

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
IX CONGRESO NACIONAL



SENSIBILIDAD DEL REGIMEN HIDROLOGICO DE LA
CUENCA SUPERIOR DEL RIO MAIPO A UN CAMBIO
CLIMATICO.

HUMBERTO PEÑA T.

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza la posible respuesta de la cuenca superior del río Maipo a un cambio climático hipotético, caracterizado por un aumento constante de la temperatura del aire de 3 °C. Con ese propósito se utiliza un modelo matemático de simulación de la cuenca desarrollado en trabajos anteriores.

El análisis de los resultados obtenidos muestra un aumento significativo de los caudales de invierno, en años con una elevada precipitación, una intensificación del deshielo de primavera y una reducción en los caudales del período de verano.



Ingeniero Civil - Dirección General de Aguas

En los últimos años han causado una creciente preocupación a la opinión pública mundial las conclusiones de diversos estudios que señalan que el planeta está sufriendo un proceso acelerado de cambio climático. Este fenómeno sería el resultado de la acción sobre las propiedades de la atmósfera de los llamados "gases de invernadero" (anhídrico carbónico, metano, clorofluorocarbonos y óxidos de nitrógeno) producidos por la actividad industrial y agrícola de la humanidad. Avalan estos estudios numerosos modelos climáticos globales (MCG) y las mediciones de la temperatura del aire y de la composición química de la atmósfera. Cabe señalar que las mediciones de temperatura entregan un calentamiento del planeta de 0.5°C durante los últimos 100 años, lo que de acuerdo a las investigaciones paleoclimáticas significa que estamos próximos a alcanzar la más alta temperatura de los últimos 10.000 años.

Por su parte las mediciones de las concentraciones atmosféricas de los distintos gases de invernadero, ponen en evidencia un consistente incremento en todos ellos, de modo que frecuentemente se adopta como hipótesis de trabajo para caracterizar la situación de mediados del próximo siglo, la duplicación del contenido actual de CO_2 atmosférico.

Frente a esta situación se ha producido un amplio esfuerzo internacional orientado a superar las muchas limitaciones que se tienen en relación al conocimiento del problema. En especial, se desarrollan numerosas investigaciones con el propósito de pronosticar la evolución climática futura y su impacto sobre las diversas actividades del hombre y el medio ambiente en general.

Respecto a la posibilidad de evaluación del impacto de un cambio climático sobre los recursos hídricos, la situación se presenta especialmente desfavorable, debido a que la precipitación constituye una variable secundaria en los MCG. Considerando la importancia del problema y las incertidumbres existentes, la Comisión de Hidrología de la Organización Meteorológica Mundial ha sugerido recientemente (OMM, 1989) diversas ideas tendientes a evaluar la sensibilidad de los programas de desarrollo de los recursos hídricos a escenarios climáticos hipotéticos, con el propósito de hacerlos menos vulnerables frente a dichas eventualidades.

El análisis global del posible impacto de un cambio de clima sobre los recursos hídricos de nuestro país, muestra que una zona potencialmente muy sensible es la constituida por las cuencas nivales del Norte Chico y de la Zona Central (Peña y Brown, 1989). Además, la influencia que ejerce sobre el régimen hidrológico de esas cuencas una variable primaria de los MCG, como es la temperatura del aire, hace factible evaluar en una primera aproximación la naturaleza de las modificaciones que se debieran esperar.

Considerando estas circunstancias favorables, en el presente trabajo se analiza, en base a un modelo de simulación matemático, la sensibilidad del régimen hidrológico del río Maipo superior a un cambio climático hipotético.

2. DESCRIPCION DEL MODELO HIDROLOGICO UTILIZADO

Para evaluar la respuesta de la cuenca a un cambio climático se ha utilizado un modelo de hidrología de nieves y hielos, de carácter conceptual, desarrollado especialmente para esta zona, cuyas características principales se pueden consultar en Peña y Nazarala (1987).

Los aspectos más relevantes de dicho modelo, en relación a su aplicabilidad en las condiciones de un escenario futuro modificado, se pueden sintetizar en los siguientes puntos:

- Utiliza como datos de entrada información diaria de precipitaciones, temperaturas y radiación solar.
- El intercambio de energía entre el manto de nieve y el medio ambiente se estima (en días sin precipitación) mediante la expresión empírica:

$$M = 0,0768 \text{ BNET} + 1,10 \text{ Ta} + 4,89 \quad (1)$$

con:

$$\text{BNET} = (1 - \alpha) \text{ ROCI} + (0,59 \sigma \text{ Tka}^4 - \sigma \text{ Tkn}^4) (1 - 0,68 \text{ n}) \quad (2)$$

- Las pérdidas por evaporación y evapotranspiración se expresan en función de la evaporación de tanque medida en una estación base.
- La escorrentía desde las áreas con glaciares es calculada

en forma separada, requiriéndose conocer la superficie cubierta y su distribución en bandas de igual elevación, orientación y pendiente.

En relación a estos tópicos, a continuación se analizan brevemente las principales hipótesis que es necesario efectuar para utilizar el modelo en condiciones modificadas y las limitaciones que presentan los resultados que se obtienen. Conviene señalar que otros aspectos, relacionados con los procesos que se desarrollan a nivel del suelo y que dependen principalmente de las características geomorfológicas de las cuencas, no serán analizados ya que se pueden asumir en una primera aproximación como invariantes. Los principales comentarios en relación a la aplicabilidad del modelo se resumen en los siguientes puntos:

- i) El uso de la expresión (1) está restringida al hecho de que las variables meteorológicas que participan en los procesos físicos mantengan la estructura que implícitamente considera dicha ecuación. Esta observación es especialmente válida en relación a los intercambios de calor sensible y latente, los cuales quedan representados exclusivamente por el término de temperatura y no consideran una dependencia del viento y de la humedad del aire. De este modo, se está suponiendo que la interacción temperatura-humedad-viento propia del clima actual se mantendrá en el futuro.
- ii) En relación a la estimación del balance radiativo neto de la ecuación (2) se pueden efectuar alcances análogos a los hechos en i). En este caso el balance radiativo de onda larga se expresa como una función simple de la temperatura, y no incluye el complejo comportamiento de la columna atmosférica que determina físicamente la contraradiación de la atmósfera. Por lo tanto el uso de esta ecuación significa que se supone que el efecto de mayor contraradiación derivado del efecto de invernadero, se reflejará directamente en la temperatura sin modificar la relación funcional entre esas variables.
- iii) En la estructura del modelo existen diversos algoritmos que permiten utilizar a nivel de la cuenca la información de distintas variables meteorológicas medidas en estaciones determinadas. Dichos algoritmos consideran gradientes de distribución con la elevación, correcciones por efectos locales y otras, todo lo cual se asume que mantiene su va

lidez. La misma situación se presenta en relación a los factores que permiten la aplicación de los datos de un tanque evaporimétrico a la estimación de la evapotranspiración desde el suelo y a la evaporación de la nieve.

Cabe destacar en favor de la aceptación de estas hipótesis el hecho de que las diversas relaciones han sido aplicadas con éxito en las distintas épocas del año y en situaciones meteorológicas muy variadas. Además en las condiciones actuales se usan en un rango de elevaciones extraordinariamente amplio, en el cual las variables meteorológicas se presentan en combinaciones muy distintas.

No obstante lo anterior, considerando que existen diversas restricciones en relación a la aplicación del modelo en condiciones modificadas, se espera que el presente trabajo entregue solamente las tendencias principales en las que se manifiestan los cambios en el régimen hidrológico.

3. IDENTIFICACION DEL ESCENARIO FUTURO Y APLICACION DEL MODELO DE SIMULACION

Con el propósito de evaluar las consecuencias que pudieran tener sobre el clima mundial la aplicación de distintas políticas de desarrollo, se realizó el Villach, Austria (1987), con el patrocinio de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y del Consejo Internacional de Uniones Científicas (CIUC) una reunión de expertos del más alto nivel (World Climate Programme, 1988). En dicha reunión se concluyó que, con un 90% de seguridad, las temperaturas a nivel global en el próximo siglo tendrían la evolución que muestra la figura N° 1. Concordante con esa evolución se estimó que la precipitación y evaporación se modificarán a una escala global en unos 2-3% por cada grado de aumento de temperatura.

En el estado de desarrollo actual de los MCG no es posible tener un conocimiento de la evolución climática detallada a nivel regional, sin embargo en la misma reunión se propusieron las siguientes orientaciones generales para las zonas ubicadas, como gran parte de Chile, en latitudes medias (30 - 60°).

	VERANO	INVIERNO
TEMPERATURA	0.8 a 1.0 x T_G	1.2 a 1.4 x T_G

Con T_G : Cambio de la temperatura media a nivel global.

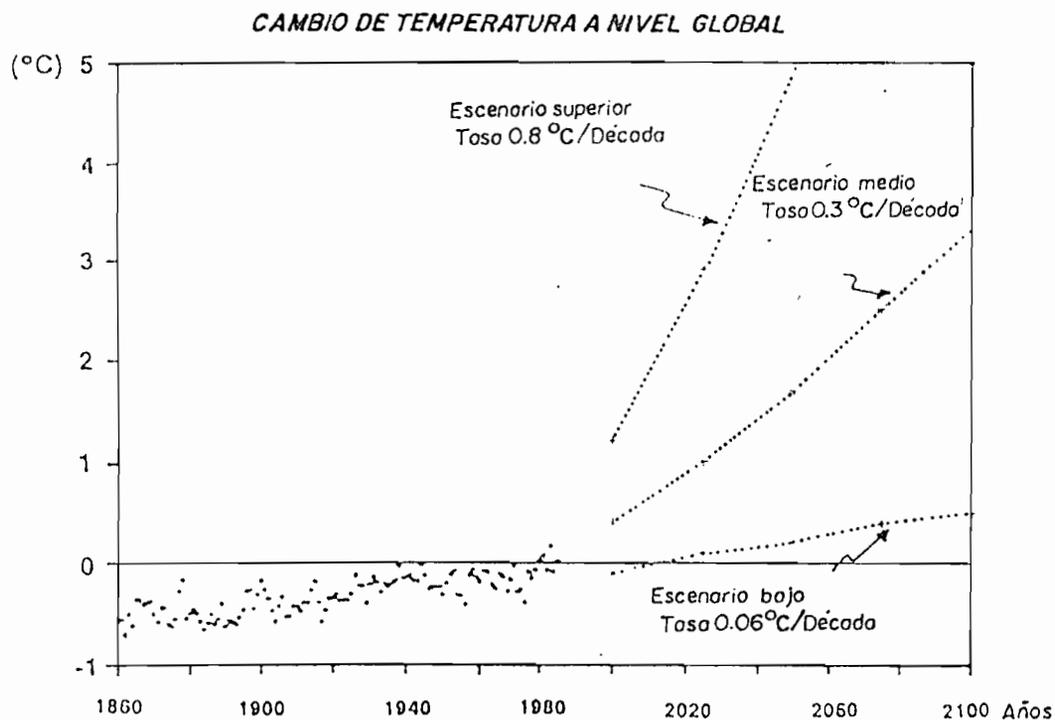


FIG. N° 1

Por su parte, extrapolando información de distintas fuentes, se ha sugerido para la zona central de Chile a mediados del próximo siglo un aumento medio de temperatura de 3° C (Comité Nacional del Programa Internacional de la Geósfera-Biosfera, IGBP, 1989).

De acuerdo a estos antecedentes, en el presente trabajo se ha analizado la sensibilidad del régimen hidrológico frente a un aumento de la temperatura del aire constante e igual a 3° C.

En relación a las precipitaciones, cualquier predicción resulta muy incierta, ya que los MCG por tratarse de una variable secundaria dan inclusive resultados contradictorios entre sí. En la reunión desarrollada en Villach sólo se indicó que en las latitudes medias posiblemente disminuyan durante el verano. El informe del Comité Nacional para el IGBP, recién citado, entrega antecedentes que sugieren una disminución de las precipitaciones en Chile Central, pero señala que no se pueden efectuar proyecciones concluyentes y que una cuantificación de dichas variaciones está fuera de consideración. Conviene además destacar que se desconoce si los eventuales cambios en las condiciones medias estarán acompañados de modificaciones en la distribución de frecuencias de las precipitaciones, cuestión decisiva en

relación a los recursos hídricos, ya que determina la magnitud de las crecidas y la intensidad de los períodos secos. En el presente trabajo, considerando la incertidumbre existente en relación a este tema, se optó por utilizar las series de precipitaciones históricas, sin introducir ningún tipo de modificación.

Para evaluar el impacto de un cambio climático como el analizado, sobre los recursos hídricos de la cuenca superior del río Maipo, se usó el modelo hidrológico de simulación con la serie histórica de valores diarios de precipitación, temperatura y radiación del período 1978/79-1987/88, de tal modo que los caudales simulados por el modelo pudieron ser utilizados como referencia, eliminando de ese modo las distorsiones producidas por el propio modelo. Para tener una idea del grado de ajuste que entrega el modelo entre los valores simulados y medidos, se puede señalar que a nivel mensual el modelo explica el 91% de la varianza de los caudales mensuales de los 10 años seleccionados.

Para simular la respuesta de la cuenca en el escenario climático hipotético se utilizó el modelo con datos de entrada alterados, introduciendo las siguientes modificaciones :

- La serie de temperaturas diarias fue incrementada en un valor constante de 3° C.
- La cobertura de glaciares fue corregida, suponiendo que se presentaría en las áreas ubicadas bajo la línea de equilibrio un retroceso de 300 m, (lo que corresponde aproximadamente a la magnitud del desplazamiento de las isoterms) y que sobre la línea de equilibrio las áreas no sufrirían modificación. Esta hipótesis significa la reducción del área total cubierta de glaciares en un 17%.
- Se estimó que la evaporación de tanque tendría un aumento del 10%, considerando el resultado de diversos tanteos efectuados para determinar la influencia de un aumento de temperatura de 3° C.

Las otras variables de entrada (precipitación, radiación solar) se asumió que no iban a presentar alteraciones.

Estas diferencias son muy significativas en algunos meses de invierno, con valores mayores en un 80-70%, mientras de la disminución de los meses de verano es del orden del 20-30% (Fig. N° 3). Se estima que estos cambios tienen su origen en la elevación de la línea de nieves invernal y en la intensificación del derretimiento de las nieves en los meses de primavera, como resultado del aumento de la temperatura del aire. Cabe señalar que un efecto muy similar ha sido sugerido en estudios realizados en California (Gleick, 1987).

- Los caudales mínimos se muestran notoriamente menos sensibles a un cambio de régimen térmico que los caudales máximos (Figs. N°s 4 y 5). Además se puede observar que en la serie modificada los caudales mínimos de otoño, contrariamente a lo que sucede con el régimen hidrológico medio, resultan inferiores a los originales. En relación a los mínimos de verano se obtienen un 10-20% menores, lo que es especialmente interesante desde el punto de vista del aprovechamiento de los recursos hídricos.
- Los caudales máximos presentan un reforzamiento de las tendencias observadas en el régimen medio, de modo que en el caso extremo los caudales mensuales de invierno de la serie modificada alcanzan a duplicar los valores correspondientes a la situación actual (Fig. N° 5).
- No obstante los cambios observados en la distribución estacional de la esorrentía, se puede apreciar que la duración general de los caudales mensuales se mantiene inalterada (Fig. N° 6). La curva de duración de los caudales del período abril-septiembre (Fig. N° 7), por su parte, muestra cambios significativos, con caudales sustancialmente mayores en la condición modificada para probabilidades de excedencia reducidas pero valores levemente menores para probabilidades de excedencia elevadas. Se estima que este comportamiento aparentemente errático tiene su origen en la alta sensibilidad respecto al ascenso de la línea de nieves que se manifiesta

en situaciones de alta pluviosidad y que no se observa en años secos.

En relación a la curva de duración de los caudales del período de deshielo, se observa un descenso aproximadamente paralelo (en papel log. prob.) (Fig. N° 7).

Es importante recordar en relación al análisis precedente que el período considerado incluye años excepcionalmente lluviosos, como fueron los años 1982 y 1987.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En relación a la sensibilidad de una cuenca pluvio-nival de la zona central del país a un cambio climático caracterizado por un aumento de temperatura de 3° C, y suponiendo que no se presentan cambios en el régimen de precipitaciones ni en el rendimiento hídrico de las cuencas, se pueden destacar las siguientes conclusiones y recomendaciones de mayor interés, las cuales deben ser consideradas como preliminares atendiendo las limitaciones del análisis:

- Como consecuencia del ascenso de la línea de nieves, durante los meses de invierno en años de alta pluviosidad los caudales mensuales pueden aumentar en forma significativa, alcanzando en años extremos a duplicar los observados en las condiciones actuales.
- Debido a la intensificación del deshielo durante el período primaveral, se puede esperar una reducción de los caudales de verano. Esta reducción en años secos se estima del orden de 10-20% y en ausencia de precipitaciones ella puede prolongarse a los meses de otoño.
- Para una evaluación más confiable del impacto de un cambio climático en este tipo de cuencas, resulta necesario el desarrollo de modelos hidrológicos con una base física más sólida.
- Considerando la sensibilidad que muestran sistemas hidrológicos como el analizado, en relación a un eventual cambio climático global y el impacto que dicho cambio puede tener

sobre el problema de la planificación de largo plazo de los recursos hídricos, resulta altamente conveniente el desarrollo de políticas de estímulo a la investigación nacional en estos temas y el estudio de estrategias específicas orientadas a disminuir la vulnerabilidad de los programas futuros frente a dichas eventualidades.

SIMBOLOGIA

- M : Derretimiento diario (mm/día)
- BNET : Balance radiativo neto (Langley/día)
- T_a : Temperatura del aire (°C)
- α : Albedo
- ROCI : Radiación de onda corta (Langley/día)
- T_{ka} : Temperatura del aire (°K)
- T_{kn} : Temperatura de la nieve (°K)
- σ : Constante de Stefan-Boltzman
- n : Nubosidad

BIBLIOGRAFIA

- Comisión de Hidrología. Informe final observado de la octava reunión. Organización Meteorológica Mundial. OMM N° 715. 1989.
- Comité Nacional del Programa Internacional de la Geosfera-Biosfera. El cambio Global del Clima y su importancia en Chile. Documento. Mayo 1989.
- Gleick P. Global Climatic Changes and regional hydrology: impacts and resources, en the influence of Climate Change and variability on the hydrology regime and water resources. IAHS. Publ. N°168. 1987.

- Peña H. y E. Brown. La evaluación y aprovechamiento de los re cursos hídricos del país en el siglo XXI. Congreso La Ingeniería Chilena en el S. XXI. Instituto de Ingenieros. 1989
- Peña H. y B. Nazarala. Simulación de la escorrentía de deshielo en una cuenca nivo-glacial de los Andes de Chile Central. VIII Congreso Nacional de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. 1987
- World Climate Programme. Report of the international Conference the Assessment of the role of carbon dioxide and of other greenhouse gases in climate variations and associated impacts. (Villach, October 1985). WMO Publ. N° 661, 1985.
- World Climate Programme. Developing policies for responding to climate Change. WMO - UNEP. WMO/TD N° 225, 1988.

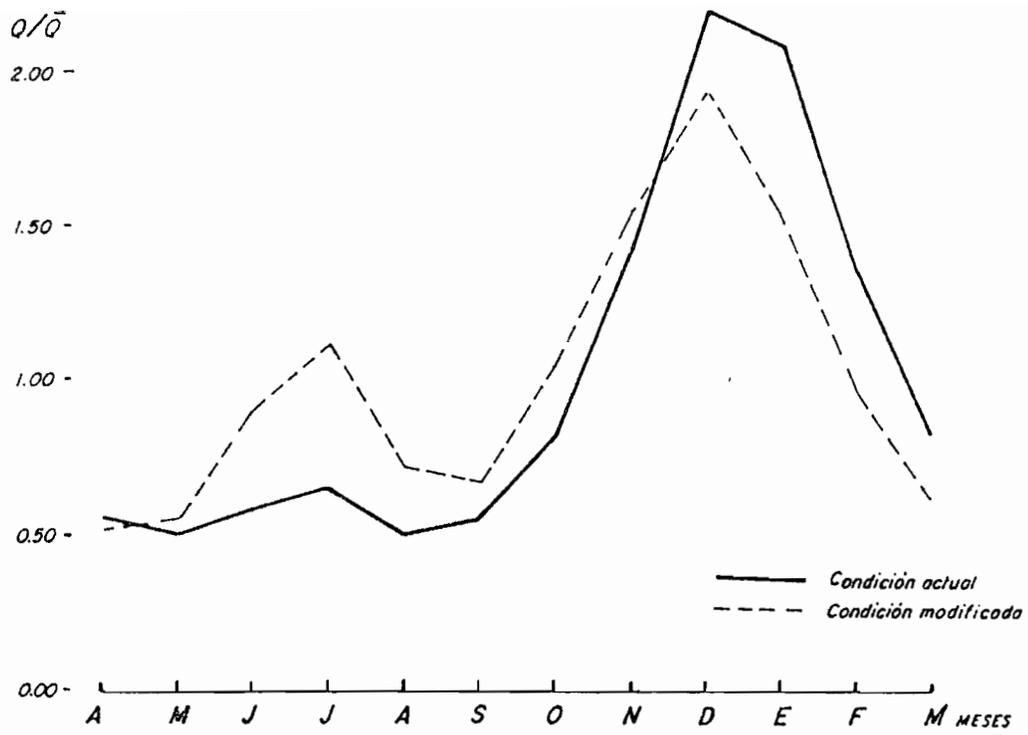


Fig. 2 Régimen Hidrológico medio.

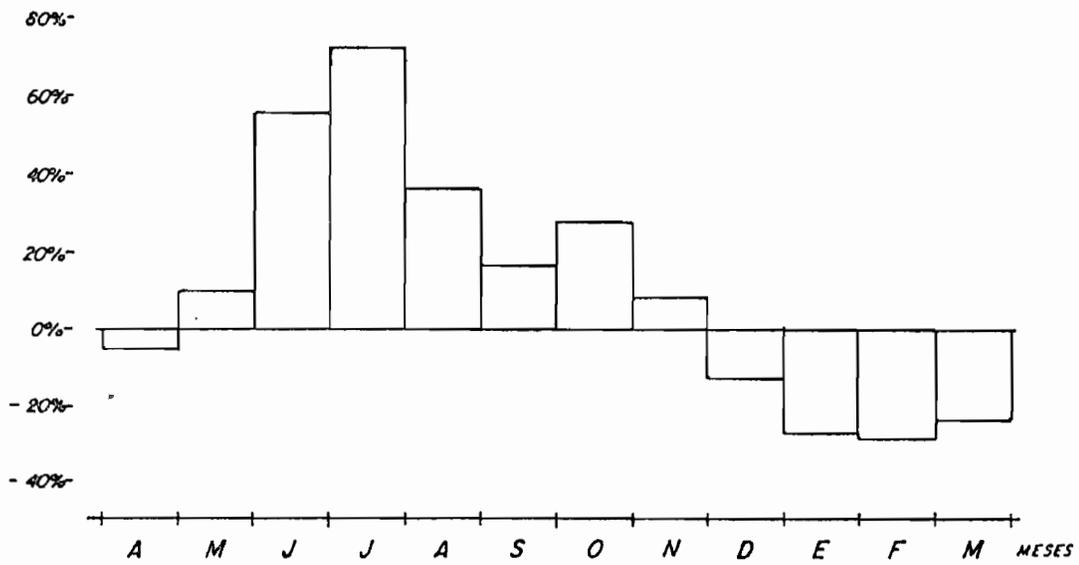


Fig. 3 Diferencias porcentuales en el régimen Hidrológico medio.

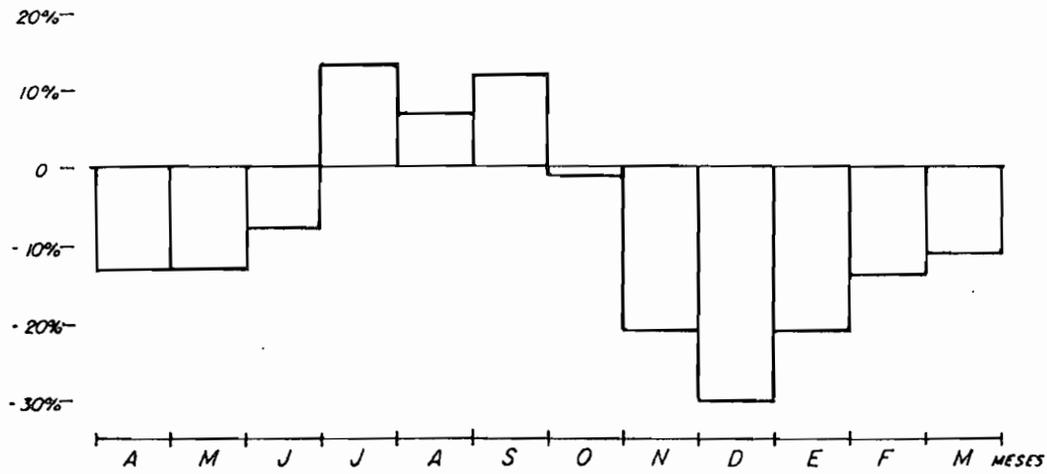


Fig. 4 Diferencias porcentuales entre los caudales mínimos de las series 1978/79 - 1987/88.-

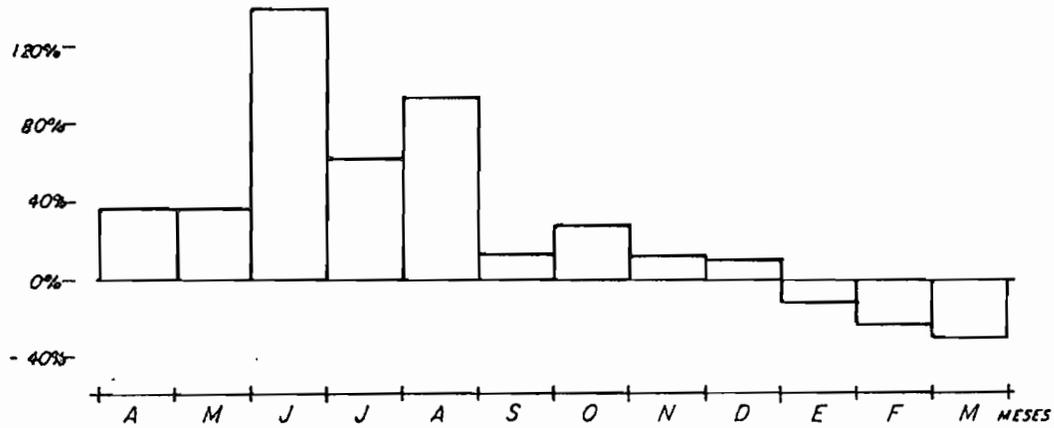


Fig. 5 Diferencias porcentuales entre los caudales máximos de las series 1978/79 - 1987/88.-

Q/\bar{Q}

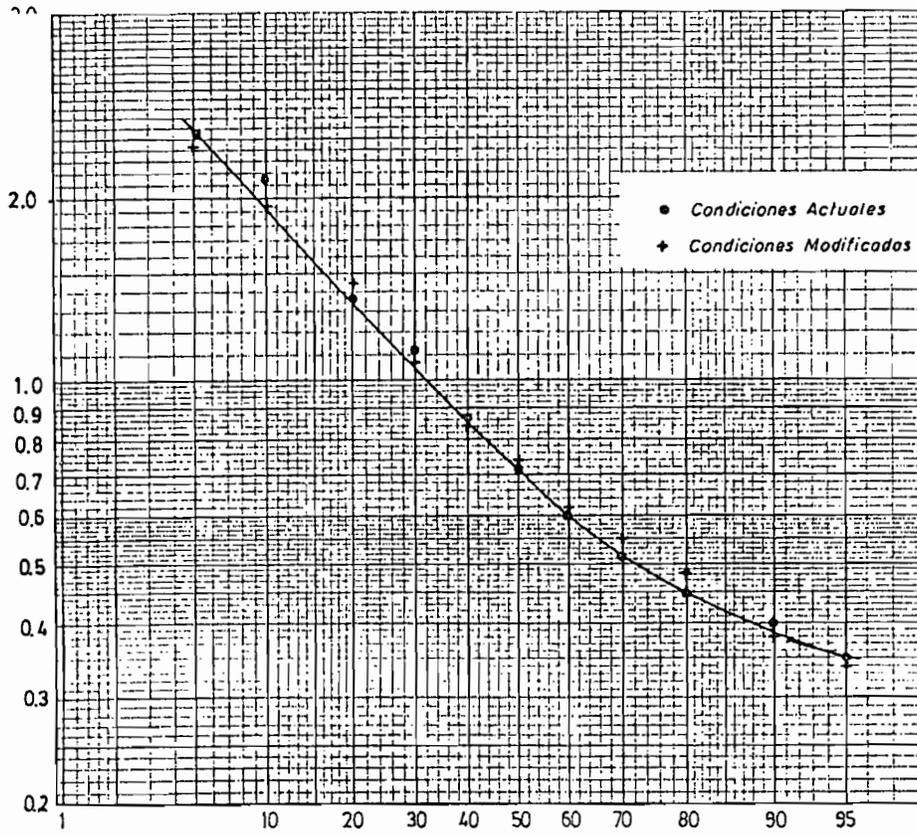


Fig. 6 Duración general de caudales mensuales.

Q/\bar{Q}

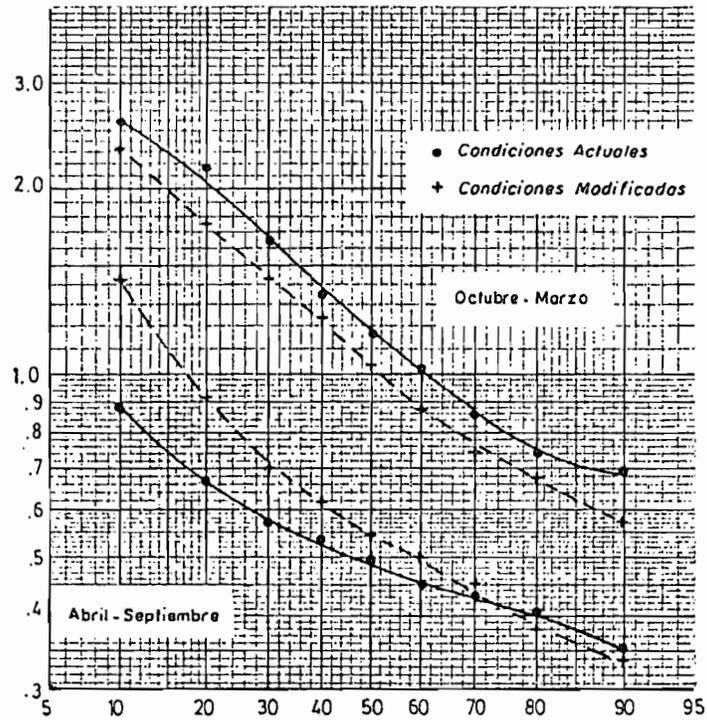


Fig. 7 Duración de caudales periodos
Abril-Septiembre y Octubre-Marzo.

CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS HIDRICOS



3 5617 00009 9390