

SUBSECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS Y SERVICIOS PÚBLICOS
MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS



Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro
de la Cuenca del Río Pilcomayo
Contrato Comisión Europea n.ASR/B7-3100/99/136

**PROYECTO "ESTUDIOS DE EROSIÓN, TRANSPORTE Y SEDIMENTACIÓN
EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PILCOMAYO"**

**DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS
POR EROSIÓN SUPERFICIAL EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PILCOMAYO**

Proyecto de gestión
Integrada y Plan
Maestro de la Cuenca
del Río Pilcomayo
BIBLIOTECA

*Proyecto LHA 628
Informe de Avance N° 1 - LHA 01-628-07
Ezeiza, Marzo de 2007*

HH ~ 282

LABORATORIO DE HIDRÁULICA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA:

Ing. Julio C. De Lío

JEFE DEL PROGRAMA HIDRÁULICA FLUVIAL:

Ing. José Daniel Brea

EQUIPO DE TRABAJO

INVESTIGADORES:

Ing. Patricia Jaime

Ing. Pablo Spalletti

**PROYECTO "ESTUDIOS DE EROSIÓN, TRANSPORTE Y SEDIMENTACIÓN EN
LA CUENCA ALTA DEL RÍO PILCOMAYO"**

**DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR EROSIÓN
SUPERFICIAL EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PILCOMAYO**

*Proyecto LHA 2XX
Informe de Avance N° 1 - LHA 01-628-07*

Resumen

Se presenta la aplicación de la metodología de Gavrilovich para estimar la producción de sedimentos por erosión superficial en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo. Se describe la información de base disponible para la aplicación de la metodología de cálculo y se muestran los resultados preliminares de la aplicación que son comparados con valores disponibles en estudios antecedentes y con datos aforos sólidos disponibles.

DESCRIPTORES

Temáticos: producción de sedimentos, transporte sólido.

Geográficos: Cuenca del Río Pilcomayo

**DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS POR EROSIÓN
SUPERFICIAL EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PILCOMAYO**

INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	METODOLOGÍA DE CÁLCULO.....	2
3	CARACTERÍSTICAS GENERALES DELÁREA DE ESTUDIO.....	5
3.1	HIDROGRAFÍA.....	7
3.2	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.....	9
3.2.1	Puna.....	10
3.2.2	Cordillera Oriental.....	11
3.2.3	Sierras Subandinas	11
3.3	VEGETACIÓN	12
3.4	SUELOS.....	16
4	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE GAVRILOVIC PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS	21
4.1	DATOS BÁSICOS: CARTAS TEMÁTICAS	21
4.1.1	Modelo Digital Del Terreno	21
4.2	PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS.....	34
4.2.1	Determinación del parámetro W	34
4.2.2	Determinación del parámetro R	44
4.2.3	Análisis de resultados.....	45
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

1 INTRODUCCIÓN

El Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo y el Instituto nacional del Agua, a través de su Laboratorio de Hidráulica, en el marco del Convenio de Financiación N° ASR/B7-3100/99/136 entre LA COMUNIDAD EUROPEA y LA COMISION TRINACIONAL PARA EL DESARROLLO DE LA CUENCA DEL RIO PILCOMAYO, y el Convenio Marco de Colaboración, firmado con el INA en fecha 01 de marzo de 2006, han acordado la realización de estudios sobre erosión, transporte y sedimentación en la Alta Cuenca del río Pilcomayo, con el fin de profundizar los conocimientos relativos a la naturaleza y dinámicas de los procesos erosivos de manera de llegar a definir medidas de control adecuadas.

El conocimiento de los procesos de transporte y sedimentación es de interés para diversos estudios y actuaciones posteriores, tales como la definición de posibilidades de regulación del río, mitigación de efectos de la sedimentación en la Cuenca Media y Baja, dinámica de los humedales, incidencia en la población ictícola, etc.

Los objetivos planteados comprenden el desarrollo de actividades que comprenden la caracterización de las unidades de erosión para profundizar los conocimientos relativos a la naturaleza y dinámicas de los procesos erosivos de manera de llegar a definir medidas de control adecuadas, incluyendo la caracterización y mapeo de zonas homogéneas por tipología de procesos erosivos y el conocimiento de los procesos de transporte y sedimentación, la caracterización de los aportes sedimentarios por Subcuencas y la caracterización fluviomorfológica del curso principal y sus afluentes

El presente constituye el Informe de Avance N° 1 y corresponde a la Tarea de Determinación de la producción de sedimentos por erosión superficial.

La determinación de la producción de sedimentos surge como el resultado del análisis de una serie de fenómenos complejos en el territorio, los cuales están íntimamente asociados a las características geolitológicas, morfológicas e hidrológicas locales. Estos fenómenos pueden resultar fuertemente influenciados por el uso del suelo y por la intervención antrópica en la cuenca.

Para la estimación de la producción de sedimentos por erosión superficial, se consideraron fórmulas empíricas para zonas de montaña que tienen en cuenta la interacción de los factores climáticos, topográficos, litológicos así como los de uso del suelo.

Para la elaboración del mapa de producción de sedimentos se aplicó la metodología de Gavrilovic en ambiente GIS. Esta metodología fue desarrollada en cuencas de montaña europeas y tiene amplio y exitoso uso en el noroeste argentino.

La metodología de Gavrilovic permite estimar la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca que es transportado a la sección del río que la define. Es un método empírico que puede estimar la descarga media anual de material erosionado, considerando que los procesos erosivos son el resultado de la interacción de factores tales como clima, litología, uso del suelo, topografía, etc.

Todas estas variables tienen una distribución espacial en la zona de estudio, por lo que los datos básicos para el desarrollo de la metodología de cálculo se corresponden con los mapas base suministrados por el Proyecto y provenientes de estudios antecedentes.

La aplicación de la metodología mencionada se realizó a nivel de celda de cálculo. Si bien los valores de los coeficientes y de las variables actuantes han sido desarrollados y probados en base a estudios sobre cuencas, su aplicación a nivel de celda es válida, permitiendo una mayor precisión por poder asignarle a cada una un valor representativo de las variables intervinientes. Cabe aclarar que estos valores se refieren a características físicas locales, y no a parámetros vinculados a la cuenca toda.

A continuación se presenta brevemente una descripción de la metodología empleada, de la información de base utilizada y de los resultados obtenidos hasta la fecha.

2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Para calcular el volumen de sedimento que se genera en la zona de estudio, se aplicó la metodología de Gavrilovic (Gavrilovic, S., 1959; Gavrilovic, Z., 1988; Zemljic, M., 1971), que estima la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca y que es efectivamente transportado a la sección del río que la define.

Este método empírico se compone de dos partes:

- 1.- La producción media anual de sedimento por erosión superficial (W).
- 2.- El coeficiente de redepositación o de retención de sedimentos (R).

A partir de ambos se obtiene el volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección final de la cuenca (G).

$$G = W \cdot R \quad (\text{m}^3/\text{año})$$

Los procesos erosivos son el resultado de la interacción de varios factores: topografía, clima, tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, características geológicas, geomorfología. Por ello las formulaciones intentan incluir estas variables con un adecuado peso relativo.

La expresión para determinar el volumen promedio anual erosionado de sedimento e la metodología empleada está dada por:

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F \quad (\text{m}^3/\text{año})$$

donde:

W = volumen promedio anual erosionado de sedimento ($\text{m}^3/\text{año}$).

T = coeficiente de temperatura, que se obtiene de:

$$T = [(t / 10) + 0,1]^{1/2}$$

t = temperatura promedio anual.

h = precipitación media anual ($\text{mm}/\text{año}$).

F = superficie de la cuenca (km^2).

Z = coeficiente de erosión, cuya expresión es:

$$Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + I^{1/2})$$

X = coeficiente de uso del suelo.

Y = coeficiente de resistencia del suelo a la erosión.

φ = coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados.

I = gradiente de la pendiente superficial (en %).

Los valores de X, Y y φ son propuestos por los autores, como producto de más de 20 años de experiencia en el campo. Estos coeficientes representan el grado de protección del suelo dado por la vegetación y la intervención antrópica, el grado de erodibilidad del suelo, y el estado de inestabilidad de la cuenca, respectivamente.

En las Tablas N° 1, 2 y 3 se presentan los valores recomendados de los coeficientes φ , X e Y brindados por la bibliografía.

Tabla N° 1: Coefficient values for the observed erosion process " φ "

Basin or area fully attacked by gulleying and deep process of erosion.	1.0
About 80% of area under rills and gullies.	0.9
About 50% of area under rills and gullies.	0.8
Entire area attacked by surface erosion: detritus and debris, few rills and gullies (deep erosion), and heavy karst erosion.	0.7
Entire area attacked by erosion, but without visible deep effects (rills, gullies, rockfalls, etc.).	0.6
50% of area attacked by surface erosion, while the rest of the basin is unattacked.	0.5
20% of the area attacked by surface erosion, and 80% unattacked.	0.3
Land surface without visible erosion effects; minor rockfalls or slips in stream channel.	0.2
Land surface without visible erosion effects; mostly crop fields.	0.15
Land surface without visible erosion effects; mostly under woods or perennial crops (meadows, pastures, etc.).	0.1

Tabla N° 2: Land use coefficient "X"

Denuded unarable land (badlands).	1.0
Field ploughed up/down the hill.	0.9
Orchards and vineyards without low vegetation.	0.7
Field contour-farmed.	0.63
Degrade forest and shrub on eroded soil.	0.6
Dry mountain pastures.	0.6
Meadows and similar perennial crops.	0.4
Grass-grown and drained pastures.	0.3
Good forest on steep slopes.	0.2
Good forest on gentle slopes.	0.05

Tabla N° 3: Coefficient of soil resistance to erosion "Y"

Sand, gravel and loose soil.	2.0
Loess, tuff, saline soil, steppe soil and the like.	1.6
Weathered limestone and marl.	1.2
Serpentine, red sandstone, flysch deposits.	1.1
Podzol, parapodzol, desintegrated schist: micaschist, gneiss, argillaceous schist, etc.	1.0
Compact and schistose limestones; tera rossa and humose-silicate soil.	0.9
Brown forest soil and mountain soils.	0.8
Smonitsa, valley and back bog soils.	0.6
Chernozem and alluvial deposits of good texture.	0.5
Bare compact igneous rocks.	0.25

En particular el coeficiente ϕ está asociado a los procesos de erosión observados, con valores que varían entre 1 y 0.1. Los autores presentan una tabla para la determinación del coeficiente, de acuerdo a los tipos de erosión observada, el porcentaje de área de la cuenca afectada por el mismo y su gravedad. Así los valores varían si hay cárcavas y fuertes procesos erosivos, deslizamientos de masa, erosión superficial, deslizamientos de rocas, etc. A su vez, en los casos en que el grado de erosión es bajo se efectúa una discriminación de acuerdo al tipo y cantidad de cobertura vegetal de la zona.

El parámetro X caracteriza el uso del suelo y adopta valores entre 0.05 y 1. En este caso los autores discriminan los valores de los coeficientes de acuerdo al uso del suelo y su cobertura, distinguiendo la existencia de suelo desnudo, campos cultivados, sembradíos, pasturas de montaña, vegetación perenne, pastizales, bosques en zonas de alta y baja pendiente, etc.

Por último, el parámetro Y indica la resistencia del suelo a ser erosionado. Se dan distintos valores de acuerdo al tipo de suelo de la superficie, tales como arenas, gravas, loes, arcillitas, areniscas, gneis, esquistos, rocas ígneas, etc., y de acuerdo a su ubicación y procedencia, pudiendo indicarse, por ejemplo, suelos de montaña, depósitos aluviales, etc. Este coeficiente varía en el rango de 0.25 a 2.

El coeficiente R indica la relación entre el volumen de sedimento que efectivamente pasa por la sección de cierre de la cuenca y el volumen total de material producido por erosión superficial.

La expresión para el coeficiente de retención de sedimentos es la siguiente (Zemljic, 1971):

$$R = [(O \cdot D)^{1/2} \cdot (L + Li)] / [(L + 10) \cdot F]$$

donde:

O = perímetro de la cuenca (km).

D = diferencia de nivel media en la cuenca (km).

Li = longitud total de los afluentes fluviales laterales (km).

L = longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal (km).

F = superficie de la cuenca (km²).

De este modo se puede estimar la descarga media anual de material erosionado (G) es decir la producción de sedimentos.

La metodología desarrollada ha sido empleada con éxito en cuencas alpinas, andinas y en otras zonas montañosas, obteniéndose buenos resultados, y con buena concordancia entre los valores medidos y calculados en cuencas piloto o en casos en que pudo efectuarse esta comparación (Brea J.D., Spalletti P., 1997; Cadore, Peviani, Baldin, 1994; Gentile, F.; Puglisi, S.; Trisorio-Liuzzi, G., 1999, Peviani, M.; Baldin, M.; Crepaldi L., 1994).

3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Pilcomayo cubre una área de 288.360 km², que se extiende sobre los territorios nacionales de Argentina, Bolivia y Paraguay. La cuenca ocupa una superficie de 89.362 km² dentro del territorio Boliviano, de 72.735 km² en territorio Argentino y finalmente se extiende en 126.263 km² de territorio Paraguayo.

El Río Pilcomayo, que forma parte del sistema fluvial de la cuenca del Plata tiene sus nacientes en la Cordillera de los Frailes en Bolivia, a más de 5.000 metros de altura y su área de influencia limita al este con el río Paraguay y se encuentra próxima a la ciudad de Asunción.

La cuenca incluye una gran variedad de climas, desde el de alta montaña hasta el de las zonas subandinas y el Chaco, en parte seco y en parte húmedo.

En el estudio objeto del presente informe de avance se efectúa la estimación de la producción de sedimentos en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo que se desarrolla entre las coordenadas 18° 42' y 22° 55' de latitud sur y 62° 20' y 67° 05' de longitud Oeste.

Limita al norte con la cuenca del Río Grande, al Oeste con la cuenca endorreica del Altiplano, al sur con la cuenca del río Bermejo (Tarija), al Este con las cuencas de los ríos Parapetí y Paraguay (sistema del Chaco) y se extiende sobre los departamentos bolivianos de Oruro, Potosí, Chuquisaca y Tarija y un área relativamente pequeña de la República Argentina.

Cubre una superficie de 80710 km² hasta Villamontes y 89600 km² hasta Misión La Paz, aproximadamente un 28% de la superficie total de la cuenca. La Figura N° 1 presenta la Alta Cuenca en el contexto de la Cuenca del Río Pilcomayo sobre un mosaico de imágenes satelitales Landsat etm+ (año 2000)..

El relieve de la Alta Cuenca está dominado por la cordillera de Los Andes al Oeste, el Subandino y la llanura del Chaco al Este. Morfológicamente la cadena andina presenta tres zonas: la Cordillera Occidental sector meridional, donde nace el río San Juan, la Cordillera Oriental Central y la Sur. El Subandino se halla constituido por un conjunto de paisajes, tales como, serranías, colinas, piedemontes y terrazas aluviales. Las serranías tienen dirección predominante Norte-Sur, adyacentes por su sector Este a la cordillera oriental y por valles intermontanos. Al Este de la serranía del Aguaragüe, la última del Subandino, se extiende la llanura del Chaco, que presenta un declive hacia el sureste. La cuenca se

extiende desde más de 5500 msnm hasta 392 msnm en la ciudad de Villamontes, donde se terminan las serranías del Subandino.

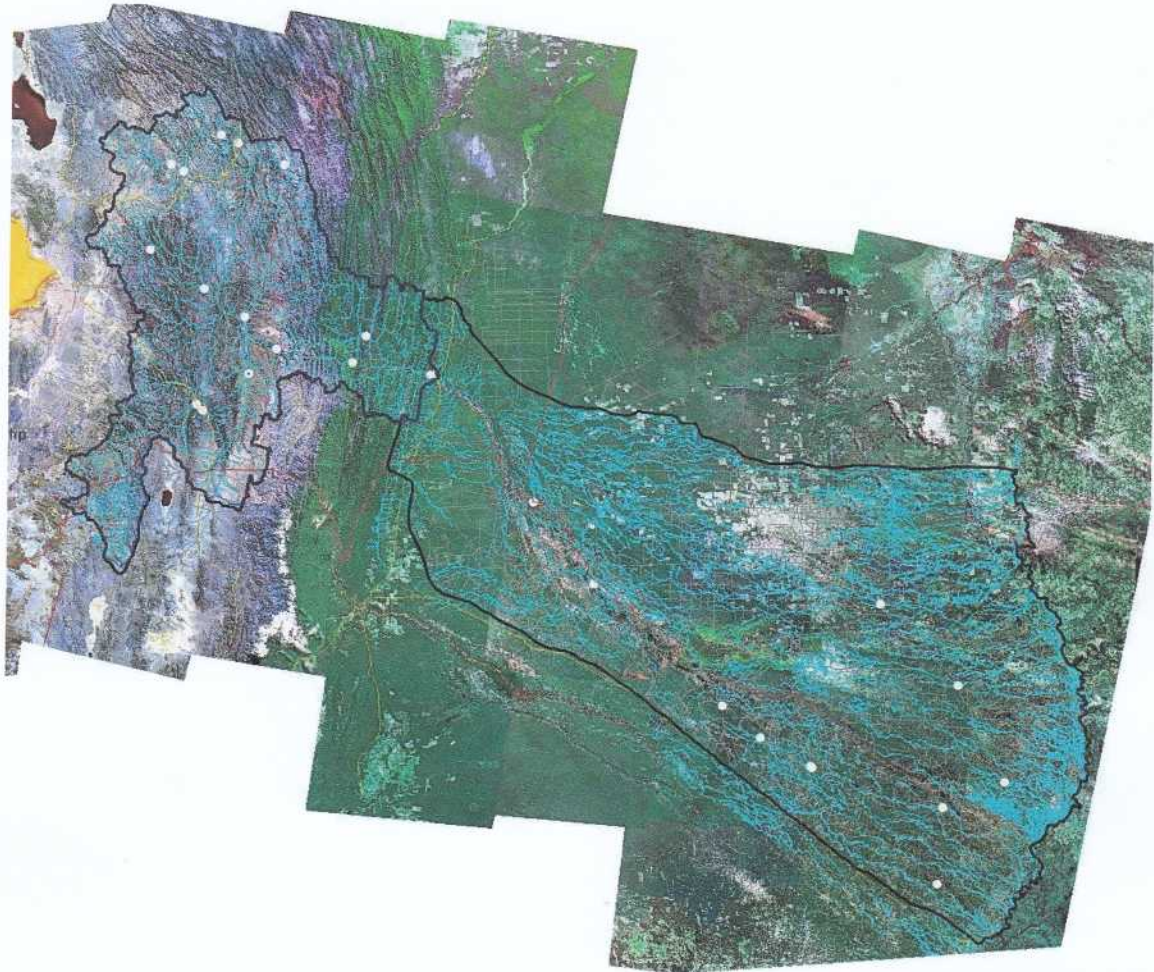


Figura N° 1: Alta Cuenca del Río Pilcomayo

Debido a la orografía, el clima de la región varía de semiárido (sector oeste) hasta subhúmedo y subhúmedo seco en el resto de la cuenca. Las precipitaciones anuales varían entre 300 mm/año en el Suroeste, hasta valores por encima de 1000 mm/año al Este de la cuenca.

La precipitación media anual supera los 1200 mm/año en la zona alrededor de El Palmar, ubicada en el tramo del Pilcomayo entre Viña Quemada y Villamontes en el departamento de Chuquisaca. Otro núcleo de precipitación se presenta en el extremo sur y lado este de la serranía del Aguaragüe, en la zona próxima a Yacuiba (estación situada fuera de la Cuenca Alta). Valores superiores a los 1000 mm/año se presentan en las subcuencas de algunos afluentes (Ingre, Ñacamiri) de la margen norte del Pilcomayo. Por contraste, en la margen sur del Pilcomayo y cerca de Puesto Margarita, la precipitación se reduce hasta un mínimo de 500 mm/año.

Los valores mínimos de precipitación se presentan en el extremo suroeste de la cuenca, en las cabeceras de la cuenca del río San Juan en Argentina, donde la precipitación apenas supera los 200 mm/año.

Gran parte del sector oeste de la cuenca, que pertenece al departamento de Potosí y las cuencas de los ríos Tumusla, Cotagaita y San Juan, presenta una precipitación por debajo de 300 mm/año..

Las precipitaciones en la cuenca son predominantemente estivales, con estación seca bien marcada. La concentración estival de las lluvias en la región es más marcada a medida que se avanza desde el río Paraguay hacia el Oeste y determina que en la Cuenca Alta se tienen precipitaciones casi nulas para el mes de Julio y del orden de los 100 mm para enero.

Por otra parte la concentración estacional de las lluvias en la Cuenca Alta y zona Este de la cuenca queda evidenciado por la regularidad del período de aguas altas del río Pilcomayo.

Las temperaturas medias están condicionadas por la altura sobre el nivel del mar y la orientación / exposición de las laderas al sol. Sin embargo la intrusión de aire caliente a lo largo de los valles de los ríos Pilcomayo y Pilaya y afluentes hace que esos valles tengan un clima más templado.

Las temperaturas medias anuales descienden con la elevación del terreno, encontrándose valores de 20°C en Villa Montes y llegando hasta los 14°C en la zona de los valles de los cursos en la zona montañosa de la cuenca alta. Los valores más bajos se presentan en la zona de Puna con promedios que oscilan en los 5°C.

El gradiente de temperaturas medias mensuales de Julio en la cuenca alta está influido por la latitud: en la parte Sur de la cuenca alta se encuentran temperaturas medias de 5°C, mientras que en la parte Norte las temperaturas son más cálidas llegando a los 8°C aproximadamente. La estacionalidad de las temperaturas de la cuenca alta es menos notoria que en la cuenca baja del río Pilcomayo con una amplitud de aproximadamente 6°C.

La estacionalidad del clima determina las características del régimen hidrológico caracterizado por una estación seca de mayo a octubre y una estación húmeda de diciembre a marzo, considerándose Noviembre y abril meses de transición.

3.1 HIDROGRAFÍA

La Figura N° 2 muestra la red hidrográfica de la Cuenca Alta del río Pilcomayo que nace en la Cordillera de los Frailes, a 4600 msnm, en territorio de la provincia Avaroa del departamento de Oruro. Las principales características hidrográficas fueron descritas en el Balance Hídrico de la Cuenca Alta del río Pilcomayo (Instituto de Hidráulica e Hidrología, UMSA, 2006) : "En sus nacientes (66°20'W y 19°20'S) recibe el nombre de Jachcha Jokho, que cambia luego a Kollpa Jahuira. Más abajo recibe sucesivamente los nombres de Aguas Calientes, Cachimayu y a partir de la confluencia con el río Chillahua, ya en el departamento de Potosí, el de Pilcomayo. El río toma un rumbo predominante este al inicio. Cruza la localidad de Yocalla-Potosí (3380 msnm) a los 55 km de recorrido y por la estación hidrométrica de Talula a los 140 km. En este punto el río toma una dirección sureste que se mantiene hasta Misión La Paz. El río cruza Puente Méndez a 184 km de sus nacientes e Icla a los 234 km y una altitud de 2010 msnm. Hasta este punto los principales tributarios son los ríos Tinguipaya y Ravelo-Cachimayu por la margen izquierda y Tarapaya y Mataka por la derecha. El río continúa por 215 km hasta la confluencia con el río Pilaya, su tributario más importante. En este tramo recibe a los ríos Turuchipa y Ajchilla/Santa Elena.

El río Camblaya-Pilaya se forma por la unión de los ríos San Juan del Oro y Tumusla. El primero recibe las aguas de varios afluentes provenientes de las Cordilleras de Lípez y Chichas, y el río Tumusla recibe las aguas provenientes de la Cordillera de los Frailes y Chichas. El río San Juan del Oro, que se denomina Grande de San Juan aguas arriba de la confluencia con el río San Antonio, tiene como tributarios importantes a los ríos Tupiza y Tomayapu. Por su parte, el río Tumusla, que aguas arriba recibe los nombres de Yura y Toropalca, tiene como principal tributario al río Cotagaita. La mayor parte del tramo Camblaya-Pilaya, de 217 km de longitud, transcurre encañonado.

Por su parte, el río San Juan del Oro, que nace a 4050 msnm en la provincia de Jujuy Argentina, tiene una longitud total de 400 km. El río Tumusla mide 234 km desde sus nacientes. Por tanto, siguiendo el curso más largo, el río Pilaya tiene una longitud de 617 km.

Desde la confluencia con el río Pilaya hasta Villamontes, el río Pilcomayo recorre 126 km, con lo que la longitud desde sus nacientes hasta esa localidad es de 575 km. En este tramo, recibe algunos afluentes, como el Ingre y el Ñacamiri, que le aportan agua de uno de los sectores más húmedos de toda la cuenca. En Villamontes (390 msnm) el río abandona la última serranía del Subandino e ingresa a la llanura chaqueña. La pendiente disminuye, la sedimentación del lecho se acelera y un cono de deyección se forma a partir del puesto militar de Ibibobo. El río cruza la localidad de La Vertiente a 355 msnm (+29 km), Palo Marcado a 330 msnm (+19 km), Ibibobo a 310 msnm (+20 km), Creveaux a 295 msnm (+35 km), D'Orbigny a 281 msnm (+24 km), Esmeralda a 265 msnm (+40 km), donde se encuentra el hito trinacional, hasta llegar a Misión La Paz (+43 km) a 230 msnm, punto de control de toda la Cuenca Alta. La longitud acumulada del tramo Villamontes-Misión La Paz es de 210 Km.

Desde las nacientes hasta el punto de control de Misión la Paz, el río Pilcomayo tiene una longitud de 785 km y su pendiente media hasta Villamontes es de 0.72%.

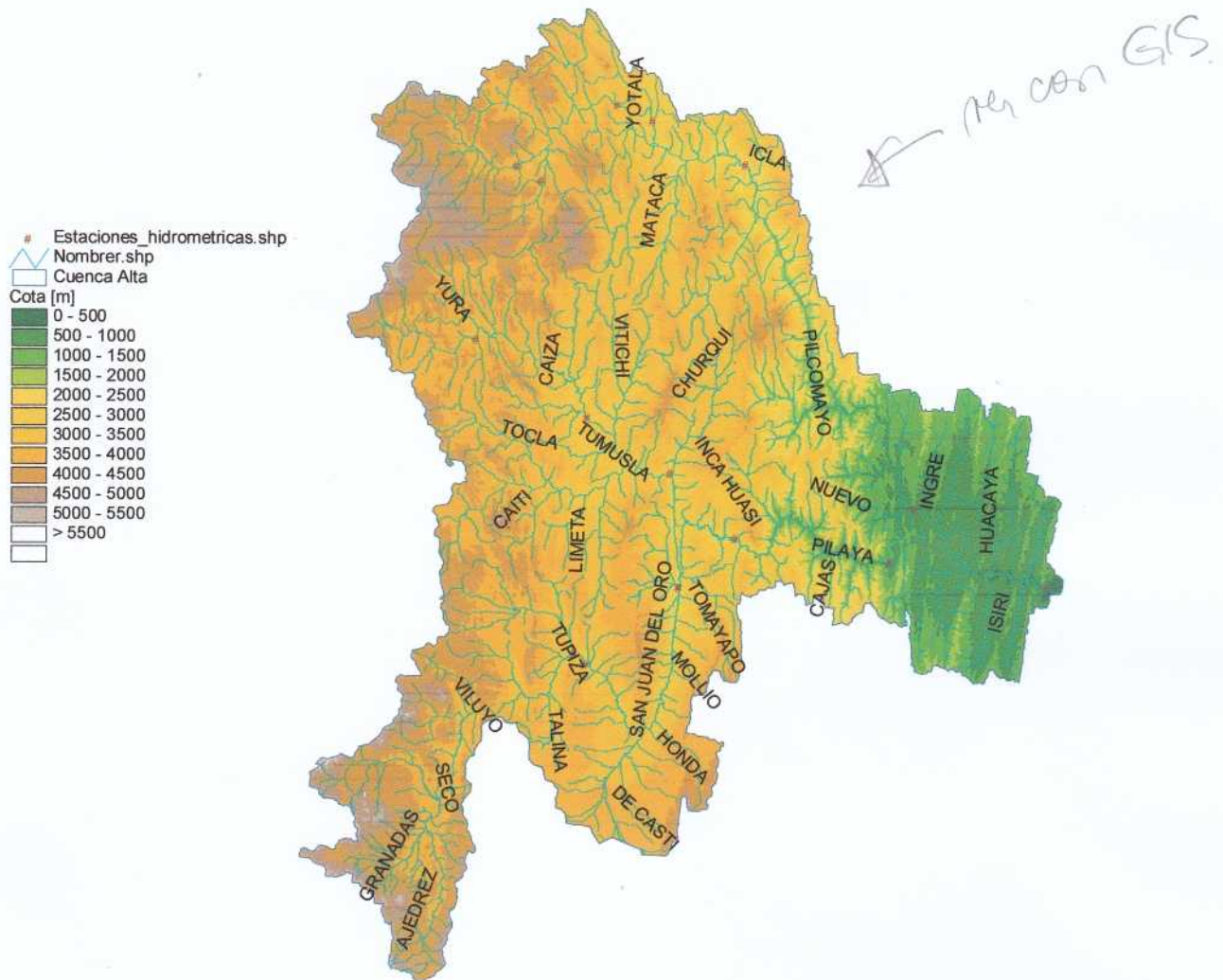


Figura N° 2: Red hidrográfica de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo

3.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

La caracterización geológica general de la Alta Cuenca del río Pilcomayo permite identificar unidades geológicas que se extienden temporalmente desde el Paleozoico hasta el Cenozoico y están representadas por sedimentitas clásticas y carbonáticas, secuencias volcanoclasticas, intrusivos granodioríticos y acumulaciones inconsolidadas, éstas últimas relacionadas con procesos fluviales, glacialigenicos y de remoción en masa.

Teniendo en cuenta asociaciones litológicas particulares, edades y estilos de deformación similar, en el Estudio LBAyS (Halcrow-Serman & asociados s.a., 2006) se estableció una subdivisión sinóptica regional que contempla grandes unidades geológicas o Provincias geológicas, que desde el Oeste al Este se identifican como: Puna, Cordillera Oriental, Sierras Subandinas y Llanura Chaqueña y se muestran en la Figura N° 3. Las tres provincias presentes en la Cuenca Alta se describen brevemente a continuación.

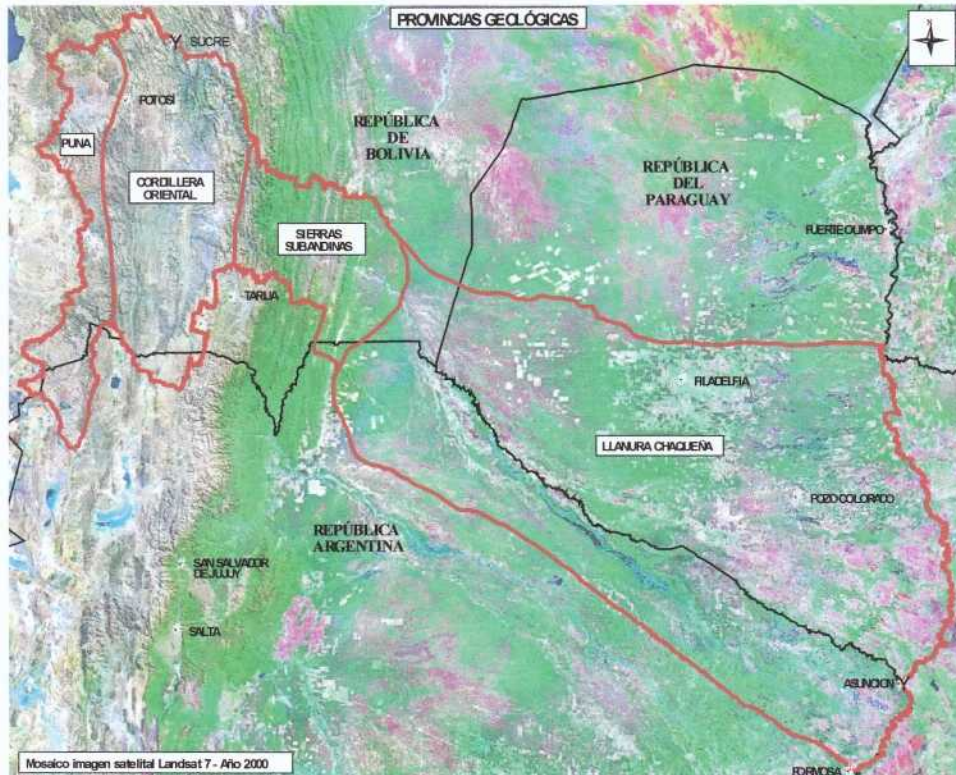


Figura N° 3: Mapa de provincias geológicas de la Cuenca del Río Pilcomayo (Estudio de Base Ambiental y Socioeconómica de la cuenca del río Pilcomayo, 2006)

3.2.1 Puna

Se localiza en el extremo Oeste de la cuenca extendiéndose desde el interfluvio y hacia el Este hasta los meridianos de los 66° 00' y 66° 30'.

Se caracteriza por presentar dos entidades volcánicas cenozoicas de diferente edad: la más antigua está integrada por coladas e ignimbritas ricas en sílice, las que fueron extruidas a lo largo de fisuras regionales de rumbo general Norte –Sur, mientras que la más moderna esta constituida por rocas de composición andesítica, que forman estructuras del tipo estratovolcanes que se erigieron durante el Pleistoceno atravesando a las litologías precedentes. Formando parte de esta provincia geológica se observa además la presencia de sedimentitas, metamórficas e intrusivos granodioríticos y graníticos locales de poco desarrollo.

Estructuralmente la Puna configura un sistema de planicies y montañas de bloques elevadas por efecto de fallas inversas de alto ángulo y gran desplazamiento vertical, que con rumbo general Norte-Sur inclinan al Este. Las secuencias litológicas precedentemente indicadas cubren un basamento que, desde la sección austral de la cuenca del río Pilcomayo ocupada por Argentina, buza regionalmente hacia en Norte. Todo el conjunto fue fracturado, fallado y desplazado durante los ciclos tectónicos andinos. El ascenso de Puna hasta su posición actual comenzó en el Mioceno medio, acentuándose durante el Plioceno-Pleistoceno inferior, mientras que en periodos geológicos previos esta entidad geológica se encontraba deprimida entre elementos topográficos adyacentes más elevados. Sobre estas estructuras tectónicas se localizan los aparatos volcánicos modernos más desarrollos y las acumulaciones glaciogenicas y fluviales.

3.2.2 Cordillera Oriental

Corresponde al extremo austral de una larga faja andina que comprende la Cordillera Oriental del Perú y las Cordilleras Oriental y Central de Bolivia. Dentro de la zona Argentina correspondiente a la cuenca del Río Pilcomayo, se localiza en el Norte de las provincias de Jujuy y Salta. Con desarrollo meridional, en el ámbito de la cuenca llega a tener un ancho variable que oscila entre los 190 y 230 kilómetros. Se localiza entre las provincias geológicas de la Puna, al Oeste y Sierras Subandinas, que la limita por el Este.

Dentro de la cuenca se desarrollan una serie de complejos que se distinguen litológica y estratigráficamente.

La estructura de la Cordillera Oriental consta de una combinación de pliegues y fallas donde, debido a su frecuencia, intensidad y magnitud, las fallas son más importantes que los pliegues. Las fallas de alto ángulo, con desplazamientos notables son las estructuras rectoras que definen la existencia de cordones montañosos.

Por su parte, los pliegues son del tipo volcado y asimétrico, con las alas orientales reducidas por fallamiento y sobre las que se sobrecorrieron en dirección al Este las crestas de los anticlinales, a favor de fallas inversas que inclinan hacia el Oriente.

3.2.3 Sierras Subandinas

El concepto de Sierras Subandinas designa una región de serranías de variada altura, y de estilo estructural y composición estratigráfica diversa que se localiza entre la Cordillera Oriental y la Llanura Chaqueña. Constituye el último elemento orográfico positivo que se extiende hacia el Oriente de la cuenca del Río Pilcomayo.

Se desarrolla como una faja de rumbo meridional, de 100 Km de ancho general, el que en la sección central alcanza los 140 km. Se despliega a continuación del límite Este de la Cordillera Oriental, desde los 64° 30' hasta los 63° 10' aproximadamente, donde se pone en contacto con la planicie pedemontana perteneciente a la Llanura Chaqueña.

Las rocas de Sierras Subandinas se caracterizan por ser una asociación de terrenos silurico-devónicos con depósitos del Triásico y el Carbónico cubiertos a su vez por espesos terrenos terciarios.

El estilo estructural general de Sierras Subandinas se conserva meridionalmente sin variaciones atravesando la sección media de la cuenca del río Pilcomayo. Se manifiesta según pliegues asimétricos, a veces ligeramente volcados hacia el Este, donde el más occidental tiende a cabalgar sobre el inmediato oriental. Los corrimientos se resuelven según una falla de piso cuya trayectoria esta determinada por el deslinde entre rocas con diferente comportamiento al esfuerzo tectónico. De esta forma, el plegamiento subandino pudo haberse producido por deslizamiento gravitacional sobre lutitas silúricas como resultado de un notable incremento de la pendiente producido por el levantamiento de la Cordillera Oriental.

El interés sobre las particularidades de esta Provincia geológica, especialmente las características litológicas de las unidades de edad terciaria, y la estructura de deformación que presenta, reside en que estas condiciones geológicas particulares facilitan que en ella tengan lugar episodios de remoción en masa de diversa topología, los que dan lugar a notables volúmenes de material clástico que son incorporados en eventos de muy corta duración en los cursos fluviales y de esta forma, transportados hacia la cuenca baja.

Las características hidrogeológicas de la cuenca alta de Río Pilcomayo señalan para la parte de la Cordillera Oriental que la mayoría de las rocas que afloran en esta área tienen solamente recursos de aguas subterráneas limitados. Una ocurrencia extensa de aguas subterráneas es de esperarse solamente en el área de la Meseta de Frailes donde fuertes manantiales abastecen a los tributarios del Río Pilcomayo. Pero en general, en áreas donde afloran las rocas ordovícicas, el flujo base en los ríos es bajo.

Por la poca permeabilidad de las formaciones ordovícicas y una pendiente con fuerte declive, las aguas de las lluvias fluyen directamente a los ríos sin infiltración al subsuelo. Este fenómeno explica las grandes diferencias en el caudal del Río Pilcomayo durante el año. En la estación Villa Montes el caudal del río varía entre 200 m³/s en los meses enero a abril y 30 – 60 m³/s entre los meses de julio y octubre.

Las Fajas Subandinas están caracterizadas por una cadena de valles y montañas con rumbo norte-sur. Las areniscas, calizas y margas depositados en el período cretácico (K) hasta triásico (Tr) en las serranías contienen acuíferos que abastecen manantiales y los mismos contribuyen en forma limitada también al flujo base del Río Pilcomayo.

3.3 VEGETACIÓN

La cuenca del río Pilcomayo tiene un gradiente ecológico complejo que se traduce en distintas regiones ecológicas y determinan el patrón de distribución de la vegetación a una escala regional. En la cuenca, existe un gradiente Este-Oeste dado por los cambios ecológicos asociados a variaciones en la altitud (cambios en la presión atmosférica, radiación, temperatura), desde 4.500 m.s.n.m. en el Oeste, a menos de 100 m.s.n.m. en el Este, y de precipitación desde más de 1.200 al E (río Paraguay) a menos de 200 mm anuales al O (Puna), con sectores intermedios con más de 2.500 mm correspondientes a los faldeos orientales de las sierras subandinas.

Estas ecorregiones han sido identificadas en el estudio de LBAyS adoptándose el criterio de Dinerstein et al. (1995) que asume que una Ecoregión es un conjunto de comunidades naturales que están geográficamente delimitadas, que comparten la gran mayoría de sus especies, tiene una dinámica ecológica propia, se desarrolla bajo ciertas condiciones ambientales y cuyas interacciones ecológicas son cruciales para su permanencia a largo plazo. Con un sentido práctico, la Ecoregión es la mínima unidad de representación para una efectiva planificación regional con fines de conservación de la biodiversidad.

La Figura N° 4 reproduce el mapa de ecoregiones de la cuenca del río Pilcomayo presentado en ese estudio en el que se identificaron las 7 ecoregiones que se detallan en la Tabla N° 4 y permite apreciar que en el ámbito de la Alta Cuenca del Río Pilcomayo se presentan las ecorregiones cuyas características se resumen a continuación:

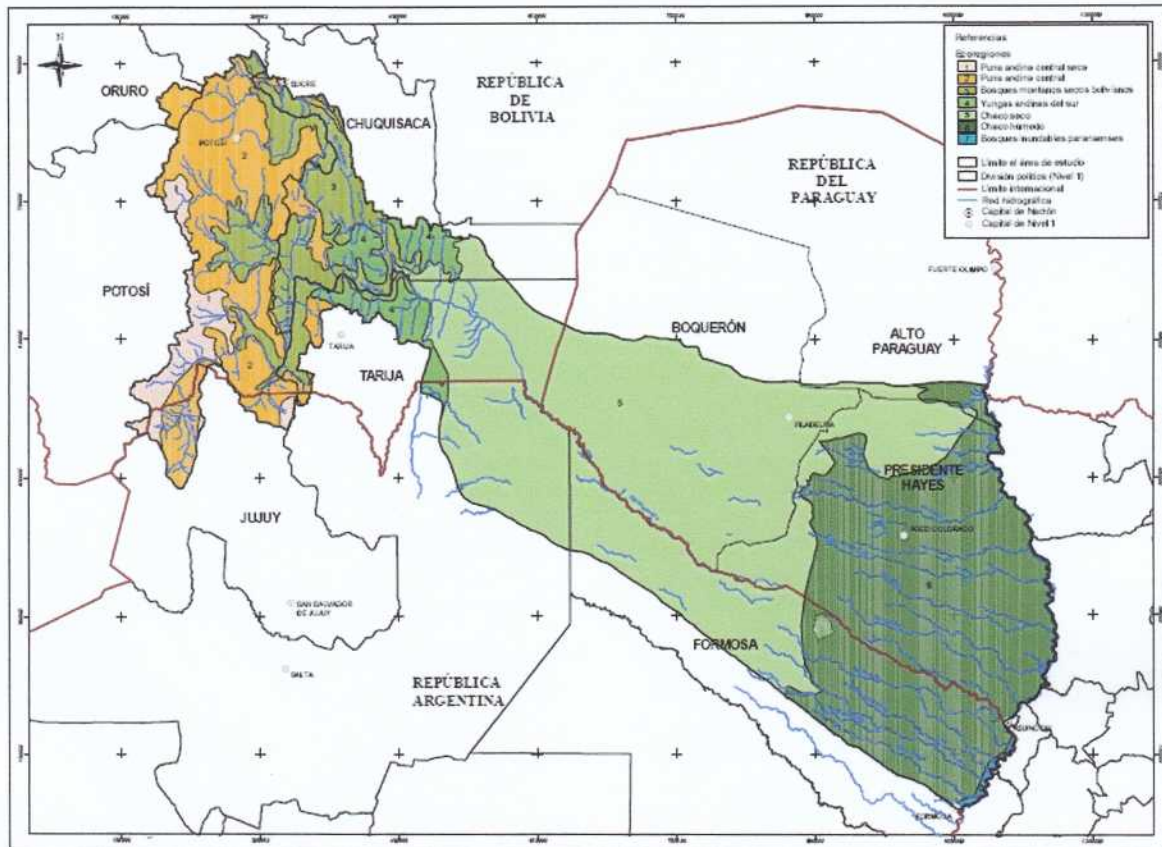


Figura N° 4: Ecoregiones de la Cuenca del Río Pilcomayo (Fuente: LBAYs, 2006)

Tabla N° 4: Ecoregiones de la Cuenca del río Pilcomayo

Nº	Ecoregión
1	Bosques Inundables Paranaenses
2	Bosques Montanos Secos Bolivianos
3	Chaco Húmedo
4	Chaco Seco
5	Puna Andina Central
6	Puna Andina Central Seca
7	Yungas Andinas Del Sur

Puna Andina Central Seca

Esta ecoregión está muy poco representada en la cuenca del río Pilcomayo, ocupando unos 8.000 Km², (aproximadamente 10 % del área de la Cuenca Alta), en algunos pocos sectores por arriba de las cabeceras de los arroyos de la cuenca, especialmente en el noroeste de Jujuy. El bioma se desarrolla en un clima seco, por arriba de los 3.500 msnm y se halla representado por pastizales cespitosos alpinos tropicales y arbustales enanos y en cojín, así como bosquecillos de *Polylepis*. Se distingue de las otras Ecoregiones puneñas por la falta de lluvias, menores a los 400 mm anuales y concentrados en unos pocos meses, por lo cual el período seco se extiende por más de ocho meses.

Puna Andina Central

Esta ecoregión, que abarca unos 36.000 Km² (45 % del área total), se extiende desde el sur de Perú a través de Bolivia hasta el norte de Argentina, ocupando una franja de altura de los 3.200 a los 6.600 msnm. El paisaje es montañoso, con picos nevados, praderas de montañas, lagos de altura, tanto de agua dulce como salinos, "pampas" y valles. La precipitación varía entre los 250 y 500 mm anuales, con temperaturas menores a 0°C hasta los 15 °C. El sistema de drenaje es esencialmente endorreico, conformando importantes lagunas o salinas. La vegetación consiste principalmente de pastizales de diferentes especies de *Calamagrostis*, *Agrostis* y *Festuca* y estepas arbustivas. En los sitios donde se acumula agua por la falta de drenaje o impermeabilidad de los suelos, se forman mallines y bofedales, incluyendo pajonales y juncales en las costas de cuerpos de agua, como en algunos de los lagos y lagunas de altura. Algunas formaciones de pequeños arbustos como los "Tolares" (*Parastrephia lepidophylla*), "Yaretales" (*Azorella yarita*) y "Rodales" de *Puya raimondi*, son característicos. Los bosques de *Polylepis*, explotados durante siglos por las comunidades nativas, son importantes y pueden crecer a grandes alturas.

Yungas Andinas Del Sur

Incluye las Yungas de Argentina y se extiende por la Cordillera Oriental de los Andes, desde el centro de Bolivia en Cochabamba hasta el este de la Cordillera de La Rioja en Argentina, ocupando Cochabamba, Chuquisaca, Tarija, Salta y Jujuy, en el área de estudio. Contacta con ecoregiones más secas, los Bosques Montanos Secos Bolivianos y la Puna a mayores alturas y el Chaco Seco al este en el pedemonte andino. Las altitudes donde se desarrolla esta selva van desde los 600 a los casi 3.000 msnm. El clima es cálido y húmedo a subhúmedo, con precipitaciones altas de hasta 2.500 mm anuales, permitiendo el crecimiento de una selva siempreverde, con árboles de 15 m o más de altura. Durante los meses fríos la condensación y captación del agua de las neblinas caracterizan a estas "selvas nubladas". Debido al desarrollo altitudinal esta selva ha sido dividida en diferentes pisos montanos: Selvas Pedemontanas (cálidas y húmedas); Selvas Montanas (templado-cálidas y húmedas); Bosques Montanos (templado y húmedos) y Pastizales de altura (templado-fríos y subhúmedos). Los pisos son diferenciables por las asociaciones vegetales predominantes: pisos de Lauráceas y Mirtáceas (por debajo de los 1200 m); asociaciones dominadas por Aliso (*Alnus acuminata*) y el Pino del Cerro (*Podocarpus*), entre los 1.200 y los 1.500 msnm. Esta Ecoregión abarca unos 10.500 Km² en el área de estudio (13% de la superficie de la Alta Cuenca).

Bosques Montanos Secos Bolivianos

Esta región abarca unos 25.000 Km² de superficie y representa un 32% de la superficie de la Alta Cuenca. Se ubica en los valles secos intermontanos del sur de Bolivia, extendiéndose hacia el noroeste en forma de parches. Forma una zona xérica de transición entre la Ecoregión de las Yungas Andinas del Sur más húmedas y la Puna y el Chaco más secos, incluyendo el Piso Prepuneño de la Vegetación Boliviano Tucumana. En la cuenca del Pilcomayo, esta Ecoregión incluye los valles altos y cabeceras de valles interandinos en el centro este del Departamento de Potosí, el oeste de Chuquisaca y el centro oeste de Tarija, desde los 360 a los 3000 msnm. La vegetación clímax está constituida por bosques xerofíticos espinosos con cactáceas en abundancia. Esta Ecoregión en el río Pilcomayo, especialmente la cuenca del río San Juan del Oro, posee una flora rica en endemismos. También aparecen los primeros arbustales de *Larrea divaricata* ("Jarillar") que tiene su máxima expresión hacia el sur, en la Ecoregión del Monte en la R. Argentina. Los tipos de vegetación incluyen bosques a lo largo de los ríos, bosques estacionales secos y arbustales y bosques de cactáceas columnares dispersos en los faldeos montañosos. La

ecoregión tiene un estatus de conservación Crítico/Amenazado. Si bien no se ha documentado con certeza la extensión de la deforestación en la zona, hay grandes áreas de tierras degradadas. Actualmente, la región está fuertemente impactada por la conversión de tierras para actividades agroganaderas, el crecimiento urbano y de las poblaciones rurales, la caza excesiva y el desmonte progresivo para el uso de madera como combustible.

A una escala local, dentro de las unidades correspondientes a las ecoregiones, Halcrow-Serman & asociados s.a. delimitaron las Unidades de Vegetación, aplicando un enfoque fisonómico-florístico y estructural, basado principalmente en el uso de las formas de vida y la mención de las especies vegetales más frecuentes y elaboraron un mapa de Unidades de vegetación que corresponde a la cobertura vegetal del área, incluyendo las alteraciones antrópicas que implican modificaciones significativas de la cobertura vegetal al momento de elaboración de los respectivos mapas fuente. Las unidades de vegetación identificadas en ese mapa alcanzan el número de 31 y se presentan en la Tabla N° 5. Una descripción sintética de cada una de las Unidades de Vegetación identificadas incluyendo la estimación del área y porcentaje de la cuenca ocupada por cada unidad se presenta en el mismo Informe.

Tabla N° 5: Unidades de Vegetación de la Cuenca del río Pilcomayo.

Nº	Unidad de Vegetación
1	Agroecosistemas
2	Bosque Chaqueño Bajo Climáxico
3	Bosque Chaqueño Bajo Mal Drenado
4	Bosque Chaqueño Mal Drenado
5	Bosque Chaqueño Subhúmedo Transicional Climático
6	Bosque Denso Caducifolio
7	Bosque Denso Perenne
8	Bosque Chaqueño Freatófilo De Algarrobo
9	Bosque Ralo Caducifolio
10	Bosque Ralo Perenne
11	Bosque Chaqueño Ripario Inundable
12	Bosque Xeromórfico Montano
13	Bosques Bajos Hidromórficos
14	Bosques Y Matorrales Riparios Sucesionales
15	Herbácea Baja
16	Herbácea Intermedia
17	Matorral Caducifolio
18	Matorral Enano
19	Matorral Halófito Inundable Con Palma Y Prosopis
20	Matorral Perenne
21	Matorral Secundario Abierto Con Prosopis
22	Matorral Secundario Anegable Con Vinal
23	Matorral Xerofítico En Paleocauces
24	Matorral Xeromórfico
25	Sabana Densa Inundable De Palma
26	Sabana Abierta Inundable De Palma
27	Sabanas Y Pajonales Chaqueños Inundables
28	Urbana
29	Vegetación Chaqueña Acuática Y Palustre
30	Vegetación Acuática Y Palustre
31	Vegetación Forestal

3.4 SUELOS

Los suelos de la Cuenca del Río Pilcomayo reconocen distintos factores que han influenciado en su formación. Ellos son: el material original o litología, las condiciones climáticas y de vegetación, el relieve y el tiempo o edad de los mismos. Debido a la importante heterogeneidad que presentan estos factores mencionados dentro del área de estudio, se encuentran en la misma más del 50 % de los tipos de suelos descritos a nivel mundial (Halcrow-Serman & asociados s. a., 2006). Algunas de las características más sobresalientes de los suelos detectados en la cuenca se presentan a continuación:

Lepsoles: Suelos de escaso desarrollo derivados de rocas consolidadas y en relieves escarpados. Presentan escasa profundidad efectiva.

Regosoles: Suelos derivados de rocas no consolidadas, de escaso desarrollo.

Fluvisoles: Suelos derivados de sedimentos fluviales, presentan escaso desarrollo y pueden sufrir inundaciones periódicas.

Gleysoles: Suelos desarrollados en condiciones de hidromorfismo semipermanentes.

Arenosoles: Suelos derivados de material arenoso de escaso desarrollo.

Cambisoles: Suelos con cierto grado de desarrollo (presentan horizonte cámbico) pero sin llegar a presentar horizonte de acumulación de arcilla.

Calcisoles: Suelos con un horizonte de acumulación de carbonato de calcio con o sin cementación. Se los encuentra en climas áridos o semiáridos.

Gysisoles: Suelos con un horizonte de acumulación de sulfato de calcio con o sin cementación.

Solonetz: Suelos con un horizonte de acumulación de arcilla y de sodio (horizonte nátrico). Su génesis esta influenciada por la presencia de una capa freática salina cercana.

Solonchaks: Suelos con un horizonte superficial con acumulación importante de sales solubles (horizonte sálico). Su génesis esta influenciada por la presencia de una capa freática salina cercana.

Phaeozems: Suelos caracterizados por presentar un horizonte superficial oscuro, rico en materia orgánica y alta saturación de bases. Su génesis esta influenciada por la presencia de vegetación natural de pradera, estepa o bosque.

Greyzems: Suelos semejantes a los anteriores. Presentan en todos los casos un horizonte de acumulación de arcilla.

Luvisoles: Suelos caracterizados por no presentar ni un horizonte superficial mólico (oscuro, rico en materia orgánica) ni un horizonte de eluviación (E) con un límite abrupto con el horizonte inferior. Presentan un horizonte de acumulación de arcilla (argílico) con alta capacidad de intercambio catiónico y alta saturación de bases.

Planosoles: Suelos caracterizados por presentar un horizonte de eluviación (E) con un límite abrupto con el horizonte inferior de acumulación de arcilla (argílico) con baja permeabilidad.

Lixisoles: Junto con los Nitisoles se ubican entre los suelos de mayor meteorización del área de estudio. Son suelos caracterizados por presentar un horizonte de acumulación de arcilla (argílico) con baja capacidad de intercambio catiónico y alta saturación de bases.

Nitisoles: Son los suelos de mayor grado meteorización del área de estudio. Su presencia en el área de estudio es muy limitada.

En el ámbito de la Cuenca Alta (ver Figura N° 5), en la región denominada Puna (A) predominan los suelos pertenecientes a los grupos Leptosoles y Cambisoles acompañados en mucha menor proporción, por Regosoles, Arenosoles y Luvisoles.

La región denominada Cordillera Oriental aparecen principalmente Cambisoles y en menor proporción, Calcisoles y Leptosoles (también se encuentran sectores pequeños con Lixisoles, Fluvisoles y Regosoles) en la porción más occidental de la región (B1). En la subregión oriental (B2) predominan los Leptosoles con sólo pequeñas inclusiones de Cambisoles, Calcisoles, Lixisoles, Fluvisoles y Regosoles.

La región denominada Sierras Subandinas en la zona delimitada por el límite de la Alta Cuenca (C1) muestra predominancia de Leptosoles con sectores minoritarios ocupados por Regosoles y Cambisoles.

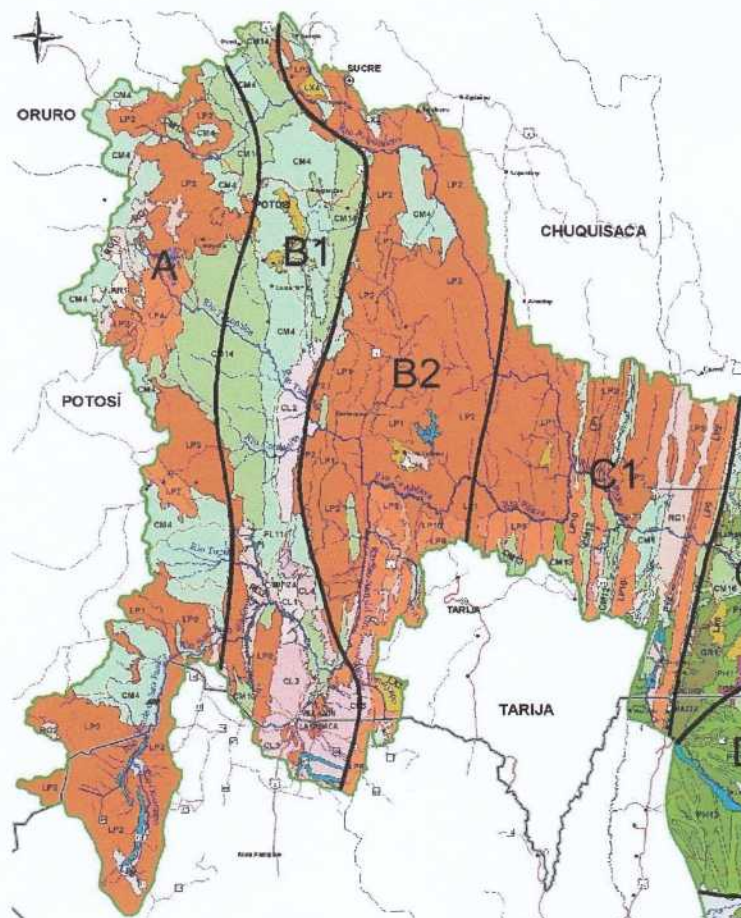


Figura N° 5: Mapa de Unidades de Suelo en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo (Fuente: Halcrow-Serman & asociados s.a., 2006)

La clasificación por Aptitud de Uso / Uso Recomendado de los suelos de la Cuenca posee las siguientes categorías:

Uso agrícola Intensivo: Tierras que por sus condiciones biofísicas y socioeconómicas adecuadas permiten un uso agrícola intensivo de modo sostenible, obteniendo rendimientos relativamente altos.

Extensivo: Tierras que presentan ciertas limitaciones por sus condiciones biofísicas y socioeconómicas que no alcanzan tal magnitud que impiden un uso agrícola extensivo de modo sostenible.

Uso agropecuario: Intensivo y Extensivo: Las definiciones son semejantes a las anteriores pero hacen alusión al uso agrícola y ganadero.

Agropecuaria-forestal: Son tierras ubicadas en medios naturales boscosos, cuyas condiciones favorecen una forma de uso y manejo de los recursos naturales, en la cual áreas con cobertura boscosa son utilizadas para ramoneo y pastoreo y/o aprovechadas para extracción de madera u otros productos del bosque, en asociación con pasturas y áreas de cultivo, sea de manera simultánea o en forma secuencial. En estas tierras el beneficio esperado del aprovechamiento combinado de estos usos es mayor que la suma de los beneficios parciales de cada uno de los usos especializados.

Uso ganadero: Extensivo y Ganadero-forestal extensivo: Las definiciones son semejantes a las anteriores pero hacen alusión al uso exclusivamente ganadero.

Uso forestal: Son tierras con cobertura forestal que reúnen condiciones medioambientales y socioeconómicas adecuadas para la producción forestal actual o potencial bajo un manejo técnica y socioeconómicamente sostenible, sea para producción de madera y/o para otros productos del bosque.

Protección: Estas tierras no son aptas para la actividad agropecuaria o forestal sostenible y sugieren priorizar la protección de los suelos, vegetación y recursos hídricos. La cobertura vegetal en estas tierras generalmente cumple un papel fundamental de regulación ambiental, protegiendo los suelos y recursos hídricos. Dentro de esta categoría se incluyen áreas cuyas tierras que, aún con limitaciones en la intensidad de su uso, se admiten otros usos (agrícola, agropecuario, agropecuario-forestal).

En la región denominada Puna (A) el uso recomendado predominante sugerido es la protección de los recursos naturales (suelos, vegetación e hídricos) con distintos usos restringidos. También se encuentran en una proporción importante áreas con uso recomendado de ganadería extensiva y, en menor medida, de uso agropecuario extensivo.

La región Cordillera Oriental (B) presenta dos subregiones (B1 y B2). En la subregión B1 también el uso recomendado predominante sugerido es la protección de los recursos naturales con distintos usos restringidos. En menor proporción existen áreas con uso recomendado de ganadería extensiva y agropecuario extensivo y, con muy escasa extensión, uso agrícola extensivo. La subregión B2 es semejante a la anterior, con menor proporción de uso ganadero extensivo y agropecuario extensivo. Posee un área pequeña con uso recomendado forestal para rehabilitación.

La región denominada Sierras Subandinas (C) también se ha dividido en dos subregiones (C1 y C2). En la subregión C1 que coincide con la porción inferior de la Cuenca Alta también el uso recomendado predominante sugerido es la protección de los recursos naturales con

distintos usos restringidos. En menor proporción se ubican el uso forestal, el agropecuario-forestal y el ganadero-forestal extensivo.

El análisis de Cobertura / uso actual del suelo (considerando las áreas relativamente homogéneas del territorio en función de diferentes rasgos naturales y/o antrópicos de la cobertura terrestre, especialmente relacionados con las características fisonómicas de la vegetación y los patrones antrópicos de uso del suelo) permitió definir diez categorías de Grandes Tipos de Cobertura y Uso y treinta y tres subcategorías (Tabla N° 6):

Las mismas fueron definidas a partir del análisis de imágenes satelitales complementado con la información de actividades económicas; pasivos ambientales; áreas naturales protegidas, unidades de vegetación ; etc.

Los distintos tipos de cobertura identificados no se distribuyen homogéneamente en la cuenca. En la Cuenca Alta, claramente influenciado por la heterogeneidad fisiográfica, topográfica y climática, se observa una distribución más equilibrada de tipos de cobertura que en resto de la cuenca, predominando la cobertura de matorrales (perennes, caducifolios, enanos, xeromórficos), de los Bosques Montanos Secos Bolivianos y de ambas Ecoregiones de la Puna. Le siguen en importancia las coberturas boscosas (correspondientes a los bosques húmedos de las Yungas Andinas del Sur y a las formaciones xerófilas de los Bosques Montanos Secos Bolivianos), y en menor medida las Estepas (herbáceas y arbustivas) y las áreas abiertas. (estepas arbustivas ralas), salinas y peladares, o algunas situaciones de degradación antrópica.

La cobertura de matorrales presente en la Alta Cuenca se caracteriza por el predominio de especies leñosas xerófilas. Pueden ser de carácter secundario sucesional, colonizando con relativa rapidez áreas deforestadas y de suelos removidos, pudiendo hacerse extensivos en áreas muy perturbadas.

La cobertura boscosa presenta una cobertura de árboles mayor al 10% de la superficie, con especies diversas perennes, caducifolias o mixtas, capaces de producir madera o productos derivados, como leña o combustible..

Las Estepas son formaciones herbáceas con gran proporción del suelo desnudo, y escasa cobertura vegetal de hierbas (pastos duros) y arbustos dispersos. Son ambientes pobres, de baja capacidad de carga y con muy baja o nula aptitud agrícola

Finalmente en las áreas abiertas. (estepas arbustivas ralas), predomina el suelo con escasa o sin cobertura vegetal. Son suelos pobres y con roca expuesta (cuenca alta).

Tabla N° 6: Tipos de cobertura y Uso del Suelo (Fuente: LBAyS, 2006)

HUMEDALES Y CUERPOS DE AGUA	Agua
	Áreas bajas anegables
	Meandro del río Pilcomayo
BOSQUES	Bosque denso perenne
	Bosque ralo perenne
	Bosque ralo caducifolio
	Bosque chaqueño denso y bosque ripario inundable, Chaco Húmedo
	Bosque bajo hidromórfico, Chaco húmedo
	Bosque xeromórfico chaqueño bajo mal drenado, Chaco seco
	Bosque xeromórfico chaqueño bajo, Chaco seco
	Bosque xeromórfico montano
	Bosque freatófilo chaqueño, Chaco seco
SABANAS Y PASTIZALES	Sabana arbolada inundable del Chaco Húmedo//pastizales de altura
MATORRALES	Matorrales secundarios sucesionales
	Matorral xeromórfico montano
	Matorral caducifolio montano y puneño
	Matorral enano montano
	Matorral perenne montano
ESTEPAS HERBÁCEAS	Estepa, herbácea intermedia montana
	Estepa, herbácea baja montana
AREAS ABIERTAS	Áreas abiertas con escasa cobertura vegetal
ECOSISTEMAS ANTRÓPICOS	Agroecosistema
	Forestal
	Sistemas urbanos
	Comunidades Indígenas
AREAS NATURALES PROTEGIDAS	ANP actuales
	ANP potenciales
ACTIVIDADES	Áreas de explotación petrolera
	Pozos petroleros
	Pasivos mineros
	Concesiones pesqueras
	Áreas de Riego
OTROS	Indefinidos (nubes; ladera en sombra, etc.)

4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE GAVRILOVIC PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

4.1 DATOS BÁSICOS: CARTAS TEMÁTICAS

Como se ha mencionado, la metodología empleada para la determinación de la producción de sedimentos considera que los procesos erosivos son el resultado de la interacción de factores que determinan tipo, localización, magnitud y frecuencia de los procesos erosivos tales como clima, litología, uso del suelo, topografía, etc.

Todas estas variables tienen una distribución espacial en la zona de estudio, por lo que los datos básicos para el desarrollo de la metodología de cálculo presentada, debieron ser recopilados en forma de planos o mapas que reflejen adecuadamente su distribución en la zona de análisis.

En este estudio se contó como información de base, con la cartografía básica y temática generada a partir del Sistema de Información Geográfica (SIG) desarrollado en el estudio de LBAyS (ESTUDIO DE BASE AMBIENTAL Y SOCIOECONOMICO DE LA CUENCA DEL RIO PILCOMAYO, Halcrow-Serman & asociados s.a., 2006). Este proyecto, con el objetivo de unificar las proyecciones utilizadas en los tres países componentes de la cuenca, seleccionó la proyección Conforme Cónica de Lambert, que había sido recomendada en el Informe Técnico SIG_20009 de mayo de 2004 del experto europeo en SIG: Maximiliano Lorenzini.

Esta proyección, utilizada para regiones de latitud media con orientación predominantemente Este – Oeste, ya que preserva de manera más precisa las formas por el menor espaciado entre los paralelos centrales, fue seleccionada debido a la extensa superficie de la cuenca y su desarrollo en sentido longitudinal E-O.

A partir de los datos básicos recibidos se procedió a efectuar el procesamiento de la información de base, organizándola en mapas y tablas con un formato adecuado para ser procesada con las herramientas de cálculo disponibles, y determinar la producción de sedimentos con la metodología especificada. La metodología implementada se basa en la utilización del programa ArcGis, un sistema de información geográfica que trabaja bajo el formato raster y permite la realización de operaciones matemáticas entre distintas imágenes, operando celda por celda, por lo que fue usado como herramienta de cálculo.

4.1.1 Modelo Digital Del Terreno

El modelo digital de terreno utilizado corresponde al elaborado en el Estudio de Base Ambiental y Socioeconómica de la cuenca del río Pilcomayo. El mismo fue elaborado sobre la base de la recopilación y edición de información de diversas fuentes:

- líneas de nivel del IGM Boliviano de cartas topográficas digitalizadas en escala 1:250.000, con una equidistancia de 100 metros.
- líneas de nivel y puntos acotados de cartas topográficas digitalizadas del DISERGEMIL de Paraguay, en escala 1:50.000, con una equidistancia de 10 metros.
- curvas de nivel y puntos acotados en formato digital del SIG250 del IGM Argentino en escala 1:250.000, con una equidistancia de 10 metros en la cuenca baja y 100 metros en la cuenca alta (en Jujuy y Salta).

El enfoque adoptado para crear un MDT que representara de manera acabada la topografía del terreno, fue utilizar los datos topográficos obtenidos del IGM de cada país completándolos donde fue necesario con los datos del Modelo Digital de la Superficie terrestre generado por la NASA. El modelo de elevación resultante posee una resolución de celda de 250 m.

En la Figura N° 6 se presenta el modelo digital del terreno en la cuenca Alta del río Pilcomayo obtenido en base al reprocesamiento del modelo de elevación de base y que evidencia que la cuenca presenta una diferencia de elevación muy pronunciada. Las características sobresalientes del relieve de la cuenca se evidencian por la presencia de la Puna al Oeste siguiendo hacia el Este con la Cordillera Oriental y las Sierras Subandinas.

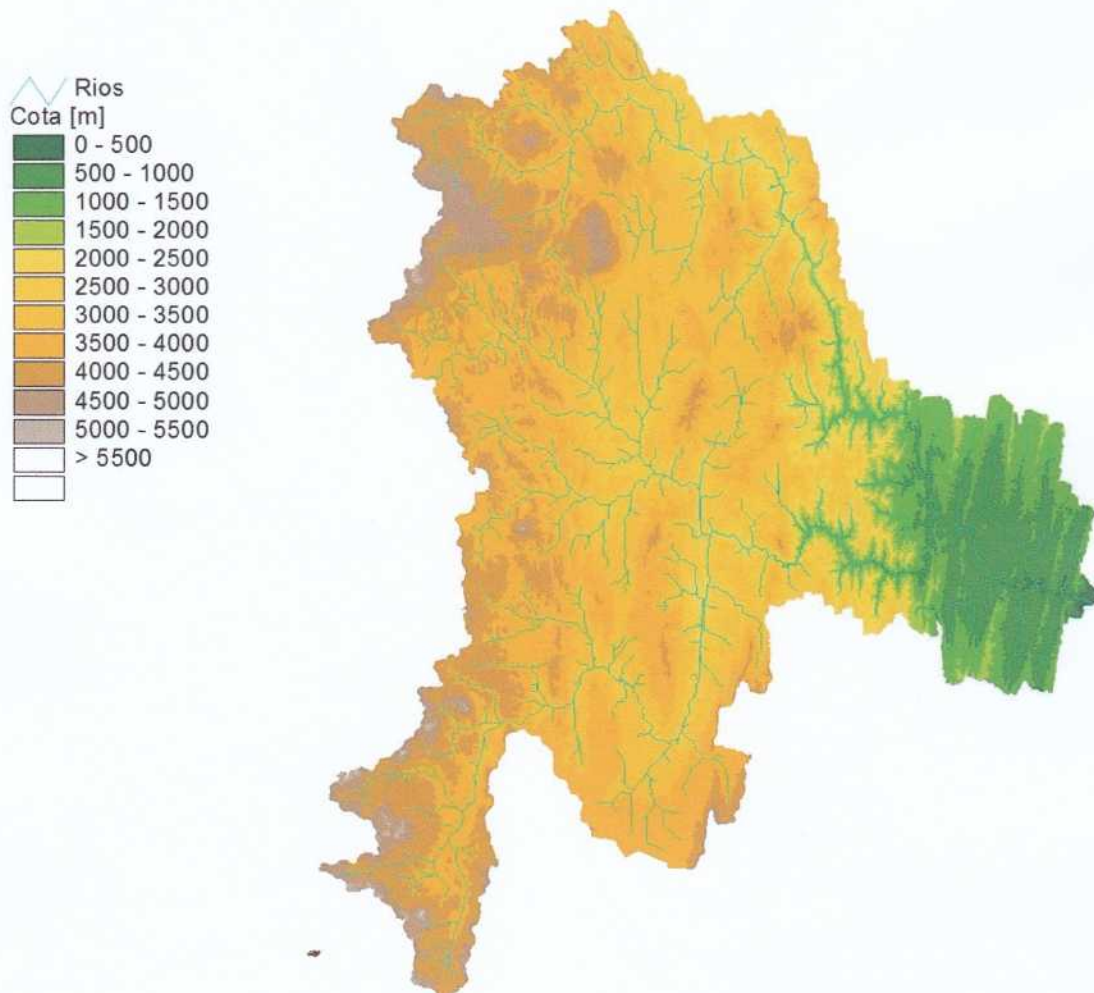


Figura N° 6: Modelo digital del terreno de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo

La Puna, el sector más oriental de la cuenca ocupa una pequeña franja de norte a sur de aproximadamente 20.800 km² con elevaciones que varían entre los 3500 m a 5000 m IGM. Siguiendo hacia el Este continua la cordillera Oriental con alturas comprendidas entre los 2000m y 3500m IGM con una superficie de 45431 Km² y las sierras Sub Andinas en donde se produce la transición entre el relieve de montaña y llanura con alturas que varían entre 2000 m y 400 m IGM.

La Cuenca Alta es una zona montañosa con pendientes abruptas y un relieve escarpado en toda la región que permite identificar numerosos cursos bien definidos, permanentes y semi-permanentes, como puede ser el caso de los valles correspondientes a los ríos Tumusla y San Juan del Oro que descargan en el río Pilcomayo.

El MDT de la Alta Cuenca es sustenta el desarrollo de aplicaciones temáticas a nivel regional y tiene un tamaño de celda de 250*250 m2 en acuerdo con el modelo de elevación de origen definiendo un nivel de detalle adecuado para la estimación de la producción de sedimentos.

A partir del modelo de elevación digital de la Alta Cuenca se realizó la división de la cuenca en 156 subcuencas de aporte. En la Figura N° 7 se presentan las mismas con la indicación de un número de orden que las caracteriza y en la Tabla N° 7 se muestran los parámetros geométricos (área y perímetro).

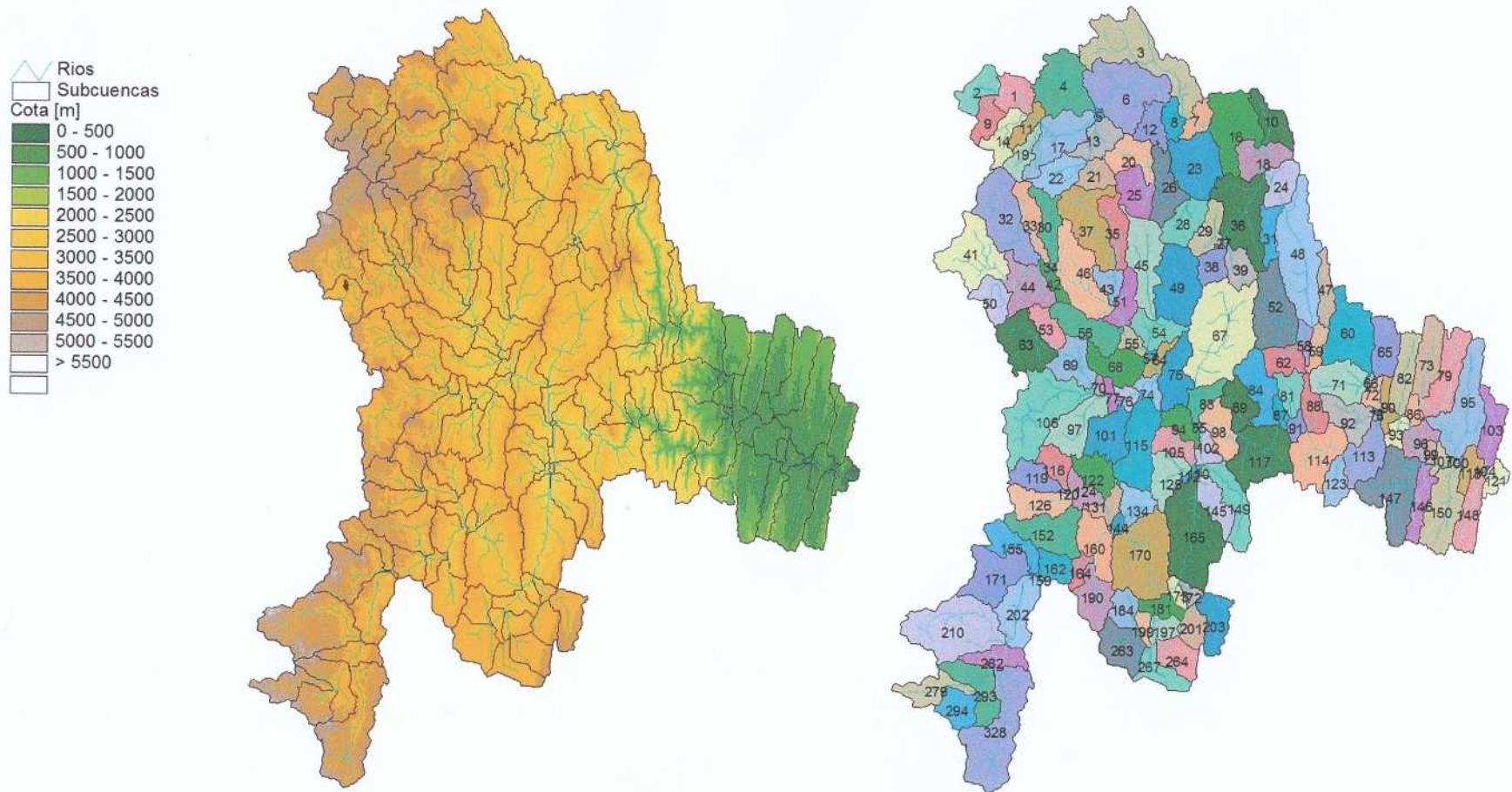


Figura N° 7: Subcuencas de aporte de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo

Tabla N° 7: Características de las subcuencas de aporte de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo

Subcuenca	Identificador	Área (m ²)	Perímetro (m)	Subcuenca	Identificador	Área (m ²)	Perímetro (m)
1	1	424918139	94959	79	83	303342205	103469
2	2	411850592	99340	80	84	661814682	153098
3	3	1627092165	292795	81	85	6891156	10446
4	4	991227239	160542	82	86	137095659	59523
5	5	28803298.6	24956	83	87	116401304	54989
6	6	1432926231	194616	84	88	352028238	96554
7	7	263508956	87898	85	89	441985248	110141
8	8	248410646	81625	86	90	203872179	94451
9	9	335451733	97761	87	91	139150869	53070
10	10	450721437	121058	88	92	555294492	120275
11	11	241694092	90198	89	93	181098607	67777
12	12	369899214	115096	90	94	319512874	95524
13	13	454198018	115212	91	95	1213194745	211734
14	14	423828620	126846	92	96	340726700	91835
15	16	1019036884	176667	93	97	711513469	142124
16	17	851092608	166907	94	98	502895642	112230
17	18	524894146	112978	95	99	77530178.6	40315
18	19	314535857	107450	96	100	17197506.6	23141
19	20	511281720	125775	97	101	644134525	138747
20	21	321656766	79963	98	102	223170485	78181
21	22	504398162	111209	99	103	497769513	134255
22	23	957351548	145642	100	104	7791273.29	13891
23	24	440501946	93264	101	105	351554594	100883
24	25	523854101	108960	102	106	1555076612	230859
25	26	601762984	149707	103	107	142703413	64313
26	27	12381785.7	16160	104	110	16533802.7	19856
27	28	516426971	105504	105	112	43702232.2	41333
28	29	406391446	101599	106	113	636538932	132888
29	30	450913156	135359	107	114	863960056	146187
30	31	313053392	109820	108	115	965234710	169431
31	32	1183735694	185101	109	116	328668151	91674
32	33	430125586	138795	110	117	1039012947	154661
33	34	8005137.4	12359	111	118	251931867	83883
34	35	459030384	124592	112	119	414361506	107068
35	36	1195409414	209838	113	120	5256438.86	9948
36	37	1006899252	186995	114	121	218059980	96571
37	38	324293695	82928	115	122	434367771	119439
38	39	352992760	91405	116	123	333546945	85263
39	41	1082308242	173645	117	124	282108835	91504
40	42	177946632	79036	118	125	519399713	116642
41	43	261391342	84211	119	126	539113357	120632
42	44	696305407	150624	120	131	261491142	105277
43	45	925883069	196676	121	134	375459413	101845
44	46	1067487594	178392	122	144	75994744.9	42098
45	47	340048084	115728	123	145	425570145	109488
46	48	1564415653	225025	124	146	404184120	132604
47	49	1062214278	155639	125	147	1181428785	209220
48	50	416425355	107842	126	148	512043601	123874
49	51	379170302	112286	127	149	659165030	160336
50	52	1020687481	156397	128	150	909752439	153296
51	53	329725459	90185	129	152	824085355	160862
52	54	462388719	116166	130	155	453639315	134970
53	55	172614786	64569	131	159	12726110.4	23058
54	56	674853108	141279	132	160	613056312	125800
55	57	36788858.8	26809	133	162	330936591	84964
56	58	162105709	70602	134	164	171449068	72034
57	59	216267535	80391	135	165	1543967906	197780
58	60	1025085094	170178	136	170	1497799730	181037
59	62	382904050	92663	137	171	897161748	165811
60	63	817151199	146992	138	172	115259916	57606
61	64	183522899	87307	139	173	134761847	57225
62	65	518823100	112562	140	181	265087883	86857
63	66	34902862.8	26785	141	184	327739890	79551
64	67	2027084174	229572	142	190	582971053	129748
65	68	581398059	125887	143	197	239747246	74132
66	69	552597903	120551	144	199	129834056	59371
67	70	71164400.3	38742	145	201	313658461	76407
68	71	666377579	115508	146	202	743681376	134313
69	72	152475273	62068	147	203	513523352	112365
70	73	619192517	139730	148	210	1623885082	190115
71	74	199700866	72762	149	262	400830344	121585
72	75	637566660	138610	150	263	627577666	112317
73	76	149532381	57675	151	264	452446211	92478
74	77	119013008	64326	152	267	412835407	117240
75	78	22312715.8	21734	153	279	474820267	149064
76	79	777741940	169977	154	293	645078387	149840
77	81	333639652	92110	155	294	434505512	96742
78	82	560329515	131692	156	328	1619495261	237980

A partir de las isohietas medias anuales de base se realizó su interpolación con el objeto de determinar la distribución espacial en el área de estudio de la Alta Cuenca. En la Figura N° 8 se muestra el resultado de dicho procesamiento, indicando una variación gradual de las precipitaciones medias anuales en el período analizado de 1970-2005 en el rango de 200 a 1200 mm.

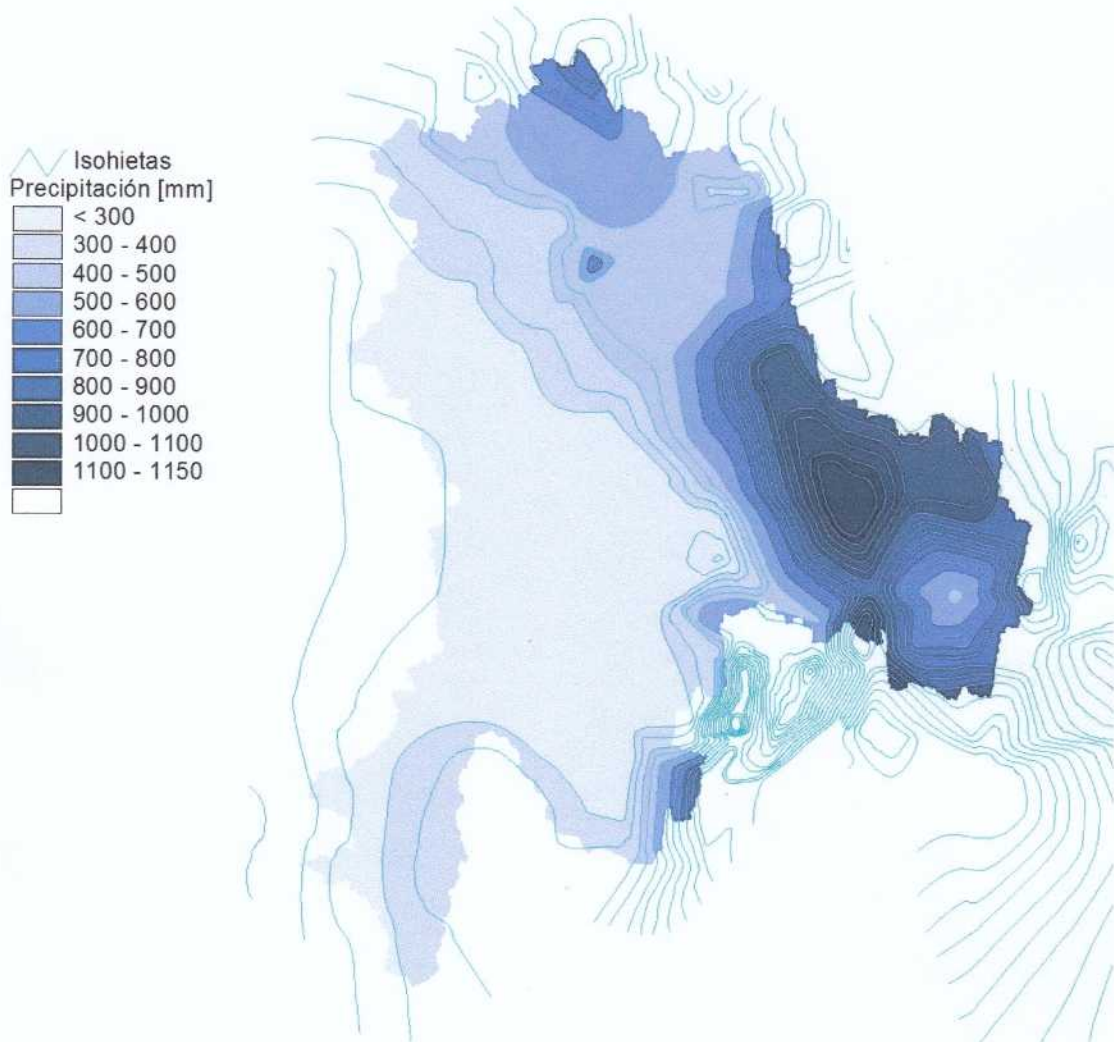


Figura N° 8: Distribución espacial de la precipitación media anual en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo

Con una metodología similar se procesaron las isotermas medias anuales, obteniéndose la distribución de temperaturas medias anuales en el período 1970-2005. La Figura N° 9 evidencia los aspectos antes señalados indicando un gradiente del orden de los 20°C entre los extremos occidental y oriental de la cuenca.

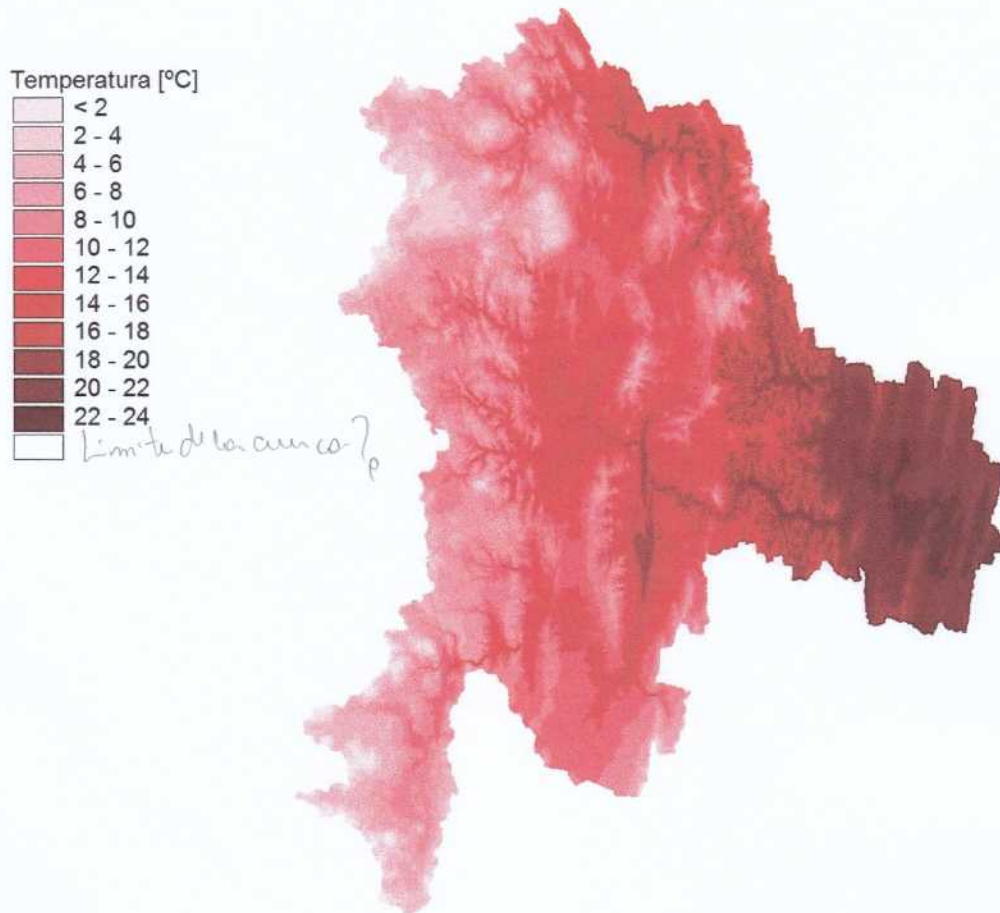


Figura N° 9: Distribución espacial de la temperatura media anual en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo

En las Figuras N° 10 a 15 se presenta el reprocesamiento de los mapas de base para la Cuenca Alta del Río Pilcomayo señalando las características principales de la distribución espacial de unidades geológicas, geomorfológicas y hidrogeológicas, así como, tipos de suelo, uso del suelo y vegetación. En cada uno de ellos se anexan las correspondientes referencias.

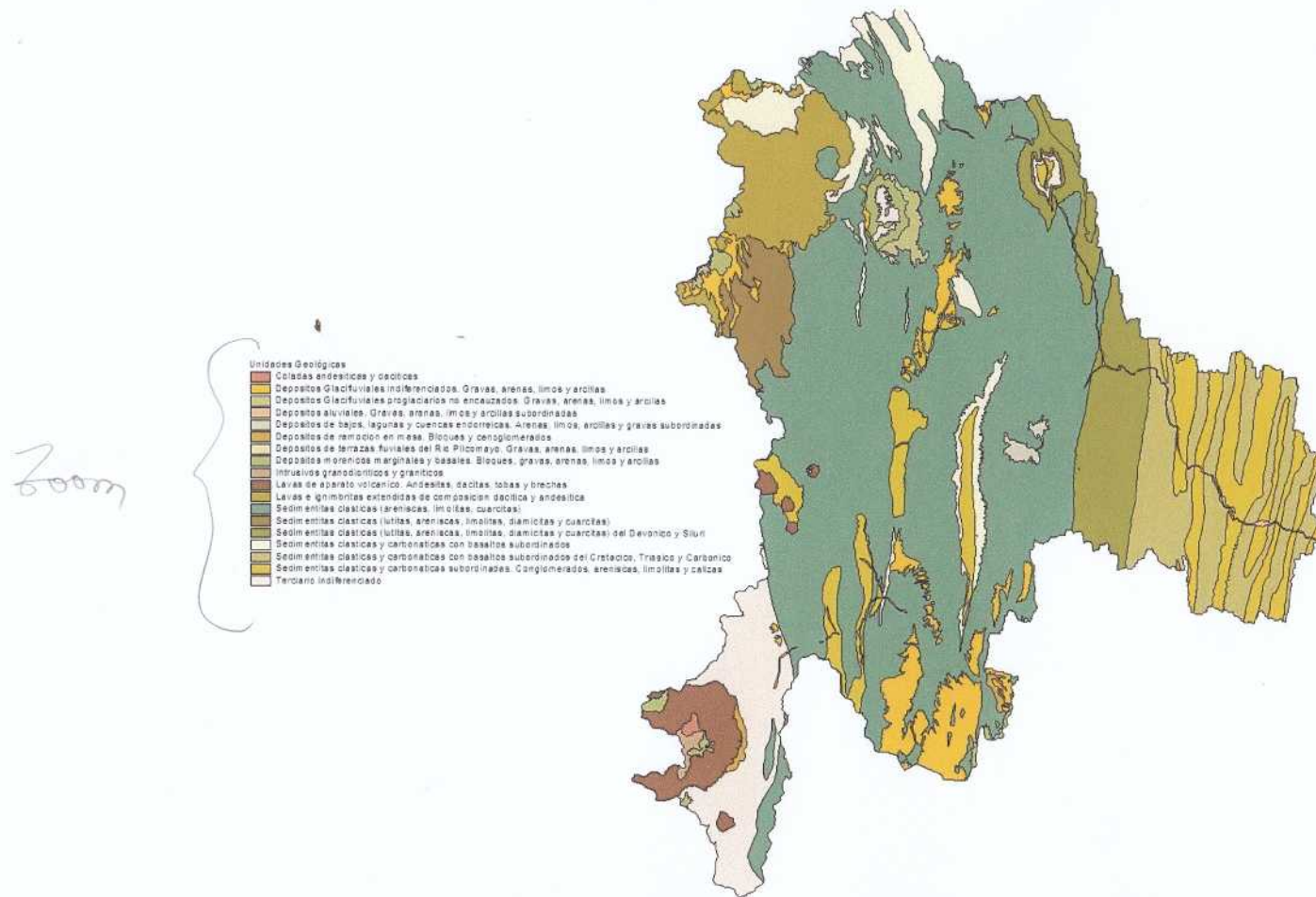


Figura Nº 10: Distribución espacial de unidades geológicas en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo

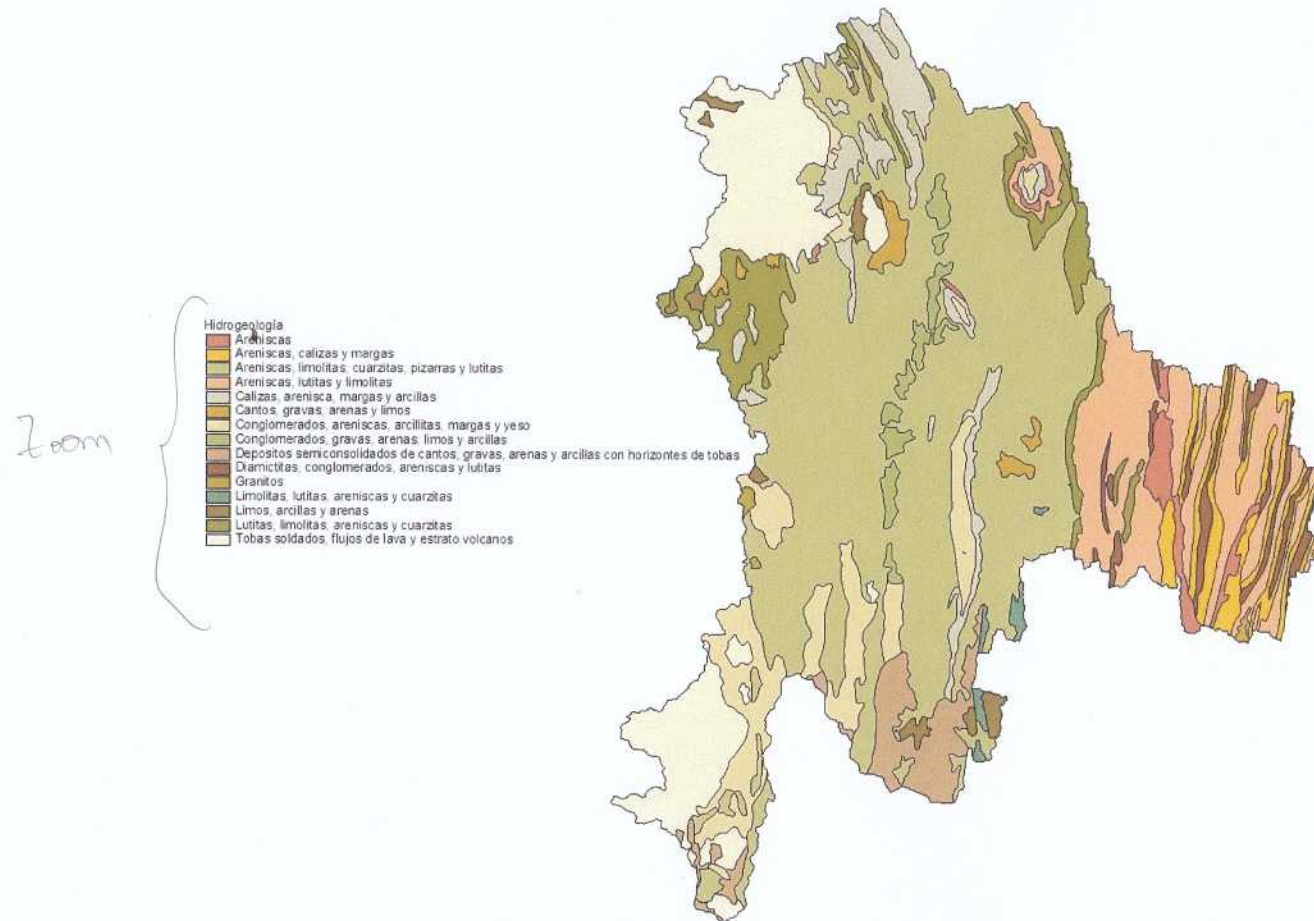


Figura N° 12: Distribución espacial de unidades hidrogeológicas en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo

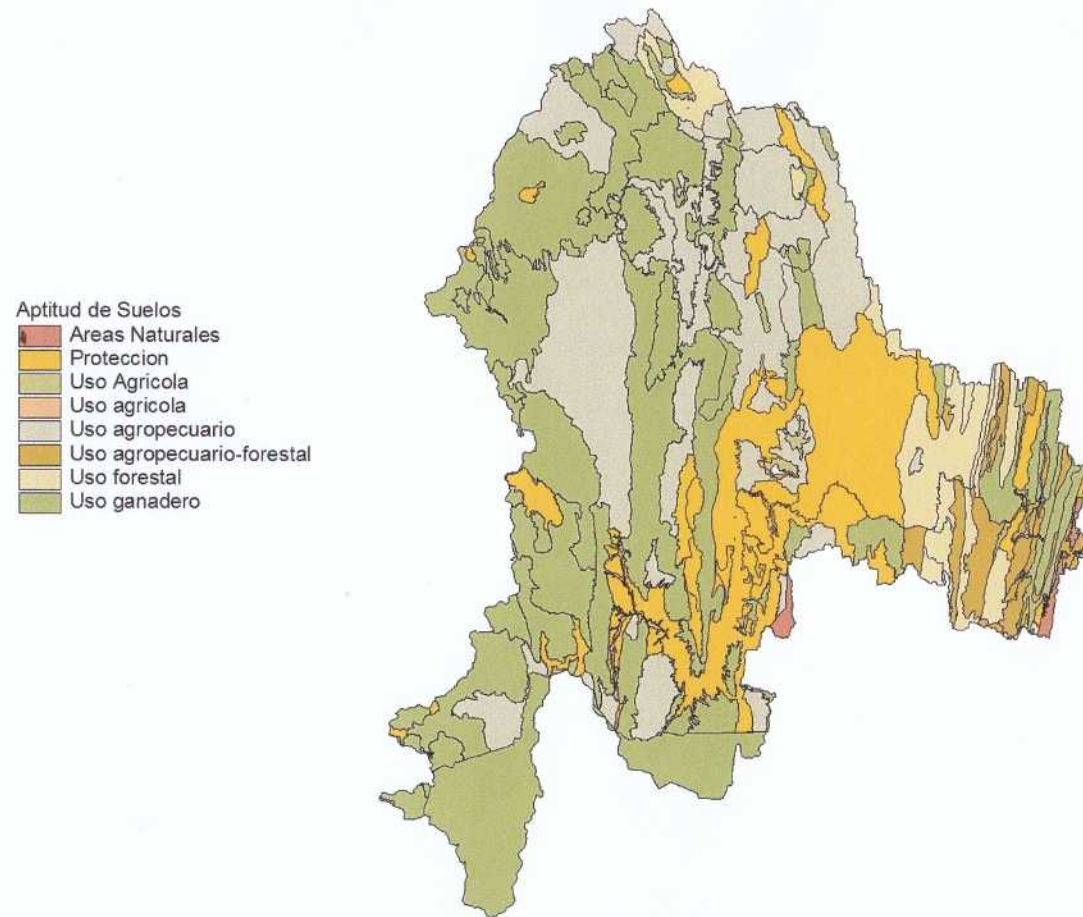


Figura N° 13: Distribución espacial de aptitud de suelos en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo

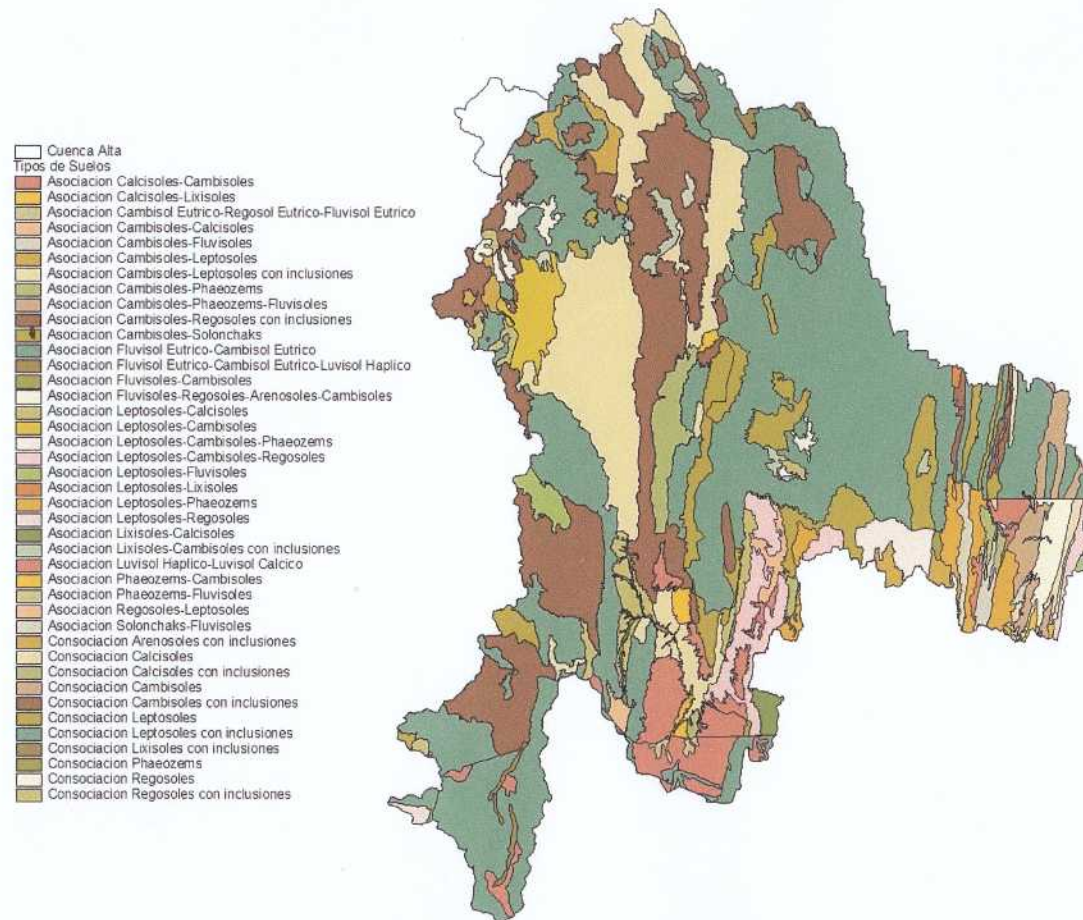


Figura N° 14: Distribución espacial de tipos de suelos en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo

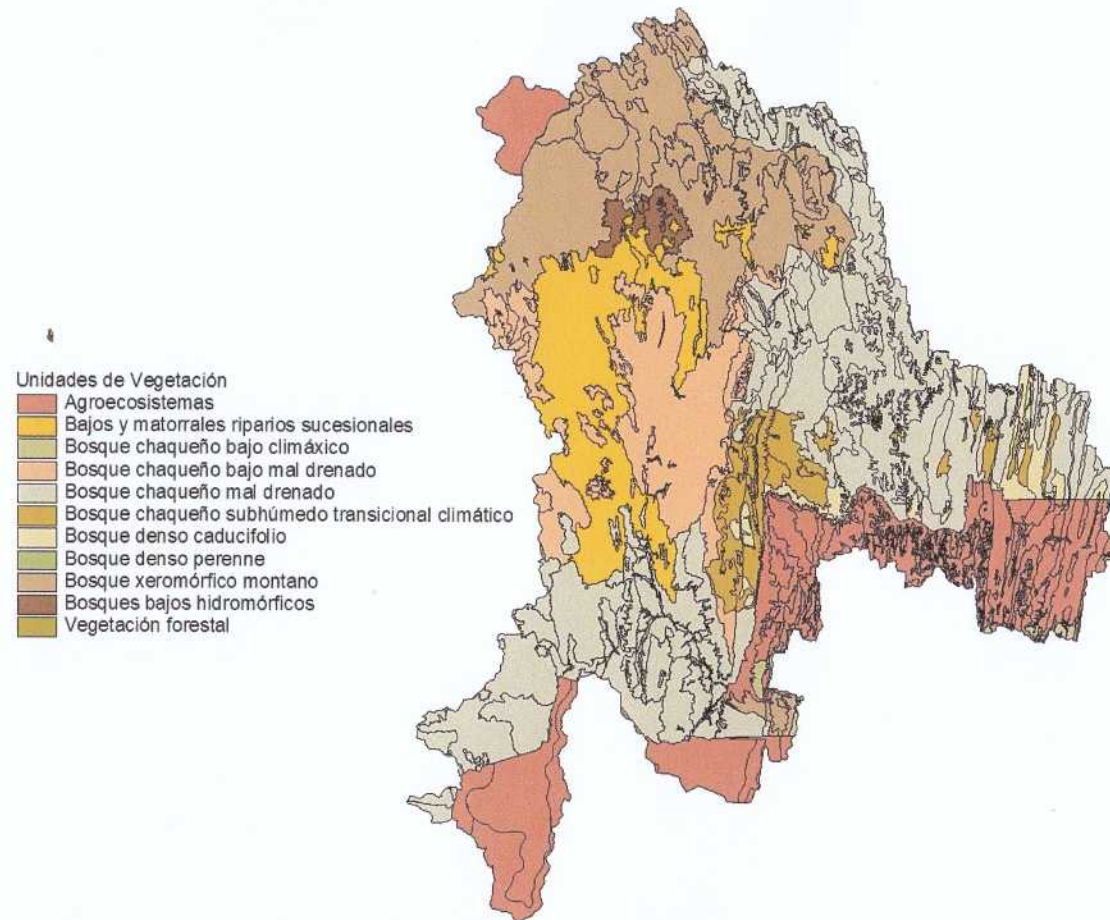


Figura Nº 15: Distribución espacial de unidades de vegetación en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo

4.2 PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

Como ya fue expresado, se aplicó el método de Gavrilovic que permite estimar la producción de sedimentos en cuencas de montaña, utilizando un GIS que trabaja con formato raster como herramienta de cálculo y procesamiento.

Los parámetros W y R inherentes al método se calcularon separadamente de acuerdo a la metodología que se describe a continuación.

4.2.1 Determinación del parámetro W

Los valores de producción media anual de sedimento por erosión superficial (W) pueden ser obtenidos de dos maneras: operando a nivel de celda u operando a nivel de subcuenca, caso en el que se consideran los valores medios pueden obtenerse de dos maneras:

Si bien los valores de los coeficientes y de las variables actuantes han sido desarrollados y probados en base a estudios sobre cuencas, su aplicación a cada celda es válida, permitiendo una mayor precisión por poder asignarle a cada una un valor representativo de las variables intervinientes, enfoque que fue adoptado en esta aplicación. Cabe aclarar que estos valores se refieren a características físicas locales, y no a parámetros vinculados a la cuenca toda.

Así, para cada celda se calculó el término:

$$Wc/Fc = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \quad (\text{m}^3/\text{año km}^2)$$

donde:

Wc = volumen promedio anual de sedimento erosionado ($\text{m}^3/\text{año}$) en la celda.

Fc = superficie de la celda (km^2)

Para poder llevar a cabo esta operación es necesario contar con imágenes raster de cada una de las variables que intervienen en el cálculo.

La correspondiente al parámetro "T", que es función de la temperatura media anual (t), de acuerdo a la relación potencial:

$$T = [(t / 10) + 0.1]^{1/2}$$

se calculó directamente operando mediante módulos del programa ArGis a partir del mapa de temperaturas medias anuales. Los resultados obtenidos expresan un rango de distribución del parámetro en el entorno de 0.5 a 1.5 que se asocian a los valores extremos de la temperatura. En la Figura N° 16 se muestra la distribución espacial de este parámetro en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo.

La zonificación del parámetro "h" (la precipitación media anual) surgió de la interpolación de las isohietas correspondientes a precipitaciones medias anuales en $\text{mm}/\text{año}$ que fueron presentadas como Figura N° 8..

El cálculo del coeficiente de erosión "Z" para cada celda de la cuadrícula en que se dividió la zona de estudio implica la evaluación de la expresión $Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + I)^{1/2}$ asignándose los valores de los coeficientes intervinientes X, Y y φ .

Como ya fue mencionado el coeficiente X parametriza las características del uso del suelo, Y representa la componente resistente del suelo a la acción erosiva y ϕ es coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados. La variable I representa la pendiente superficial del área.

Los valores recomendados por el autor de ϕ , X e Y respectivamente fueron presentados en las Tablas N° 1, 2 y 3, en dependencia de características locales. Para la determinación de los mismos en la aplicación del método a la Alta Cuenca del Río Pilcomayo se utilizaron los planos de vegetación, tipos y uso de suelo y de características geológicas y geomorfológicas ya presentados

La cuantificación el coeficiente "X" implicó la superposición de las áreas identificadas en el mapa de uso de suelos con las unidades de vegetación, asignando a cada tipo de unidad del plano resultante un valor del factor como se indica en la Tabla N° 8.

Para la determinación del coeficiente "Y" fue utilizado como base el mapa de unidades geológicas, definiendo valores de resistencia a la erosión entre 0,5 y 2 para cada identificador. Los valores se presentan en la Tabla N° 9.

Simultáneamente, y a modo de verificación, se controló que la variación del coeficiente se corresponda con las zonas identificadas en el mapa de unidades geomorfológicas en atención a las zonas en las que se distinguen diversos procesos erosivos.

Para determinar los valores del coeficiente " ϕ ", se utilizaron especialmente los mapas de tipo de suelo y vegetación, que son los que permiten definir de mejor manera la importancia de los procesos erosivos observados. Este parámetro es el menos sensible en la determinación de la producción de sedimentos (Cadore, Peviani, Baldi, 1994).

En la Figura N° 17 se presenta el plano con los valores de "X" adoptados en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo. La Figura N° 18 muestra la distribución espacial del parámetro "Y" en la misma región.

El mapa de distribución de pendiente superficial se obtuvo mediante el procesamiento del MDT y su distribución se presenta en la Figura N° 19. Esta figura resalta el hecho que las mayores declividades se producen en el área de las Sierras Subandinas donde alcanza valores del orden de 100%.

Dadas las distribuciones espaciales de los parámetros "X", "Y", " ϕ " e "I", puede calcularse para cada celda el valor de "Z". En la Figura N° 20 se presenta la distribución en planta del parámetro "Z" en la cuenca estudiada.

La operación de los mapas obtenidos para los parámetros "T", "h" y "Z", permiten calcular el valor Wc/Fc para cada celda. Estos resultados se presentan en la Figura N° 21.

Tabla N° 8: Asignación del coeficiente X

Descripción	Coeficiente X
Agroecosistemas	0.63
Bosque Chaqueño Bajo Climáxico	0.65
Bosque Chaqueño Bajo Mal Drenado	0.6
Bosque Chaqueño Mal Drenado	0.55
Bosque Chaqueño Subhúmedo Transicional Climático	0.51
Bosque Denso Caducifolio	0.47
Bosque Denso Perenne	0.42
Bosque Chaqueño Freatófilo De Algarrobo	0.23
Bosque Ralo Caducifolio	0.24
Bosque Ralo Perenne	0.28
Bosque Chaqueño Ripario Inundable	0.5
Bosque Xeromórfico Montano	0.8
Bosques Bajos Hidromórficos	0.75
Bosques Y Matorrales Riparios Sucesionales	0.7
Herbácea Baja	0.29
Herbácea Intermedia	0.26
Matorral Caducifolio	0.4
Matorral Enano	0.27
Matorral Halófito Inundable Con Palma Y Prosopis	0.25
Matorral Perenne	0.35
Matorral Secundario Abierto Con Prosopis	0.2
Matorral Secundario Anegable Con Vinal	0.3
Matorral Xerofítico En Paleocauces	0.17
Matorral Xeromórfico	0.15
Sabana Densa Inundable De Palma	0.05
Sabana Abierta Inundable De Palma	0.1
Sabanas Y Pajonales Chaqueños Inundables	0.12
Urbana	0.6
Vegetación Chaqueña Acuática Y Palustre	0.34
Vegetación Acuática Y Palustre	0.36
Vegetación Forestal	0.45

Tabla N° 9: Asignación del coeficiente Y

Nombre	Descripción	Coeficiente Y
Agua		1.95
D	Sedimentitas clásticas (lutitas, areniscas, limolitas, diamicitas y cuarcitas)	1.05
D-S	Sedimentitas clásticas (lutitas, areniscas, limolitas, diamicitas y cuarcitas) del Devónico y Siluri	1.2
K	Sedimentitas clásticas y carbonáticas con basaltos subordinados	0.8
K-Tr-C	Sedimentitas clásticas y carbonáticas con basaltos subordinados del Cretácico, Triásico y Carbónico	1.3
O	Sedimentitas clásticas (areniscas, limolitas, cuarcitas)	1
Qb	Depósitos de cono aluvial y bajada. Gravas, arenas, limos y arcillas	1.4
Qci	Depósitos del cono aluvial del Río Itiyuro. Arenas, limos y arcillas	1.42
Qcp	Depósitos de la sección proximal del conoide regional del Río Pilcomayo. Arenas, limos y arcillas	1.65
Qcpi	Depósitos de la sección distal del conoide regional de los Ríos Pilcomayo y Bermejo. Limos y arcilla	1.75
Qcpm	Depósitos de megapaleocauces de desarrollo regional de los Ríos Pilcomayo y Bermejo. Limos y arcilla	1.55
Qcpr	Depósitos del paleocauce reciente del Río Pilcomayo. Arenas, limos y arcillas	1.7
Qcps	Depósitos del nivel superior del conoide regional compuesto de los Ríos Pilcomayo y Bermejo. Arcilla	1.5
Qcpt	Depósitos de megapaleocauce del Río Bermejo asociado con subcono aluvial. Arenas, limos y arcillas	1.6
Qgf	Depósitos Glacifluviales indiferenciados. Gravas, arenas, limos y arcillas	0.7
Qgfm	Depósitos Glacifluviales proglaciarios no encauzados. Gravas, arenas, limos y arcillas	0.6
Ql	Depósitos de bajos, lagunas y cuencas endorreicas. Arenas, limos, arcillas y gravas subordinadas	1.25
Qm	Depósitos morénicos marginales y basales. Bloques, gravas, arenas, limos y arcillas	0.5
Qpa	Depósitos aluviales. Gravas, arenas, limos y arcillas subordinadas	2
Qpl	Depósitos de albardón marginal del Río Pilcomayo. Arenas, limos y arcillas	1.9
Qr	Depósitos de remoción en masa. Bloques y cenoglomerados	0.45
Qrb	Depósitos del conoide aluvial del Río Bermejo. Arenas, limos y arcillas	1.45
Qtp	Depósitos de terrazas fluviales del Río Pilcomayo. Gravas, arenas, limos y arcillas	1.8
S	Sedimentitas clásticas (lutitas, areniscas, limolitas, diamicitas y cuarcitas)	0.9
T	Sedimentitas clásticas y carbonáticas subordinadas. Conglomerados, areniscas, limolitas y calizas	1.35
Ti	Terciario indiferenciado	0.55
Tve	Lavas e ignimbritas extendidas de composición dacítica y andesítica	0.25
Tvec	Lavas de aparato volcánico. Andesitas, dacitas, tobas y brechas	0.3
Tvel	Coladas andesíticas y dacíticas	0.35
Tvi	Intrusivos granodioríticos y graníticos	0.4

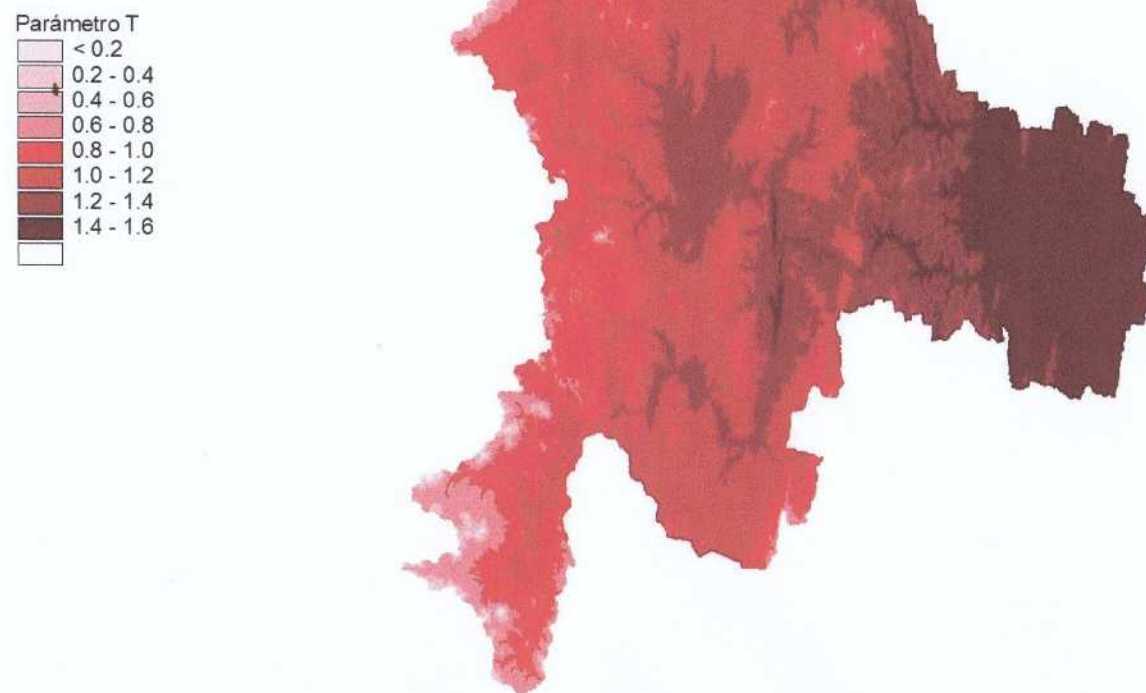


Figura N° 16 Distribución espacial del Parámetro T en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo

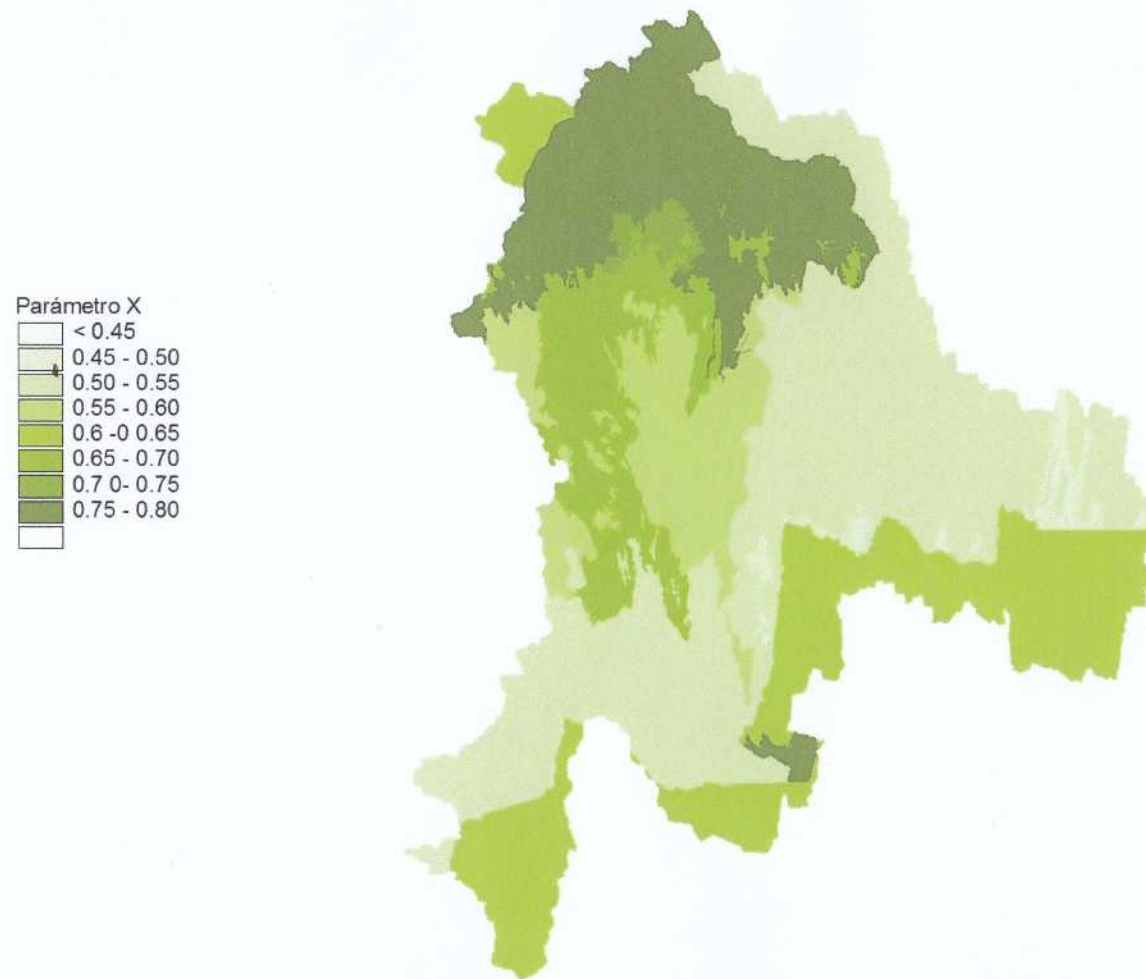


Figura N° 17 Distribución espacial del Parámetro X en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo

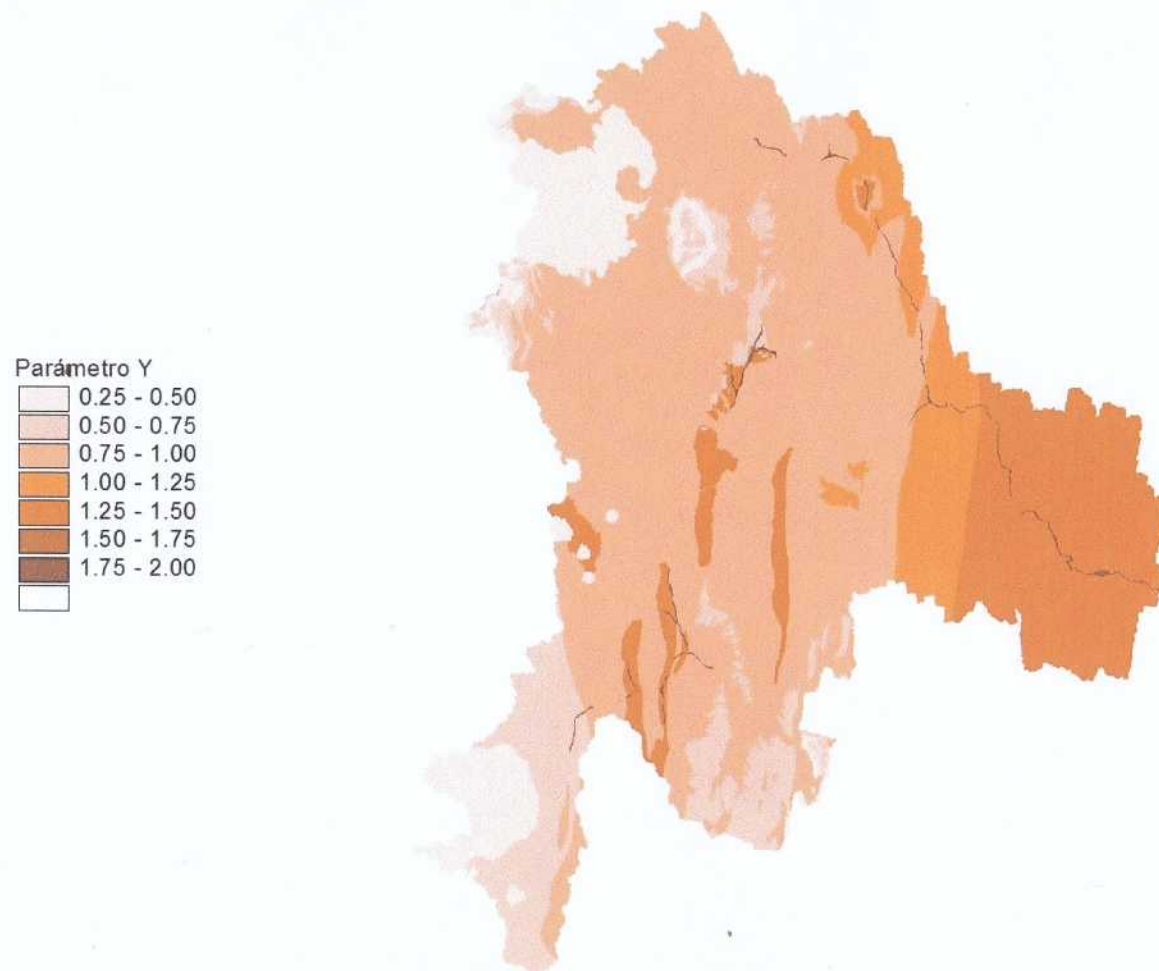


Figura N° 18 Distribución espacial del Parámetro Y en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo

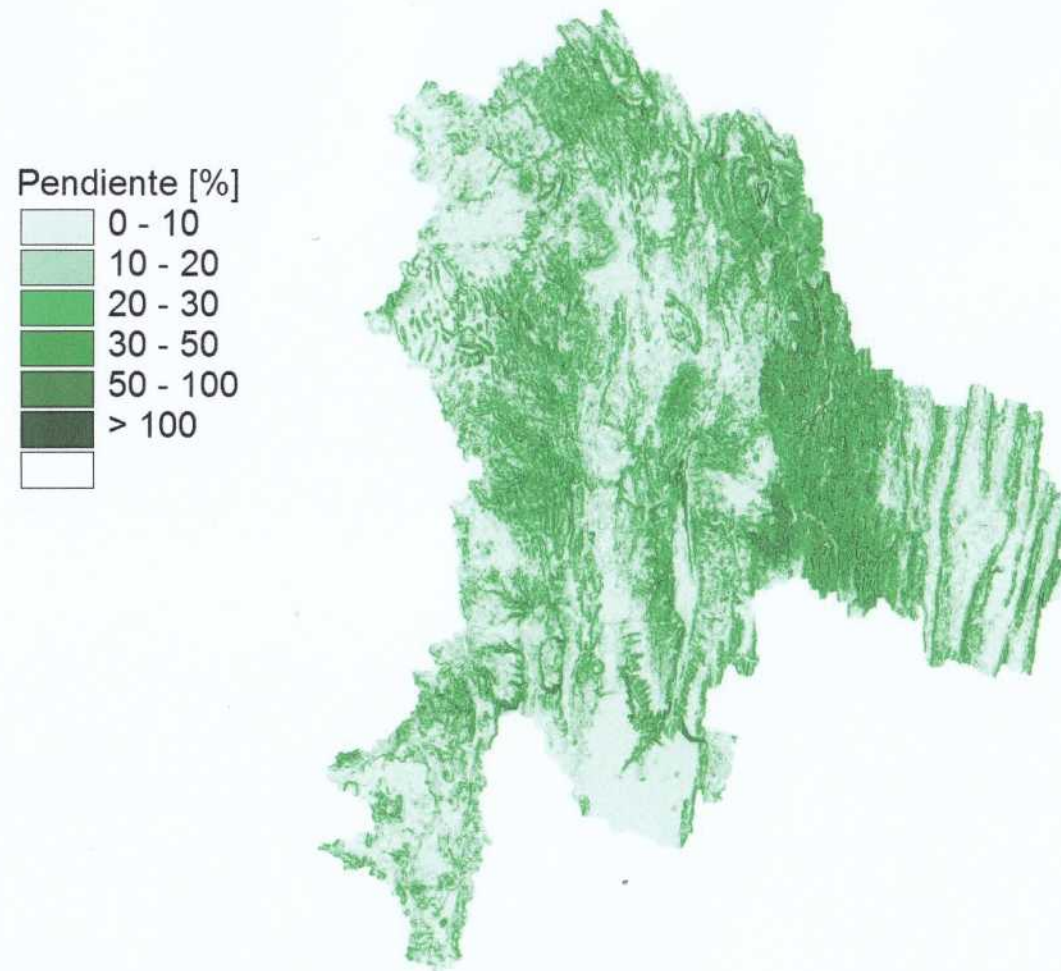


Figura N° 19 Distribución espacial de pendiente media superficial en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo

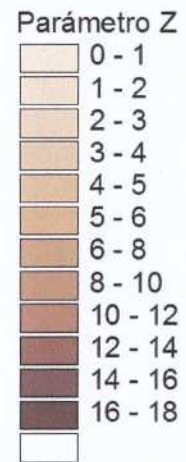


Figura N° 20 Distribución espacial del parámetro Z en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo

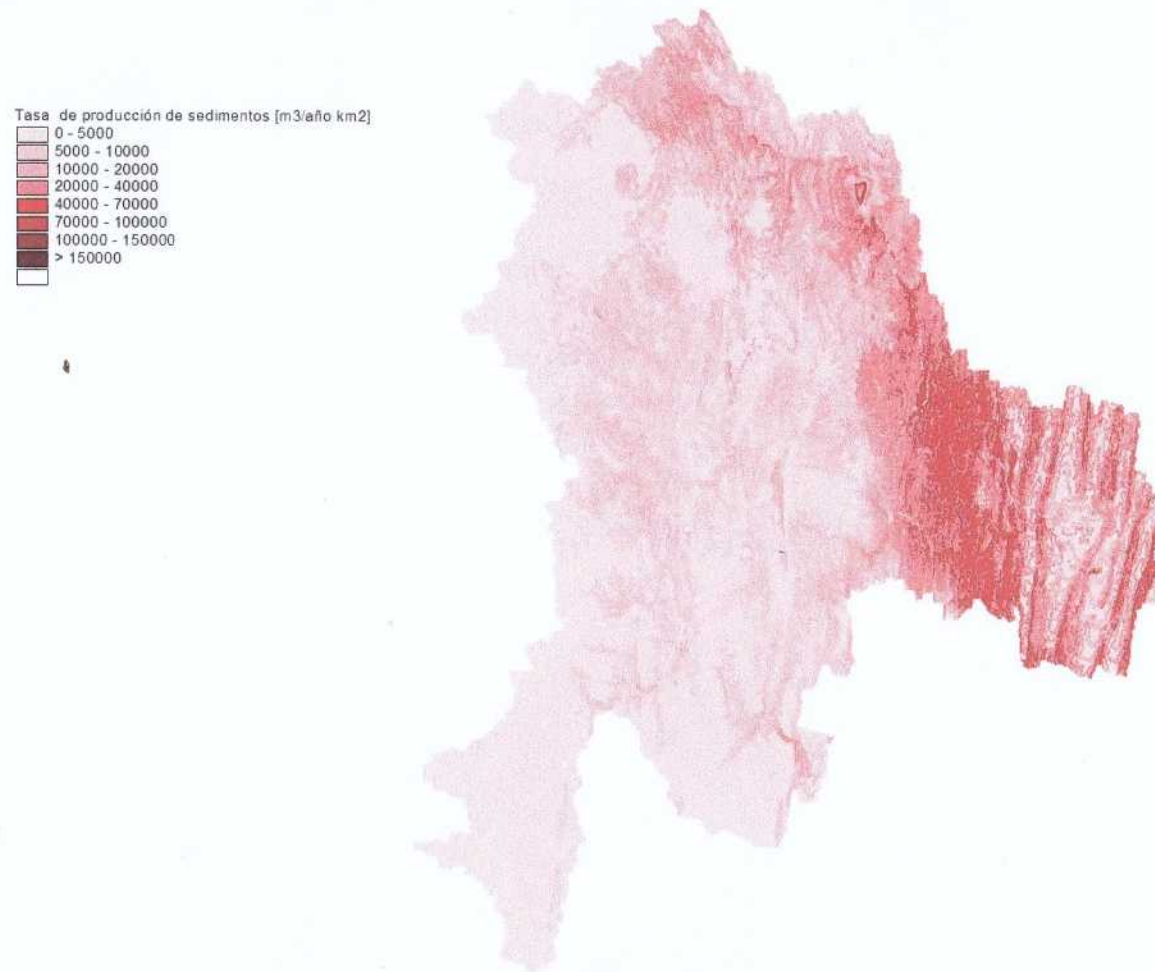


Figura N° 21 Distribución espacial de la tasa anual promedio de producción de sedimento por erosión (m³/año km²) en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo

Analizando la ecuación general:

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F \quad (\text{m}^3/\text{año})$$

correspondiente a una determinada subcuenca, y teniendo en cuenta la forma en que se llevó a cabo el cálculo, donde se trabajó con cada celda en forma individual, la ecuación puede reescribirse como:

$$W_c = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F_c \quad (\text{m}^3/\text{año})$$

y efectuando la suma de los valores correspondientes a las celdas de una subcuenca de aporte se tiene:

$$\sum W_c = \sum (T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F_c) \quad (\text{m}^3/\text{año})$$

Ya que la superficie de las celdas es una constante, la expresión anterior es equivalente a:

$$W = \sum W_c = F_c \sum (T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2}) \quad (\text{m}^3/\text{año})$$

con lo que el volumen promedio anual erosionado de sedimento ($\text{m}^3/\text{año}$) para la subcuenca puede calcularse sumando todos los valores de W_c/F_c de las celdas incluidas en la superficie de la misma, y multiplicando dicha sumatoria por la superficie de las celdas.

El término W_c/F_c indica la tasa anual promedio de producción de sedimento por erosión ($\text{m}^3/\text{año km}^2$), por lo que el mapa de su distribución en toda la cuenca estudiada, presentado en la Figura N° 21, es un claro indicador de las zonas más susceptibles de ser atacadas por erosión superficial.

4.2.2 Determinación del parámetro R

Obtenido el valor de la producción media anual de sedimento por erosión superficial W el interés reside en determinar para cada cuenca la cantidad de sedimento que es producida por la cuenca y que efectivamente llega a la sección final de la misma luego de la redepositación interna,

Para obtener este valor debe afectarse la producción media anual de sedimento de un coeficiente de retención (R) cuyo valor depende de parámetros que caracterizan a la cuenca como un todo, por lo que no se puede trabajar con las celdas como unidad de cálculo, pues habrá un único valor de "R" para la cuenca y por lo tanto todas las celdas incluidas en ella tendrán el mismo valor.

Como ya fue indicado, la ecuación del coeficiente de retención es:

$$R = [(O D)^{1/2} (L_c + L_i)] / [(L_c + 10) F]$$

donde:

O = perímetro de la cuenca (km)

D = diferencia de nivel media en la cuenca (km)

D = $D_m - D_c$

D_m = cota media de la cuenca

D_c = cota mínima de la cuenca

L_i = longitud total de los afluentes fluviales laterales (km)

L_c = longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal (km)

F = superficie de la cuenca (km^2)

Los valores de O , F , L_c y L_i se calcularon a partir del plano de subcuencas de aporte presentado en el parágrafo XX así como los correspondientes valores de cotas media y mínima.

Una vez definidas todas las variables, se procede al cálculo del coeficiente de retención para cada una de las subcuencas. Efectuado el producto de este coeficiente por la tasa de producción de sedimentos se obtiene el volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección final de la cuenca (G).

4.2.3 Análisis de resultados

4.2.3.1 Volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección final de la cuenca

En la Tabla N° 10 se presentan los valores calculados de volumen de sedimento producido G en $\text{m}^3/\text{año}$. La sumatoria de estos valores permite conocer la producción total de sedimentos por erosión superficial en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo. Así, el cálculo condujo a obtener un valor total de $G = 47344384 \text{ m}^3/\text{año}$ que equivale a $125462619 \text{ Ton/año}$.

Con el propósito de comparar el resultado obtenido con valores medidos de producción de sedimentos, en la Figura N° 22 se compara el valor obtenido por la metodología de Gavrilovich con los valores de transporte sólido medio anual en el período 1973/74-2004/2005 en la estación Villa Montes.

Los valores de transporte sólido anual fueron elaborados a partir de los valores de caudal sólido medio diario obtenidos a partir de aforos de sólidos en suspensión que tienen en cuenta la producción de sedimentos en la cuenca debida a todas las causas posibles de erosión, incluyendo fenómenos tales como deslizamientos. En contraste, el método de Gavrilovic estima la componente debida sólo a erosión superficial. Esto debe ser tenido en cuenta al juzgar la bondad del acuerdo ya que en la cuenca alta los fenómenos de remoción en masa tienen importancia.

El valor obtenido por la metodología implementada es del orden del promedio de los valores anuales registrados en la Estación Villamontes. En este período la estadística de los caudales sólidos indica que el valor promedio de transporte fue de 126 millones de toneladas por año (mediana de 114 millones de ton/año), mientras que los valores máximo y mínimo fueron de $295 \cdot 10^6 \text{ ton/año}$ y $30 \cdot 10^6 \text{ ton/año}$, respectivamente. En el cálculo de estos estadísticos sólo se consideran los valores registrados, pero si se adoptan los valores calculados en "Sedimentología de la Cuenca Alta del río Pilcomayo. Síntesis de los conocimientos hasta la fecha, datos disponibles y elaboración de los parámetros principales aguas arriba de Misión La Paz (Argentina), 2006", mediante el relleno de las series históricas el valor promedio asciende a 170 millones de ton/año, siendo el valor mediano de 144 millones de ton/año.

Tabla N° 10: Volumen de sedimentos producido por erosión superficial en la cuenca Alta del Río Pilcomayo

Subcuenca	Identificador	R	W [m3/año]	G [m3/año]	Subcuenca	Identificador	R	W [m3/año]	G [m3/año]
1	1	0.026	1322474.6	34964.749	79	83	0.039	1591494.8	62265.411
2	2	0.046	258458.77	12003.64	80	84	0.085	5344151	456212.54
3	3	0.034	18004528	614891.27	81	85	0.059	38229.434	2247.9947
4	4	0.043	7049242	305107.94	82	86	0.027	2039366.8	55956.214
5	5	0.054	469379.25	25284.068	83	87	0.069	1969257.6	136617.3
6	6	0.034	22068104	756105.89	84	88	0.221	11453936	2536108.9
7	7	0.068	2803004.3	190037.62	85	89	0.033	1221965.6	40388.539
8	8	0.046	4005668.5	183153.32	86	90	0.049	5418932	265692.84
9	9	0.069	246949.02	17129.713	87	91	0.093	3892986.5	361447.44
10	10	0.096	4622342.5	445166.28	88	92	0.093	19346212	1802238.4
11	11	0.079	366409.13	28927.908	89	93	0.061	4102688.5	248698.87
12	12	0.136	5178933.5	705381.82	90	94	0.148	1300133.8	192601.34
13	13	0.043	3295440.8	142509.81	91	95	0.033	21969400	732141.91
14	14	0.060	491901.44	29287.893	92	96	0.026	4468743	117126.47
15	16	0.042	12497144	523115.15	93	97	0.045	3926036	177946.35
16	17	0.039	1948073.5	75226.102	94	98	0.047	2458092.5	116287.34
17	18	0.076	10745313	813580.92	95	99	0.049	422844.88	20754.666
18	19	0.124	143420.09	17771.173	96	100	0.027	180487.34	4810.6663
19	20	0.076	3869190.5	295218.25	97	101	0.053	3199085.5	168647.63
20	21	0.071	1645378	117634.63	98	102	0.047	1224448.3	57054.567
21	22	0.096	839941.13	80332.766	99	103	0.069	10899424	750354.78
22	23	0.034	12717422	426408.93	100	104	0.026	183828.61	4721.2233
23	24	0.054	9004401	485417.5	101	105	0.104	1429439.8	148133.35
24	25	0.094	2035490.3	191187.77	102	106	0.036	6761404	242679.43
25	26	0.035	5656241	197314.05	103	107	0.016	2265707	36450.851
26	27	0.045	132312.41	5935.7616	104	110	0.045	44297.09	1997.1964
27	28	0.073	3534094.5	257632.55	105	112	0.052	171974.3	9011.031
28	29	0.109	3363656.3	366783.15	106	113	0.040	24382314	985992.38
29	30	0.057	1720175.4	97971.507	107	114	0.056	25375010	1413199.9
30	31	0.224	4936191.5	1107292.6	108	115	0.046	3537186	162090.4
31	32	0.030	2537341.5	75735.76	109	116	0.070	1069337.4	74799.886
32	33	0.048	1004396.8	48429.724	110	117	0.049	11251013	548241.67
33	34	0.061	66532.414	4068.5143	111	118	0.045	5329622.5	237892.32
34	35	0.079	1812747	143856.22	112	119	0.049	1443592.3	70028.214
35	36	0.056	17489450	971570.81	113	120	0.092	40525.805	3721.8557
36	37	0.025	6286608	155207.71	114	121	0.026	5532390.5	141914.11
37	38	0.104	1900896.6	197864.87	115	122	0.044	1970637.1	87051.293
38	39	0.065	2667019.3	173865.95	116	123	0.122	9570745	1164206.4
39	41	0.038	1651605.4	62887.143	117	124	0.034	1462704	49297.481
40	42	0.093	1193468.1	110972.15	118	125	0.093	2386410.8	222130.84
41	43	0.031	1673780	52501.379	119	126	0.062	1399360.4	87037.86
42	44	0.033	3150896	104424.51	120	131	0.051	1269098	64750.814
43	45	0.051	4729246.5	239302.66	121	134	0.072	669012.44	48165.293
44	46	0.038	7093209.5	272890.36	122	144	0.036	371917.84	13389.282
45	47	0.144	11070277	1590184.6	123	145	0.115	2331282.8	268875.25
46	48	0.037	40655896	1501908.9	124	146	0.116	7917318	926864.9
47	49	0.040	4854136.5	193344.09	125	147	0.061	31203066	1916685.1
48	50	0.036	858013.88	30835.207	126	148	0.055	11841235	656107.51
49	51	0.055	2019230	111282.2	127	149	0.059	4530464.5	267868.71
50	52	0.099	21892296	2176959.7	128	150	0.043	14652436	623179.37
51	53	0.115	1871980.1	214854.66	129	152	0.047	2744336.3	127661.62
52	54	0.046	2237528.8	101885.76	130	155	0.056	1027866.5	57670.736
53	55	0.025	888546.19	22631.842	131	159	0.055	66148.703	3628.1917
54	56	0.064	3854433.3	245176.6	132	160	0.043	2492281.5	107740.36
55	57	0.043	208124.41	8897.6131	133	162	0.026	1501487	38494.179
56	58	0.067	5465952.5	367810.59	134	164	0.053	855648	45658.091
57	59	0.076	8736164	664926.35	135	165	0.029	7196234.5	205801.52
58	60	0.033	39806280	1313711.7	136	170	0.030	4909817	149455.69
59	62	0.105	8639747	907182.61	137	171	0.053	1285146.1	68622.002
60	63	0.063	3693750	232199.11	138	172	0.037	885953.31	32429.959
61	64	0.079	1033684.5	81724.506	139	173	0.061	792025.69	48090.637
62	65	0.044	11410567	507535.72	140	181	0.062	854977.81	52988.42
63	66	0.027	983739.88	26534.244	141	184	0.033	257403.3	8375.5653
64	67	0.043	12419687	536764.21	142	190	0.053	1699974.1	89941.072
65	68	0.051	2434376.5	125097.48	143	197	0.045	389387.78	17555.136
66	69	0.042	3638113	153072.06	144	199	0.044	243258.09	10675.899
67	70	0.056	533970.44	30085.121	145	201	0.062	994824.94	62032.944
68	71	0.062	24956968	1547021	146	202	0.032	1622874.5	51418.384
69	72	0.024	4945336	119842.12	147	203	0.050	3345636	165954.82
70	73	0.036	11205630	402001.12	148	210	0.030	784034.44	23714.819
71	74	0.044	1188667.5	52355.587	149	262	0.078	625439.44	48882.873
72	75	0.056	3745906.8	208931.63	150	263	0.064	801968.19	51719.491
73	76	0.028	807078.88	22661.331	151	264	0.034	951889.25	32039.2
74	77	0.039	632534.94	24730.018	152	267	0.056	425184.66	23846.524
75	78	0.031	743677	22850.171	153	279	0.040	175356.38	7054.9695
76	79	0.030	13541661	404773.93	154	293	0.074	551984.06	41014.753
77	81	0.121	8440822	1021561.5	155	294	0.119	433818.75	51595.05
78	82	0.055	12518060	683843.37	156	328	0.037	3289193	120708.6

Por otro lado, si se consideran los aportes sólidos registrados en la estación Misión La Paz en el período 1993/94-2004/2005 se advierte que el valor promedio fue de 113 millones de toneladas anuales siendo la mediana de aproximadamente 93 millones de toneladas anuales. Estos valores decaen a 107 millones de toneladas y 89 millones de toneladas anuales si se considera el período total de registro que se extiende entre 1963/64 a 2004/2005 con una interrupción de 19 años entre 1975 y 1993.

Las diferencias entre valores medidos y calculados se deben al carácter empírico del método empleado, a la relativa incertidumbre en la asignación de los coeficientes y a la existencia de otras fuentes de producción, entre otras causas que se suman al alto grado de variabilidad que implica el análisis de producción y transporte de sedimentos en agua. En el mismo sentido, el parámetro "R" que representa la cantidad de sedimentos que se retiene o deposita en la cuenca, es el que presenta las mayores incertidumbres en su determinación, siendo más preciso efectuar el traslado del sedimento producido mediante un modelo de transporte que resuelva las ecuaciones que gobiernan el fenómeno.

La valoración cuantitativa precisa de la producción de sedimentos de una cuenca resulta pues imposible en la práctica, debido a la complejidad del proceso erosivo, a la cantidad de factores que influyen en el mismo y a la escala de los fenómenos en juego, que involucran desde cuestiones tan puntuales como la cohesión de las partículas del suelo, hasta parámetros de orden regional como la temperatura o las precipitaciones en la cuenca (Brea, J.D.; Spalletti P., 1997). No obstante, la metodología utilizada proporciona adecuados resultados para los fines perseguidos.

A partir de los valores de sólidos en suspensión medios diarios disponibles y los correspondientes caudales medios diarios, se procesó la información para obtener la relación que se muestra en la Figura N° 23 en la que se vincula los valores de Derrame anual (hm^3) con los de material sólido en suspensión anual. En la misma figura se indica el punto correspondiente al material sólido producido por erosión superficial y que llega a la sección del río donde se ubica la estación de aforo, calculado con la metodología descrita, considerándose los valores calculados de derrame medio en todos los años de aforo. Se elige el derrame ya que en el cálculo con el método de Gavrilovich las variables que tienen variación temporal se consideran con su valor medio anual, en particular los datos climáticos como la precipitación que se vincula directamente a los caudales líquidos.

En "Sedimentología en la Cuenca Alta del río Pilcomayo – Síntesis de los conocimientos y elaboración de los parámetros principales", se presentaron las tasas de erosión calculadas sobre los períodos de observaciones de caudal sólido disponibles, que se reproducen en la Tabla N° 11. La tasa de erosión global en Villamontes fue estimada en $2177 \text{ ton/km}^2/\text{año}$. Es interesante destacar que este valor es un 40% superior al valor estimado por la metodología de Gavrilovic de $1563 \text{ ton/km}^2/\text{año}$.

En dicho informe se señala que el análisis de las tasas de erosión muestra la variabilidad de una cuenca a otra y se remarca que "las tasas menores se encuentran en la cuenca del Pilaya (El Puente SJDO y Chilcara), más rocosa, y las tasas mayores en cabeza de la cuenca del Pilcomayo (Talula, Ñucchu, Viña Quemada), más árida" (Ver Figura N° 24) y en desacuerdo a lo esperado según el mapa de áreas sedimentógenas elaborado en ocasión de la Misión de Identificación y análisis para el Plan de manejo Integrada de la Cuenca del Río Pilcomayo (1997).

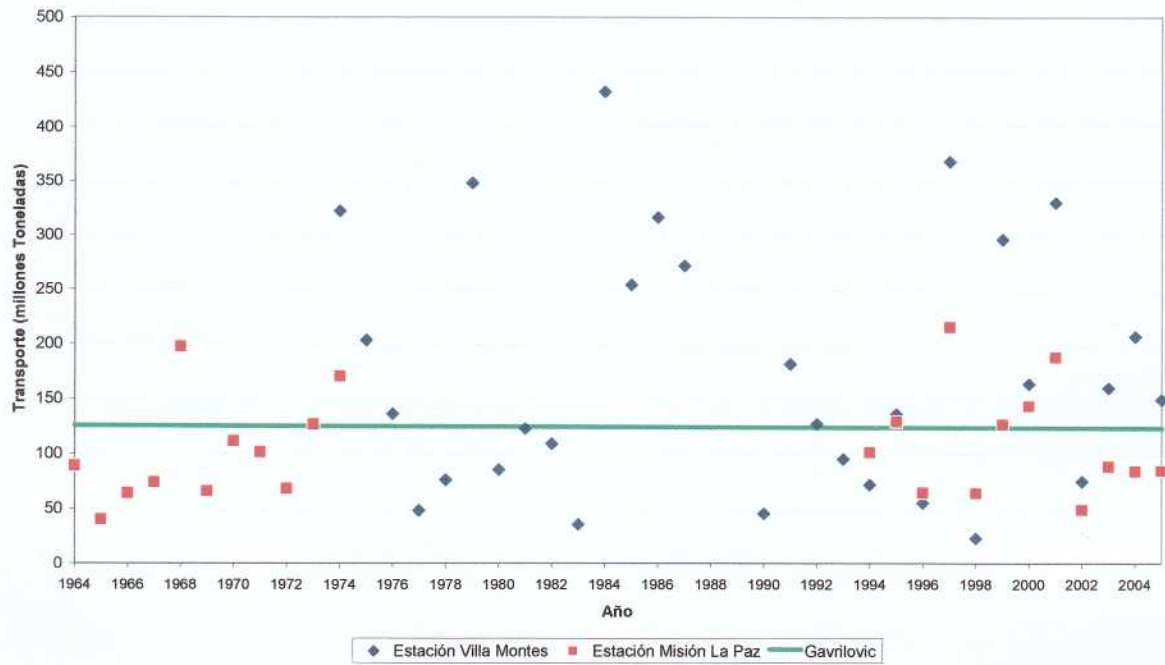


Figura N° 22: Transporte sólido anual del Río Pilcomayo

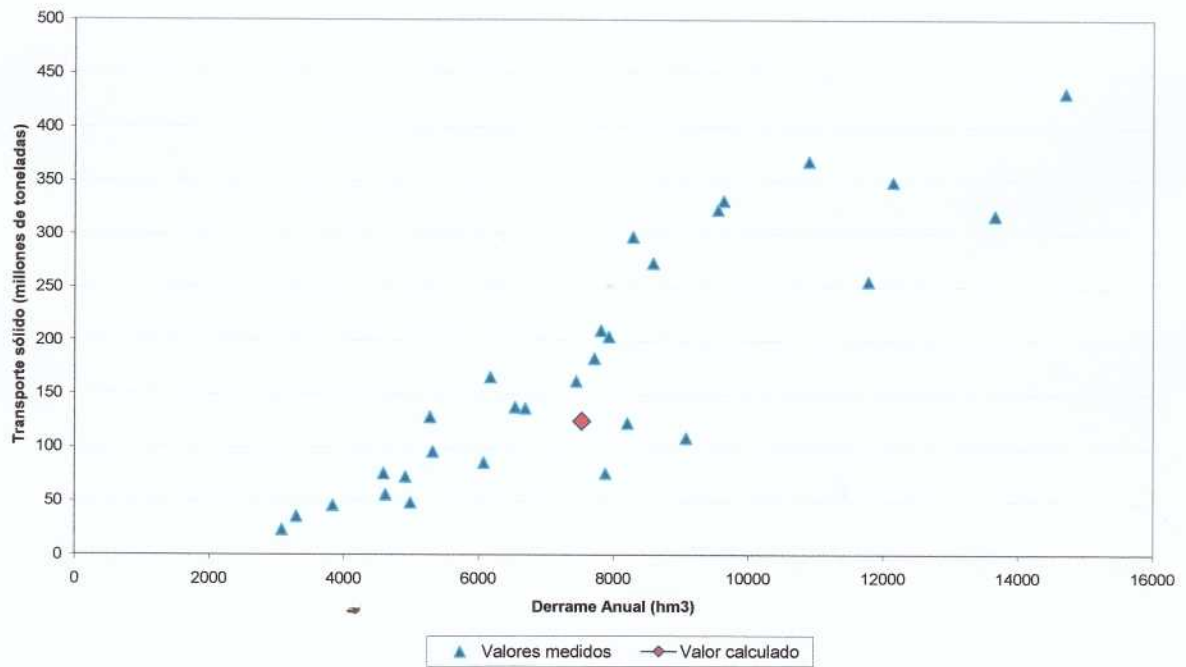


Figura N° 23: Comparación de valores medidos y calculado de Transporte sólido anual del Río Pilcomayo en la Estación Villa Montes en el Período 1973-2005

Estacion	Periodo de observación	Promedio interanual (millones de ton)	Promedio interanual (millones de m3)	Area cuenca (km2)	Tasa de erosión (Ton/km2/año)
Nucchu	73-85	1.58	0.60	1 608	984
Talula	64-67 72-98	13.39	5.05	6 493	2 062
Víña Quemada	78-98	69.78	26.33	13 449	5 188
Salto Leon	75-85	0.77	0.29	4 455	173
El Puente SJDO	74-82	6.92	2.61	19 707	351
Chilcara	75-85 91-93	27.57	10.40	43 880	628
San Josecito	76-87 90-92	49.12	18.53	48 130	1 021
Villamontes	73-87 89-05	175.69	66.30	80 711	2 177
Misión La Paz	63-75 93-05	106.42	40.16	89 595	1 188
Fortin Nuevo P.	52-67	71.17	26.86		

Tabla Nº 11: Tasas de erosión medio-anales para los periodos de observación (Fuente: Sedimentología de la Cuenca Alta del río Pilcomayo, 2006)

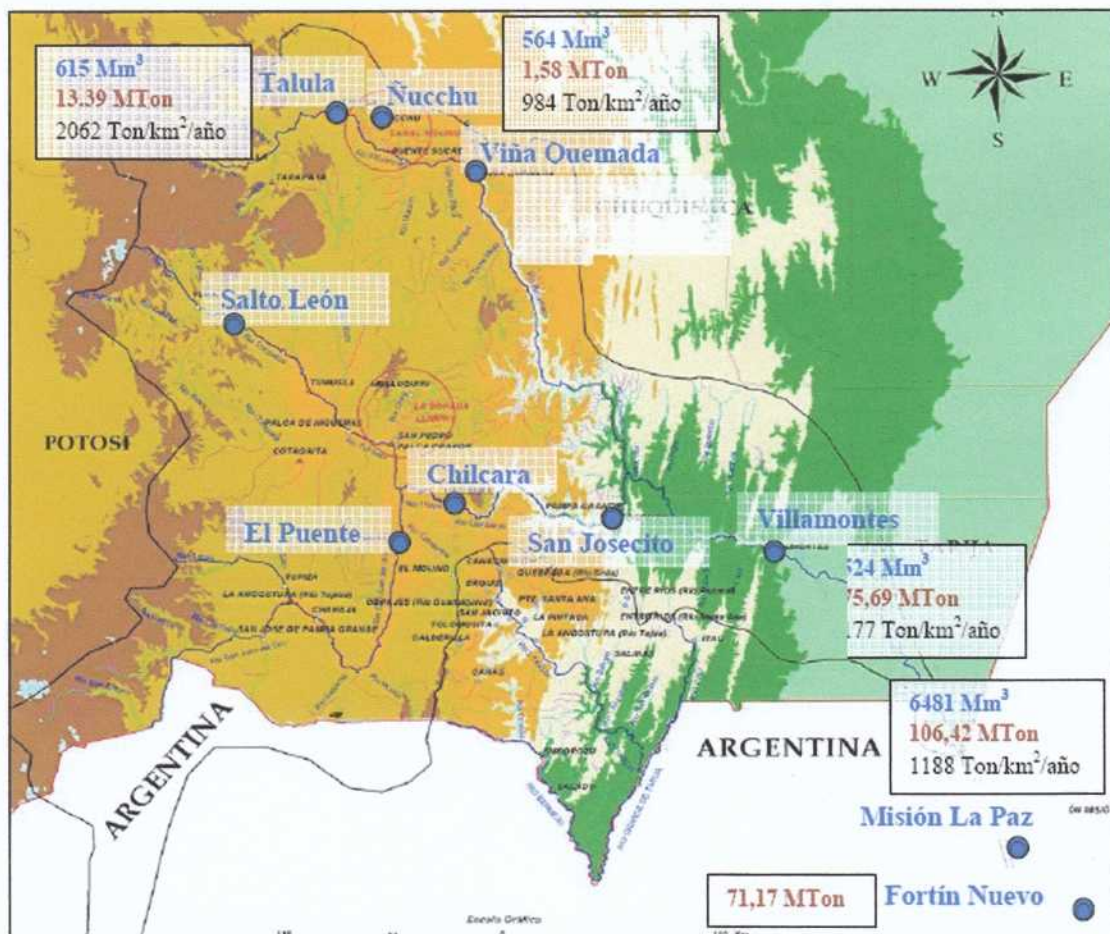


Figura Nº 24: Aportes interanuales líquidos, aportes interanuales sólidos y tasa de erosión interanual en la cuenca alta del Pilcomayo (Fuente: Sedimentología de la cuenca alta del río Pilcomayo, 2006)

En la Figura N° 25 se reproduce el mencionado mapa de áreas sedimentógenas y en la N° 26 se superpone a este mapa las isólinas de producción de sedimento superficial obtenidas por aplicación de la metodología de Gavrilovich. Esta última figura permite advertir que los valores mayores de producción de sedimentos se localizan en las áreas categorizadas como tipo 1, 3 y 4: Áreas con deslizamientos locales bajo bosque, Áreas con deslizamientos en zonas deforestadas y Áreas con deslizamiento y erosión hídrica difusa, surcos y cárcavas, respectivamente.

En estas zonas, cuyo desarrollo coincide en parte con la provincia geológica de las Sierras Subandinas y en parte con la Cordillera oriental, la tasa anual de producción de sedimentos alcanza en promedio valores del orden de $100000 \text{ m}^3/\text{km}^2$.

A partir de este eje central de la Alta Cuenca la producción de sedimentos disminuye aunque con ritmos diferentes hacia ambos lados: Hacia el Este, tasas del orden promedio de $20000\text{-}40000 \text{ m}^3/\text{km}^2$ se producen ocupando el área sedimentógena N° 2 (Áreas con deslizamientos locales y erosión hídrica difusa) y hacia el Oeste, los valores promedio son inferiores a los $10000 \text{ m}^3/\text{km}^2$ en una amplia región en la que predominan las áreas sedimentógenas tipificadas como 5, 9 y 10 (Área con erosión hídrica difusa y numerosas cárcavas, Área con erosión hídrica difusa y en surcos con pocas cárcavas y Área con escasa erosión hídrica y flujos y derrumbes en los taludes, respectivamente).

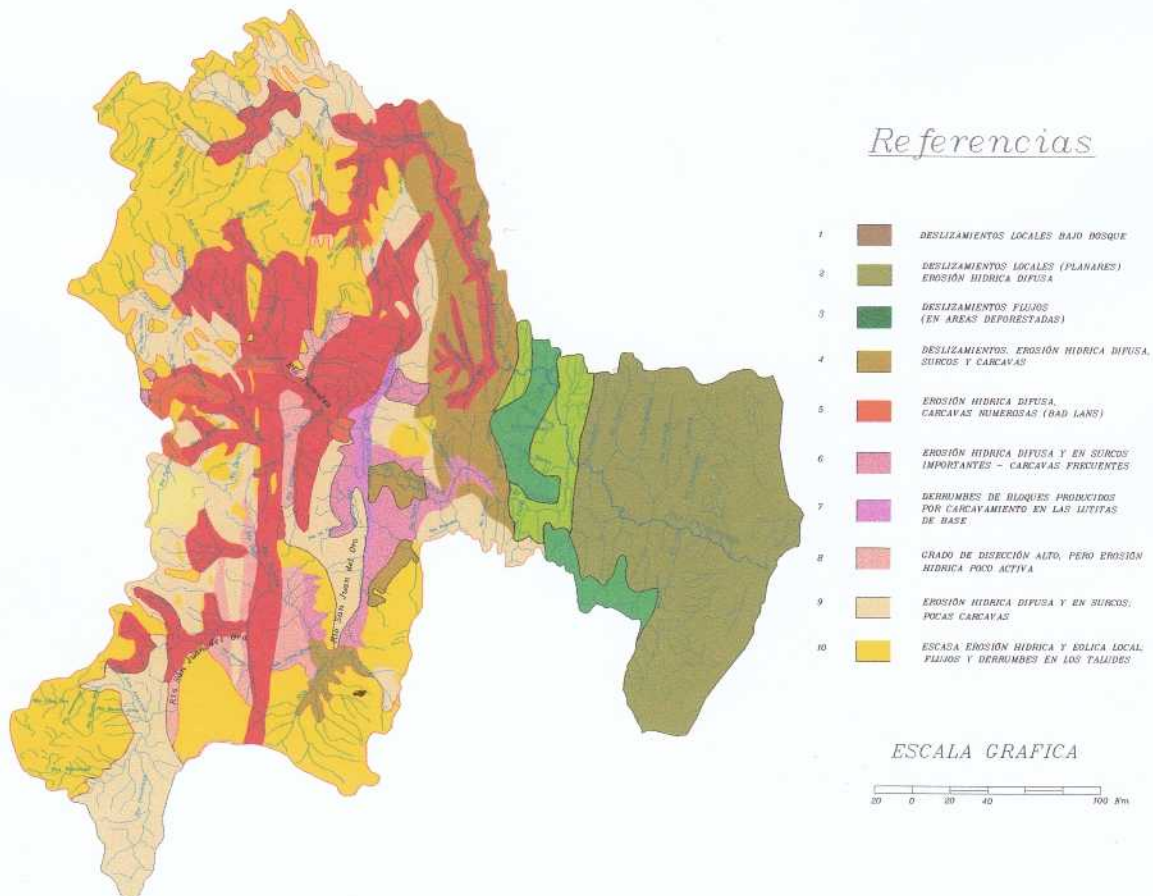


Figura N° 25: Áreas Sedimentógenas en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo

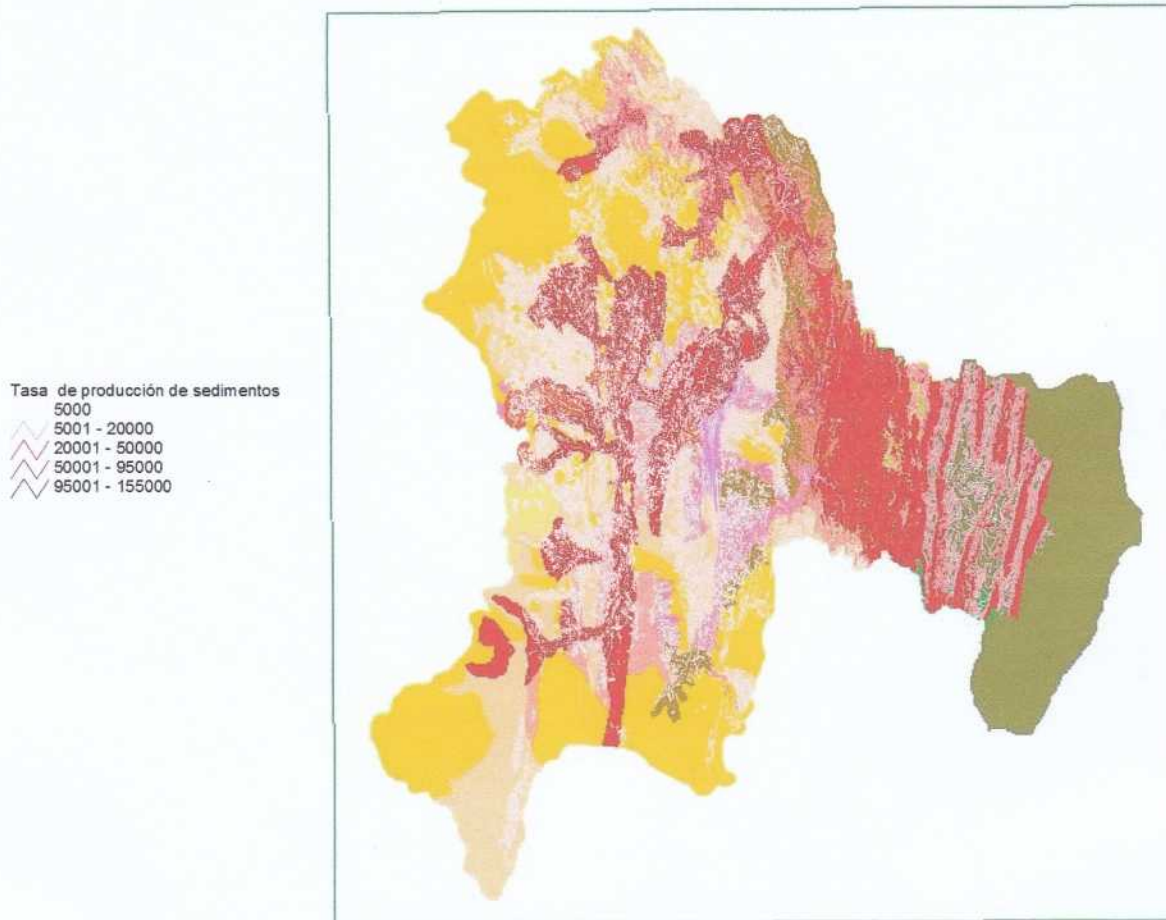


Figura N° 26: Comparación Gavrilovich- Áreas Sedimentógenas en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo

A los fines de efectuar la comparación de los resultados obtenidos aplicando la metodología de Gavrilovich con los aportes anuales de materias en suspensión para diferentes estaciones de la Cuenca Alta del Pilcomayo se efectuó la agrupación de subcuencas en aquellas asociadas a estaciones de medición. En la Figura N° 27 se presentan las subcuencas cuya producción de sedimentos puede ser observada en una sección de control y para las cuales se realizó la sumatoria de los valores de "G" correspondientes a las unidades de cálculo incluidas en dichas áreas. Se denotan en la misma figura las estaciones de medición de transporte sólido consideradas.

Las mediciones de caudales sólidos en suspensión, permiten efectuar la comparación de los valores medidos con los calculados utilizando la metodología presentada, siempre teniendo en cuenta lo expresado acerca de las diferentes fuentes de sedimentos posibles en una cuenca, mientras el método de Gavrilovic estima la componente debida sólo a erosión superficial.

En la Tabla N° 12 se presenta la comparación realizada. En la misma se incluye la relación Valor medido/Valor calculado que permite valorar la validez de la metodología aplicada.

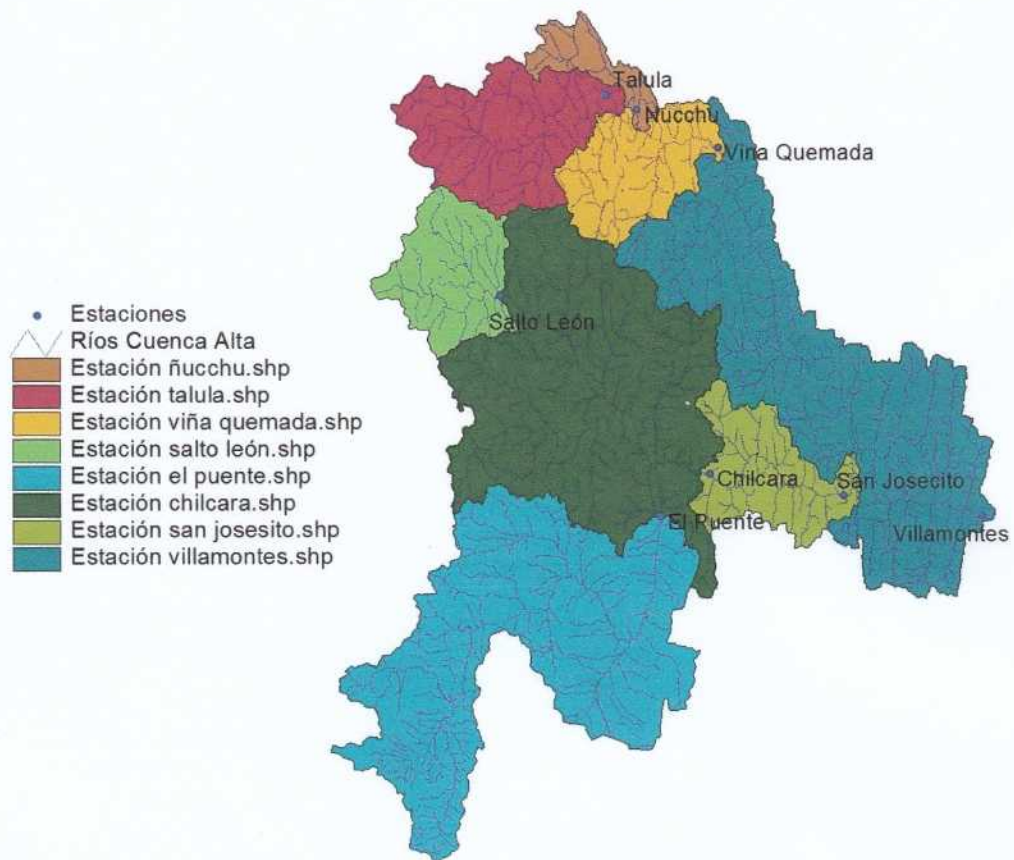


Figura N° 27: Delimitación de subcuencas de aportes para la comparación de volúmenes de sedimentos calculado-medido

	Período de Observación	Calculado (millones Ton/año)	Promedio valores medidos (millones Ton/año)	Relación Med/Calc
Ñucchu	73-85	1.64	1.59	0.97
Talula	64-67/ 72-98	4.35	13.38	3.08
Viña Quemada	78-98	13.14	69.77	5.31
Salto León	75-85	1.40	0.77	0.55
El Puente	74-62	6.63	6.92	1.04
Chilcara	75-85/ 91-93	21.47	27.56	1.28
San Josecito	76-87/ 90-92	44.26	49.10	1.11
Villa Montes	73-87/ 93-05	125.08	175.70	1.40

Tabla N° 12: Comparación de volúmenes medios anuales de producción de sedimentos en la Alta Cuenca del río Pilcomayo

Los resultados expuestos en la Tabla anterior muestran que las relaciones entre los montos de sedimento medidos y calculados son muy variables (en el rango de 0.5 a 5). Esto indica que aún en las situaciones en las que la erosión superficial es la principal fuente de sedimentos, la diferencia entre valores medidos y calculados puede ser importante. No obstante, la metodología utilizada da resultados adecuados a los efectos de la caracterización global interanual. Se advierte que sólo en las estaciones Ñucchu y Salto León la relación Medido/Calculado es inferior a la unidad indicando que el valor calculado por Gavrilovich sobreestima la producción de sedimentos en esas secciones de cierre. En las estaciones restantes la relación es superior a la unidad y representa una diferencia porcentual neta de hasta 430% en la estación Viña Quemada. En la estación de cierre de la Alta Cuenca este exceso es de 40%, como ya fue expresado.

Con los datos de sólidos en suspensión medios disponibles y los correspondientes datos de caudales líquidos medios, se construyeron las Figuras N° 28 a 34 para las Estaciones Ñucchu, Talula, Viña Quemada, Salto Ñeón, El Puente, Chilcara y San Josecito, respectivamente. En estas figuras se representan los pares de valores "Derrame" – "Transporte sólido en suspensión" a escala anual. Asimismo, se indica el valor calculado correspondiente al material sólido producido por erosión superficial y que llega a la sección del río donde se ubica la estación de aforo, considerándose el derrame medio de todos los años con registro de aforos.

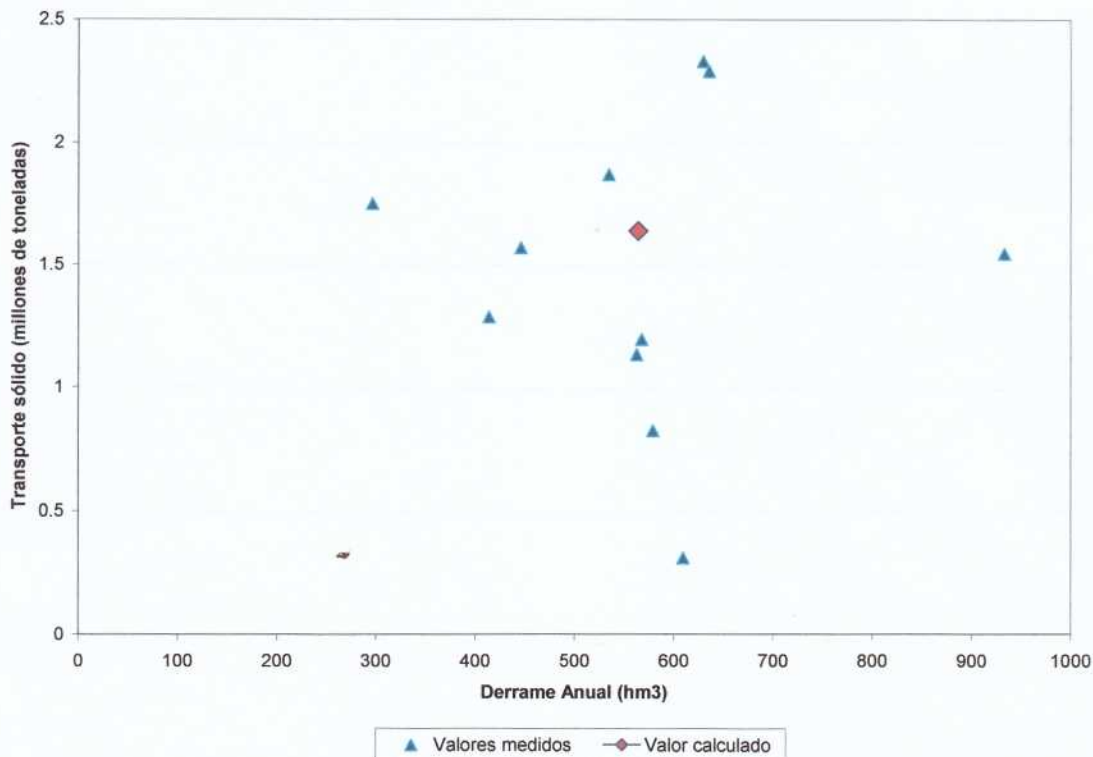


Figura N° 28: Comparación valores medidos y calculado en la Estación Ñucchu en el período 1974-1985

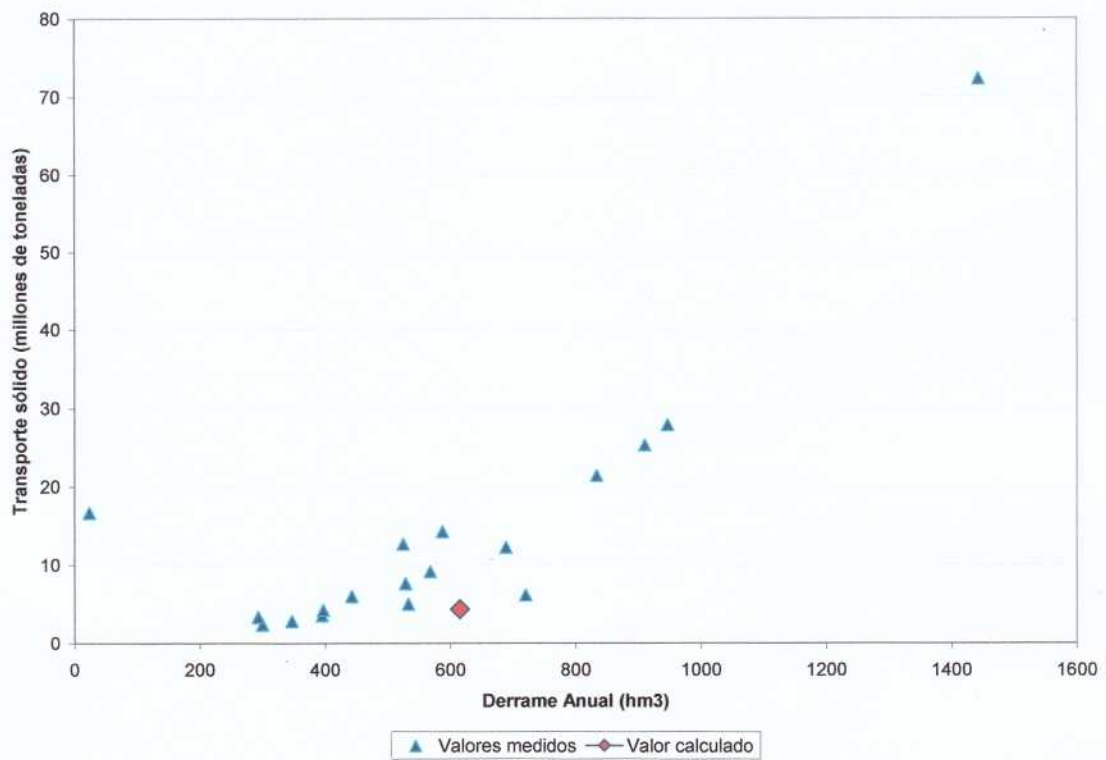


Figura N° 29: Comparación valores medidos y calculado en la Estación Talula en el período 1973-1999

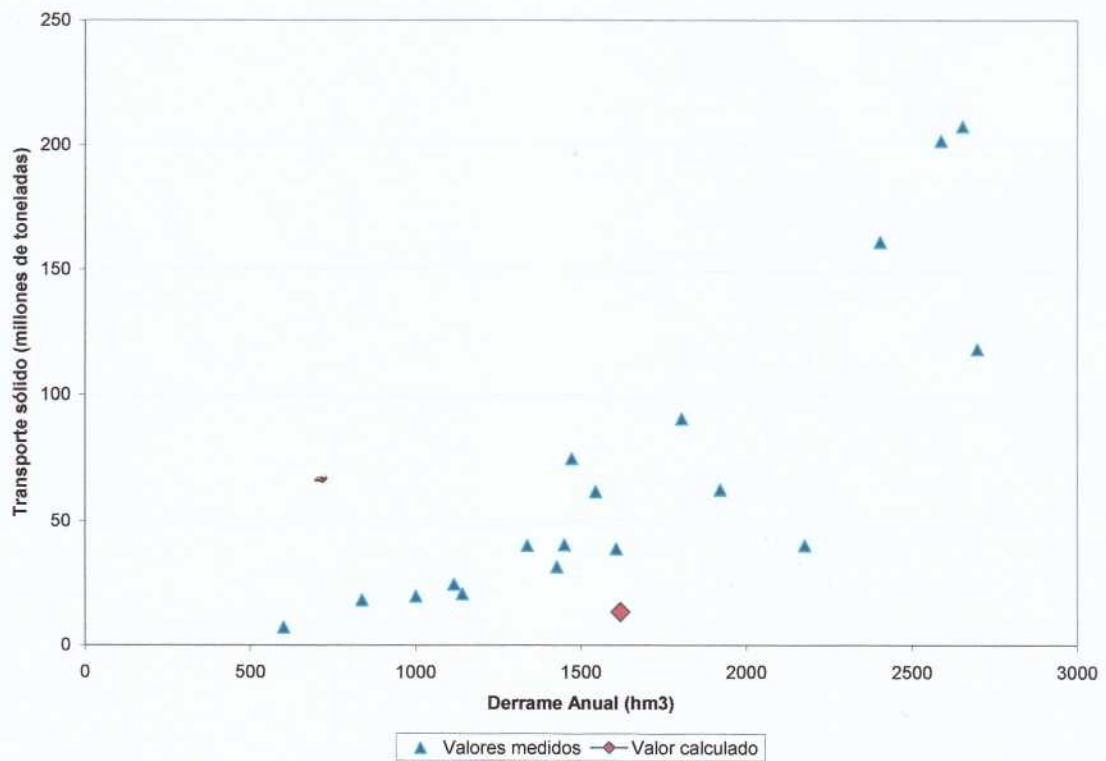


Figura N° 30: Comparación valores medidos y calculado en la Estación Viña Quemada en el período 1977/78-1996/1997

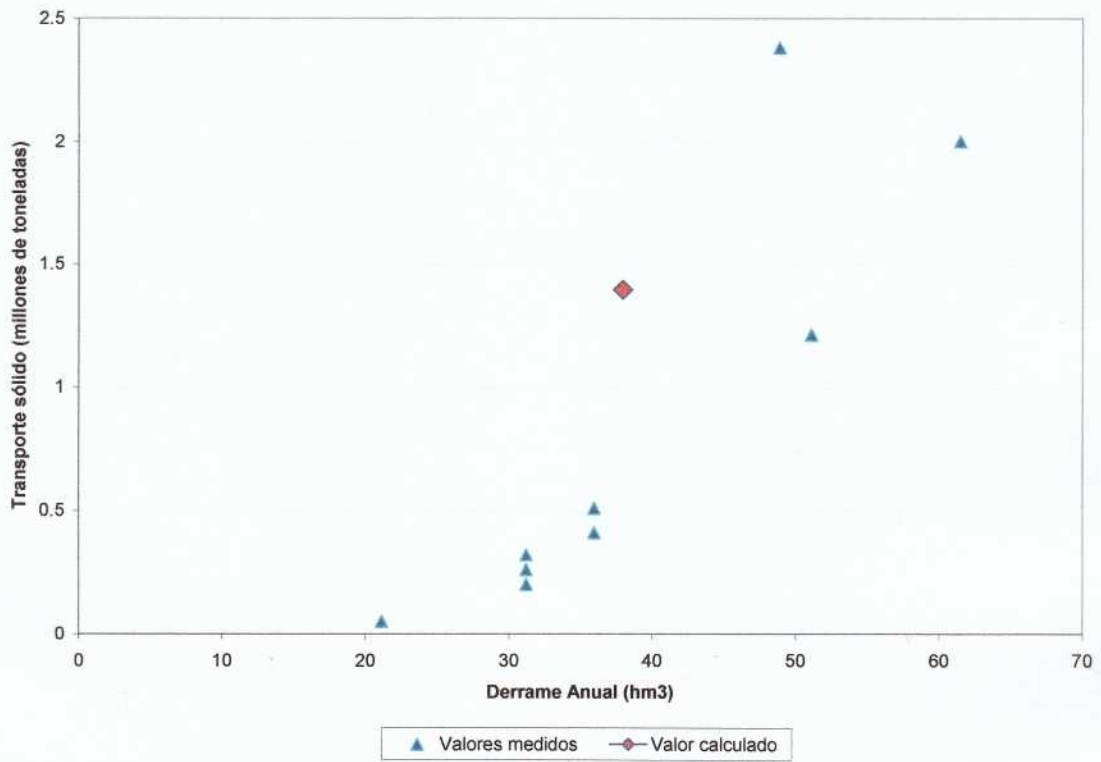


Figura N° 31: Comparación valores medidos y calculado en la Estación Salto León en el período 1975-1985

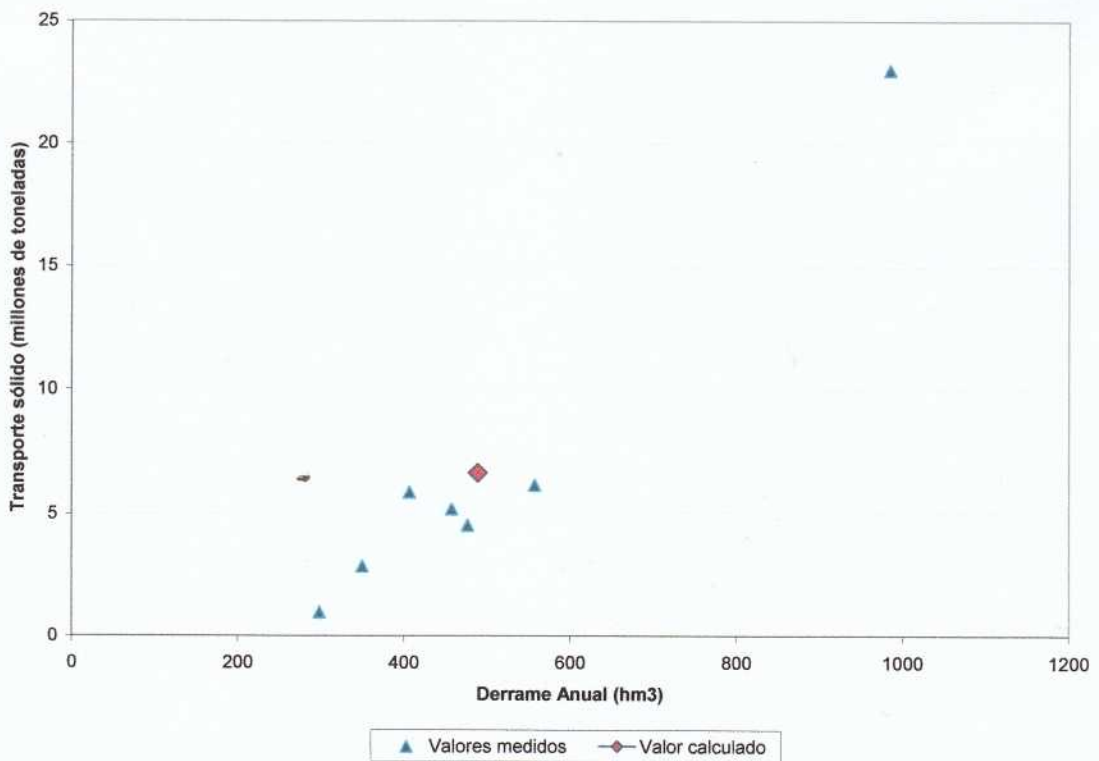


Figura N° 32: Comparación valores medidos y calculado en la Estación El Puente SLDO en el período 1975-1982

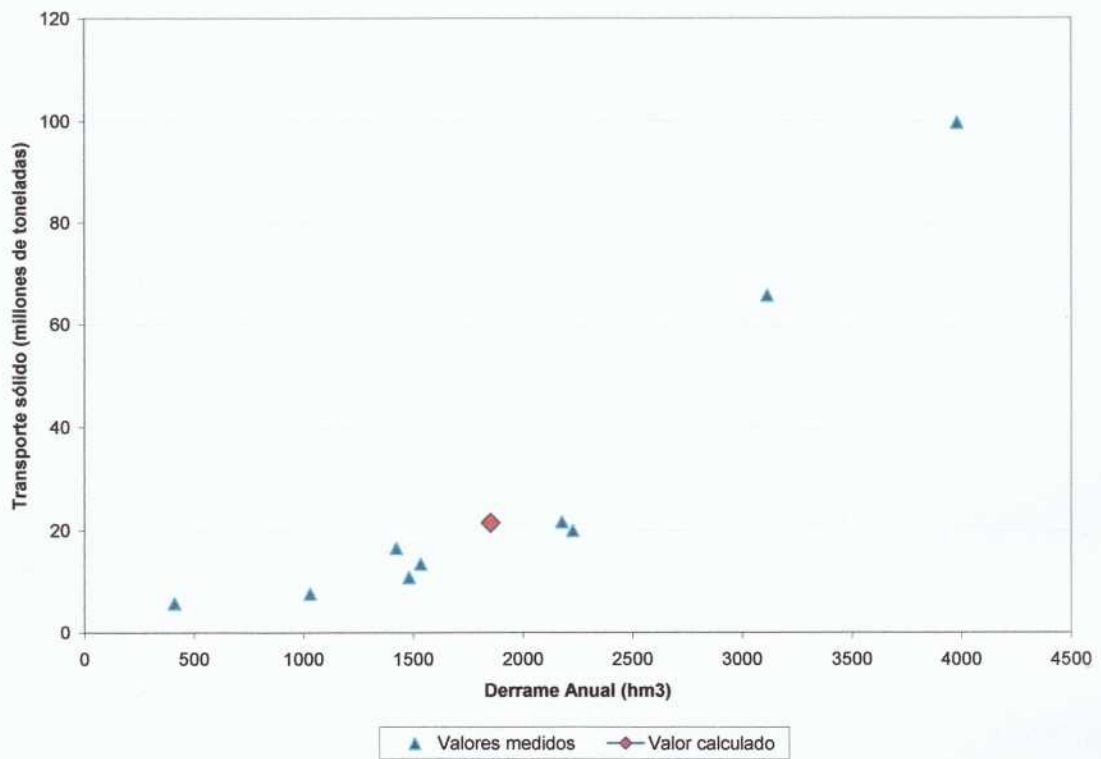


Figura N° 33: Comparación valores medidos y calculado en la Estación Chilcara en el período 1976-1985

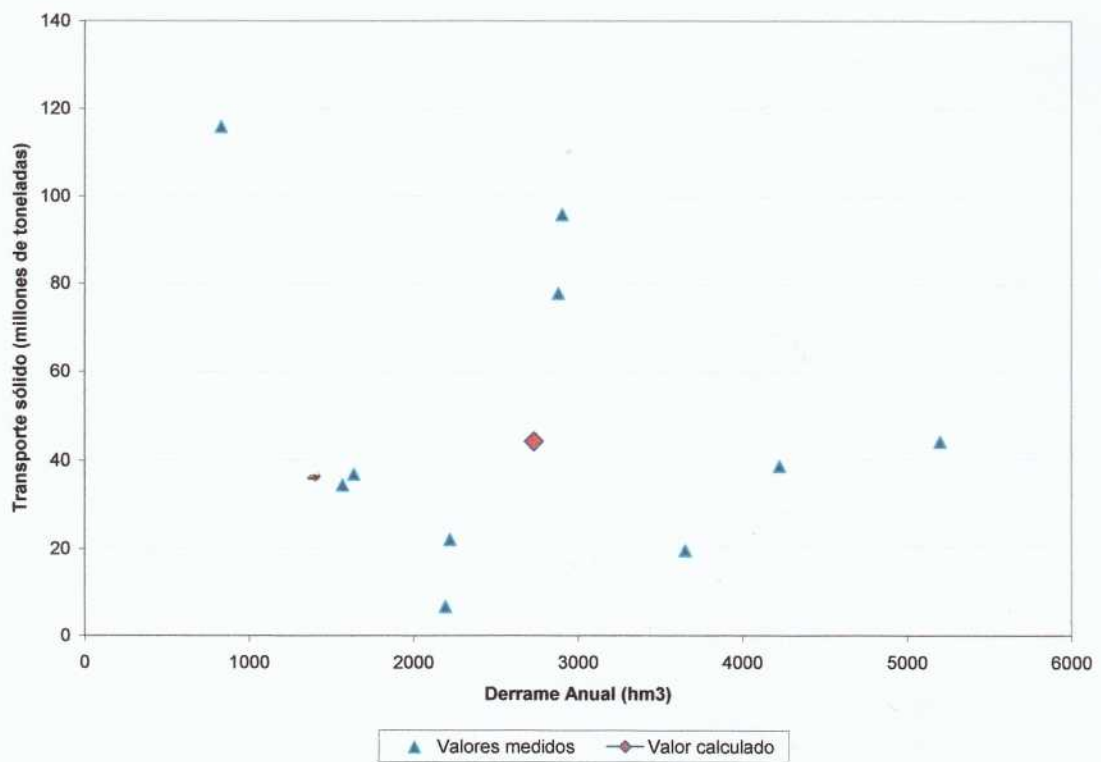


Figura N° 34: Comparación valores medidos y calculado en la Estación San Josecito en el período 1978-1987

Estas figuras ilustran sobre la evolución anual de los derrames líquidos y sólidos en el período de registro de cada estación y evidencian que en las estaciones Viña Quemada y Talula ubicadas en el extremo norte de la Alta Cuenca donde se presentan los valores mayores de la relación Medido/Calculado el valor calculado se ubica en el sector inferior de la nube de puntos respectiva indicando que en la evaluación de la producción total de sedimentos en esas cuencas deben considerarse procesos de otra naturaleza (como los de remoción en masa) que constituyen una componente importante del transporte sólido. Un patrón similar aunque más atenuado se observa en las estaciones Chilcara y Villamontes. En las Figuras que corresponden a las estaciones Ñucchu y Salto León se advierte que el valor calculado con el método de Gavrilovic se ubica en el sector superior de la nube de puntos.

En el Primer Informe elaborado por el Laboratorio de Hidráulica de la UMSS en el marco del Proyecto de Estudios de Erosión, Transporte y Sedimentación, de diciembre de 2006, se ha efectuado una primera subdivisión de cuencas de aporte en la Cuenca Alta del río Pilcomayo con vistas a la aplicación del modelo SWAT para estudiar los procesos de erosión y aporte de sedimentos.

La previsión de la necesidad de ajuste del modelo exigió la identificación de estaciones con mediciones simultáneas de caudal líquido y sedimentos localizadas aguas arriba de Misión la Paz. Como producto de este análisis se propuso la delimitación en tres subcuencas que se denominan Subcuenca Viña Quemada, Subcuenca Tumusla y Subcuenca San Juan del Oro siendo las estaciones de cierre Viña Quemada, Palca Grande y El Puente, respectivamente. Estas subcuencas han sido caracterizadas físicamente en el informe mencionado y se presentan en la Figura N° 35. Sus parámetros principales se resumen en la Tabla N° 13.

Para las mismas, se estimaron los valores de volumen de sedimentos producidos por erosión superficial y transportados a la sección final de salida ($G=Wc \cdot R$) agregando los valores calculados en las celdas incluidas en las áreas delimitadas. Los valores calculados se presentan en la Tabla N° 14 y en la Figura N° 36 se muestra el mapa de distribución espacial de volumen de producción de sedimentos.



Figura N° 35: Subcuencas preseleccionadas para la aplicación del Modelo SWAT

Tabla N° 13: Características físicas de las subcuencas seleccionadas para aplicación del modelo SWAT (LHUSS, 2006)

Subcuenca	Área (Km ²)	Longitud Curso Principal (km)	Pendiente superficial (%)
Viña Quemada	13514	263	19.6
San Juan del oro	20064	404	16
Tumusla	18645	243	21

Tabla N° 14: Volúmenes de sedimento transportado a la sección final en las subcuencas seleccionadas para aplicación del modelo SWAT

Subcuenca	Área (Km ²)	Wc*R (m ³ /año)	Volumen de sedimento (millones de ton/año)	% de la Producción total en la Alta Cuenca
Viña Quemada	13514	5202264	13.79	11%
San Juan del Oro	20064	3979019	10.54	8%
Tumusla	18645	2496197	6.61	5%

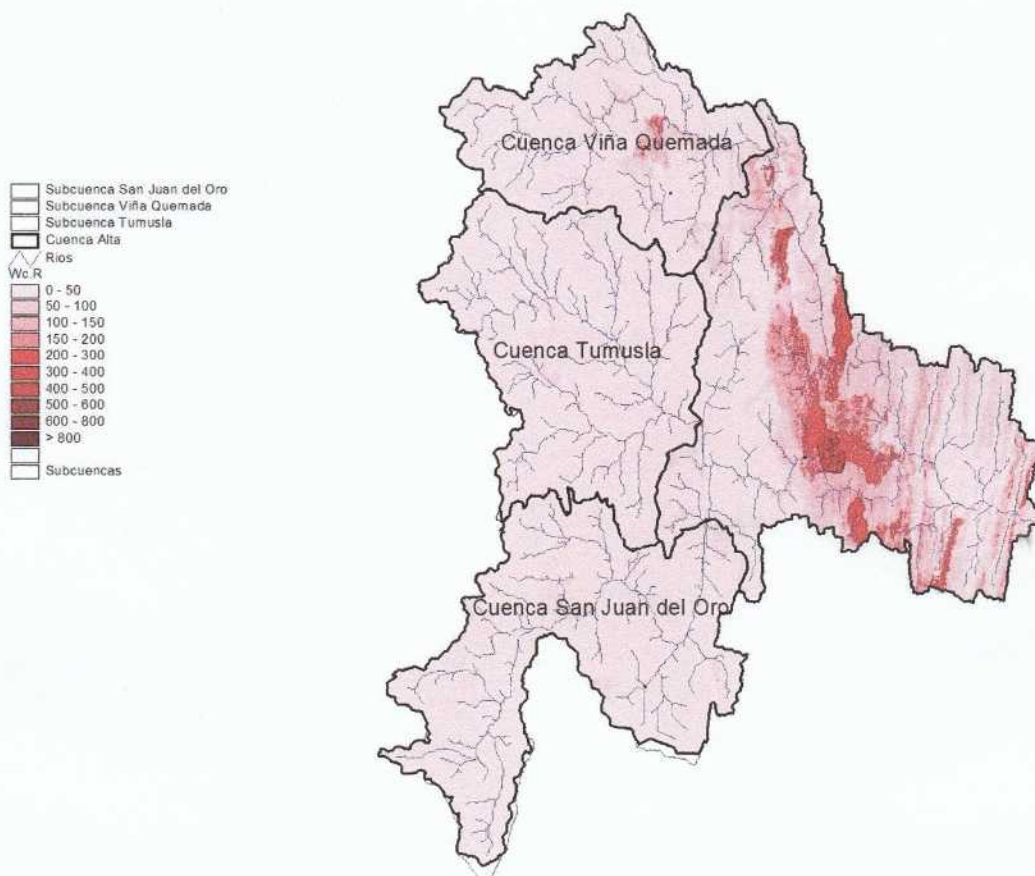


Figura N° 36: Distribución areal del volumen de sedimentos producidos por erosión superficial en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo

Las tres subcuencas, que conforme a su pendiente promedio presentan una superficie fuertemente inclinada (pendiente promedio en el rango de 12 a 25%) y que de acuerdo a la caracterización efectuada por el LHUSS son jóvenes e inestables totalizan en conjunto la cuarta parte de la producción total de sedimentos de la Cuenca Alta.

Resulta evidente que la metodología implementada permite la estimación de los volúmenes de sedimentos generados por erosión superficial para el nivel de agregación de subcuencas que se desee, ya que el cálculo ha sido efectuado a nivel de celda de 250*250 m².

5 PROCESOS DE DESMORONAMIENTO, DESLIZAMIENTO Y FLUJOS RÁPIDOS DE REMOCIÓN EN MASA

Los movimientos de remoción en masa rápidos, tales como desmoronamientos (slumps), deslizamientos (slides) de masas de rocas y de detritos, caídas (falls) de masas rocas y de detritos, y flujos de barro o de tierra (mudflows o, en general, debris flows) son característicos de muchas regiones montañosas. En las áreas en las que operan, no sólo constituyen importantes modeladores del paisaje, contribuyendo a la degradación de áreas positivas, sino que proveen grandes volúmenes de materiales sólidos a las cuencas hídricas.

Muchos de estos desplazamientos son característicos de las áreas de aporte o de las zonas de cabeceras de las cuencas hídricas, tal el caso de los desmoronamientos, deslizamientos y caída de rocas y detritos. Estos procesos, favorecidos por los fenómenos de meteorización física o de desintegración de las rocas y por marcados relieves, son generadores de acumulaciones detríticas en las áreas más proximales de los sistemas fluviales, y poseen un muy elevado nivel de energía potencial, por lo que constituyen la fuente de alimentación detrítica de las cuencas hídricas al ser posteriormente removilizados en forma gravitacional por otros agentes superficiales.

Por su parte, los flujos de barro y de tierra, junto con otros agentes de transporte fluvial (tales como flujos hiperconcentrados, mantos de crecientes y crecientes encauzadas), se alimentan de los anteriores y producen el transporte de sedimentos de todas las granulometrías posibles hacia las regiones ubicadas fuera del frente de montaña. Generan así las más importantes acumulaciones de los abanicos y conos aluviales y de los sistemas fluviales entrelazados gravosos proximales (transversales y longitudinales) de las cuencas hídricas, así como buena parte de la carga detrítica traccional, suspensiva y de lavado del sistema fluvial colector medio y distal.

Con todo, estos movimientos de remoción en masa rápidos, no operan con igual intensidad en cualquier región caracterizada por fuertes desniveles topográficos. Existen diversos factores determinantes de la existencia de estos procesos de movilización detrítica, entre los que se pueden destacar:

Factores geológicos

Factores geomorfológicos

Factores climáticos

Factores orgánicos

5.1 Factores geológicos

Los factores geológicos que intervienen en los procesos de remoción en masa son de distinta índole. Por una parte se encuentran los aspectos litológicos, entre los que se destaca la presencia de materiales inconsolidados a poco consolidados, entre ellos las rocas sedimentarias (areniscas, fangolitas, arcilitas, carbonatos) o metamórficas de bajo grado (pizarras, filitas, esquistos), así como las gravas sueltas favorecen la disponibilidad detrítica y proveen de una elevada tasa de materiales susceptibles a la movilización por agentes gravitacionales.

Resultan también importantes los aspectos estratigráficos, tales como la existencia de sucesiones estratificadas (sedimentarias, piroclásticas, inclusive volcánicas), así como foliadas o esquistosas (metamórficas de bajo grado), en las que –además de las superficies planares de discontinuidad– son significativas las alternancias entre cuerpos de rocas porosas y no porosas. Estos conjuntos estratificados proveen mayores volúmenes de materiales en comparación con los cuerpos de rocas más homogéneas, como son los granitoides (granitos, granodioritas, tonalitas, etc.) y las metamórficas de alto grado (gneisses y migmatitas).

A los antes mencionados, debemos sumar los aspectos estructurales, entre los que se destacan la existencia de conjuntos rocosos deformados (dislocados, plegados) y las presencia de fallas y diaclasas que favorecen la desintegración y el desprendimiento de las masas rocosas. Particularmente, las escarpas de falla y de frentes de corrimiento o de

cabalgamiento adquieren una importancia fundamental al producir significativas diferencias de topografía regionales y locales. Por otra parte, la existencia de sucesiones dislocadas con fuertes valores del ángulo de buzamiento (inclinación máxima de estratos u otras estructuras planares) son fuentes esenciales de aprovisionamiento detrítico y de masas de rocas, sobre todo cuando la orientación de las capas inclinadas coincide con las de la pendiente de las laderas montañosas (pendientes de buzamiento).

Entre los factores geológicos, el vulcanismo ejerce un rol fundamental en la generación de muy diversos tipos de movimientos en masa (Polanski, 1966). Desde ya que en primer término, los fenómenos volcánicos son – en sí mismos- generadores de relieves, pero aparte de estos factores, los episodios volcánicos son capaces en pocos instantes de generar enormes volúmenes de materiales detríticos que pueden ser removilizados gravitacionalmente. Al respecto, en forma independiente de los productos primarios del vulcanismo (como son la generación de flujos lávicos, las caídas y los flujos piroclásticos), los fenómenos explosivos pueden producir grandes procesos de removilización detrítica por colapso gravitacional y por aportes significativos de grandes volúmenes de agua (fusión de glaciares de las cumbres volcánicas, súbito vaciamiento de los lagos de los cráteres) (cf. Mazzoni, 1986).

5.2 Factores geomorfológicos

Ya se ha mencionado que el relieve de un área de montañas es fundamental para la producción de los movimientos de remoción en masa rápidos. Por supuesto que cuanto mayores sean los desniveles más altas serán las posibilidades de poner en movimiento volúmenes rocosos. En este sentido, deben considerarse tanto el relieve absoluto (alturas máximas sobre el nivel del mar) como los relieves relativos o locales, es decir las diferencias de nivel entre los puntos topográficamente más altos y la localización de los valles o los niveles de base locales.

Se resumen a continuación algunos ejemplos sobre la importancia de los factores geomorfológicos.

En las áreas cordilleranas, las cotas absolutas determinan la existencia de la línea de firm o de nieve y de la línea de vegetación. La posición de estas líneas, obviamente está relacionada con la latitud a la que se encuentra localizada la región y con los fenómenos climáticos globales. Al respecto, durante el Pleistoceno, y a causa del fenómeno de enfriamiento global, la posición de la línea de nieve fue más baja que en la actualidad dando lugar a fenómenos de glaciación o de nivación en áreas que hoy en día aparecen desprovistas de hielo, de nieves permanentes o semipermanentes. Estos procesos de glaciación o nivación del Pleistoceno han sido factores esenciales en la generación de grandes volúmenes de detritos que quedan disponibles para su removilización durante los posteriores períodos post-glaciales o de climas más benignos.

Al pie de las regiones montañosas, y donde se produce la salida del frente topográfico de los colectores fluviales principales (canales de descarga), hay un brusco cambio en las pendientes que se traduce en la súbita depositación de muy abundantes materiales detríticos, con la consecuente generación de un cono o abanico aluvial, caracterizado por el desarrollo de una red de drenaje distributaria, justamente a expensas de cada canal de descarga (Denny, 1967; Hooke, 1967). Estos grandes cuerpos sedimentarios, generados por la interacción de crecidas no encauzadas, crecidas en manto y movimientos de remoción en masa rápidos (flujos de barro y de tierra), suelen tener un crecimiento vertical, lateral y frontal muy vertiginoso, lo que favorece los procesos de progradación o de avance del frente de acumulación sedimentaria (Blair, 1987; Nemec y Postma, 1993; Collinson, 1996). El tamaño y tasa de crecimiento de los abanicos aluviales depende del relieve, de las

constitución geológica de las áreas de aporte y –fundamentalmente– del desarrollo o tamaño de la cuenca imbrífera de cabeceras. Como consecuencia de estos fenómenos, el canal de descarga también progresa sobre la superficie del abanico que él mismo creó, desplazando distalmente el punto de distribución de cargas (o punto de generación de la red de drenaje distributaria) y produciendo una fuerte excavación en el área de cabeceras del propio abanico (Denny, 1967; Spalletti, 1972). Este proceso deja a los sedimentos de esa zona apical “colgados” o susceptibles a ser removilizados por caída hacia el canal de descarga.

5.3 Factores climáticos

La existencia de procesos de remoción en masa está estrechamente vinculada con la provisión de agua. La situación más favorable para que se produzcan estos desplazamientos no se da cuando la disponibilidad de agua es más o menos permanente, sino cuando sus aportes son súbitos y/o esporádicos. Así, como comentáramos la importancia de la fusión de glaciares o vaciamiento de lagos-cráteres vinculados a vulcanismo, el clima puede constituirse en un factor esencial en las episódicas contribuciones de agua al sistema de generación-transporte-acumulación de sedimentos.

En tal sentido, los aportes súbitos o esporádicos de agua están relacionados con dos distintas condiciones climáticas: glaciales y semiáridas. En climas (relativamente) fríos, con glaciares templados, como los de tipo alpino, en el invierno prevalece la acumulación nival, pero en los veranos se hace predominante la ablación y por lo tanto los sistemas sedimentarios reciben una sobrealimentación de caudales hídricos, lo que favorece la generación de movimientos de remoción en masa rápidos, así como de flujos hiperconcentrados y de crecientes encauzadas.

Por su parte, en las regiones semiáridas, las lluvias son escasas, pero su precipitación es copiosa, concentrándose durante muy breves períodos del año (verano), en los que obviamente son mayores las posibilidades de generación de desmoronamientos, deslizamientos y flujos en masa (Polanski, 1966). Más aún, este efecto puede verse acentuado con las primeras precipitaciones torrenciales que suceden a lapsos en los que se han sucedido varios veranos poco lluviosos, ya que resulta muy grande la disponibilidad de materiales detríticos y masas de rocas con elevada energía potencial, susceptibles a los procesos de removilización gravitacional.

5.4 Factores orgánicos

Están referidos a la cubierta vegetal y en tal sentido cuanto más desprovista de vegetación se encuentre la superficie del terreno, son mucho mayores las posibilidades de removilizar a las masas detríticas y de rocas (Spalletti, 1972). En las regiones montañosas de latitudes medias y altas, las áreas con mayor susceptibilidad a la erosión son las que se encuentran en las partes altas de las laderas, a alturas por encima de la línea de vegetación. En las regiones semiáridas, la existencia de una pobre cobertura vegetal y el desarrollo de suelos esqueléticos poco cohesivos, desde los desnudos a aquéllos que soportan una rala pastura de montaña, favorece enormemente el fenómeno de generación de deslizamientos, procesos de caída y de flujos de detritos. A este respecto, vale la pena comentar que los abanicos aluviales de regiones secas a semiáridas (Bull, 1972; Spalletti, 1972, 1980; Ethridge, 1985) están caracterizados por la acumulación de materiales gruesos (aglomerados a gravas) debidos a la interacción de fenómenos de crecientes fluviales, flujos hiperconcentrados y flujos de barro y de tierra, mientras que los abanicos aluviales de las regiones húmedas (Ethridge, 1985) están constituidos por una red de drenaje trenzada de naturaleza gravosa o gravo-arenosa en la que dominan netamente los procesos de sedimentación fluviales o por crecidas encauzadas.

El análisis de los procesos y de las contribuciones de detritos por desmoronamientos, deslizamientos y flujos en masa rápidos en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo, requiere de la ponderación del conjunto de factores que se han discutido previamente.

Las áreas de la Alta Cuenca del río Pilcomayo con mayor susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa y deslizamientos serán aquéllas en las que se sumen:

- a) constitución por rocas estratificadas (sedimentarias) y/o foliadas a esquistosas (metamorfitas de bajo grado);
- b) estructura geológica que favorezca el desarrollo de importantes desniveles locales, así como conjuntos estratificados con alto buzamiento, en especial coincidente con la pendiente de las laderas;
- c) presencia de fenómenos de meteorización física (desintegración de masas rocosas) por insolación, variaciones muy amplias en las temperaturas extremas diarias y procesos de congelamiento intermitente;
- d) cotas máximas absolutas altas que hayan favorecido los procesos glaciales y/o de nivación en el Pleistoceno (fuente importante de generación de detritos);
- e) desarrollo de grandes abanicos aluviales de regiones secas o semiáridas (drenaje distributivo a partir de un curso troncal), estrechamente ligados a áreas con importantes desniveles y buen desarrollo de la red imbrífera de cabeceras proveedora del cañón o colector principal;
- f) precipitaciones concentradas a breves períodos del año (lluvias copiosas);
- g) suelos esqueléticos, poco maduros o azonales, así como pobre cobertura vegetal.

Las consideraciones hasta aquí efectuadas son de orden general, sirven simplemente como una introducción al problema de los aportes de materiales detríticos por fenómenos en masa

Al momento de la redacción de este informe se está llevando a cabo el análisis e interpretación de la información de base disponible a los efectos del análisis de estos fenómenos que serán evaluados a partir del procesamiento de información georeferenciada en entorno GIS.

6 CONCLUSIONES

Se inició el estudio de la producción de sedimentos en la Alta Cuenca del río Pilcomayo, realizándose en primer término la evaluación de la producción por erosión superficial. El análisis de los procesos de desmoronamiento, deslizamiento y flujos rápidos de remoción en masa está siendo llevado a cabo al momento de la redacción de este informe.

Para el cálculo de la producción de sedimentos por erosión superficial se implementó una metodología mediante la utilización de un sistema de información geográfica que permitió la obtención de mapas de producción de sedimentos que constituyen una herramienta importante en la toma de decisiones acerca de la identificación de zonas de mayor producción, y la evaluación de los procesos de estabilización (forestación, obras de control) o recuperación de dichas zonas.

La estructura con la que se ha implementado esta metodología, permite la rápida actualización de los resultados a medida que se cuente con información más completa de los datos básicos que se utilizan en la aplicación del método de cálculo.

A partir de la aplicación efectuada, se ha comprobado el buen funcionamiento del método para los fines perseguidos, a través del contraste de los resultados obtenidos con los aforos sólidos disponibles en distintas estaciones de la Alta Cuenca, y se han obtenido conclusiones preliminares acerca de la incidencia de la erosión superficial frente a las otras fuentes de producción de sedimentos.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blair, T., 1987. Sedimentary processes, vertical stratification sequences and geomorphology of the Roaring River alluvial fan, Rocky Mountain National Park, Colorado. *Journal of Sedimentary Petrology* 57: 1-18.

Brea, J.D.; Spalletti P., 1997; Producción de sedimentos en cuencas de ríos de montaña. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente – Laboratorio de Hidráulica y del Ambiente, Informe LHA 150-02-97.

Bull, W., 1972. Recognition of alluvial-fan deposits in the stratigraphic record. En Rigby, J. & Hamblin, M. (Eds.) *Recognition of Ancient Sedimentary Environments*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication 16: 63-83.

Cadore, Peviani, M.; Baldin, M, 1994; Quantificazione del trasporto solido in bacini pilota mediante formule geomorfologiche. ISMES, Bérgamo, Italia.

Collinson, J., 1996. Alluvial sediments. En Reading, H. (Ed.) *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy* (3rd. Edition), Blackwell Science: 37-82.

Denny, C., 1967. Fans and pediments. *American Journal of Science* 265: 81-105.

Ethridge, F., 1985. Modern alluvial fans and fan deltas. En *Recognition of Fluvial Depositional Systems and Their Source Potential*. Lecture Notes Course 19, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists: 101-126.

Ferro, V., 1999; Modellistica matematica e verifica sperimentale dell'aprocio distribuito dei processi di sediment delivery. La gestione dell'erosione. *Scienza tecnica e strumenti a confronto per il controllo dei fenomeni torrentizi*. Trento e Bolzano, Italia.

Gavrilovic S., 1959; Methode de la classification des bassins torrentiels et equations nouvelles pour le calcul des hautes eaux et du debit solide. *Vadoprivreda*, Belgrado.

Gavrilovic Z., 1988; The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. Wallingford, England.

Gentile, F.; Puglisi, S.; Trisorio-Liuzzi, G., 1999; Verifica sperimentale di modelli empirici per la valutazione della perdita di suolo in un piccolo bacino molisano. La gestione dell'erosione. *Scienza tecnica e strumenti a confronto per il controllo dei fenomeni torrentizi*. Trento e Bolzano, Italia.

Halcrow-Serman & asociados s-a-, 2006: Estudio de Base Ambiental y Socioeconómica de la cuenca del río Pilcomayo.

Harrington, H., 1946. Las corrientes de barro (mud-flows) de "El Volcán", quebrada de Humahuaca, Jujuy. Sociedad Geológica Argentina Revista I: 149-166.

Hooke, R., 1967. Processes on arid-region alluvial fans. *Journal of Geology* 75: 438-460.

Instituto de Hidráulica e Hidrología, UMSA, 2006: Balance Hídrico de la Cuenca Alta del río Pilcomayo Informe Final

Laboratorio de Hidráulica, UMSS, 2006: Estudios de erosión, transporte y sedimentación en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo. Primer Informe.

Mazzoni, M., 1986. Procesos y depósitos piroclásticos. Asociación Geológica Argentina, Serie B Didáctica y Complementaria 14, 115 pp.

Mazzoni, M. & Spalletti, L., 1972. Sedimentología de las arenas del río Grande de Jujuy. Revista Museo de La Plata, nueva serie, Geología VIII: 35-117.

Nemec, W. & Postma, G., 1993. Quaternary alluvial fans in southwestern Crete: sedimentation processes and geomorphic evolution. En Marzo, M. & Puigdefabregas, C. (Eds.) *Alluvial Sedimentation. Special Publication International Association of Sedimentologists*: 235-276.

Peviani, M.; Baldin, M.; Crepaldi L., 1994; Application of a sediment yield model to an East Alpine Basin. *Man and Mountain '94*. Ponte di Legno (BS), Italia.

Polanski, J., 1966. Flujos rápidos de escombros rocosos en zonas áridas y volcánicas. *Manuales de EUDEBA*, 67 pp.

Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo, 1997: Misión de Identificación y análisis para el Plan de manejo Integrada de la Cuenca del Río Pilcomayo: Informe

Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo, 2006: Sedimentología de la cuenca alta del río Pilcomayo. Síntesis de los conocimientos hasta la fecha, datos disponibles y elaboración de los parámetros principales aguas arriba de Misión La Paz (Argentina)

Spalletti, P.; Brea J.D., 1998; Producción de sedimentos en cuencas de ríos de montaña. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Oaxaca, México.

Spalletti, L., 1972. Sedimentología de los cenoglomerados de Volcán, provincia de Jujuy. Revista Museo de La Plata, nueva serie, Geología VIII: 137-225.

Spalletti, L., 1980. Paleoambientes sedimentarios en secuencias silicoclásticas. Asociación Geológica Argentina, Serie B Didáctica y Complementaria 8, 175 pp.

UNITAR, 1995; Explorations in Geographic Information Systems Technology. Volume 5. GIS and Mountain Environments.

Zemljic M., 1971; Calcul du debit solide - Evaluation de la vegetation comme un des facteurs antierosif. International Symposium Interpraevent, Villach, Austria.