REFERENCIAS

- Banjevic, D (1988). On some statistics connected with runs in Markov chain. J. Appl. Prob. 25-815-821

- Dracup, J. A., Lee, K. S. y Paulson, E. G. (1980). On the definition of draught. Water Res. Res. Vol. 16 Nº 2, 297-302.

- Fernández L., B. y Velásquez, M. (1987). Identificación y caracterización de sequías meteorológicas en la zona central de Chile. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. 21-24 Octubre, U. de Santiago de Chile.

- Fernández L.,B. y Gutiérrez, M. (1988). Proceso semimarkoviano para la modelación de sequías. XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba.

- Guerrero-Salazar, P. y Yevjevich, V. (1975). Analysis of Drought characteristics by the theory of runs. Hyd. Paper 80, C.S.U. Fort Collins.

- Llamas, J. y Siddiqui, M. Ch. (1969). Runs of precipitation series. Hyd. Paper 33. C.S.U. Fort Collins.

- Millán, J. y Yevjevich, V. (1971). Probabilities of observed draught. Hyd. Paper 50 C.S.U. Fort Collins.

- Schwager, S. J. (1983). Run Probabilities in sequences of Markov-Dependent trials. Journal of the Am. Stat. Ass., Vol. 78 Nº 381, pp. 168-175.

- Yevjevich, V. (1967). An objective approach to definition and investigation of continental drought. Hyd. Paper 23, C.S.U. Fort Collins.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

IX CONGRESO NACIONAL

CALCULO DE LA CRECIDA MAXIMA PROBABLE PARA LA CENTRAL PANGUE

EMILIO IRAGUEN I. (1)

CARLO CARVALLO A. (2)

RESUMEN

La ENDESA está desarrollando el proyecto hidroeléctrico con embalse que aprovecha la cuenca alta del río Bío-Bío mediante la construcción de una presa en la angostura Pangue.

En este trabajo se resume la metodología que se ha seguido para estimar la Crecida Máxima Probable afluente al embalse, la que se utiliza para estudiar diferentes verificaciones de carácter hidraúlico. Esta crecida está asociada a la Precipitación Máxima Probable y su determinación se basa en factores meteorológicos y en una relación Precipitación-Escorrentía para la que se ha utilizado el Hidrograma Unitario.

Respecto a la Precipitación Máxima Probable, se consideró el efecto orográfico en la distribución espacial del temporal como también otros factores que conducen a una maximización razonable de la escorrentía en la eventual ocurrencia de dicha PMP.

(1) Ingeniero Civil. División Estudios Hidrológicos ENDESA.
(2) Egresado Ingeniería Civil. División Estudios Hidrológicos ENDESA.

1.- INTRODUCCION.

La ENDESA ha programado la construcción de la Central Pangue aprovechando los recursos hídricos de la cuenca alta del río Bío-Bío, específicamente los caudales afluentes de este río a la estación fluviométrica de Bío-Bío en San Pedro.

La presa, de 113 m de altura, se ubicará en la angostura del valle en la localidad de Pangue, con una cuenca hidrográfica pluvionival de 5.430 km^2. La Lámina N° 1 muestra la zona del Proyecto.

Con el objeto de efectuar una serie de verificaciones de tipo hidraúlico del comportamiento de la presa para una situación hidrológica muy exigente, se ha calculado la crecida extrema que pudiese ocurrir a partir de la Precipitación Máxima Probable, PMP.

Este concepto, PMP, está asociado al límite termodinámico que necesariamente debe tener la atmósfera en su capacidad para condensar el vapor de agua que contiene, en una zona determinada y durante un intervalo de tiempo dado.

Los métodos probabilísticos no consideran el fenómeno físico que genera la precipitación si empieza a ser extrapolada a períodos de retorno cada vez mayores. En este sentido, la PMP teóricamente lo considera, pero en cambio, no asocia una probabilidad a la precipitación.

El método utilizado para el cálculo de la PMP es, en general, el propuesto por la World Meteorological Organization, WMO, (WMO N° 332), con algunas adaptaciones a la realidad presente en la cuenca de aplicación. Entre estas últimas cabe señalar la influencia de la Orografía en la distribución espacial del temporal, lo que limita su libre transposición en el área de la cuenca. Este cambio es sin duda el de mayor importancia y podría considerarse como un factor que siempre estará presente en las cuencas cordilleranas de Chile. En todo caso, es un factor que puede ser ponderado en la medida que se cuente con información pluviográfica en el área.

Esta metodología, como se describe en el trabajo, implica el proceso de una cantidad voluminosa de información hidrometeorológica inherente a la cuen-

ca, además de antecedentes provenientes de las características termodinámicas de la atmósfera estándar o seudo-adiabática.

2.- BASE TEORICA.

El aire atmosférico puede contener una cantidad máxima de vapor de agua, la que depende únicamente de su temperatura. En ese estado se dice que el aire esta saturado.

Si el aire se encuentra con un grado de humedad por debajo de su saturación, es posible que la consiga mediante un enfriamiento hasta una temperatura que se llama entonces "Temperatura de punto de rocío" Tr; a partir de ese momento el aire está en condiciones de condensar el vapor de agua que excede a la saturación. Cuanto mas alta es la temperatura Tr, mayor es la cantidad de vapor de agua que se requiere para saturar el aire atmosférico.

Llamando "es" y "e" a las tensiones parciales de vapor de agua en la atmósfera saturada y no saturada respectivamente, se define la humedad relativa H a la razón e/es la que suele expresarse en por ciento. La medida de la temperatura del aire T, y la humedad relativa H, son suficientes para calcular la temperatura del punto de rocío del aire no saturado ya que la relación entre "es" y T es conocida. Tambien se conoce el contenido de agua de una columna de aire entre 1.000 y 200 mb de presión si se conoce la temperatura del punto de rocío Tr. Por lo tanto, bastará medir la temperatura y la humedad del aire para determinar el contenido de agua potencialmente precipitable en una columna total de aire.

El concepto que se aplica para calcular la PMP deriva de las ideas antes expresadas. En efecto, si se conoce la temperatura de punto de rocío con que ocurrió una tormenta, y se supone que esa misma tormenta pudo haber ocurrido con la temperatura de punto de rocío máxima observada en un período de 50 años, por ejemplo, se supone que el agua precipitable podría haber sido mayor, en el valor correspondiente a la razón entre los contenidos de humedad que derivan del Tr máximo Wm, y el de la tormenta, Ws.

$$K = \frac{Wm}{Ws} > 1.0$$

3.- METODOLOGIA.

La metodología seguida para la estimación de la crecida máxima probable en la Central Pangue, se muestra simplificadamente en la Lámina Nº 2 mediante un diagrama de flujo, el que muestra secuencialmente las grandes etapas del método. Cada una de éstas se explica brevemente, agregando algunos comentarios cuando es oportuno.

3.1. RECOPILACION DE ANTECEDENTES.

Una de las principales características de la utilización de métodos hidrometeorológicos en la estimación de la crecida máxima probable, es la gran cantidad de información que se requiere. Es así como se necesita conocer las características geomorfológicas de la cuenca en estudio, además de información pluviográfica y/o pluviométrica, estadísticas de temperatura y humedad, estadísticas de caudales, etc; todo esto, para diversas estaciones del área que se está estudiando.

No solamente hay que considerar estaciones que se ubiquen dentro de la cuenca en estudio, sino también aquellas de las cuencas vecinas, con el fin de precisar el trazado de las isoyetas del temporal.

Es muy usual en las cuencas cordilleranas de nuestro país, como es el caso de la hoya del Alto Bío-Bío, que no se disponga de estadísticas pluviométricas en las partes altas de ellas. Es por esto, que la precipitación en dichas zonas se estima en base a las estadísticas de caudales que existen en las subcuencas de la parte alta de la hoya, estimando el déficit de escorrentía mediante algún método como puede ser el de la Curva Número.

3.2.- ANALISIS DE LOS ANTECEDENTES.

La información recopilada se ha corregido por errores o mal funcionamiento de los instrumentos, logrando que ésta sea homogénea y consistente. Las estadísticas incompletas se han rellenado mediante correlaciones con estaciones cercanas, al igual que aquella estadística deficitaria para la cual se cuenta con suficientes estaciones vecinas y completas que permitan estimarla

con adecuada precisión. La estadística dudosa o errónea que no pudo corregirse, se ha desechado.

3.3.- ELECCION DE TEMPORALES Y ESTACIONES.

Después de una revisión preliminar de las estadísticas de las tormentas históricas se obtuvo una serie de temporales para los cuales se verificó la existencia de información pluviográfica y termohigrográfica. Es recomendable considerar temporales que se hayan producido en las distintas épocas del año, con el fin de analizar su comportamiento bajo las condiciones de maximización.

Finalmente, se eligieron para el estudio todos los temporales, de entre los mas intensos, para los cuales existe adecuada información hidrometeorológica. En el caso de la hoya del Alto Bío-Bío, la información que se recopiló para cada temporal seleccionado, fue la lluvia cada 6 horas, en cada una de las estaciones, como también datos de humedad y temperatura cada 2 horas. Además, para la estación considerada como base para el estudio (Pangue) se recopiló datos de temperatura y humedad horaria, correspondiente a un período estadístico de 12 años.

3.4. ISOYETAS

El método utilizado contempló la confección de planos de Isoyetas, correspondientes a la lluvia total de cada uno de los temporales seleccionados.

3.5. CURVAS PRECIPITACION-DURACION-AREA; PDA.

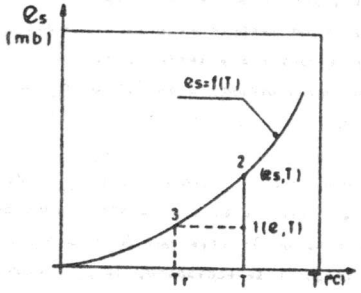
Se definieron las curvas PDA para cada uno de los temporales seleccionados. Estas curvas son las que se maximizan, con el objeto de saber cual es la máxima cantidad de agua que puede precipitar en distintas áreas de la cuenca y para distintas duraciones de lluvia. El método utilizado para el trazado de las PDA, se encuentra en WMO, 1969.

3.6. TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCIO DEL TEMPORAL; Trs.

Para la obtención del factor de maximización de cada temporal, se obtuvo la temperatura de punto de rocío representativa de éste. Se consideró como

representativa la máxima temperatura de punto de rocío persistente por 12 horas.

El gráfico siguiente esquematiza el procedimiento para obtener la temperatura de punto de rocío, a partir de datos de temperatura y humedad actuales.



en que "es" : presión parcial de vapor saturado
T : temperatura del aire

La posición 1, corresponde al aire en su estado natural. La posición 2 corresponde al aire saturado a la misma temperatura. Luego dado H, T se puede calcular "es" mediante la curva conocida es= f (T), y "e" mediante e= H x es. Finalmente se determinó Tr mediante $T = f^{-1}$ (es).

3.7.- TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCIO MAXIMA; Trm.

Se determinó la máxima temperatura de punto de rocío persistente por 12 horas que puede ocurrir en la zona. El procedimiento fue el siguiente:

Para el período estadístico considerado se determinó la estadística horaria de temperatura y humedad, con lo cual se calculó la máxima Tr persistente por 12 horas para cada mes y cada año. Así se tiene una estadística con los máximos Tr persistentes por 12 horas mes a mes.

A cada serie mensual se le ajustó una distribución normal y se determinó la máxima Tr persistente por 12 horas con un período de retorno de 100 años.

Se utiliza este criterio cuando las estadísticas de humedad y temperatura no son lo suficientemente extensas como para considerar el valor máximo observado de la temperatura de punto de rocío. Sin embargo, puede utilizarse el valor máximo observado cuando la longitud de las estadísticas son 50 años o más, y por lo tanto son suficientemente representativas de los fenómenos que pueden ocurrir.

3.8 AGUA PRECIPITABLE DURANTE EL TEMPORAL; Ws

Habiendo obtenido la Trs del temporal, es fácil determinar el agua precipitable existente en la atmósfera durante el mismo, Ws, haciendo uso de tablas que entregan el agua precipitable como función de la temperatura de punto de rocío al nivel 1.000 mb o nivel del mar. (WMO 1986)

3.9 AGUA PRECIPITABLE MAXIMA; Wm

Para los Trm (100 años) ajustados y reducidos al nivel 1.000 mb, se determina el agua precipitable mes a mes, que se denomina Wm, mediante las tablas que existen para tal efecto.

3.10 FACTOR DE MAXIMIZACION; K

Los factores de maximización se calculan de acuerdo a la siguiente relación:

$K = (Wm/Ws) > 1,0$

Hay que notar que el Wm utilizado para cada temporal, es el correspondiente al mes en que ha ocurrido dicho temporal.

3.11 CURVAS PDA MAXIMIZADAS

Teniendo las curvas PDA y los factores de maximización correspondientes a los temporales, las curvas PDA se desplazan multiplicándolas por el factor K respectivo.

En este momento se está en condiciones de decir cuánto podría haber llovido durante cada temporal, si es que la atmósfera hubiese estado en condicio-

nes maximizadas en lo que se refiere a la cantidad de agua precipitable presente en ella.

3.12 P.M.P

A partir de las curvas PDA maximizadas, se determinó la PMP, de acuerdo al siguiente procedimiento :

En un gráfico se dibujaron todos los valores de la precipitación máximizada de las distintas tormentas, y para una misma duración. Luego se trazó la envolvente a esta nube de puntos, adoptándose esta curva como la PMP para esa duración.

El criterio de adoptar la envolvente a todos los temporales se considera adecuado, ya que es poco probable que una tormenta alcance valores extremos de lluvias para toda duración y superficie de cuenca simultáneamente.

3.13 HIDROGRAMA UNITARIO (H.U.)

El método empleado en la evaluación de la crecida máxima probable, es el método del Hidrograma Unitario. Este es ampliamente conocido, por lo que no se entrará en detalles en cuanto a su aplicación. El hidrograma unitario utilizado debe corresponder al área de la cuenca aportante que se haya estimado como la más desfavorable desde el punto de vista de la crecida, ya sea en caudal máximo y/o volumen.

3.14 CONSIDERACIONES PARA LA EVALUACION DE LA CMP

Además de haber considerado en la estimación de la PMP condiciones maximizadas de temperatura y humedad, en la evaluación de la crecida máxima probable deben considerarse las condiciones de la cuenca y de la lluvia más desfavorables, de modo de obtener la mayor crecida físicamente posible.

Cuando se habla de condiciones de la cuenca y la lluvia, deben entenderse factores tales como :

- Superficie de la cuenca aportante más desfavorable; aspecto muy importante en cuencas de régimen nivopluvial.
- Infiltración de la precipitación en la cuenca.
- Cobertura de nieve, suceptible de fundirse producto de la lluvia sobre ella.
- Distribución temporal de la lluvia que genera la crecida.
- Gasto base de la crecida.

3.15 CRECIDA MAXIMA PROBABLE; CMP

Todos los factores mencionados en los puntos 3.13 y 3.14 anteriores se evalúan adecuadamente, de modo que produzcan la condición más desfavorable, pero descartando situaciones imposibles de ocurrir en la realidad.

4.- RESULTADOS Y COMPARACION CON METODOS ESTADISTICOS

4.1 PRECIPITACIONES

Luego del análisis de 18 temporales seleccionados, se llegó a estimar la PMP en la hoya del Alto Bío-Bío, cuyos resultados se resumen a continuación:

Hoya del Alto Bío-Bío
Precipitación Máxima Probable (mm)

Duración (h)	Area 25 (km2)	Area 5.430(km2)
24	522	198
48	692	285
72	813	334

Con objeto de comparar los valores estimados de la PMP, se realizó un análisis de frecuencia de precipitaciones de 1, 2 y 3 días en la estación de Pangue, ajustando una distribución de Gumbel. Los valores que se obtuvieron son los siguientes :

Precipitaciones Máximas en Pangue

Periodo de retorno (años)	1 día (mm)	2 días (mm)	3 días (mm)
50	318	463	585
100	348	508	641
500	418	611	771
1000	448	655	826
5000	512	770	962
10000	541	819	1016

Como se puede observar, la precipitación máxima para un área de 25 km2 (que correspondería a una precipitación puntual) estimada mediante la maximición de las curvas de PDA, está en el orden de un periodo de retorno de 5.000 años en la estación de Pangue, de acuerdo a la distribución de Gumbel.

Una comparación de dichos valores con el método estadístico de Herschfield modificado, aplicado a las estadísticas de la estación meteorológica de Pangue, indica un factor de frecuencia entre 4 y 6; valor relativamente bajo comparado con otras regiones del mundo y con estudios realizados con estadísticas del país. (Stowhas, 1983)

4.2 CAUDALES

La crecida asociada a la PMP, considerando el total del área como cuenca aportante a la escorrentía, se resume en el siguiente cuadro :

Hoya del Alto Bío-Bío
Crecida Máxima Probable (m3/s)*

PMP en	Distr. inferior de precipitación	Distr. media de precipitación	Distr. superior de precipitación
24 horas	12.200	12.950	13.650
48 horas	14.400	10.800	14.300
72 horas	8.650	9.400	11.150

* : Se consideró un flujo base de 516 m3/s (Carvallo e Iragüen, 1989)

La crecida milenaria, estimada a partir de registros fluviométricos en la estación Bío-Bío en San Pedro, alcanzó a los 8.000 m3/s, mientras la crecida decamilenaria llegó a los 10.600 m3/s (ENDESA, 1988). Esto muestra que la crecida máxima probable entrega valores bastante superiores a los correspondientes a los criterios de diseño usuales.

5.- COMENTARIOS

5.1 PRECIPITACION MAXIMA PROBABLE

El procedimiento y metodología de cálculo de la PMP adoptado en este estudio difiere un tanto respecto al procedimiento estándar, debido a las particulares características de la zona del proyecto donde la precipitación está fuertemente influenciada por la orografía.

Los planos de isoyetas de las diferentes tormentas analizadas mostraron que la ubicación del centro de los distintos temporales era aproximadamente la misma; ubicándose éste sistemáticamente en los alrededores de la estación meteorológica Pangue. Esto significa que el efecto orográfico y el microclima del área condicionan la distribución espacial de las tormentas.

Debido a este fuerte efecto orográfico se consideró para el análisis de las curvas PDA, el área correspondiente a zonas de isoprecipitación limitada por la cuenca.

Este criterio de cálculo, que intuitivamente podría pensarse que se debiera aplicar a cualquier cuenca cordillerana, no se puede generalizar, debido a que no existen suficientes estudios al respecto que fijen una norma de calculo de este tipo para cualquier cuenca cordillerana de nuestro país. Existe otro estudio similar en la cuenca del río Melado, en el cual también los temporales quedan determinados espacialmente por el efecto orográfico imperante en la zona.

5.2 CAUDAL MAXIMO PROBABLE

La crecida máxima probable CMP, se eligió de entre las ondas de crecida correspondientes a la PMP de distinta duración y distribución temporal, consi-

derando que éstas sólo pueden ocurrir durante la temporada de invierno. La lluvia más crítica correspondió a la PMP de 48 horas, con la cual se alcanzó el valor de 14.400 m3/s.

Dado que la PMP se supone ocurrirá en condiciones de temperatura de punto de rocío extrema, se determinó que la cuenca pluvial, en esas condiciones, corresponde al total de la cuenca afluente al embalse. Además, la cuenca total resultó ser la más crítica respecto al caudal máximo que genera en ella la PMP de 48 horas.

Es indiscutible que el considerar el total del área de la cuenca como cuenca pluvial en la evaluación de la CMP puede aparecer a primera vista exagerado, si se considera que la cuenca del Alto Bío-Bío es una cuenca de comportamiento pluvionival. Sin embargo, a la luz de los antecedentes, los cuales indican que algunas tormentas se habrían producido con altas temperaturas lo que significa que la precipitación líquida habría caído sobre toda la cuenca, esta consideración no sería exagerada, sino solamente un comportamiento poco usual de la cuenca.

En relación con lo anterior, puede comentarse el temporal de Junio de 1986, para el cual debido a la alta temperatura con que se presentó, se produjeron precipitaciones de tipo pluvial sobre la cota 1.500 m s.n.m, nivel normal de la línea de nieve en los meses de invierno en la zona que abarcó el temporal. Debido a lo anterior se produjo un importante aumento de la cuenca pluvial colaborante, con fusión de nieve de las zonas altas a causa del agua lluvia caída y un gran incremento del volumen de escorrentía. (Verni, 1986)

Así se ve, que situaciones como las del temporal de Junio de 1986 están previstas en la evaluación de la CMP.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- World Meteorological Organization. (1969). "Manual for Depth Area Duration Analysis of storm precipitation", WMO - Nº 237. TP.129. GENEVA.

- World Meteorological Organization. (1986). "Manual for Estimation of probable Maximum Precipitation", WMO - Nº 332. GENEVA.

- Stowhas Ludwig. (1983). "Precipitaciones máximas diarias en Chile", VI Congreso Nacional de Ingeniería Hidraúlica. Santiago.

- Carvallo Carlo e Iragüen Emilio.(1989). " Determinación de la Crecida Máxima Probable por métodos hidrometeorológicos. Aplicación en la Hoya del Alto Bío-Bío", Informe Inédito. Santiago.

- División Estudios Hidrológicos.(1988). "Central Pangue. Estudio de los Recursos Hídricos", Informe OICOI Nº 8/88. ENDESA. Santiago.

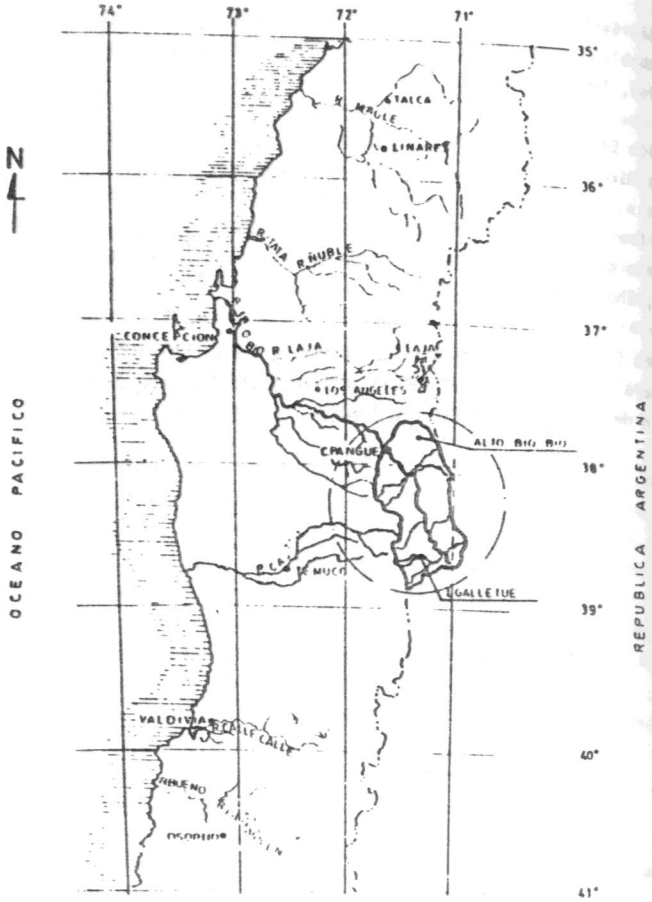
- Verni Francisco.(1986). "Efectos de las crecidas de los días 15, 16 y 17 de Junio de 1986 sobre obras del sistema eléctrico interconectado central", ENDESA. Santiago.

- Iragüen Emilio, López Maximiliano, Carvallo Carlo (1986). "Estudio Preliminar para la aplicación del Método de Precipitación Máxima Probable en una cuenca de Cordillera". Estudio Inédito. ENDESA. Santiago.

LAMINA N°1

PLANO DE UBICACION

CUENCA AFLUENTE AL EMBALSE CPANGUE



LAMINA N°2

CRECIDA MAXIMA PROBABLE

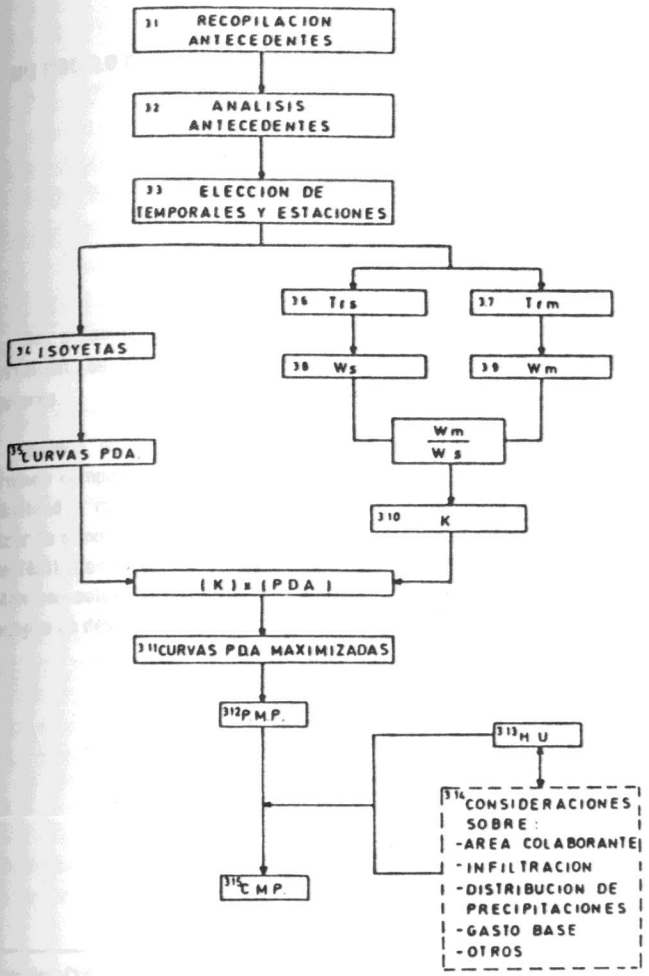



DIAGRAMA ESQUEMATICO DE LA METODOLOGIA