

PRECIPITACION Y ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES DE RIOS ANDINOS

Juan L. Minetti

Centro de Investigaciones Regionales de San Juan

RESUMEN

Se analizan las relaciones existentes entre la precipitación caída en diversas regiones de Chile con los escurrimientos superficiales de ríos andinos. Se muestra que la precipitación media regional ajusta mejor a los escurrimientos, y que la relación entre ambas variables es de tipo curvilínea. Posteriormente se infiere la probable causa de esta respuesta y se comparan los diferentes comportamientos entre ellas.

ABSTRACT

The relationship between the precipitations observed in different sites in Chile and the river runoffs of the andean rivers in Argentine are analyzed. It is shown that the mean regional precipitation fits well with the runoffs; it is also observed that the relationship between both variables is not linear. The probable cause is inferred and different behaviours are compared.

INTRODUCCION

Es ampliamente conocida la relación existente entre la precipitación y el escurrimiento superficial de un río, como producto del balance de agua en el ciclo hidrológico (UNESCO-ROSTLAC, 1982). Esta relación tiene diversa complejidad según sean las características del régimen de precipitación y de las cuencas (Seyhan, 1976).

En general estas relaciones son de tipo lineal o curvilíneas dentro del rango de definición. La vinculación más lineal de esta aproximación, por lo general se observa en el rango superior de ambas series, en tanto que para el inferior, la misma comienza a curvarse debido a las entregas de agua que realiza el sistema de la cuenca, que obró como reservorio natural en épocas de balance hídrico positivo. En el caso de los ríos andinos, este efecto debería ser mayor en cuencas que poseen criósferas activas, debido a la regulación que impone el descongelamiento de masas de hielo, almacenadas en años de balance de masa positivo.

Una de las principales dificultades que existe para este tipo de análisis, es que, en este caso, no se conoce en forma directa, la cantidad de precipitación caída en cada una de las cuencas. Por lo tanto en todas las investigaciones existentes, la precipitación que caería en el piso superior de la cordillera, fuente de alimentación en las cuencas, ha sido reemplazada por la precipitación medida en algún punto a occidente de la cordillera sobre la República de Chile, pues tienen un régimen periódico y aperiódico semejante al de la cuenca (Minetti y otros, 1982). En este trabajo se tratará de analizar la representatividad de la información puntual y territorial de la precipitación en la República de Chile, en relación con la pluviosidad del piso superior cordillerano.

MATERIALES Y METODOS

Se ha usado para el análisis, la información pluviométrica de la República de Chile, editada por el CORFOP (1969), cuya distribución geográfica de localidades se ve en la figura 1; y los datos de los escurrimientos superficiales de ríos andinos argentinos, editados por Agua y Energía (1981).

Se han calculado ajustes lineales y curvilíneos en las relaciones bivariadas de precipitaciones y derrames superficiales, por el método de mínimos cuadrados con iteración computacional. Previamente se normalizaron las variables usando el logaritmo natural de ambas series, debido a los sesgos característicos que poseen (Minetti y otros, 1982). Juntamente con los ajustes entre ambas variables, se calcularon los coeficientes de correlación, determinación y varianza no explicada por la variable precipitación (Larraín Bascuñán, 1981).

Para el caso de análisis de significación de las tendencias presentadas, se recurrió a la prueba no paramétrica de rango Mann-Kendall, recomendada por WMO (1979).

RESULTADOS Y DISCUSION

Una forma general del balance de agua en un tiempo dado, según UNESCO-ROSTLAC (1982), sería:

$$Q_{so} = P + Q_{s1} + Q_{u1} - E - E_{tr} - Q_{uo} - AM - AG - ASI - ASch - ASgl - ASsn - n \quad (1)$$

donde Q_{so} =salida de agua superficial en un río o derrame superficial

P =precipitación en la cuenca

Q_{s1} =entrada de agua superficial a la cuenca

Q_{u1} =entrada de agua subterránea a la cuenca

E =evaporación

E_{tr} =evapotranspiración real

Q_{uo} =salida de agua subterránea

AM =variación del almacenamiento de humedad en el suelo y la zona no saturada

AG =variación del almacenamiento en acuíferos

ASI =variación del almacenamiento en lagos y embalses

$ASch$ =variación del almacenamiento en canales y ríos

$ASgl$ =variación del almacenamiento en glaciares

$ASsn$ =variación del almacenamiento en cobertura de nieve

n =término residual de discrepancia, error de medición o estimación.

En la ecuación (1), el término ' P ' es el de mayor orden de magnitud, si $Q_{s1}=0$ y $Q_{u1}=0$, y además tiene estrecha vinculación con el resto de las componentes expresadas. Por otra parte, el término ' Q_{so} ' es en general inferior al 50% de ' P ', pero buena parte de ' Q_{so} ' en el caso de los ríos andinos es regulada por las componentes de almacenamiento subterráneo y criogénico (glaciares descubiertos y permafrost) expresados aquí por ' AG ' y ' $ASgl$ ', o por un almacenamiento en la cobertura de nieve perenne ' $ASsn$ ', expresada a veces como una variación con el tiempo de la altura de ésta.

Si las cuencas no poseen formas de almacenaje de agua en períodos de excedentes o balance de masa positivo, con posterior regulación de ésta en períodos críticos, tal como se presenta en la naturaleza, la respuesta del escurrimiento superficial en función de la precipitación debería ser lineal. Esta suposición ha sido llevada a cabo con un ajuste entre la precipitación invernal acumulada en Santiago de Chile, a occidente de la cordillera, con el escurrimiento anual del río San Juan en la República Argentina, observado en la estación de aforo "La Puntilla". La relación encontrada es la siguiente:

$$\ln Q = 3,114 + 0,758 \ln RR \quad R^2 = 0,488 \quad (2)$$

donde: Q = escurrimiento superficial

RR = precipitación

ambos para el período 1909-10/1977-78. RR es precipitación acumulada entre los meses de abril y septiembre. Esta relación se ve en la figura 2a.

La figura 3a muestra el derrame del río San Juan con el tiempo, en tanto que la figura 3b muestra la varianza no explicada con el ajuste lineal de la ecuación (2). El total de la variabilidad no explicada en este caso es del 51,2% y posee una tendencia negativa significativa. En este caso, el error se está llevando consigo parte de la información necesaria para una buena predicción, y en todos los casos se debería procurar que los modelos generaran errores observados o varianzas no explicadas, efectivamente aleatorias (Larraín Bascuñán, 1981).

Por supuesto que aquí existen tres problemas que se deben aclarar:

- A. ¿Es el ajuste lineal el más adecuado? La hipótesis no contemplaba al almacenamiento de agua en la cuenca y su regulación posterior.
- B. ¿Es la variable predictora representativa de la precipitación que cae en el piso superior de la cordillera?
- C. ¿Existen otras variables predictoras que expliquen otro porcentaje importante de la variabilidad total?.

En este trabajo se tratará de explorar los interrogantes A y B.

Si se contempla como hipótesis que las cuencas son recargadas de aguas subterráneas o hielo durante períodos de balance de masa positivo, regulando la misma a posteriori en forma natural (Yevjevich, 1972), entonces la relación entre precipitación y escurrimiento superficial perdería su forma lineal. En la figura 2 pueden apreciarse tres ajustes cuadráticos entre ellas, para diversos períodos: $b_0=1909-10/1978-79$, $b_1=1909-10/1943-44$ y $b_2=1944-45/1978-79$. Ellos son:

$$(b_0) \quad \text{Ln}Q = 14,161 - 3,3577 \text{ LnRR} + 0,3798 (\text{LnRR})^2 \quad R^2=0,566 \quad (3)$$

$$(b_1) \quad \text{Ln}Q = 13,687 - 3,1946 \text{ LnRR} + 0,3680 (\text{LnRR})^2 \quad R^2=0,537 \quad (4)$$

$$(b_2) \quad \text{Ln}Q = 16,026 - 3,9939 \text{ LnRR} + 0,4299 (\text{LnRR})^2 \quad R^2=0,490 \quad (5)$$

Se han probado otros ajustes que no han mejorado las relaciones presentadas. Aquí puede verse que un ajuste cuadrático ha mejorado la explicación de la variabilidad del escurrimiento en un 8% entre (2) y (3) (ver figura b0), siendo significativo el término cuadrático.

La figura 3c muestra la variabilidad no explicada con el tiempo del escurrimiento superficial del río San Juan, con la precipitación "invernal" de Santiago de Chile, mediante una ecuación cuadrática. En ella desaparece la tendencia significativa de la figura 3b, aunque conserva a simple vista algún período como el 1966-72 con un déficit en el valor pronosticado por el ajuste (3). Esto se debería probablemente a la liquidación de un buen volumen de criósfera durante este período seco con balance hídrico negativo en el piso superior de la cordillera (Menegazzo de García y otros, 1984). Este proceso ha generado un rápido retroceso de algunos frentes glaciares entre 1963-70 como los informados por

Cobos y Boninsegna (1983).

El análisis por separado de los tramos de las series de escurrimiento en función de la precipitación, se debe a que en la primera mitad del período considerado (1909-10/1943-44), se observó un período de grandes precipitaciones con balances de masa positivos, en tanto que en la segunda mitad del período instrumental (1944-45/1978-79), las pérdidas de masa fueron significativas, aun observadas en series muy extendidas, reconstruidas por Cobos y Boninsegna (1983).

Sobre estos ajustes debería esperarse una mejor explicación de la varianza del escurrimiento, en el primer período pluvial, con balances más frecuentemente positivos, y a la inversa en el período más deficitario. En este último período, una mayor regulación del escurrimiento ante un prolongado período crítico, con aportes de agua almacenada, disminuirá la dependencia entre el escurrimiento y la precipitación. La cuantificación de este aspecto se ve afirmada por la disminución del coeficiente de determinación (R^2) del 0,537 (4) al 0,490 (5), y aunque esto parezca una sutileza, coincide con la hipótesis planteada.

El problema referido a la representatividad de la precipitación de Santiago de Chile en la explicación de la variabilidad del escurrimiento del río San Juan, tienen dos aspectos que se deben tratar. El primero, es intrínseco a la calidad de la observación puntual de la precipitación, y el segundo referido a la representatividad del valor puntual sobre una precipitación regional en el piso superior de la cordillera, y a su vez ésta sobre los caudales.

El primer problema, manifestado por Hoffmann (1970) se verá minimizado al tomar como indicador a un promedio de precipitación, pero la selección de las localidades más representativas para su cálculo es más compleja y se debería recurrir a un método objetivo. En este trabajo se realiza una exploración, tratando de encontrar regiones representativas, de cuyos promedios regionales estén mejor vinculados con los escurrimientos de ríos en el sector argentino.

En forma tentativa, se han discriminado subjetivamente áreas de 2,5º de latitud entre los 30ºS y los 42,5ºS, integrando al desierto del norte en una sola banda entre los 20º y 30ºS. En cada área se han seleccionado por lo menos tres series pluviométricas para el cálculo de 'precipitación regional anual' (RR(t)) que se ve en la figura 1. Pueden verse los promedios con el tiempo en la figura 4.

La Tabla 1 muestra resultados de ajustes por polinomios de 1er y 2do grado, entre las precipitaciones regionales RR(t) con los escurrimientos superficiales de ríos andinos Q(t) y sus respectivos R^2 . Se ha tratado a todos los ríos de la zona andina central, desde el San Juan hasta el Limay. En el análisis se puede ver que los ajustes cuadráticos responden siempre mejor que los lineales, con mayor o menor grado de apartamiento entre ellos, aunque en líneas generales puede decirse que la relación cuadrática es mejor para las cuencas de más al norte.

También puede inferirse que hay una mayor dependencia de Q(t) con RR(t)

para los ríos de la zona norte de Cuyo, vistas en los R^2 , confirmando con esto una mayor sensibilidad a las fluctuaciones del clima (Minetti y otros, 1982).

También se infiere de esta tabla, que la mayor parte de los ríos andinos de la zona central tienen mejor respuesta a la variabilidad de la precipitación regional de la banda 3 en la República de Chile, perdiendo definición a la altura del río Atuel. De idéntica manera, la precipitación regional de la banda 4, justo a occidente de la cuenca del mismo río, no explicita a la varianza de éste, y además lo hace con menor definición con los ríos Colorado, Neuquén y Limay. Aunque desconocemos la motivación de este fenómeno, sí se puede decir que, sobre esta banda latitudinal puede verse un aparente cambio en la modalidad en algunas de las componentes de la variabilidad de la precipitación (ver figura 4), manifiesta también en el escurrimiento de los ríos a occidente de la cordillera y expuestos anteriormente por Pittock (1980), Benítez y King (1977) y Frick (1977).

En la Tabla 1 también puede apreciarse la mejor vinculación entre $RR(t)$ regional de la banda 5 en Chile, con los escurrimientos de los ríos de la provincia del Neuquén y sur de Mendoza, en tanto que las $RR(t)$ de la banda 6, no explicitan la varianza de éstos.

La figura 5 muestra los ajustes cuadráticos de $RR(t)$ con $Q(t)$ de ríos andinos centrales, con sus respectivos polinomios y R^2 . En este caso, se muestra que las $RR(t)$ regionales han mejorado significativamente a los ajustes con $Q(t)$ expresados en (3), lográndose, en el caso del río San Juan, explicar a un 69,7% de la varianza, mejorando así un 14% de la explicación.

En el eje de las abscisas de esta figura se indican algunos estadísticos, deciles 1ro, 5to y 9no, cuartiles de la distribución y extremos de las precipitaciones regionales en la banda 3 en Chile. Los ajustes presentados se acotan entre los valores extremos de $RR(t)$ y pierden sentido físico más allá del límite extremo izquierdo.

De esta figura se puede inferir lo siguiente:

- El río San Juan muestra una exagerada respuesta de $Q(t)$ con $RR(t)$ comparándolo con los otros ríos de la región, con excepción de Los Patos que es afluente de éste. Esta mejor respuesta, juntamente con un mejor ajuste (R^2), indicaría una mayor sensibilidad a la variabilidad de la precipitación, ya comentada.
- La hipótesis probable de la incidencia del tamaño del área colectora de éstos, sobre la respuesta en $Q(t)$, es descartada si se considera un análisis relativo entre el río Los Patos de 8.500 km² de cuenca y el río Mendoza de 9.040 km². Descartada esta hipótesis, por semejanza de áreas entre estas dos cuencas, quedarían algunos factores causales como los geomorfológicos y geológicos que deberían investigarse.
- Una menor respuesta del escurrimiento superficial a un incremento de la precipitación, estaría indicando una mayor capacidad de almacenamiento de agua de

una cuenca, que se haría efectiva como agua subterránea o hielo (criósfera). Desde este punto de vista, el río Mendoza sería mejor almacenador de agua que Los Patos, y éste sería el motivo de su comportamiento más regulado que presenta en situaciones críticas de sequía, ya manifestado por Menegazzo de García y otros (1984).

- Para el intervalo de $RR(t)$ menor que el mediano (RR_{me}), el comportamiento de $Q(t)$ en función de $RR(t)$, es más curvilíneo que por encima de RR_{me} y estaría mostrando la eficiencia en la capacidad reguladora del escurrimiento superficial operada en cada cuenca. Esta regulación en el intervalo de $RR(t)$ deficitarios, es coherente con el punto de vista anterior, ya que los ríos con menor coeficiente AQ/ARR en la parte superior de la relación, tienen menor AQ/ARR en la inferior, o sea que, a mayor capacidad de almacenamiento, mayor capacidad de regulación.
- La figura 6 es semejante a la figura 5, pero en el eje de ordenadas, se ha cambiado la variable 'escurrimiento superficial' por 'escurrimiento superficial por unidad de área', manteniendo la variable en el eje de abscisa. En ella se puede comparar a los ríos andinos con independencia de su área colectora, y confirmar lo mostrado anteriormente cuando comparaba al río Los Patos con Mendoza.

CONCLUSIONES

Los escurrimientos superficiales de la mayor parte de los ríos andinos, muestran un mejor ajuste no lineal con la precipitación regional del sector mediterráneo de Chile. Estas relaciones estarían indicando que la precipitación regional es más representativa que la puntual, y además, la relación curvilínea indicaría la efectividad de cada cuenca en los procesos de almacenamiento y regulación del agua. De los ríos analizados, el Mendoza se muestra aparentemente más propenso a este efecto.

La relación entre precipitación y escurrimiento se muestra parcialmente diferenciada en períodos secos y húmedos, y el valor esperado de escurrimiento basado en la precipitación se aleja del real luego de un proceso de sequía prolongado.

Agradecimientos: Al Dr. Arturo E. Corte por sus sugerencias, y al Lic. José L. Sales y a la Prof. Patricia M. Barbieri por el apoyo computacional.

BIBLIOGRAFIA

- Agua y Energía Eléctrica, 1981: "Estadística Hidrológica hasta 1981", Tomo 1, Fluvimetría. Ministerio de Obras y Servicios Públicos. Buenos Aires, República Argentina.
- Benítez, G.A. y King, F.H., 1977: "El ecosistema chileno: comportamiento del ciclo hidrológico en el centro de Chile". Jornadas del agua y el futuro regional de Mendoza, Gobierno de la Provincia de Mendoza, Mendoza, República Ar-

- gentina. Inédito.
- Cobos, D.R. y Boninsegna, J.A., 1983: "Fluctuations of some glaciers in the upper Atuel River basin, Mendoza, Argentina". Quaternary of South America and Antarctic Peninsula. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Rep. Argentina.
- Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), 1969: "Estadísticas Pluviométricas". Departamento de Recursos Hidráulicos. República de Chile.
- Frick, G., 1977: "Distribución de las lluvias en Chile durante los últimos 48 años". Jornadas del agua y el futuro regional de Mendoza, Gobierno de la Provincia de Mendoza, Mendoza. República Argentina. Inédito.
- Hoffmann, J.A.J., 1970: "Características de las series de precipitaciones de la República Argentina". Meteorológica, Vol.1, Nº3, Buenos Aires. República Argentina.
- Larraín Bascuñan, F., 1981: "El uso de series de tiempo con fines predictivos". Trabajo Docente Nº33, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
- Menegazzo de García, M.I., Minetti, J.L., Carletto, M.C. y Barbieri, P.M., 1984: "Régimen de variabilidad estacional y aperiódico de los escurrimientos superficiales de ríos andinos". Centro de Investigaciones Regionales de San Juan. Revista Geofísica de España, Vol.41. Madrid.
- Minetti, J.L., Radicella, S.M., Menegazzo de García, M.I. y Sal Paz, J.C., 1982: "La actividad anticiclónica y las precipitaciones en Chile y en la zona cordillerana central". Revista de Geofísica Nº16, Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), OEA, México.
- Pittock, A.B., 1980: "Patterns of climatic variation in Argentina and Chile. Part I: Precipitation 1931-60". Mont.Wea.Rev., Vol.108, Nº9, 1347-1361. USA.
- Seyhan, E., 1976: "A statistical analysis of morphometrical variables and their multiple correlation with the mean annual flood". Geographisch Instituut Utrecht, Serie B, Nº62.
- UNESCO-ROSTLAC, 1982: "Gua Metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur". Montevideo, Uruguay.
- World Meteorological Organization (WMO), 1966: "Climate change". Nota Técnica Nº79, Ginebra, Suiza.
- Yevjevich, V., 1972: "Stochastic processes in Hydrology". Water Resources Publications Fort Collins, Colorado, USA.

EPIGRAFE DE LAS FIGURAS

- Figura 1: Bandas latitudinales utilizadas para el cálculo de precipitación regional en Chile y localizaciones pluviométricas.
- Figura 2: Vinculaciones entre la precipitación acumulada de abril a septiembre en Santiago de Chile y el escurrimiento superficial del río San Juan (La Puntilla).
- Figura 3: a- Derrame anual del río San Juan en La Puntilla $Q(t)$, y tendencia.
 b- Varianza no explicada del $Q(t)$ río San Juan con la precipitación acumulada de abril a septiembre ($RR(t)$) en Santiago de Chile, con relación lineal y tendencia residual.
 c- Idem anterior con ajuste cuadrático entre variables y tendencia residual.
- Figura 4: Precipitación regional anual en Chile por bandas de latitud.
- Figura 5: Ajustes cuadráticos entre la precipitación regional de la banda 3 en Chile (entre $32^{\circ}31'$ y $35^{\circ}00'S$) y los escurrimientos superficiales de ríos andinos en la zona central.
- Figura 6: Idem figura 5, pero considerando a los escurrimientos por unidad de área en eje de ordenada.
- Tabla 1: Ajustes entre la precipitación regional anual $RR(t)$ por bandas de latitud en la República de Chile, con escurrimientos superficiales de ríos andinos en Argentina $Q(t)$, usando polinomios de 1er y 2do grados con sus respectivos R^2 .

T A B L A 1

Bandas	R^2 lineal		R^2 cuadrático	
i	sin ajustes importantes		sin ajustes importantes	
2	San Juan: (Km 47)	0,453		
3	San Juan: (Km 47)	0,613	San Juan: (Km 47)	0,697
			San Juan: (La Puntilla)	0,695
	Tunuyán:	0,466	Mendoza:	0,595
	Diamante:	0,502	Tunuyán:	0,553
	Atuel:	0,229	Diamante:	0,615
			Atuel:	0,290
4	Mendoza:	0,137	Atuel:	0,115
			Colorado:	0,421
			Neuquén:	0,460
			Limay:	0,419
5			Atuel:	0,396
			Colorado:	0,440
			Neuquén:	0,511
	Limay:	0,587	Limay:	0,608
6	sin ajustes importantes		sin ajustes importantes	

LOCALIZACIONES PLUVIOMETRICAS Y DE AFOROS

- 1.—LA PUNTILLA (RIO SAN JUAN)
- 2.—KM 47 (RIO SAN JUAN)
- 3.—LA PLATEADA (RIO LOS PAIDOS)
- 4.—USINA CACHEUTA (RIO MENDOZA)
- 5.—VALLE DE UCO (RIO TUNUYAN)
- 6.—LOS REVUNOS (RIO DIAMANTE)
- 7.—LA ANGOSTURA (RIO ATUEL)
- 8.—PICHI MAHUIDA (RIO COLORADO)
- 9.—PASO DE LOS INDIOS (RIO NEUQUEN)
- 10.—PASO LIMAY (RIO LIMAY)

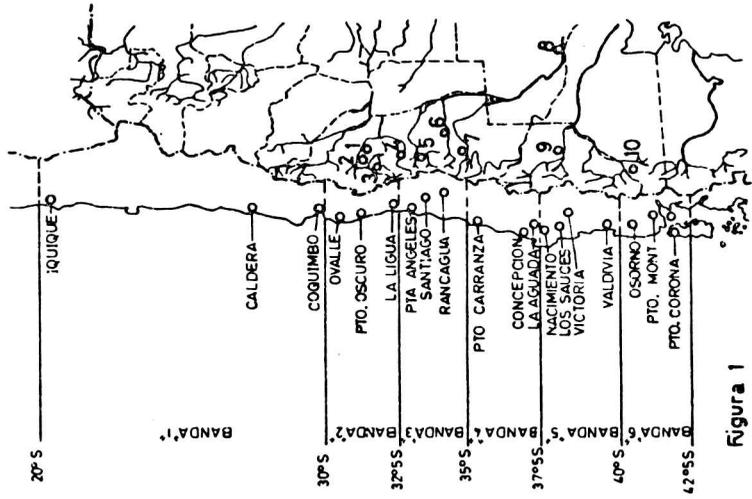


Figura 1

- a.—RELACION LINEAL 1909-10/1977-78
- b₁—RELACION CUADRATICA 1909-10/1977-78
- b₂—RELACION CUADRATICA 1909-10/1943-44
- b₃—RELACION CUADRATICA 1944-45/1977-78

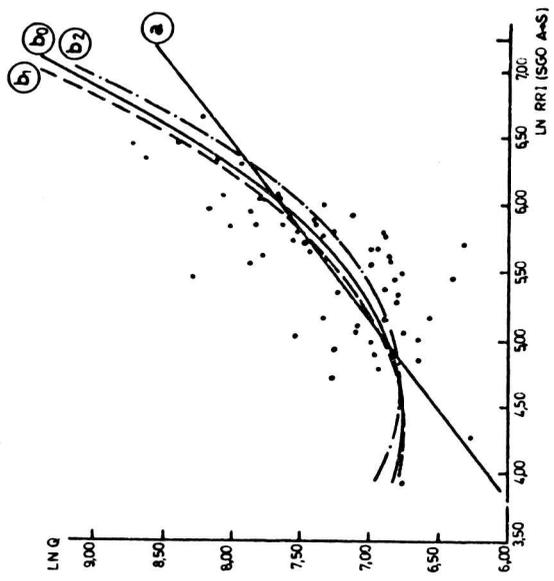


Figura 2

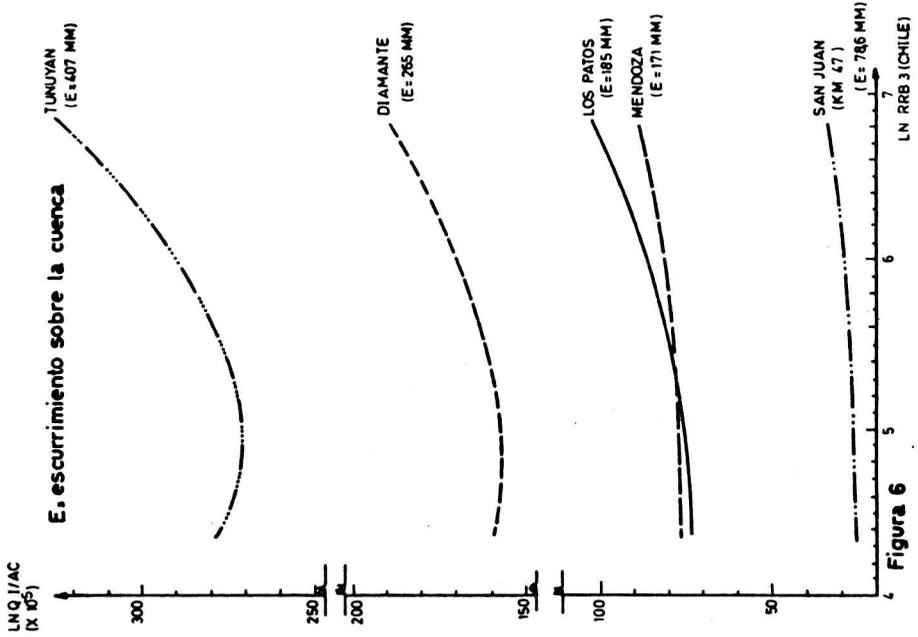


Figura 6

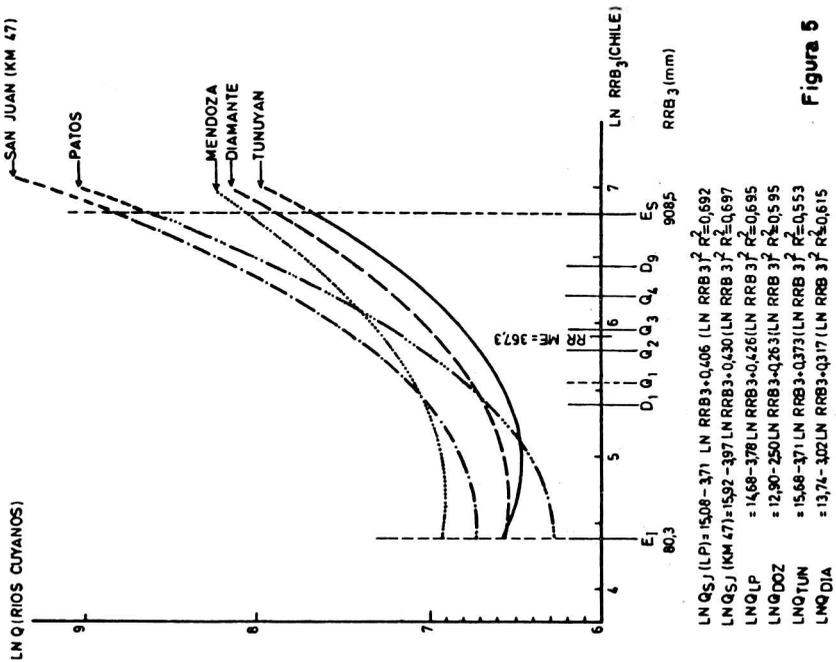


Figura 5