

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS



**DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN LA
CUENCA DEL RÍO SANTA**

Presentado por:

Sergio Byron Morera Julca

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGÍSTER
SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS.**

Lima - Perú

2010.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POSTGRADO

MAESTRÍA DE RECURSOS HÍDRICOS

**DINÁMICA DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS
EN LA CUENCA DEL RÍO SANTA**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGÍSTER
SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS.**

Presentado por:

Sergio Byron Morera Julca.

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

**Mg.Sc. Teresa Velásquez Bejarano
Presidente**

**Mg.Sc. Eduardo Chávarri Velarde
PATROCINADOR**

**Dr. Thomas Condom
MIEMBRO**

**Mg.Sc. Ricardo Apacla Nalvarte
MIEMBRO**

**Lima - Perú
2010.**

ABSTRAT

Erosion rate and sediment flux dynamic in rivers to the central western part of the Andean range is still unknown (Perú); the present study was developed within the framework of the HiBAm project in partnership with UNALM and the exceptional Chavimochic project, which monitors middle and upper Santa basin ($\pm 10000 \text{ km}^2$), has a reliable hidrosedimentology database (1999-2009); the area surveyed as the main problem present a high concentration of suspended sediment. Understanding the dynamics of sediment production includes an analysis of space-time variability which is complex due a mountain landscape, climate and the use of water: population, hydroelectric, mining and agriculture in the course of the Santa river. After an analysis and using four methodologies it was possible to complete the missing data. Condorcerro station (479 m) which produced an average of $15.1 \times 10^6 \text{ t}$ of suspended sediment and 4.16 km^3 of liquid flow, for the total annual sediment yield $\pm 85\%$ is discharged in the rainy season, $\pm 13\%$ transition and only $\pm 2\%$ in dry season, these values change for liquid flow by 60.3%, 26.2% and 13.5% as accordingly. ENSO events do not show characteristic patterns, but it highlights the high and complex annual variability in sediment production whose main contributor is the river Tablachaca ($\pm 3130 \text{ km}^2$) with 58% and only 20.6% of the liquid flow, while the middle and upper basin of the main river channel Santa brings the rest of the two amounts. It notes the high rates of erosion in the Tablachaca basin river in $2205 \text{ t} \cdot \text{year}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ and the middle and upper Santa basin about $779 \text{ t} \cdot \text{year}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Finally, the spatial variability shows a high contrast of erosion influenced by the lithology which is directly related to mining activity, high slopes, low and seasonal vegetation cover as well climate variability especially rainfall.

Key Word: Dynamic, suspended sediment, Andes, Santa, ENOS, erosion, lithology, mining.

RESUMEN

La erosión y la dinámica de la producción de sedimentos en los Andes occidentales peruanos son aun desconocidos. El presente estudio se desarrollo dentro del marco del proyecto HiBAm en convenio con la UNALM y el proyecto especial Chavimochic que monitorea la cuenca media y alta del río Santa ($\pm 10000 \text{ km}^2$), cuya base de datos hidrosedimentologica es confiable (1999-2009); el área de estudio tiene como principal problema la elevada concentración de sedimentos en suspensión. Entender la dinámica de la producción de sedimentos conlleva un análisis de la variabilidad espacio-temporal que es compleja debido al escenario físico-climático y al uso del agua: poblacional, hidroeléctrico, minas y agricultura en el trayecto del río Santa. Después de una crítica de la base de datos se obtuvo la disponibilidad de estos, luego mediante cuatro metodologías se completó los datos faltantes. Para la estación Condorcerro (479 msnm) se produce una media anual de $15.1 \times 10^6 \text{ t}$ de sedimentos en suspensión y 4.16 km^3 de caudal líquido, del total de la producción de sedimentos anual $\pm 85\%$ es descargado en época de lluvias, $\pm 13\%$ en transición y solo $\pm 2\%$ en estiaje, dichos 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 y muy compleja variabilidad anual en la producción de sedimentos. El principal aportante de sedimentos es el río Tablachaca ($\pm 3130 \text{ km}^2$) con 58% y solo el 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 las altas tasas de erosión en la cuenca del río Tablachaca con $2205 \text{ t.año}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ y para la cuenca media y alta del cauce principal de río Santa de $779 \text{ t.año}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Finalmente la variabilidad espacial muestra un alto contraste de erosión influenciada por la litología que está directamente relacionada con la actividad minera, altas pendientes y la cobertura vegetal escasa y estacional, además de la variabilidad climática especialmente las precipitaciones.

Palabras claves: Dinámica, sedimentos suspensión, Andes, Santa, ENOS, erosión, litología, minera.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| CAPITULO I.- INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO II.- OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN | 3 |
| 2.1 Objetivo general | 3 |
| 2.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| III.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 3.1 Descripción general de la cuenca | 4 |
| 3.2 Características físicas de la cuenca hidrográfica del río Santa..... | 6 |
| 3.2.1 Hidrología e hidrografía | 6 |
| a. Glaciares..... | 6 |
| b. Tipos de escorrentía..... | 6 |
| 3.2.2 Características climáticas de la cuenca del río Santa | 7 |
| a. Temperatura..... | 7 |
| b. Precipitación y humedad relativa | 7 |
| 3.2.3. Geología | 9 |
| a. Formación y litología | 9 |
| 3.2.4 Usos del agua..... | 12 |
| a. Uso Domestico | 12 |
| b. Uso Industrial | 12 |
| c. Uso Agrícola..... | 12 |
| d. Uso Minero..... | 13 |
| 3.3 Gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Santa | 15 |
| 3.3.1 Generalidades | 15 |
| 3.3.2 Problemática del uso del recurso hídrico en la cuenca del Santa | 15 |
| 3.4 Transporte de sedimentos | 16 |
| 3.4.1 ¿Porque estudiar la dinámica de la producción de sedimentos?..... | 16 |
| a. Problemas debido a la producción de sedimentos | 16 |
| 3.4.2 Datos de sedimentos en suspensión..... | 16 |
| a. Problemas en la continuidad temporal para la toma de datos..... | 17 |
| b. Problemas en la frecuencia para la toma de datos | 17 |
| 3.4.3 Producción de sedimentos en suspensión..... | 18 |
| 3.4.4 Procesos erosivos en la cuenca..... | 18 |
| a. Remoción en masa..... | 18 |
| b. Erosión hídrica | 19 |
| 3.4.5 Transporte de sedimentos en suspensión..... | 19 |

| | | |
|---|--|----|
| 3.4.6 | Impacto antrópico sobre la producción de sedimentos..... | 19 |
| a. | Actividades humanas y la producción de sedimentos | 20 |
| b. | La naturaleza y la producción de los sedimentos | 21 |
| 3.4.7 | ¿Como actuar frente al problema de los sedimentos? | 21 |
| 3.4.8 | Cálculo de las concentraciones de sedimentos en suspensión..... | 22 |
| a. | Modelación..... | 22 |
| 3.4.9 | Relación entre el transporte y la descarga | 23 |
| 3.5 | Métodos para la toma de muestras en suspensión | 23 |
| 3.5.1 | ¿Porque realizar pruebas de turbidez?..... | 24 |
| 3.5.2 | ¿Por qué utilizar una Sonda de análisis de turbidez?..... | 24 |
| 3.5.3 | Análisis de las partículas en suspensión..... | 25 |
| CAPÍTULO IV.- MATERIALES, METODOS Y DATOS | | 26 |
| 4.1 | Zona de estudio: Cuenca del río Santa | 26 |
| 4.2 | Materiales | 28 |
| a. | Material laboratorio y campo | 28 |
| b. | Materiales de gabinete..... | 28 |
| 4.3 | Metodología..... | 29 |
| 4.3.1 | Recopilación de la información disponible | 31 |
| a. | Recopilación de la información existente del proyecto especial Chavimochic... | 31 |
| b. | Elaboración de una base de datos SIG | 32 |
| c. | Base de datos concerniente a los parámetros físicos de la cuenca | 32 |
| 4.3.2 | Reconocimiento de campo y muestreo de puntos críticos..... | 34 |
| a. | Misiones a la cuenca del río Santa y Tablachaca | 34 |
| b. | Método para procesar las muestras recolectadas, laboratorio HiBAm –UNALM | 34 |
| 4.3.3 | Análisis de la dinámica de los caudales líquidos y sólidos | 35 |
| a. | Procesamiento de los datos en Hydraccess | 35 |
| b. | Análisis espacio-temporal de los sedimentos en suspensión..... | 35 |
| 4.3.4 | Análisis de la relación entre caudal sólido-turbidez y caudal sólido-líquido | 36 |
| 4.3.4.1. | Prueba de turbidez con la Sonda Ysi 6600 V2-4..... | 36 |
| a. | Cálculo del caudal líquido a partir de las alturas de la sonda YSI | 36 |
| 4.3.4.2 | Modelo de sedimentos en suspensión para la cuenca..... | 37 |
| a. | Selección del periodo de análisis..... | 37 |
| - | Nash-Sutcliffe..... | 37 |
| - | Bias o desviación relativa de los caudales sólidos | 37 |
| 4.3.5 | Medios para determinar las principales fuentes de sedimentos..... | 38 |
| 4.3.5.1 | Análisis de los filtros de sedimentos | 38 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4.3.6 | Modelar dos cuencas pequeñas, una con impacto antrópico y la naturaleza..... | 38 |
| 4.3.7 | Conclusiones de la dinámica de la producción de sedimentos en el río Santa | 39 |
| 4.4 | Datos hidrológicos..... | 40 |
| - | Recopilación de la información..... | 40 |
| - | Fuente de los datos | 40 |
| - | Lecturas de caudales..... | 40 |
| d. | Frecuencia de la toma de datos..... | 40 |
| 4.4.1 | Tratamiento de datos hidrológicos | 41 |
| 4.4.1.1 | Discreción de los datos..... | 41 |
| a. | Serie temporal de datos | 41 |
| b. | Resolución temporal de los datos | 42 |
| 4.4.1.2 | Calidad de los datos..... | 44 |
| a. | Variación entre los caudales de la mañana y la tarde de la serie completa | 45 |
| 4.4.1.3 | Obtención de las series completas de caudales líquidos..... | 47 |
| a. | Completando datos mediante la suma y diferencia entre estaciones | 47 |
| b. | Completando datos mediante interpolación de datos | 48 |
| c. | Llenado mediante correlación lineal simple utilizando Cormul..... | 49 |
| 4.5 | Datos de caudales sólidos en suspensión disponibles de Chavimochic | 50 |
| a. | Toma de muestras..... | 50 |
| b. | Determinación de concentraciones en el laboratorio Chavimochic | 50 |
| 4.5.1 | Tratamiento de los datos de sólidos en suspensión | 50 |
| 4.5.1.1 | Cálculo de los caudales sólidos anuales para las estaciones de estudio | 52 |
| - | Metodología 1 (Cálculo directo con llenado de datos faltantes) | 52 |
| - | Metodología 2 (Modelo anual)..... | 52 |
| - | Metodología 3 (Modelo Global)..... | 53 |
| - | Metodología 4 (Cálculo directo e interpolando datos vacíos)..... | 53 |
| 4.6 | Desarrollo de la metodología 3 (Modelo Global)..... | 53 |
| 4.6.1 | Modelo hidrosedimentológico entre caudales líquidos y sólidos global | 53 |
| a. | Estación Condorcerro | 53 |
| - | Análisis de la dispersión de puntos | 54 |
| b. | Estación Tablachaca | 55 |
| c. | Estación Santa | 56 |
| 5.6.2 | Cálculo de los caudales sólidos diarios aplicando la metodología 3 | 57 |
| a. | Calibración del modelo de sedimentos en suspensión..... | 57 |
| 4.7 | Desarrollo de la metodología 2..... | 59 |
| 4.7.1 | Modelo hidrosedimentológico entre caudales líquidos y sólidos anual | 59 |
| V.- | RESULTADOS Y DISCUSIONES | 62 |

| | | |
|---|---|----|
| 5.1 | Disponibilidad de los caudales líquidos y sólidos en la base de datos | 62 |
| 5.1.1 | Variación entre los caudales de la mañana y la tarde de la serie más completa.. | 63 |
| 5.2 | Estimación de caudales líquidos..... | 64 |
| 5.3 | Análisis ENSO de los caudales líquidos | 66 |
| a. | Resultados de la calibración de los modelos de sedimentos en suspensión | 67 |
| 5.4 | Estimación de la carga en suspensión instantánea y anual | 67 |
| 5.4.1 | Cálculo de los caudales sólidos anuales | 68 |
| a. | Análisis de la producción de sedimentos en eventos ENSO | 71 |
| 5.4.2 | Proyección de los caudales sólidos en suspensión para la estación Condorcero | 71 |
| 5.5 | Análisis de la alta variabilidad en los caudales sólidos en suspensión..... | 73 |
| 5.5.1 | Prueba de la función de probabilidad de distribución (PDF) | 73 |
| a. | PDF de los caudales líquidos..... | 73 |
| b. | PDF de los caudales sólidos | 73 |
| 5.5.2 | Análisis de las tendencias de los modelos anuales | 74 |
| 5.6 | Análisis de la relación caudal sólido y turbidez con alta resolución temporal.... | 75 |
| a. | Análisis de eventos en los caudales..... | 75 |
| b. | Análisis de la coherencia de los datos de turbiedad | 76 |
| c. | Relación entre la turbidez y la concentración durante 7 días de monitoreo | 77 |
| 5.7 | Caudales sólidos obtenidos en las misiones | 78 |
| a. | Monitoreo en la cuenca alta y media del río Santa..... | 78 |
| b. | Monitoreo en la cuenca alta de la cuenca del rio Tablachaca | 81 |
| 5.8 | Resultados espaciales de las misiones realizadas en la cuenca del río Santa | 83 |
| 5.8.1 | Alcances de la variabilidad espacial de la producción de sedimentos..... | 85 |
| a. | Panorama de la variabilidad espacial durante las misiones..... | 85 |
| b. | Análisis de los filtros de sedimentos | 87 |
| 5.8.2 | Variabilidad espacial interanual | 88 |
| 5.9 | Resultados de la producción de sedimentos | 89 |
| CAPÍTULO VI.- CONCLUSIONES | | 91 |
| CAPÍTULO VII.- RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS | | 93 |
| VIII.- BIBLIOGRAFÍA | | 94 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Principales subcuencas en la cuenca del río Santa (SRTM, 2009) | 5 |
| Figura 2. Precipitación promedio 1998-2009 en la cuenca del río Santa (TRMM, 2010) 8 | 8 |
| Figura 3. Formación de suelo y litología en la cuenca del río Santa..... | 11 |
| Figura 4. Distribución de la actividad minera en la cuenca del Santa..... | 14 |
| Figura 5. Ubicación de la cuenca del río Santa; las cuencas vecinas de Chao..... | 27 |
| Figura 6. Metodología de investigación a fin de caracterizar la dinámica | 29 |
| Figura 7. Ubicación de las estaciones hidrosedimentológicas de estudio | 30 |
| Chavimochic | 32 |
| Figura 8. Modelo digital de elevación (SRTM 3); delimitación del área que compromete la estación Condorcerro (9969 km ²), Tablachaca (3131 km ²) y Santa (6815 km ²) | 33 |
| Figura 9. Lecturas incompletas de caudales líquidos estación Condorcerro..... | 41 |
| Figura 10. Lecturas incompletas de caudales líquidos estación Tablachaca..... | 42 |
| Figura 11. Lecturas incompletas de caudales líquidos estación Santa | 42 |
| Figura 12. Porcentaje de caudales disponibles para la estación Condorcerro | 43 |
| Figura 13. Porcentaje de caudales disponibles para la estación Tablachaca..... | 43 |
| Figura 14. Porcentaje de caudales disponibles para la estación Santa | 43 |
| Figura 15. Panorama de los caudales para la estación Condorcerro | 44 |
| Figura 16. Panorama de los caudales para la estación Tablachaca | 44 |
| Figura 17. Panorama de los caudales para la estación Santa..... | 45 |
| Figura 18. Variación entre caudales de la mañana y tarde estación Condorcerro..... | 46 |
| Figura 19. Frecuencia con la que se repite los caudales para la estación Condorcerro.... | 46 |
| Figura 20. Variación entre caudales de la mañana y tarde estación Tablachaca..... | 46 |
| Figura 21. Variación entre caudales de la mañana y tarde estación Santa | 47 |
| Figura 22. Relación entre caudales diarios entre la estación la Balsa y Santa | 49 |
| Figura 23. Datos de concentraciones vacías y repetidas en la estación Condorcerro | 51 |
| Figura 24. Datos de concentraciones vacías y repetidas en la estación Tablachaca | 51 |
| Figura 25. Datos de concentraciones vacías y repetidas en la estación Santa..... | 51 |
| Figura 26. Relación entre el caudal líquido y sólido en la estación Condorcerro | 54 |
| Figura 27. Caudales sólidos clasificados por época de lluvias y estiaje | 55 |
| Figura 28. Modelo hidrosedimentológico interanual para la estación de Condorcerro.... | 55 |
| Figura 29. Modelo hidrosedimentológico para la estación Tablachaca | 56 |
| Figura 30. Relación entre el caudal líquido y sólido en la estación Santa | 57 |
| Figura 31. Cálculo del caudal sólido instantáneo estación Condorcerro (2007-2009)..... | 58 |
| Figura 32. Cálculo del caudal sólido instantáneo estación Tablachaca (2007-2009)..... | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 33. Cálculo del caudal sólido instantáneo estación Santa (2007-2009)..... | 59 |
| Figura 34. Modelo de correlación lineal simple entre caudales líquidos y sólidos..... | 60 |
| Figura 35. Análisis de toda la base de datos al paso mensual 1999-2010..... | 61 |
| Figura 36. Cálculo del volumen anual de agua para las estaciones | 64 |
| Figura 37. Caracterización de flujos líquidos para la época de lluvia (Enero-Abril)..... | 65 |
| Figura 38. Caudales diarios/anuales en la estación Condorcerro | 66 |
| Figura 39. Cálculo de caudales sólidos anuales con las cuatro metodologías | 69 |
| Figura 40. Cálculo de la producción de sedimentos en suspensión anual..... | 72 |
| Figura 41a. PDF de los caudales líquidos en estaciones | 73 |
| Figura 41b. PDF de los caudales líquidos específico en estaciones..... | 73 |
| Figura 42a. PDF de las concentraciones en estaciones | 74 |
| Figura 42b. relación [C] vs Q..... | 74 |
| Figura 43. Tendencias anuales del caudal sólido en suspensión..... | 74 |
| Figura 44. Caudales instantáneos tomados por la Sonda Ysi..... | 75 |
| Figura 45. Caracterización de los caudales sólidos y líquidos instantáneos | 76 |
| Figura 46: Crónica de turbiedad..... | 76 |
| Figura 47: zoom sobre las anomalías de turbiedad de la Sonda Ysi | 77 |
| Figura 48: Análisis con alta resolución temporal de las crónicas de caudal y de turbiedad77 | |
| Figura 49. Modelo obtenido durante una semana de monitoreo | 78 |
| Figura 50-a. Muestreo de los principales afluentes de sedimentos en suspensión..... | 79 |
| Figura 50-b . Muestreo de los principales afluentes de sedimentos en suspensión..... | 80 |
| Figura 51-a. Muestreo de los principales afluentes de sedimentos en suspensión..... | 81 |
| Figura 51-b. Muestreo de los principales afluentes de sedimentos en suspensión..... | 82 |
| Figura 52. Puntos de muestreo en el cauce principal del río Santa | 84 |
| Figura 53. Puntos de muestreo del río Tablachaca desde su nacimiento..... | 84 |
| Figura 54. Contraste de la erosión en la cuenca media y alta del río Santa y Tablachaca | 86 |
| Figura 57. Aporte media anual en porcentaje de sólidos en suspensión | 89 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Litología de la cuenca del río Santa | 9 |
| Tabla 2. Panorama de las misiones realizadas a la cuenca del río Santa..... | 30 |
| Tabla 3. Data histórica de caudales líquidos, sólidos y turbidez disponibles..... | 32 |
| Tabla 4. Objetivos de las misiones realizadas en la cuenca del río Santa | 34 |
| Tabla 5. Disponibilidad de los caudales líquidos y sólidos en la base de datos..... | 62 |
| Tabla 6. Porcentaje de variación de los caudales de la mañana y tarde (2007-2008) | 63 |
| Tabla 7. Volumen en porcentaje de aporte de la cuenca del Tablachaca | 65 |
| Tabla 8. Metodologías planteadas para el cálculo anual de sólidos en suspensión..... | 67 |
| Tabla 9. Resultados de calibración según Nash y Bias | 68 |
| Tabla 10. Cálculo de caudales sólidos en suspensión para las estaciones..... | 71 |
| Tabla 11. Objetivos alcanzados en las misiones realizadas durante el presente estudio.. | 83 |
| Tabla 12. Panorama de la producción de sedimentos de la cuenca..... | 90 |
| | |
| ANEXOS | 99 |

CAPÍTULO I.-INTRODUCCIÓN

El estudio de la producción de sedimentos en suspensión en América del Sur-Océano Pacífico es poco desarrollado, es así que el proyecto HiBAm viene haciendo esfuerzos denodados para ampliar el conocimiento en los eventos que ocurren en nuestros andes; Guyot et *al.*, (1996) cuantificaron la producción de sedimentos en los Andes orientales de Bolivia con un promedio de 32 000 t.Km⁻².año, el río andino de Carare en Colombia 2200 t.Km⁻².año⁻¹ (Restrepo et *al.*, 2006), Pepin et *al.* (en revisión) un máximo en los andes Chilenos en el río Maipo 1780 t.Km⁻².año⁻¹ y Laraque et *al.*, (2004) el río Napo en los Andes de Ecuador con 900 t.Km⁻².año⁻¹; Las altas tasas de erosión en los Andes bolivianos pueden ser comparadas con las de 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 desarrollo dentro del marco del proyecto HiBAm, mediante un convenio múltiple entre la Universidad Nacional Agraria La Molina y el proyecto especial Chavimochic que monitorea las aguas del río Santa desde las estaciones hidrosedimentológicas de Condorcerro, Tablachaca y Santa, se posee una base de datos privilegiada con dos muestras por día (1999-2009); La cuenca del río Santa ubicada al nor-oeste del Perú se extiende altitudinalmente desde el nivel del mar, hasta la línea de cumbres de la Cordillera Negra y Cordillera Blanca; esta última es la más extensa cadena montañosa tropical, con una glaciación de $\pm 600\text{Km}^2$ y cuyo punto más alto corresponde al nevado Huascarán a 6768 msnm (Georges, 2004, 2009). Johnson et *al.*, (1998) agregan que las aguas del río Santa son vitales para la población de las montañas y tierras costeras, abasteciendo el uso domestico, campos agrícolas, 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, estos proyectos en su recorrido abastecen a cientos de hectáreas cuya

principal producción es la agroexportación, centrales hidroeléctricas, además esta es la fuente principal de agua potable para la ciudad de Trujillo, Chimbote, Ancash entre otras.

Dai et *al.* (2009) afirman que la actividad humana se ha convertido en un factor determinante en la producción de sedimentos fluviales, la cuenca del río Santa ostenta evidencias de la contaminación de sus aguas, producto de actividades industriales, desechos de residuos sólidos, malas prácticas agrícolas (MINEM, 1998); la intensa actividad minera, desarrollada con polimetálicos, oro, carbón, cobre, plata, tungsteno y algunos no metálicos, han dejado un pasivo ambiental muy disperso, esto varía con el modo de explotación pequeña, mediana y a gran escala; además dicha cuenca se caracteriza por su topografía agreste en la cuenca media y alta con pendientes que sobrepasan el 100%, cobertura vegetal estacional y escasa, con una litología que presenta suelos poco estables ello sumado a las elevadas precipitaciones desde 100-1150 mm anuales para la zona de estudio (1998-2009).

Siendo el principal problema del río Santa las altas concentraciones de sedimentos en suspensión se genera la necesidad de predecir que sucederá en este tipo de sistemas en el futuro, 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.

CAPÍTULO II.- OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer la dinámica de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilación y análisis de la calidad de los datos de caudal líquido y concentraciones de sedimentos.
- Completar y extender los datos hidrosedimentológicos en la cuenca del río Santa.
- Cuantificar y analizar la producción de sedimentos y los flujos de agua en el ámbito de la cuenca identificando las fuentes.
- Efecto del ENSO en la dinámica de la producción de sedimentos.

III.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Descripción general de la cuenca

Ubicada al norte-oeste del Perú, con un área de 12 200 km², la cuenca del río Santa es la segunda cuenca más grande de la vertiente del Pacífico en Perú, comprende a las provincias de Recuay, Huaraz, Carhuaz, Yungay, Huaylas, Corongo y Pallasca del Departamento de Ancash, y a las provincias de Santiago de Chuco y Virú del Departamento de La Libertad. El río Santa se caracteriza por su recorrido de Sur a Norte entre las dos cordilleras, por la margen derecha la Cordillera Blanca con la presencia de glaciares, y por la margen izquierda la Cordillera Negra árida y semi árida (Figura 1); A unos 200 km desde su origen aguas abajo, después de haber cortado la Cordillera en el Cañón del Pato, toma la dirección Oeste hasta su desembocadura en el Océano Pacífico (ATA, INADE; 2002).

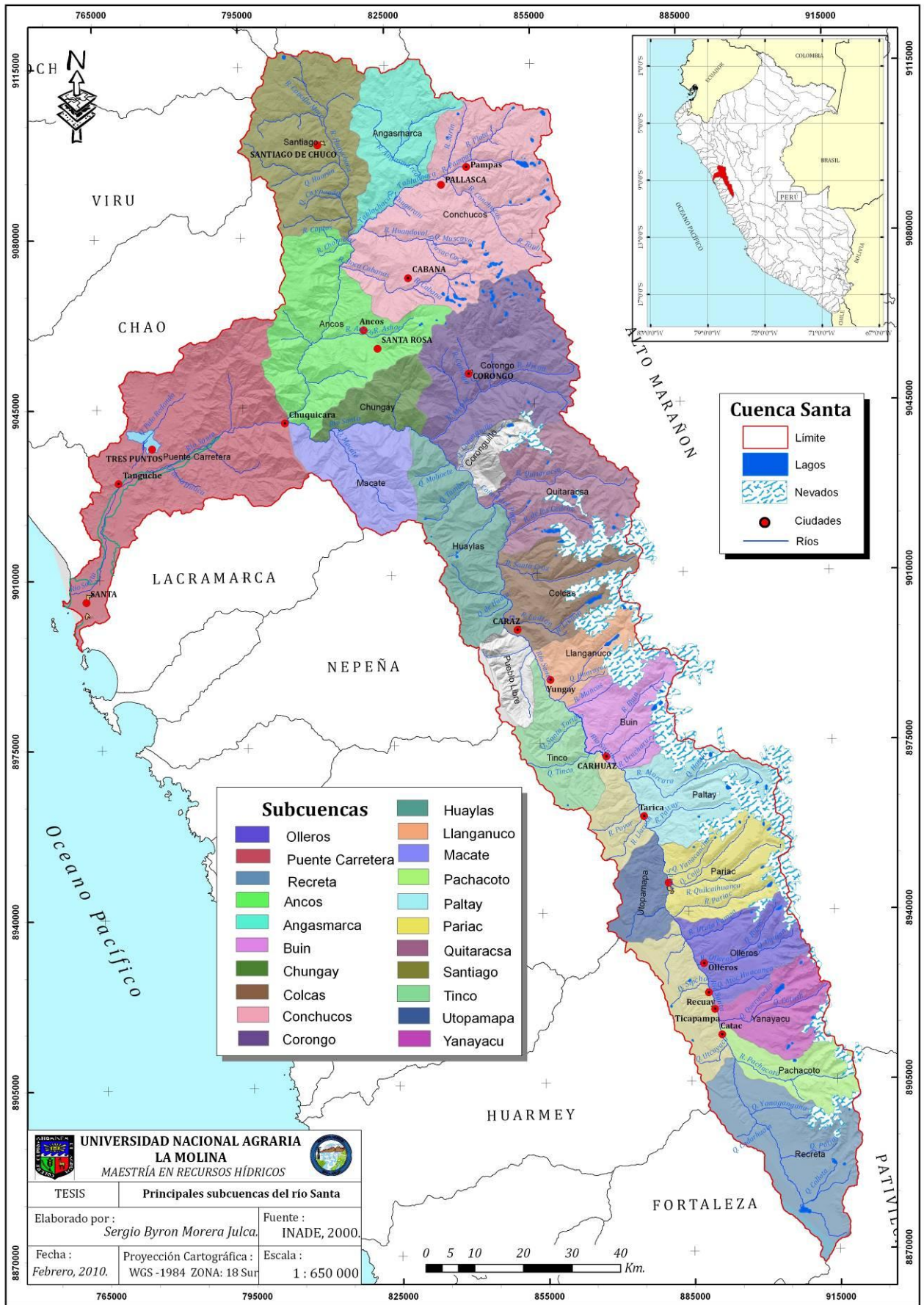


Figura 1. Principales subcuencas en la cuenca del río Santa (SRTM, 2009).

3.2 Características físicas de la cuenca hidrográfica del río Santa

3.2.1 Hidrología e hidrografía

INRENA, 1996. caracteriza al río Santa, con una longitud aproximada de 316 km. desde su nacimiento hasta su desembocadura, presentando una pendiente promedio de 1.4% entre la desembocadura de las quebradas Cedro y Quitarcasa; el tramo denominada "Cañón del Pato" tiene una longitud de 13 km, en donde alcanzan una pendiente del 4%. Desde sus nacientes, gran parte de su recorrido se verifica en un valle de origen tectónico (fosa tectónica) encontrándose encajonado por la Cordillera Negra y Blanca.

a. Glaciares

Los glaciares tropicales en el mundo cubren una superficie de 2 500 km², el mayor porcentaje de glaciares tropicales en el mundo se halla en la cordillera de los Andes 71% está en el Perú (Figura 2), 20% Bolivia, 4% en Ecuador y otro 4% en Colombia (SENAMHI, 2005). Los glaciares constituyen sólo uno de los componentes del aporte hidrológico pero son importantes reservas de agua durante los periodos secos, especialmente en las regiones tropicales que están dominados por precipitación altamente estacional (Barry et al., 2000; SENAMHI, 2005). Según Mark et al. (2006) es probable que disminuyan estas reservas si los glaciares continúan derritiéndose y Maurer (2009) dice que un cambio de la superficie glaciar tendría un impacto decisivo en la escorrentía de las cuencas de la Cordillera Blanca.

b. Tipos de escorrentía

Mark et al., 2003. describen que la escorrentía superficial de estas montañas se origina de las precipitaciones que ocurren en su cuenca alta y además, de los deshielos de los nevados en la Cordillera Blanca. La escorrentía durante la estación seca (mayo a septiembre), proviene de la fusión Glaciar hasta en un 100% para cuencas glaciares; y Baraer et al, (2009) con su estudio demuestran que algunas cuencas son alimentadas de 18-74% por el agua subterránea; por ello aseguran que las contribuciones de las aguas subterráneas glaciares, son un componente clave para el sistema hidrogeológico local, y de toda la Cordillera Blanca. El escurrimiento superficial del río Santa contribuye a mantener una considerable descarga aun en época de estiaje, las características antes mencionadas hacen del río Santa uno de los más caudalosos de la Vertiente del Pacífico y en magnitud de cuenca sólo es superado por la cuenca del río Chira (INRENA, 1996).

3.2.2 Características climáticas de la cuenca del río Santa

Según (Condom et *al.*, en revisión; Maurer, 2009; Kaser, et *al.*, 1990; etc) el clima tiene una estacionalidad de menor importancia en la temperatura anual del aire, pero remarcable estacionalidad en el contenido de humedad atmosférica. Por lo tanto, el clima puede ser dividido en una temporada base húmeda (enero-marzo) y una estación base seca (junio-agosto); los meses de transición de húmedo a seco son (abril, mayo) y las condiciones de seco a húmedo (septiembre-diciembre).

a. Temperatura

Vuille et *al.*, 2008. señalan que la temperatura de los Andes ha aumentado en aproximadamente 0.1°C/década, sólo dos de los últimos 20 años han sido inferiores al promedio de 1961-1990. La temperatura media anual e nivel de la cuenca varía de -6 °C a 33 °C, registradas en las estaciones de Lampas Bajo e Hidroeléctrica respectivamente; la variación anual de la temperatura del aire es mucho menor que la variación diurna, en general la temperatura disminuye con la altitud (INADE, 2001; Kaser, et *al.*,1990).

b. Precipitación y humedad relativa

Kaser et *al.*, 1990. acotan que la temporada húmeda en la Cordillera Blanca se debe a la oscilación de la zona de convergencia intertropical (ITCZ), que trae masas de aire húmedo de la cuenca húmeda amazónica, 70-80% de la precipitación anual. Durante la estación seca, la ITCZ esta muy al norte y los vientos alisios causan condiciones secas. Según INADE (2001) la precipitación varía de 0 a 1017 mm.y⁻¹ promedio anual, más del 80% de las precipitaciones caen entre octubre a mayo, y los meses de junio a septiembre se conoce como la estación seca de invierno austral; En general las precipitaciones aumentan con la altitud.

Kaser et *al.*, 1990. nos comentan que los picos más altos de la Cordillera Blanca se sitúan al oeste de la cuenca y en consecuencia el drenaje de sus aguas van al río Santa; sobretodo porque las masas de aire húmedo del sureste de la superposición de la cuenca causan abundantes precipitaciones (Figura 2). La lluvia, que cae en el este de las cumbres principales desemboca en el lado occidental.

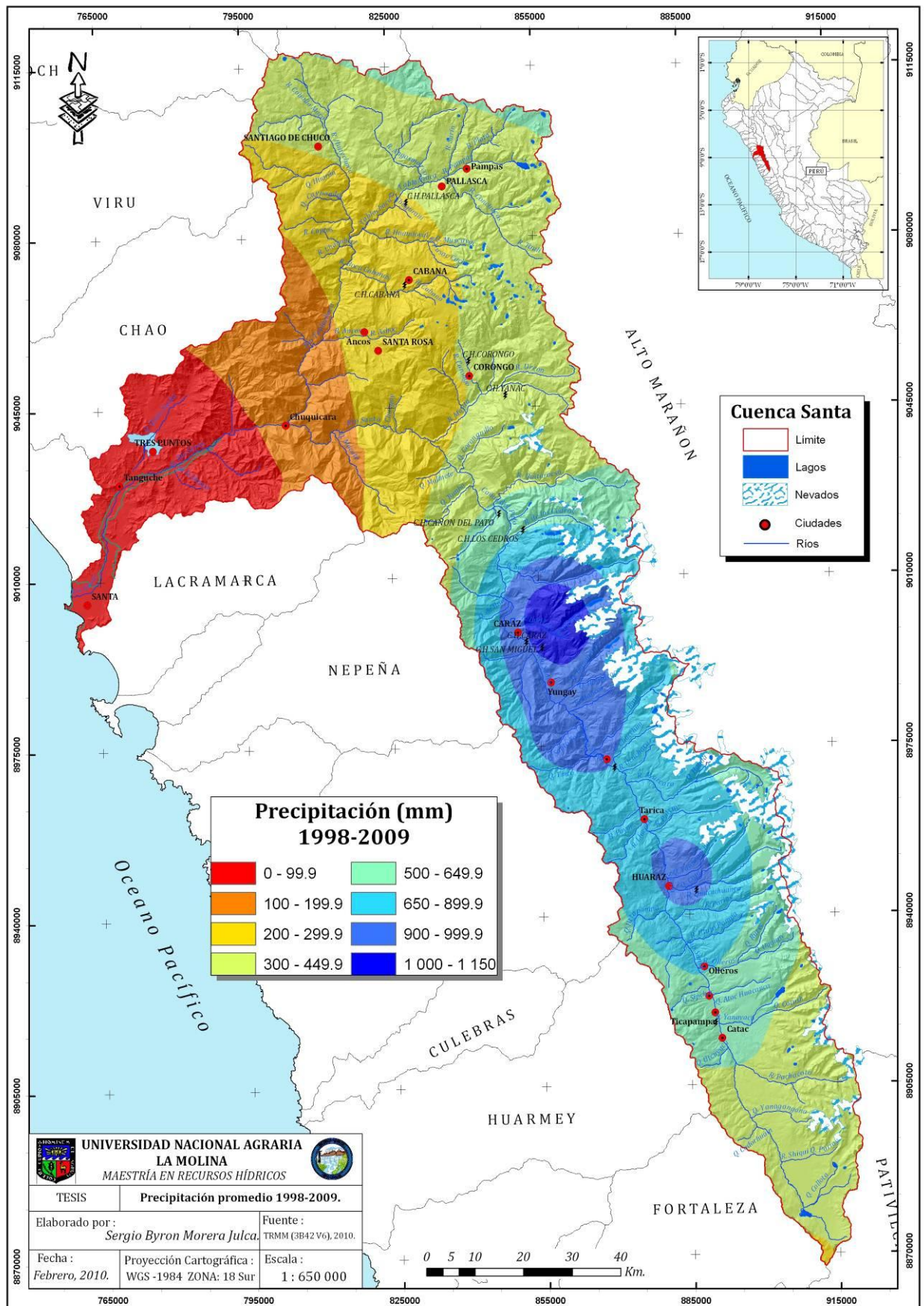


Figura 2. Precipitación promedio 1998-2009 en la cuenca del río Santa (TRMM, 2010).

3.2.3. Geología

INRENA, 1996. presenta la geología de la cuenca como bastante compleja, las rocas que presentan son sedimentarias, ígneas (intrusivas y extrusivas) y metamórficas. Las rocas sedimentarias están representadas principalmente por calizas, areniscas y conglomerados; Entre las rocas ígneas e intrusivas predominan las de composición granitoide y forman parte de intrusiones batoleíticas además existen intrusiones menores de composición aplítica, pegmática, entre otras. Las rocas ígneas extrusivas están representadas fundamentalmente por tufos, derrames y aglomerados de composición andesítica, riolítica, dasítica y material piroplástico en general. Las rocas metamórficas están conformadas principalmente por cuarcita y pizarra (Figura 3 y Tabla 1).

a. Formación y litología

Tabla 1. Litología de la cuenca del río Santa.

| <i>Formación</i> | <i>Litología</i> |
|--|---|
| Depósitos Eólicos Q-e | Arenas de grano fino que cubren gran parte de las áreas aluviales y formaciones rocosas más antiguas. Constituyen dunas, médano, depósitos de laderas. Compuestos por gránulos de cuarzo 60-80%, restos de feldespatos 0-30% y Magnetita y otros 0-10% (Figura 3). |
| Depósitos Coluvial Q-col | Arena, arcilla, grava, fragmentos rocosos angulosos y heterométricos no consolidados. Son depósitos de transporte relativamente corto y no acusan estratificación definida (Figura 3). |
| Depósitos Aluviales Q-al | Arena, arcilla, grava, y conglomerado semiconsolidados, generalmente horizontales. De acuerdo a sus diferencias de nivel, indican antiguas etapas del valle (Figura 3). |
| Depósitos Morrénicos Qm , Fluvio Glaciares Q-fg, Glaciares Q-g | Están conformados por acumulaciones morrénicas y rellenos de arena, arcilla y grava. Los fragmentos rocosos son heterométricos, poco seleccionados y de formas angulosas y sub-redondeadas (Figura 3). |
| Formación Yungay Ts-yu | Consiste de tufos dacíticos con abundantes cristales de cuarzo y biotita en una Matriz de feldespatos, conteniendo fragmentos angulosos de las rocas circundantes (Figura 3). |
| Volcánico Calipuy Kti-vca (andesitas). | Extensa y variada formación volcánica; piroclastos, derrames y brechas de composición dacítica, riolítica y andesítica, de colores morados, verdosos y amarillentos. Constituidos por plagioclasa (variedad andesita con mayor proporción) 70-80%, hornblenda 20-25%, magnetita y otros 10% (Figura 3). |

| | |
|---|---|
| Formación Huaylas Kti-hu | Está conformada por conglomerados y areniscas rojizos verdosas; los elementos conglomerádicos están constituidos por fragmentos de rocas volcánicas, calcáreas y cuarcíticas (Figura 3). |
| Formación Jumasha- Celendín Ks-jc | Está integrada por calizas, margas y dolomitas de color gris claro y conglomerado intraformacional (Figura 3). |
| Formación Pariahuanca Ki-p | Consiste de calizas grises, margas de color gris oscuro y lutitas negras calcáreas (Figura 3). |
| Grupo Goyllarisquizga Ki-g | Comprende las formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat. La Formación Farrat está constituida por areniscas y cuarcitas con intercalaciones de lutitas (Figura 3). |
| Formación Santa- Ki- sc (Calizas-Margas). | La Formación Santa está integrada por calcita, aragonita, carbonatos de calcio, magnesio, arcillas y restos orgánicos (Figura 3). |
| Formación Carhuaz (Lutitas, lutitas-pizarras y lutitas-arenosas). | Formación Carhuaz comprende areniscas y cuarcitas abundantes con intercalaciones de lutitas. Arcilla 80-95% (diferente naturaleza), Arenas (feldespático-cuarzosas) entre 0-20%, restos bituminos y/o carbonos 0-5% (Figura 3). |
| Formación Chimú Ki-chi (Areniscas- cuarsíticas) | La Formación Chimú consiste de areniscas y cuarcitas con intercalaciones lutáceas y mantos de carbón. Cuarzo > 90%, feldespatos ± 5%, coloide silicoso ± 5% (Figura 3). |
| Grupo Casma Jsk-Ca, Formación Junco Jsk-ju, La Zorra Jsk-z | Comprende una secuencia de rocas volcánicas con intercalaciones de sedimentos. Las rocas volcánicas están representadas principalmente por derrames y piroclásticos de composición andesítica. Las capas sedimentarias intercaladas por lutitas de color pardo. Arcillas 80-90% (diferente naturaleza), Arenas (feldespatos y cuarzos) entre 0-20% y restos bituricos y/o carbonosos 0-5% (Figura 3). |
| Formación Chicama Js-chic | Está constituida por una secuencia de lutitas laminadas de color gris oscuro, que representa el mayor porcentaje de la formación, y de arenisca finas de color gris, con bancos de cuarcitas y areniscas claras (Figura 3). |
| Batolito Andino Kt-i, Granodiorita-Tonalita T-gt, Tonalita T-t | Constituido principalmente de intrusiones plutónicas-granito, granodiorita, diorita, tonalita, etc. Rocas intrusivas menores: andesitas, dacita, monzonita, pérfido cuarcífero. Componentes plagioclasa 42%, ortoclasa 12%, biotita 9% hornblenda 4% y cuarzo 20% (Figura 3). |
| Batolito de la Cordillera Blanca T-i | Principalmente está formado por rocas intrusivas plutónica de composición granodiorítica (Figura 3). |

Fuente: (ONERN, 1972; Sutton, 1943).

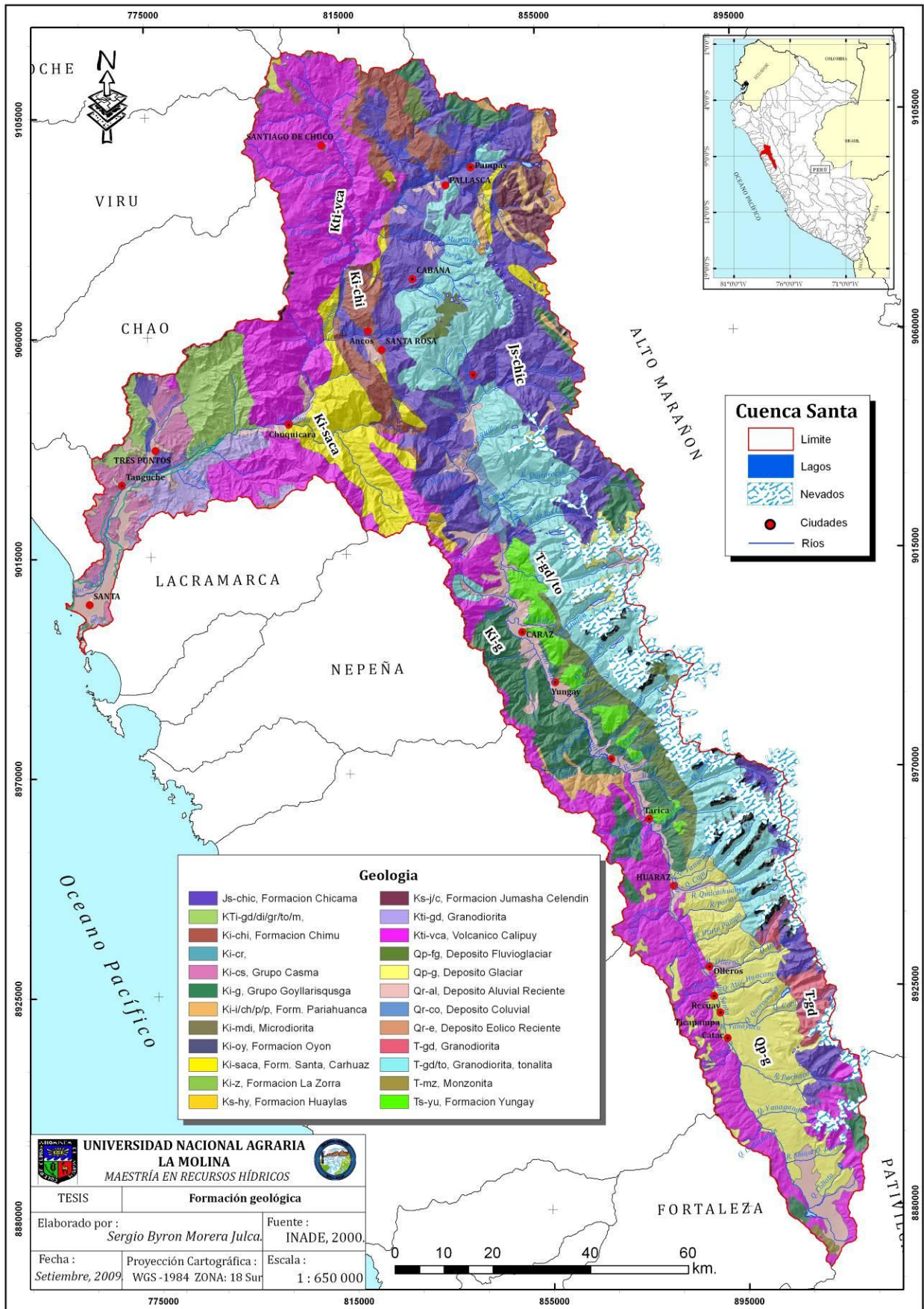


Figura 3. Formación de suelo y litología en la cuenca del río Santa.

3.2.4 Usos del agua

a. Uso Domestico

Según INRENA (1996) la cuenca del río Santa cuenta con una acumulación de 515,488 habitantes que utilizan con fines domésticos 25'266,000 m³/año (esta agua proviene de los afluentes del río Santa). La población servida, que representa el 45% de la población total, utiliza 22'700,000 m³/año y la no servida que representa el 55% utiliza únicamente 3'066,000 m³/año; para la estación Condorcerro el caudal promedio en el periodo 1977-2008 es 4 147'105,979 m³/año (Figura 27).

En la cuenca del río Santa las condiciones favorables que ofrecen sus recursos naturales son esenciales para el desarrollo de la intensa actividad humana en el Callejón de Huaylas, el valle del río Santa y el área costera de Chimbote, así como los valles de Chao, Virú, Moche, Lacramarca, Nepeña y Casma (INRENA, 1996; Juen et *al.*, 2007).

b. Uso Industrial

INRENA, 1996. señala que las industrias en la cuenca del río Santa están localizadas mayormente en la zona costera y su incidencia en los cambios de las características del río Santa no es significativa. La mayoría de las industrias son de tipo pesquero, elaboran harina de pescado y conservas, principalmente. Existe también una gran industria metalúrgica denominada SIDERPERU que si bien es cierto no contamina directamente al río, lo hace indirectamente contaminado el aire con gases tóxicos y polvos.

c. Uso Agrícola

INRENA, 1996. indica que los campos agrícolas están distribuidos a lo largo del río Santa, siendo la zona más explotada la correspondiente al valle costero; las partes alta y media se riegan principalmente con el agua proveniente de las quebradas y tributarios y en menor grado con el de los manantiales. Cultivándose bajo riego un total de 47 807 hectáreas que utilizan un volumen medio anual de agua de 617.15 millones de m³; de dicha superficie 6 516 ha ubicadas en el valle costero utilizan 338.98 millones de m³ y 41 291 has ubicadas a lo largo del denominado Callejón de Huaylas utilizan 278.17 millones de m³.

d. Uso Minero

Una parte importante de la actividad minera se encuentra representada por la llamada pequeña y micro minería de polimetálicos (Figura 4); esto es minas y plantas que extraen y procesan decenas de toneladas por día de 100 a 200 ton/día. (MINEM, 1998).

Para la cuenca del río Santa no existen estudios detallados sobre la producción de sedimentos por acción de la minería; pero Guy (1977) en su estudio denominado Información de Sedimentos para una Declaración de Impacto Ambiental en una Mina de Carbón de Superficie; realizado al oeste de los Estados Unidos, muestra en sus cálculos la media anual de producción de sedimentos en seis ríos de corrientes no permanentes, en un rango de 130 hasta 240 m³/km²; El peso de la concentración de sedimentos en la media anual de descarga de agua osciló entre 20 000 a 37 000 g/m³. El promedio de erosión bruta anual se calculo de 8,5 t/ha en las cuencas aguas arriba de las minas y 5,8 t/ha en la áreas mineras recuperadas.

Si bien es cierto la cuenca del río Santa es considerado como uno de los pocos ríos de régimen permanente que desembocan en el océano pacífico, esta tiene una subcuenca Tablachaca que tiene como principal problema las elevadas cargas de sólidos en suspensión.

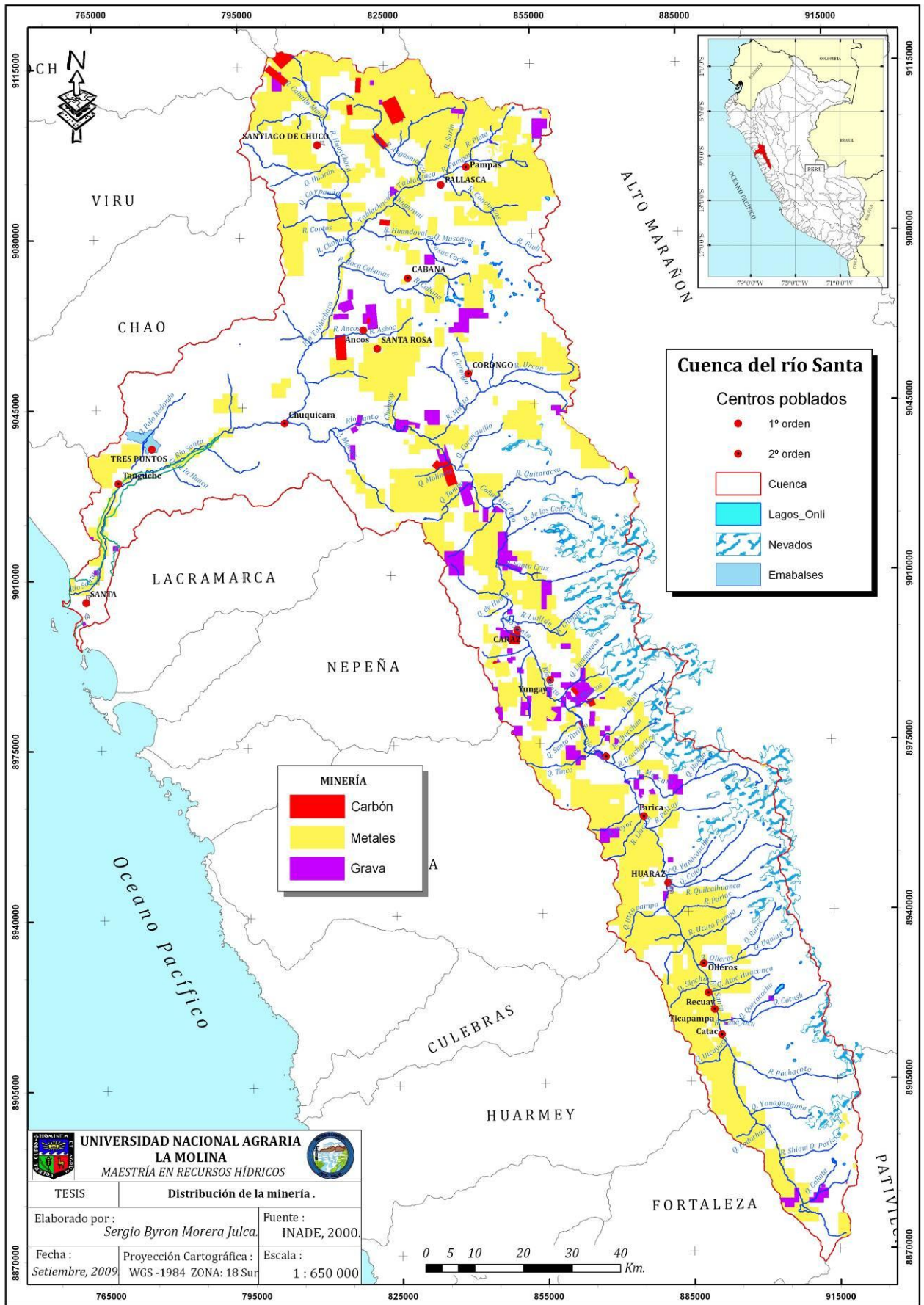


Figura 4. Distribución de la actividad minera en la cuenca del Santa.

3.3 Gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca del río Santa

3.3.1 Generalidades

Dominic et *al.*, 2008. comentan que hay desafíos en cuantificar la disponibilidad de los recursos hídricos que es una condición necesaria para poder realizar una gestión integrada de los recursos hídricos; Daniel et *al.* (2007) subrayan que el manejo de los recursos hídricos en la cuenca del pacífico necesita información en relación a la situación y las tendencias regionales en la calidad del agua, ello es de vital importancia considerando la dinámica que se desarrolla alrededor del recurso hídrico en la cuenca del río Santa.

3.3.2 Problemática del uso del recurso hídrico en la cuenca del Santa

Según Delgado (2008) la gestión del recurso hídrico en la cuenca del río Santa presenta una serie de problemas al no contar con condiciones técnicas y administrativas adecuadas, así como estrategias que permitan la eficaz coordinación con las instituciones públicas, organizaciones de usuarios de agua y empresas privadas, para lograr efectos de preservación, conservación y uso racional de los recursos hídricos.

- Contaminación por vertimiento de residuos, sólidos, líquidos y gaseosos que contaminan las aguas de la cuenca.
- Deficiente organización y gestión de las Organizaciones de Regantes.
- Limitada participación de los usuarios en la gestión del agua.
- Debilidad de las Juntas Directivas de regantes.
- Pérdida de suelos por mal sistema de riego.
- Pérdida del agua por mala distribución.
- Mala infraestructura de riego.
- Ámbito demasiado extenso.
- Conflictos entre regantes.

3.4 Transporte de sedimentos

3.4.1 ¿Porque estudiar la dinámica de la producción de sedimentos?

Farnsworth et *al.*, 2003. comentan que durante los últimos 50 años los ríos han descargado alrededor de 18×10^9 t/año de sedimentos a los océanos del mundo, los ríos de montaña con las cuencas pequeñas desempeñan un papel clave. Por su parte Walling et *al.* (2003) dicen, ahora con el creciente interés en el cambio ambiental mundial, es importante saber el grado en que este índice está cambiando el funcionamiento del sistema de la Tierra. La evidencia de los registros de sedimentos a largo plazo indican que los flujos de sedimentos del río son sensibles a la influencia de numerosos factores, incluyendo la construcción de embalses, la remoción de tierra, cambio del uso de la tierra, la actividad minera, medidas de conservación de agua y suelo, programas de control de sedimentos, y el cambio climático. También Walling (2006) resalta que debe prestarse especial atención a la perspectiva temporal y la variación de las trayectorias de impacto, en diferentes áreas del mundo y cuencas hidrográficas de distintos tamaños.

Batalla et *al.*, 1994. comentan desde una perspectiva técnica, esta información también puede ser valiosa para la planificación, así como para diversos propósitos de ingeniería; y Day (1988) señala que una adecuada caracterización del transporte de sedimentos es requerida para establecer normas ambientales.

a. Problemas debido a la producción de sedimentos

Las altas cargas de sedimento resulta un mayor problema 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 aumentar el costo del tratamiento de agua extraída de un río (Walling, 2009; Johnson et *al.*, 1998). En este contexto, los cambios en las tasas de erosión y transporte de sedimentos en los ríos del mundo pueden tener importantes repercusiones en diferentes niveles. Desde una perspectiva global, los cambios en las tasas de erosión, tienen importantes implicaciones para los recursos mundiales de los suelos y su uso sostenible para la producción de alimentos (Walling, 2009).

3.4.2 Datos de sedimentos en suspensión

Según Rocha (1999) en su estudio para el periodo de 1978-1986 en Condorcero se obtuvo una masa media de 21,7 millones de t/año, en cuanto a la granulometría del

material sólido, sólo existen curvas granulométricas utilizadas en el estudio de factibilidad del Proyecto CHAVIMOCHIC del año 1982, en donde se observa que los sólidos en suspensión menor a 0,15mm., varían de 74-88% para los meses de enero-febrero y marzo-mayo respectivamente. *El caudal sólido total medio resulta 27,7 millones de t/año y en años extraordinarios como en los que corresponden al fenómeno de El Niño, el caudal sólido sería de 61,7 millones de t/año que corresponde a una erosión específica de 5 713 t.km⁻².año⁻¹.* También recalca que los afluentes del río Santa, Coronguillo, Tablachaca, Manta y otros que reciben relaves de las minas que son los principales aportadores de materiales en suspensión y por análisis de sedimentos se comprobó que estos son altamente abrasivos debido a su composición de materiales de alta dureza como cuarzo.

El proyecto HiBAm viene realizando trabajo de investigación en la cuenca amazónica que abarca los andes pertenecientes a la vertiente del océano Atlántico, en un afán de comprender que sucede al otro lado de la cordillera de los andes que escurren al océano Pacífico viene realizando trabajos de esta índole.

a. Problemas en la continuidad temporal para la toma de datos

Un análisis significativo de las tendencias temporales en la carga anual de sedimentos, exige el registro de una data considerable que puede documentar las tendencias en el flujo de sedimentos con programas de control de sedimentos a largo plazo, sin embargo, en muchas zonas del mundo son raras. Incluso, en algunos lugares han sido limitados por el reciente cierre de estaciones de monitoreo a largo plazo. Estos cierres son el resultado de la falta de financiación para apoyar el monitoreo y una vez que los argumentos de la carga media anual se han establecido, es difícil de justificar la continuación de una estación (Walling *et al.*, 2003).

El Perú por ser un país en vías de desarrollo está inmerso en esta problemática donde el principal factor para lograr tener redes de monitoreo o información sedimentológica es la falta de inversión.

b. Problemas en la frecuencia para la toma de datos

Day, 1988. aclara que la documentación de la frecuencia de registros a largo plazo del transporte de sedimentos en suspensión son limitados, en los procesos geofísicos,

debido a la sensibilidad de respuesta de la cuenca, la complicación de los recursos naturales y los cambios inducidos por el hombre.

3.4.3 Producción de sedimentos en suspensión

Los sedimentos transportados por un curso de agua constituyen la erosión laminar de sus laderas y también el material que la corriente levanta de su propio cauce; generalmente estos sedimentos son clasificados de acuerdo al proceso de transporte dominante, al material de origen y a sus dimensiones (Artigas et *al.*, 2006).

En un estudio Aalto et *al.* (2006) para predecir la tasa de erosión en los Andes, realizaron un análisis de regresión múltiple de la descarga de sedimentos de 47 cuencas en los Andes bolivianos, con un área media de 11 000 km², estas a menudo tienen décadas de datos de medición diarias de caudales y descarga de sedimentos, estas muestran una extraordinaria variedad de denudación (0.01-6.9 mm/año), (escurrimiento 16-2700 mm/año) y relieve topográfico local (700-4300 m), sin embargo la litología subyacente (plutones graníticos, metasedimentos, y depósitos cuaternarios) pueden ser clasificados en un número reducido de tipos homogéneos, con alteraciones antropogénicas limitadas. Mientras que Restrepo et *al.* (2006) realizaron estudios en el río Magdalena ubicada en los Andes Colombianos ellos consideran este río como el mayor productor de sedimentos en América del sur para cuencas de grande a mediano tamaño, basada en un análisis de datos multianual de 32 cuencas tributarias cuya producción varía de 128 a 2200 t.km⁻².año⁻¹ para las cuencas de 320 de 59 600 km². Por otro lado en China Dai, et *al.* (2009) estudio nueve grandes cuencas, y cuantifica que Liaohe de 220 000 km², precipitación 520 mm/año y con una descarga de 3 km³/año produce 12.2 Mt/año.

3.4.4 Procesos erosivos en la cuenca

a. Remoción en masa

Silva, 2003. dice que este fenómeno está asociado con deslizamientos de grandes masas de material sólido que se han concentrado en sitios inestables. La inestabilidad es causada por factores geotécnicos que tienen que ver con las pendientes de los taludes, el manejo inadecuado del suelo, la tala de árboles y el almacenamiento de agua de lluvia en los suelos.

Mizuhara et *al.*, 1987. mencionan que la alta producción de sedimentos debido a deslizamientos de tierra durante las fuertes lluvias es un asunto de gran preocupación en la planificación de control de la erosión. Sin embargo, una fuente adicional de sedimentos es la ladera desnuda formada después de los deslizamientos, por falta de cobertura vegetal.

b. Erosión hídrica

Según Silva (2003) la erosión hídrica se genera cuando las gotas de lluvia que caen sobre un suelo tienen suficiente energía para remover partículas del mismo, dejándolas libres para que puedan ser transportadas por la escorrentía superficial hacia las corrientes de drenaje.

3.4.5 Transporte de sedimentos en suspensión

Bateman et *al.*, 2004. aclaran que, en caso el flujo transporte partículas en suspensión, las partículas pueden pertenecer al lecho o bien al lavado de la propia cuenca. Aguirre, 1983. dice que estas sustancias son transportadas en suspensión por un flujo; están sometidas a la acción del fenómeno turbulento, el cual origina fuerzas hidrodinámicas que pueden contrarrestar las fuerzas de gravedad que actúan sobre ellas. Leopold et *al.*, 1964. Las distribuciones verticales de sedimentos en suspensión puede variar entre los arroyos y entre secciones dentro de un arroyo según los tamaños de las partículas. Sin embargo, como regla general, las partículas más finas se distribuyen uniformemente en la vertical, y las partículas más gruesas se concentran cerca del lecho del río. Ocasionalmente, las partículas más gruesas podrían llegar a la superficie del agua, generalmente llevada por el flujo turbulento o como resultado del estrés de la dispersión del grano.

3.4.6 Impacto antrópico sobre la producción de sedimentos

Debido a que los sedimentos en suspensión de contaminantes no puntuales en los arroyos naturales varía rápidamente la composición, y de manera impredecible; los cambios de transporte relacionados debido a causas humanas son difíciles de demostrar (Jack, 1996).

Según Walling (1997 y 2006) dice que actualmente los datos sobre la carga de sedimentos de los ríos proporcionan una clara evidencia de importantes cambios recientes, en respuesta al impacto de la actividad tanto de humanos y otros aspectos del cambio

ambiental; Entonces Dai, et *al.*, 2009. corroboran con su estudio de nueve grandes ríos, que el flujo de sedimentos en suspensión hacia el mar ha tenido un aumento estadísticamente significativo.

a. Actividades humanas y la producción de sedimentos

La actividad humana se ha convertido en un factor determinante en la producción de los sedimentos fluviales (Dai, et *al.*, 2009). Entonces Hooke (1994, 1999 y 2000) dice que cada año los seres humanos mueven alrededor de 0,8 Gt (billones de toneladas) de tierra en la construcción de viviendas, 3,2 Gt en la producción de minerales, y 3 Gt en la construcción de carreteras. La tierra total movida por los seres humanos se estima en 30 a 35 Gt/año. En comparación, meandros de ríos pueden trasladar de 25 a 40 Gt de sedimentos de un lado del río a la otra durante un año, y otros procesos geomorfológicos mueven mucho menos material. Acerca de 3500 Gt de suelo son removidos anualmente por el arado. La mayor parte de esto, sin embargo, es simplemente transferidos de los surcos hasta los camellones. Por otra parte, alrededor de 75 Gt/año es en realidad erosionado por el viento y el agua en los campos arados. La mayor parte de este se deposita a una corta distancia del campo en pendientes y en las llanuras de inundación, pero hasta a 10 Gt/año puede ser transportado a los océanos.

Aunque se han realizado esfuerzos en los últimos años hacia la conservación del agua y el suelo, el sedimento erosionado en las cuencas, ha aumentado significativamente desde la década de 1950; Los conductores principales del aumento de las cargas de sedimentos incluyen remoción de tierras para la agricultura, actividad maderera y la minería (Dai, et *al.*, 2009; Walling, 2006).

- Infraestructura hidráulica que compromete la dinámica de los sedimentos

(Condom et *al.*, en revisión; INRENA, 1996). dan un bosquejo de los principales sistemas hidráulicos en la cuenca del río Santa. A las faldas de los Andes las aguas del río Santa abastecen a dos megaproyectos como son Chavimochic y Chincas ambos de propósitos múltiples; debajo de los 2000 msnm se encuentra una impresionante fisiografía la cual da origen al Cañón del Pato, aprovechando las características de esta se construyó una hidroeléctrica; entre los 2000 y 4000 msnm. Por siglos el hombre andino utiliza las laderas para la agricultura con irrigación (Cordillera Blanca) y al secano (Cordillera

Negra), los cuales poseen un complejo sistema de canales; a lo largo del río también se aprovecha para la generación de energía, abastecimiento de agua potable y abastecimiento de agua para algunos centros mineros los cuales regulan algunas lagunas en el sistema hidráulico de la cuenca.

b. La naturaleza y la producción de los sedimentos

En un estudio Johnson et *al.* (1998) muestran que las diferencias significativas existentes en el tamaño y forma de las partículas entre cuencas pequeñas relativamente similares tiene como control dominante la lluvia y Davy et *al.* (2000) demuestran que la ley de la erosión macroscópica tiene características de una difusión anormal cuyo exponente base en el tiempo de duración está determinada por los parámetros del proceso fluvial. Además estudios sobre la erosión en el centro de Nepal demostró que la pérdida de suelo bajo diferentes usos de la tierra era muy variado, siendo uno de los principales factores el control de 15 minutos de lluvia. Sin embargo Edwards et *al.* (1970) citan a la fusión glaciaria, actividad volcánica, movimiento de la tierra como importantes agentes en la producción de sedimentos.

3.4.7 ¿Como actuar frente al problema de los sedimentos?

Walling, 2006. aclara que si bien, los programas de conservación de suelos y control de los sedimentos pueden resultar en reducción de las cargas de sedimentos, la captura de los sedimentos por las presas representa la causa dominante para reducir las cargas. Esta influencia está adquiriendo una importancia cada vez mayor a escala mundial (Walling et *al.*, 2003). Cualquier intento de vincular estos conductores a los cambios en la tierra a nivel mundial se debe tener en cuenta la totalización y los efectos de amortiguación que operan en las grandes cuencas, pudiendo causar incluso la eliminación de las señales de flujo cada vez mayor aguas arriba dentro de la cuenca, y complicar la relación entre la respuesta anterior y posterior al impacto humano (Walling, 2006). Dai et *al.*, 2009. en su estudio de los flujos de sedimentos en suspensión de nueve grandes ríos de china hasta mar transportaron de 1954-1963 a 0,54 Gt/año, para el periodo 1996-2005 de 1,81 Gt/año disminuyeron hasta en un 70.2 %; esta fue más marcada en la región árida del norte que en la región húmeda del sur, 84% en el río amarillo.

3.4.8 Cálculo de las concentraciones de sedimentos en suspensión

La cuantificación de sedimentos se realiza considerando la clasificación relacionada con los procesos de transporte (Artigas et al., 2006). Los sólidos suspendidos se determinan utilizando aforadores normalizados de precisión satisfactoria para estudios hidrométricos. Williams et al. 2007. dicen que el grado de floculación de sedimentos en suspensión son altamente complejas, ya que muestran una significativa variabilidad a corto plazo que no ha sido previamente documentado en el ambiente fluvial. Entones Artigas et al. (2006) dicen que para minimizar el riesgo de estas prácticas hay que ahondar en el conocimiento de las relaciones existes entre la cuenca como productora de sedimentos y el río como conductor de los mismos. Por otra parte Collins (2002) menciona que las concentraciones de sedimentos en suspensión y los flujos de los ríos de las cuencas de montaña que drenan agua del deshielo glaciar, varían considerablemente en un rango de escalas temporales, de hora en hora, día a día, mes a mes y de año a año durante el ciclo anual de la escorrentía. Finalmente Mizuyw (1982) recalca aunque la distribución, la frecuencia y la magnitud de la descarga de sedimentos puedan ser estimadas aproximadamente, de la relación con la descarga y la corriente; pero los resultados no son exactos.

a. Modelación

En la modelación cada técnica suele tener su propia metodología, aunque muchos de los conceptos que se manejan en el mundo de la modelación hidrológica pertenecen a una teoría más general que recibe el nombre de teoría de sistemas. Dentro de esta teoría se entiende por variable una característica del sistema que puede ser medida, y que toma diferentes valores numéricos a lo largo del tiempo. Las variables pueden ser de entrada al sistema (INPUT), de estado intermedio (caracteriza al sistema en cada instante) y de estado final (OUTPUT) (Martínez, 1999).

3.4.9 Relación entre el transporte y la descarga

Según Lewis et al. (1989) la relación entre el transporte y la descarga puede ser representado en general como una función de potencia (Ecuación 1):

$$Q_{Sólido} = \alpha * Q_{Líquido}^{\beta} \dots\dots\dots(Ecuación 1)$$

Donde $Q_{sólido}$ es el transporte, $Q_{Líquido}$ es la descarga de agua y (α) es la constante de la ecuación; cuando el exponente de esta ecuación (β) es 1.0 la concentración se mantiene constante. Sin embargo tres tipos de derivaciones de un exponente son posibles:

Exponentes > 1 , indica que las concentraciones crecen cuando las descargas se incrementan (efecto de purga).

Exponente > 0 y < 1 , indica que las concentraciones decrecen cuando las descargas aumentan, pero la proporción es menos rápida que el incremento de la descarga (efecto de disolución).

Exponentes < 0 , indica que las concentraciones decrecen rápido con el correspondiente incremento en la descarga, entonces el transporte declina cuando la descarga aumenta (efecto de conservación).

La complejidad en la relación del transporte y la descarga, como las diferencias en la concentración en descargas iguales en aumento o caída de los puntos del hidrograma (histéresis), no están relacionados con la función de potencia, la importancia de estas irregularidades se indica por el error estándar del exponente (β) los constituyentes con una alta histéresis tienen un alto nivel de error por causa de la separación de las concentraciones en la fase ascendente y descendente del hidrograma.

3.5 Métodos para la toma de muestras en suspensión

Williams et *al.*, 2007. explican que la influencia de la frecuencia de la medición debe considerarse en la adquisición de datos in situ; en términos de sus implicaciones para futuros estudios de la granulometría de los sedimentos en suspensión fluvial; Pero Leopold et *al.* (1964) dicen que la distribución vertical de los tamaños de las partículas de los sedimentos en suspensión puede variar entre las corrientes y las secciones de una corriente y Keller, et *al.* (1991) remarcan que sin embargo en las zonas montañosas su tamaño varía considerablemente con las condiciones de hidráulica, turbulencia, velocidad, pendiente, capacidad de transporte o si hay otra corriente. Esto hace el muestreo y la evaluación de la verdadera cantidad de sedimentos en suspensión en torrentes, sean muy difíciles.

La técnica de selección aleatoria de los tiempos de muestreo o de un elemento aleatorio en un modelo ajustado (como una regresión) para la concentración de sedimentos o de flujo; estos pueden ser aplicados por medio de un registrador de datos programable que detecta la etapa, determina los tiempos de muestreo, y desencadena un muestreador automático de bombeo (Jack, 1996).

La recopilación de datos automatizada es esencial para medir efectivamente las cargas de sedimentos en suspensión en las tormentas. Aunque es posible confiar únicamente en mediciones manuales, los flujos importantes no son frecuentes, impredecibles y cuando ocurren, el personal capacitado puede no estar disponible para recopilar la información requerida (Jack, 2003).

3.5.1 ¿Porque realizar pruebas de turbidez?

Costa et *al.*, 2005. explican por qué la concentración de sólidos suspendidos en los ríos es determinado tradicionalmente por medio de métodos lentos y relativamente caros. Por lo tanto, la necesidad de enfoques alternativos. Entonces Jack (1996) opino que el desarrollo y la validación de los modelos que relacionan la concentración de sólidos en suspensión a la turbidez, representa un enfoque potencial. El método de muestreo de la turbidez tiene un potencial para la estimación de la carga de cualquier componente de la calidad del agua que constituye una mejor correlación, medibles in situ; y Jack (2003) dice que la medida continua de la turbidez puede ser utilizada por un largo periodo junto con la descarga, en un sistema automatizado que permite en tiempo real el muestreo; a fin de facilitar la estimación de la carga de sedimentos.

3.5.2 ¿Por qué utilizar una Sonda de análisis de turbidez?

Jack, 2003. publicó que el registro continuo de la turbidez puede revelar los pulsos de sedimentos no relacionados con el flujo, el suministro de información sobre el momento y la magnitud de la entrada de sedimentos. La turbidez puede ser utilizado en un sistema automatizado que permite en tiempo real tomar las muestras a fin de:

- a. Facilitar la estimación precisa de las cargas de sedimentos en suspensión a un costo razonable.
- b. Proporcionar un número adecuado y la distribución de muestras físicas para validar cada aumento significativo de la turbidez y calibrar la turbidez con la concentración del sedimento en suspensión para cada período que se estima.
- c. Proporcionar una estimación continua de la concentración de sedimentos y el flujo basada en la turbidez.

3.5.3 Análisis de las partículas en suspensión

Guyot, 1999. nos dice que el conocimiento sobre el tamaño de las partículas distribuidas en el lecho del río y los sedimentos en suspensión es fundamental para el estudio de los procesos geomorfológicos a lo largo de un hidrosistema aluvial. Entonces Williams, et *al.* (2007) agregan que una colección de registros detallados del tamaño de la distribución efectiva de las partículas, facilita la interpretación de la evolución dinámica de las características del tamaño de los sedimentos en suspensión, en relación con su posible origen, la distribución y los mecanismos de floculación.

CAPÍTULO IV.- MATERIALES, METODOS Y DATOS.

4.1 Zona de estudio: Cuenca del río Santa

Geográficamente, los puntos extremos de la cuenca se hallan comprendidos entre los 10° 12' y 7° 58' de Latitud Sur y los 78° 41' y 77°13' de Longitud Oeste.

Limites: por el norte con la cuenca del río Chao y Virú, por el sur con la cuenca del río Pativilca y Fortaleza, por el este con la cuenca del río Marañón y por el oeste con las cuencas Lacramarca, Nepeña, Casma, Huarney, Fortaleza y el océano Pacifico (Figura 5).

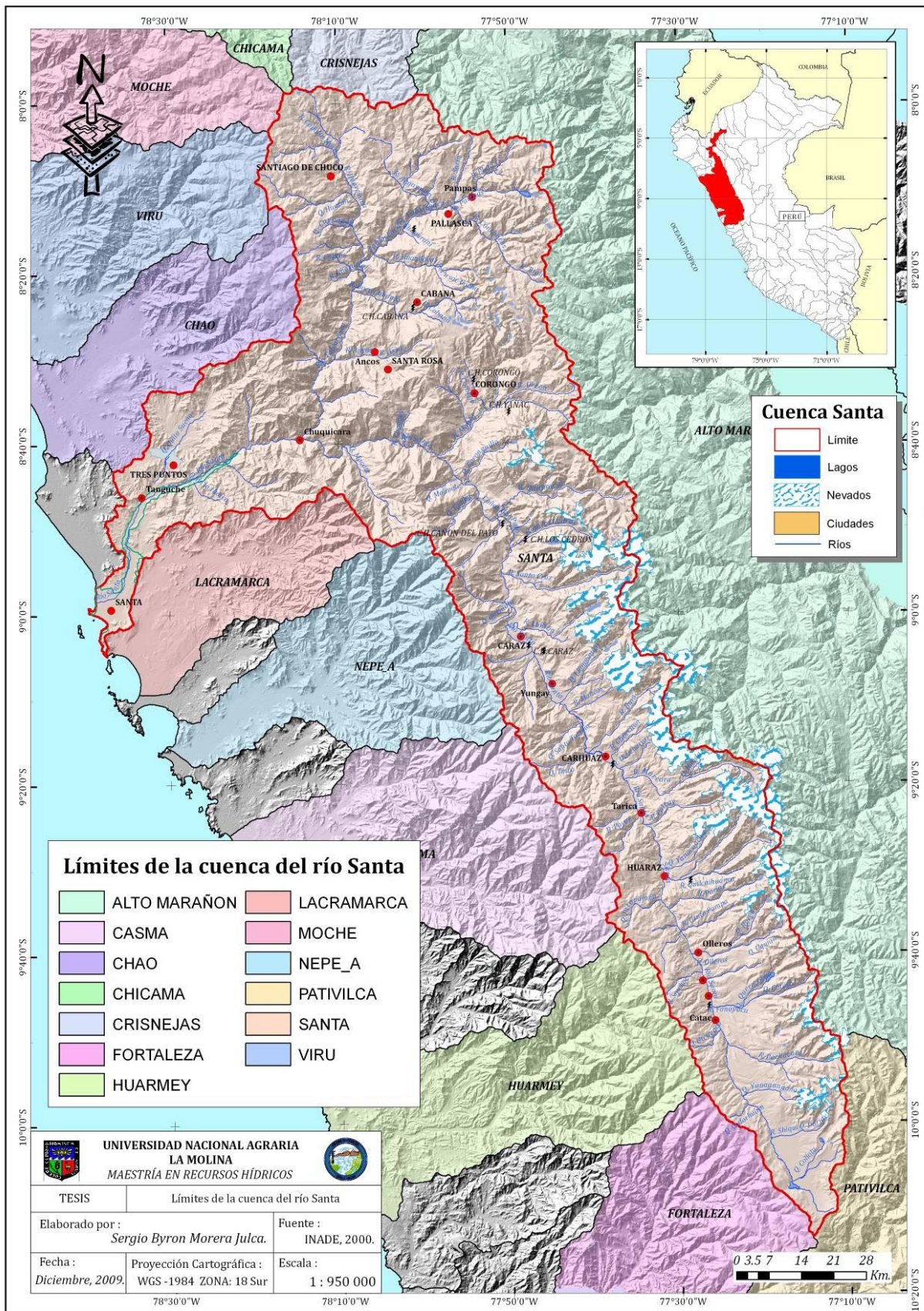


Figura 5. Ubicación de la cuenca del río Santa; las cuencas vecinas de Chao, Virú, Moche Chicama, Lacramarca, Nepeña y Casma dependen directamente del recurso hídrico de la cuenca del río Santa.

4.2 Materiales

a. Material laboratorio y campo

- Balanza analítica.
- Sonda Ysi 6600 V2-4.
- Muestreador, frascos para muestras.
- Filtros de 45 micras de porosidad, hechos a base de celulosa.
- Estufa.
- Bomba de vacío.
- Agua destilada.
- Cámara fotográfica.
- Limnígrafo.

b. Materiales de gabinete

- Información de muestreos y aforos del proyecto especial CHAVIMOCHIC*
- Datos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).
- Datos TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission 3B42 V6).
- Mapas de la carta nacional Escala 1: 100 000 (IGN, 1986.)
- Mapas Alpeveinskarte Norte y Sur de la Cordillera Blanca Escala 1: 100 000
- Mapa de ubicación de las minas en la cuenca IGEMMET (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico).
- Libreta de apuntes.
- Equipos Hardware.
 - Computadora Corel 2 de 2.40 GHz Memoria RAM 2 GB, disco duro de 300 GB.
 - 1 Impresora Epson Stylus C62, de formato A4.
 - 1 GPS navigator, resolución de 10 metros.
- Programas Software.
 - Arc Gis 9.3, Erdas 9.2, Minitab 14.0 Surfer 8.0, AutoCad, Hydraccess 4.4**, Google Earth, ACD 10.0, Paquete office.
- Base de datos INADE (Instituto Nacional de Desarrollo, Perú).

*Gracias al convenio existente entre el proyecto HiBAm (Hidrogeodinámica de la cuenca amazónica) y el proyecto especial CHAVIMOCHIC.

**Descargar el software en www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess_sp.htm (Vauchel, 2009).

4.3 Metodología

La evaluación de las condiciones físico-naturales del ámbito, los resultados de las muestras de sedimentos en suspensión y las lecturas de caudales, permitió establecer las relaciones existentes entre la cuenca y la producción de sedimentos en suspensión (Figura 6).

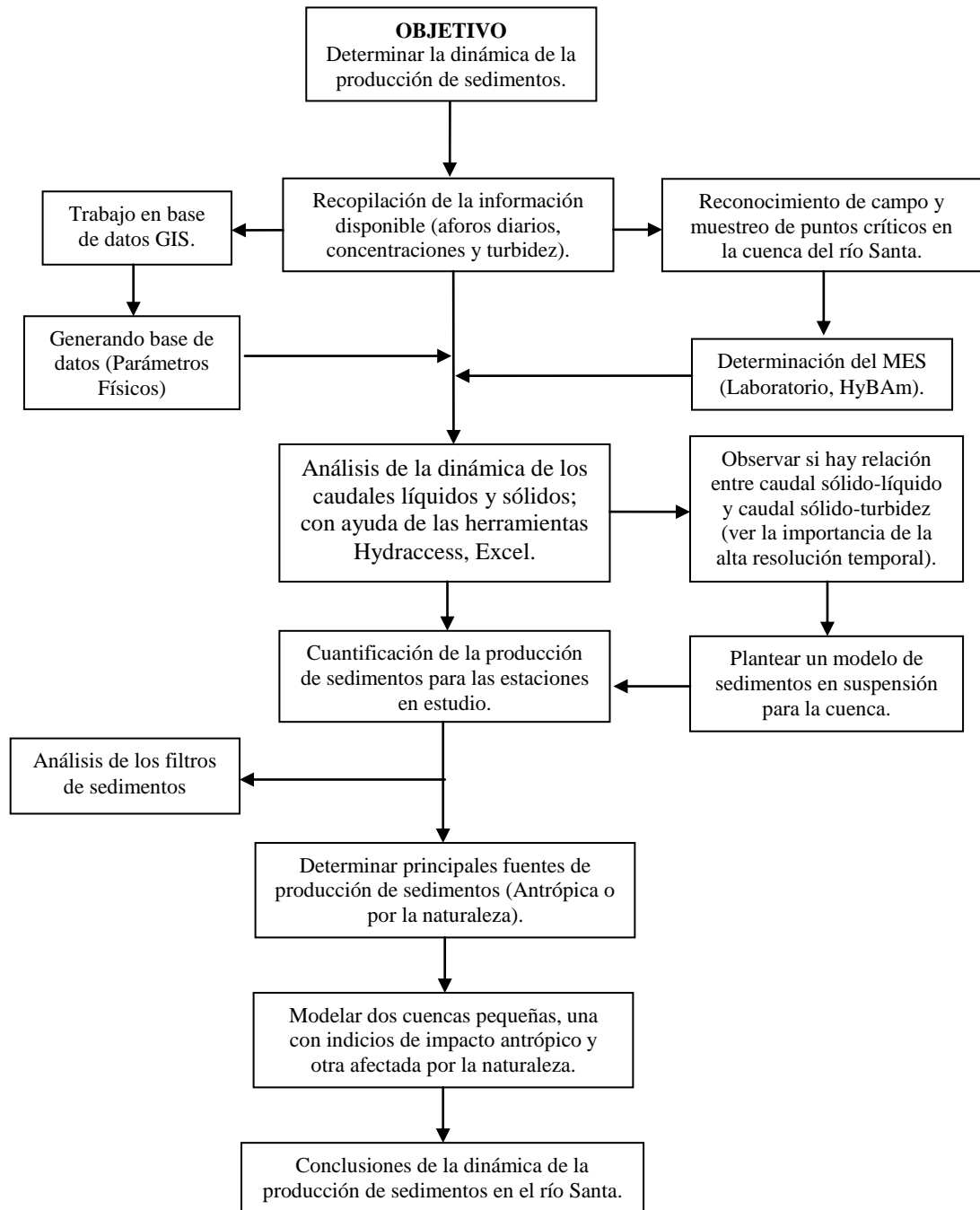


Figura 6. Metodología de investigación a fin de caracterizar la dinámica de la producción de sedimentos en el río Santa.

Para encaminarse en el objetivo se necesitó de:

- Datos de concentración de sedimentos y caudal líquido provenientes del proyecto especial Chavimochic, debido al convenio entre este y el Proyecto HiBAm del IRD (Instituto de investigación para el desarrollo).
- Larga serie temporal de caudales líquidos (Figura 7 y Tabla 3) al paso diario para la estación de Concorcerro (1977-2002) y caudales al paso horario (2002-2009); caudales sólidos y líquidos dos veces por día para las estaciones de Concorcerro (1999-2009), Tablachaca y Santa (2002-2009).
- Se realizaron misiones a la cuenca del río Santa con el fin de tener una imagen de la variabilidad espacial en un punto en el tiempo; Identificando las fuentes de producción de sedimentos y flujos en el ámbito de la cuenca mediante la recolección de muestras en las misiones realizadas (Tabla 2).

Tabla 2. Panorama de las misiones realizadas a la cuenca del río Santa.

| <i>Misión</i> | <i>Fecha</i> | <i>Época</i> | <i>Zona</i> | <i>Actividades</i> |
|---------------|-------------------|--------------|-------------|---|
| I | 23/02/09-03/03/09 | Lluvias | Santa | Identificar actividades antrópicas y climáticas; muestreos. |
| II | 09/03/09-14/03/09 | Lluvias | Tablachaca | Muestras de los principales afluentes de sedimentos. |
| III | 15/12/09-18/12/09 | Lluvias | Desarenador | Dinámica de los caudales y sedimentos de un ciclo diario. |
| IV | 17/02/10-24/02/10 | Lluvias | Desarenador | Monitoreo durante una semana con sonda de turbidez. |

- También se necesitó de una alta resolución temporal para el análisis del ciclo diario de los caudales líquidos y sólidos en la estación de Concorcerro; se realizó durante una semana con una sonda de análisis de turbidez.
- Generar y validar un método de cálculo de sedimentos en suspensión en la cuenca, previo análisis de la calidad de los datos que consiste en descartar la información poco confiable es decir caudales que se repiten por días durante la época húmeda; además se completó los vacíos para periodos máximos de 48 horas.

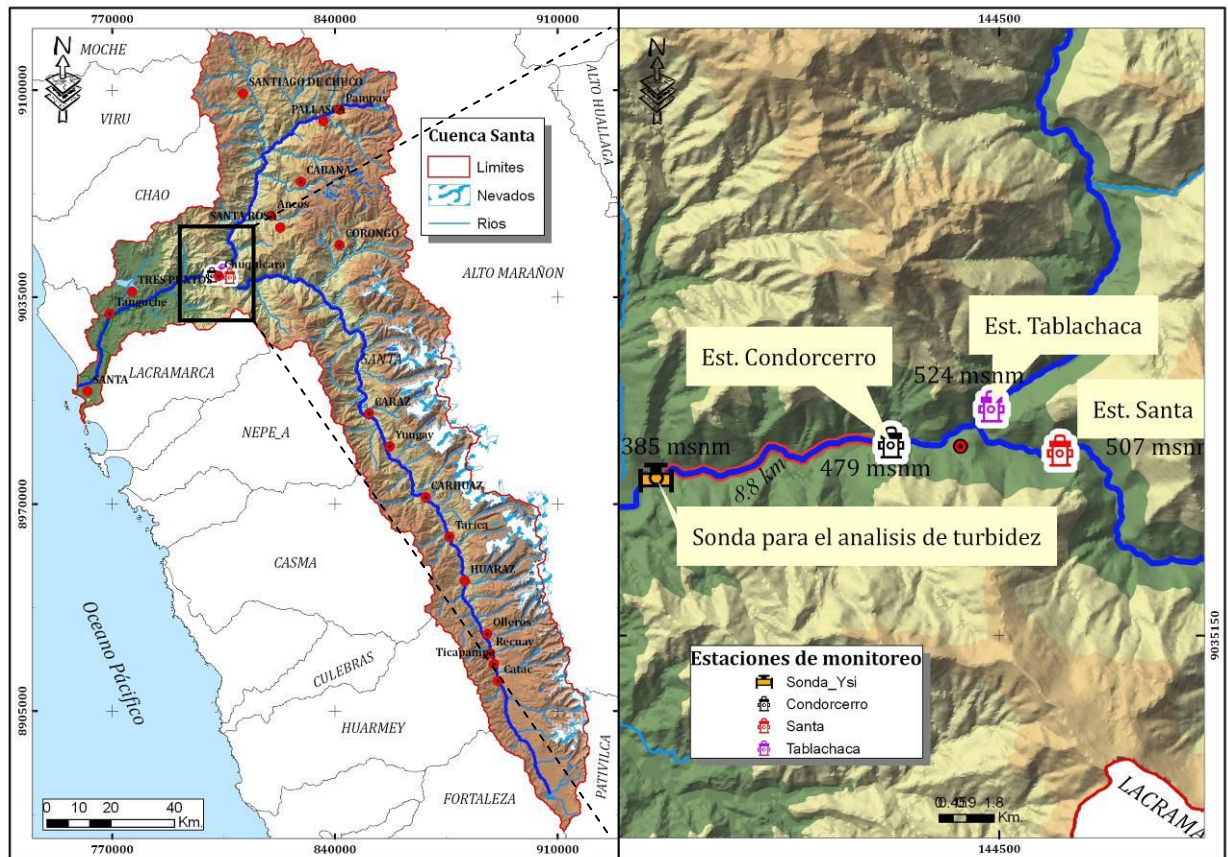


Figura 7. Ubicación de las estaciones hidrosedimentológicas de estudio y ubicación de la sonda de turbidez con la cual se realizó los monitoreos, además muestra la distancia entre la estación Condorcerro y el punto de monitoreo.

4.3.1 Recopilación de la información disponible

Tanto los programas SIG y los modelos hidrológicos tienen de una fuerte dependencia de los datos espaciales y temporales; es así que la combinación de ambos es ideal para nuestro objetivo el cual busca entender la dinámica de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa.

a. Recopilación de la información existente del proyecto especial Chavimochic

El proyecto especial Chavimochic mediante su programa de manejo integrado de agua y suelos en la cuenca del río Santa, evalúa parámetros de turbidez, temperatura, pH y conductividad eléctrica en todo su sistema; parte de este involucra las estaciones de Condorcerro, Santa y Tablachaca (Figura 7) las dos primeras ubicadas en el cauce del río Santa y la última ubicada en un afluente importante para la producción de sedimentos. Para el estudio se empleó caudales, concentraciones y turbidez (Tabla 3).

Tabla 3. Data histórica de caudales líquidos, sólidos y turbidez disponibles del proyecto Chavimochic.

| <i>Estación</i> | <i>Q líquido e Intervalo de tiempo</i> | <i>Q sólido e Intervalo de tiempo</i> | <i>Periodo</i> | <i>Observaciones</i> |
|-----------------|--|---------------------------------------|----------------|---|
| Santa | Uno por día | Cada 48 horas | 1999 -2009 | Falta todo el año 2000, 2001 y 8 primeros meses del 2002. |
| Tablachaca | Dos por día | Dos por día | 2002 -2009 | No todos los días tienen información de concentración. |
| Condorcerro | Horario | Dos por día | 1999 -2009 | A partir de la instalación del limnógrafo 2002, antes dos por día |
| Condorcerro | Diario | | 1977 -2002 | Caudales diarios una lectura por día. |
| Condorcerro | Turbidez (NTU), dos por día | | 2006-2009 | Medición realizada en el laboratorio de muestras diarias. |

b. Elaboración de una base de datos SIG

Para comprender la dinámica de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa es necesario conocer: la topografía, el uso actual de los suelos, la geología, la distribución de las lluvias en la cuenca, la cobertura vegetal, la ubicación de las minas y la hidrología; para ello utilizamos como referencias los mapas elaborados por INADE en el año 2000.

Se tiene a disponibilidad datos de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) el cual es un DEM que tiene como unidad mínima un pixel de 90 x 90 m; esta información se utilizó para generar el mapa base ya que para cálculos de mayor precisión se trabajó con las curvas de nivel obtenidas del IGN (Instituto Geográfico Nacional, Perú) generando pixeles de 50 x 50 m. La base de datos SIG fue enriquecida y actualizada con las diferentes misiones realizadas a la cuenca del río Santa.

Otra parte importante en la base de datos SIG es la descarga de los datos TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission 3B42 V6) los cuales nos brindan datos de lluvia cada 3 horas desde el año 1998 hasta la actualidad, esta data especializada fue utilizada como referencia para nuestro estudio (Figura 2) para una mejor comprensión de la climatología anual en la cuenca del río Santa; no se tuvo acceso a la información de estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca.

c. Base de datos concerniente a los parámetros físicos de la cuenca del río Santa, se inicio con el trabajo en campo, tomando las coordenadas de los puntos evaluados para luego realizar los ajustes con los shapes a trabajar; también se actualizó los puntos críticos

de producción de sedimentos, con relación a las características climáticas de la cuenca, especialmente el área húmeda de la cuenca, para el posterior cálculo del caudal específico.

- El SRTM fue utilizado como mapa base después de una calibración en campo (GPS-Shapes), implementando en la base existente puntos como son las estaciones de aforo así como las principales fuentes aportadoras de sedimentos (Figura 8).
- Manipulación del mapa: Topológico, hidrológico, litología, minas, isoyetas precipitaciones, cobertura vegetal y uso actual de los suelos (Figura 2-4, y 8).
- Se delimitó la cuenca del río Santa, subcuencas y principales ríos (Figura 1).
- Se generó el perfil longitudinal del río principal Santa y del río Tablachaca, por presentar problemas en el lecho del río; como bancos de sedimentos producto de los deslizamientos, erosión laminar y cárcavas todo ellos listos para ser transportados por el flujo del cauce (Figura 52 y 53).

Se realizó cálculos de la proyección de la superficie de escurrimiento que abarca cada una de las estaciones y algunos puntos de monitoreo (Figura 8).

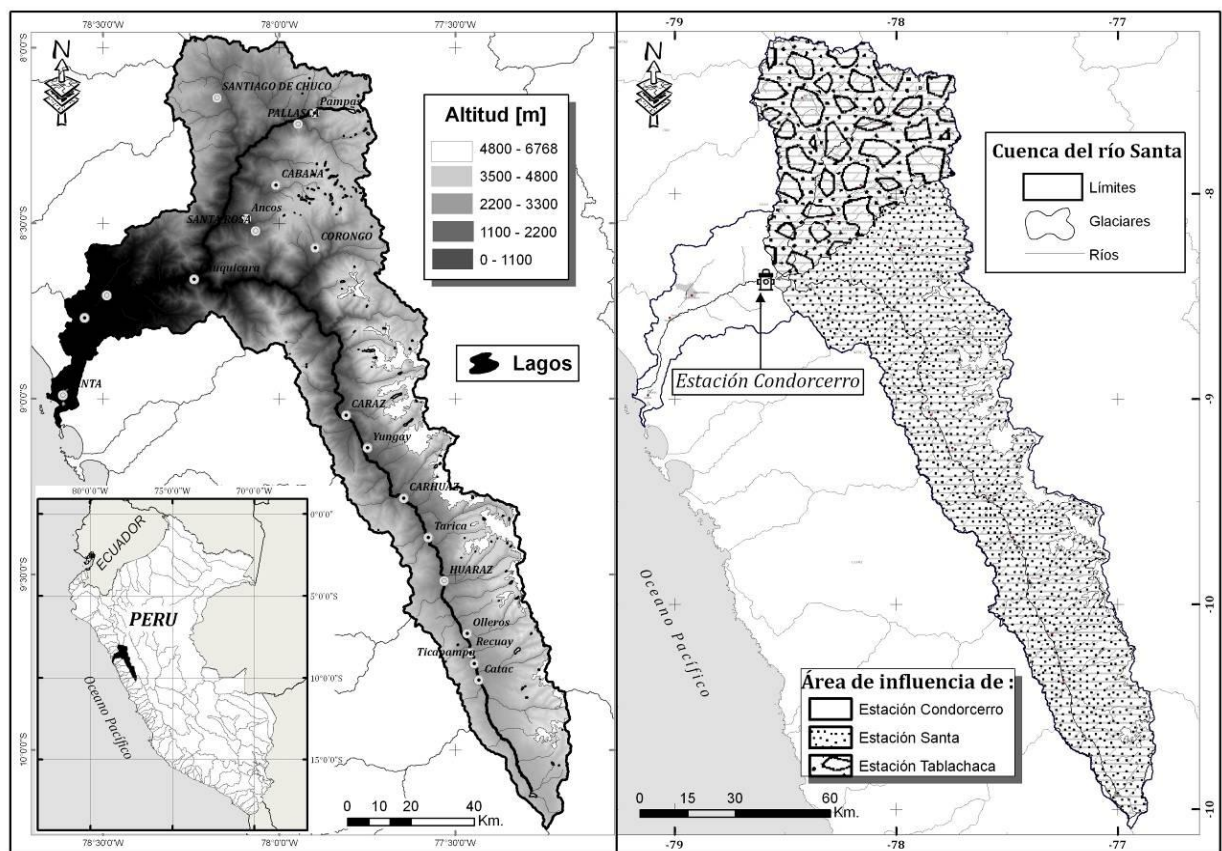


Figura 8. Modelo digital de elevación (SRTM 3); delimitación del área que compromete la estación Condorcerro (9969 km²), Tablachaca (3131 km²) y Santa (6815 km²).

4.3.2 Reconocimiento de campo y muestreo de puntos críticos en la cuenca del río Santa

a. Misiones a la cuenca del río Santa y Tablachaca

Las misiones fueron financiadas por el proyecto HiBAm y Great Ice ambos pertenecientes al IRD (Instituto de investigación para el desarrollo), a pesar de ello uno de los problemas para realizar misiones de varios días es el monto a utilizar, pese a ello se pudo realizar cuatro misiones las cuales especificamos en la tabla 3 y 4.

Tabla 4. Objetivos de las misiones realizadas en la cuenca del río Santa.

| Misión | Objetivos |
|--------|--|
| I | <ul style="list-style-type: none"> - Recopilar información existente de las estaciones hidrosedimentológicas que posee el Proyecto Especial Chavimochic (Figura 7). - Evaluar las principales actividades que contribuyen a la producción de sedimentos en el río Santa (Figura 70, 72-74). - Observar la metodología empleada para la toma de muestras en las estaciones de estudio (Figura 63). - Toma de muestras de los principales tributarios de sedimentos del río Santa. |
| II | <ul style="list-style-type: none"> - Evaluar las principales actividades que contribuyen a la producción de sedimentos en el río Tablachaca (Figura 64, 67, 68, 73). - Toma de muestras de los principales tributarios de sedimentos del río Tablachaca (Figura 71). |
| III | <ul style="list-style-type: none"> - Monitorear durante un ciclo diario (24 horas) con una Sonda de análisis de turbidez - Recolectar la información de turbidez tomada por el proyecto Chavimochic desde 2006. - Recopilar data histórica de los limnígrafos. |
| IV | <ul style="list-style-type: none"> - Monitorear durante 7 días con una Sonda de análisis de turbidez y conductividad, además de tomar muestras de sedimentos en suspensión según los picos de turbidez detectados por el turbidímetro (Figura 45). |

b. Método para procesar las muestras recolectadas, laboratorio HiBAm -UNALM

Luego de la recolección de sólidos en suspensión en botellas vacías de agua mineral, se procedió:

- Pesado de la botella más contenido sólido y líquido (muestra campo); la densidad del líquido se considera 1 ml/g, entonces convertimos el peso a volumen.
- Vertemos el contenido de la botella a un embudo, en el cual previamente se colocó un filtro de celulosa de 45 μ m de porosidad que fue pesado en la balanza analítica; el embudo trabaja con una pequeña bomba de vacío el cual facilita el filtrado (mediante succión).
- Pesamos la botella vacía, luego de haber hecho el filtrado se coloca los filtros a secar durante 24 horas al aire ó estufa a 105 °C.

- Se pesará en la balanza analítica los filtros más los residuos sólidos en el filtro, después de ello se realiza el inventariado de los filtros, finalmente se guardan las muestras para otros análisis más complejos si fuera necesario.

4.3.3 **Análisis de la dinámica de los caudales líquidos y sólidos; con ayuda de las herramientas Hydraccess y Excel**

a. Procesamiento de los datos en Hydraccess

El río Santa es una de las cuencas alto andinas más estudiadas de la Cordillera de los Andes; esta posee una data histórica privilegiada (Tabla 3), gracias a los aforos, muestreos y digitalización de las cartas limnigráficas por el proyecto CHAVIMOCHIC; a dicha base de datos hidrométrica privilegiada en todo el Perú se ordenó y recopiló en un formato específico que requiere el software hidrológico Hydraccess, entonces los caudales son obtenidos por conversión de las cotas utilizando las curvas de descarga calibradas con los aforos. Las cotas son tomadas cada 2 horas para fines hidrológicos. Las ventajas comparativas que ofrece Hydraccess, lo hacen el más apropiado para procesar la información tanto de cantidad como de calidad del agua, debido a la facilidad que proporciona en la manipulación e interacción de la base de datos, además los gráficos y tablas generados en el software son de fácil interpretación y generados instantáneamente.

Estación Tablachaca con un máximo de 2 valores de caudal por día desde septiembre del 2002. Los caudales vienen de las observaciones hechas por los observadores, a partir de lecturas de nivel en la regla y una conversión en caudal utilizando una curva de calibración anual calibrada durante un año hidrológico (Tabla 3).

Estación Santa con un máximo de 1 valor de caudal por día desde septiembre del 2002. Caudales obtenidos a partir de aforos. Sin embargo en la mayoría de los casos, parece que el caudal para la estación Santa se ha calculado por diferencia entre el caudal de las estaciones Condorcerro y Tablachaca.

b. Análisis espacio-temporal de los sedimentos en suspensión

Como una visión general Farnsworth *et al.* (2003) nos comentan que los valores medios anuales, a menudo ocultan las variaciones a corto y largo plazo como consecuencia de factores climáticos y antropogénicos. Entonces una de las desventajas para la cuenca del

río Santa es que los datos de caudales sólidos no están disponibles en las escalas apropiadas, a diferencia de los caudales líquidos; la observación y modelización se realizó en periodos cortos, por ello se identificó y formuló relaciones dentro las escalas de interés, luego ellas fueron calibradas y validadas para tener un respaldo de confiabilidad en los resultados generados por el modelo.

4.3.4 Análisis de la relación entre caudal sólido-turbidez y caudal sólido-líquido

4.3.4.1. Prueba de turbidez con la Sonda Ysi 6600 V2-4

Se realizó dos misiones cuyo objetivo fue evaluar la turbidez para ello se empleo la sonda Ysi 6600 V2-4, la primera duro 48 horas con un intervalo de lectura cada 5 segundos y con un muestreo de los sólidos en suspensión cada 2 horas durante 24 horas; el principal objetivo fue de observar si hay relación entre la turbidez y la concentración de sólidos en suspensión, además de explorar como varia el ciclo del caudal sólido y líquido durante el día (Figura 41, 43, 44 y 45).

Después del primer monitoreo aparecieron más interrogantes, ya que la producción de sedimentos aparenta tener un ciclo que se repite, ¿Debido a la acción antrópica?; Entonces se hizo un monitoreo de 7 días durante las 24 horas del día, esto con la finalidad de entender o buscar indicios de actividad antrópica y/o eventos naturales, además se planteo algunas preguntas como: Si estos eventos son bien definidos mediante el modelo de transporte de sedimentos en suspensión.

a. Cálculo del caudal líquido a partir de las alturas de la sonda YSI

Tenemos una relación entre la cota del nivel del río en la estación Condorcero (H_{Cond}) y el caudal liquido (Q):

$$Q = 51 * H_{Cond}^2 + 68,4 * H_{Cond} + 14,526 \dots\dots\dots (Ecuación 2)$$

Tenemos una relación entre la cota del nivel en la estación Condorcero (H_{cond}) y la cota del nivel del río en donde se instalo la Sonda Ysi (H_{ysi}):

$$H_{Cond} = 0,65 * H_{ysi} + 1 \dots\dots\dots (Ecuación 3)$$

Entonces a partir de la ecuación 2 y 3 calcularemos los caudales líquidos para el punto de monitoreo con la Sonda Ysi.

4.3.4.2 Modelo de sedimentos en suspensión para la cuenca

Se planteará un pequeño modelo producto de la relación entre el caudal sólido y líquido, se examinará si dicho modelo hidrológico de correlación lineal simple brinda buenos resultados para el cálculo de sedimentos en suspensión al paso diario, mensual y anual, a partir de caudales líquidos instantáneos y al paso diario para la estación de Condorcerro, Santa y Tablachaca (Tabla 3).

a. Selección del periodo de análisis

Nuestro criterio de calibración considera toda la data disponible de caudales sólidos y líquidos con el fin de aprovechar la mayor cantidad de eventos ocurridos durante el período de monitoreo. Para comprobar la predictibilidad de nuestro modelo se realizó el cálculo del caudal sólido a partir de caudales líquidos ello para el periodo con mayor cantidad de información (más de un caudal y una muestra por día) 2007-2009, para analizar la eficiencia de nuestro modelo se empleo las siguientes pruebas hidroestadísticas (Ecuación 4 y 5):

- **Nash-Sutcliffe**

$$Ef = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{iObs} - Q_{iCal})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{iObs} - \bar{Q}_{Obs})^2} \right) \dots\dots\dots (Ecuación 4)$$

- **Bias o desviación relativa de los caudales sólidos**

$$Bias = 100 * \left[\frac{\bar{Q}_{Cal} - \bar{Q}_{Obs}}{\bar{Q}_{Obs}} \right] \dots\dots\dots (Ecuación 5)$$

Se realizó una prueba de función de la probabilidad de distribución (Probability Distribution Function PDF) según ello se observó la aleatoriedad de los caudales sólidos en

suspensión; además se estableció diferencias entre la hidrología de la cuenca del río Tablachaca y la cuenca media y alta del río Santa; además otro punto importante es analizar cuál es la ley de distribución de los caudales para las estaciones en estudio.

4.3.5 Medios para determinar las principales fuentes de sedimentos

Se inicio con la recopilación de la información acerca de las principales actividades que favorecen a la producción de sedimentos, luego con las visitas de campo se trato de distinguir entre los sedimentos provenientes debido a la actividad antrópica y/o debido a la naturaleza. Después de haber analizado la dinámica en las principales cuencas productoras de sedimentos, el caudal específico, caudales sólidos y su variabilidad en el tiempo y espacio se evaluó además la relación de los eventos con algunas actividades desarrolladas en la cuenca o algún efecto climático extremo.

4.3.5.1 Análisis de los filtros de sedimentos

Este tiene como principal objetivo definir la naturaleza de los sedimentos en suspensión en la cuenca del río Santa, con una remarca especial en ver si las partículas oscuras son carbones. Entonces antes de observar dichas muestras en el microscopio electrónico se observó con un estereoscopio.

4.3.6 Modelar dos cuencas pequeñas, una con indicios de impacto antrópico y otra afectada por la naturaleza

Se debería seleccionar dos cuencas, una que presente como principal agente productor de sedimentos a la actividad antrópica frente a la otra cuenca que tenga como principal factor de producción de sedimentos el escenario climático. Luego de haber localizado se empezaría con los monitoreos, esta fue una de las razones por la que no se pudo concluir con este paso. La falta de datos temporales de las cuencas seleccionadas hace difícil tener una idea de la dinámica compleja desarrollada en la cuenca del río Santa; se debería tener por lo menos un ciclo hidrológico. También es imprescindible realizar visitas de campo a las dos cuencas seleccionadas para establecer claramente las características de cada una en las diferentes estaciones del año.

4.3.7 Conclusiones de la dinámica de la producción de sedimentos en el río Santa

Estas se basarán en la identificación de las principales fuentes aportantes de sedimentos en suspensión ¿Quiénes son?, análisis de la data histórica de los caudales sólidos y líquidos al paso instantáneo (limnigráfo) como diario (lecturas y muestras), con las misiones realizadas se ayudara a caracterizar la dinámica de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa y subcuencas a lo largo de un ciclo hidrológico; el monitoreo realizado con una sonda de análisis de turbidez instantánea nos ayudara con algunas respuestas en la variabilidad temporal, además el análisis se complica debido a la gran variabilidad espacio-temporal de los sistemas hidrológicos y antrópicos en la cuenca del río Santa.

4.4 Datos hidrológicos

a. Recopilación de la información

Para el estudio de la dinámica de sedimentos es importante contar con una base de datos hidrosedimentológica confiable, es entonces necesario realizar un análisis detallado de cada lectura y/o muestra de la base de datos recopilada, para cada estación de estudio.

b. Fuente de los datos

La data histórica de los caudales y concentraciones usados en este estudio fueron obtenidos del Proyecto especial Chavimochic el cual opera las estaciones hidrosedimentológicas de Condorcerro (9969 km²), Santa (6815 km²) y Tablachaca (3131.4 km²); las tres ubicadas en la cuenca baja del río Santa (Figura 7).

c. Lecturas de caudales

Para las lecturas de caudales se cuenta con una regla de medición; para las estaciones de Tablachaca y Condorcerro se tiene limnógrafos que trabajan durante las 24 horas del día detalles en tabla 3. De los cuales se recuperan los datos de caudales a cada dos horas esto con fines prácticos.

Para generar la curva de calibración se realizan los aforos con una frecuencia mayor a dos veces por mes, cuando el perfil transversal del río cambia quiere decir que es oportuno realizar un nueva medición de las velocidades a diferentes alturas en la sección transversal y así cambiar la curva de calibración; en cuanto a los aforos se tiene mayor precisión en época de estiaje ya que en avenidas es difícil de realizar una buena medición debió a las condiciones poco favorables como la turbulencia de las aguas del río Santa.

d. Frecuencia de la toma de datos

En las estaciones Condorcerro y Tablachaca se realizan toma de muestras y lecturas de caudales líquidos y sólidos dos veces por día a partir del año 2000 y 2002 respectivamente; para la estación Santa se toma muestras y lecturas de caudales una vez cada 48 horas. Pero se posee una extensa base de datos de caudales al paso diario desde 1977 hasta la actualidad esto para la estación de Condorcerro (Tabla 3); en años anteriores se realizaban monitoreos de los caudales sólidos y líquidos a la cuenca alta del río Santa.

4.4.1 Tratamiento de datos hidrológicos

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

4.4.1.1 Discreción de los datos

a. Serie temporal de datos

Con ayuda de un hidrográma y de forma visual se seleccionó el periodo con la mejor crónica en cada estación; al decir se analizó la distribución temporal de la serie más completa (mayor número de muestras por día y por un periodo como mínimo de un año hidrológico), y su calidad de los datos (los caudales no deben de repetirse por más de tres lecturas, menos en época de lluvia); ello para cada estación.

Estación Condorcerro se analizó la serie temporal entre el periodo feb-00 al feb-10 por contar con una frecuencia de una a dos muestras por día y caudales al paso horario; pero con una data histórica de caudales líquidos al paso diario desde 1977-2002; no se tiene problemas en la continuidad de los caudales diarios (Figura 9).

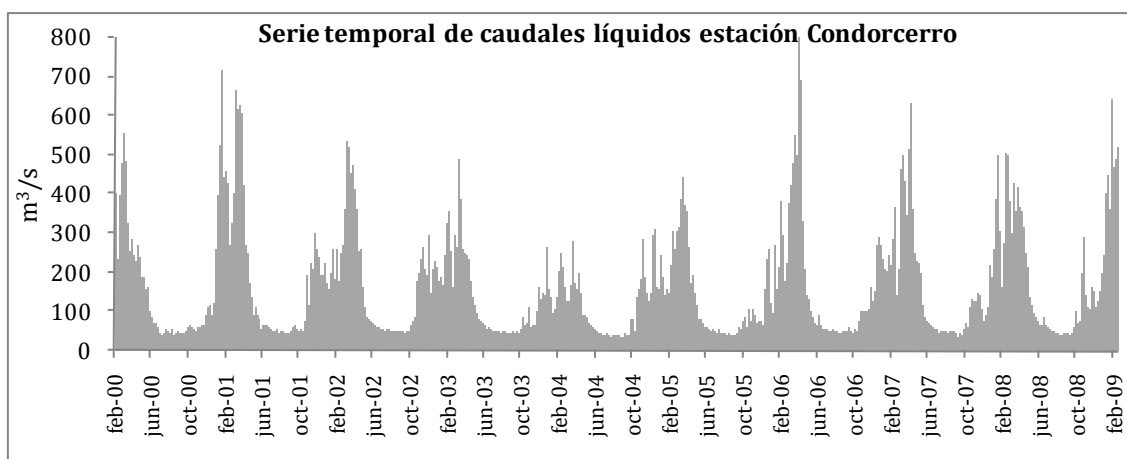


Figura 9. Lecturas incompletas de caudales líquidos estación Condorcerro.

Estación Tablachaca con información a partir del año 2002, años atrás no existía una estación de monitoreo; se realizaban algunos aforos pero eventuales a lo largo del río Tablachaca. Esta estación presenta algunos problemas de continuidad y frecuencia de lecturas de caudales y muestras de sólidos en suspensión (Figura 10).

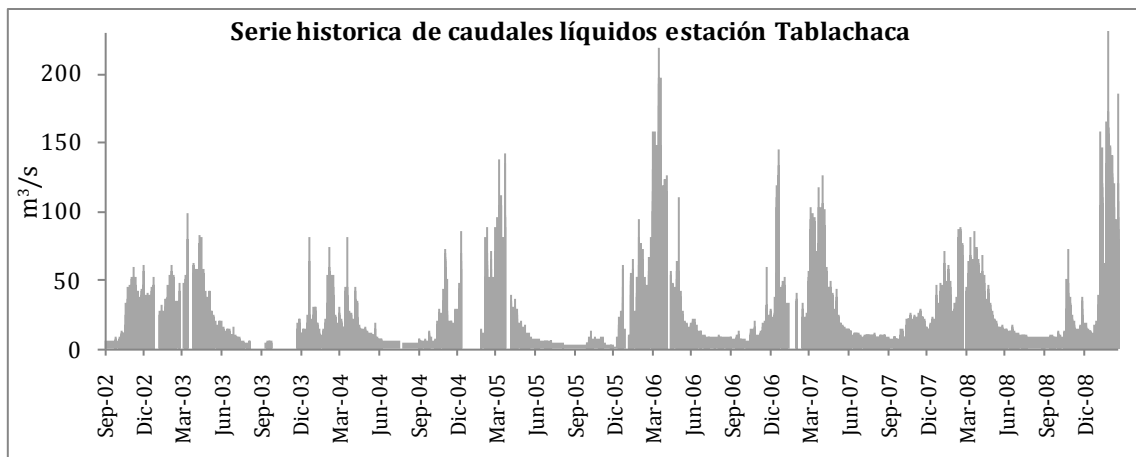


Figura 10. Lecturas incompletas de caudales líquidos estación Tablachaca.

Estación Santa posee información a partir del año 2002, tenemos como principal problema la frecuencia de los datos siendo esta cada 48 horas normalmente (Figura 11).

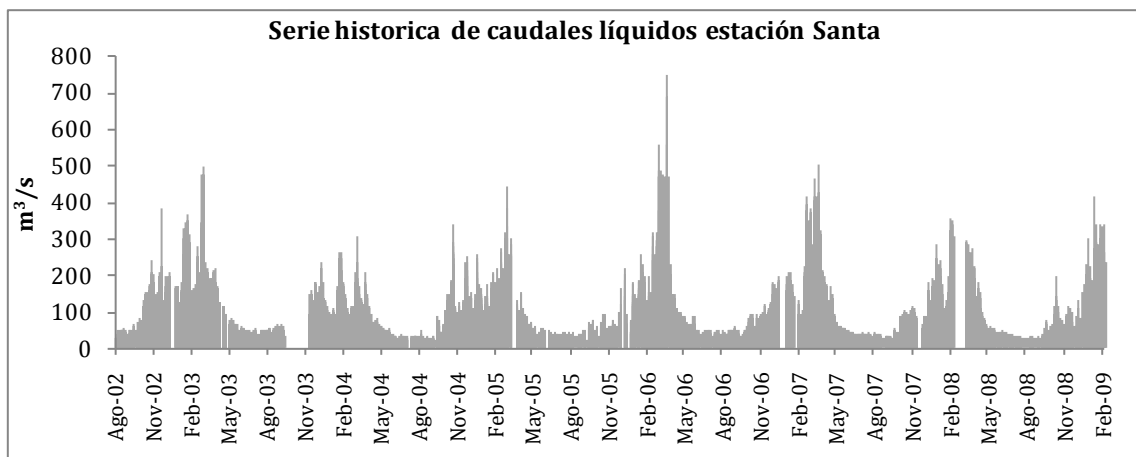


Figura 11. Lecturas incompletas de caudales líquidos estación Santa.

b. Resolución temporal de los datos

Para evaluar al detalle el número de concentraciones y caudales disponibles en las estaciones de monitoreo; se considero como promedio una resolución de dos muestras diarias por estación, después se cálculo a nivel mensual el porcentaje de datos disponible en cada mes y por estación (Figura 12, 13 y 14); es decir para el mes de enero (31 días) debe de existir 62 datos, ello se consideraría con un mes con un 100% de datos llenos.

Es necesario conocer si la serie de datos mejor conformada compromete caudales en tiempo de estiaje y lluvias. Debido al posible 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 76 m³/s, para las horas de mayor demanda de energía durante el día; y sabiendo que el caudal promedio en tiempo de estiaje para ese punto es de 25.6 m³/s.

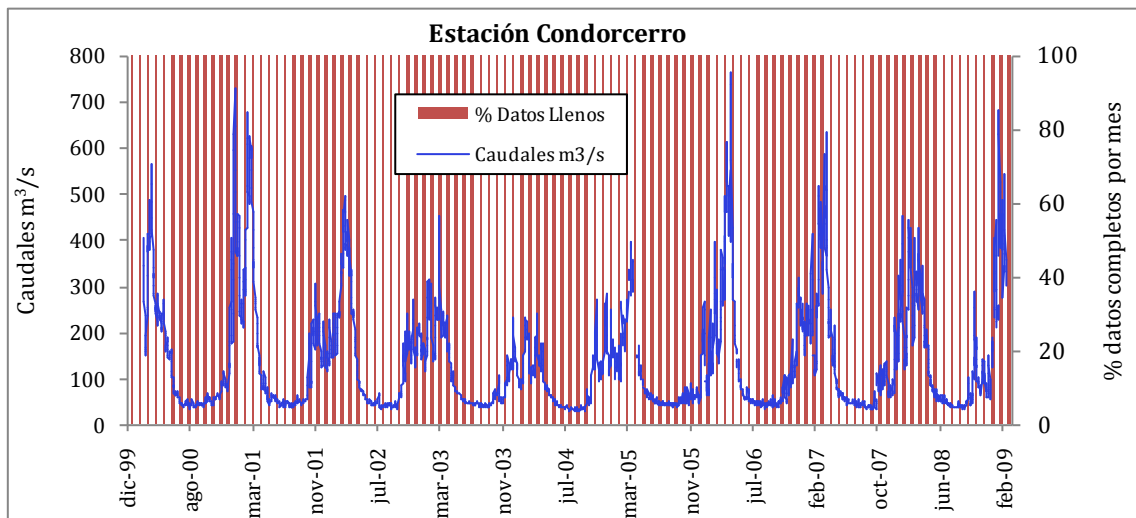


Figura 12. Porcentaje de caudales disponibles para la estación Condorcerro.

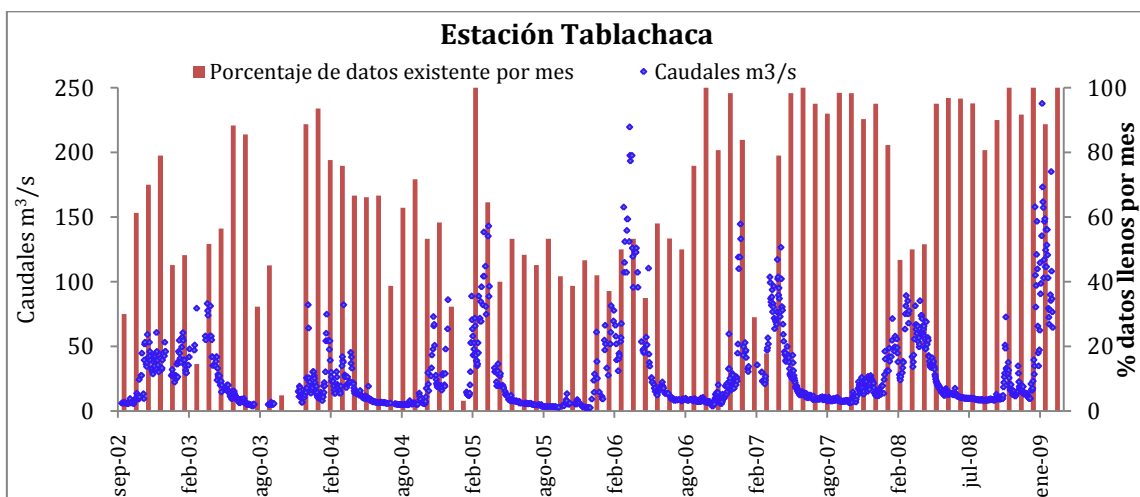


Figura 13. Porcentaje de caudales disponibles para la estación Tablachaca.

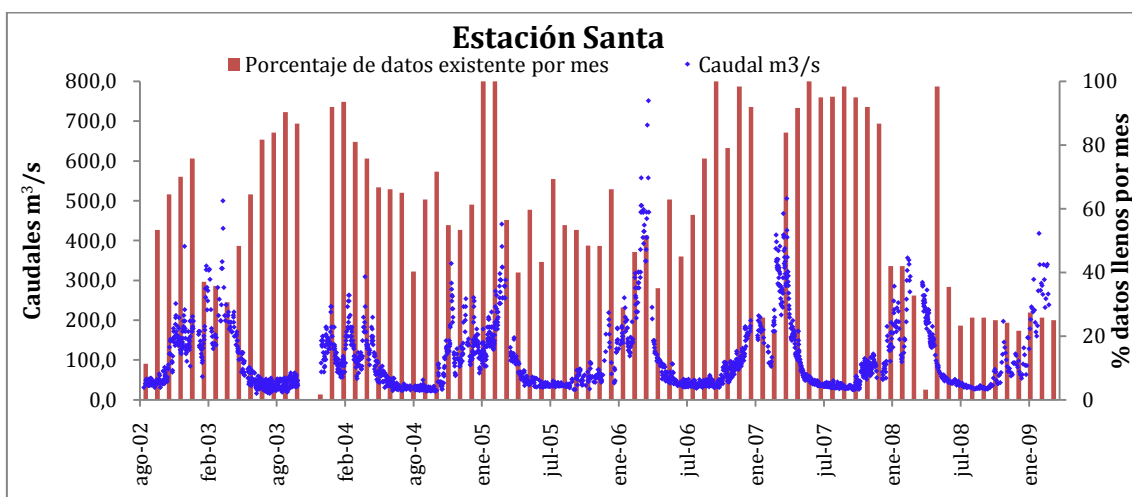


Figura 14. Porcentaje de caudales disponibles para la estación Santa.

4.4.1.2 Calidad de los datos

Se observó los caudales y concentraciones en la serie de datos, encontrando 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 para este supuesto es que un caudal en el río Santa después de 12 horas no será el mismo debido a la variabilidad que presenta este, siendo mayor la variabilidad en caudales de avenidas; ello se comprobó con las lecturas del limnógrafo desde el año 2002 hasta la febrero 2009 (Figura 15, 16 y 17).

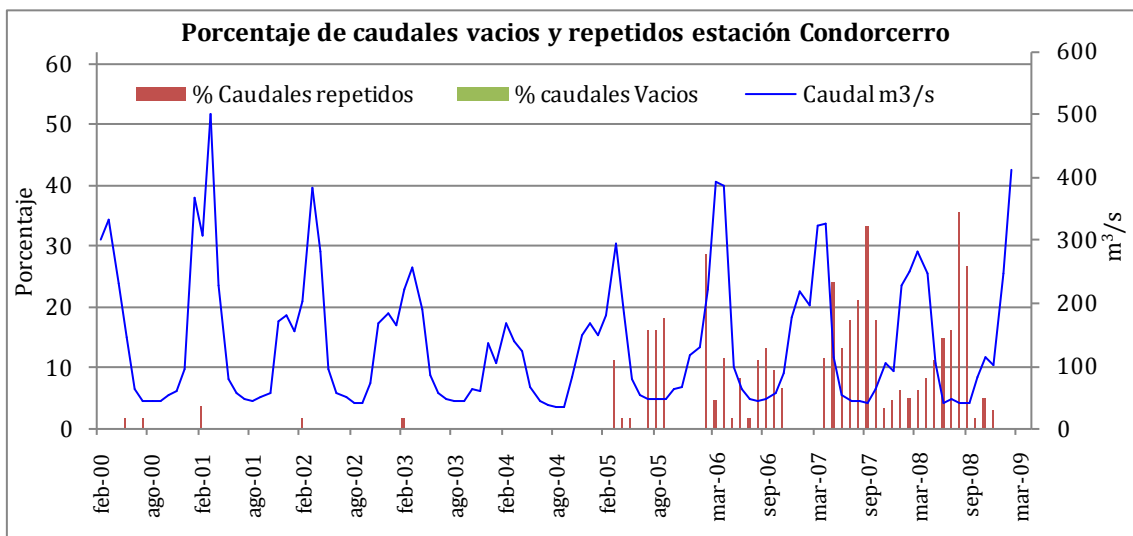


Figura 15. Panorama de los caudales para la estación Condorcerro.

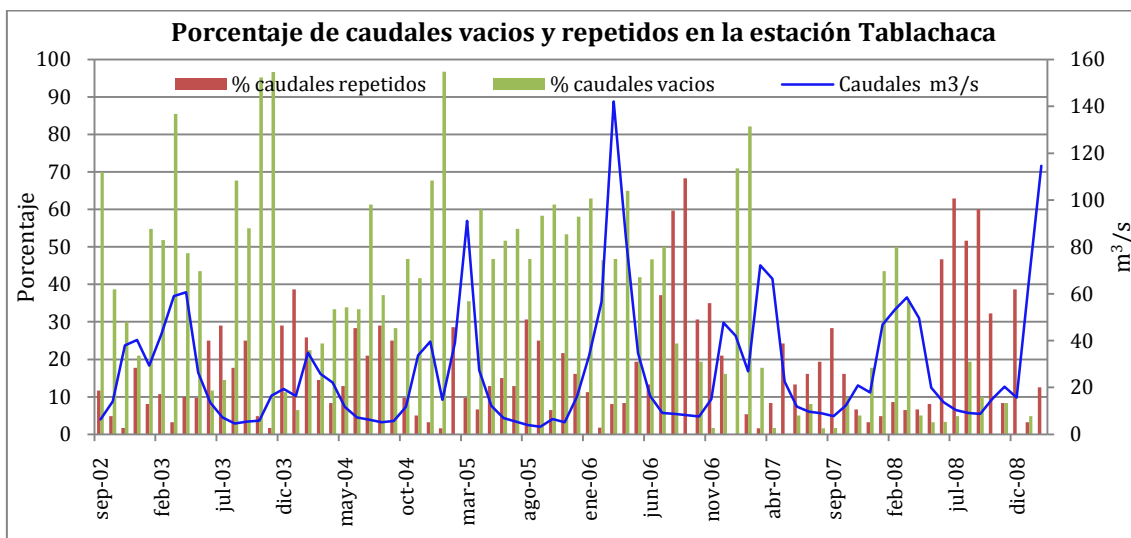


Figura 16. Panorama de los caudales para la estación Tablachaca.

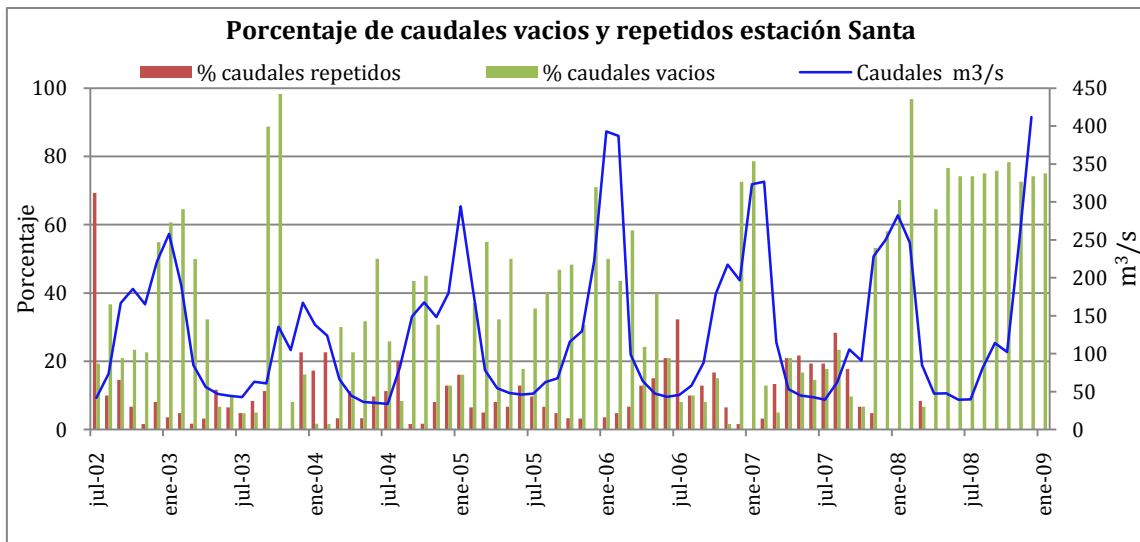


Figura 17. Panorama de los caudales para la estación Santa.

a. Variación entre los caudales de la mañana y la tarde de la serie completa

En uno de los intentos en generar un modelo para llenar los datos en blanco, se procedió a cuantificar la relación existente entre caudales de mañana, tarde y el porcentaje de aporte de ambos para el dato considerado como el representativo del día.

Para realizar el análisis de la variación de los caudales (mañana y tarde) en base a caudales de la tarde se empleo (Ecuación 6):

$$\%V = 100 * \left[\frac{Q_{mañana} - Q_{tarde}}{Q_{mañana}} \right] \dots\dots\dots \text{(Ecuación 6)}$$

La cual compara la diferencia de volúmenes en porcentaje entre los caudales de la mañana y tarde.

Este análisis tiene como fin de comprobar la hipótesis que los caudales no se repetirán durante varios días solo para algunas excepciones (Figura 18, 19, 20 y 21), de demostrar cuán confiable es tomar como caudal representativo solo un caudal por día es decir solamente el caudal de la mañana ó la tarde y un tercero con el intervalo de tiempo que fueron tomados durante 24 horas, este último es el que mejor refleja el caudal representativo del día.

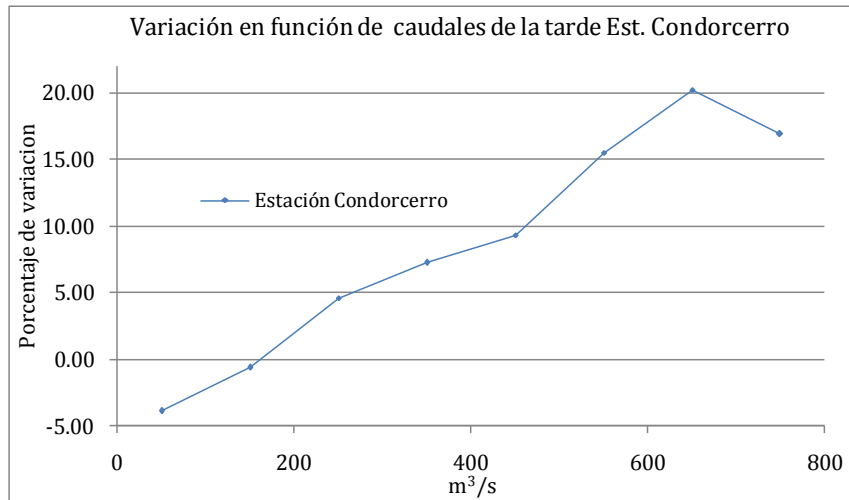


Figura 18. Variación entre caudales de la mañana y tarde estación Condorcerro.

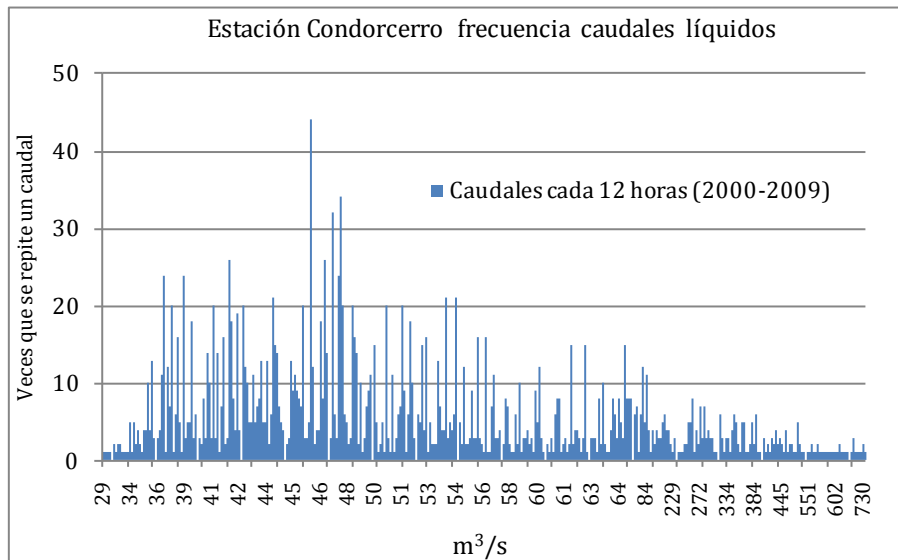


Figura 19. Frecuencia con la que se repite los caudales para la estación Condorcerro.

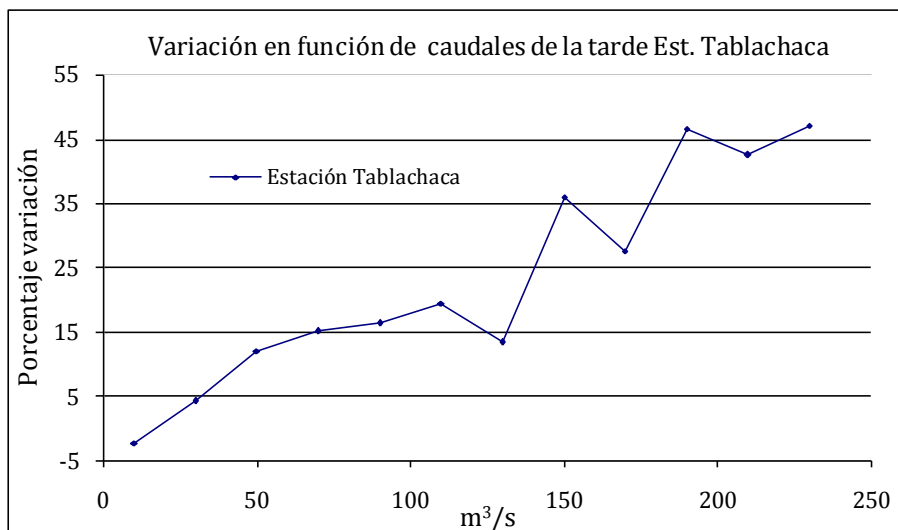


Figura 20. Variación entre caudales de la mañana y tarde estación Tablachaca.

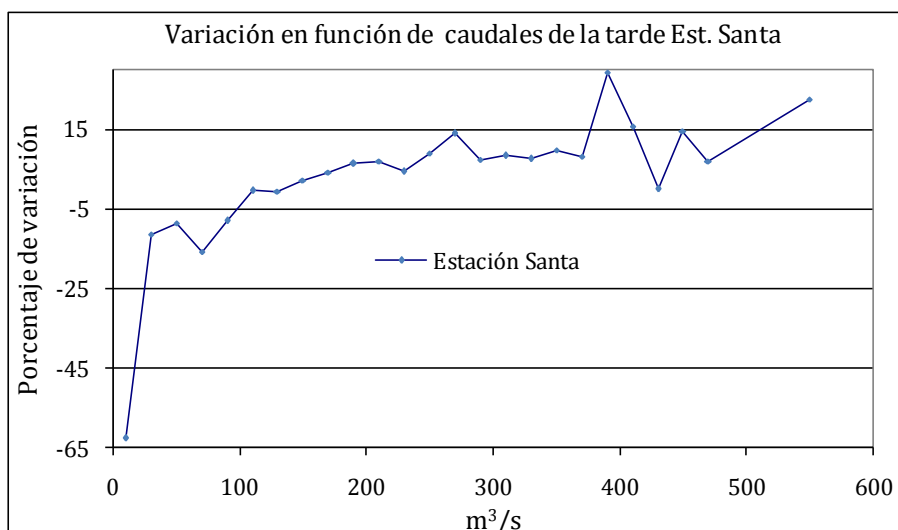


Figura 21. Variación entre caudales de la mañana y tarde estación Santa.

4.4.1.3 Obtención de las series completas de caudales líquidos

En un primer paso en la purga de los datos se ubico y elimino todas las lecturas repetidas por más de dos días en la serie de datos para caudales en tiempo de lluvias ya que en tiempo de estiaje este evento podría ocurrir; Solo para fines de cálculo consideraremos que un caudal repetido es igual a un caudal vacio, bajo las condiciones antes mencionadas.

a. Completando datos mediante la suma y diferencia entre estaciones

Debido a la ubicación de las estaciones (Figura 7) 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 7).

$$Q_{Est. Santa} = Q_{Est. Condorcerro} - Q_{Est. Tablachaca} \dots\dots\dots (Ecuación 7)$$

Esta ecuación la consideraremos válida para caudales promedios diarios debido a la variabilidad que presenta el río Santa.

En los cálculos realizados entre las estaciones se tuvo problemas para algunos caudales diarios ya que esta daba muchas veces caudales negativos ($Q_{Est. Tablachaca} = Q_{Est. Condorcerro} - Q_{Est. Santa}$) lo cual es imposible en la realidad; entonces estos errores se le atribuye a la diferencia horaria en la toma de muestras que oscila entre una hora para los caudales tomados entre las estaciones de Tablachaca, Santa y Condorcerro, y una

diferencia horaria desconocida para la estación La Balsa. Otro de los errores podría ocurrir al momento de elaborar una curva de calibración con aforos con bajo grado de confiabilidad, e incluso afectando el método de aforo; en ríos de montaña se hace muy difícil realizar aforos bien hechos a pesar que estos sean hechos con la mayor minuciosidad posible.

b. Completando datos mediante interpolación de datos

Luego de un llenado de datos mediante suma y resta de caudales aun quedan demasiadas fechas sin datos siendo este el principal problema para la estación Santa, entonces un segundo paso para la reconstrucción de los caudales; Se formuló una hipótesis a partir de la variabilidad de los caudales a través del tiempo; esta permite realizar una regresión lineal para una y hasta cuatro muestras faltantes ($0 < \text{Lectura de caudales} < 48$ horas).

- Llenado de un espacio en blanco

Para llenar un caudal en blanco, se interpola en base al tiempo transcurrido entre la lectura anterior y la lectura siguiente (Ecuación 8).

Cálculo del caudal vacio (Q_x)

$$Q_x = \frac{(Q_{x-1} * n) + (Q_{x+1} * m)}{n + m} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 8)}$$

Donde: $n > 0$ horas, $m > 0$ horas y $m+n \leq 24$ horas.

- Llenado de dos espacios en blanco

Para llenar los datos faltantes en un periodo menor a 48 horas (Ecuación 9 y 10).

$$Q_x = Q_{x-1} + \left(\frac{1}{3} * (Q_{x-1} - Q_{x+2}) \right) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 9)}$$

$$Q_{x+1} = Q_{x-1} + \left(\frac{2}{3} * (Q_{x-1} - Q_{x+2}) \right) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 10)}$$

Donde:

Q_x y Q_{x+1} , son caudales consecutivos entre un periodo máximo de 48 horas.

c. Llenado mediante correlación lineal simple utilizando Cormul

Después de haber aplicado los dos pasos anteriores, en dicha base aun se encuentran vacios, esta será finalmente completada mediante un modelo de correlación entre los caudales observados en las estaciones de La Balsa, Santa, Tablachaca y Condorcerro; reconstruir los datos faltantes de la serie histórica de la estación Santa, será posible gracias a los caudales diarios de la estación La Balsa ubicada aguas arriba de dicha estación. De esta primera correlación se observan algunos puntos muy alejados de la línea de tendencia, para un mejor calculo se eliminaron dichos puntos, obteniendo así una correlación lineal con mayor ajuste (Figura 22).

Dicha relación tiene un $R^2 = 0.91$, D.E. residuos = $30.5 \text{ m}^3/\text{s}$, Desvío Medio = $18.6 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 22).

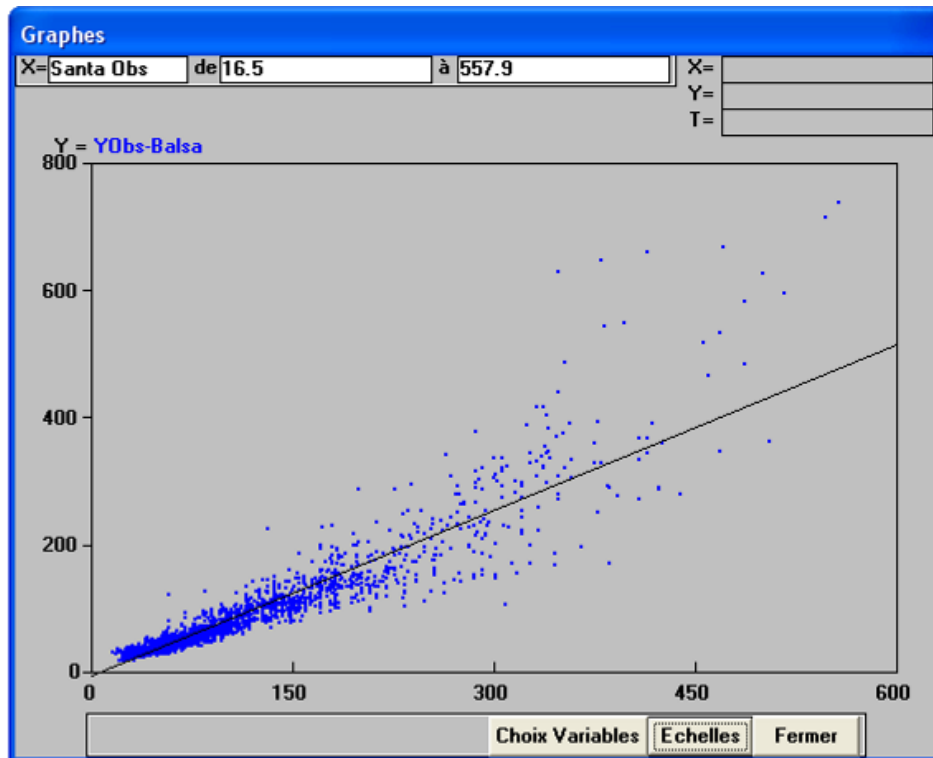


Figura 22. Relación entre caudales diarios entre la estación la Balsa y Santa.

4.5 Datos de caudales sólidos en suspensión disponibles de Chavimochic

a. Toma de muestras

Los muestreos en las estaciones Tablachaca y Condorcerro se realizaron dos veces al día todos los días (Tabla 3), efectuándose el primer muestreo y lectura entre las 06:00 - 07:30 horas y el segundo entre las 17:00 - 18:00 horas.

Cada muestreo se realizó desde los *carros huaros* con un *muestreador Clape*; primero se divide en tres partes la sección horizontal del río ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ con respecto al ancho del Río), de cada una se saca una muestra, a $\frac{1}{4}$ de la profundidad, las tres muestras tomadas de cada punto serán mezcladas en el laboratorio para finalmente sacar una sola muestra. En la Estación Santa se realiza un muestreo dejando un día (Figura 62 y 63).

b. Determinación de concentraciones en el laboratorio Chavimochic

En el programa de medición de sedimentos del Proyecto Especial Chavimochic se realiza análisis de calidad procesando parámetros de pH, conductividad eléctrica, turbidez en (NTU) unidades nefelométrías de turbidez, material sólido en suspensión.

Para los sedimentos en suspensión la metodología empleada en el laboratorio de sedimentos es:

- Primero se toma el volumen de la muestra (1 Litro), luego se espera que floculen las arenas y limos esto ayudara en un filtrado más rápido luego se vierte todo el contenido en un papel filtro que ha sido pesado previamente, en caso quedara sedimentos estos deben lavarse con agua destilada utilizando una pizeta, después de filtrar todo el líquido por gravedad se lleva a la estufa por 24 horas a 105 °C terminado el tiempo se pesa el papel filtro con sedimentos, finalmente cada muestra será guardada para futuros estudios o fiscalizaciones.

4.5.1 Tratamiento de los datos de sólidos en suspensión

Para el tratamiento de los datos de concentraciones se realizó un trabajo similar al de los caudales líquidos, pero no se completo ninguna lectura de concentración; No se tuvo problemas con los datos repetidos, el principal problema es el porcentaje de espacios vacios que fueron cuantificados por mes (Figura 23, 24 y 25).

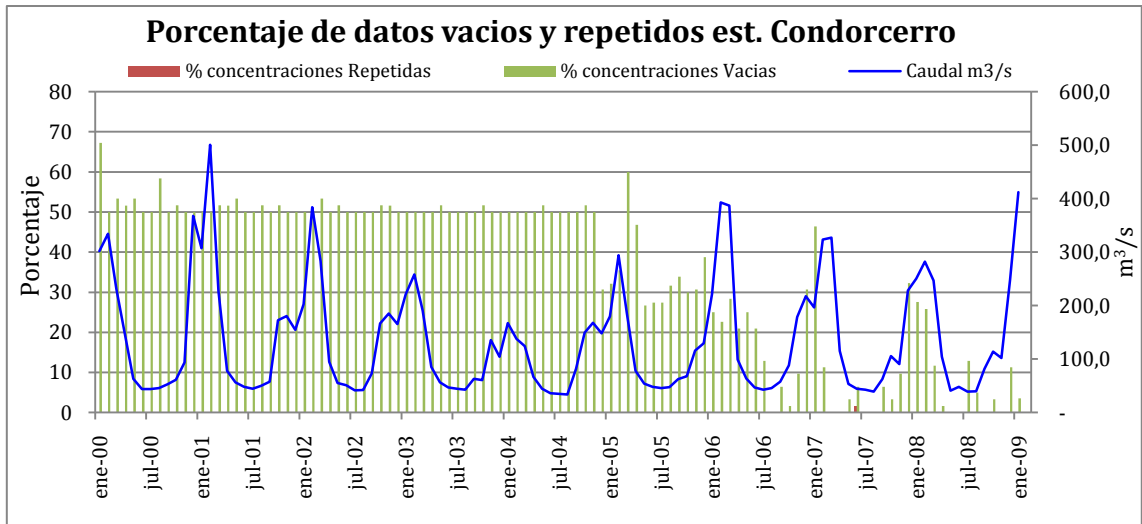


Figura 23. Datos de concentraciones vacías y repetidas en la estación Condorcerro.

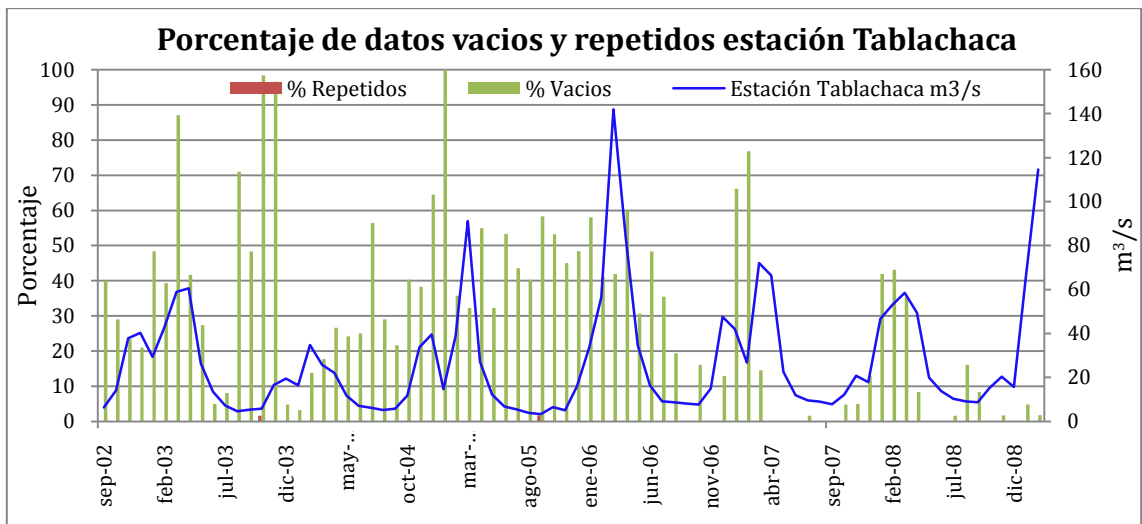


Figura 24. Datos de concentraciones vacías y repetidas en la estación Tablachaca.

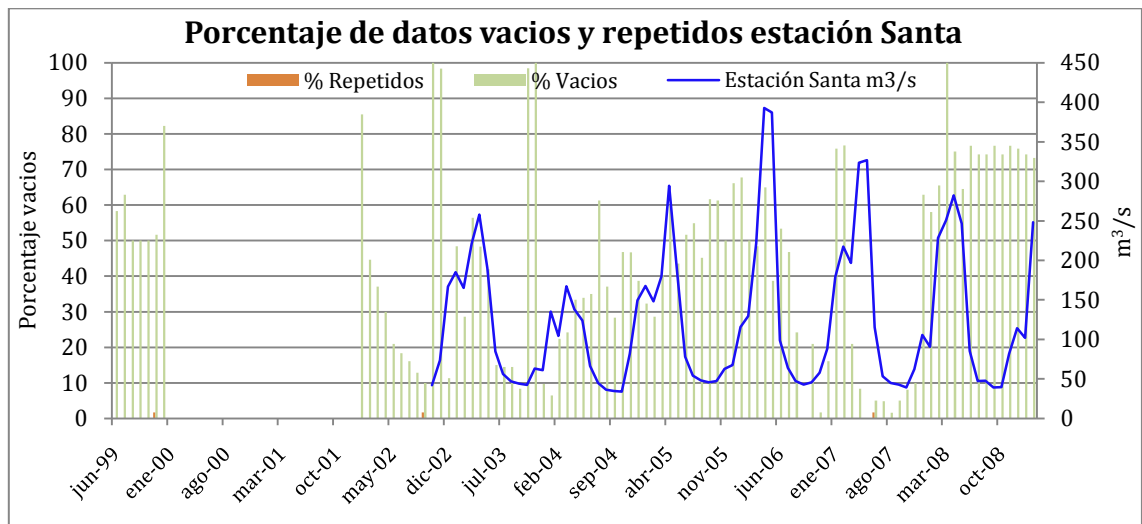


Figura 25. Datos de concentraciones vacías y repetidas en la estación Santa.

4.5.1.1 Cálculo de los caudales sólidos anuales para las estaciones de estudio

En cuanto a la calidad de los datos de concentración no se presentaron inconvenientes (Figura 23, 24 y 25).

Para realizar un balance anual y un cálculo de los caudales sólidos instantáneos en la cuenca del río Santa se poseen tres estaciones, pero con varios días sin información (ver 4.3.3 - a); para el llenado de los datos faltantes se planteo cuatro metodologías:

Metodología 1 (Cálculo directo con llenado de datos faltantes)

a. Parte de la cuantificación del material sólido en suspensión a partir de la multiplicación entre el caudal líquido y las concentraciones ($Q_s = MES \times Q$); pero debido la falta de datos en muestra base de datos es necesario llenar datos mediante otros métodos.

b. Completando datos mediante suma y resta de caudales sólidos en suspensión en las estaciones Santa, Tablachaca y Condorcero (Figura 7); La suma de las estaciones Tablachaca y Santa nos dan la estación Condorcero, es aprovechando esta característica que vamos a llenar los vacios de caudal sólido en suspensión siempre y cuando haya información en dos estaciones (Est. Condorcero= Est. Santa+ Est. Tablachaca).

c*. Luego de ello se procederá a llenar los vacios del caudal sólido a partir de los caudales líquidos aplicando modelos anuales, generados de una correlación lineal simple entre el caudal sólido y el caudal líquido por año hidrológico y para cada estación ($Q_s = aQ^b$).

*Este paso se desarrollo en la metodología 2.

Metodología 2 (Modelo anual)

Se basa en el cálculo anual del caudal sólido a partir de caudales líquidos diarios aplicando el modelo de correlación potencial anual entre el caudal líquido y el caudal sólido para cada estación ($Q_s = aQ^b$); es decir una relación año por año.

Metodología 3 (Modelo Global)

Este cálculo del caudal sólido en suspensión se realizó con el modelo generado de una correlación potencial simple de toda la data histórica, para cada estación en estudio; calculando a partir de caudales líquidos diarios, caudales sólidos en suspensión diarios. Ello a partir de la primera fase de llenado de caudales líquidos ($Q_s=cQ^d$).

Metodología 4 (Cálculo directo e interpolando datos vacíos)

Esta parte del cálculo directo del caudal sólido en suspensión ($Q_s = MES \times Q$); finalmente el llenado de los datos e hizo mediante interpolación con ayuda del programa Hydraccess el cual en la fase de cálculo de caudal sólido permite realizar una interpolación de los datos faltantes.

4.6 Desarrollo de la metodología 3 (Modelo Global)

Para generar nuestros modelos en la metodología 2 y 3 se empezó de un análisis global, luego a una escala anual y finalmente mensual esta última debido a la dispersión de puntos observada en los primeros años de monitoreo.

4.6.1 Modelo hidrosedimentológico entre caudales líquidos y sólidos global

- Para aprovechar la amplia serie histórica de caudales líquidos y solucionar el problema de falta de caudales sólidos en suspensión, se formuló un modelo de correlación potencial simple entre caudales líquidos y sólidos (Ecuación 1 y Figura 26, 27 y 38) para poder calcular el caudal sólido a partir de los caudales líquidos.

a. Estación Condorcerro.- En un primer modelo se observa un gráfico con dos tendencias (Figura 26), el punto de quiebre se produce a $80 \text{ m}^3/\text{s}$, además observamos una nube dispersa de puntos para caudales entre $50\text{-}90 \text{ m}^3/\text{s}$, ello se le atribuye probablemente a la regulación y tratamiento del agua por la hidroeléctrica ubicada en el Cañón del Pato (1880 msnm en el cauce del río) la cual necesita de $76 \text{ m}^3/\text{s}$ para el funcionamiento de sus turbinas.

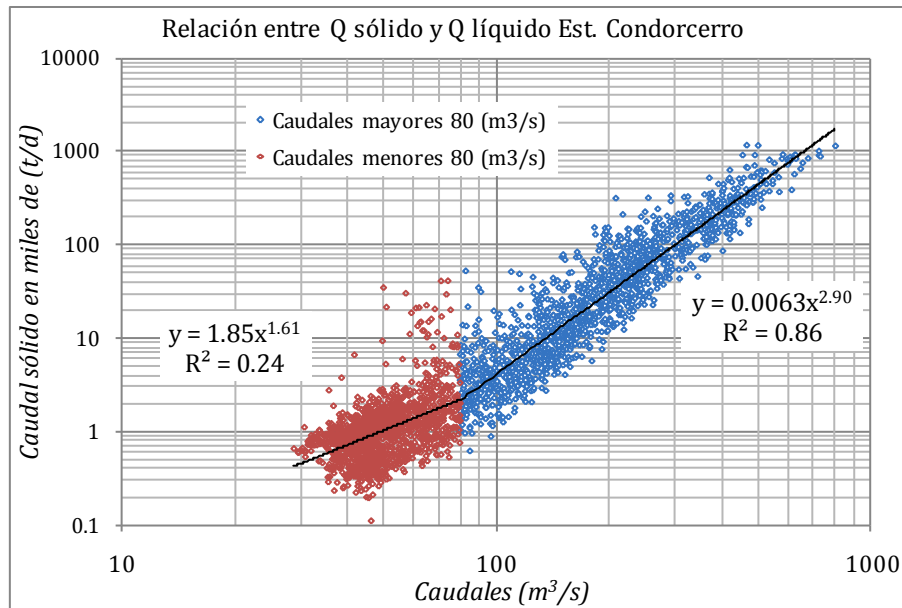


Figura 26. Relación entre el caudal líquido y sólido en la estación Condorcero.

- Análisis de la dispersión de puntos

En un análisis con mayor minuciosidad para un primer modelo generado en la estación Condorcero donde se presenta una fuerte relación entre el caudal líquido y sólido en suspensión para caudales mayores a 80 m³/s. Se clasificó toda la data histórica hidrosedimentológica en dos grupos por año, uno en época de lluvias o altos caudales (H) y otro grupo en época de estiaje o bajos caudales (L) (Figura 27); entonces se observó que la nube de puntos pertenece al año 2000 H (época de lluvia) (Figura 27), esta diferencia se le atribuye al método de toma y procesamiento de datos debido a los siguientes fundamentos:

Para procesar las muestras de sedimentos en suspensión se utilizó el método de la evaporación, mediante el uso de la Cápsula de porcelana, con muestras de 100 ml cuyos resultados se obtuvieron en gr/l, a ello se le suma un error técnico en la recolección de las muestras debido a la falta de capacitación de estos. A partir de Mayo del 2005 hasta la actualidad se empezó a trabajar con el método que se basa en las normas internacionales ASTM D3977-97 (2002). El cual es el método del vacío con el uso de bombas de succión o a gravedad utilizando muestras con sedimentos en suspensión de 1000 ml.

Entonces se concluye que la dispersión de puntos que se observa en la gráfica se debe al método de medición de sedimentos en el primer año de medición (2000) para los caudales altos.

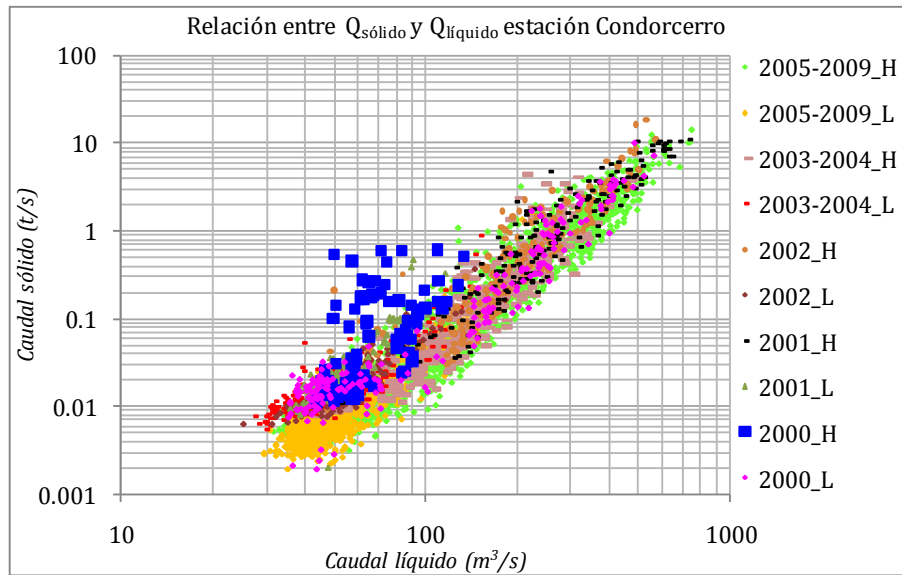


Figura 27. Caudales sólidos clasificados por época de lluvias y estiaje.

El análisis tiene como objetivo encontrar el ¿porqué? de la dispersión, de tal manera que el coeficiente de determinación (r^2) sea un buen resumen del mismo. Entonces luego de haber detectado el problema de la nube de puntos se realizó un nuevo cálculo en las tendencias para la estación Codorcerro (Figura 28).

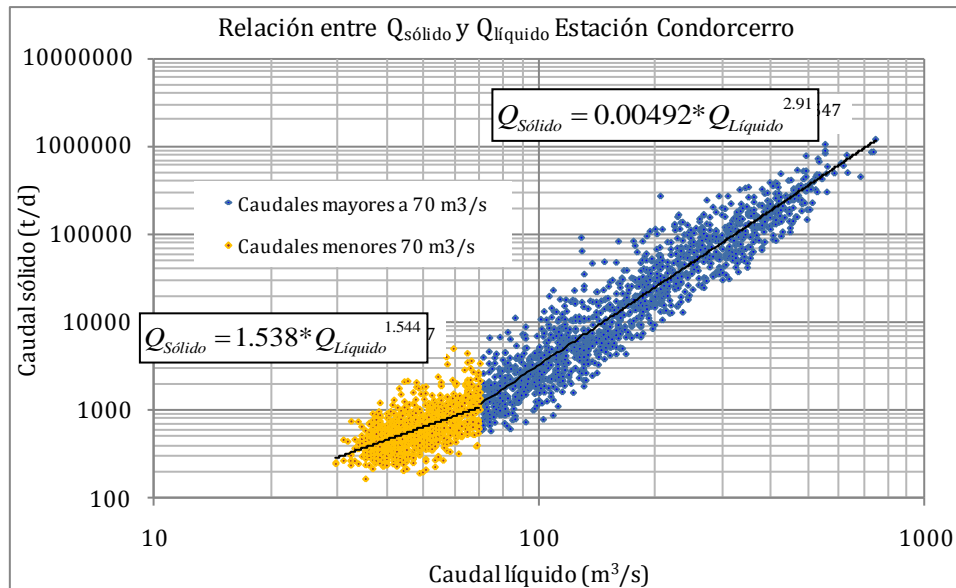


Figura 28. Modelo hidrosedimentológico interanual para la estación de Condorcerro.

b. Estación Tablachaca.- Abarca la cuenca del Tablachaca; Se observa dos puntos de quiebre que se ubican en caudales de 12 y 45 m^3/s ; se puede observar que para caudales menores a 12 m^3/s la tendencia tiene un exponente de 1.5, pero el exponente llega a

uplicarse con las primeras lluvias (caudales entre 12-45 m³/s), al transcurrir la época de lluvia llegamos a las máximas precipitaciones donde el exponente del transporte de sedimentos se simplificara a 1.6 (Figura 29).

Una explicación a este evento es que para caudales menores de 12m³/s (época de estiaje Figura 29) los sólidos en suspensión provienen del lecho del río, pero el transporte de sedimentos se incrementa durante las primeras lluvias ya que estas arrastran los sedimentos producidos durante el año por la actividad antrópica (minas, agricultura, etc) y la acción de la naturaleza, además de un stock en el lecho del río, el cual no fue transportado con caudales inferiores, muchos de estos sedimentos provienen de los continuos deslizamientos en la cuenca media y alta del río Tablachaca; este stock disminuirá con las continuas lluvias durante el año hidrológico, esperando repetirse con el siguiente ciclo hidrológico.

No se aprecian problemas técnicos en cuanto al método de medición de caudales sólidos y concentraciones, ya que fueron hechas a partir del año 2002, a estas alturas el personal fue adecuadamente capacitado.

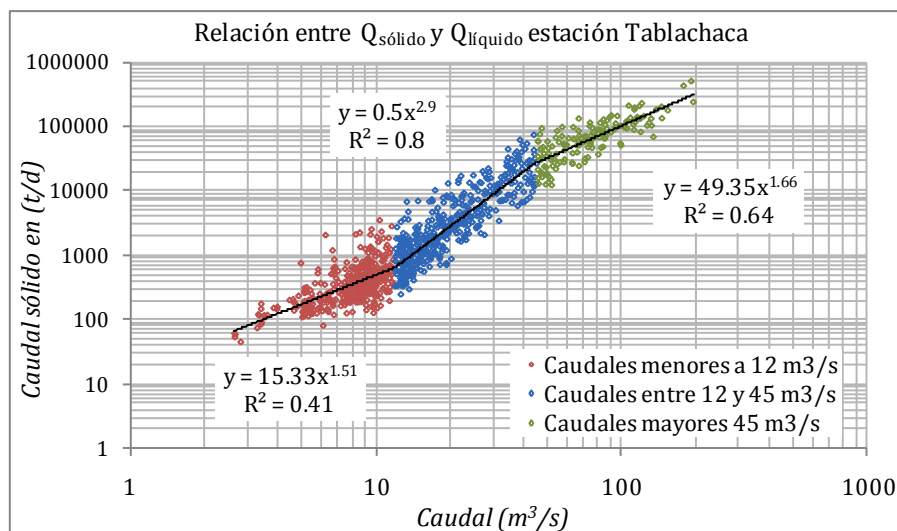


Figura 29. Modelo hidrosedimentológico para la estación Tablachaca.

c. Estación Santa.- Para esta estación se aprecian dos tendencias una para caudales menores a 70 m³/s y otra para mayores a dicho caudal (Figura 30), para ambas tendencias se observa una dispersión de puntos; uno debido a la fuerte acción antrópica en la cuenca

media y alta donde se observó actividades de extracción de arena del lecho del río, minería, agricultura, suelos donde no se aplica conservación de suelos (Figura 69-72), además de la regulación y tratamiento de aguas por la hidroeléctrica de Duke Energy que se encuentra ubicada en el Cañón del Pato (Figura 77-79).

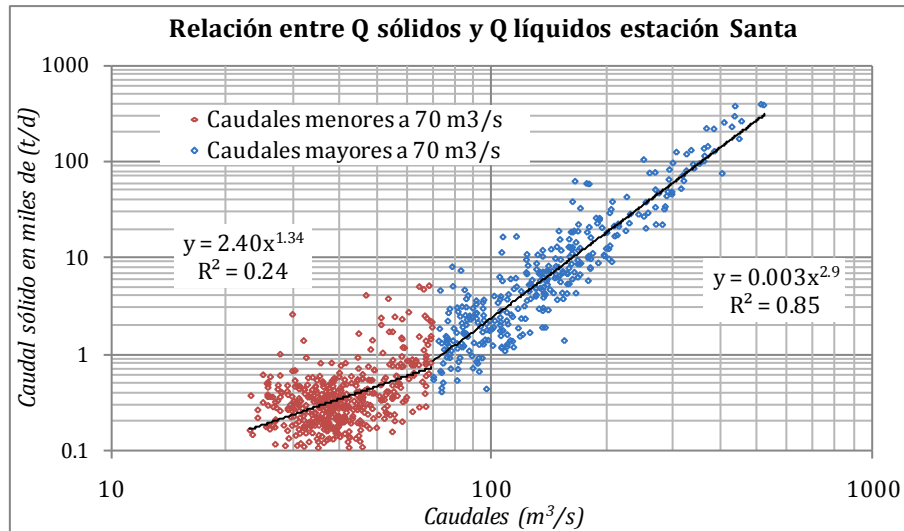


Figura 30. Relación entre el caudal líquido y sólido en la estación Santa

Finalmente del análisis temporal de los datos hidrosedimentológicos de las tres estaciones de monitoreo se observa la dinámica de la producción de sedimentos mediante la ecuaciones originadas cuyos exponentes para dichas estaciones son de: Condorcerro con dos tendencias (1.54 y 2.91), Tablachaca tres tendencias (1.51, 2.99 y 1.66) y Santa dos tendencias (1.34 y 2.9), el poder de purga de la cuenca va cambiando según los caudales.

5.6.2 Cálculo de los caudales sólidos diarios aplicando la metodología 3

Luego de haber discutido sobre las dispersiones y las tendencias para los modelos de producción de sedimentos para cada una de las estaciones, es necesario calibrar los datos de caudales en suspensión instantáneos a partir de caudales líquidos instantáneos; Aplicando las ecuaciones de los modelos con mejores resultados.

a. Calibración del modelo de sedimentos en suspensión

Estación Condorcerro.- La calibración se realizó en el periodo de setiembre del 2007 a agosto de 2009, este periodo presento la mayor información disponible en nuestra base de datos, con caudales y muestras cada 12 horas (Figuras 12, 15 y 22); el modelo

tiene dos ecuaciones, la primera $Q_{\text{Sólido}} = 0.0000000569 \times Q_{\text{Líquido}}^{2.91}$ es para la predicción de caudales sólidos instantáneos a partir de caudales líquidos menores a $70 \text{ m}^3/\text{s}$ y la segunda ecuación es $Q_{\text{Sólido}} = 0.00001780 \times Q_{\text{Líquido}}^{1.544}$ se aplica a caudales mayores a $70 \text{ m}^3/\text{s}$, se puede apreciar que la primera ecuación subestima mientras que la segunda sobreestima la producción de sedimentos.

Para generar el rango de error máximo y mínimo se trabajó con el exponente de la ecuación $\beta = \pm 0.1$ (Ecuación 1); agregando y restando 0.1 en cada modelo y a cada una de las tendencias en dicho modelo (Figura 28) basándonos en la concepción que a mayor exponente existe mayor efecto de purga. Se observa que para caudales menores a $70 \text{ m}^3/\text{s}$ la producción de sedimentos es subestimada hasta por la tendencia máxima generada; por otra parte para caudales mayores a $70 \text{ m}^3/\text{s}$ la tendencia máxima es la que más se aproxima a los caudales sólidos observados (Figura 31).

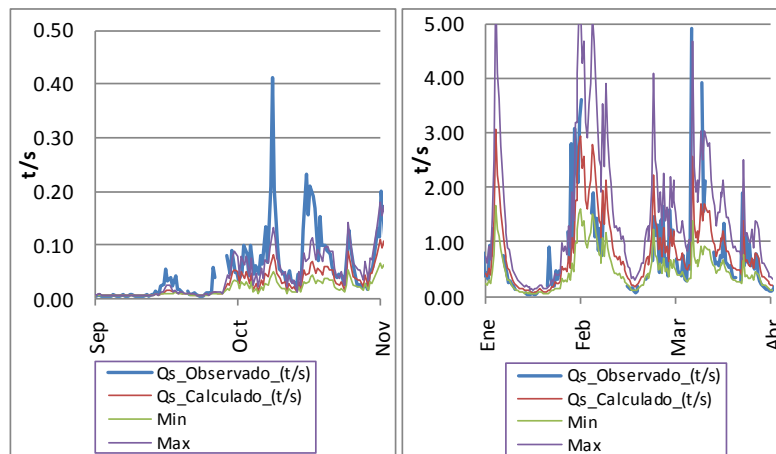


Figura 31. Cálculo del caudal sólido instantáneo estación Condorcero (2007-2009).

Estación Tablachaca.- El modelo generado de la correlación lineal no refleja los caudales observados ya que subestima y sobreestima la producción de sedimentos debido a la variabilidad de la producción de sedimentos para dicha cuenca haciendo impredecible el cálculo de la producción de sedimentos para dicha cuenca (Figura 32).

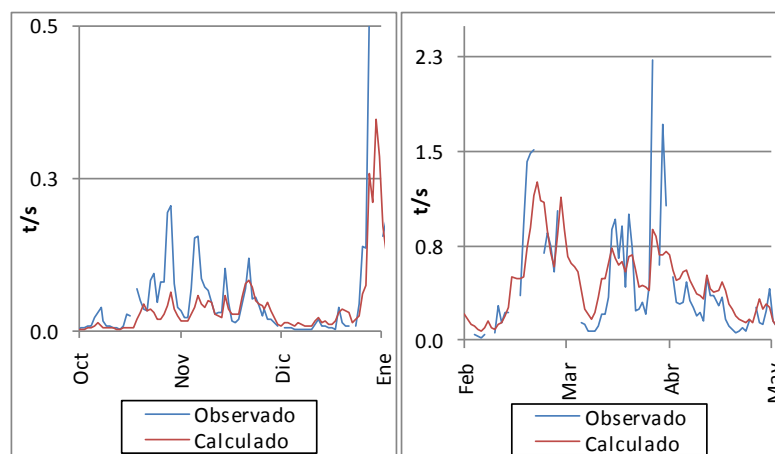


Figura 32. Cálculo del caudal sólido instantáneo estación Tablachaca (2007-2009).

Estación Santa.- Se generó buenos resultados a pesar del problema de los eventos de picos de descargas de caudal sólido que son menos frecuentes que en la cuenca del río Tablachaca. Se observa una ligera sobreestimación del caudal sólido en para caudales líquidos elevados es decir mayores a $70\text{m}^3/\text{s}$ (Figura 33).

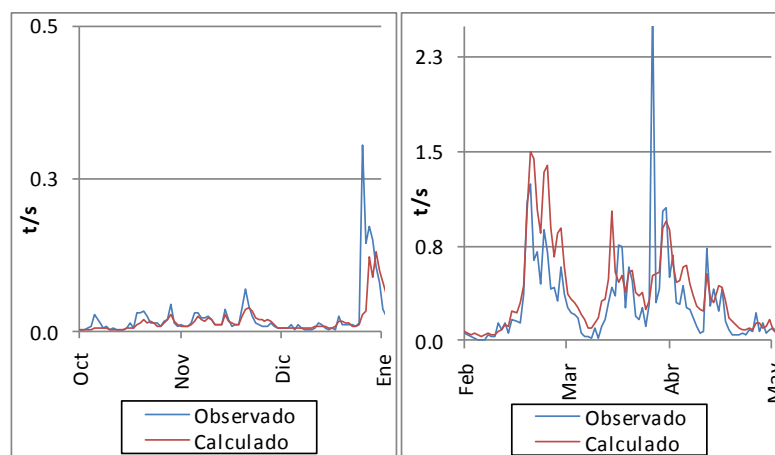


Figura 33. Cálculo del caudal sólido instantáneo estación Santa (2007-2009).

4.7 Desarrollo de la metodología 2

4.7.1 Modelo hidrosedimentológico entre caudales líquidos y sólidos anual

Para el periodo 2000-2009 se observó alta variabilidad de las tendencias anuales, detectando que los tres primeros años presentan dispersión de puntos, esto se le atribuye al método de extracción y procesamiento de los datos de concentraciones además de la falta de capacitación al personal a cargo de esta labor. Para los siguientes años se observa dos tendencias con mayor claridad, con algunas dispersiones pero esta debido a la dinámica

que origina el afluente Tablachaca; siendo este importante en las altas cargas de concentraciones solidas a nivel de la estación Condorcero (Figura 34).

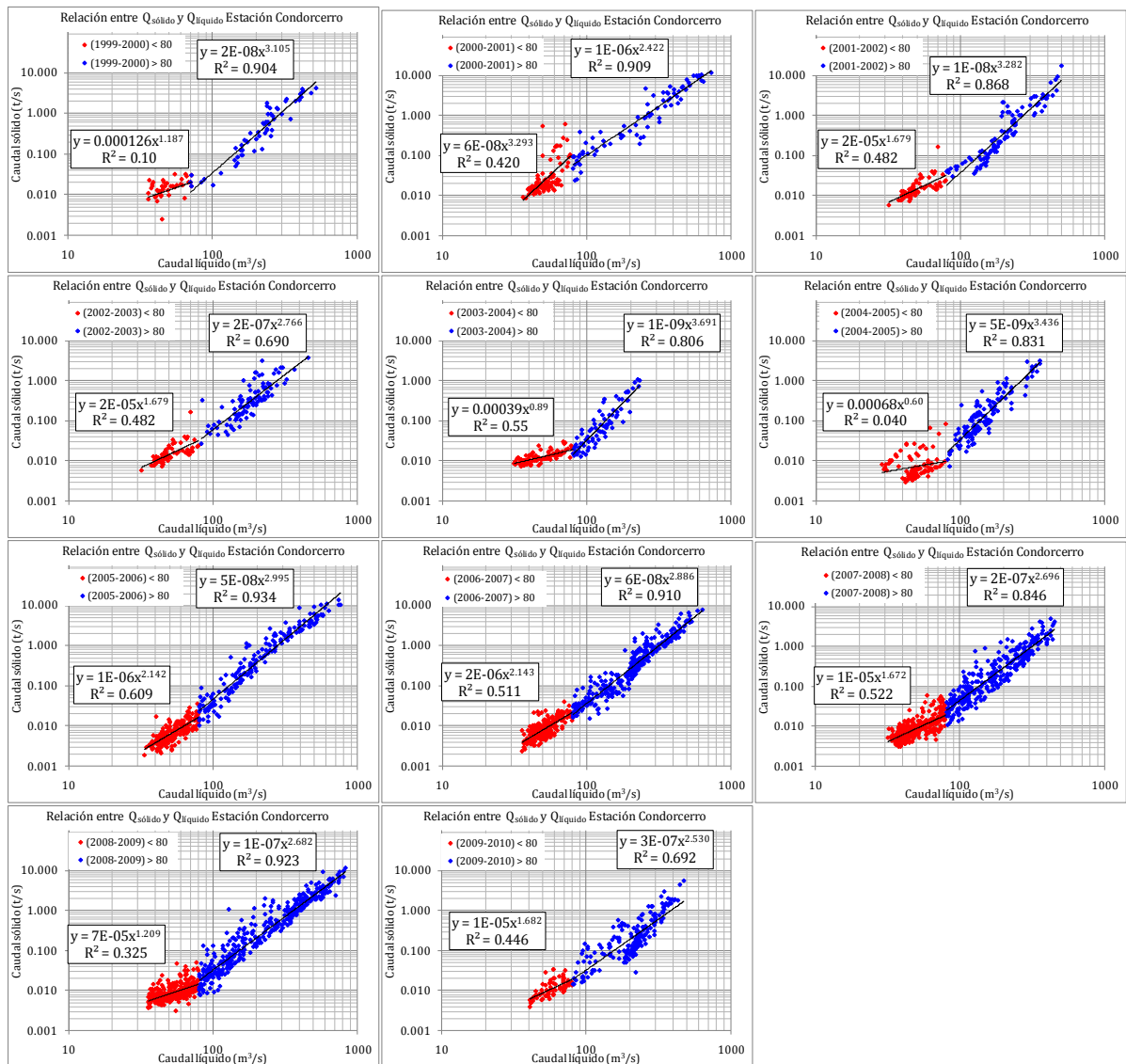


Figura 34. Modelo de correlación lineal simple entre caudales líquidos y caudales sólidos en suspensión para la estación de Condorcero; evolución del caudal sólido (1999-2010) con diferentes tendencias de evolución.

Debido al problema de dispersión observado en los primeros años se realizó una evaluación mensual por año hidrológico en la base de datos hidrosedimentológica; no se observa histéresis lo puntos muestran un buen ajuste a nivel mensual mejorando año a año. (Figura 35).

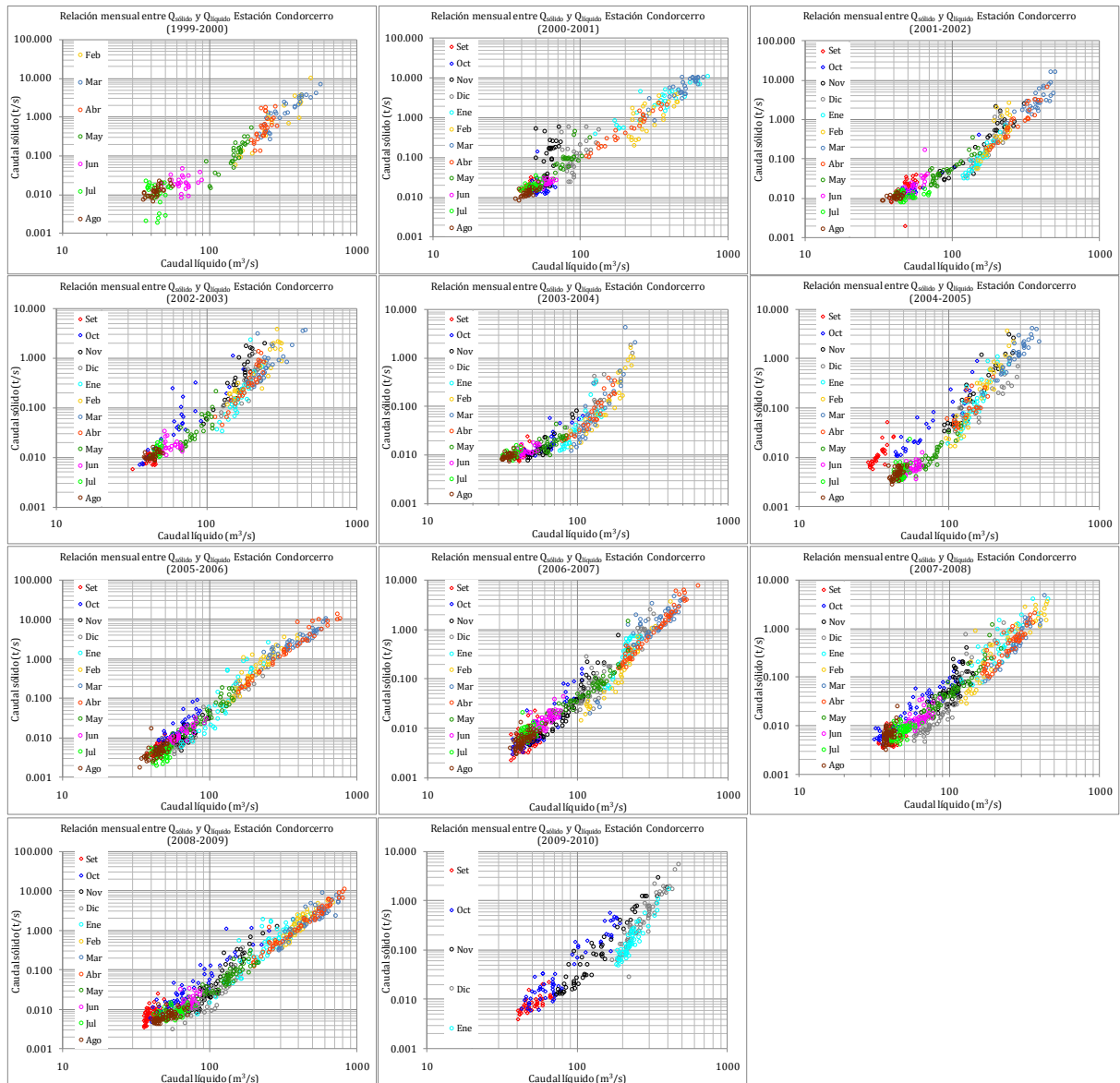


Figura 35. Análisis de toda la base de datos al paso mensual 1999-2010 estación Condorcerro.

V.- RESULTADOS Y DISCUSIONES

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

Después de un riguroso análisis de la distribución temporal y la calidad de los datos en caudales líquidos y concentraciones se tiene idea de la disponibilidad de los datos confiables, algunas cifras en la tabla 5, de esta tabla sintética se puede resaltar que no tenemos problemas para los caudales líquidos diarios para la estación de Condorcero, también para esta estación se posee la data más completa y con una buena calidad de los datos en concentraciones (Figura 9, 12 y 15). La estación Tablachaca presenta problemas en la calidad de los datos para los caudales líquidos, con un 18.01% de datos repetidos estos eventos aun más frecuente en época de estiaje. La estación Santa presenta mayores problemas que las dos anteriores, debido a la falta de un limnógrafo y a la baja frecuencia para la toma de muestras (Figura 11, 14 y 17), entonces se realizó una correlación entre las tres estaciones de estudio y la estación La Balsa (1954-2009) (Figura 22) para llenar los vacios de caudales en las estaciones de estudio; finalmente se pudo llenar los vacios.

Tabla 5. Disponibilidad de los caudales líquidos y sólidos en la base de datos Chavimochic.

| Estación | Caudal Líquido | Frecuencia por día (%) | | Estación | Caudal sólido | Frecuencia por día (%) | |
|------------|----------------|------------------------|-------|------------|---------------|------------------------|-------|
| Condorcero | 1977-2009 | 2 | 18.37 | Condorcero | 2000-2009 | 2 | 15.89 |
| | | 1 | 61.95 | | | 1 | 82.99 |
| | | Repetidos | 17.26 | | | Repetidos | 0.02 |
| | | Vacios | 2.42 | | | Vacios | 1.01 |
| Tablachaca | 2002-2009 | 2 | 28.13 | Tablachaca | 2001-2009 | 2 | 27.82 |
| | | 1 | 42.72 | | | 1 | 58.02 |
| | | Repetidos | 18.07 | | | Repetidos | 0.04 |
| | | Vacios | 11.08 | | | Vacios | 14.2 |
| Santa | 2002-2009 | 2 | 7.00 | Santa | 2002-2009 | 2 | 5.69 |
| | | 1 | 46.50 | | | 1 | 49.86 |
| | | Repetidos | 30.20 | | | Repetidos | 0.05 |
| | | Vacios | 16.30 | | | Vacios | 44.40 |

5.1.1 Variación entre los caudales de la mañana y la tarde de la serie más completa

Para entender la variabilidad de los caudales se emplearon tres estaciones: Condorcerro al paso diario (1977-2002) y las estaciones de Santa, Tablachaca y Condorcerro datos horarios (2002-2010), de los datos horarios se observó que al tomar dos lecturas de caudales por día 6:00 y 18:00 horas, y considerar el promedio como el caudal representativo del día se tiene un error entre el 4.08% a -4.43% para la estación Condorcerro, especialmente en época de lluvias el error aumenta debido a las malas técnicas para la obtención de los datos. En época de estiaje no hay mucha variabilidad debido a la regulación de los caudales $\pm 76\text{m}^3/\text{s}$ por la hidroeléctrica ubicada aguas arriba de la estación Condorcerro.

Para hallar los caudales sólidos en suspensión diarios representativos se realizó tres cálculos uno con el caudal de la mañana, otro con los caudales tomados por la tarde y un tercero en relación al intervalo de tiempo que fueron tomados durante la mañana y la tarde, es decir que se calculó la media ponderada de todas las lecturas de caudales durante 24 horas para sacar un caudal representativo por día.

Se analizó como varía la relación entre el caudal sólido tomado por la mañana y tarde, observando que hay mayor variabilidad cuando los caudales son mayores por la mañana (Figura 18, 19, 20 y 21); entonces se calculó el porcentaje de variación entre el caudal de la mañana y el de la tarde (Tabla 6).

Tabla 6. Porcentaje de variación de los caudales de la mañana y tarde en función del caudal representativo (2007-2008).

| Estación | Tipo caudal | Total Mañana | % Mañana | Total Tarde | % Tarde | Representativo |
|-------------|---------------------------------------|--------------|----------|-------------|---------|----------------|
| Condorcerro | Qlíquido ($\text{km}^3/\text{año}$) | 4.10 | 0.4 | 4.07 | -0.4 | 4.09 |
| | Qsólido (t/año) | 10 231 334.5 | 11.4 | 7 907 175.8 | -12.8 | 9 069 255.2 |
| Tablachaca | Qlíquido ($\text{km}^3/\text{año}$) | 0.98 | 4.9 | 0.88 | -5.1 | 0.93 |
| | Qsólido (t/año) | 7 598 378.7 | 21.1 | 4 388 064.3 | -26.8 | 5 993 221.5 |
| Santa | Qlíquido ($\text{km}^3/\text{año}$) | 3.07 | 1.5 | 2.98 | -1.5 | 3.03 |
| | Qsólido (t/año) | 6 800 960.0 | 20.5 | 4 017 926.1 | -25.7 | 5 409 443.0 |

De la tabla 6 se afirma que la regulación de caudales líquidos debido al requerimiento de la energía es mayor por las noches (Estación Santa), es entonces que en

época de estiaje estos son más notorios ya que durante el día la Hidroeléctrica del Cañón del Pato almacena el agua del río Santa en sus reservorios para poder liberar dicho volumen por la noche a $76\text{m}^3/\text{s}$ que es el caudal requerido para el funcionamiento de las turbinas; debido a la distancia entre la hidroeléctrica y la estación de estudio el caudal demorara varias horas en llegar a la estación en estudio. La producción de sólidos en suspensión son generalmente menores por la tarde ello se le atribuye al tratamiento de aguas antes de ser turbinadas en la hidroeléctrica.

5.2 Estimación de caudales líquidos

Uno de los problemas detectados en el capítulo anterior es la falta de caudales así como la mala calidad de los datos, este problema se agrava en la estación Santa que presenta lectura de caudales cada 48 horas; fue posible reconstruir los caudales líquidos al paso diario para las estaciones Santa y Tablachaca (Ver remarca 4.4.1.3 en el capítulo IV), la Metodología empleada para afrontar este problema arrojó buenos resultados; cuantificando los caudales anuales para las tres estaciones de estudio a partir de lecturas diarias e instantáneas (Figura 36).

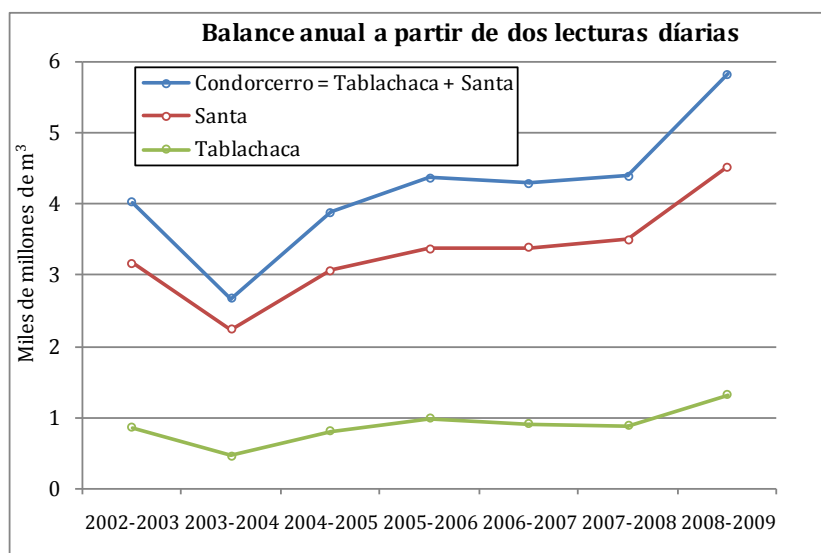


Figura 36. Cálculo del volumen anual de agua para las estaciones de Condorcerro, Santa y Tablachaca (2002-2009).

Podemos decir que los problemas de caudales líquidos para la estación de Condorcerro y Tablachaca fueron superados debido a la información obtenida de los limnógrafos instalados para los últimos años y los datos de la estación La Balsa ubicado en el Cañón del Pato aguas arriba de la estación Santa (2002-2009).

Tabla 7. 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 m ³ /año | Tablachaca m ³ /año | Santa % | Tablachaca % |
|-----------------|-------------------------------------|--|-------------------|------------------------|
| 2002-2003 | 3169368000 | 853048800 | 78.76 | 21.20 |
| 2003-2004 | 2231276544 | 457576128 | 83.40 | 17.10 |
| 2004-2005 | 3071606400 | 799437600 | 79.12 | 20.59 |
| 2005-2006 | 3374352000 | 984553920 | 77.20 | 22.53 |
| 2006-2007 | 3390120000 | 899722080 | 78.87 | 20.93 |
| 2007-2008 | 3500599680 | 874359360 | 79.53 | 19.86 |
| 2008-2009 | 4528569600 | 1307797920 | 77.66 | 22.43 |
| Promedio | 3323698889 | 882356544 | 79.22 | 20.66 |

De la tabla 7 se puede resaltar que no existe una alta variabilidad de producción de caudales 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 $\pm 20\%$ y cuya área es de 3131 km². Las altas tasas de erosión observadas es debido al escenario de fuertes pendientes (Figura 7), escasa cobertura vegetal, precipitaciones que varían de 200-900 mm anuales (Figura 2), una litología que facilita la erosión (Figura 3) y la intensa actividad antrópica especialmente la minería (Figura 4), son las que le dan a este escenario un alto grado de erosión.

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, transición y lluvias (Figura 37).

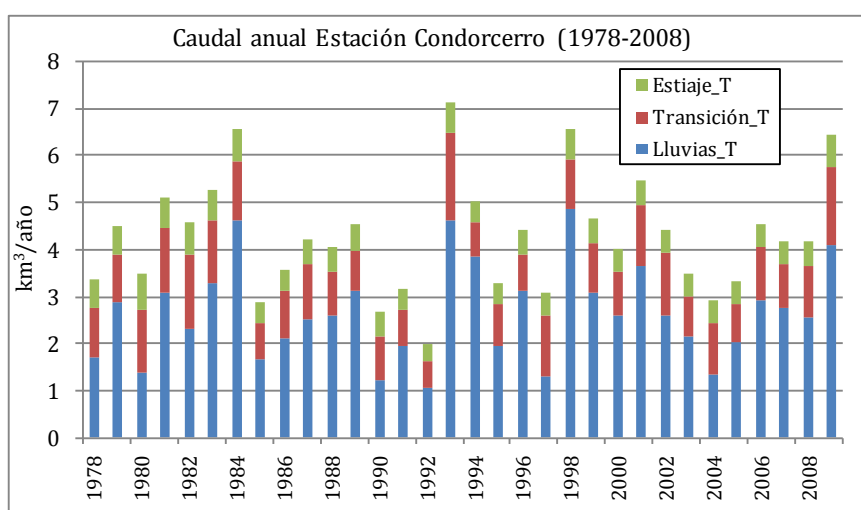


Figura 37. Caracterización de flujos líquidos para la época de lluvia (Enero-Abril), transición (Mayo-Junio, Noviembre-Diciembre) y estiaje (Julio-October).

Entonces del gráfico anterior podemos decir que para la estación de Condorcerro, en época de lluvias se produce $\pm 60\%$ del volumen anual, $\pm 26\%$ en época de transición y $\pm 13\%$ en época de estiaje estos últimos provenientes de los glaciares y aguas subterráneas de la cuenca media y alta del río Santa.

5.3 Análisis ENSO de los caudales líquidos

Podemos hacer un pequeño análisis en cuanto a los eventos extremos de descarga (picos de caudales) o en un volumen anual en relación a eventos del niño, niña y años normales; podemos observar los círculos rojos en los caudales anuales periodo 1983-1984 (año normal) y 1997-1998 (evento fuerte del niño) se presentan eventos picos de descarga en el año normal además se produce casi el mismo volumen; así seguimos comparando los círculos del mismo color donde apreciamos una niña débil produce el mismo volumen que un niño fuerte, luego en un evento niña fuerte se produce el doble de caudal que para un niño fuerte, otro evento que se puede observar que en un evento niña débil se produce el doble de volumen para un niño de intensidad débil.

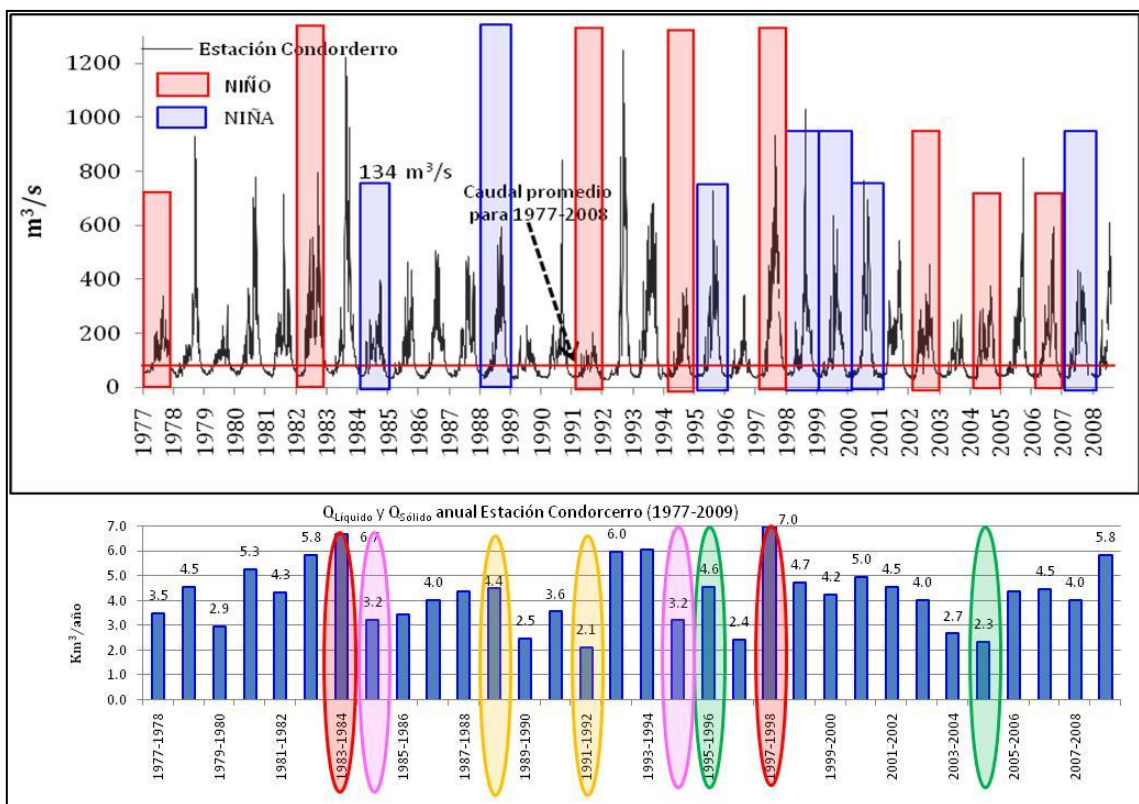


Figura 38. Caudales diarios/anuales en la estación Condorcerro y años en los que ocurrieron eventos del niño y niña. La altitud de las barras (niño y niña) indican la intensidad de los eventos en fuerte (barra más grande), moderada y débil (barras pequeñas).

De la figura 38 se observa que no hay un patrón característico de los caudales en un evento ENSO ya sea en caudales diarios o el volumen total anual para la cuenca del río Santa.

5.4 Estimación de la carga en suspensión instantánea y anual

Para la estimación de los caudales sólidos en suspensión se planteo cuatro metodologías de cálculo (Tabla 8).

Tabla 8. Metodologías planteadas para el cálculo anual de sólidos en suspensión.

| <i>Metodología</i> | <i>Virtudes</i> | <i>Limitaciones</i> | <i>Predictibilidad</i> |
|--------------------|--|--|------------------------|
| 1 | Brinda las mejores estimaciones, Calculo directo $Q_s = MES \times Q$; llena vacios a partir de datos observados en las estaciones (Condorcerro=Santa+Tablachaca) | No se llena todos los vacios, 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. | Es necesario tener caudales líquidos para poder generar a partir de estos el caudal sólido. | No |
| 3 | Modelo interanual que se construyo a partir de toda la serie histórica de caudales y concentraciones | En años extremos genera altos rangos de error en el cálculo anual de sedimentos. | Si |
| 4 | Calculo directo $Q_s = MES \times Q$, 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 |

a. Resultados de la calibración de los modelos de sedimentos en suspensión

De todos los modelos hidrosedimentológicos generados los de las figuras 28 para la estación de Condorcerro, figura 29 para la estación Tablachaca y figura 30 para la estación Santa arrojaron buenos los mejores resultados, mediante el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, y Bias o desviación relativa de los caudales (Tabla 9), estos fueron usados como pruebas hidroestadísticas para evaluar la relación entre el caudal líquido y caudal sólido en suspensión; los modelos fueron plasmados en un gráficos log-log para cada una de las estaciones en estudio. Debido a los buenos resultados obtenidos se calcularon los caudales sólidos en suspensión utilizando la data histórica de los caudales líquidos (Figura 40).

Tabla 9. Resultados de calibración según Nash y Bias para el periodo mejor conformado.

| Estación hidrosedimentológica | | Periodo | Nº días | Una Tendencia | | Dos Tendencias | | Tres Tendencias | |
|----------------------------------|---------------------|-------------------|------------|---------------|--------|----------------|--------|-----------------|-------|
| | | | | NASH | Bias | NASH | Bias | NASH | Bias |
| Condorcerro | Q _{sólido} | 07/2007 - 02/2009 | 584 | 0.8290 | -21.80 | 0.89 | -8.38 | | |
| Tablachaca | Q _{sólido} | 03/2008 - 02/2009 | 335 | 0.5021 | 14.06 | 0.02 | 35.96 | 0.77 | -4.03 |
| Santa | Q _{sólido} | 03/2007 - 11/2007 | 261 | 0.5084 | -45.91 | 0.76 | -22.70 | | |

Se realizó la calibración con las pruebas estadísticas de Nash-Sutcliffe y Bias, a los modelos generados; cada uno de ellos con diferentes posibles tendencias. Para la aplicación de dichas pruebas estadísticas se seleccionó los periodos con la menor cantidad de datos vacíos; de esa manera tendríamos un mejor contraste entre los caudales instantáneos sólidos observados y los generados en el modelo.

Se observa buenos resultados para la prueba estadística de Nash-Sutcliffe con una mínima de 0.76 y un máximo de 0.89 para los mejores modelos generados; pero con BIAS el error del volumen encontrado varía entre -22 % hasta un -4 % para el periodo de calibración. Los cálculos generados para las tres estaciones con los mejores modelos subestiman la producción de sedimentos al paso instantáneo; pero el 2008-2009 en la estación de Condorcerro se sobreestima dicha producción en ± 38 %, producto de los altos picos de caudales líquidos considerando que nuestro modelo tiene una relación potencial. Para la estación de Tablachaca se generaron tres modelos con una, dos y tres tendencias respectivamente, los mejores resultados según el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe fueron obtenidos con tres tendencias (Tabla 9 , Figura 27)

No fue posible realizar la validación del modelo ya que para la calibración era necesario emplear toda la data disponible con la finalidad de incluir la mayor cantidad de eventos posibles (el porqué será desarrollado en el subcapítulo 5.5).

5.4.1 Cálculo de los caudales sólidos anuales

De las metodologías planteadas para el cálculo del caudal sólido en suspensión podemos decir que la metodología 1 y 4 el cálculo con esta ultima da cifras con poco margen de error cuando existe pocos vacíos; la metodología 1, 2, y 4 ayudan a generar caudales a partir de información disponible, la metodología 3 ayudara a completar pero subestima o sobrestima los caudales sólidos en suspensión para años extremos.

Después de haber trabajado en el análisis de los modelos cuyas ecuaciones generarán datos faltantes de caudales sólidos en suspensión a partir de caudales líquidos, se aplicaron para el periodo 2000-2009; resaltando que la Metodología 1 es la que mejor refleja la realidad, por ende, se consideró como estimador de la producción de sedimentos.

Estación Condorcero los métodos restantes (Método 2, 3 y 4), el que arrojó los mejores resultados es el de interpolación (Método 4) siempre y cuando este no se realice a un número elevado de días con datos faltantes; el Método 2 muestra una subestimación de 64% para el año de 2001-2002 pero en este mismo periodo la situación se agrava para el Método 3 que subestima en un 85%, otro aspecto a considerar es que la información de estos años no es muy confiable (detalles subcapítulo 5.3.1 - a); el Método 3 en el año 2008-2009 con alta frecuencia de caudales mayores a 70 m³/s sobreestima en un 38 % (Figura 39).

Para entender la variabilidad de la producción de sedimentos en los años 2000-2001 y 2003-2004 se observó los caudales líquidos (Figura 61) donde se observa eventos excepcionales con altos picos de caudales a diferencia del segundo que no hubieron eventos picos de caudales líquidos.

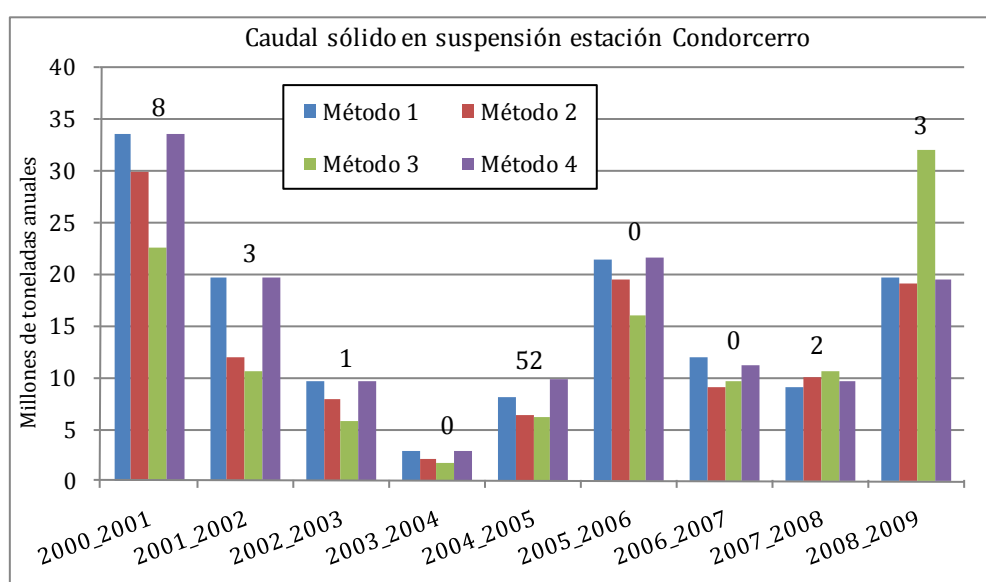


Figura 39. Cálculo de caudales sólidos anuales con las cuatro metodologías planteadas; arriba de las barras número de vacíos de caudales sólidos para cada año hidrológico.

De las metodologías planteadas para el cálculo del caudal sólido en suspensión podemos decir que la metodología 1 se aproxima a la realidad, la metodología 1, 2, y 4 ayudan a generar caudales a partir de información disponible; La metodología 4 brinda cifras con poco margen de error cuando existe pocos vacíos, la metodología 3 ayudara a completar pero subestima o sobrestima los caudales sólidos en suspensión para años extremos (ver también modelos en las estaciones de Tablachaca y Santa Figura 59 y 60).

El modelo hidrosedimentológico (metodología 3) para la estación Condorcero presenta dos tendencias.

| <i>Caudales (m³/s)</i> | <i>Ecuación de descarga</i> | <i>Coefficiente de determinación (%)</i> |
|-----------------------------------|-----------------------------|--|
| Q<70 | $Q_s = 1.538 Q_L^{1.54}$ | 24 |
| Q>70 | $Q_s = 0.00492 Q_L^{2.91}$ | 84 |

El margen de error para la producción anual es entre -38 % a +85 %. De los altos exponentes de las ecuaciones generadas se atribuye que la cuenca Santa posee un gran stock listo para ser transportado con las primeras lluvias y durante la época de lluvias; pero en tiempo de estiaje la mayor parte de los materiales en suspensión provienen del lecho del río; Entonces se concluye que el modelo 3 generado, tiene un alto margen de error para la predicción de caudales sólidos al paso horario, a pesar que el coeficiente de Nash-Sutcliffe del modelo arrojaran 0.89 (2008-2009), los resultados subestima la producción de sedimentos en un año con pocos eventos de descarga y sobreestimando en un año con varios eventos picos de descarga.

Balance anual de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa realizada con el método 1 (cálculo directo con llenado de datos faltantes) por ser la estimación que se aproxima más a la realidad; se puede observar la alta variabilidad anual en la producción de sedimentos (Tabla 10).

Tabla 10. Cálculo de caudales sólidos en suspensión para las estaciones de Santa, Tablachaca y Condorcerro 2002-2009.

| <i>Periodo</i> | <i>Condorcerro (t)</i> | <i>Santa (t)</i> | <i>Tablachaca (t)</i> | <i>Santa (%)</i> | <i>Tablachaca (%)</i> |
|-----------------|------------------------|--------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|
| 2002-2003 | 9 585 550.7 | 3 975 971.8 | 6 882 096.1 | 36.62% | 63.38% |
| 2003-2004 | 2 809 602.4 | 1 364 498.8 | 1 587 882.4 | 46.22% | 53.78% |
| 2004-2005 | 8 160 575.7 | 3 286 383.7 | 6 560 914.0 | 33.37% | 66.63% |
| 2005-2006 | 21 507 246.6 | 11 112 577.4 | 10 761 395.9 | 50.80% | 49.20% |
| 2006-2007 | 11 988 366.9 | 5 289 617.6 | 5 544 373.0 | 48.82% | 51.18% |
| 2007-2008 | 9 144 524.1 | 3 280 767.9 | 5 972 322.8 | 35.46% | 64.54% |
| 2008-2009 | 19 769 164.5 | 8 833 249.8 | 11 006 132.7 | 44.52% | 55.48% |
| Promedio | 11 852 147.3 | 5 306 152.4 | 6 902 159.5 | 42.26% | 57.74% |

Se resalta la alta variabilidad anual en la producción de sedimentos para la cuenca media-alta del río Santa y río Tablachaca (Figura 58); Para la estación Santa en un balance anual no se rige a un patrón donde a mayor caudal mayor producción de sedimentos; porque en el año 2005-2006 apporto el 51.7% del caudal sólido y el 70% del caudal líquido, en contraste a ello el año 2004-2005 apporto el 79% del caudal líquido pero solo el 33% del caudal sólido a anual.

a. Análisis de la producción de sedimentos en eventos ENSO

A pesar del corto periodo del monitoreo en la producción de sedimentos en suspensión este incluye un evento moderado del niño (2002-2003), que tuvo una producción de sedimentos en suspensión similar a la que se produjo en una niña de intensidad moderada (2007-2008); pero el año 2000-2001 que se clasificado como niña de intensidad débil se produjo 350 % de lo que se produjo el año 2002-2003 niño de intensidad débil (Figura 62).

No se observa una clara tendencia en cual un evento ENSO produce cantidad de sedimentos.

5.4.2 Proyección de los caudales sólidos en suspensión para la estación Condorcerro

A pesar de las subestimaciones encontradas por la prueba estadística de BIAS y los buenos valores de Nash-sutcliffe al aplicar los modelos generados en la calibración; realizamos un balance de la producción de sedimentos en suspensión; caracterizando la dinámica de la producción de sedimentos según la hidrología con una época de lluvias

(Enero-Abril), dos de transición (Mayo-Junio, Noviembre-Diciembre) y una de estiaje (Julio-Octubre) (Figura 40).

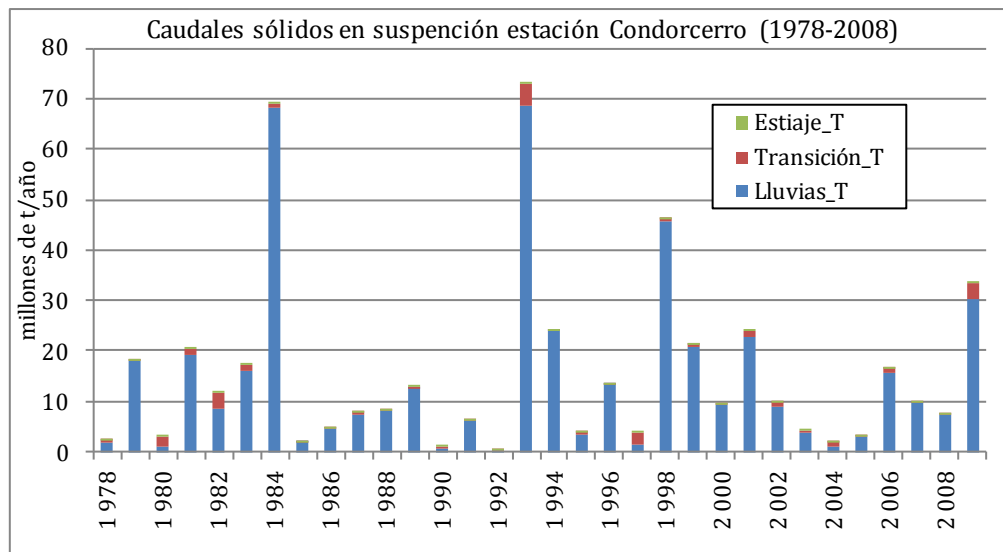


Figura 40. Cálculo de la producción de sedimentos en suspensión anual a partir de caudales líquidos diarios en la estación de Condorcerro.

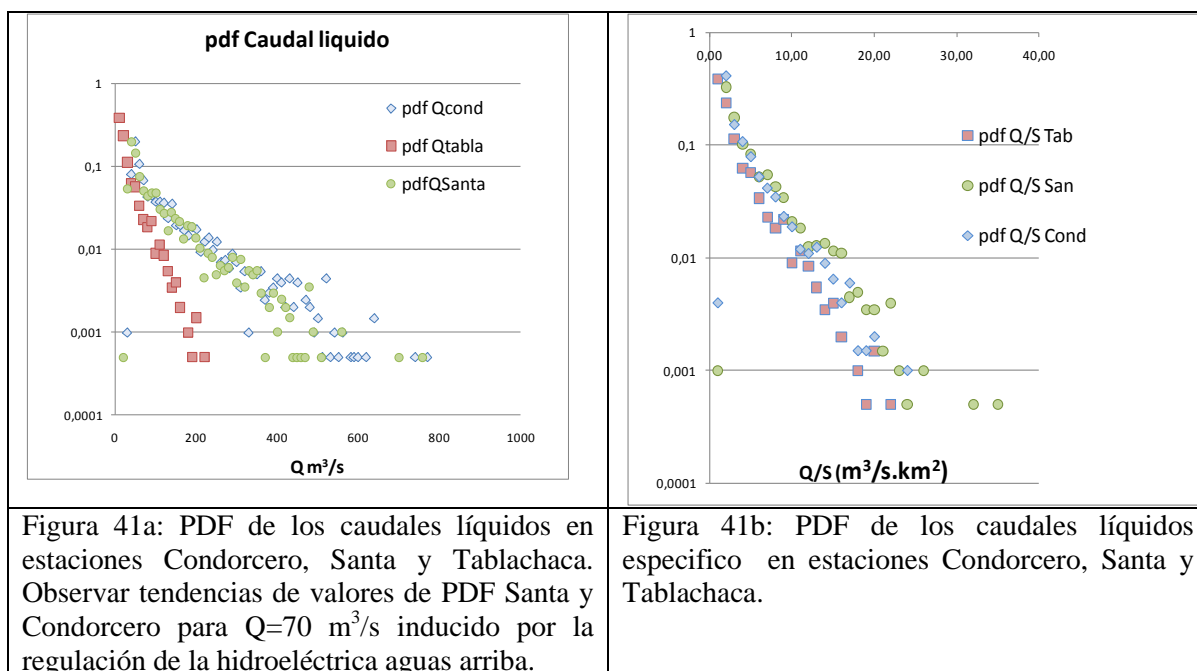
Entonces podemos decir que para la estación de Condorcerro, en época de lluvias se produce $\pm 85\%$ del volumen anual de caudal sólido, $\pm 13\%$ en época de transición y $\pm 2\%$ en época de estiaje.

5.5 Análisis de la alta variabilidad en los caudales sólidos en suspensión

5.5.1 Prueba de la función de probabilidad de distribución (PDF)

a. PDF de los caudales líquidos

Según la probability distribution function (PDF) se puede observar que el río Santa y Tablachaca tienen similares resultados de PDF lo que nos dice que ambas cuencas tienen la misma distribución de los eventos de caudales líquidos específicos (Figura 41 a y b).



b. PDF de los caudales sólidos

Si hacemos la PDF de los caudales sólidos para cada crónica (Figura 42a) podemos observar que Tablachaca y el río Santa tienen un PDF muy diferente para $[C] > 1 \text{ g/l}$. Es decir que las altas concentraciones no siguen la misma repartición de probabilidad de aparición que las concentraciones $[C] < 1 \text{ g/l}$. Más común son las distribuciones relacionadas con caudales de ríos con una disminución de la probabilidad de aparición que decrece mucho cuando los valores de la variable crecen (Figura 41a). La PDF de concentración de Tablachaca muestra entre 1000 mg/l y $10\,000 \text{ mg/l}$, una probabilidad de aparición casi constante para este rango de valores; es decir la concentración no es relacionada con el valor del caudal en término de probabilidad de aparición por lo tanto altas concentraciones aparecen para altos caudales pero para pequeños caudales también.

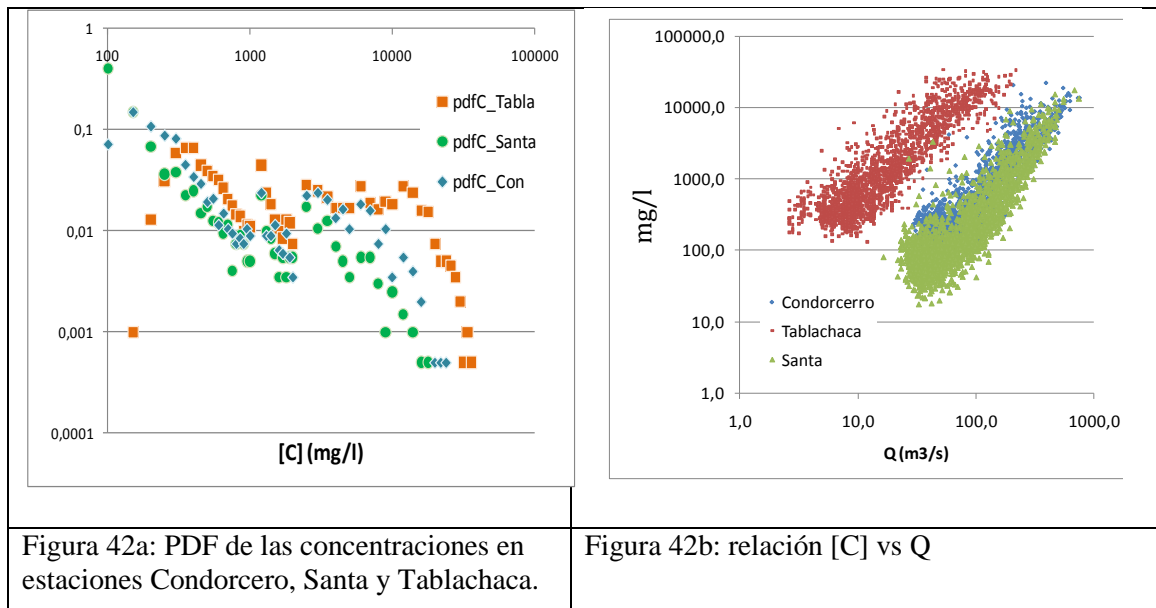


Figura 42a: PDF de las concentraciones en estaciones Condorcero, Santa y Tablachaca.

Figura 42b: relación [C] vs Q

5.5.2 Análisis de las tendencias de los modelos anuales

En un análisis comparativo se observa la alta variabilidad del poder de purga anual para la estación Condorcero el cual se observa en los exponentes de los modelos generados; el periodo 2008-2009 y 2009-2010 presentan tendencias más bajas a los años anteriores, esto indica una disminución en cuanto al poder de descarga de sedimentos anuales (Figura 43).

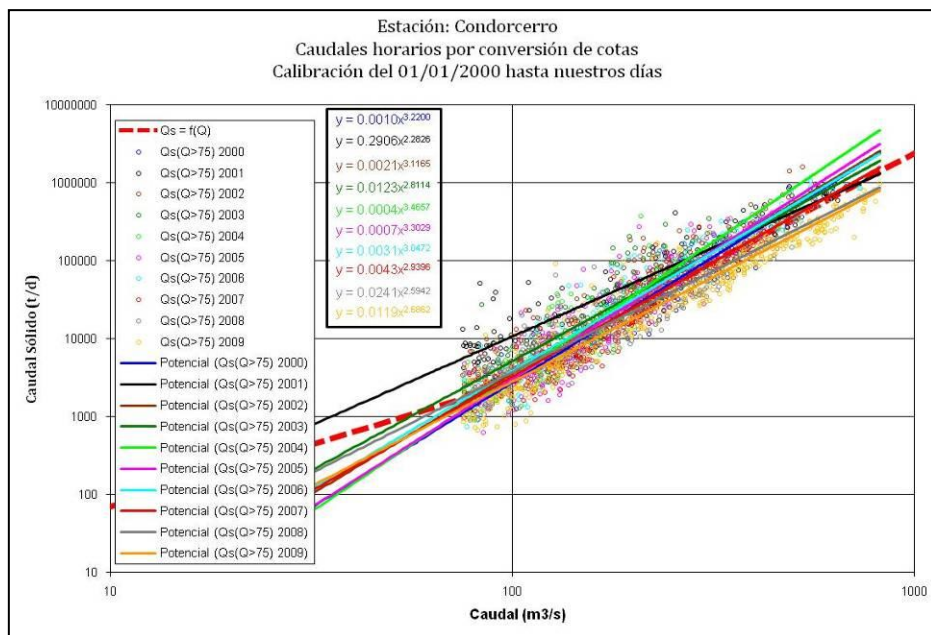
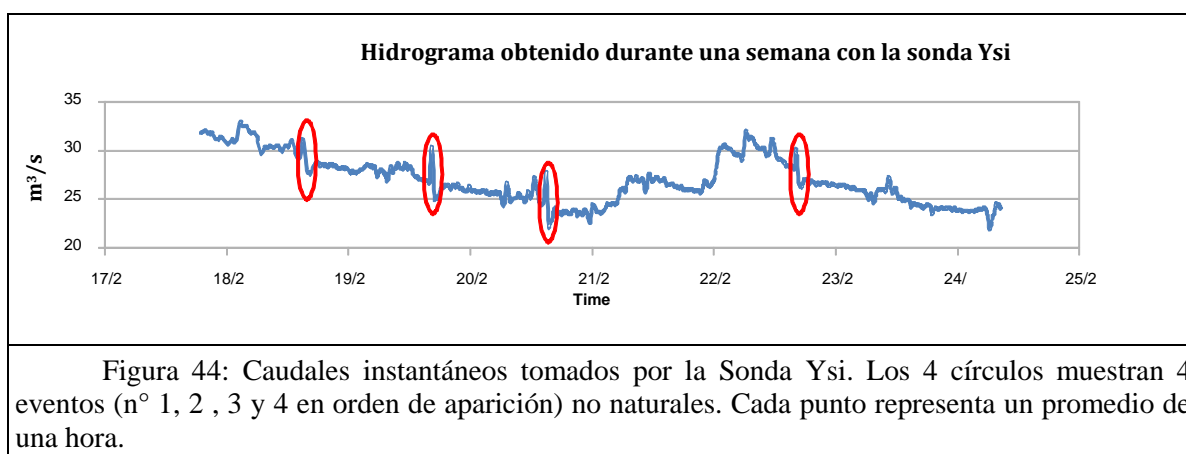


Figura 43. Tendencias anuales del caudal sólido en suspensión; línea gruesa y punteada es el promedio de todas las muestras observadas en nuestra base de datos; recuadro del centro, exponentes anuales cuyo color está acorde con las líneas de las tendencias.

5.6 Análisis de la relación caudal sólido y turbidez con alta resolución temporal

a. Análisis de eventos en los caudales

Los caudales instantáneos observados durante el monitoreo con la Sonda Y si entre el 18 y el 25 de Febrero 2010, muestra una decrecida regular del caudal líquido hasta el 21 de Febrero y desde esta fecha una crecida en dos fases, cuatro eventos cortos (entre 1h y 2 horas de duración) aparecen con regularidad (entre las 3 y las 4 de la tarde), ello debido a la manipulación de las compuertas de la bocatoma Chavimochic; ya que el punto de ubicación de la sonda fue aguas abajo de esta. Entonces cada círculo de rojo tiene una duración de una hora y media, tiempo en el cual se realizan los lavados de las naves desarenadoras para este periodo se cierran las compuertas (Figura 44).



En un intento de conocer el origen de los picos de caudal presentes en el punto de monitoreo, se trabajó con los limnógrafos que se posee en las estaciones de Tablachaca y Condorcerro de tal manera que conoceremos si el caudal pico es a causa de un alto caudal en la estación de Santa (1S) o Tablachaca (1T), estos enumerados según ocurra el evento (Figura 45).

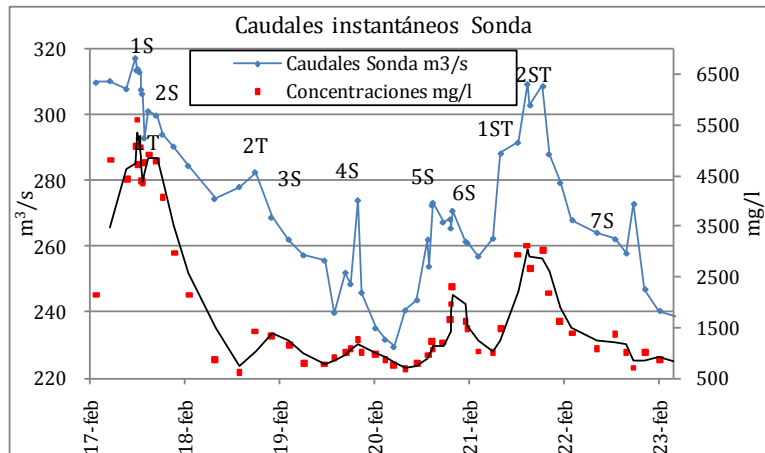


Figura 45. Caracterización de los caudales sólidos y líquidos instantáneos en el punto de monitoreo, caudales instantáneos durante 7 días.

b. Análisis de la coherencia de los datos de turbiedad

Antes de convertir la crónica de turbiedad en crónica de concentración, se realizó un primer análisis de la crónica para identificar anomalías eventuales.

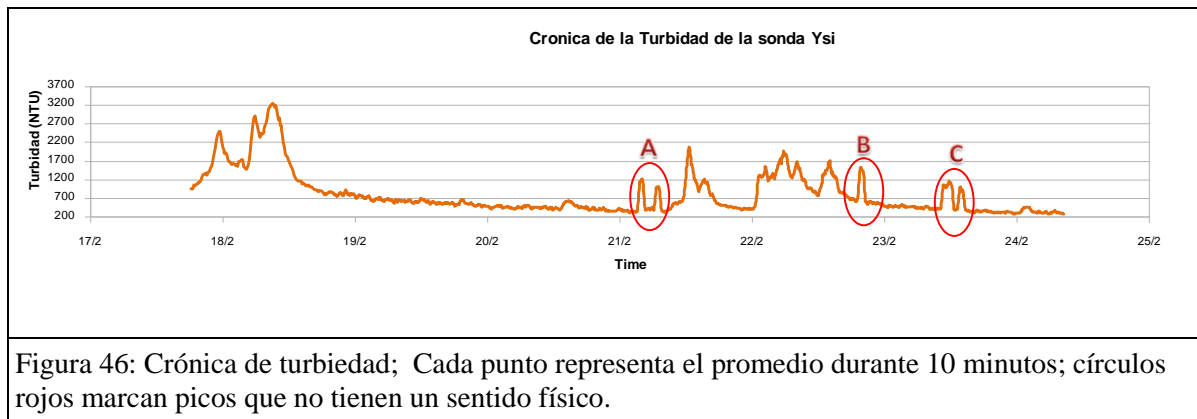
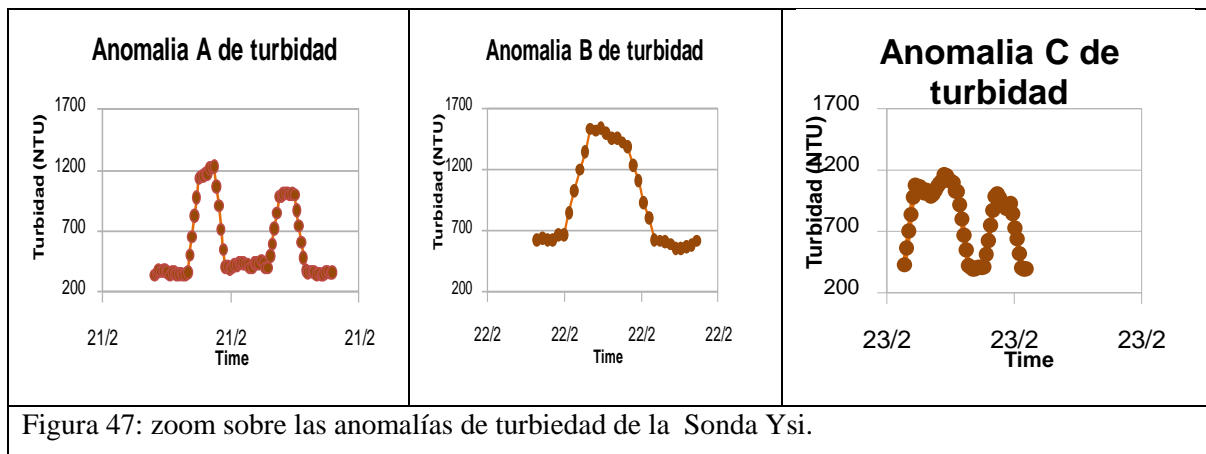


Figura 46: Crónica de turbiedad; Cada punto representa el promedio durante 10 minutos; círculos rojos marcan picos que no tienen un sentido físico.

La crónica muestra picos con fases de crecida y decrecida demasiado lineales para ser natural. Además son picos que no corresponden a ningún pico de caudales líquido (Figura 48). Por eso limpiamos estos eventos, considerando que para estos picos no hay crecida y decrecida real.



Por fin, la crónica de turbiedad que usamos en el estudio es la crónica medida sin los picos A, B y C (Figura 47).

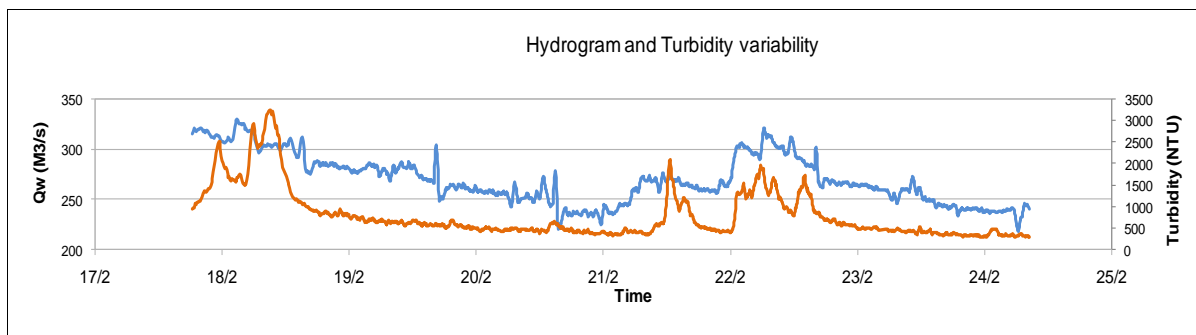


Figura 48: Análisis con alta resolución temporal de las crónicas de caudal y de turbiedad; Cada punto representa el promedio durante 10 minutos; sin anomalías de turbiedad. Línea azul son los caudales y la línea naranja son las lecturas de turbidez.

c. Relación entre la turbidez y la concentración durante 7 días de monitoreo

Luego de haber corregido datos de los eventos durante el monitoreo se procedió a elaborar un modelo que partiera de una correlación lineal simple entre la concentración y la turbidez de los caudales para el punto de monitoreo de la sonda Ysi se observa mucha dispersión de los puntos (Figura 49); debido a ello es un poco difícil de realizar una tabla de calibración de sedimentos para la cuenca del río Santa con los datos obtenidos durante una semana de monitoreo.

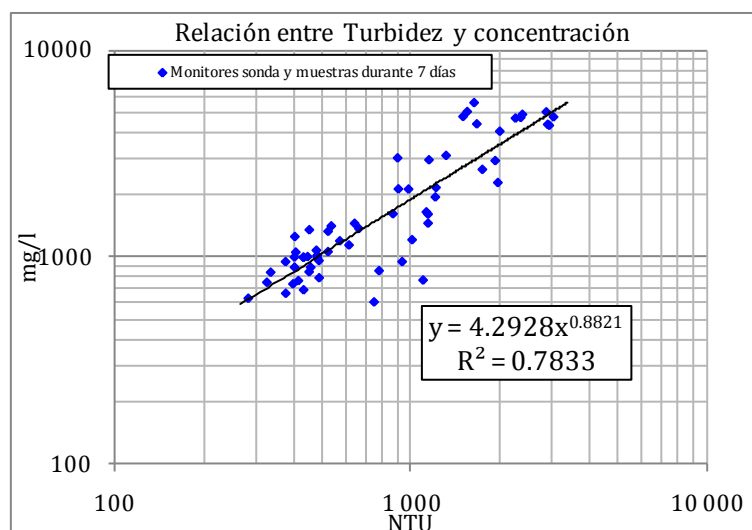


Figura 49. Modelo obtenido durante una semana de monitoreo en la cuenca baja del río Santa (altura del desarenador Chavimochic).

Finalmente del análisis temporal con alta resolución de las concentraciones, turbidez, y caudales durante 7 días se observa que para un mismo caudal podemos tener diferentes concentraciones, pero para el análisis de turbidez se tuvo algunos problemas debido a la dispersión de puntos que se observa, un factor influyente en ello son el margen de las lecturas variaban entre -50 y +50 NTU de un segundo al otro, además la manipulación de la bocatoma aguas arriba del punto de monitoreo causaba picos que hicieron variar mucha la relación entre caudal líquido, concentraciones y turbidez.

Se concluye que durante los monitoreos con la sonda de análisis de turbidez no se encontró una buena relación entre la turbidez y la concentración de sedimentos en suspensión debido a la manipulación de la bocatoma aguas arriba de la estación de monitoreo y el alto margen de variabilidad en las lecturas instantáneas hechas por la sonda.

5.7 Caudales sólidos obtenidos en las misiones

a. Monitoreo en la cuenca alta y media del río Santa

Esta parte tiene como fin mostrar un instantáneo en el tiempo de la dinámica de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa para el periodo del 23 al 03 de marzo del 2009. Estando consientes que estas son variables en el tiempo, pero nos muestra las posibles fuentes de producción significativa en la cuenca; se puede observar la gran diferencia de concentraciones para las estaciones de estudio en un muestreo simultaneo (Figura 50-a y 50-b).

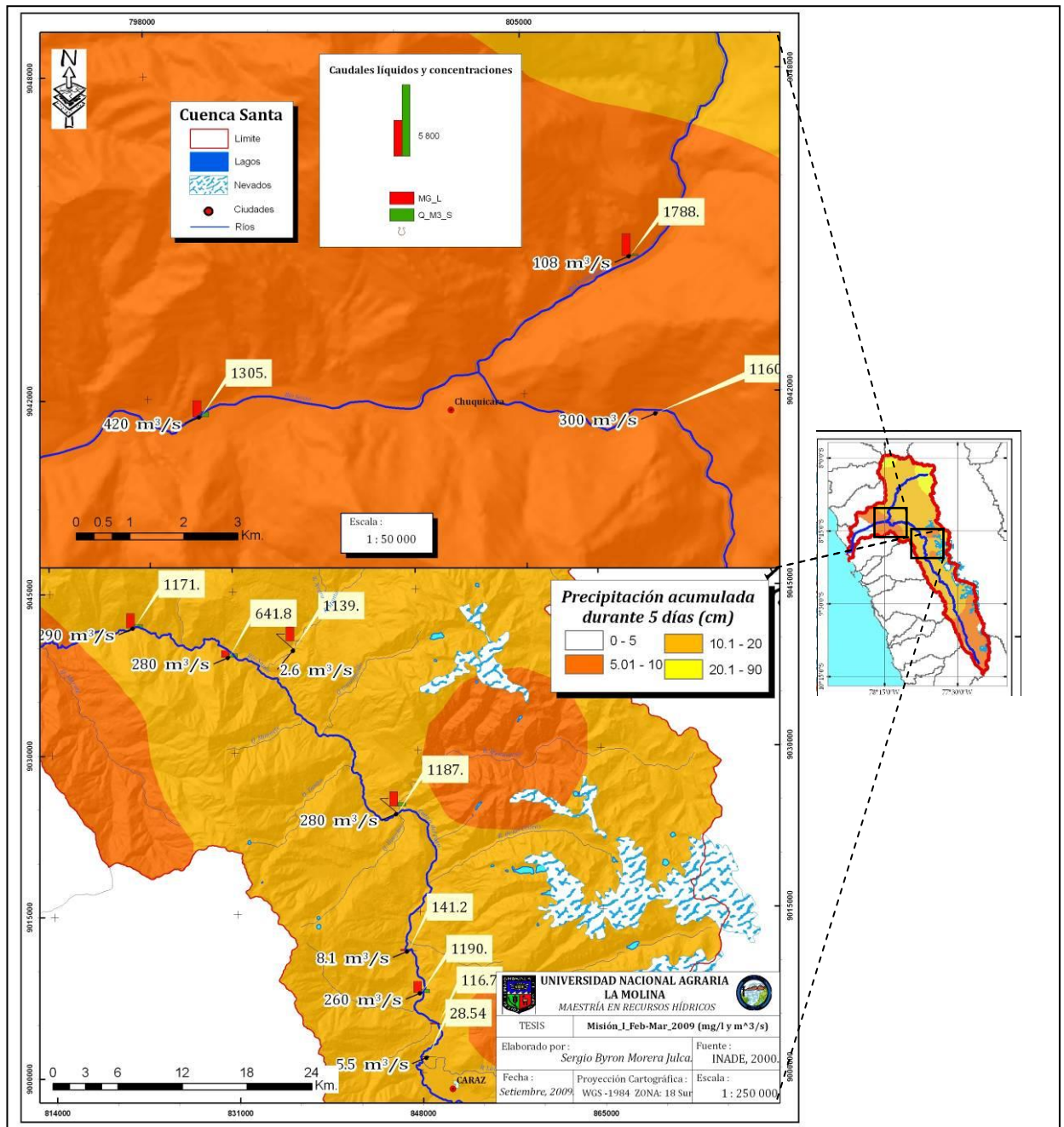


Figura 50-a. Muestreo de los principales afluentes de sedimentos en suspensión cuenca del río Santa, desde la estación Condorcerro hasta el pueblo de Caraz.

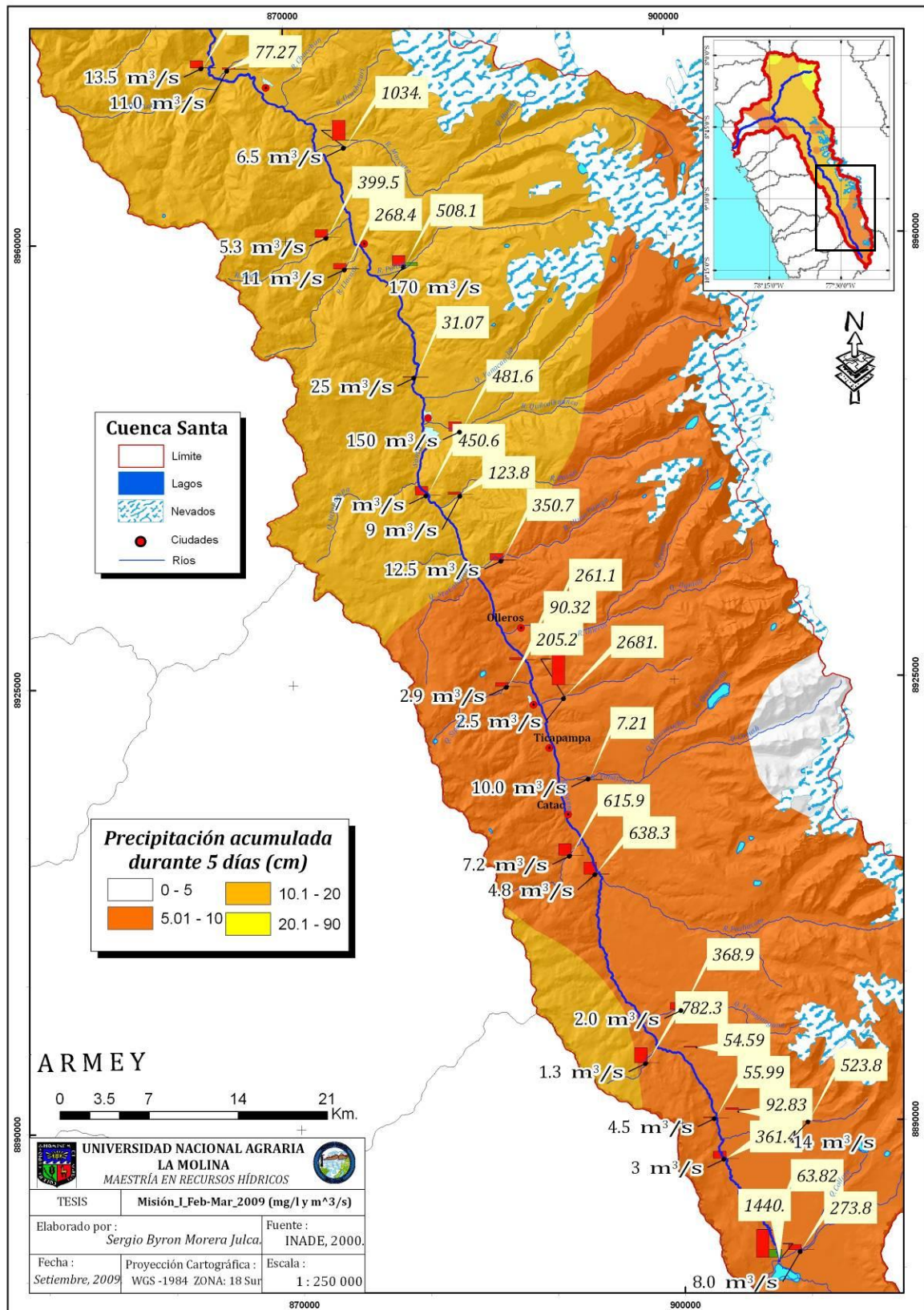


Figura 50-b . Muestreo de los principales afluentes de sedimentos en suspensión cuenca del río Santa, desde la naciente en la laguna Conocochoa hasta el río Tinco. Periodo (23-03 de marzo del 2009).

b. Monitoreo en la cuenca alta de la cuenca del río Tablachaca

Se dedico una misión exclusivamente para tomar muestras de toda la subcuenta del río Tablachaca, ya que los flujos provenientes de este río presenta una alta concentración de sedimentos.

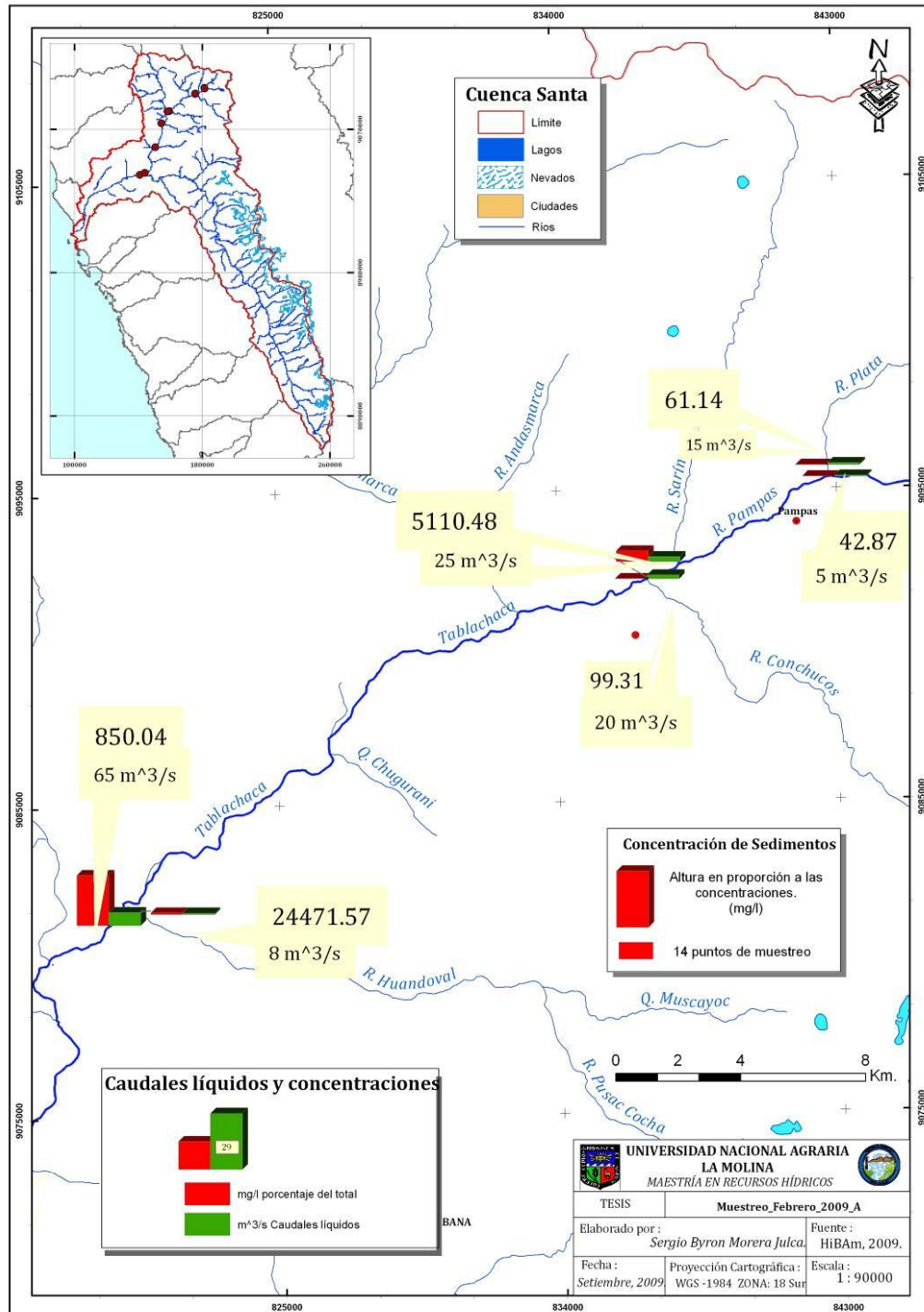


Figura 51-a. Muestreo de los principales afluentes de sedimentos en suspensión cuenca del río Tablachaca; desde sus nacientes en la laguna Pelagatos hasta la intersección con el río Santa.

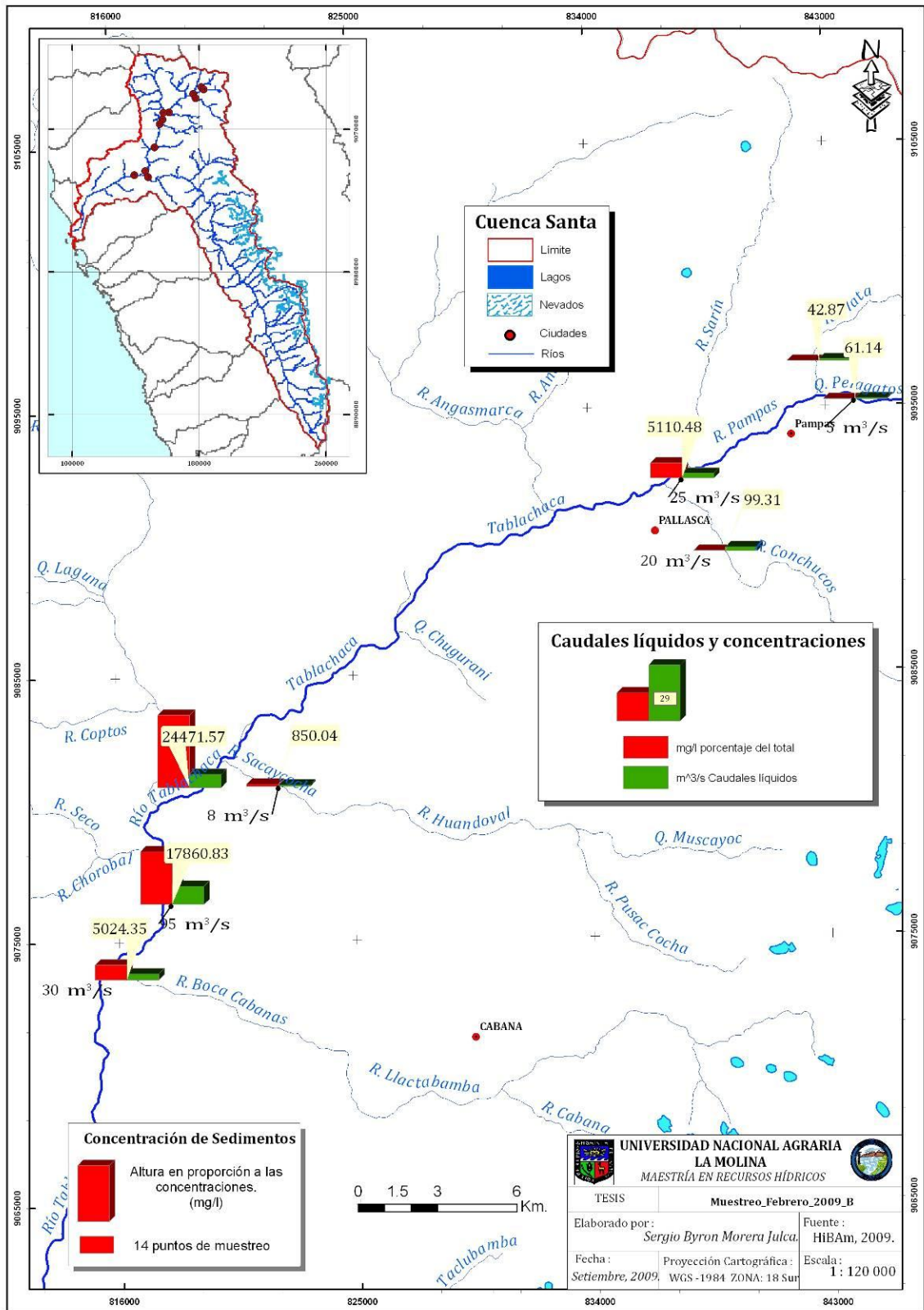


Figura 51-b. Muestreo de los principales afluentes de sedimentos en suspensión cuenca del río Tablachaca; desde el río Llactabamba hasta la intersección con el río Santa.

5.8 Resultados espaciales de las misiones realizadas en la cuenca del río Santa

La recolección de muestras de sedimentos en suspensión y monitoreo en la cuenca del río Santa se realizó mediante cuatro misiones (Tabla 11), se pudo observar la alta erodabilidad de la cuenca media y alta, asemejándose a una cuenca joven al estar conformada por fuertes pendientes y poca cobertura vegetal.

Tabla 11. Objetivos alcanzados en las misiones realizadas durante el presente estudio.

| Misión | Alcances |
|--------|--|
| I y II | <ul style="list-style-type: none">- Estableció diferencias entre técnicas utilizadas para la obtención de caudales y muestras de sedimentos en suspensión (Figura 67, 68).- Estableció diferencias entre técnicas de los laboratorios para el análisis de sedimentos en suspensión.- Con la recolección de muestras de la cuenca del río Santa y subcuenca Tablachaca se validó la base de datos obtenida de Chavimochic.- Mapa de muestreos en toda la cuenca como referencia de variabilidad temporal (un panorama a nivel de cuenca) (Figura 54).- Mejorar la resolución de los datos temporales; para finalmente generar una base de datos espaciales y temporales confiables. |
| III | <ul style="list-style-type: none">- Estableció una relación entre la turbidez y la concentración de sedimentos en suspensión (Figura 49).- Estudio la dinámica del flujo líquido al paso instantáneo para la estación de Condorcerro. |
| IV | <ul style="list-style-type: none">- Interpretación de la relación entre el caudal, turbidez y caudales sólidos frente a la actividad antrópica y la acción climática (Figura 44-48). |

Con los datos obtenidos durante la etapa de monitoreo y el SRTM se pudo construir el perfil longitudinal del río Santa y Tablachaca (Figura 52 y 53). La figura 52 nos muestra una pendiente del cauce del río Santa, la cual parece estable debido a las bajas pendientes hasta el Cañón del Pato, además debido a dicha pendiente podemos decir que predomina la carga en suspensión, la longitud del río Santa provocaría eventos de abrasión a lo largo del cauce; otra característica adicional es el alto número de conos aluviales observados en las laderas de dicho río. En contraste con el perfil longitudinal del río Tablachaca, el río Santa tiene un mayor tiempo de descarga debido a las bajas pendientes y la longitud.

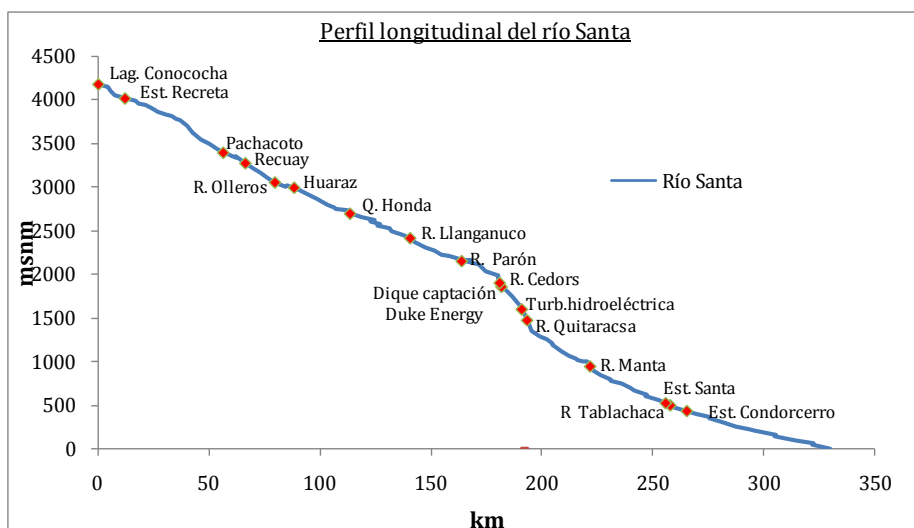


Figura 52. Puntos de muestreo en el cauce principal del río Santa.

El primer tramo del perfil longitudinal del río Tablachaca con fuertes pendientes, refleja el alto grado de erodabilidad en la laderas; Un evento que juega un rol importante en la cuenca del río Tablachaca son los frecuentes deslizamientos incluso uno de ellos llego hasta el cauce principal del río el cual formo una represa natural y fue aperturada por la fuerza de las aguas del río Tablachaca, dicho deslizamiento representa miles de toneladas listas para ser transportadas por encontrarse cerca al cauce y formando parte del cauce del río Tablachaca (Figura 53 y 69).

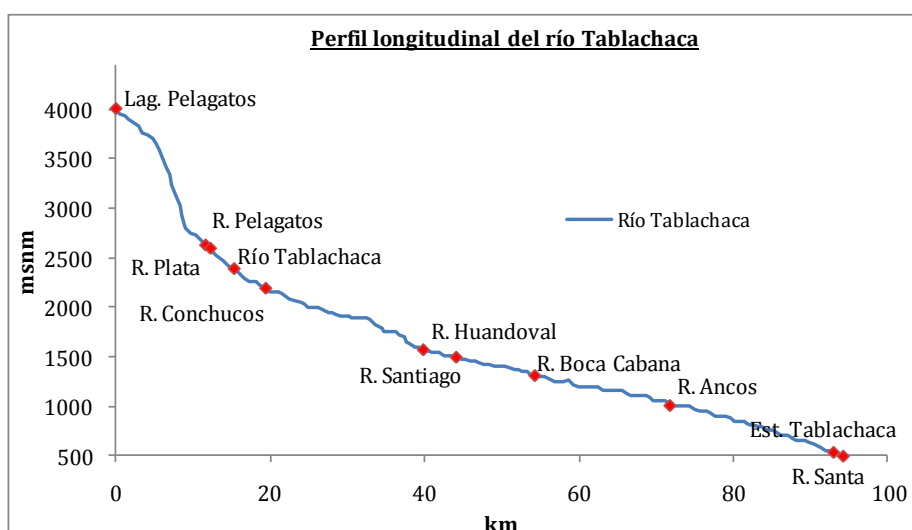


Figura 53. Puntos de muestreo del río Tablachaca desde su nacimiento hasta su confluencia con el río Santa. Cuenca pequeña con un índice de compacidad cercana a 1, la cual indica que la descarga de las lluvias van a ser violentas por ende tomaran menor tiempo en llegar a la estación Condorcerro.

Utilizando estos perfiles (Figura 52 y 53) una interpretación de la dinámica de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa y el río Tablachaca es: No existe una sincronización en la descarga, ya que el flujo del río Tablachaca llega primero con una elevada concentración de sedimentos y bajos caudales líquidos, pero luego llega el aporte del río Santa que transporta elevados caudales líquidos pero con bajas concentraciones de sólidos en suspensión, ocasionando una dilución en el flujo del río Santa para la estación de Condorcerro.

5.8.1 Alcances de la variabilidad espacial de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa

La variabilidad espacial es bien representada mediante el uso de herramientas SIG, he aquí algunos resultados de las misiones realizadas a la cuenca del río Santa.

a. Panorama de la variabilidad espacial durante las misiones

Durante las misiones realizadas donde se evaluaron los principales afluentes de sedimentos en Tablachaca y Santa, se encontró un importante contraste de erosión, además en la cuenca Tablachaca se presentaron los mayores caudales específicos.

La cuenca Tablachaca presenta un alto contraste de erosión mostrados a través de los caudales específicos que va de 1 - 1796 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$; la subcuenca de Sarín presento uno de los caudales específicos más elevadas, pero también observamos subcuencas con bajos caudales específicos y de áreas representativas en la cuenca del Tablachaca, una de ellas es la sub cuenca Conchucos (Figura 54); además no se asemeja al patrón que a mayor altitud mayor erosión, es decir el contraste se debe más al escenario de la cuenca. La cuenca del río Santa presento mayores problemas de erosión en las subcuencas ubicadas en la Cordillera Negra.

Transponiendo la figura 3, 4, 54, 65 y 67 podemos observar que los factores climáticos juegan un papel fundamental en la erosión de los suelos de la cuenca del río Santa, pero un factor determinante en la producción de sedimentos en suspensión es la litología que para dicha cuenca está directamente relacionada al uso de estas con la minería.

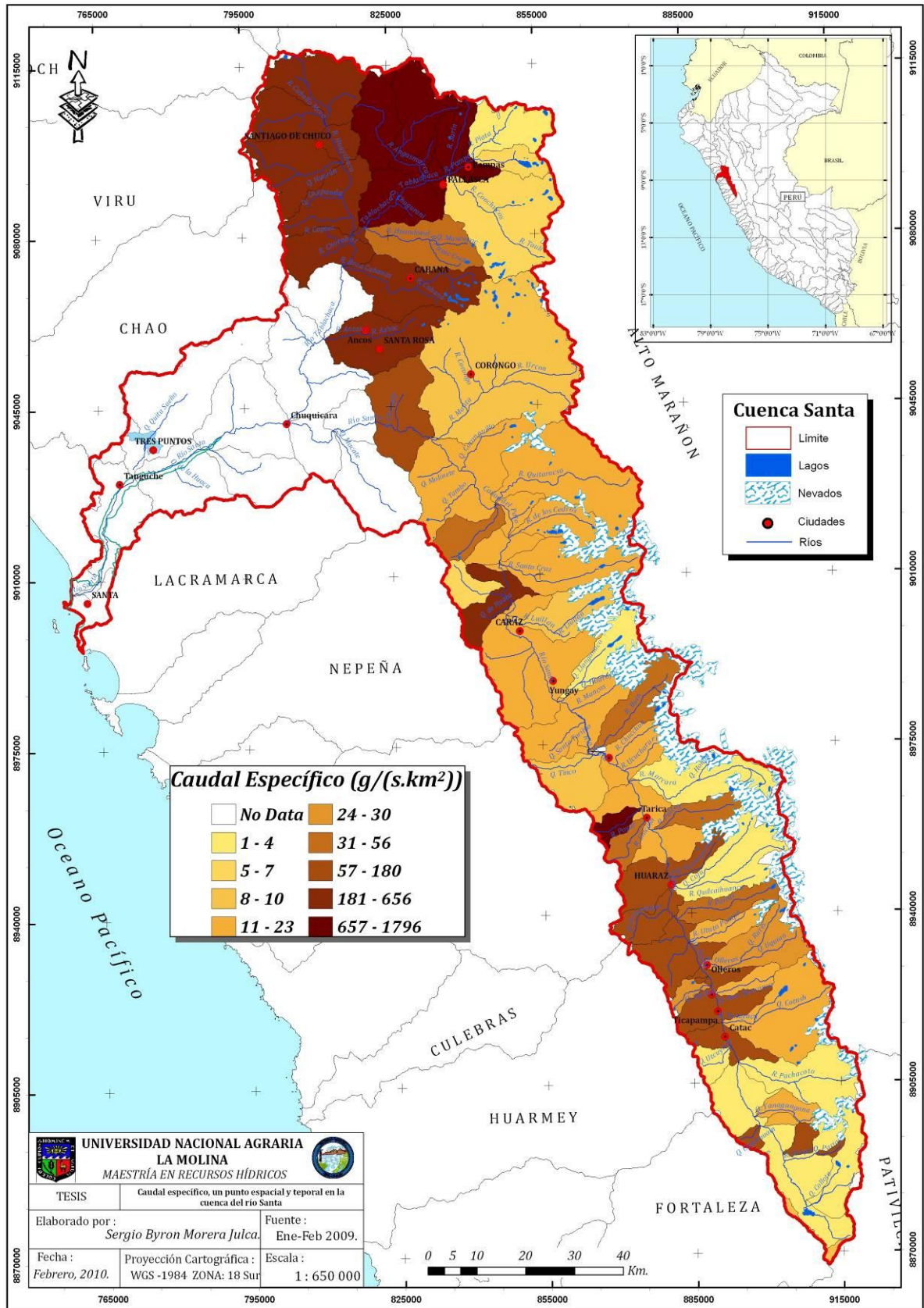


Figura 54. Contraste de la erosión en la cuenca media y alta del río Santa y Tablachaca.

b. Análisis de los filtros de sedimentos

La inspección con la lupa binocular muestra dos tipos de sedimentos (Figura 55). Algunos granos alrededor de 100 μm y una capa de arcillas que no podemos determinar con la lupa binocular.

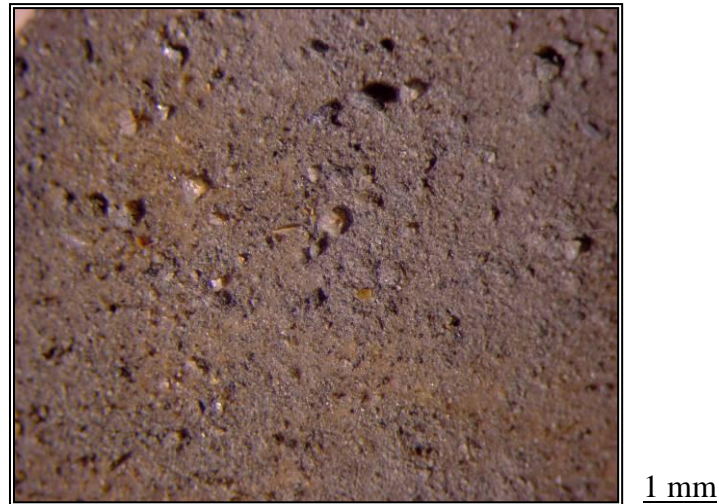


Figura 55. Vista del material en suspensión; muestra tomada del río Santa en una de las misiones realizadas durante el estudio.

La inspección con el MEB (Figura 56 a, b y c), muestra claramente partículas compactas y angulosas sin porosidad. Es decir que los sedimentos gris que salen del río Santa en mayor parte no son partículas de carbón, estas tienen la apariencia de micas, que es uno de los minerales más abundantes en la superficie terrestre (Figura 3 y Tabla 1) además las micas las encontramos con otros minerales como cuarzos y feldespatos, finalmente las partículas encontradas son una mezcla de micas y silicas.

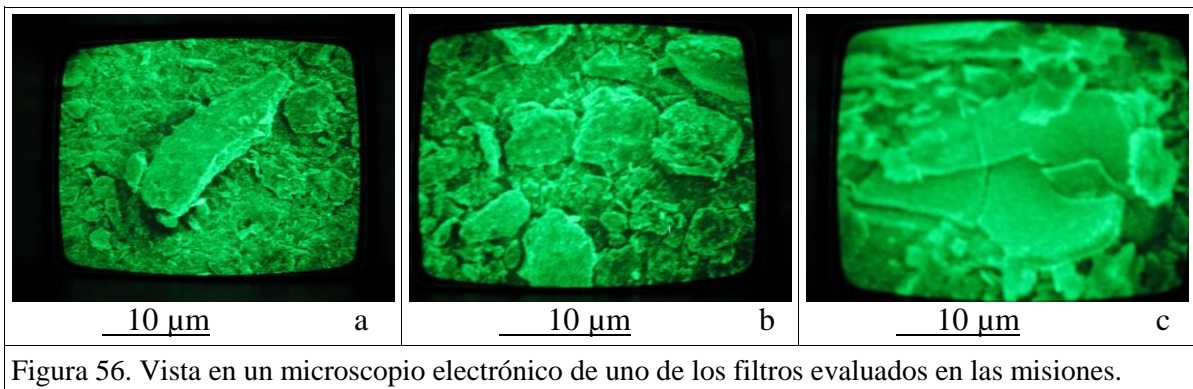


Figura 56. Vista en un microscopio electrónico de uno de los filtros evaluados en las misiones.

Del análisis de los filtros con el MEB no podemos decir que los sedimentos que salen de la cuenca del río Santa provienen de las minas de carbón, ya que las muestras realizadas no proveen la suficiente evidencia para una buena conclusión; Es imprescindible identificar la naturaleza de la basura mineral de las minas que están en los ríos, sin embargo para concluir si la mayor carga de sedimentos en suspensión son originados por acción antrópica se requiere de una base de datos completa que incluya por lo menos un monitoreo durante un ciclo hidrológico con muestreos aguas arriba y aguas abajo de la minas.

5.8.2 Variabilidad espacial interanual

Después de haber completado los datos de sedimentos en suspensión y caudales para las estaciones de Santa, Tablachaca y Condorcerro (Figura 7); se calculó el aporte anual promedio en porcentaje, se observa que el mayor aporte de sedimentos en suspensión proviene de la cuenca del río Tablachaca (estación Tablachaca) variando entre un 66-49% anual durante los siete años de monitoreo; mientras que la cuenca del río Santa (estación Santa) aporta entre un 33-50% de sedimentos en suspensión. El año de mayor producción de sólidos para la estación Santa fue 2005-2006 a pesar que este año solo aportó un 70% del caudal líquido, en contraste a ello el año 2004-2005 aportó el 79% del caudal líquido pero solo el 33% del caudal sólido; entonces para la Estación Santa en un balance anual no se rige a un patrón donde a mayor caudal mayor producción de sedimentos (Figura 57, Tabla 7 y 10).

Estación Tablachaca tiene una influencia de primer orden $\pm 57\%$ en la producción de sedimentos en suspensión global en la cuenca del río Santa (estación Condorcerro) a pesar que solo aporte un $\pm 20\%$ del volumen anual de agua. Por otro lado la cuenca alta y media del río Santa aporta un 43% de sedimentos en suspensión anual pero tiene un aporte significativo del $\pm 79\%$ del volumen anual de agua para la estación de Condorcerro (Tabla 7 y 10).

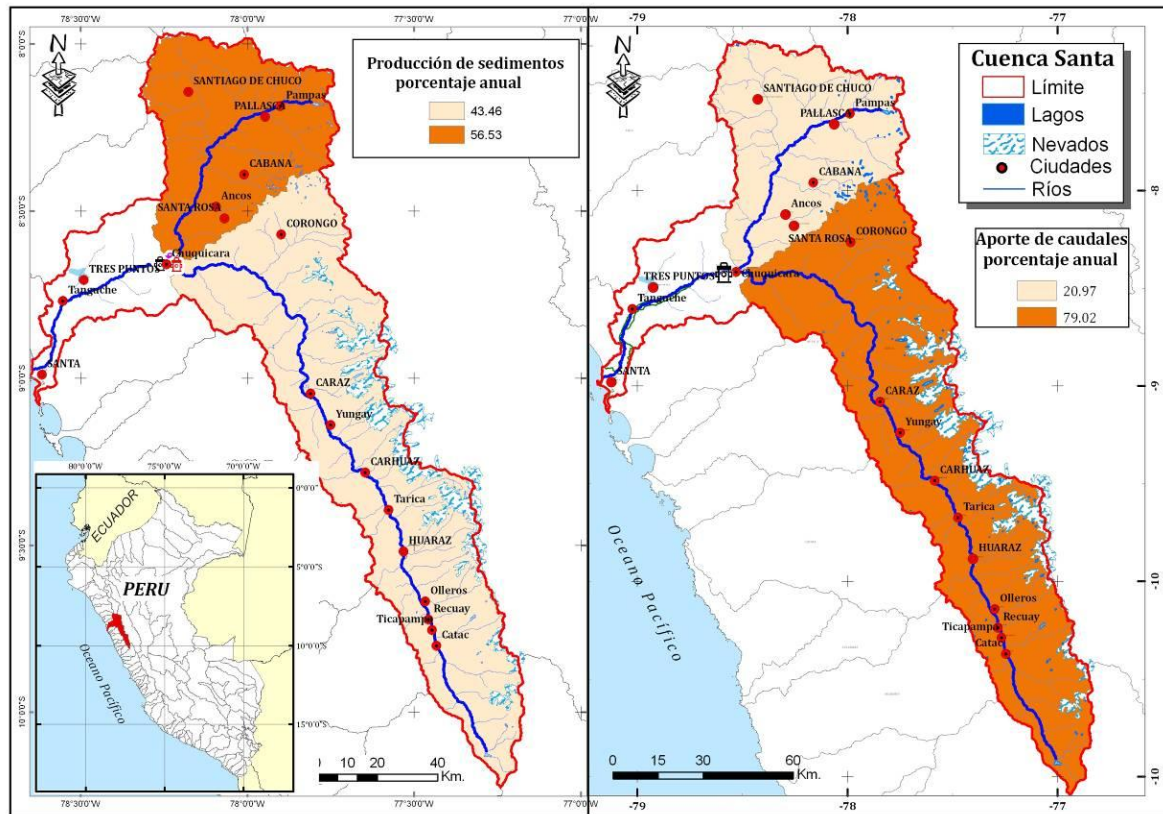


Figura 57. Aporte media anual en porcentaje de sólidos en suspensión y caudales líquidos para las estaciones de Tablachaca y Santa (2002-2009).

5.9 Resultados de la producción de sedimentos

Se puede resaltar la alta concentración de sedimentos en suspensión promedio para la cuenca del río Tablachaca, además de la elevada erosión expresada en caudal específico para la cuenca del río Tablachaca, dichas cifras la ubican entre una de las cuencas más erosionadas después de las cuencas de los andes orientales bolivianos (Figura 63); del río Santa se puede resaltar el abundante recurso hídrico que posee dicha cuenca (Tabla 12).

Las continuas y abundantes precipitaciones van a causar huaycos, derrumbes, deslizamientos, etc. en la cuenca media y alta del Santa y Tablachaca, proporcionando un plus a la dinámica antes expuesta (Figura 69, 71 y 72). La situación se agrava para la cuenca Tablachaca que presenta altas pendientes (Tabla 13), cobertura vegetal estacional y escasa, litología que está directamente relacionada con la actividad minería (Figura 3 y 54) y elevadas precipitaciones (Figura 2).

Tabla 12. Panorama de la producción de sedimentos de la cuenca media-alta del río Santa y Tablachaca.

| Cuenca | Estación | Periodo de evaluación | Área de drenaje (km ²) | Sistema de coordenadas geográficas WGS-84 | | Rango de elevación (m) | Descarga líquida promedio (km ³ /año) | Trasporte de sedimentos en suspensión | Descarga de sedimentos (t/año) | Caudal específico (t.km ⁻² .año ⁻¹) |
|-----------|------------|-----------------------|------------------------------------|---|--------------|------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------------|--|
| | | | | Latitud | Longitud | | | | | |
| Santa | Condorcero | 2000-2009 | 9969 | -78.23181316 | -8.647528679 | 479 - 6867 | 4.21 | 1 469.4 | 15 127 089.1 | 1 517.4 |
| Santa | Santa | 2002-2009 | 6815 | -78.26174246 | -8.657913363 | 507 - 6867 | 3.32 | 557.3 | 5 306 152.4 | 778.6 |
| Talachaca | Talachaca | 2002-2009 | 3132 | -78.21162255 | -8.660668116 | 524 - 4950 | 0.88 | 3 182.2 | 6 902 159.5 | 2 204.2 |

CAPÍTULO VI.- CONCLUSIONES

- La dinámica del transporte de sedimentos en suspensión al paso diario es muy compleja para la estación Condorcerro, los caudales sólidos aumentan de manera potencial al caudal líquido pero hay eventos picos de descarga o diluciones estos procedentes de la cuenca Tablachaca y/o la cuenca media-alta del río Santa, reflejándose en el análisis de PDF.
- Se cuantificó la disponibilidad de los datos hidrosedimentológicos tomados por Chavimochic luego se completó la base de datos de caudales caracterizándose la hidrología en base a los caudales líquidos para el periodo 1977-2009 en la estación Condorcerro; cuya producción promedio anual es 4.16 km^3 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-October).
- La producción promedio anual de sedimentos en suspensión observados para la estación de Condorcerro (2000-2009) es de 15.1 millones de toneladas de los cuales en época de lluvias se produce $\pm 85\%$ del volumen anual de caudal sólido en suspensión, $\pm 13\%$ en época de transición y $\pm 2\%$ en época de estiaje, dicha estación involucra un área de $\pm 10000 \text{ km}^2$ y se encuentra ubicada a 479 msnm en el cauce del río Santa.
- Se observó que el mayor aporte de sedimentos en suspensión proviene de la cuenca del río Tablachaca (estación Tablachaca) 58% y solo aporta 20.6% del caudal líquido; mientras la cuenca media y alta del río Santa (estación Santa) aporta el 42% de sedimentos en suspensión y 71.4% del caudal líquido anual.

- Para el cálculo de sedimentos en suspensión anual, se desarrollo cuatro metodologías: Metodología 1 consiste en un cálculo directo ($Q_s = MES \times Q$) además para llenar los datos faltantes se utilizó los datos de las otras dos estaciones (Figura 7), Metodología 2 con un modelo hidrosedimentológico anual se calculó el caudal sólido a partir del caudal líquido ($Q_s=aQ^b$), Metodología 3 se realizó el cálculo con toda la data disponible ($Q_s=cQ^d$), finalmente la Metodología 4 es un cálculo directo $Q_s = MES \times Q$ pero cuyos vacios fueron llenados mediante interpolación.
- Un análisis espacio-temporal de los datos obtenidos durante los monitoreos en la cuenca media y alta del río Santa y Tablachaca muestran la alta variabilidad en la producción de sedimentos $1 - 1796 \text{ g.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$; se observó como afluentes con mayor caudal específico el río Sarín en la cuenca alta del Tablachaca y el río Poyor proveniente de la Cordillera Negra.
- La actividad acelerada de la microminería dispersa en la cuenca, suelos altamente erosionables, pendientes muy accidentadas, escasa cobertura vegetal, precipitación y la falta de conservación de suelos generan un caudal específico de $779 \text{ t.año}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ provenientes de la cuenca media y alta del río Santa ($\pm 6815 \text{ km}^2$); pero la situación se agrava para la cuenca del río Tablachaca ($\pm 3200 \text{ km}^2$) con $2205 \text{ t.año}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.
- En un análisis de la producción anual de sedimentos en suspensión con los eventos ENSO no presentan un patrón característico frente a dicho evento para la cuenca media y alta del río Santa.
- Modelar dos microcuencas con características similares bien definidas, una donde predomine el impacto antrópico y otra la acción de la naturaleza no fue posible porque la litología está directamente relacionado con la minería, además se requiere por lo menos un año de información hidrosedimentológica, debido a la alta variabilidad estacional climática.

CAPÍTULO VII.- RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

- Para comprender a mayor detalle la dinámica de la producción de sedimentos se requiere de una mayor resolución espacial y una red de estaciones de monitoreo en los principales afluentes de producción de sedimentos. Sería ideal realizar un estudio geoquímico de la cuenca para determinar el origen de los sedimentos. El monitoreo debe realizarse durante todas las estaciones del año, antes y después de lugares donde existe actividad minera; A la vez es necesario hacer pruebas de granulometría del lecho así como de los sólidos en suspensión del río Tablachaca y Santa, donde se presenta bancos de sedimentos provenientes de remociones en masa, con el fin de tener cifras sobre la estabilidad del cauce.
- La cuenca del río Santa, especialmente la subcuenca del río Tablachaca requiere una acción inmediata para la legalización de los pequeños mineros ubicados en la cuenca media y alta de la cuenca, programas de conservación de suelos, forestación y concientización de la población acerca de la erosión causada por sus actividades; además de realizar un estudio de riesgos con su respectivo plan de mitigación. La situación es realmente inquietante considerando los altos niveles de producción de sedimentos en la cuenca teniendo problemas para el tratamiento de estas especialmente cuando estas traen altas concentraciones; además de la alta degradación del ambiente.

VIII.- BIBLIOGRAFÍA

- Aalto, R.; Dunne, T. & Guyot, J.L. 2006. Geomorphic Controls on Andean Denudation Rates. *The Journal of Geology*. 114: 85-99.
- Abernethy, C. 1990. The use of river and reservoir sediment data for the study of regional soil erosion rates and trends. Artículo presentado en International Symposium on Water Erosion, Sedimentation and Resource Conservation. Dehradun, India.
- Aguirre, J. 1983. Hidráulica de sedimentos, CONICIT y CIDIAT, Mérida, Venezuela. 269 p.
- Artigas, J.; López, J & Córdova, J. 2006. Methodology to estimate the total sediment transport in mountainous river basins (En línea). Venezuela. Scientific electronic library on line. vol.29 no.3. 1-18 p. Disponible en http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702006000300003&lng=en&nrm=iso&tlng=es. Consultado julio 01 de 2008.
- ATA (Asesores Técnicos Asociados S.A.), Perú; INADE (Instituto Nacional de Desarrollo, Perú). 2002. Plan de gestión de la oferta de agua en la cuenca de gestión Santa. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento-Instituto Nacional de desarrollo, Proyectos especiales Chavimochic y Chinea.
- Baraer, M.; McKenzie, J.; Mark, B.; Bury, J. & Knox, S. 2009. Characterizing contributions of glacier melt and groundwater during the dry season in a poorly gauged catchment of the Cordillera Blanca (Peru). *Advances in Geosciences*. 22: 41-49.
- Barry, R. & Seimon, A. 2000. Research for Mountain Area Development: Climatic Fluctuations in the Mountains of the Americas and Their Significance. *A Journal of the Human Environment*. 29(7): 364-370.
- Batalla, R. & Sala, M. 1994. Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river. *IAHS*. 224: 299-305.
- Bateman, A & Aguilar C. 2004. Modelo numérico para analizar el transporte de fondo y suspensión en ríos y estuarios, desarrollado mediante el método del volumen finito (En línea). *Revista Escuela Colombiana De Ingeniería* N°. 53. 9-19 p. Disponible en www.gits.ws/06articulos/pdfs/paper-eci.pdf. Consultado julio 15 de 2008.
- Collins, D. 2002. Long-term close-interval monitoring of suspended sediment transport in meltwaters draining from an Alpine glacier. *Erosion and Sediment Transport Measurement: Technological and Methodological Advances Workshop*. 19-21.
- Condom, T.; Escobar, E.; Purkey, D.; Pouget, J.; Suarez, W.; Ramos, C.; Apaestegui J.; Zapata, M. & Gomez, J. (en revisión). Modelling the Hydrologic Role of Glaciers within a Water Evaluation and Planning System (WEAP): A case study in the Rio Santa watershed (Peru). *Journal of Hydrology*.
- Costa, E & Caliari, P. 2005. Estimation of the concentration of suspended solids in rivers from turbidity measurement: error assessment. *IAHS*. 291: 151-160.

- Day, T. 1988. Evaluation of long term suspended sediment records for selected Canadian rivers. *IAHS*. 17: 189-195.
- 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. *IAHS*. 54(1): 135-145.
- Daniel, R.; Rinella, F.; Joseph, R.; Greg, F.; Sandra, E.; Gregory, C.; Gregory, S. & S, Sobieszcyk. 2007. Nutrient and Suspended-Sediment Transport and Trends in the Columbia River and Puget Sound Basins, 1993-2003. USGS. Scientific Investigations Report. 5186: 116 p.
- Davy, P. & Crave, A. 2000. Upscaling local-scale transport processes in large-scale relief dynamics. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*. 25: 533-541.
- Degens, E; Kempe, S & Richey, J. 1991. Biogeochemistry of Major World Rivers. Scientific Committee On Problems of the Environment (Scope 42). 356 p.
- Delgado, E. 2008. "Comportamiento del río Santa ante el Cambio Climático". Ministerio de Agricultura. Dirección Regional Agraria Ancash. 1-15 p.
- Dominic, M.; Zvikomborero, H.; Lewis, J.; Nhapi, I. & Senzanje, A. 2008. Integrated Water Resources Management (IWRM) – From Concept to Practice. *Journal Science Direct. Physics and Chemistry of the Earth*. 33: 609-613.
- Edwards, T. & Glysson, D. 1970, Field methods for measurement of fluvial sediment: U.S. Geological Survey. 3(2). 89 p.
- Farnsworth, K & Milliman, J. 2003. Effects of climatic and anthropogenic change on small mountainous rivers: the Salinas River example. *Global and Planetary Change*. 39:53-64.
- 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.
- Guy. H. 1977. Sediment information for an environmental impact statement regarding a surface coal mine, western United States. *IAHS*. 122: 98-108.
- 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. *IAHS*. 236: 55-63.
- Hofer, M. 2007. Statistical downscaling of NCEP/NCAR reanalysis data to air temperature and specific humidity above an outer tropical glacier surface Artesonraju (Peru). Master en ciencias Naturales. University of Innsbruck. 93 p.
- Hooke, R. 1994, On the efficacy of humans as geomorphic agents: *GSA Today*, 4(9): 217, 224-225.
- Hooke, R. 1999, Spatial distribution of human geomorphic activity in the United States: *Earth Surface Processes and Landforms*. 24: 687-692.
- Hooke, R. 2000, On the history of humans as geomorphic agents: *Geology*. 28: 843-846.

- INADE (Instituto Nacional de Desarrollo, Perú). 2001. Proyecto Especial Chincas. Diagnóstico de gestión de la oferta de agua cuencas: Santa-Lacramarca, Nepeña, Casma-Sechin. Chimbote, Lima. Tomo I, II y III.
- INRENA (Instituto Nacional de Recursos Naturales, Perú). 1996. Diagnostico de la calidad del agua de la vertiente del pacifico. (En línea). Perú. p. 1-779 Disponible en http://www.inrena.gob.pe/bibliotecadigital/IndicePublicacion.aspx?id_Publicacion=HASH151298ea10b4a386c72845. Consultado julio 14 de 2008.
- Jack, L. 2003. Turbidity-controlled sampling for suspended sediment load estimation. IAHS. 283: 13-20.
- Jack, L. 1996. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. USDA, VOL. 32(7): 2299-2310.
- 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. IAHS. 249: 325-332.
- Juen, I. 2006. Glacier mass balance and runoff in the tropical Cordillera Blanca, Perú. Doctor of natural science. Institute of Geography, University of Innsbruck. 173 p.
- Juen, I.; G. Kaser & Georges, C. 2007. Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). Global and planetary change. 59: 37-48.
- Kaser, G.; Ames, A. & Zamora, M. 1990. Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. Annals of Glaciology. 14: 136-140.
- Keller, H. & Weibel, P. 1991. Suspended sediments in streamwater - indicators of erosion and bed load transport in mountainous basins. IAHS. 203: 53-61.
- Kleinmann, R. 2000. Prediction of Water Quality at Surface Coal Mines. Prediction Workgroup, National Energy Technology Laboratory (U.S.), National Mining Association (U.S.). 241p.
- 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. IAHS. 288: 220-225.
- Leopold, L.; Wolman, M. & Miller, J. 1964. Fluvial processes in geomorphology: San Francisco. California. W.H. Freeman and Company. 522 p.
- Lewis, W. & Saunders, J. 1989. Concentration and transport of dissolved and suspended substances in the Orinoco River. Biogeochemistry. 7: 203-240.
- Mark, B.; McKenzie, J. & Gómez, J. 2006. Hydrochemical evaluation of changing glacier meltwater contribution to stream discharge: Callejón de Huaylas, Peru. IAHS. 50(6): 975-987.
- Mark, B. & Seltzer, G. 2003. Tropical glacier meltwater contribution to stream discharge: a case study in the Cordillera Blanca, Peru. Journal of Glaciology. 49 (165): 271-281.

- Martínez, V. 1999. Simulación y comprobación experimental de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas no aforadas mediante modelos distribuidos implementados sobre SIG. Tesis doctoral. Escuela técnica superior de ingenieros agrónomos. Madrid, España. 453 p.
- Maurer, D. 2009. Past and future runoff from glacier-covered tropical catchment basins in the Cordillera Blanca, Peru. A modeling approach based on IPCC scenarios. Master of Natural Science. Institute of Geography, University of Innsbruck. 109 p.
- Mizuhara, K & Ohte, K. 1987. Sediment yield from bare slopes due to landslides in central Japan. IAHS. 165: 251-252.
- Mizuyuw, T. 1982. Analysis of sediment yield and transport data for erosion control Works. IAHS. 137: 177-182.
- 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. (En línea). Perú. Disponible en www.minem.gob.pe/archivos/dgaam/publicaciones/evats/santa/santa.htm. Consultado agosto 18 de 2008.
- Nash, J. & Sutcliffe, J. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. Journal Hydrology. 10(3): 282-290.
- ONER (Oficina Nacional de Evaluación de los Recursos Naturales). 1972. Inventario, Evaluación y uso Racional de los Recursos Naturales de la Costa. Cuenca de los ríos Santa, Lacramarca y Nepeña. Lima. 3 vol. 1175 p.
- Pepin, E; Guyot J.L; Escobar, F & Carretier, S. (en revisión). Suspended sediment yields exported by the Andean rivers of Chile from the Andes to the Pacific Ocean.
- Restrepo, JD.; Kjerfve, B.; Hermelin, M. & Restrepo, JC. 2006. Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. Journal of Hydrology. 316: 213-232.
- Rius, J.; Batalla, R & Poch, M. 2001. Monitoring Water and Sediment Yield In Mediterranean Mountainous Watersheds: Preliminary Results. 10th International Soli Conservation Organization Meeting. 223-228.
- Rocha A. 1999. "Control de material sólido en el sistema de aprovechamiento del Proyecto Especial CHAVIMOCHIC".
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Perú). 2005. Escenarios climáticos Futuros y Disponibilidad del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Santa (En línea). Serie Cambio climático. p. 01-30. Disponible en <http://www.conam.gob.pe/proclim/doc/Escenarios%20Climáticos%20Futuros%20y%20disponibilidad%20del%20recurso%20h.pdf>. Consultado marzo 17 de 2008.
- Silva, G. 2003. Transporte de sedimentos en ríos. (En línea). Colombia. Disponible en www.geocities.com/gsilvam/sedimentos.htm. Consultado marzo 17 de 2008.
- SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). 2009. Descarga de Imágenes Raster en formato GRID (En línea). NASA (National Aeronautics and space administration). <http://antroposig.ciesas.edu.mx:8080/joom/srtm-desc>. Consultado el 10 de setiembre 2008.

- TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). 2010. Descarga de precipitaciones especializada (En línea). NASA (National Aeronautics and space administration). http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas/TRMM_V6.3B42.shtml. Consultado el 10 de febrero 2010.
- Vauchel, P. 2009. HYDRACCESS 4.4. Software para manejo y procesamiento de información hidro-meteorológica. www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess.
- Vuille, M.; Francou, B.; Wagnon, P.; Juen, I.; Kaser, G.; Mark, B. & Bradley, R. 2008. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*. 89: 79-96.
- Walling, D. 1997. The response of sediment yields to environmental Change. *IAHS*. 245: 77-87.
- Walling, D. 2006. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*. 79: 192-216.
- 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.
- Walling, D. & Fang, D. 2003. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 39: 111-126.
- Williams, N.; Walling, D. & Leeks, G. 2007. High temporal resolution in situ measurement of the effective particle size characteristics of fluvial suspended sediment . *Water Research*. 41: 1081-1093.

ANEXOS

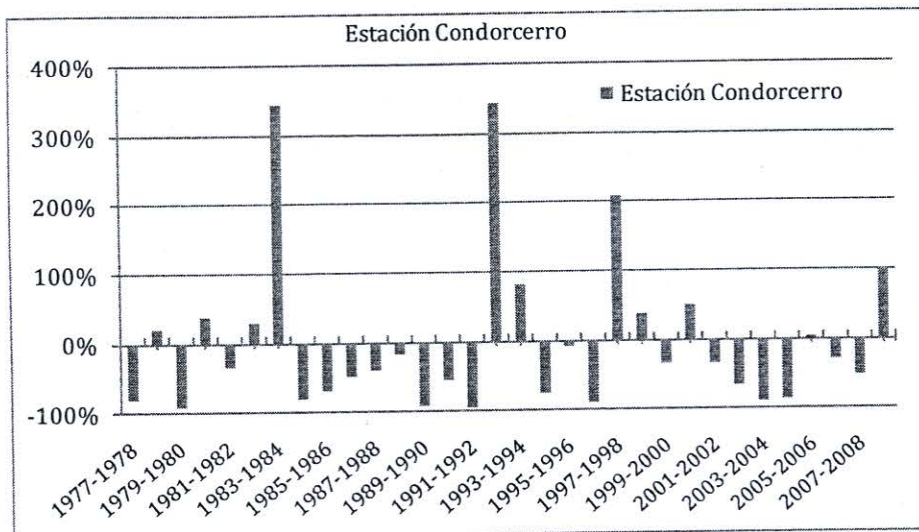


Figura 58. Variabilidad interanual en la producción de sedimentos en suspensión para la cuenca del río Santa.

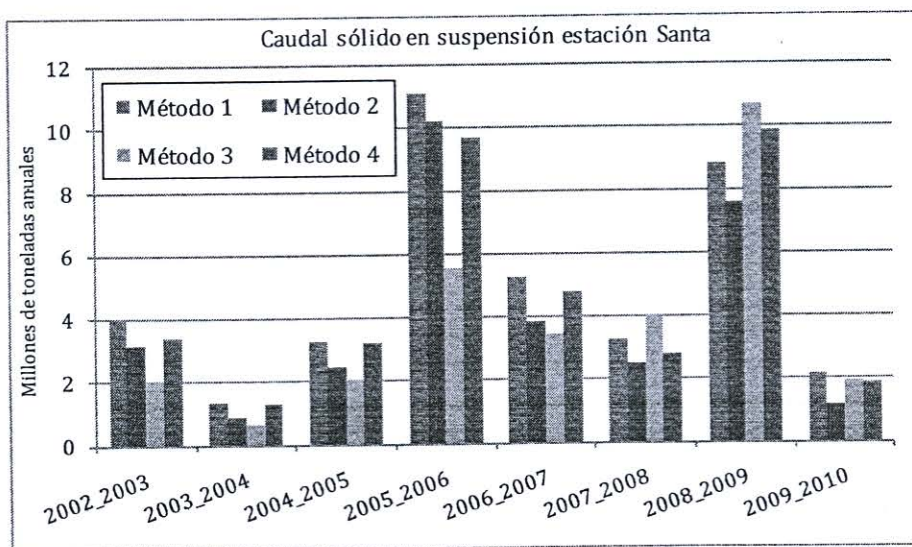


Figura 59. Cálculo de caudales sólidos anuales con las cuatro metodologías planteadas para cada año hidrológico.

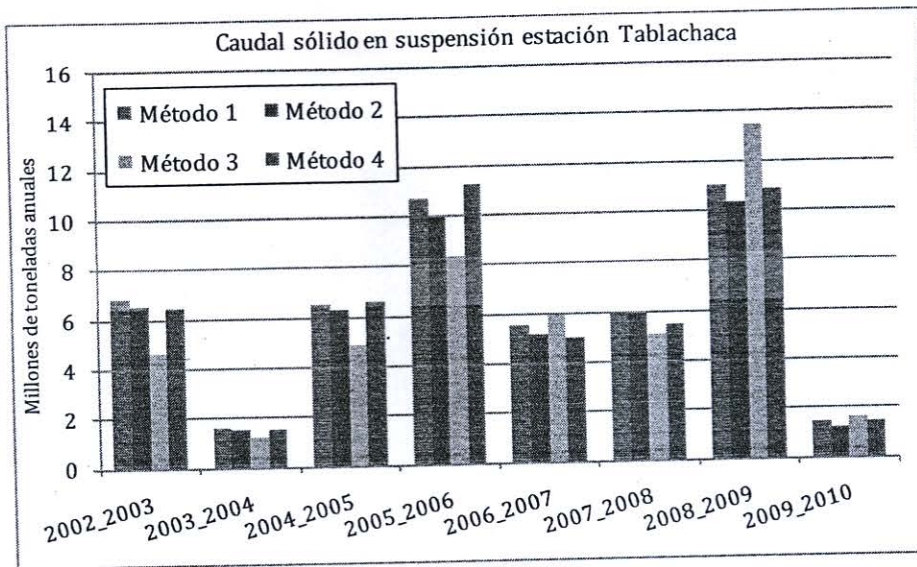


Figura 60. Cálculo de caudales sólidos anuales con las cuatro metodologías planteadas para cada año hidrológico.

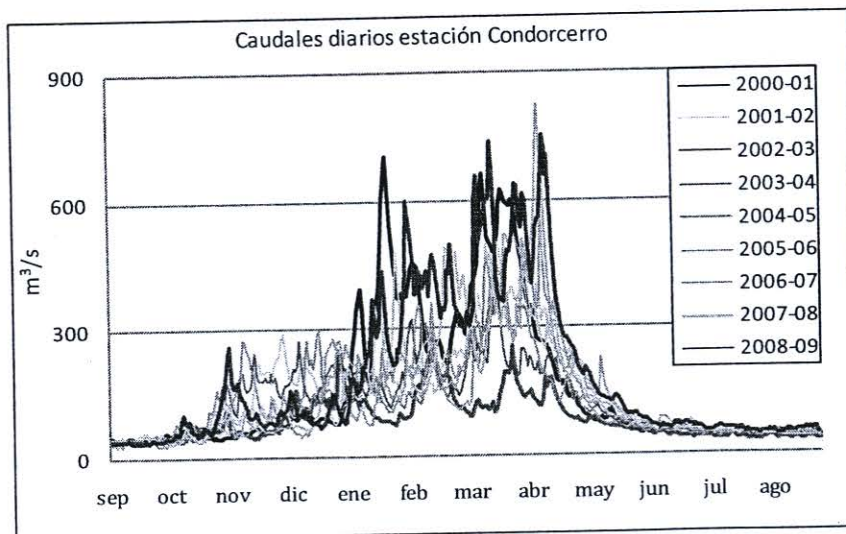


Figura 61. Caudales sólidos anuales observar caudales para los años 2000-2001 y 2003-2004 años en los que se producen el máximo y mínimo de sedimentos en suspensión para la cuenca del río Santa.

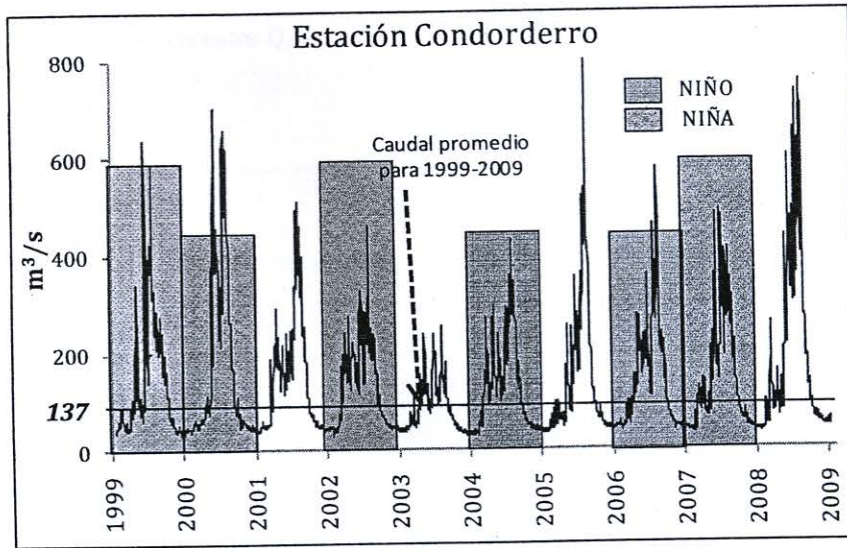


Figura 62. Producción de sedimentos en eventos ENSO.

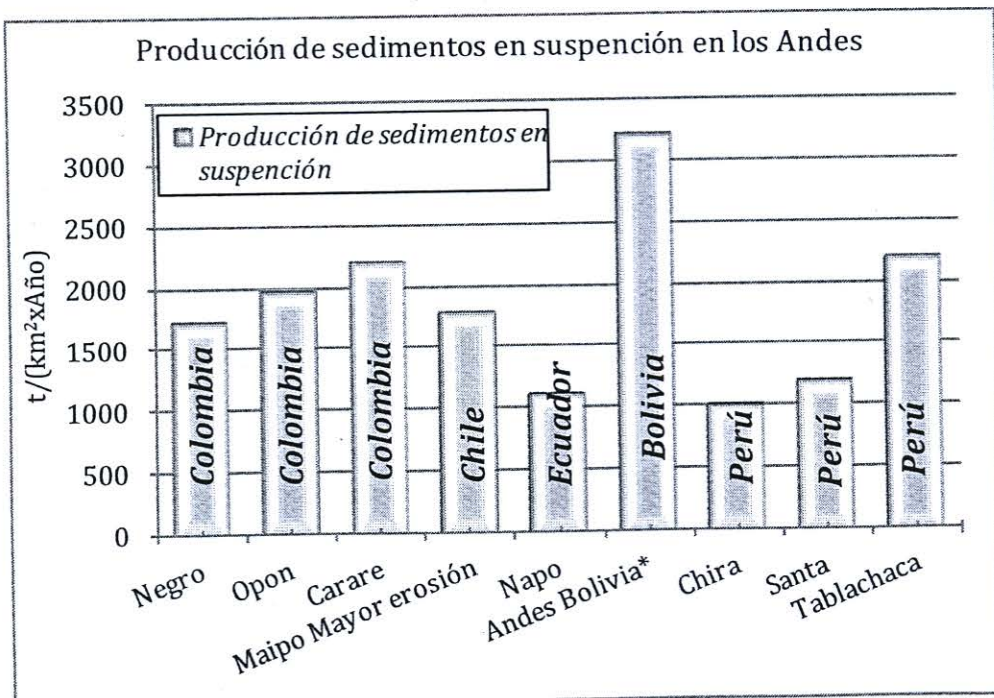


Figura 63. Producción de sedimentos en suspensión en la Cordillera de los Andes (Restrepo et al., 2006; Pepin (en revisión); Laraque et al., 2004 & J.L. Guyot et al., 1996).

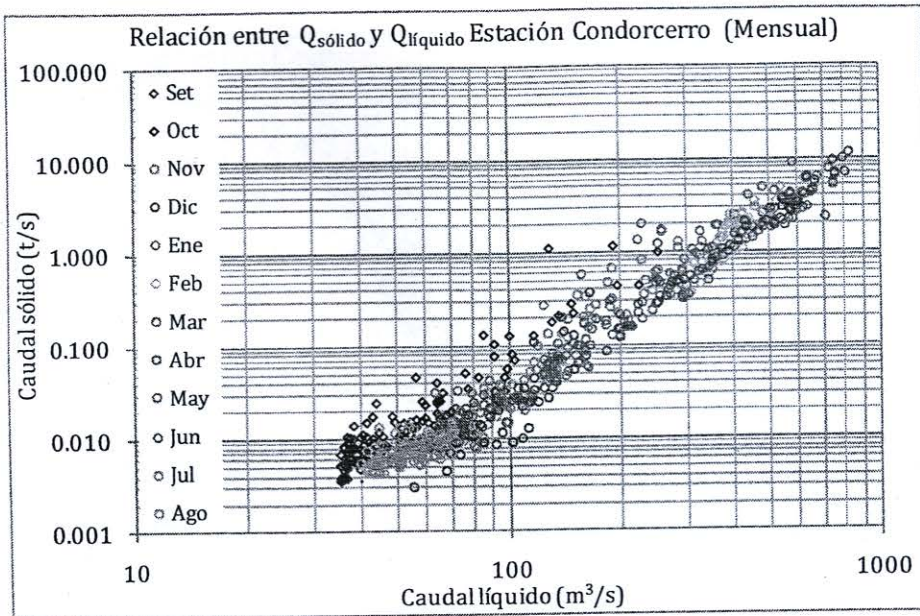


Figura 64. Análisis mensual de la producción de sedimentos en suspensión.

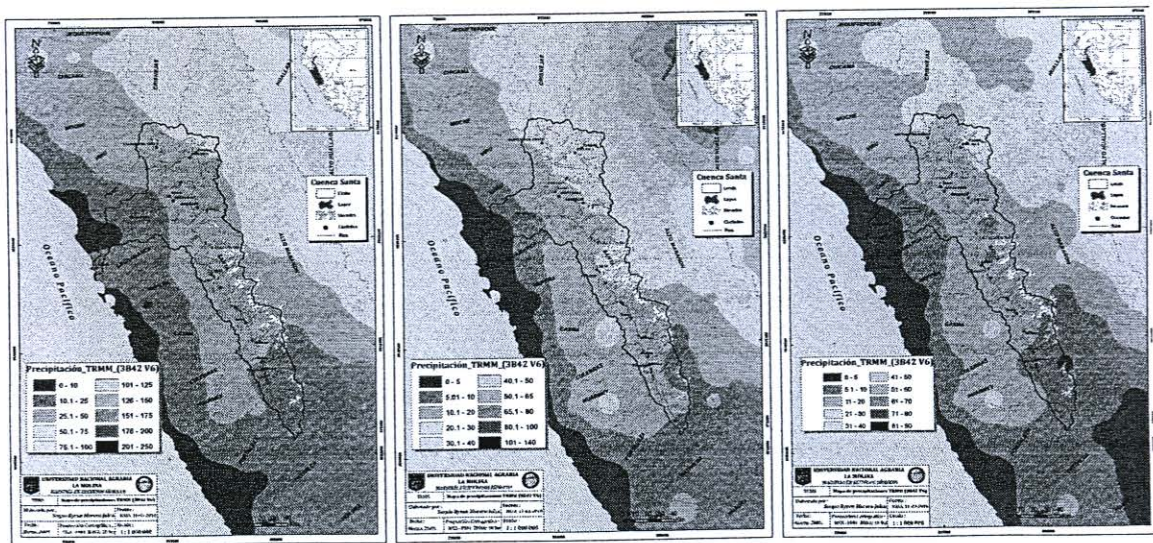


Figura 65. Mapas generados con datos TRMM de 15, 10 y 5 días antes de haber realizado los muestreos durante la primera misión realizada.

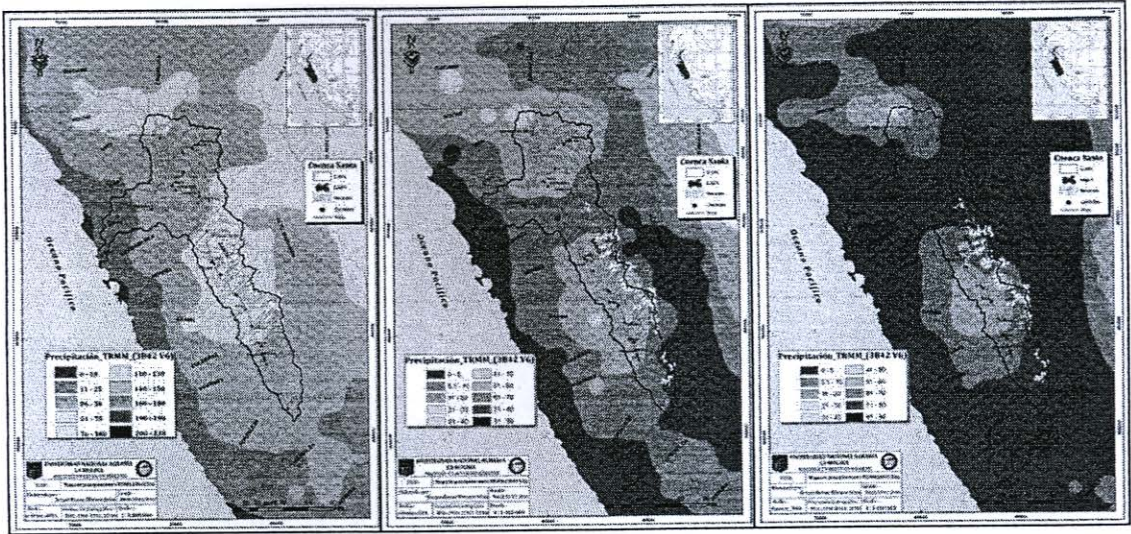


Figura 66. Mapas generados con datos TRMM de 15, 10 y 5 días antes de haber realizado los muestreos durante la segunda misión realizada.

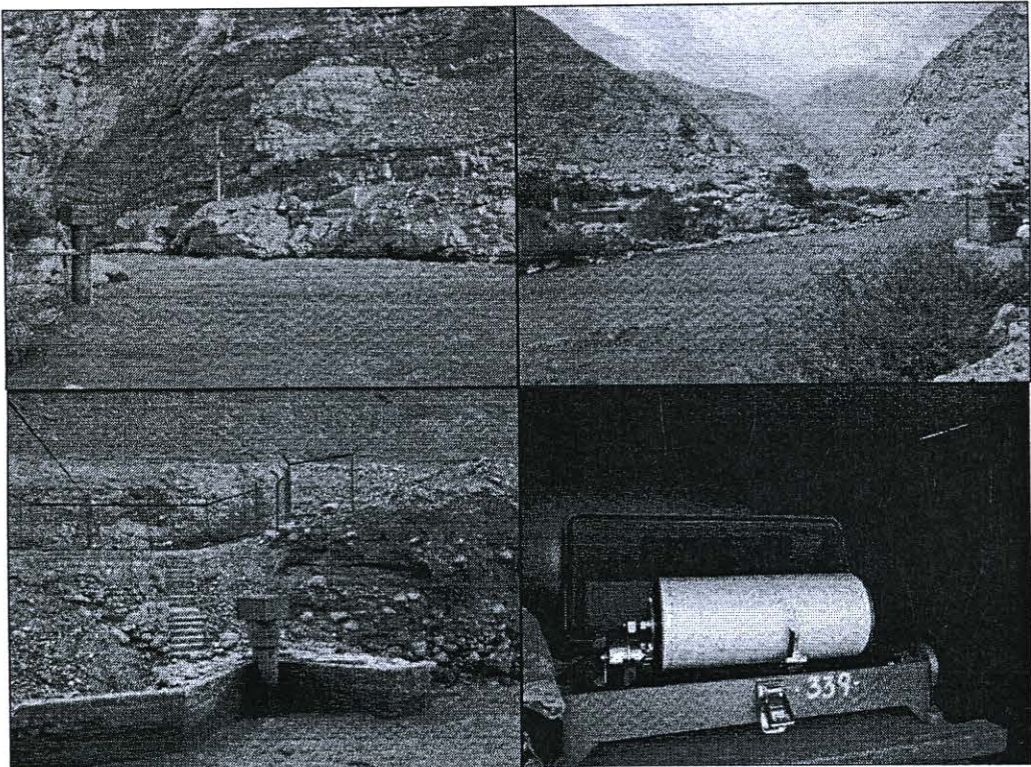


Figura 67. a. Estación hidrosedimentológica Condorcero, b. Derecha superior estación Tablachaca, c. Estación Santa ubicada aguas arriba de la confluencia con el río Tablachaca, d. Limnigrafo que posee en las estaciones Condorcero y Tablachaca.

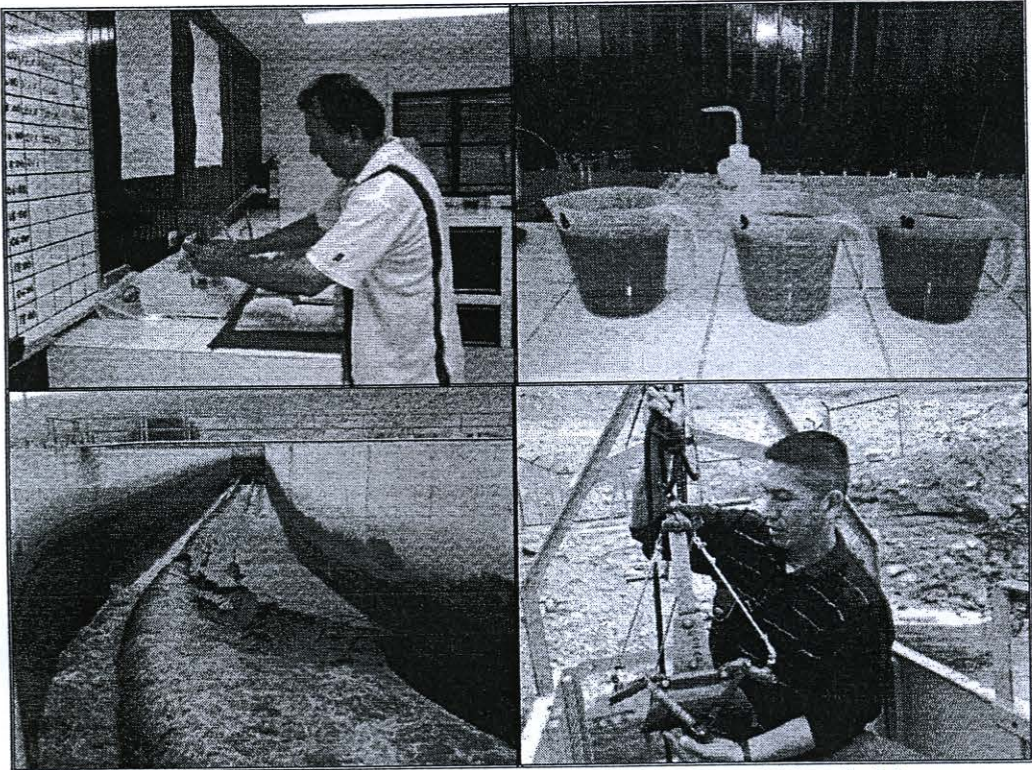


Figura 68. a. Personal del laboratorio tomando lecturas de turbides, b. Muestras de las estaciones Condorcerro (8)=Santa (9) + Tablachaca (10), c. Lavado de naves del desarenador altura de sedimentos 1.2 metros, d. Muestreador de sedimentos Clape, Winche y Lastre Sonda.



Figura 69. Erosión en el lecho del río producto de un deslizamiento en masa en la cuenca alta del río Tablachaca

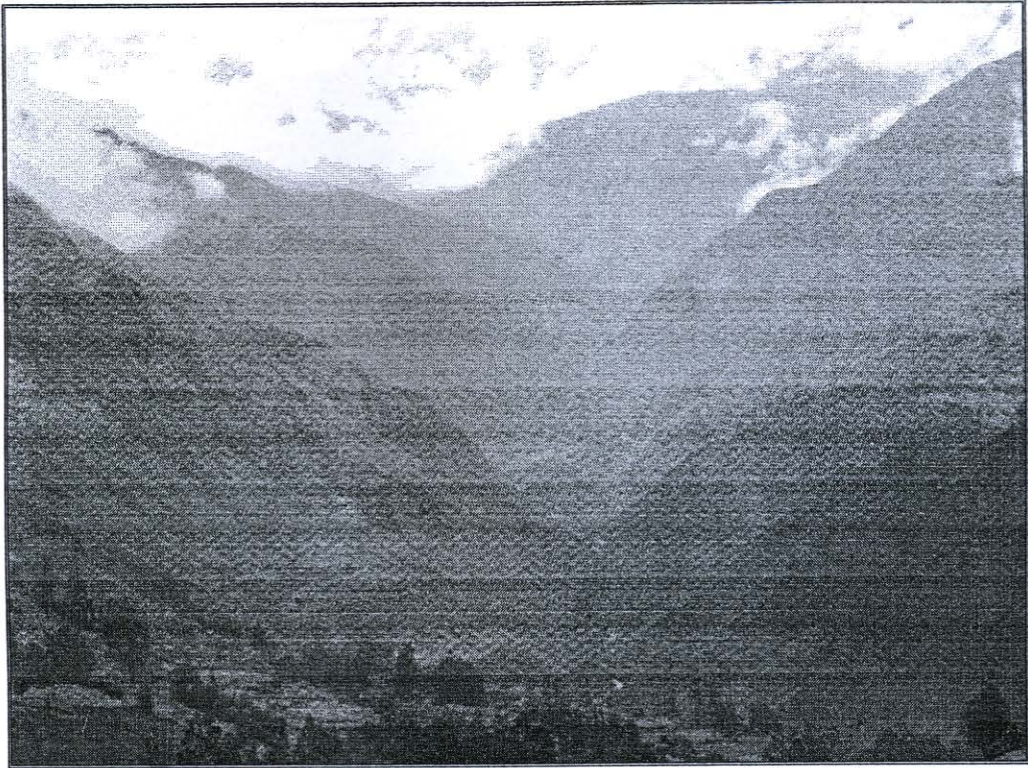


Figura 70. Vista panorámica río abajo a la altura del pueblo de Pampas Cuenca alta Tablachaca.



Figura 71. Confluencia del río Tablachaca (Aguas oscuras) y el río Conchucos (Aguas claras).

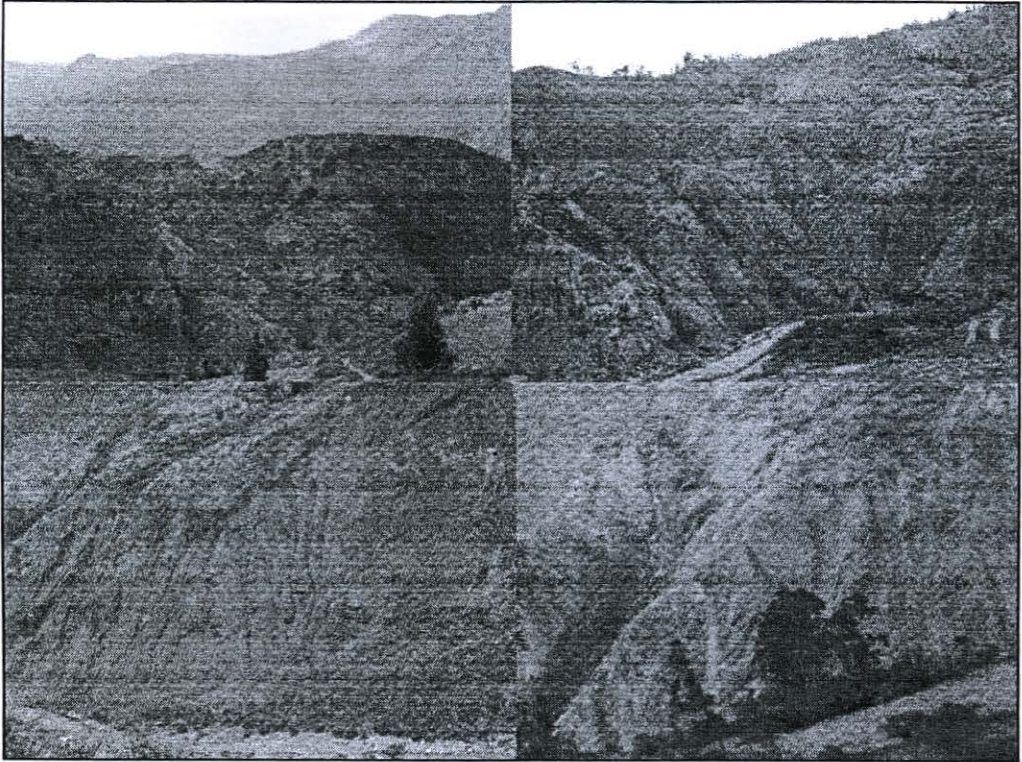


Figura 72. Suelos denudados con erosión severa, cuenca media del río Tablachaca.



Figura 73. Mina de carbon en la cuenca Baja del Río Tablachaca.

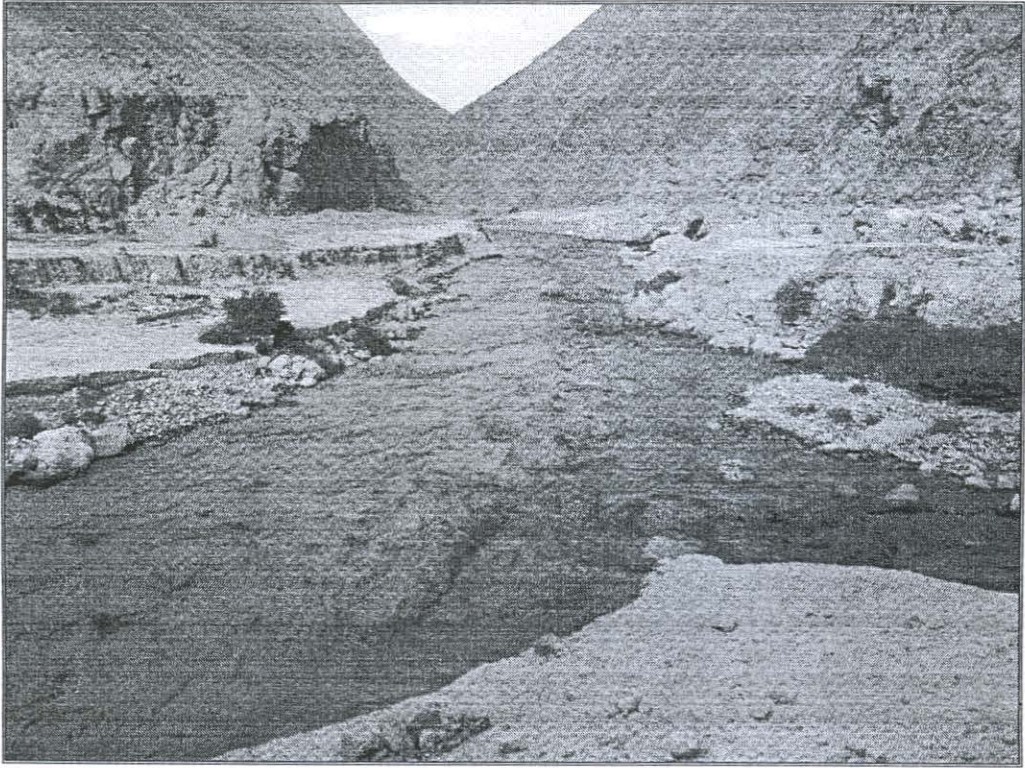


Figura 74. Unión del río Santa(izquierda) con el río Tablachaca (derecha); contraste del color de los caudales..



Figura 75. Desarrollo de la agricultura en la cuenca media del río Santa; surcos de los cultivos a favor de la pendiente, malas prácticas agrícolas.



Figura 76. Muestreo de sedimentos en suspensión en la cuenca media del río Santa.

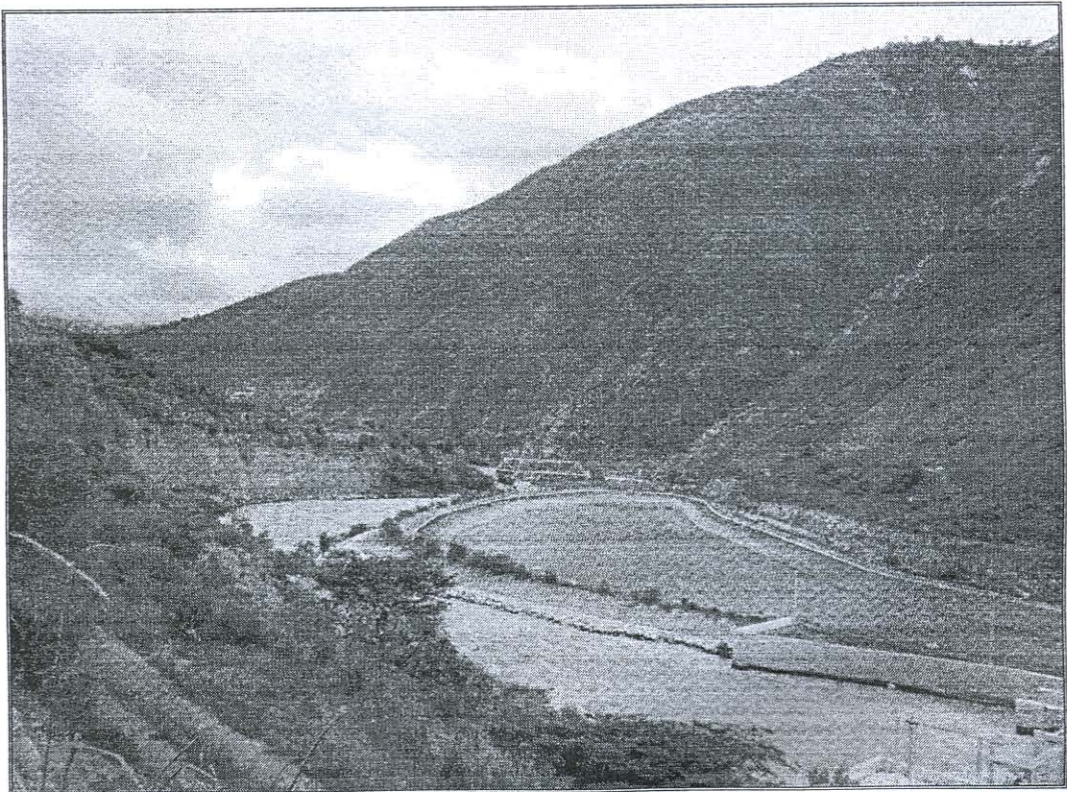


Figura 77. Embalse San José utilizado en la regulación de caudales para la producción energética por Duke Energy.



Figura 78. Central hidroeléctrica en el Cañón del Pato ± 1800 msnm.

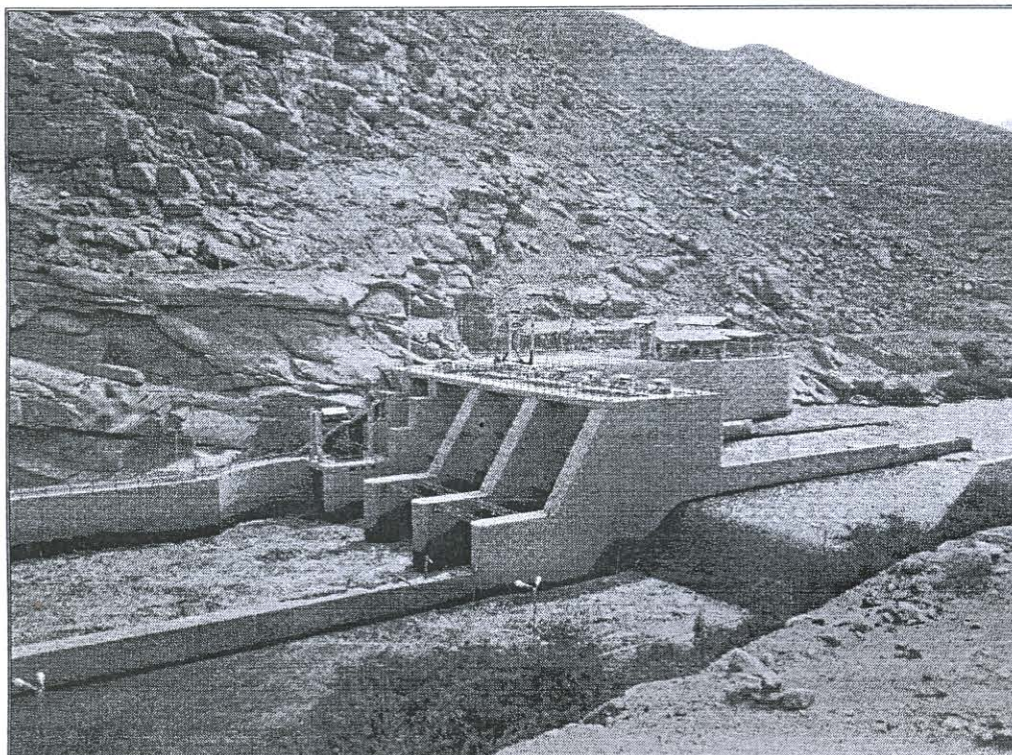


Figura 79. Bocatoma Chavimochic 420 msnm; capta un caudal de ± 38.5 m³/s en estiaje.

Tabla 13. Pendientes que se observan en la cuenca Tablachaca y cuenca media y alta del río Santa.

| Estación-Cuenca | | PENDIENTE | | | | | | | | | TOTAL |
|-----------------|------|-----------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------|
| | | 0 - 4.9° | 5 - 9.9° | 10 - 19.9° | 20 - 29.9° | 30 - 39.9° | 40 - 49.9° | 50 - 59.9° | 60 - 74.9° | 75 - 88.9° | |
| Santa | Área | 1213.0 | 638.9 | 1655.3 | 1681.1 | 1231.5 | 426.1 | 96.7 | 113.6 | 115.7 | 7172.0 |
| | % | 16.9 | 8.9 | 23.1 | 23.4 | 17.2 | 5.9 | 1.3 | 1.6 | 1.6 | 100 |
| Tablachaca | Área | 321.9 | 253.1 | 976.3 | 840.0 | 545.3 | 166.6 | 23.5 | 4.1 | 0.4 | 3131.2 |
| | % | 10.3 | 8.1 | 31.2 | 26.8 | 17.4 | 5.3 | 0.7 | 0.1 | 0.0 | 100 |