

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

IX CONGRESO NACIONAL

METODOLOGIA PARA IDENTIFICAR FUENTES DE SEDIMENTO EN

CUENCAS CORDILLERANAS. APLICACION A LA

HOYA ALTA DEL RIO MAIPO

Alejandro López A. (1)

Luis Ayala R. (2)

Rodrigo Gómez S. (3)

RESUMEN

Se presenta la metodología desarrollada para identificar fuentes potenciales de generación de sedimento en cuencas andinas, la cual se basa prioritariamente en relacionar las características geológico-mineralógica de los sedimentos líticos transportados en suspensión por los cursos de agua con las unidades geológicas que caracterizan la cuenca. Se da a conocer los resultados obtenidos al aplicar esta metodología en la cuenca alta del río Maipo.

-
- (1) Ingeniero Civil, Profesor Asociado e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Depto. de Ingeniería Civil, U. de Chile.
 - (2) Ingeniero Civil Ph.D., Profesor Titular e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Depto. de Ingeniería Civil, U. de Chile.
 - (3) Egresado de Ingeniería Civil. Ayudante de Mecánica de Fluidos. Depto. de Ingeniería Civil, U. de Chile.

1. INTRODUCCION

1.1 Importancia de la identificación de fuentes de sedimento

Los fenómenos sedimentológicos propios de una cuenca, son el resultado de la acción de agentes erosivos sobre el suelo de la cuenca, y su efecto está condicionado por elementos o factores característicos los que incrementan o aminoran la acción de los agentes. Estos factores pueden ser físicos o humanos, encontrándose entre los primeros factores climáticos, fisiográficos, formaciones superficiales y cobertura vegetal y entre los segundos se destacan las prácticas agropecuarias y las alteraciones introducidas por obras en la superficie y/o en los cauces de la cuenca.

De esta forma los procesos que caracterizan los fenómenos sedimentológicos (erosión, transporte y depósito) no son homogéneos en toda la cuenca existiendo áreas que constituyen fuentes prioritarias de origen del sedimento. Estas zonas no son simples de determinar y su identificación reviste gran importancia ya que está asociada a la conservación y recuperación de suelos y a la posibilidad de efectuar un control y manejo del problema sedimentológico en una cuenca.

1.2 Procedimientos y técnicas empleadas. Experiencia en Chile

Las principales fuentes de sedimento son las áreas interfluviales y los cauces, pero la contribución de tales fuentes será distinta de una cuenca a otra, debido a la variación de los factores ambientales que condicionan los procesos sedimentológicos.

Hasta ahora los estudios realizados para identificar fuentes de sedimento, han conducido a la elaboración de mapas regionales de producción de sedimento, los que se basan en la cuantificación del sedimento producido en una cuenca sea midiéndolo como sedimento transportado en suspensión en un cauce o bien

determinando el volumen de sedimento depositado en un embalse (Jansson 1982).

El área controlada por la estación de muestreo o el embalse determina el nivel de análisis del problema y condiciona la interpretación de la información recopilada. Arnett (1979) reconoce dos niveles: un primer nivel referido a una cuenca de cierta extensión y un segundo nivel referido a subcuencas de la anterior. El primer nivel proporciona información global de la respuesta sedimentológica de la cuenca sin aportar antecedentes que permitan identificar la o las zonas de la cuenca que producen mayoritariamente sedimento; el segundo nivel posibilita más la identificación de las áreas más importantes a la vez que clarifica mejor el efecto de los factores ambientales en el fenómeno en estudio, llegando a obtenerse resultados contradictorios entre ambos niveles de análisis (Arnett 1979).

En Chile, la red sedimentométrica debido a la ubicación de las estaciones de muestreo, proporciona básicamente información válida para un análisis del tipo primer nivel (Ayala et al 1984, López et al 1986), no contándose con antecedentes estadísticos derivados de sedimentación en embalses salvo un caso (Benítez, 1983).

El presente trabajo tiene como objetivo presentar la metodología seguida y los resultados alcanzados en un proyecto desarrollado por el Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile, relativo a la identificación de las fuentes más importante del sedimento transportado en suspensión por los ríos de la cuenca alta del Maipo, mediante un enfoque cualitativo en el que se ha relacionado principalmente las características geológicas de la región con propiedades de los sedimentos en suspensión.

2. FACTORES INCIDENTES EN LA IDENTIFICACION DE FUENTES

Entre los factores físicos de una cuenca que condicionan su respuesta sedimentológica se distinguen: Clima, representado principalmente por el tipo, régimen y distribución espacial y temporal de las precipitaciones, por la temperatura y régimen de vientos, elementos que unidos a otros factores ambientales condicionan la escorrentía superficial; Fisiografía, área, pendiente, altura media, longitud y red de drenaje de la cuenca; Formaciones superficiales, las que dan las características geológicas y propiedades de los suelos de la cuenca; Cubierta Vegetal, la que está comprendida entre bosques y vegetación rala o inexistente. Estos factores no son necesariamente homogéneos en una cuenca, por lo tanto su incidencia en el fenómeno sedimentológico no será la misma en toda su extensión. Por otra parte, si bien se ha analizado el efecto particular de cada uno (Jansson 1982, Jansen et al 1974), la respuesta sedimentológica de una cuenca o zona de ella, está condicionada por la superposición de varios de los factores mencionados, lo que le da la compleja característica al fenómeno sedimentológico, debiéndose considerar además, si procede, la intervención que realiza el hombre a través del uso de la tierra y de la construcción de obras que alteran el sistema natural de la cuenca. Por lo tanto la identificación de zonas potenciales de generar sedimento requiere conocer los factores ambientales antes señalados, analizar sus efectos y caracterizar la cuenca o las subcuencas desde un punto de vista climático, morfológico, de la vegetación existente y de la actividad humana desarrollada.

En cuencas andinas, caracterizadas por altas cumbres, fuertes pendientes y extensas zonas con escasa o sin vegetación, los fenómenos sedimentológicos son más complejos que en cuencas de llanura. En efecto, si bien actúan los mismos factores ambientales ya vistos, éstos pueden incidir en forma diferente en el fenómeno sedimentológico y por lo tanto en la generación de sedimento. Por ejemplo, los factores climáticos están influidos por la variación de altura, mientras que la topografía y red de drenaje adquieren

mayor relevancia al igual que las características geológicas y mineralógicas de las formaciones superficiales.

3. METODOLOGIA EMPLEADA

Los estudios efectuados en diversas regiones del mundo han conducido a la confección de mapas regionales de erosión, expresada ésta en $\text{ton/Km}^2/\text{año}$. La obtención de estos mapas se basa en cuantificar la respuesta sedimentológica de la cuenca a través de mediciones del gasto sólido en suspensión determinado en estaciones sedimentométricas o el volumen de sedimento depositado en algún embalse. Las concentraciones se relacionan con el caudal correspondiente y se elaboran curvas de descarga del gasto sólido, formulándose también ecuaciones de predicción del tipo $gs=aQ^b$. Esta información se complementa con los antecedentes geológicos, morfológicos, climáticos, de cubierta vegetal y uso de la tierra correspondiente al área de la cuenca cubierta por la estación o embalse correspondiente. Generalmente se determina la incidencia de los factores ambientales en la respuesta sedimentológica de la cuenca estudiando, mediante un análisis de regresión múltiple, la incidencia que en el factor a y exponente b tienen dichos factores.

En este estudio no se pretendió asociar fuentes potenciales de sedimento en una cuenca con las tasas de producción de sedimento, sino identificar tales fuentes asociando las características geológicas del área con las propiedades geológico-mineralógicas de los granos líticos presentes en las muestras de sedimento en suspensión. El criterio seguido se basa en aceptar que las características geológicas de los sedimentos líticos en suspensión deben ser similares a las características geológicas de la zona de la cuenca en donde se originó el sedimento. Por lo tanto se muestreó el sedimento en suspensión en distintos cauces y en diferentes puntos de un mismo cauce, aun cuando en muchos de esos puntos no se contara con datos sedimentométricos. Al mismo tiempo se efectuó una campaña de reconocimiento geológico hasta las nacientes de los ríos de la cuenca alta del Maipo con el fin

de obtener el mapa geológico de la zona. A los sedimentos en suspensión muestreados se les determinó en laboratorio su composición granulométrica y geológico-mineralógica, en particular las componentes intrusivas, volcánicas modernas y calcáreo-volcánico-sedimentario, asociando esta última información con las unidades geológicas en la zona cubierta por cada punto de muestreo, para así definir las zonas potenciales de origen del sedimento.

4. APLICACION A LA HOYA ALTA DEL RIO MAIPO

4.1 Antecedentes del área del estudio

El área del estudio corresponde a la hoya alta del río Maipo, cuyo sistema hidrográfico está representado por numerosos ríos y esteros, siendo el Maipo y sus afluentes Volcán, Yeso y Colorado los principales cursos de la zona. El relieve corresponde a una región montañosa con cumbres de 6.000 m. y más y de fuertes pendientes. Los valles van encajonados y son estrechos. Hay en la zona un desarrollo importante de glaciares, los que se ubican de preferencia en las cabeceras de los ríos y esteros. El clima es seco en verano y con importantes precipitaciones en invierno, las que son de tipo nival por sobre los 2000 m.s.n.m. El régimen hidrológico de la cuenca es nival. La vegetación es escasa y se va reduciendo hasta desaparecer totalmente a medida que se aumenta en cota. El área en estudio se dividió en las subcuencas cuyas características y puntos de muestreo del sedimento en suspensión se consignan en la Tabla 1 y en la Fig. 1.

4.2 PROCEDIMIENTO EMPLEADO

La metodología empleada consistió en recopilar información relativa a sedimentos en suspensión, cubierta vegetal, superficie de nieve, fluviometría, sedimentometría y geología de la cuenca. Se programó una campaña de muestreos de sedimento en suspensión en las estaciones indicadas en la Tabla 1

SUBCUENCAS DEL ESTUDIO

TABLA 1:

SUBCUENCA	ESTACION DEL MUESTREO	Area Km'	Longitud de la cuenca Km	Pendiente media %
Rio Maipo	Maipo en Las Melosas	1427	60	7
	Volcán en Queltehues	523	30	7
	Yeso en Puente Yeso*	848	46	5
	Quebrada Las Leñas*	19	3	28
	Estero Aparejo*	23	6	16
	Yeso antes de Embalse*	237	18	8
Rio Colorado	Colorado en Desembocadura	1652	65	5
	Colorado antes Junta Olivares	695	42	4
	Colorado antes Junta Parraguirre*	482	27	5
	Parraguirre antes Junta Colorado*	126	14	7
	Olivares antes Junta Colorado	528	43	4
	Olivares en Bocatoma*	407	25	2

* Estaciones sin control fluviométrico ni sedimentométrico.

la que se desarrolló en dos períodos: Febrero a Abril y Octubre a Noviembre de 1987, respectivamente; durante ambos períodos se efectuaron muestras superficiales e integradas del sedimento en suspensión. Paralelamente el Departamento de Geología de la Universidad de Chile desarrolló otra campaña de terreno con fines geológicos. Asimismo se analizó la representatividad de la información relativa a los factores ambientales de la zona.

Los sedimentos muestreados en los cauces se analizaron en laboratorio para determinar su composición granulométrica y geológico-mineralógica. Lo primero se hizo mediante tamizado mecánico y sedimentación, obteniéndose el porcentaje de arenas, limos y arcilla presentes en cada muestra. El análisis geológico se realizó visualmente con lupa de 60 aumentos, previo tamizado de la muestra por la malla 48 (0,297 mm), con lo cual se analizaron sólo los elementos líticos. Este análisis permitió establecer el porcentaje de sedimentos tipos intrusivos (I), calcáreos-volcánicos-sedimentarios (CVS) y volcánicos modernos (VM) de cada muestra.

Estos resultados se interpretaron cualitativamente con el mapa geológico, relacionando los elementos líticos con las unidades geológicas, complementándose la interpretación con información básica, por ejemplo superficies nevadas, más lo observado en las campañas de terreno.

4.3 RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis granulométrico proporcionó el porcentaje de arena, limo y arcilla de cada muestra y la variación temporal de la arena y sedimentos finos. Se encontró en casi todas las estaciones una tendencia a disminuir la proporción de arena con la disminución del caudal (primer período fin de deshielo), mientras que en el segundo período, de deshielo, se produce la situación, inversa. Se exceptúan de esta tendencia el estero Parraguire, el estero Aparejo y Quebrada La Leñas, en las cuales hay bruscas variaciones explicables por probables fenómenos locales. A modo de ejemplo se muestra en la Fig. 2 un diagrama de barra de la composición granulométrica correspondiente a las estaciones Colorado en Desembocadura y Quebrada Las Leñas, respectivamente.

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis geológico-mineralógico, constatándose que, con excepción del Estero Aparejo y quebrada Las Leñas, el sedimento en toda la zona presenta una fuerte componente de tipo intrusivo, mientras que la componente VM es de mínima importancia y la componente CVS es de importancia variable en las distintas estaciones. Recordando que las características composicionales se determinaron para líticos de tamaño igual y mayores a 0,297 mm, los resultados muestran la capacidad que cada tipo geológico tiene para producir granos de tal tamaño. Cabe destacar también que la variación en el orden de importancia entre las componentes CVS y VM en algunos períodos en ciertas estaciones, indicaría una variación en la actividad de las fuentes potenciales de sedimento.

TABLA 2:

COMPOSICIÓN GEOLOGICA DE LOS LITICOS (3)

Subcuenca	Estación	Fecha	Componente										
			3/2	1/3	28/3	11/4	25/4	4/10	24/10	14/11			
Río Maipo	Maipo en Las Melosas	I	63	67,6	61,0	-	74,0	74,0	-	74,0	74,0	-	57,7
		CVS	14,6	1,2	13,4	-	26,0	26,0	-	26,0	26,0	-	30,1
		VM	22,4	31,2	25,6	-	0	0	-	0	0	-	12,2
		I	60,2	-	61,2	-	68,0	64,0	-	67,0	71,0	-	-
		CVS	11,6	-	25,0	-	32,0	36,0	-	32,0	29,0	-	-
Río Yeso	Yeso en Puente Yeso	VM	28,2	-	13,8	-	0	0	-	0	0	-	1,0
		CVS	-	-	-	-	53,0	28,1	-	30,0	41,7	-	-
		VM	-	-	-	-	17,0	30,2	-	17,0	30,2	-	-
		Fecha	17/3	27/3	4/4	9/4	18/4	24/10	29/10	9/5	14/5	-	-
		I	71	52	75	-	-	-	24	-	-	-	-
Río Colorado	Colorado antes Junta con Parraguire	CVS	21	38,4	20	-	-	67	-	-	-	-	
		VM	8	9,6	5	-	-	9	-	-	-	-	
		I	30,2	24,2	35,2	-	-	-	-	23	-	-	
		CVS	66,8	73,8	62,0	-	-	-	-	71	-	-	
		VM	3,0	2,0	2,8	-	-	-	-	6	-	-	
Río Olivares	Olivares en Bocaatona	I	20	33,7	8,9	17,0	19,3	-	17,3	10,4	21,8	-	
		CVS	80	53,7	90,1	59	80,7	-	75,5	89,6	54,4	-	
		VM	0	12,6	1,0	24	0	-	7,2	0	23,8	-	
		Fecha	4/2	28/2	29/3	12/4	25/4	3/10	24/10	14/11	-	-	
		I	78	62	64	83,2	-	84	-	78,8	-	-	
Río Olivares	Olivares antes Junta Colorado	CVS	19	25	9,7	16,8	-	15	-	20,1	-	-	
		VM	-	13	26,3	0	-	1	-	1,1	-	-	
		I	-	28,9	-	-	-	-	-	37,8	-	-	
		CVS	-	33,3	-	-	-	-	-	53,9	-	-	
		VM	-	45,8	-	-	-	-	-	8,3	-	-	
Río Colorado	Colorado en Desembocadura	I	72,1	45,8	-	76	66,7	61,9	60	62,7	-	-	
		CVS	25,9	28,3	-	4	0	0	0	37,0	-	-	
		VM	2,0	4,3	-	0	0	0	0	0	-	-	
		I	-	40	-	-	-	-	-	35,3	-	-	
		CVS	-	11	-	-	-	-	-	58,2	-	-	
Río Colorado	Colorado en Desembocadura	VM	45	45	-	-	-	-	6,5	-	-	-	
		I	35	41	-	-	-	-	33,5	35,6	-	-	
		VM	20	14	-	-	-	-	52,1	50,5	-	-	
		I	54,2	52,4	-	61	-	-	14,4	13,9	-	-	
		CVS	26,6	30,6	-	35	-	-	36,4	35,3	73	-	
VM	19,2	17,0	-	4	-	-	33,6	31,4	3	-			

4.4 UTILIZACION DE LOS RESULTADOS PARA IDENTIFICAR FUENTES

Para localizar las fuentes probables que han originado el sedimento muestreado en las diferentes estaciones, se comparó la composición geológico-mineralógica de los líticos con las características de las unidades geológicas que afectan a cada punto de muestreo. Para este fin se consideró la distribución porcentual de cada elemento geológico-mineralógico, adoptando el criterio que el elemento con el valor más alto sirve para orientar en la identificación de la fuente de acuerdo a la posición y extensión de las unidades geológicas en la zona. Vale decir, la comparación se efectúa relacionando los elementos con las unidades geológicas a las cuales se les atribuye su procedencia, de acuerdo al siguiente esquema:

ELEMENTOS	UNIDADES GEOLOGICAS
a) Intrusivos	Unidades intrusivas expuestas o socavadas.
b) Calcáreo-Volcánico-Sedimentario	
b1) Clásticos	Formación Río Damas y Formación Colimapu.
b2) Calcáreos	Formación Río Colinay Formación Lo Valdés.
b3) Volcánicos Antiguos	Formación Abanico y Formación Farellones.
c) Volcánicos Modernos	Volcanes Tupungato, Tupungatito, Marmolejo, San José y Maipo.

El análisis efectuado permitió confeccionar el mapa mostrado en la Fig.4 en el cual se destacan las zonas identificadas como las más importantes, no pretendiéndose cuantificar la extensión de tales áreas o su capacidad de producir sedimento, sino más bien establecer cualitativamente su potencialidad como fuente.

Resulta de interés destacar que es posible explicar, a partir del mapa geológico, la presencia de los distintos componentes presentes en los sedimentos líticos. Por ejemplo, en la subcuenca del Maipo la alta proporción de intrusivo puede explicarse por la presencia del intrusivo Queltehues, próximo a la estación de muestreo, sin por ellos descartar el aporte de otras unidades intrusivas de aguas arriba; el volcanismo moderno, de baja proporción, se asocia al volcán Maipo ubicado en la cabecera del río. Del mismo modo en la subcuenca del río Volcán el intrusivo San Gabriel próximo a la estación de muestreo explicaría el origen de era componente así como el volcán San José ubicado en la cabecera del río aportaría la componente VM. En cada subcuenca las áreas identificadas como fuente es más reducida en relación al área total de la subcuenca, lo que parece ser característico en cuencas nivales.

5. COMENTARIOS FINALES

La metodología aplicada demostró ser un medio adecuado para identificar en cuencas andinas las zonas que constituyen fuentes de sedimento. Los resultados obtenidos representan un reconocimiento general de las fuentes más importantes, estimándose que se logrará una mejor y más exacta interpretación de la información de terreno, posibilitando así identificar con mayor precisión la ubicación de tales fuentes, si en futuros estudios se consideran los siguientes aspectos: Extender el área de muestreo del sedimento en suspensión a más sectores de la cuenca, de manera que los puntos de muestreo representen áreas más pequeñas, en particular debe incluirse las nacientes y las confluencias de ríos y esteros; recolectar muestras de tamaño adecuado que permitan efectuar, además de los análisis granulométricos y mineralógicos, determinación de concentraciones del sedimento en suspensión; aplicar metodologías de laboratorio que posibiliten obtener las características geológico-mineralógicas del sedimento completo, complementando el estudio macroscópico de la muestra con análisis bajo microscopio polarizante. Por otra parte, la definida

tendencia observada en la variación temporal de las características granulométricas del sedimento en suspensión, constituye un antecedente que se debe tener en cuenta al analizar el fenómeno sedimentológico en cuencas andinas.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Ayala L., López A. y Bzdigian K. (1984). Producción de sedimento en cuencas andinas de Chile. Jornadas de Hidrología de Nieve y Hielos en América del Sur.
2. Arnett R.R. (1979). The use of different scale to identify factors controlling denudation rates. Cap. 8 del libro Geographical Approches to fluvial processes. Geo Books England. Editado por Alistair F. Pitty.
3. Benítez A. (1983). Estimación del gasto sólido afluente y embanque producido en el embalse de la Central Rapel durante el período de 11 años 01/04/68-31/03/79. VI Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica.
4. Jansen J.L. y Painter R.B. (1974). Predicting Sediment Yield from climate and Topography. Journal of Hydrology N°4.
5. Jansson M. (1982). Land Erosion by water in different climates upsala University. Department of Physical Geography. Sweden.
6. López A. y Bzdigian K. (1986). Influencia de factores geomorfológicos en la producción de sedimento en cuencas Andinas de Chile. XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Sao Paulo. Brasil.

RECONOCIMIENTO

El presente trabajo fue desarrollado en el contexto del proyecto Fondecyt N°0129/86, el cual contó con el financiamiento del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico y del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Participó también en el proyecto el Departamento de geología de la misma Universidad.

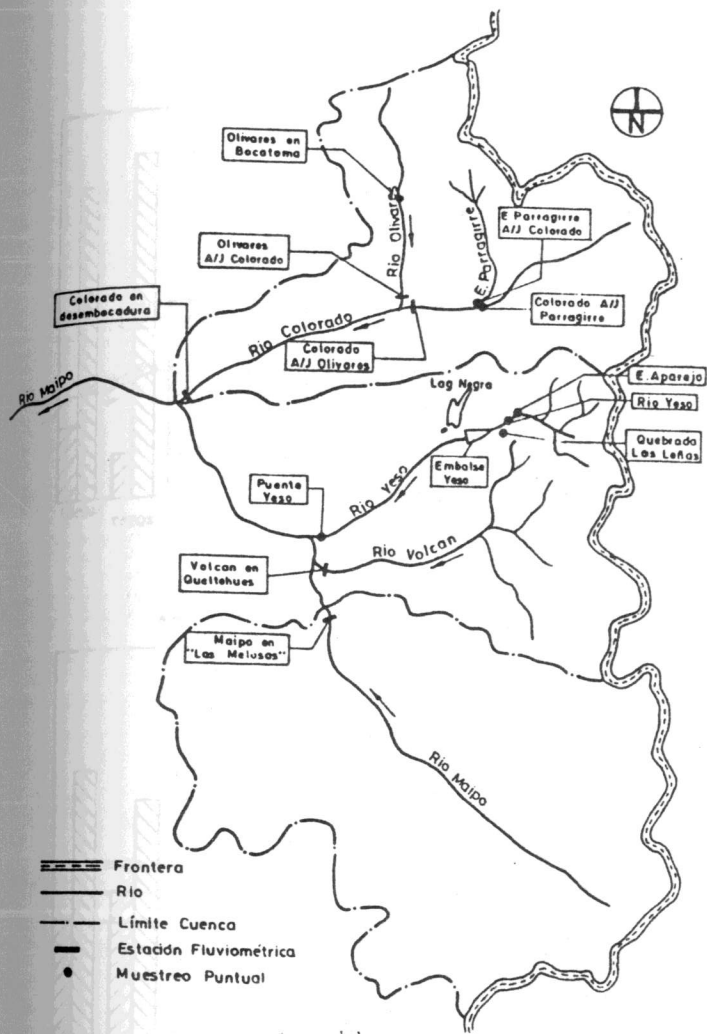


FIG.1 UBICACION SECCIONES DE MUESTREO

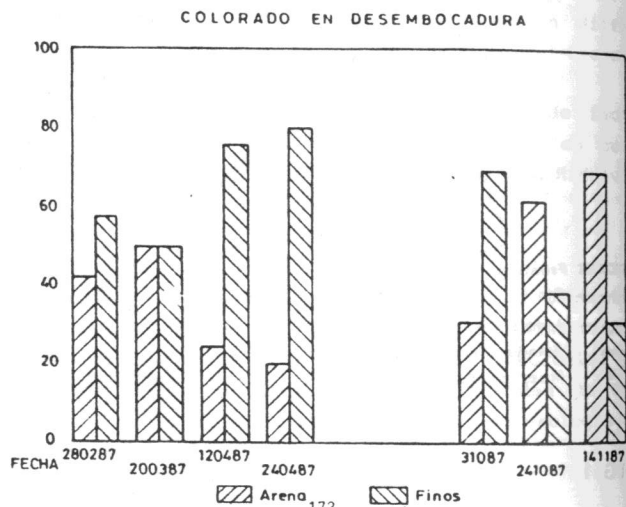
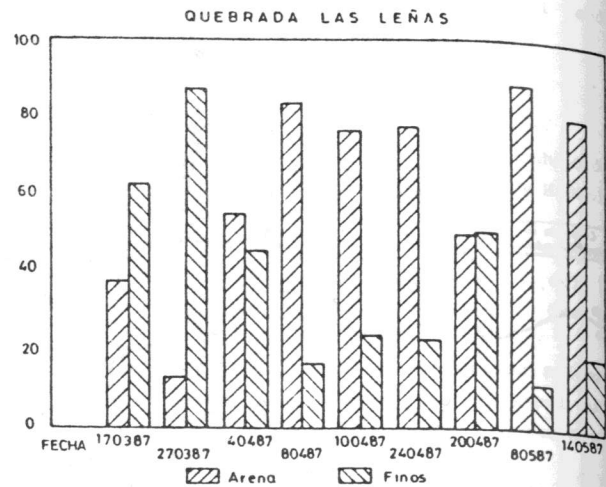


FIG. 2 VARIACION TEMPORAL DE LA GRANULOMETRIA

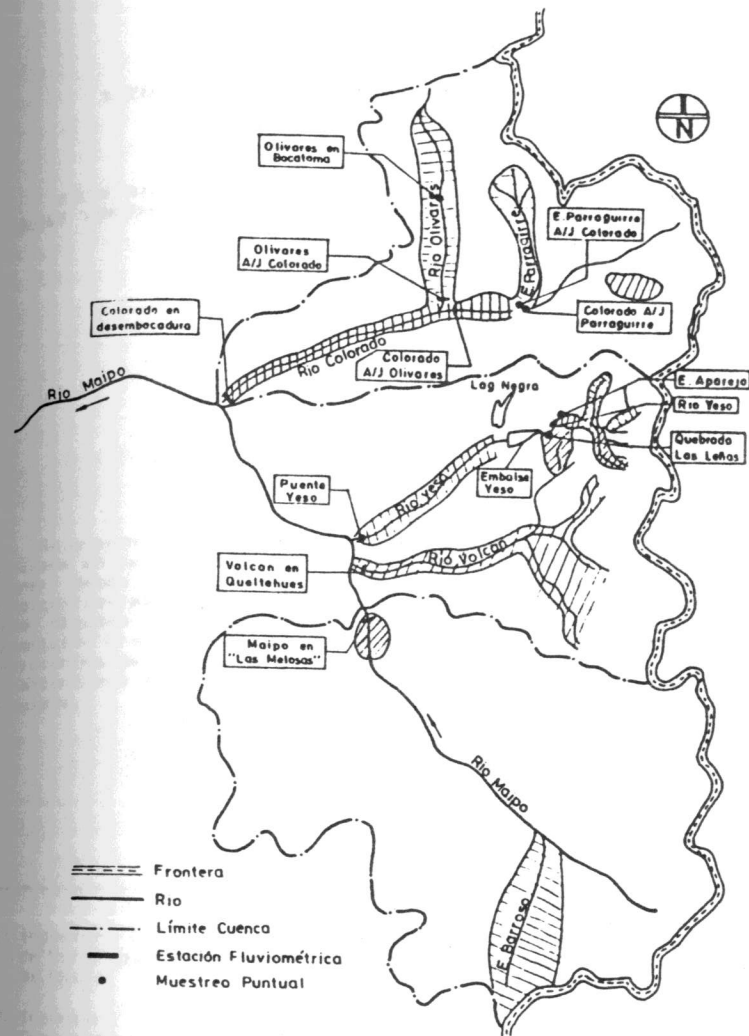


FIG. 3 UBICACION DE FUENTES MAS IMPORTANTES