



Fig. 3-38

PROGRAM: **FORMATO DEL ARCHIVO 'FKEYL2'**

CARD TYPE:		QTY.:		FORMAT DATOS DE LOS REGISTROS Y COMENTARIOS																																																																											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
CODIGO PLU		AÑOS DE		# DE		LLUVIA PRO.		LLUVIA PRO.		CAUDAL PRO.		AÑOS REG.		GRADO DE		GRUPO DE		COMENTARIOS					COM																																																								
REGISTRO		HISTOR		AÑOS		ANUAL		ANUAL		ANUAL		DE		DE							E S P																																																										
INC.		FINAL		COMPL		HISTORICA		AJUSTA DA		EXTENDIDA		EXT.		EXT.							S LINEA DE																																																										
																					NO-COM																																																										

E.H.

Fig. 3-39

PROGRAM: **FORMATO DEL ARCHIVO "BASIN 1"**



CARD TYPE:		QTY.:		FORMAT DATOS MORFOMETRICOS Y DETALLES DEL SISTEMA FLUVIAL																																																																											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
CODIGO		#		#		NOMBRE DE CUENCA													AREA		ALTURA		LONG		FACTOR		PENDIENTE		DENSID.		# DE		# DE		#																																												
DE		DE		DE															TOTAL		PROM.		DE RIGS		DE FORMA		PROM.		DE DESAG.		TRAMOS		PUNTOS		DE																																												
CUENCA		VERT.		CNCA.															KM ²		M.S.N.M.		KM		%		Km				REG																																																

esencia los archivos contienen la siguiente información:

Estaciones Hidrométricas:

- FKEYH1 características físicas
- FKEYH2 detalles de los registros históricos y extendidos, grupos de extensión y comentarios codificados
- FKEYH3 parámetros morfométricos e hidrológicos deducidos del modelo de la cuenca; parámetros estadísticos del caudal máximo anual.

Estaciones Pluviométricas :

- FKEYL1 características físicas
- FKEYL2 detalles de los registros históricos y extendidos y comentarios codificados

Cuencas :

- BASIN1 parámetros morfométricos y detalles de los sistemas fluviales.
- BASIN2 parámetros hidrológicos y detalles del potencial teórico

Los archivos maestros se localizan en el disco HYMOD junto a los programas asociados de escritura de informes.

3.4.4.4 Extracción de Información

Aparte de las amplias ventajas en el manejo de archivos proporcionados por el sistema operativo de la computadora, se desarrollaron durante el estudio un número considerable de programas para una eficiente extracción de los datos almacenados.

Estos programas son de dos tipos.

Los primeros agrupan los datos pertinentes y los ponen en forma compatible a la entrada de los principales programas analíticos empleados. Los segundos constan de aquellos programas que extraen información y dan una salida en formato adecuada para su inclusión en los informes.

3.4.4.5 Manejo de Archivos y Actualización

Todos los archivos creados según el sistema operativo Data General RDOS son de tipo expandible; esto es, no hay un límite predeterminado para el tamaño físico del archivo. Como resultado, la puesta al día de archivos de datos puede efectuarse fácilmente cuando se dispone de nueva información. Además, el sistema operativo mantiene registros del tamaño actual de todos los archivos (en bloques), la fecha de creación y la última fecha de acceso. La capacidad para crear sub-directorios en cada disco de almacenamiento individual posibilita al usuario agrupar los archivos de acuerdo a su función.

4. ESTIMACION DEL CAUDAL MEDIO Y EL POTENCIAL HIDROELECTRICO TEORICO

4.1 INTRODUCCION

La evaluación sistemática del potencial teórico y técnico de un país requiere que se dé la debida importancia a toda la información hidrológica disponible relacionada con la estimación de las características de los caudales y aquellas condiciones que influyen en el diseño y la ejecución de proyectos hidroeléctricos. Sin embargo el nivel de análisis hidrológico que puede ser llevado a cabo está limitado por los recursos disponibles de tiempo, personal y servicios de la computadora. De esta manera tiene que hacerse un balance entre la asignación de tales recursos y un nivel de confianza en los resultados que esté en relación a aquellos asociados con otras partes del estudio y los datos disponibles.

El parámetro hidrológico básico para la selección y evaluación de centrales hidroeléctricas potenciales es el caudal medio esperado en la localización de proyectos, ya sea que ocurra naturalmente o aumentado por derivación. Para los propósitos de planeamiento a nivel de cuenca o nacional, esto implica que se requiere las estimaciones del caudal medio en puntos de todos los ríos principales y sus mayores afluentes. Teniendo la disponibilidad de tales estimados y la pertinente información topográfica, se puede entonces, calcular el potencial hidroeléctrico teórico de la región.

Las secciones siguientes describen el trabajo realizado durante el presente estudio a fin de estimar el caudal medio en todos los ríos principales del Perú, y la consiguiente evaluación del potencial teórico. Debido al carácter nacional del estudio fue posible, y necesario, llevar a cabo estas actividades en una forma secuencial a fin de suplir la gran falta de información y la necesidad de identificar características regionales. A fin de estimar el caudal medio - a largo plazo - en cada tramo de finido del río se construyó un modelo matemático simple de cada cuenca. Estos modelos operan basado en los valores medios a largo plazo de escorrentía y precipitación y de su variación con los parámetros morfométricos. Por consiguiente es necesario estandarizar todos los registros históricos disponibles a un periodo base que sea representativo de las condiciones a largo plazo.

No obstante que los modelos son conceptualmente simples, éstos brindan una base cuantitativa para analizar la naturaleza de la cuenca en consideración y el potencial para desarrollar los recursos hidráulicos correspondientes. Tanto los resultados de este estudio como los modelos mismos se pueden considerar, en este sentido, como una herramienta valiosa para el futuro planeamiento del uso de los recursos hidráulicos superficiales en el Perú. Considerando las limitaciones de tiempo y datos, hay bastante campo para refinar estos modelos y se espera que el énfasis dado en la cuantificación alentará una estandarización de la información la que, indudablemente traerá beneficios a todos los sectores. Este objetivo tomará mayor importancia cuando se dé el debido énfasis a proyectos de múltiples propósitos y, a la necesidad de prestar más atención a la interacción entre proyectos.

4.2 MODELOS DE CUENCAS

4.2.1 Metodología de los Modelos de las Cuencas

El modelo matemático empleado para la estimación del caudal medio a largo plazo y el correspondiente potencial hidroeléctrico teórico, está incorporado en el programa de cómputo HYMOD. Puesto que en el Volumen XI se incluye una descripción total del programa, aquí simplemente se presentará un breve resumen de los principios subyacentes y los datos de entrada requeridos.

El programa HYMOD fue originalmente desarrollado por los consultores en el curso de un estudio del potencial hidroeléctrico de Guatemala, América Central. Fue diseñado de tal modo que proporcionase diversos métodos para la estimación del caudal medio en un punto dado. La metodología básica empleada consiste en que las contribuciones de escorrentía de áreas de captación incrementales se estiman usando relaciones previamente deducidas y los caudales acumulados resultantes comparados con los valores históricos o extendidos en los puntos aforados. Las discrepancias son eliminadas ajustando proporcionalmente las contribuciones de aguas arriba.

En el presente estudio, la contribución de cada área de cuenca incremental fue estimada usando relaciones deducidas de la forma

$$DQM(i) = K * DA(i) * q(i)$$

donde

$DQM(i)$ es el caudal incremental en $m^3/seg.$ proveniente de la cuenca i

K es el factor de conversión apropiado ($= 1/31536$)

$DA(i)$ es el área de cuenca incremental en Km^2

$q(i)$ es la escorrentía media a largo plazo en $mm/año$

a su vez,

$$q(i) = f_n(\bar{H}_i)$$

donde

$\bar{H}(i)$ es la elevación media de la cuenca incremental

La precipitación media a largo plazo no está explícitamente considerada en la ecuación anterior; sin embargo, la variación de la precipitación con la elevación se ha utilizado extensamente para establecer la relación entre escorrentía y elevación. Dado que

$$q = K \cdot r$$

donde

r es la precipitación media a largo plazo en mm/año y

K es el coeficiente de escorrentía que, en la mayor parte de casos prácticos, toma valores

$$0.0 \leq K \leq 1.0$$

La deducción de las relaciones hidrológicas requeridas se describe más adelante en la Sección 4.2.5 y en las Secciones 4.2.3 y 4.2.4 se describen los análisis realizados para obtener los valores medios a largo plazo de escorrentía y precipitación en las estaciones existentes.

Evidentemente, las relaciones anteriores pueden representar únicamente un modelo muy simplificado de los factores subyacentes de la escorrentía efectiva obtenida de un área de cuenca dada. Teóricamente se podrían obtener relaciones más complejas que considerasen explícitamente parámetros tales como longitud del cauce, pendiente promedio o precipitación. Sin embargo, la elección del modelo es determinada en forma efectiva por la disponibilidad de los datos hidrológicos, asumiendo que se pueda obtener, en todos los casos la necesaria información morfométrica a fin de definir el sistema fluvial, las áreas de cuenca incrementales y sus elevaciones medias. Debe señalarse que, a medida que se incremente el número de parámetros, la cantidad de datos necesarios para establecer relaciones con un suficiente grado de confianza aumenta geoméricamente. En la práctica, a menudo es imposible obtener suficientes datos en una región homogénea.

La experiencia con modelos que emplean las sencillas relaciones descritas anteriormente sugiere que, disponiendo de un número razonable de datos, los resultados obtenidos serán de suficiente precisión para un nivel de reconocimiento. Como se menciona en la Sección 3.3.3 hay extensas áreas del Perú donde por lo general se dispone de datos medidos descuidadamente, y en tales casos se tiene que recurrir a métodos indirectos a fin de obtener las relaciones requeridas. El método empleado en estos casos está basado en la teoría de zonas de vida desarrollada por Holdridge y se describe en la Sección 4.2.5.3.

Se podrá apreciar que los modelos no consideran explícitamente los movimientos de agua subterránea, sin embargo, muy a menudo se hace alusión y se estima el flujo de agua subterránea durante el proceso de calibración del modelo que se presenta en la Sección 4.2.6.1. En este proceso se puede introducir al modelo las ganancias o pérdidas de los flujos puntuales a fin de explicar las pérdidas por transvase, uso consuntivo, evaporación e infiltración o para posibilitar que grandes sistemas puedan ser considerados como subsistemas discretos.

4.2.2 Información Topográfica y el Banco de Datos del Sistema Fluvial

El modelo HYMOD opera en base de una representación matemática de un sistema fluvial, y por consiguiente es necesario definir los límites de los tramos de río a considerarse y sus correspondientes parámetros morfométricos. Teóricamente la longitud del tramo debería ser infinitamente pequeña, pero en la práctica se encuentra que valores promedio de 10 Km. brindan suficiente exactitud para que se puedan identificar cambios de consideración en las condiciones morfométricas o hidrológicas.

En el presente estudio se adoptó este intervalo como la longitud de tramo de río estandar, pero estuvo sujeto a modificaciones en ciertos casos. Específicamente, el intervalo fue reducido en el tramo final (el más aguas arriba) de un río o afluente y cuando lo exigía la ubicación de una confluencia de ríos o estaciones hidrométricas. Por otra parte en regiones donde únicamente se disponía de mapas a la escala 1 : 1'000,000 (principalmente en las partes de bajo gradiente de la Selva) se adoptaron tramos de río de 50 Km. Debido a la homogeneidad de esas regiones, la resultante pérdida de precisión no es de mayor importancia.

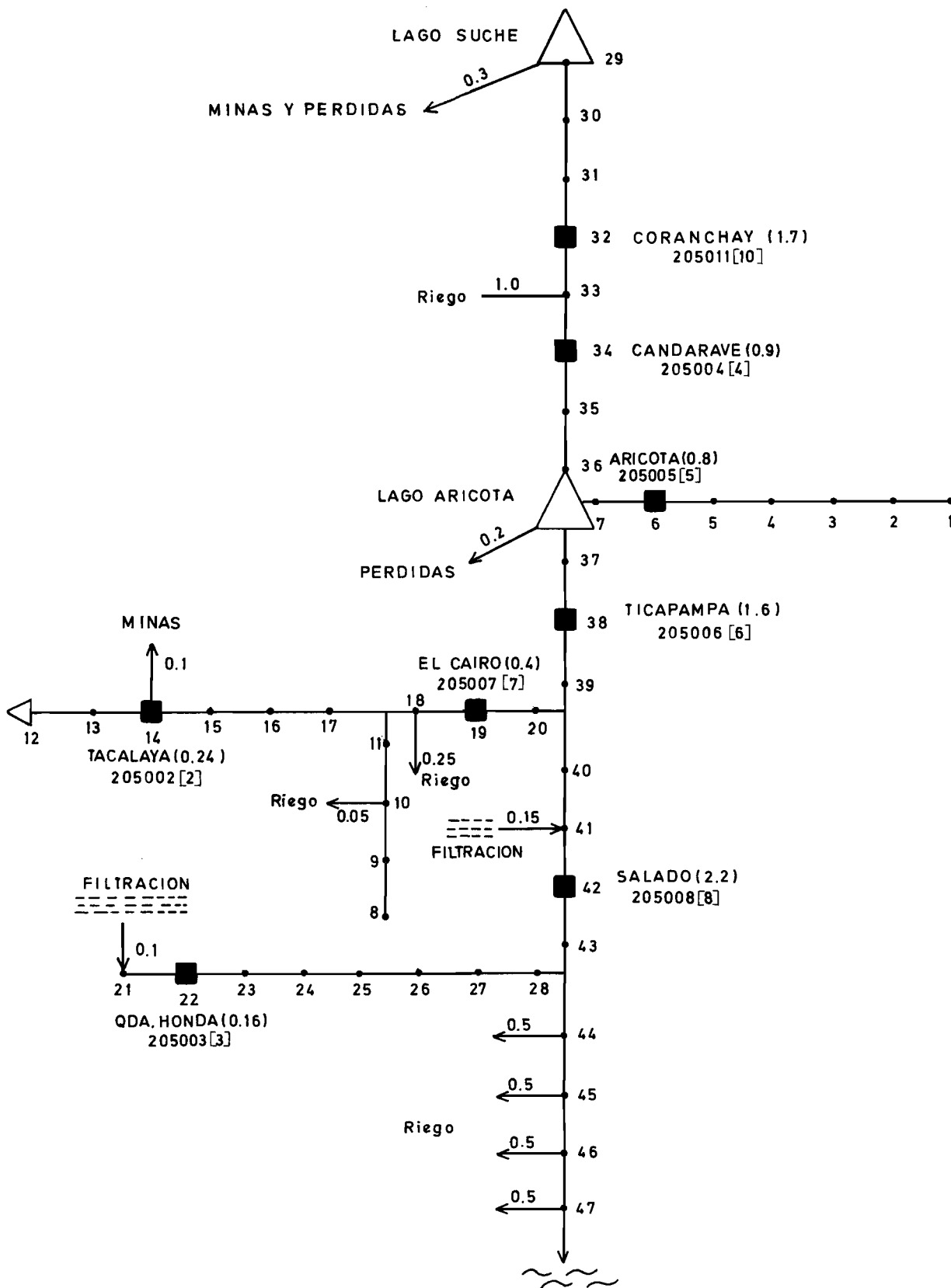
En todos los casos se emplearon los mapas más detallados que se disponían para definir los sistemas fluviales estudiados, y sobre esta base se identificaron un total de 6,288 puntos dando 1,490 tramos de río correspondientes sobre 81,355 Km. en 111 cuencas separadas. En la figura 4-1 se da un ejemplo del diagrama del sistema fluvial elaborado por cada cuenca, el cual ilustra la manera en la cual se numeran los ríos de acuerdo al orden del río.

Cada punto está definido por su distancia en kilómetros de la confluencia aguas abajo con un río de orden más bajo y por su elevación en metros sobre el nivel del mar. Para cada área de cuenca correspondiente, esto es, entre el punto dado y el punto situado inmediatamente aguas arriba, se obtuvieron valores planimetrados del área superficial en Km² y la elevación media en m.s.n.m. Los puntos de confluencia se diferencian por un sistema de doble numeración, dándose números únicos a los puntos coincidentes en los ríos de más alto y bajo orden. La ubicación de una estación de aforos se define por el número de punto adecuado e identificando los elementos lineales de los cuales se derivan los caudales medidos. Estos elementos lineales están, a su vez limitados por puntos de confluencia y/o estaciones de control.

De la manera descrita se elaboró un modelo digital para cada sistema fluvial y esta información forma el banco de datos del sistema fluvial. Debido a las limitaciones asociadas con el programa HYMOD fue necesario descomponer algunas de las más grandes redes fluviales de la Selva y Sierra del Perú. Sin embargo, manteniendo un riguroso orden secuencial al correr los modelos se pueden transmitir los resultados acumulados. Los archivos de datos resultantes se muestran en las hojas de actividades como archivos MDFXX, en tanto que los archivos reales son identificados por el nombre de cuenca.

La definición de los sistemas fluviales y los consiguientes cálculos de valores topográficos representa un considerable empleo de horas-hombre y debido a la naturaleza del trabajo fue necesario llevar a cabo un buen número de revisiones a fin de eliminar las inconsistencias. De otro lado, el establecimiento de este banco de datos morfométrico, basado en la información más detallada actualmente disponible, representa una fuente valiosa para futuros análisis. El banco de datos hidrológico, así como los archivos son susceptibles que en cualquier momento sean revisados y actualizados sin mayores trabajos.

El programa de cómputo HYDAL fue desarrollado durante el presente estudio para aprovechar la información morfométrica obtenida y como una ayuda a la preparación de las entradas de datos hidrológicos para el programa HYMOD. Este programa usa el mismo archivo de entrada que el programa HYMOD y calcula un buen número de parámetros morfométricos e hidrológicos para todo el sistema fluvial, para los



elementos lineales individuales y para las estaciones de control consideradas. Esta información está almacenada en los archivos maestros FKEYH y BASIN para su consiguiente uso en el análisis de correlación.

4.2.3 Ajuste y Extensión de Registros Hidrométricos (Figuras 4-2 y 4-3)

Como se describió en la Sección 3.4, se identificaron un total de 472 estaciones de control hidrométricas y sus correspondientes registros históricos fueron recopilados e instalados en el banco de datos hidrológico. Estos registros son de longitud variable, como se puede ver en la sección apropiada del Volumen V del Informe. Para la estimación de la media a largo plazo sobre una base consistente, es necesario obtener los registros reconstituídos en un periodo base seleccionado. Debido a que muchas estaciones se crearon a comienzos de la década de 1940, se adoptó el periodo base de 36 años, 1940-1975 y cuando fue posible, se reconstituyeron los registros individuales en base a correlaciones.

4.2.3.1 Ajuste de Registros

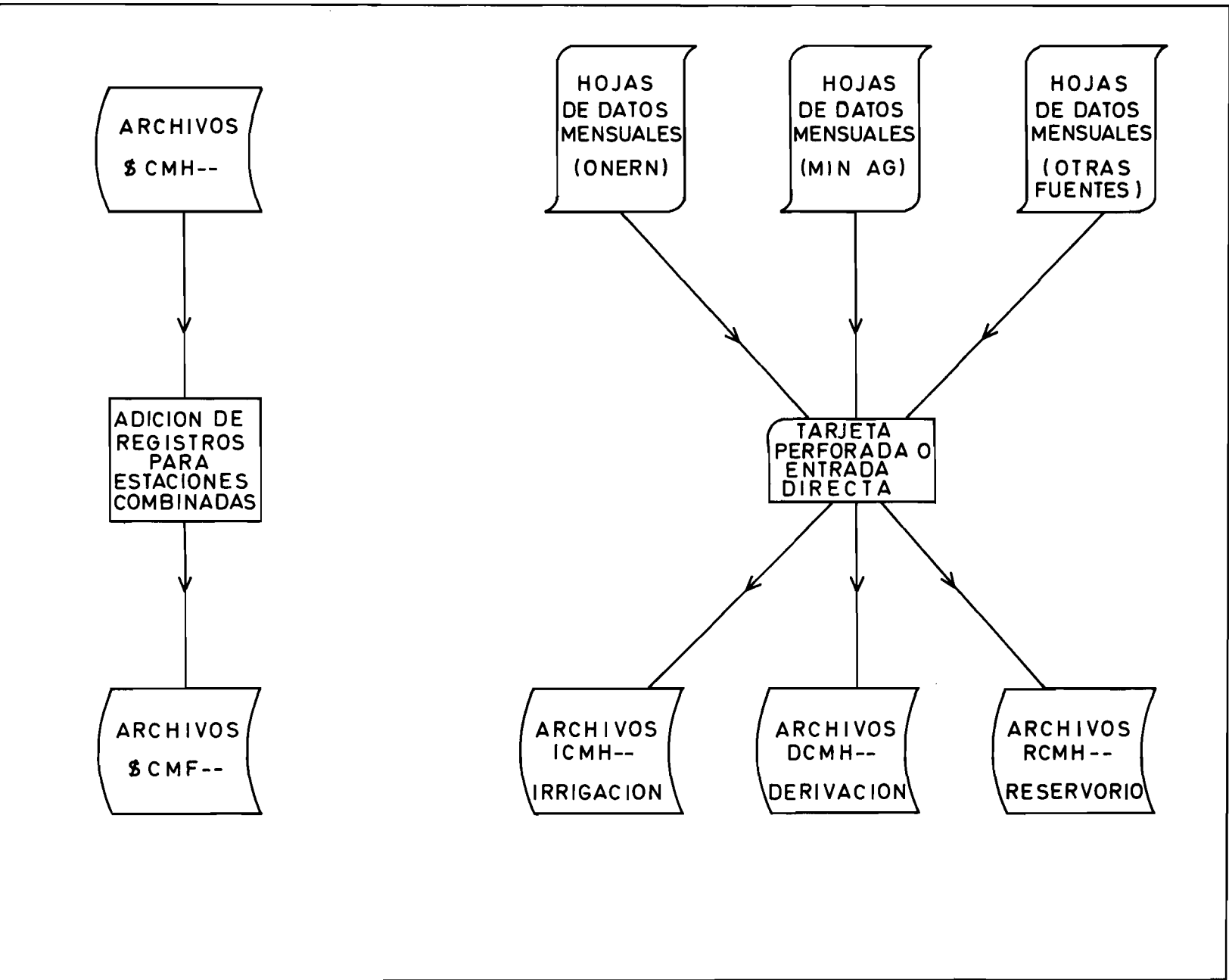
A fin de obtener relaciones justificables basadas en correlaciones entre estaciones es muy recomendable que los registros de caudal representen las condiciones naturales del río. Esto es, los valores usados deberán referirse al caudal realmente producido en la cuenca sin estar perturbada por ingerencias humanas tales como el uso consuntivo, derivaciones o regulaciones. Por ejemplo la estructura de correlación de un caudal será considerablemente modificada por tomas de irrigación en la cabecera de valle que se realicen en la época de estiaje.

Los pasos realizados para ajustar los registros históricos en razón de tomas controladas en cabecera de valle se ilustran en las Figuras 4-2 y 4-3. El proceso se complicó por los siguientes factores: la falta de datos controlados relativos a derivaciones conocidas, principalmente para irrigación, algunas de las cuales se remontan al periodo incaico; los registros esporádicos de las tomas; la necesidad de usar, en muchos casos demandas estimadas en lugar de las tomas reales. El personal de ONERN prestó amplia colaboración en esta tarea, tanto en la identificación de desarrollos humanos como en el acceso a los datos registrados y, en algunos casos, ajustando ellos mismos las secuencias. Como se describe en la Sección 3.4.4.1 estos datos están almacenados en los archivos \$ICMH, \$DCMH, \$RCMH relativos a ajustes para tomas de irrigación, transvases y efectos de regulación respectivamente.

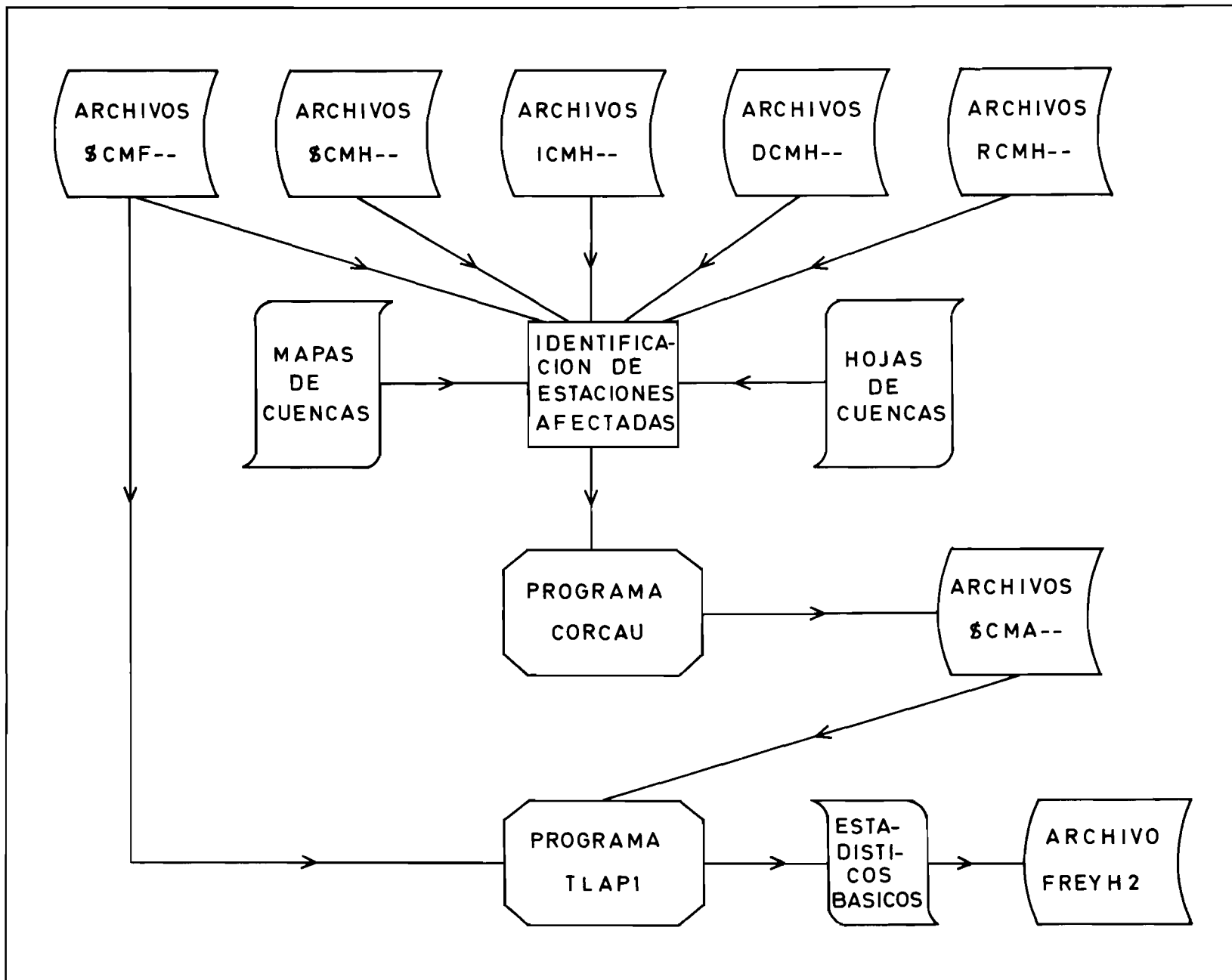
En base a esta información y a los archivos de datos históricos \$CMH, se crearon cierto número de archivos secuenciales ajustados mediante la adición o sustracción de las secuencias de ajuste pertinentes. Para este fin se usó el programa de cómputo CORCAU y los archivos resultantes se pueden identificar en el banco de datos mediante el prefijo \$CMA.

4.2.3.2 Selección del Modelo de Correlación

Para llevar a cabo la reconstitución o extensión de registros históricos de caudal, normalmente se tiene que recurrir a la determinación de correlaciones con registros coincidentes en estaciones vecinas. Estas últimas se pueden referir a otras medidas de caudal o mediciones de precipitación.



ARCHIVO LS3PI HOJA DE ACTIVIDADES 3/1: AJUSTE DE SECUENCIAS HISTORICAS DE CAUDAL Fig. 4-2



ARCHIVO LS3P2 HOJA DE ACTIVIDADES 3/2 :AJUSTE DE SECUENCIAS HISTORICAS DE CAUDAL Fig.4-3

Debido a la ausencia general de registros largos de precipitación en el Perú, no se intentaron deducir relaciones tipo precipitación/escorrentía y todas las extensiones de registros de caudal se hicieron en base a correlaciones de escorrentía en varios puntos.

Todas las extensiones de registros de caudal se hicieron para un intervalo mensual. Aunque para la estimación de valores medios de caudal y del potencial teórico, habría sido suficiente los valores anuales, la evaluación de proyectos requiere que se considere la distribución mensual y estacional de caudales. Un factor adicional fue que debido a la alta incidencia de datos faltantes en los registros históricos disponibles, limitar el análisis a valores anuales para años completos significaría perder un número considerable de observaciones con las cuales se debería llevar a cabo la necesaria regresión.

4.2.3.3 Descripción del Modelo de Correlación

Debido a las razones anteriormente mencionadas se aplicó el modelo incorporado en el programa de cómputo HEC-4.

Este programa ha sido ampliamente utilizado en todo el mundo en estudios a nivel de factibilidad, y la metodología se describe en el manual del programa*. A continuación se da un breve resumen del modelo.

El enfoque de la metodología es de una regresión múltiple en varios puntos realizada sobre valores mensuales con desfases 0 y 1. Se pueden considerar hasta 10 estaciones que tengan registros mensuales coincidentes en el periodo de extensión deseado.

Además, cualquier registro de estación debe contener al menos tres valores para cada mes calendario. Con el programa, cada registro de estación se convierte en un valor standard normalizado mediante:

- a) Una transformación logarítmica
- b) Una transformación que elimine efectos estacionales (restando la media mensual y dividiendo entre la desviación standard mensual).
- c) Una transformación Pearson III.

La correlación entre estaciones para cada mes y el precedente se computa entre todos los pares de estaciones sobre la base de los valores reducidos.

* Hydrologic Engineering Center, Computer Program Nº 4, "Monthly Streamflow Simulation". U.S. Corps of Engineers, Davis, California, U.S.A., February 1971

Los valores faltantes en cada estación en el periodo base se estiman entonces por medio de la regresión múltiple

$$X_{I,KD} = \sum_{\substack{K=1 \\ K \neq KD}}^{NSTA} A_K + X_{I,K} + \sum_{K=1}^{NSTA} B_K * X_{I-1,K} + Z_{I,K} * \sqrt{(1-R_{1,K}^2)}$$

donde:

- X = valor reducido del caudal
- A = coeficientes de regresión (desfase - 0)
- B = coeficientes de regresión (desfase - 1)
- I = número de mes
- K = número de estación
- KD = número de estación de la variable dependiente
- R = coeficiente de correlación múltiple
- Z = número aleatorio (distribuido normalmente)

Si existe variable independiente se le asigna un valor de desfase -0, de otra manera se emplea el desfase -1 de tal modo que el número total máximo de variables independientes empleadas sea igual al número de estaciones en el grupo. Se efectúa una prueba de consistencia mediante la cual las variables independientes que tengan la menor correlación absoluta son eliminadas a su vez, hasta que se logre la consistencia. (coeficiente de determinación <1.0). Los valores resultantes reconstituidos y extendidos se convierten finalmente en caudales mediante las transformaciones c), b) y a).

Al incorporar el programa en el sistema * de minicomputadora del Proyecto se introdujeron algunas modificaciones, incluyendo el uso opcional del generador de números aleatorios. Una ventaja adicional es que los caudales históricos se pueden predecir también por medio de la ecuación de regresión de tal manera que el coeficien

* La instalación del programa HEC-4 en la computadora del Proyecto planteó problemas de importancia debido a la limitada capacidad de memoria. Sin embargo, el programa fue implementado exitosamente mediante reducciones de los arreglos, segmentaciones, sustitución virtual de memoria (disco) y cambios de procedimiento. Los cambios efectuados se describen en el Volumen XI bajo el título "Modificaciones al Programa HEC-4 para su uso en minicomputadora".

te de correlación global pueda ser calculado a fin de dar una medida cualitativa de la extensión obtenida. Esta versión del programa es referido como el HEC-4M.

4.2.3.4 Aplicación del Modelo de Correlación (Figuras 4-4 y 4-5)

Los grupos de estaciones seleccionados en la fase de recopilación de datos (Sección 3.4.2.6) y que están almacenados en el archivo GROUPH, formó la base de las corridas efectuadas con el programa HEC-4M.

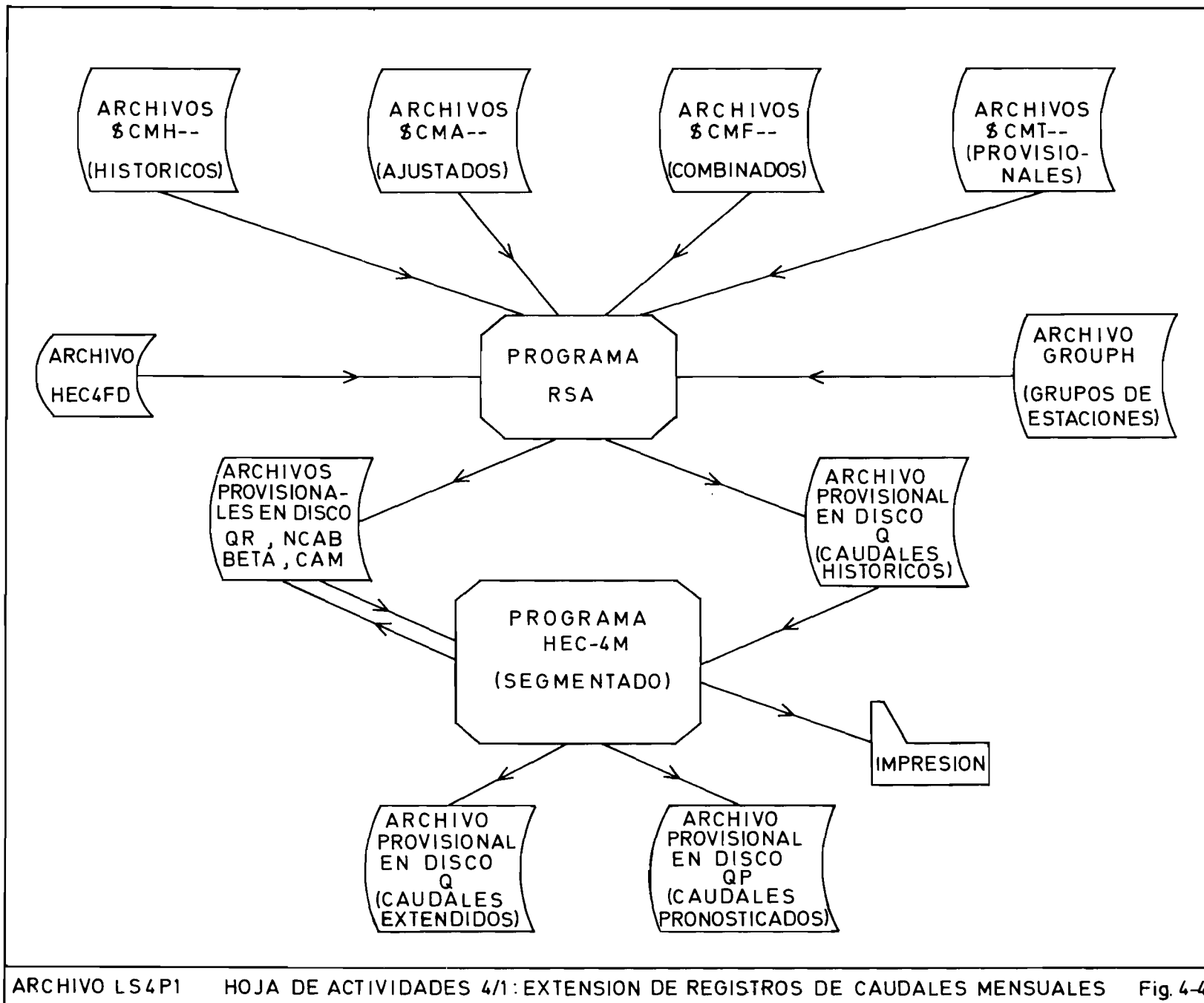
En muchos casos se encontró que existían dos o más registros de estaciones correspondientes a localizaciones distintas pero cercanas. Esta situación surge debido a la reubicación de estaciones de control o, en algunos casos, al doble control de medidas efectuado por diferentes entidades. Juntando los registros separados se creó una secuencia de caudales combinados y extendidos y se realizaron extensiones de los registros combinados. Donde fue necesario los valores registrados se ponderaron con las correspondientes áreas de captación. Dichos registros combinados se asignaron a las llamadas estaciones ficticias y los archivos correspondientes se identificaron por el Código \$CMF. Las dos últimas cifras de este código toman valores 99, 98, 97... de acuerdo al número de estaciones ficticias creadas en una cuenca determinada. Además de las estaciones ficticias se crearon cierto número de estaciones temporales. Estas eran completamente sintéticas en cuanto a su ubicación y resultaron de la adición de registros de afluentes concurrentes, descargas de lagos controladas, flujos entre estaciones, etc. y se utilizaron únicamente con fines de correlación.

A fin de obtener una secuencia completa en cada estación en el periodo 1940-1975 fue necesario asegurar que al menos una estación del grupo correspondiente, tuviera un valor para los meses incluidos. En muchos casos esto sólo pudo lograrse transfiriendo un registro reconstituido previamente y de este modo fue necesario considerar con cuidado el orden en el cual se corrieron los grupos. El agrupamiento inicial se empezó en la costa de Sur a Norte, el Lago Titicaca y luego la región Norte de la Sierra y Selva.

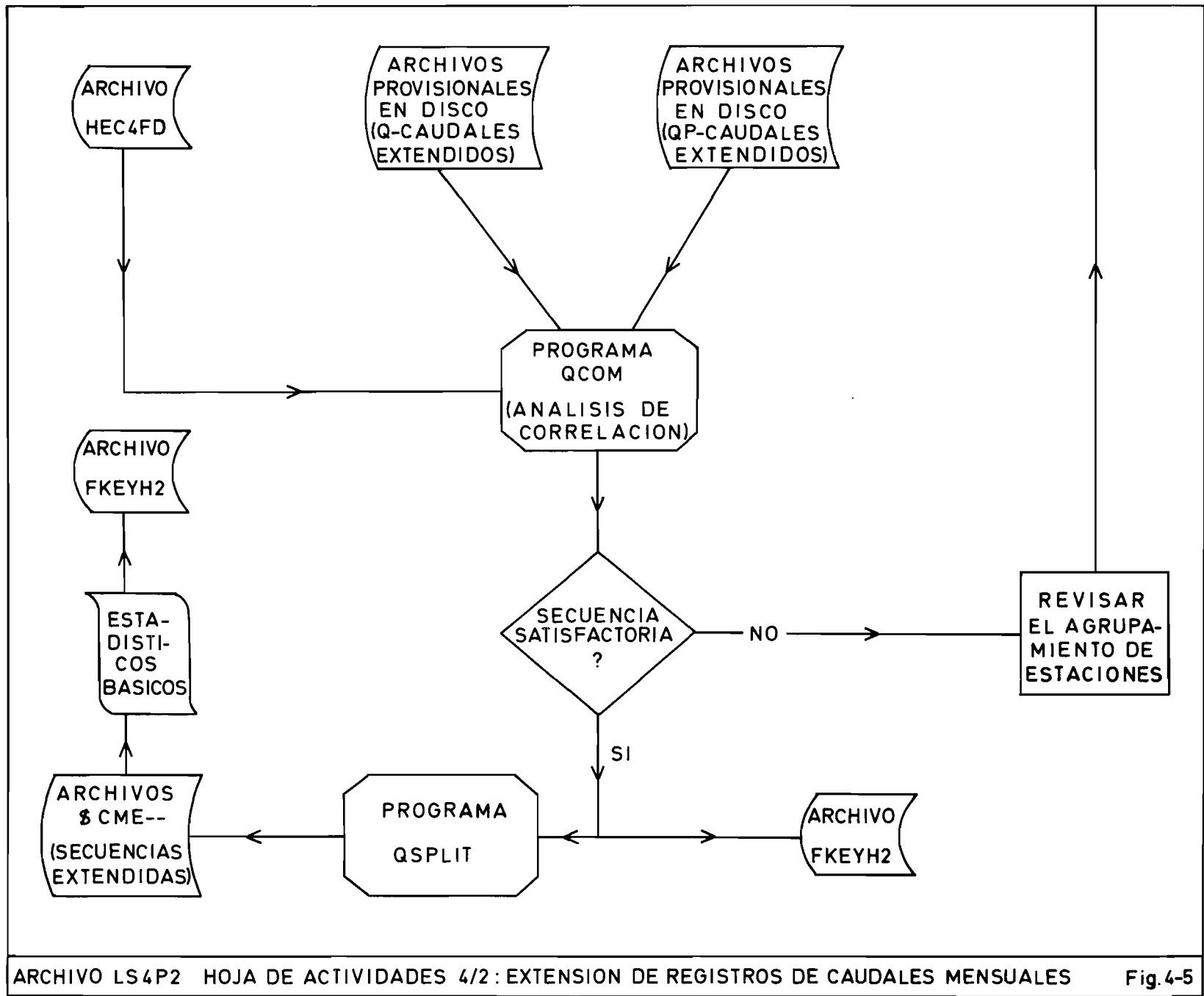
Dentro de este sistema de agrupamiento básico se efectuaron un número considerable de reagrupamientos y re-corridas debido a la baja correlación y a extensiones inadecuadas o irrazonables. El número total de corridas del programa fue de 115 y la composición de los grupos de estaciones se muestra en el Volumen IX del Informe.

La extracción de datos se efectúa mediante el programa RSA, el cual funciona de la siguiente manera:

- 1) Los códigos de las estaciones incluidas en el grupo a correrse se leen del archivo HEC4FD.
- 2) El archivo de datos de entrada para el programa HEC4M se forma incluyendo los datos fijos de la corrida y los registros a utilizarse en cada estación.
- 3) Se elaboran archivos temporales en disco para trabajo, para el programa principal.



ARCHIVO LS4P1 HOJA DE ACTIVIDADES 4/1: EXTENSION DE REGISTROS DE CAUDALES MENSUALES Fig. 4-4



ARCHIVO LS4P2 HOJA DE ACTIVIDADES 4/2 : EXTENSION DE REGISTROS DE CAUDALES MENSUALES Fig.4-5

El programa HEC4M proporciona dos salidas de archivo en disco, una conteniendo las secuencias de caudales reconstituídas y el segundo conteniendo las mismas series pero con los valores "históricos" reemplazados por valores estimados usando el modelo de correlación elaborado. Estos archivos son, a su vez, entradas al programa QCOM que realiza un análisis de correlación elemental en las dos secuencias como una ayuda para evaluar la "bondad de ajuste" total obtenida.

El programa QSPLIT trabaja en el archivo de secuencias de caudales reconstituídos y establece una serie de archivos identificados por el prefijo \$CME, los cuales contienen la secuencia extendida para un código de estación dado. Estos archivos son a su vez trasladados al programa TLAPI para determinar las estadísticas básicas para su almacenamiento en el archivo maestro FKEYH2.

La operación secuencial de los programas RSA, HEC4M, QCOM y QSPLIT se controla a nivel del sistema de cómputo mediante el programa 'macro' RUNHEC4. Para un grupo de 10 estaciones, el tiempo total de cómputo es del orden de 40 minutos.

Luego de finalizadas todas las corridas, las secuencias resultantes fueron sujetas a un procedimiento de graduación para identificar aquellas series adecuadas para la etapa de evaluación de proyectos (Sección 5.2.4.1). Aunque cualitativos, los factores considerados en esta graduación fueron la longitud de los datos registrados, el coeficiente de correlación total dado por el programa QCOM, y la sensibilidad de los valores extremos generados. Esta graduación oscila de 1 (muy bueno) a 4 (no utilizable) y se almacenan también en el archivo maestro FKEYH2.

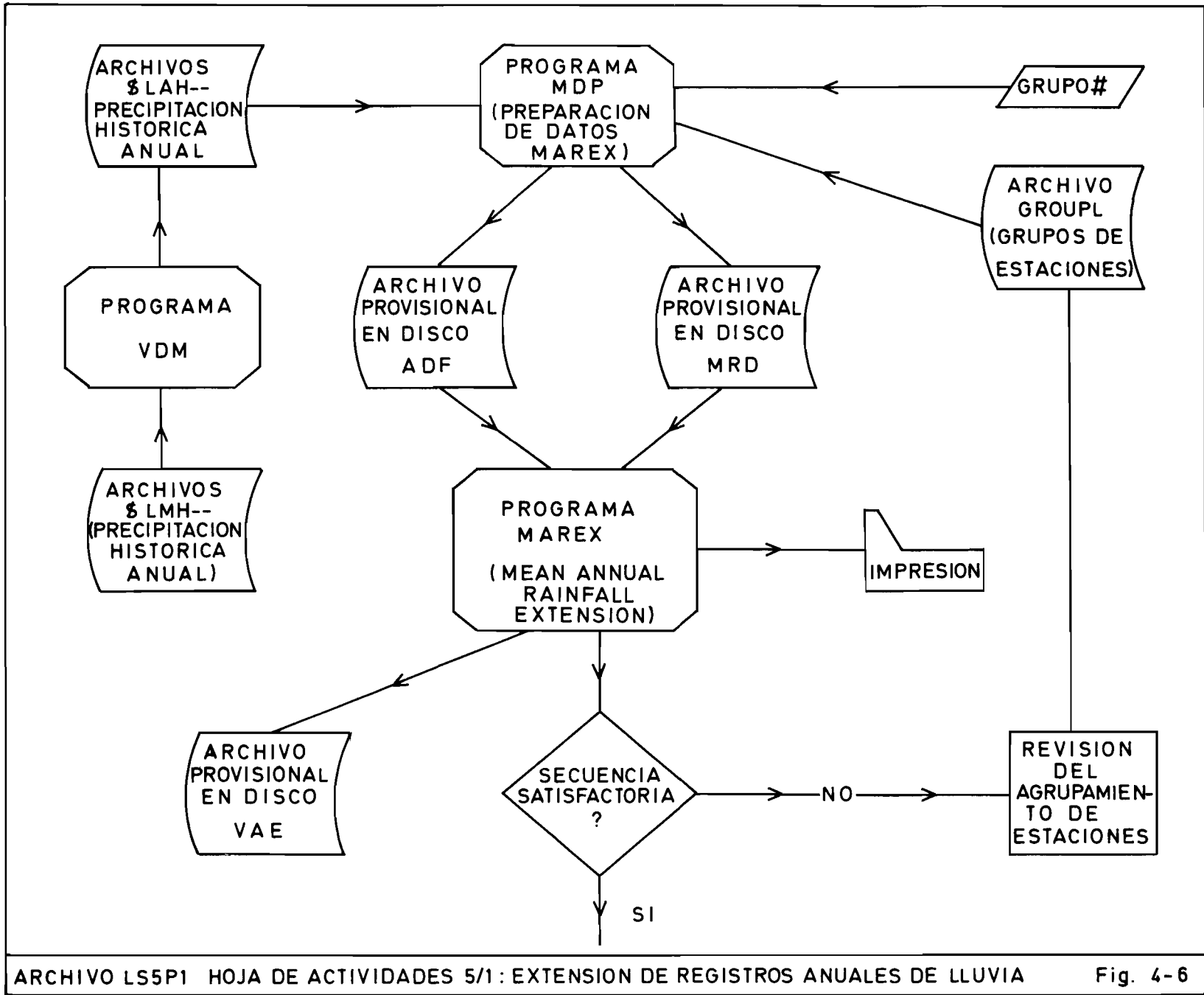
4.2.4 Extensión de los Registros Pluviométricos (Figuras 4-6 y 4-7)

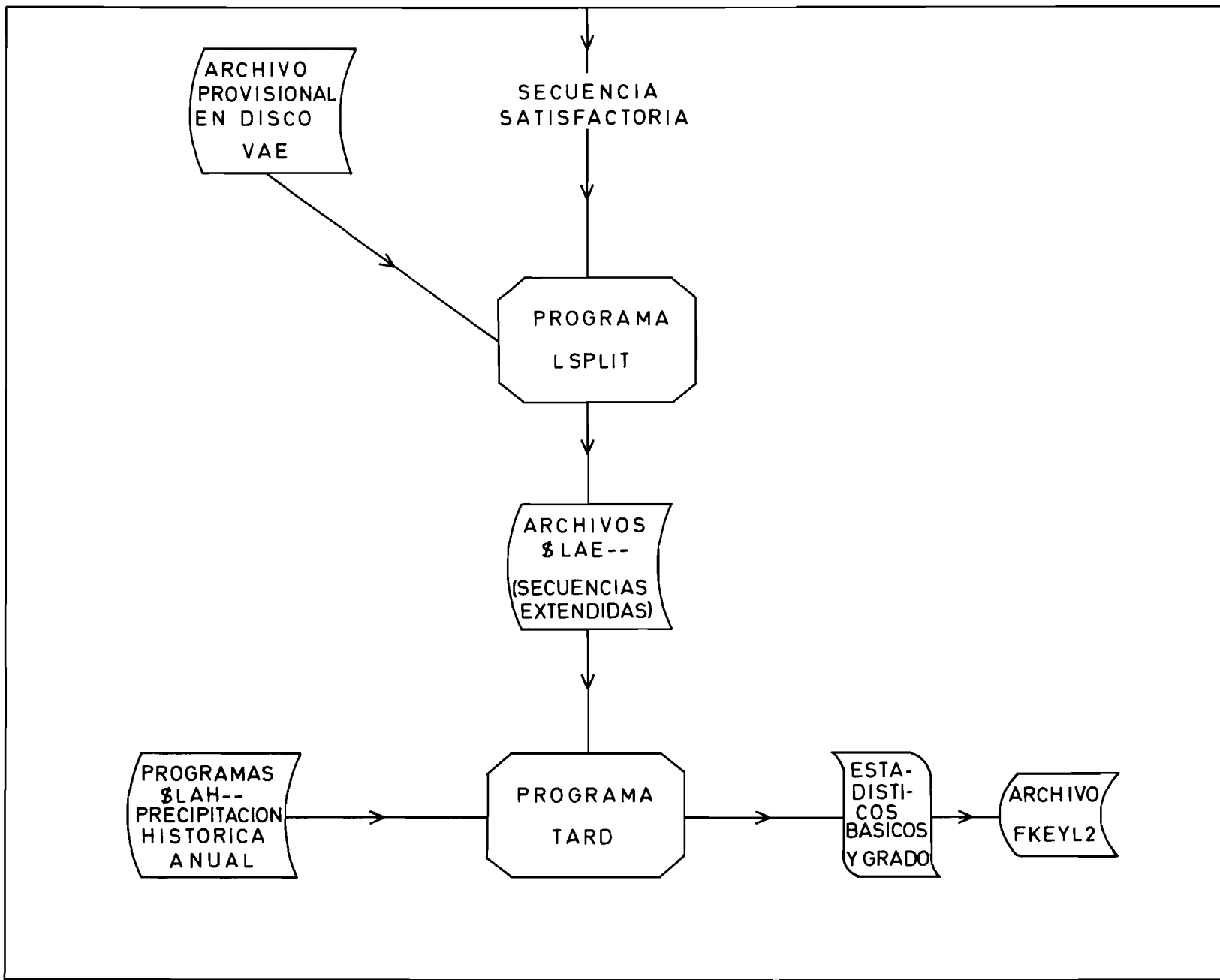
4.2.4.1 Selección del Modelo de Correlación

El modelo de captación incorporado en el programa HYMOD, según se ha aplicado en este estudio, predice caudales medios en base a relaciones deducidas entre la elevación media del área de captación y la escorrentía específica. Sin embargo, a menudo no hay suficientes estaciones de control para poder definir una curva para el rango total de elevaciones presentes en una cuenca y tiene así que considerarse información adicional, especialmente aquella concerniente a la distribución de la precipitación.

El modelo HEC4 empleado para la extensión de registros mensuales de caudales y que se describe en la Sección 4.2.3.3, puede usarse también para la extensión de precipitación. Dado que durante el presente estudio sólo se requería el valor medio extendido de precipitación (y no las secuencias mismas), se concluyó que sería conveniente una extensión en base a valores anuales. Una consideración adicional fue que el volumen de datos de precipitación a procesarse (aprox. 1000 estaciones) originaría una excesiva carga de cómputo para el modelo HEC4.

El modelo utilizado para extender las secuencias anuales de precipitación está incorporado en el programa de cómputo MAREX, desarrollado por el consultor para obtener un valor estimado de la precipitación, mejorado y estadísticamente válido, en una estación de registro dada donde exista un registro incompleto. Para mantener





la comparabilidad con los caudales medios extendidos, se usó el periodo 1940-75 como intervalo base. La longitud de los registros históricos de precipitación se pueden ver en la sección apropiada del Volumen V. En el Volumen XI se da una descripción del programa MAREX, y la metodología implícita se describe en la siguiente sección.

4.2.4.2 Descripción del Modelo

A fin de estimar el valor medio de precipitación anual - a largo plazo - donde exista un registro incompleto para el periodo base escogido, es necesario predecir valores para los años ausentes. El programa MAREX establece una relación lineal entre pares de estaciones con registros concurrentes de la forma $y = mx + c$ donde m es el coeficiente de regresión o pendiente, y c es la constante de regresión, o el intercepto. Los valores de m y c se calculan de acuerdo al método de mínimos cuadrados, el cual minimiza la varianza total entre los valores registrados y estimados.

Las estaciones independientes son ordenadas de acuerdo a la relación de regresión obtenida con los registros concurrentes en la estación de referencia. El valor empleado para ordenar las estaciones independientes se toma como la diferencia entre los coeficientes de correlación respectivos y un valor estadístico límite deducido por Matalas y Jacobs*, quienes demostraron que una condición necesaria para obtener una estimación mejorada de la media utilizando un modelo de regresión lineal simple es que $r \geq 1/\sqrt{L-2}$, donde r es el coeficiente de correlación y L el número de valores concurrentes.

Habiendo establecido, con este criterio, el orden de preferencia en el cual las estaciones independientes deben ser utilizadas para predicción, las ecuaciones de regresión respectivas se usaron para completar los valores faltantes en el registro de la estación de referencia.

La precipitación anual promedio es entonces calculada como la media de los valores anuales históricos y predecidos.

3.2.4.3 Aplicación del Modelo (Figuras 4-6 y 4-7)

El agrupamiento de estaciones se basó en aquellos grupos establecidos en la fase de recopilación de datos y se describen en la Sección 3.4.2.6. Este agrupamiento, almacenado físicamente en el archivo GROUPL, fue sujeto a muchas revisiones, a medida que las corridas mejoraban, debido a la necesidad de obtener una correlación adecuada para extensión de registros y de incluir, en cada grupo una secuencia coincidente para el periodo base. En muchos casos fue necesario transferir registros extendidos previamente para satisfacer este criterio.

El programa MDP da los archivos de datos de entrada para el programa MAREX y esto involucra los siguientes pasos:

* Matalas N.C., y Jacobs, B.: Un procedimiento de correlación para incrementar los datos Hidrológicos, U.S. Geological Survey Professional Paper 434-E (en inglés).

- 1) El número del grupo a correrse se ingresa desde el terminal y los de estación asociados se extraen del archivo GROUPL.
- 2) Los registros históricos o previamente extendidos para cada estación se combinan con los datos fijos de la corrida del archivo MRD para formar el archivo de datos de entrada ADF.

El programa MAREX de correlación/ extensión imprime y almacena las secuencias extendidas resultantes en el archivo VAE. Este archivo contiene los datos para el programa LSPLIT, que crea los archivos \$LAE, los cuales contienen las secuencias anuales individuales. Las corridas secuenciales de los programas MDP, MAREX y LSPLIT se realizan con la marca RUNMAREX a nivel del sistema de cómputo.

Habiendo establecido una secuencia aceptable, se utiliza el programa TARD para calcular los parámetros estadísticos básicos y para su almacenamiento en el archivo maestro FKEYL2. Así como en las secuencias de caudales extendidas, se estableció un sistema de graduación cualitativo como guía de la adecuación de las series, y se utilizó durante las corridas para la selección de las series aptas para transferirse a otros grupos.

Se efectuaron un total de 345 corridas del programa MAREX y en la mayoría de los casos se obtuvieron series para el periodo base completo de 36 años. En algunos casos, sin embargo fue imposible predecir valores debido a que el coeficiente de correlación caía bajo los límites prescritos. Donde se observó muy baja correlación entre estaciones de control bastante próximas, se puede inferir que los datos registrados son dudosos. En tales casos sólo se otorga una confiabilidad limitada a los valores medios resultantes para propósitos de deducción de relaciones regionales.

4.2.5 Deducción de Relaciones Hidrológicas

El estudio de relaciones hidrológicas regionales se efectuó en dos niveles, debido a la variable disponibilidad de datos. Las relaciones estudiadas fueron las requeridas para las entradas del modelo de cuenca del programa HYMOD, es decir la variación de la escorrentía específica media anual y de la precipitación media anual con la altura. Como se explica en la Sección 4.2.1 la estimación de los valores medios de caudal fue realizado usando la primera de estas relaciones, mientras que la segunda fue usada para extrapolar curvas de escorrentía en aquellas regiones donde únicamente se disponían de datos de precipitación.

Con el objeto de elaborar curvas de caudal específico, fue necesario obtener para cada estación hidrométrica, valores del área de cuenca hasta la estación y su elevación media. Estos datos se obtuvieron trasladando los datos del archivo del sistema fluvial, a los programas HYMOD y HYDAL, siendo los valores requeridos almacenados en el archivo maestro FKEYH2.

A fin de facilitar la deducción de las relaciones hidrométricas y pluviométricas se hizo un uso intensivo del programa de cómputo REASA, que grafica las estaciones consideradas y efectúa regresiones polinomiales hasta de quinto orden, de las variables requeridas con o sin transformación logarítmica. La selección de estaciones y extracción de información en formatos del programa REASA fue realizada usando el

programa SELECT, el cual permite subagrupamiento de estaciones a definirse sobre la base de su ubicación u otro parámetro identificante. En la mayoría de los casos las curvas deducidas fueron sujetas a revisión como parte de los procedimientos de calibración del modelo HYMOD, los cuales se describen en la Sección 4.2.6.1.

4.2.5.1 Relaciones Regionales (Figuras 4-8 y 4-9)

Debido al hecho que muchos ríos en el Perú no tienen suficiente información hidrométrica para el objeto de elaborar relaciones hidrológicas del tipo deseado, las cuencas fueron agrupadas en regiones y las curvas se dedujeron en base a todas las estaciones incluidas. Las curvas regionales resultantes fueron consiguientemente usadas como referencia para determinar las curvas a aplicarse en áreas escasamente controladas y para asegurar la continuidad. Se observó que esas curvas reflejaban las tendencias subyacentes concordantes con las diferentes condiciones climatológicas y topográficas existentes en el Perú.

4.2.5.2 Relaciones en Cuencas Usando Datos Medidos

El modelo matemático de cuenca incorporado en el programa HYMOD puede considerarse hasta tres regiones hidrológicas definidas por grupos diferentes de curvas regionales una cuenca determinada. Esta consideración se empleó en ciertas cuencas donde se pudo obtener suficiente información para definir las relaciones necesarias, pero en general este no era el caso, y solamente se aplicaron un grupo de curvas en toda la cuenca.

Aplicando el mismo procedimiento utilizado para deducir relaciones regionales se dedujeron curvas para cada cuenca individual, aunque en algunos casos se tuvieron que aplicar curvas idénticas debido a la falta de valores locales. Las curvas finales aplicadas en cada corrida después de la calibración del modelo se tabularon y plotearon, formando parte de los resultados que se dan en el Volumen VII.

4.2.5.3 Relaciones en Cuencas Empleando la Información de Zonas de Vida

Tal como se indica en la Sección 3.3.3, hay grandes áreas del Perú donde se dispone de datos hidrométricos y pluviométricos no significativos. Sin embargo, en este estudio fue necesario estimar las descargas de todos los ríos importantes del país y fue necesario un método indirecto para obtener las relaciones hidrológicas para el modelo HYMOD. En 1977 la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) finalizó la elaboración de un Mapa Ecológico del Perú mostrando, en escala 1 : 1'000,000, la división del país en zonas de vegetación. Este trabajo es una aplicación directa de los estudios de H.R. Holdridge*, quien clasificó las zonas de vida encontradas en el mundo en 103 categorías. En esencia, la base del trabajo de Holdridge consiste en que a fin que existan zonas de vida estables deben presentar

* Life Zone Ecology, Tropical Science Center, San José, Costa Rica, 1967