

Simposio sobre la preservación del medio ambiente
La Paz, Bolivia, Octubre 1989.

EROSION, BALANCE DE SEDIMENTOS Y MATERIAS DISUELTAS EN LA
CUENCA ALTA DEL RIO PARAGUAY (Ríos Pilcomayo y Bermejo, Bolivia).

Jean Louis GUYOT
ORSTOM, C.P. 8714, La Paz, Bolivia.

Héctor CALLE & José CORTES
SENAMHI, C.P. 996, La Paz, Bolivia.

Mario PEREIRA & Helmet RODRIGUEZ
ENDE, C.P. 565, Cochabamba, Bolivia.



Figura 1 : Cuenca del Río de La Plata (ríos Paraguay, Paraná y Uruguay). Localización de la zona estudiada.

1 - Introducción

Con una superficie de 3,200,000 Km², la cuenca del Río de La Plata es la segunda gran cuenca de América del Sur, luego de la del Río Amazonas (Fig. 1). El Río de La Plata presenta, en su desembocadura, un caudal medio de 23,000 m³/s, del cual un 75% proviene del Río Paraná y 25% del Río Uruguay (Depetris & al., 1968).

El Río Paraguay, principal afluente en la orilla derecha del Río Parana, contribuye modestamente a los aportes hidricos del Río de La Plata (20%), brindando, sin embargo, la mayor cantidad de sedimentos y una parte de soluciones (Bonetto, 1975). Los ríos Pilcomayo y Bermejo, que son los principales tributarios andinos del Río de La Plata, tienen un alto aporte de sedimentos al Río Paraguay. Más del 60% de materias en suspensión exportadas por el Parana Medio (100,000,000 t/año) provienen sólo del Río Bermejo (Drago & al., 1988), que puede presentar en su confluente concentraciones de materias en suspensión de 6 g/l (Bonetto & al., 1969).

Una gran parte de las cuencas andinas de los ríos Pilcomayo y Bermejo están situadas en Bolivia. En este país, la evaluación de transportes de materias disueltas y en suspensión fue llevado a cabo en el marco del programa PHICAB (Programa Hidrológico y Climatológico de Bolivia : ORSTOM/SENAMHI/UMSA). La cuenca boliviana del Río de La Plata (230,000 Km² de los cuales el 40% está situado en los Andes), es la segunda gran cuenca de Bolivia (Montes de Oca, 1982).

ORSTOM : Instituto Francés de Investigación Científica para el
Desarrollo en Cooperación.
SENAMHI : Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de
Bolivia.
UMSA : Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.

2 - Cuencas vertientes

Situadas entre el 19no y el 23ro grado de latitud Sur, las altas cuencas andinas del Río Paraguay ocupan una superficie aproximada de 100,000 Km². Esta región tropical montañosa es drenada principalmente por los ríos Pilcomayo y Bermejo (Figura 2).

A la salida de los Andes, el río Pilcomayo drena en Villamontes una cuenca de 81,300 Km², de los cuales el 5% está situado en Argentina y el resto en Bolivia (Arellano, 1988). Esta cuenca se extiende de Oeste a Este de las cimas de las cordilleras de "Los Frailes" (4,500 m) y del Lípez (5,700 m),

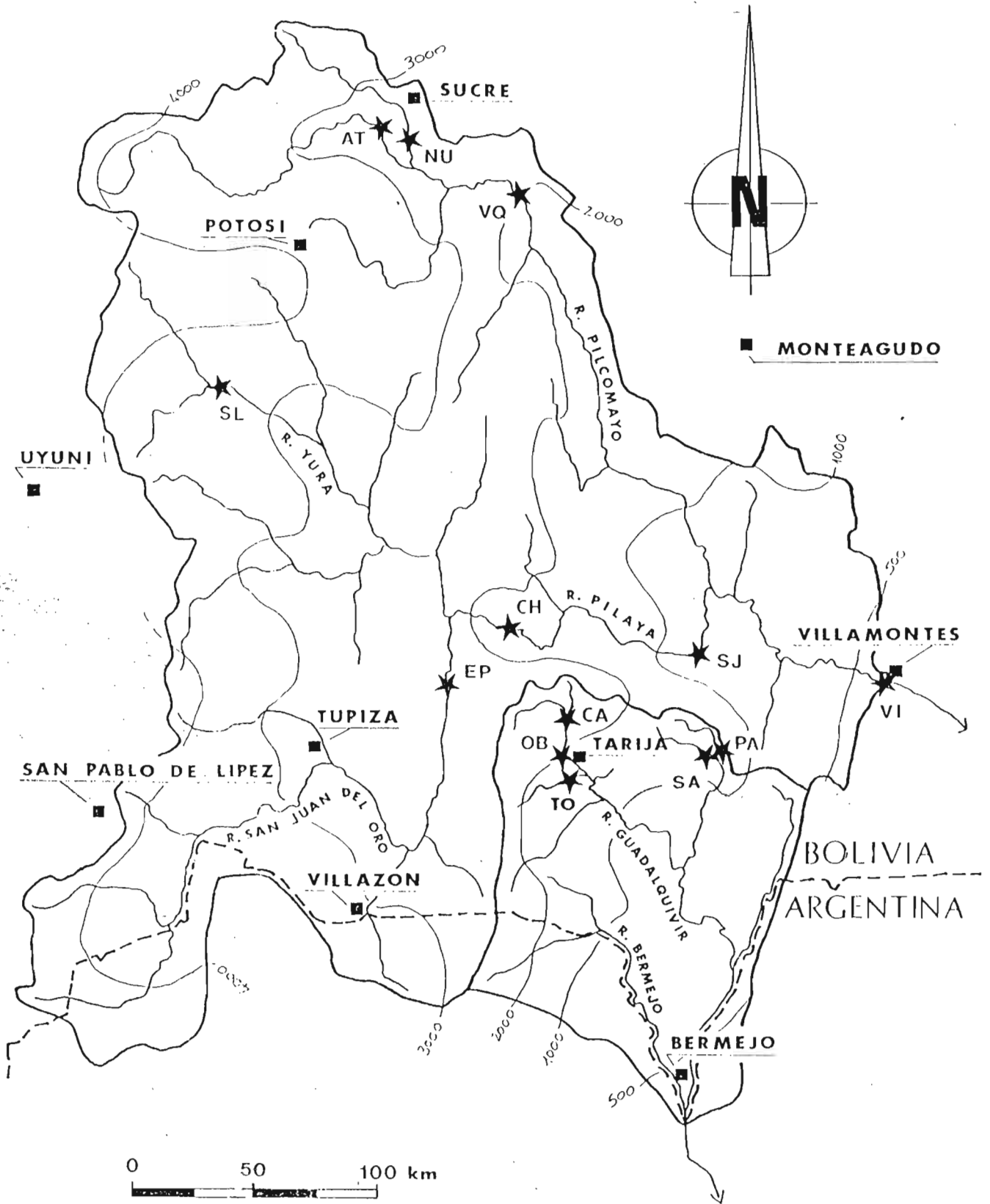


Figura 2 : Cuencas bolivianas de los ríos Pilcomayo y Bermejo. Localización de las estaciones de medida. Ver Cuadro 1 para el código de las estaciones.

hasta la planicie del Chaco (300 m). Ocho estaciones de medida en los cinco principales cursos de agua aseguran el control de esta cuenca vertiente (Cuadro 1).

Cuadro 1 : Características de las estaciones estudiadas.

Código Estación	Río	Estación	Altitud (m.)	Superficie (Km2)	Institución
AT	Pilcomayo	Angosto Talula	2500	6340	ENDE-SENAMHI
NU	Cachimayu	Ñucchu	2300	1600	ENDE-SENAMHI
VQ	Pilcomayo	Viña Quemada	2000	13200	ENDE-SENAMHI
SL	Yura	Salto León	3100	4200	SENAMHI
EP	San Juan del Oro	El Puente	2300	20100	SENAMHI
CH	Pilaya	Chillcara	2100	42900	SENAMHI
SJ	Pilaya	San Josécito	800	47500	SENAMHI
VI	Pilcomayo	Villamontes	340	81300	SENAMHI
CA	Chamata	Cañasmoro	2100	230	SENAMHI
OB	Guadalquivir	Obrajes	1900	920	SENAMHI
TO	Tolomosa	San Jacinto	1900	460	SENAMHI
SA	Santa Ana	Entre Ríos	1200	290	SENAMHI
PA	Pajonal	Entre Ríos	1200	220	SENAMHI

El Río Bermejo drena, a la salida de los Andes, una cuenca de 16,000 Km², de los cuales el 25% está situado en Argentina y el resto en Bolivia (Frias, 1989). Cinco estaciones de medida controlan pequeños cursos de agua en la cabecera de la cuenca del Río Guadalquivir (o Río Grande de Tarija), principal afluente boliviano del Río Bermejo (Cuadro 1).

Las series detriticas del Paleozoico de la cadena andina representan lo esencial de los afloramientos. Los relieves de la

orilla occidental están constituidos por series vulcano-sedimentarias del Cenozoico. En la parte oriental o zona sud-andina, los grandes valles y depresiones del pie de monte están recubiertos por sedimentos del Cenozoico.

El conjunto de la región estudiada está sometida al mismo régimen de precipitaciones de origen Atlántico (Ronchail, 1985), con un aumento de la lámina de agua precipitada del Norte a Sur, y de Oeste a Este (Roche & al., 1985). Para el periodo 1968-1982, la media pluviométrica es de 506 mm para la cuenca del Río Pilcomayo (Arellano, 1988) y de 1,100 mm para la cuenca del Río Bermejo (Frias, 1989). La distribución mensual de las precipitaciones (Figura 3) muestra claramente la pertenencia al mismo régimen climático, con una estación de lluvias bien marcada de Noviembre a Abril, y una estación seca de Mayo a Octubre. Los cuatro meses más lluviosos (de Diciembre a Marzo) representan el 63% (Monteagudo) al 92% (Uyuni) del volumen precipitado. Por el contrario, los seis meses más secos (de Mayo a Octubre), no representan respectivamente más que el 18% al 2% de dicho volumen.

La vegetación, con el relieve, pasa de Oeste a Este de una cobertura rasa, de pradera y luego de arbustos en altura, a la selva tropical seca de la planicie del Chaco.

3 - Datos utilizados

Los datos utilizados provienen principalmente del SENAMHI, que controla una red de aproximadamente 150 estaciones hidrológicas en los Andes bolivianos. ENDE (Empresa Nacional de Electricidad de Bolivia) efectuó campañas de muestreo en algunas estaciones, en el marco de los estudios de factibilidad de una represa en el Río Pilcomayo, en Icla.

Los caudales utilizados corresponden a los caudales medios diarios del SENAMHI y/o de ENDE para las estaciones que poseen observaciones limnimétricas y curvas de calibración (AT, NU, VQ, SL, CH, VI, TO, SA Y PA). Para las otras estaciones (EP, SJ, CA Y OB), los caudales utilizados corresponden a los caudales puntuales de aforos realizados en el momento de los muestreos.

Las materias en suspensión fueron muestreadas con la ayuda de muestreadores integradores del tipo USD 49, en varias verticales, de 3 a 6 según la extensión de los cursos de agua. Un muestreador puntual de tipo USP 61 fue también utilizado en el Río Pilcomayo en las estaciones de Angosto Talula y de Viña Quemada (Icla, 1982 - Vollmers & al., 1983). Una concentración media diaria fue calculada a partir de los resultados de diferentes verticales, por el método de la media aritmética, que en este tipo de cursos de agua da resultados comparables a los obtenidos por el método de la media ponderada por las velocidades

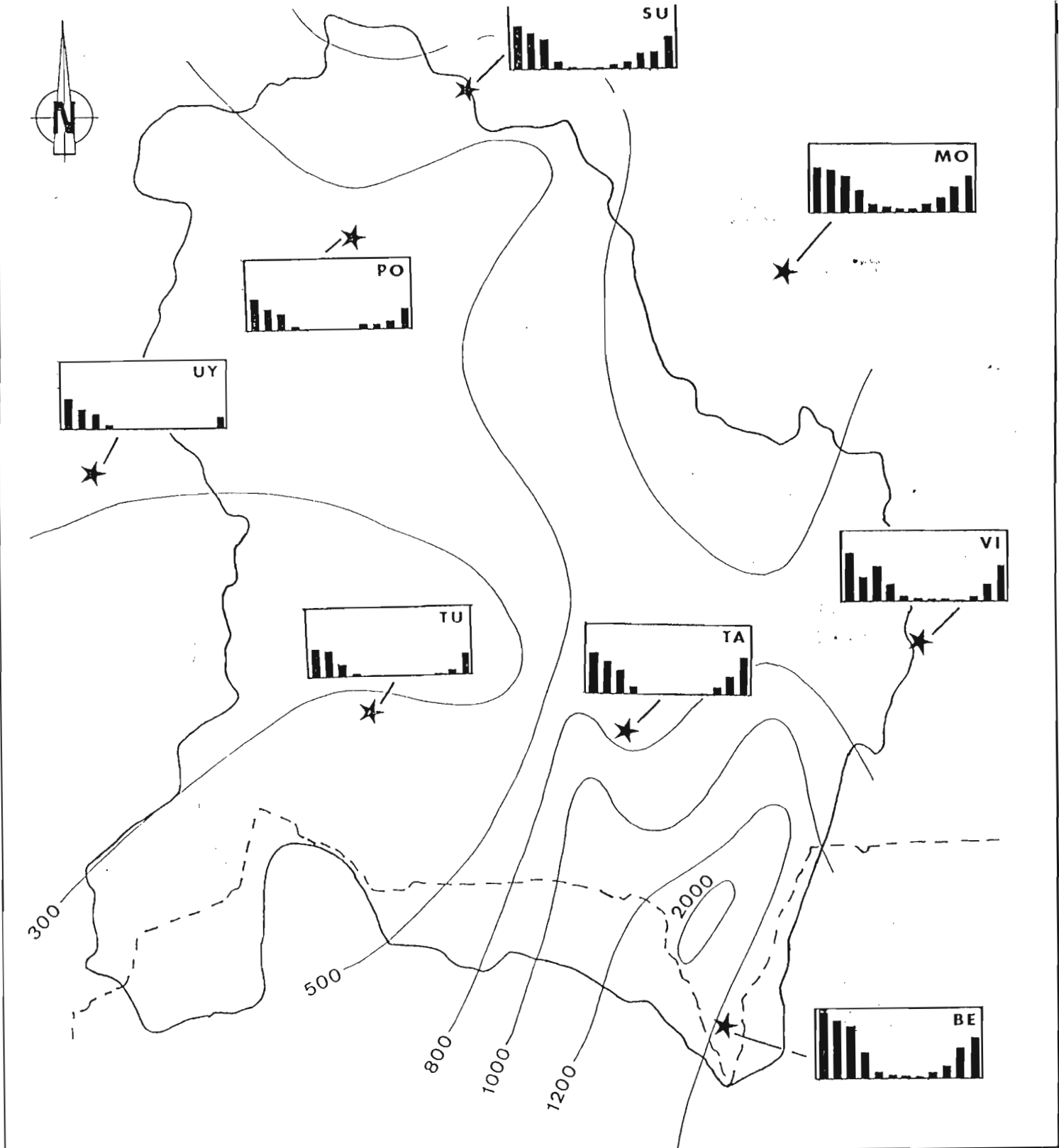


Figura 3 : Pluviometría (en mm) de las cuencas bolivianas de los ríos Pilcomayo y Bermejo, 1968-1982. Según Arellano (1988), Frías (1989), Herbas (1987) y Mariaca (1985).

BE = Bermejo	(410 m)	1081 mm.
MO = Monteagudo	(1130 m)	927 mm.
PO = Potosí	(3860 m)	404 mm.
SU = Sucre	(2890 m)	706 mm.
TA = Tarija	(1860 m)	616 mm.
TU = Tupiza	(2950 m)	346 mm.
UY = Uyuni	(3660 m)	350 mm.
VI = Villamontes	(340 m)	691 mm.

de corriente (Guyot & al., 1988). Este último modo de cálculo, más riguroso, requiere de la utilización de datos de aforos, de los que ya no se dispone.

El transporte de fondo o arrastre, fue medido por ENDE en dos estaciones de la cuenca alta del Río Pilcomayo, con la ayuda de un muestreador Helley-Smith y de canastillas de fabricación local (Icla, 1982 - Palenque, 1981 - Vollmers & al., 1983). Los muestreos fueron siempre efectuados en el periodo de aguas altas.

Medidas regulares de la conductividad eléctrica fueron efectuadas en las estaciones del SENAMHI del Departamento de Tarija. Estos datos permitieron el cálculo de la mineralización global de estas aguas, utilizando la relación Mineralización = f(Conductividad) propuesta por Rodier (1975). La misma relación establecida en la cuenca vecina del Río Grande en Abapo (Guyot & al., 1988) da resultados similares.

Los flujos de materias en suspensión (M.E.S.) y disueltas fueron obtenidos mediante el cálculo al nivel diario del caudal medio por la concentración media medida. Luego, para los diferentes periodos de observación, el establecimiento de promedios mensuales pluri-anales, permitió el cálculo de un promedio anual. Ninguna regresión de tipo transporte de materias = f(caudal) fue utilizada. Los valores del arrastre fueron extraídos de los estudios de Icla (1982) y Vollmers & Palenque (1983).

4 - Resultados

Con fuertes variaciones de caudales específicos que van de 0.5 a 20 l/s.Km², el total de las estaciones estudiadas presenta el mismo régimen hidrológico (Figura 4), que depende del régimen de precipitaciones. Una estación de aguas altas aparece claramente de Diciembre a Marzo, así como un período de estiaje que se extiende de Mayo a Octubre. Los cuatro meses de aguas altas representan el 53% (Río Yura) al 79% (Río Pilaya) del volumen anual escurrido, mientras que los seis meses de estiaje no representan respectivamente, para los mismos cursos de agua, más que el 35% al 13% de este volumen.

La cuenca del Río Pilcomayo en Villamontes presenta un caudal específico medio de 3.2 l/s.Km². Los cursos de agua que drenan la orilla occidental de esta cuenca, tienen caudales específicos mucho menores; 1.5 l/s.Km² para el Río Yura y 0.5 l/s.Km² para el Río San Juan del Oro. Por otra parte, el régimen hidrológico de estos cursos de agua es más regular, con un decrecimiento más lento de caudales, así como la ausencia de un estiaje marcado. Esta particularidad del comportamiento hidrológico puede explicarse por la existencia de un acuífero importante, que podría en este caso estar ligado a las series

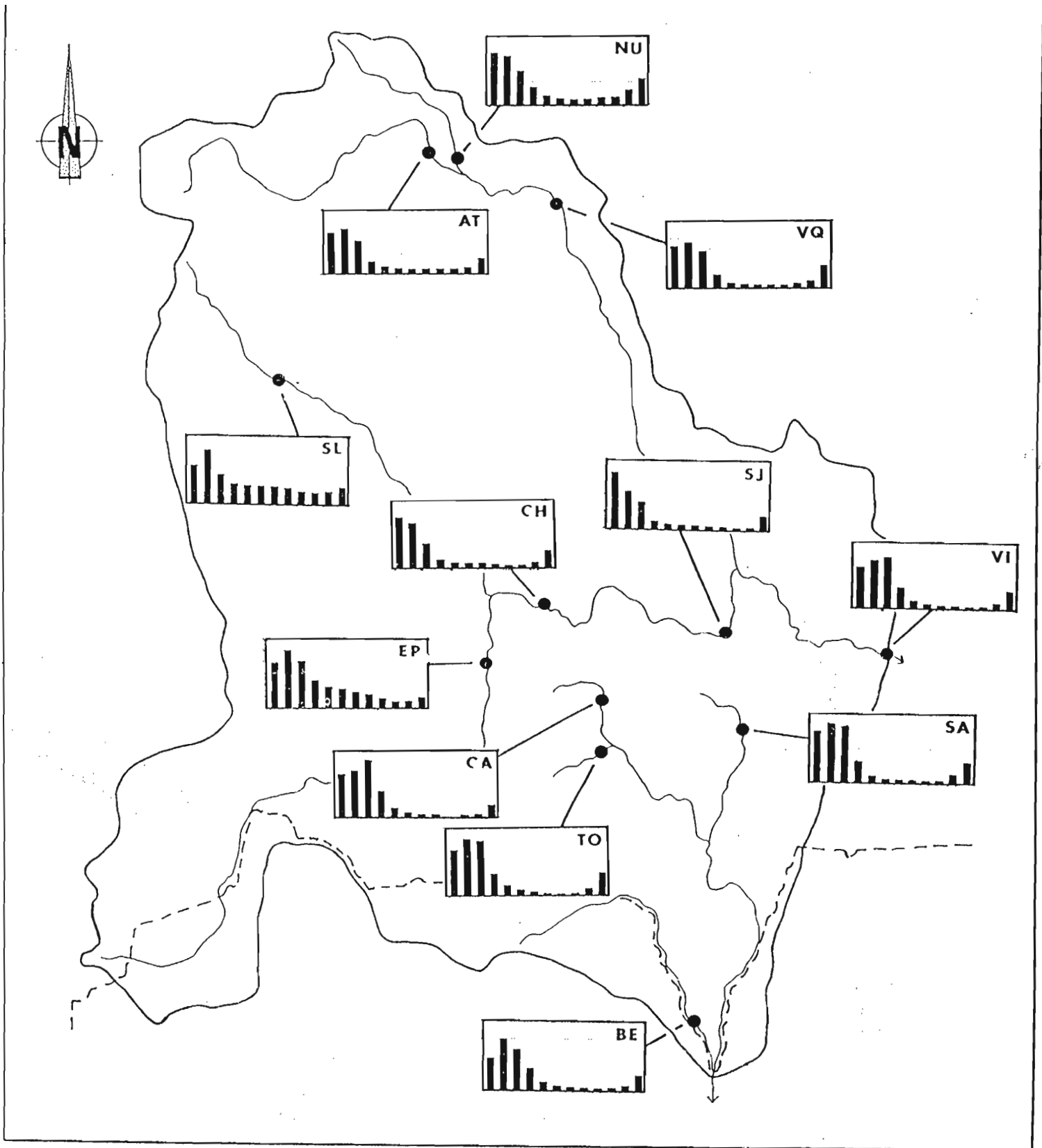


Figura 4 : Regímenes hidrológicos (de Enero a Diciembre).
 Ver Cuadro 1 para el código de las estaciones. BE = Río Bermejo
 en Aguas Blancas, 92 m³/s (Frías, 1989).

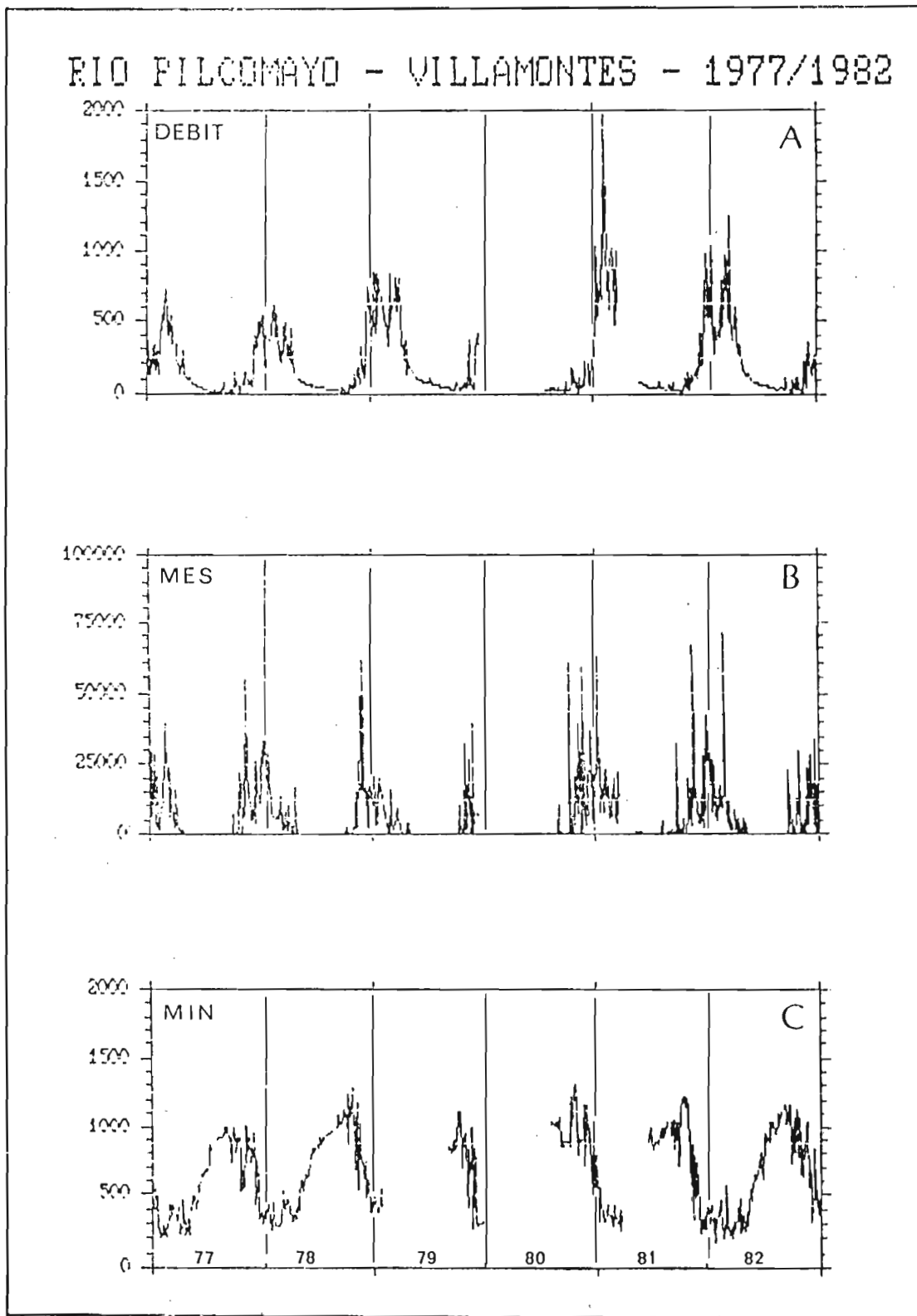


Figura 5 : Río Pilcomayo en Villamontes, 1977-1982, según los datos del SENAMHI. A) Regimen hidrológico (m³/s), B) Materias en suspensión (mg/l) y C) Mineralizaciones (mg/l).

vulcano-sedimentarias drenadas por estos dos cursos de agua. La cuenca del Río Bermejo en Bermejo, presenta un caudal medio específico de 18 l/s.Km², para un módulo de 92 m³/s (Frias, 1989). Las estaciones estudiadas, todas situadas en la cabecera de la cuenca tienen caudales específicos que varían de 4 a 20 l/s.Km².

La evolución de las materias en suspensión durante el ciclo hidrológico muestra en Villamontes (Figura 5), que las máximas de concentraciones se producen al iniciarse la crecida, y por lo tanto no coinciden con los extremos de la misma. Este fenómeno de histerésis hace que la utilización de la fórmula clásica caudal sólido = f(caudal) sea inadecuada.

La mineralización, contrariamente a las suspensiones, presenta tenores máximos en periodo de aguas bajas, y tenores mínimos en crecida extrema, debidos a los fenómenos de dilución. Las concentraciones en materia disuelta varían durante el ciclo hidrológico con una amplitud mucho más débil que aquella observada para los tenores de materias en suspensión.

Los regímenes de caudales sólidos (Figura 6), muestran claramente, para el conjunto de las estaciones estudiadas, el predominio de cuatro meses de aguas altas que representan del 84% al 98% de los sedimentos exportados, mientras que los seis meses del período seco no representan más que del 1% al 3% de dicho volumen. A partir de los resultados obtenidos (Cuadro 2), se evidencia que todos los cursos de agua de la cuenca del Río Pilcomayo tienen tenores en materias en suspensión elevados, presentando a la salida de los Andes, en Villamontes, un flujo de 72,000,000 t/año de materias en suspensión. Las diferentes tasas de erosión específica obtenidas por cuenca, corresponden en realidad a los diferentes comportamientos hidrológicos de estas cuencas, con tasas de más de 1,500 t/km².año para la cuenca alta del Río Pilcomayo, y valores del orden de 100 t/km².año para las cuencas que drenan la orilla occidental, donde también se observan los caudales específicos más débiles. En la cuenca alta del Río Guadalquivir, las concentraciones medidas son más débiles y las tasas de erosión específica varían visiblemente de una estación a otra, posiblemente por la débil dimensión de estas cuencas vertientes. Los valores observados en la cuenca del Río Tolomosa en San Jacinto son muy superiores a aquellos estimados por SOFRELEC (1978), probablemente a raíz de períodos de observación diferentes.

Los resultados obtenidos en la cuenca alta del Río Pilcomayo, que corresponden a las medidas de transporte de fondo (Cuadro 3), muestran que éste no representa más del 10% del volumen de materias en suspensión exportadas. Esto corresponde a un valor máximo, tomando en cuenta que estos muestreos fueron realizados únicamente en el período de aguas altas, generalmente de Enero a Marzo. De este modo, extendiendo estos valores al conjunto de las cuencas estudiadas, el Río Pilcomayo a la salida

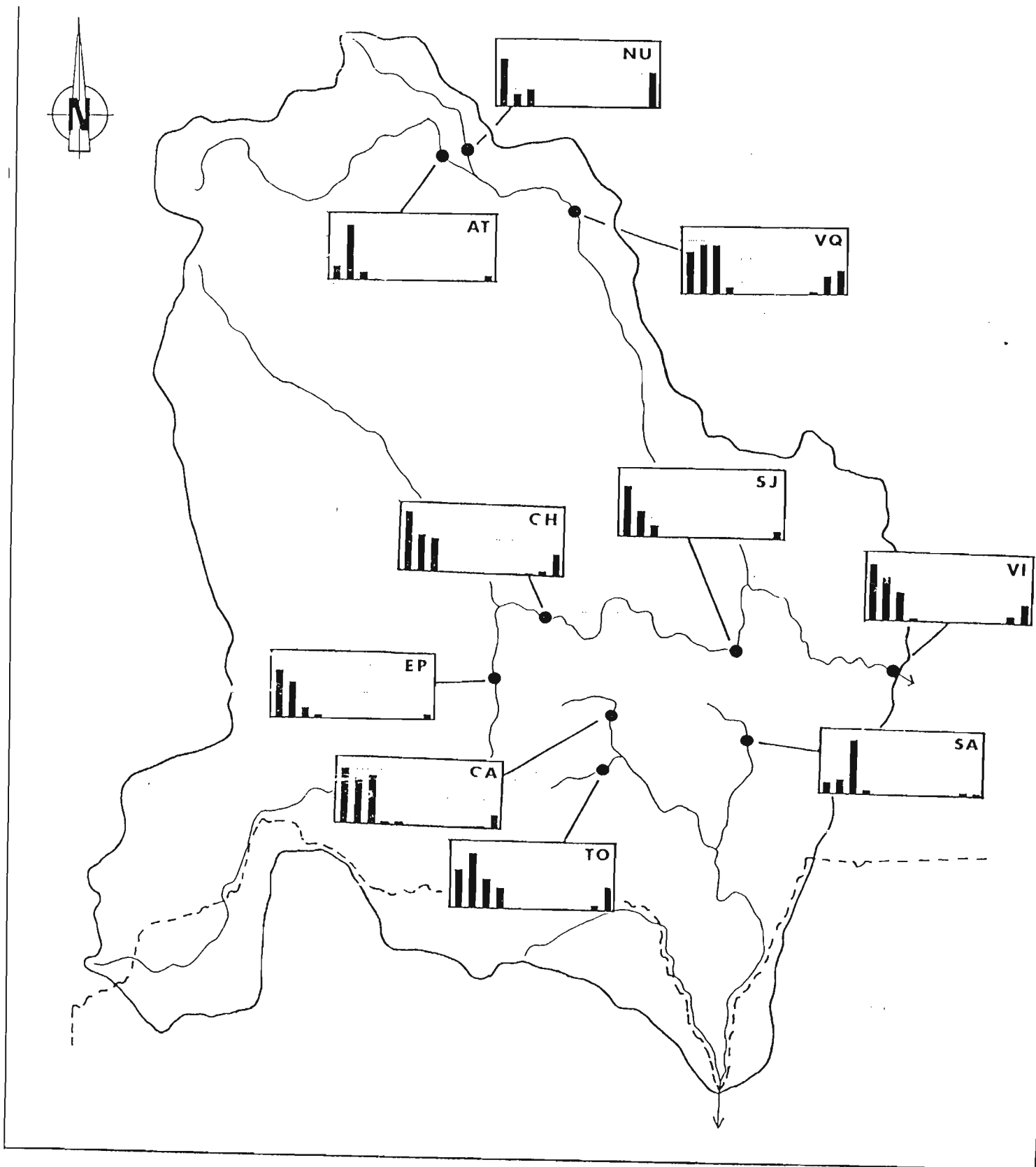


Figura 6 : Regímenes de flujos de materias en suspensión o caudales solidos (de Enero a Diciembre). Ver Cuadro 1 para el código de las estaciones.

Cuadro 2 : Materias en suspensión (M.E.S.)

Código Estación	Período de observ.	Nro de medidas	Caudal (m3/s)	M.E.S. (mg/l)	Flujo M.E.S. (10.6 t/año)	Tasa de erosión (t/Km2.año)
AT	06/75-04/83	1088	20	5620	12	1900
NU	11/75-11/82	46	8.5	1630	1.1	660
VQ	01/78-01/83	552	49	6910	22	1700
SL	11/76-02/77	57	6.5	2200	0.5	110
EP	09/79-12/82	584	10	3830	2.4	120
CH	05/77-04/83	549	53	4790	14	320
SJ	09/79-12/82	309	82	5380	31	650
VI	01/77-12/82	745	260	6240	72	890
CA	08/79-05/82	444	1.5	590	0.05	200
OB	07/79-12/82	192	3.8	1740	0.40	440
TO	05/77-12/82	584	9.0	1480	1.5	3300
SA	07/79-12/82	181	5.9	120	0.06	220
PA	07/79-12/82	182	4.6	440	0.11	500

Cuadro 3 : El arrastre

Código Estación	Período de obs.	Nro de medidas	Referencias	Flujo (10.6 t/año)	% M.E.S.
AT	01/80-04/81	36	Vollmers, 1983	1.1	10
VQ	01/79-03/81	182	Icla, 1982	3.4	11

Cuadro 4 : Las materias disueltas (Mineralización)

Código Estación	Período de obs.	Nro de medidas	Caudal (m3/s)	Min. (mg/l)	Flujo mat. dis. (10.6 t/año)	Tasa de erosión (t/km2/año)
EP	10/79-12/82	469	10	870	0.25	13
SJ	10/79-12/82	295	82	660	1.4	28
VI	01/77-12/82	672	260	650	2.9	36
CA	10/79-05/82	423	1.5	120	0.003	13
OB	10/79-12/82	171	3.8	80	0.01	10
TO	05/77-12/82	519	9.0	42	0.02	39
SA	09/79-12/82	172	5.9	160	0.02	62
PA	09/79-12/82	172	4.6	250	0.02	83

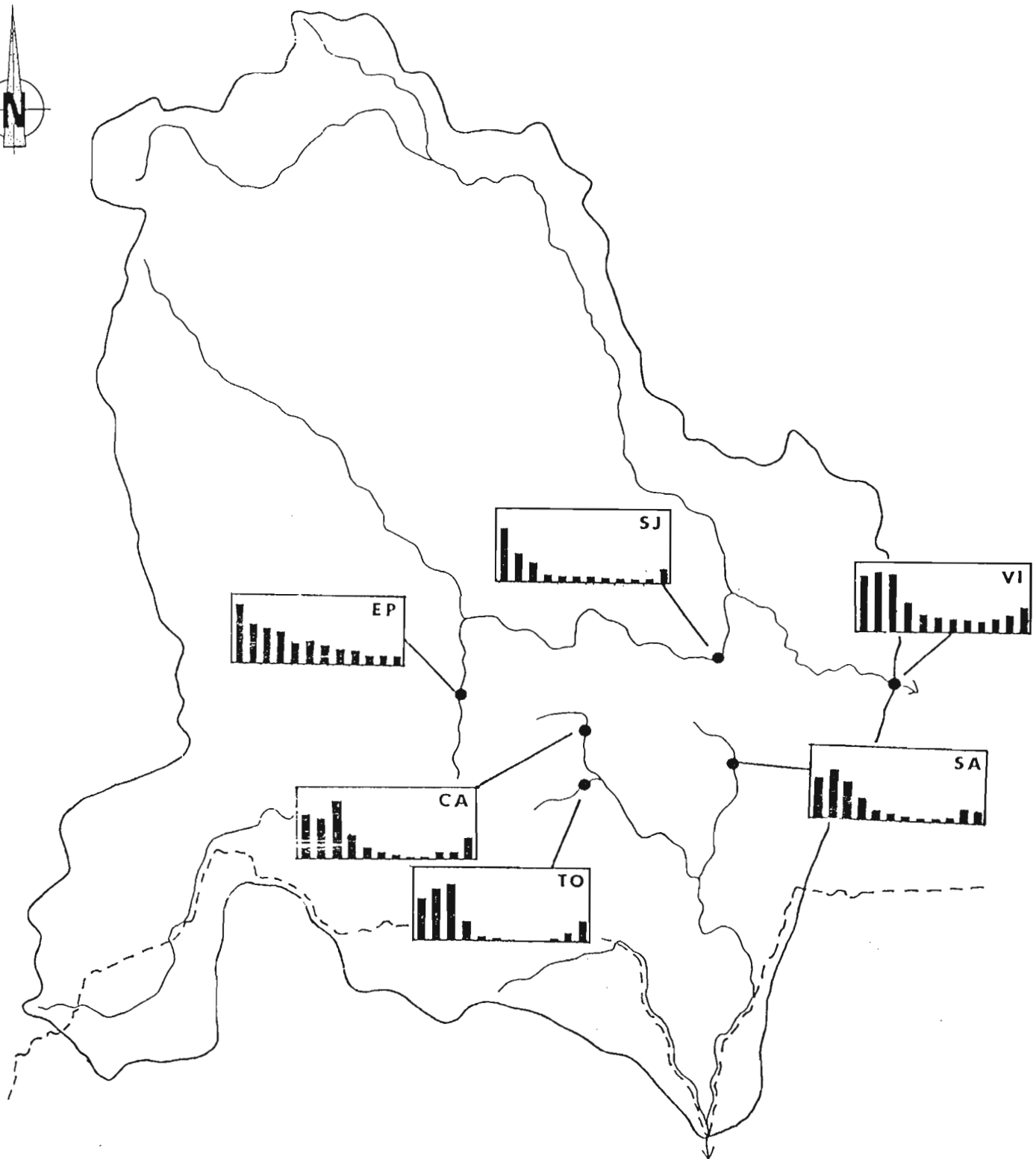
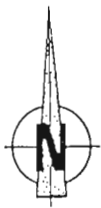


Figura 7 : Regímenes de flujos de materias disueltas (de Enero a Diciembre). Ver Cuadro 1 para el código de las estaciones.

de los Andes presentaría un flujo total de sedimentos del orden de 80,000,000 t/año.

Los regímenes de los flujos en materias disueltas (Figura 7), observados en algunas estaciones, son similares a los regímenes hidrológicos de estas mismas estaciones (Figura 4). Esto se debe a la débil amplitud de las variaciones de la mineralización durante el ciclo hidrológico. Es por lo tanto en el periodo de aguas altas, a pesar de tenores ligeramente más débiles, que se produce lo esencial de la exportación de materias disueltas. Los cuatro meses de aguas altas (de Diciembre a Marzo) son por lo tanto responsables del 50% al 80% del volumen anual de exportaciones. El conjunto de estaciones de la cuenca del Río Pilcomayo presentan tenores en solución comprendidos entre 0.5 y 1 g/l, para tasas de erosión específica próximas (Cuadro 4). El Río Pilcomayo presenta, a la salida de los Andes, un flujo de materias disueltas de 2,900,000 t/año, es decir alrededor de 25 veces menos que el de los sedimentos. En la cuenca alta del Río Guadalquivir, las concentraciones observadas son por lo general débiles, y las tasas de erosión específica varían de 10 a 80 t/km².año en función de las cuencas, lo que representa del 1 al 30% de sedimentos medidos en estas mismas estaciones.

5 - Conclusión

El estudio de transportes de materia, de los Andes bolivianos hacia la cuenca del Río Paraguay, permitió estimar la amplitud de los transportes de sedimentos, principalmente en la cuenca del Río Pilcomayo. A la salida de los Andes, este curso de agua cuyo caudal promedio es de 260 m³/s, presenta un flujo de sedimentos de 80,000,000 t/año, en forma de suspensiones esencialmente (90%). Con un flujo de materias disueltas del orden de 3,000,000 t/año, es decir alrededor de 25 veces menos que el de sedimentos, la cuenca del Río Pilcomayo a Villamontes está sometida a una tasa de erosión global de 930 t/Km².año.

Las tasas de erosión específica observadas por estación, presentan variaciones significativas en relación a las características biogeográficas de las cuencas (vegetación, superficie, geología, pluviometría). Así, las tasas de erosión mecánica varían de 100 t/Km².año en las cuencas semi-áridas de la orilla Oeste de la cuenca del Río Pilcomayo, a más de 3,000 t/Km².año en una pequeña cuenca de fuerte pluviometría de la región de Tarija. Las tasas de erosión química varían en estas mismas cuencas de 10 a 80 t/Km².año.

A pesar de los modestos aportes hídricos al Río Pilcomayo, el flujo de sedimentos medido en Villamontes en el Río Pilcomayo es del mismo orden de amplitud que el observado en el Paraná Medio, 2,000 kilómetros río abajo (Depetris et al., 1968 - Drago & al., 1988). Por lo tanto, la mayor parte de estos sedimentos va depositarse antes de llegar al Río Paraná, del cual la mayor parte de carga sólida proviene del Río Bermejo.

6 - Referencias

- ARELLANO, R. (1988). Balance hídrico superficial de la cuenca del Río Pilcomayo, Río de La Plata, Bolivia. Tesis de grado, UMSA, La Paz. Publ. PHICAB : 101 p.
- BONETTO, A.A. (1975). Hydrologic regime of the Parana River and its influence on Ecosystems. Landscapes of River Basins (South America). Ed. Springer Verlag New York Inc. : 175-197.
- BONETTO, A.A., DIONI, W. & PIGNALBERI, C. (1969). Limnological investigations on biotic communities in the Middle Paraná River valley. Verh. Internat. Verein. Limnol. 17 : 1035-1050.
- DEPETRIS, P.J. & GRIFFIN, J.J. (1968). Suspended load in the Río de La Plata drainage basin. Sedimentology 11 : 53-60.
- DRAGO E.C. & AMSLER, M.L. (1988). Suspended sediment at a cross section of the Middle Paraná River : concentration, granulometry and influence of the main tributaries. IAHS Symposium on Sediment Budgets, Porto Alegre, December 1988. IAHS Publ. 174 : 381-396.
- FRIAS, R.I. (1989). Balance hídrico superficial de la cuenca de los ríos Bermejo y Grande de Tarija, Bolivia, Argentina. Tesis de grado, UMSA, La Paz. Publ. PHICAB : 263 p.
- GUYOT, J.L., ROCHE, M.A. & BOURGES, J. (1988). Etude de la physico-chimie et des suspensions des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne : l'exemple du Río Beni. Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, Septembre 1988.
- ICLA (1982). Proyecto hidroeléctrico ICLA. Hidrología y sedimentología. Informe final. 149 p.
- MONTES DE OCA, I. (1982). Geografía y recursos naturales de Bolivia. 628 p.
- PALENQUE, G. (1981). Análisis de las ecuaciones para el transporte de la carga de fondo. Tesis de grado, UMSA, La Paz, 230 p.
- ROCHE, M.A. & ROCHA, N. (1985). Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas, 1/4000000. Publ. PHICAB, 1 hoja offset.
- RODIER, J. (1975). L'analyse de l'eau. Tome 1. Ed. Dunod. 629 p.
- SOFRELEC (1978). Estudio de factibilidad del proyecto múltiple San Jacinto. 172 p.
- VOLLMERS, H.J. & PALENQUE, G. (1983). Sediment Measurements in the Pilcomayo River in Bolivia. 2nd International Symposium on River Sedimentation, Nanjing, May 1983 : 1050-1070.

O.R.S.T.O.M.

E.N.D.E.

PHICAB

I.I.Q. - U.M.S.A.

S.E.N.A.M.H.I.

C.E.M.A.G.R.E.F.

IV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental **Simposio sobre preservación del medio ambiente**

La Paz - Bolivia, Octubre de 1989



M. A. Roche, J. L. Guyot, H. Calle, J. Cortes, M. Pereira,

O.R.S.T.O.M.

E.N.D.E.

P H I C A B

I.I.Q. - U.M.S.A.

S.E.N.A.M.H.I.

C.E.M.A.G.R.E.F.

IV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
Simposio sobre la preservación del medio ambiente
La Paz, Bolivia, Octubre 1989.

* Investigación para la preservación y la recuperación de la calidad del agua.

M.A. Roche

* Erosion, balance de sedimentos y materias disueltas en la cuenca alta del Río Paraguay (Ríos Pilcomayo y Bermejo, Bolivia).

J.L. Guyot, H. Calle, J. Cortes, M. Pereira & H. Rodriguez

* Primera evaluación del impacto de la ciudad de La Paz sobre el medio amazónico. Evolución de la físico-química y del carbono orgánico total (COT) a lo largo del río La Paz-Boopi, Bolivia.

J.L. Guyot, J.G. Wasson, H. Sanejouand, J. Quintanilla & H. Calle

O.R.S.T.O.M., C.P. 9214, La Paz, Bolivia.

Marzo 1990