

SNMH
551.577.38
V47



LA SEQUIA COMO FENOMENO HIDROLOGICO

por

Guillermo Vera Fung

Conferencia presentada ante el II
Seminario Internacional de Ingeniería de los Recursos Hídricos en la
Industria Azucarera
(Lima, Octubre de 1981)

SNMH
551.577.38
V47

Lima - 1987

Lima, 11 NOV. 1987

OFICIO N° 004/CID/DIC/87

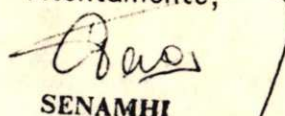
Señor : Jefe del SENAMHI
Asunto : Texto de la conferencia "La sequía como fenómeno hidrológico".- Se remite

Tengo el agrado de remitir adjunto el texto de la conferencia "La sequía como fenómeno hidrológico", presentada por el suscrito con ocasión del II Seminario Internacional de Ingeniería de los Recursos Hídricos en la Industria Azucarera, realizada en la ciudad de Chiclayo en octubre de 1981.

Como recientemente se ha vuelto a mencionar la posibilidad de una nueva recurrencia del fenómeno, especialmente en la sierra sur del país, se estima que el documento en mención puede aportar en algo a la discusión del tema. Este texto fue editado en mimeógrafo en forma muy limitada por el ICIA (Instituto Central de Investigación Azucarera) en 1981, de modo que su difusión, incluido en el SENAMHI, fue prácticamente inexistente.

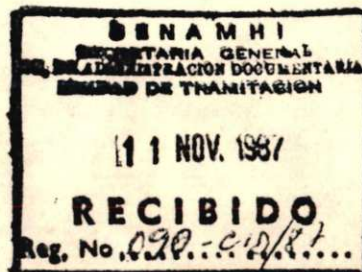
Como quiera que el tema es de permanente vigencia y el informe toca aspectos muy importantes, como son las causas de las sequías y las posibilidades de su predicción, se considera que la difusión al interior del Servicio, de al menos los capítulos antes mencionados, podría ser de utilidad, salvo mejor parecer.

Atentamente,

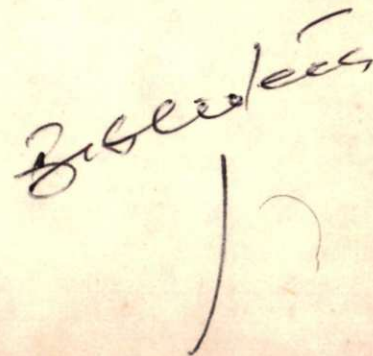


SENAMHI
Centro de Investigación y Desarrollo
Dirección de Investigación Científica
Ing. GUILLERMO VERA FUNG
Director(e)

cc.: CID
Archivo
GVF/rch



1586



LA SEQUÍA COMO FENÓMENO HIDROLÓGICO (*)

(Guillermo Vera Fung)



RESUMEN

Las sequías son fenómenos de frecuente aparición en el Perú. Se presenta en este trabajo una serie de ideas que pueden ayudar en su estudio sistemático. Se compone de nueve capítulos que consignan entre otros una breve discusión del problema de la definición de sequías, la naturaleza y causas del fenómeno, así como de los efectos esperados de su ocurrencia. También se mencionan algunas consideraciones respecto a la factibilidad de la predicción y las maneras de caracterizarla como son los índices y la estadística o teoría del run. Después se enumeran las diversas estrategias y medidas que conforman la tecnología del control de sequías. Finalmente se anotan algunos comentarios generales sobre la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías o adoptar las existentes a nuestra realidad; la necesidad de prepararnos para que no nos sorprendan los fenómenos naturales desastrosos en general y las sequías en especial y, la realización urgente de estudios e investigación en esta área de los conocimientos.

1. INTRODUCCION

La sequía es un fenómeno frecuente en nuestro país. Sus efectos en la economía y en todas las actividades humanas son muchas veces desastrosos y de carácter irreversible. La agricultura, la industria y la minería, así como la generación de hidroelectricidad y el abastecimiento poblacional constituyen áreas de preferente impacto del fenómeno.

Los objetivos del presente trabajo son el mostrar algunas de las ideas principales que dan contenido a lo que se ha dado en llamar "Problemática de las Sequías". Estas ideas son probablemente las bases que todo estudio sistemático del fenómeno debiera considerar.

Es necesario recalcar el carácter preliminar del trabajo que aquí presentamos y que sin duda no está exento de algunas inconsistencias. La idea subyacente al aceptar su realización es también la de promover el estudio de las sequías entre los profesionales e investigadores del país de modo de ir dándole sustento a una toma de conciencia respecto a un tema tan poco tratado como el que nos ocupa.

El trabajo está dividido en 9 capítulos. El primero trata de los objetivos, alcances y organización del trabajo, mientras que el segundo se refiere al controvertido problema de la definición de sequía. El tercero trata de las causas y naturaleza del fenómeno y el cuarto de los efectos de su ocurrencia. De igual manera, el quinto capítulo nos habla de las posibilidades y limitaciones de la predicción, mientras que el sexto trata de la caracterización y análisis del fenómeno. El séptimo capítulo comprende una breve enumeración y descripción de las diversas estrategias y medidas que comprenden el control de las sequías, mientras que en el capítulo octavo anotamos algunos comentarios que creemos necesario mencionarlos.

(*) Conferencia presentada en el "II Seminario Internacional de Ingeniería de los Recursos Hídricos en la Industria Azucarera" realizada en Chiclayo-Perú del 25 al 30 de Octubre de 1981.

Finalmente en el noveno capítulo enumeramos las conclusiones que se desprenden del trabajo.

2. DEFINICIÓN DE SEQUÍA

En general, el término sequía nos expresa una condición de déficit de humedad o agua. Registramos situaciones de sequía en el abastecimiento de agua para la ciudad, la industria y la agricultura, en la generación de hidroelectricidad, en la humedad del suelo adecuada para el desarrollo óptimo de las plantas, en el contenido de humedad de la atmósfera, etc. y, los efectos de su ocurrencia se dejan sentir en la economía, la sociedad, etc.

Cada actividad del hombre que es afectada por el fenómeno y cada especialista desde su particular punto de vista nos proporcionan una definición específica. A este hecho es que debemos la importante colección de definiciones con que contamos en la actualidad y también las controversias y confusiones a la hora de analizar el fenómeno. /6, 13, 24, 29/

Una observación detenida de las diversas definiciones dadas a la sequía nos evidencia de que las diferencias sólo son aparentes, debidas básicamente a la conclusión de: (1) Los efectos que determinado nivel de déficit de humedad o de agua ocasionan una actividad o proceso específico y (2) el orden de magnitud y el tipo de unidades de medida utilizadas al caracterizar el fenómeno.

En lo que respecta a (1) tenemos que muchas definiciones mencionan los efectos que determinado déficit de humedad ocasionará en cultivos y pastizales o en la producción de un bien o servicio específico. Respecto a (2) tenemos por ejemplo que a nivel de cuenca expresamos los déficit en miles y aún millones de metros cúbicos de agua escurrida o precipitada y, en días y aún años de duración en esta condición, mientras que en una parcela el déficit lo expresamos en milímetros de lámina y en horas o días.

En todas las definiciones subyace la idea de déficit, de modo que una definición única y de aceptación universal tiene que hacer énfasis en este hecho y la cuantificación adecuada debe proporcionar las diferencias idóneas para cada uso o proceso físico estudiado.

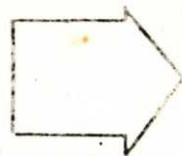
La Fig. 1 nos ayuda a visualizar los elementos que deben intervenir en toda definición de sequía. La diferencia entre el flujo de humedad o volumen de agua entrante I_i (lluvia, riego, caudal entrante, etc.) y el flujo saliente O_i (evapotranspiración, infiltración, caudal efluente, demandas de uso, etc.) en el intervalo de tiempo i (horas, días, meses, año) es una cantidad S_i disponible por el sistema (suelo, parcela, embalse, cuenca, región, país, volumen de atmósfera, etc.). Un aspecto de la severidad de la sequía estará dada por la mayor o menor negatividad de la cantidad S_i al término de un proceso físico o de uso.

Básicamente, el fenómeno de las sequías incluye tres aspectos, los cuales están mutuamente interrelacionados: Cantidad de unidades de humedad o volumen de agua deficitarios, cantidad de unidades de tiempo en esa condición y cantidad de área comprometida. La gravedad de la sequía evi

I_j



S_j



O_j

INGRESOS

- Precipitación
- Riego
- Caudal entrante
- Agua subterránea

SISTEMA

- Suelo
- Parcela
- Embalse
- Cuenca

EXTRACCIONES

- Evapotranspiración
- Infiltración
- Caudal effluente
- Demandas de uso

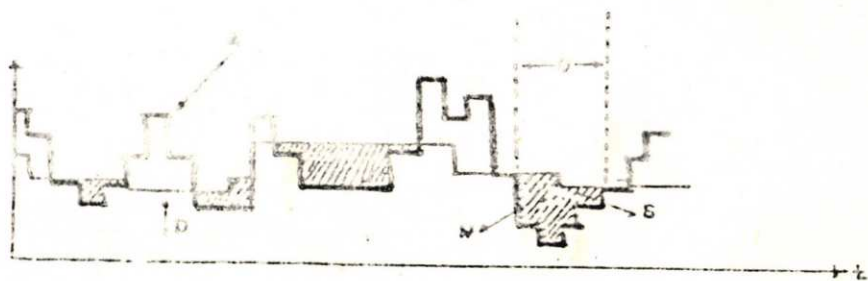
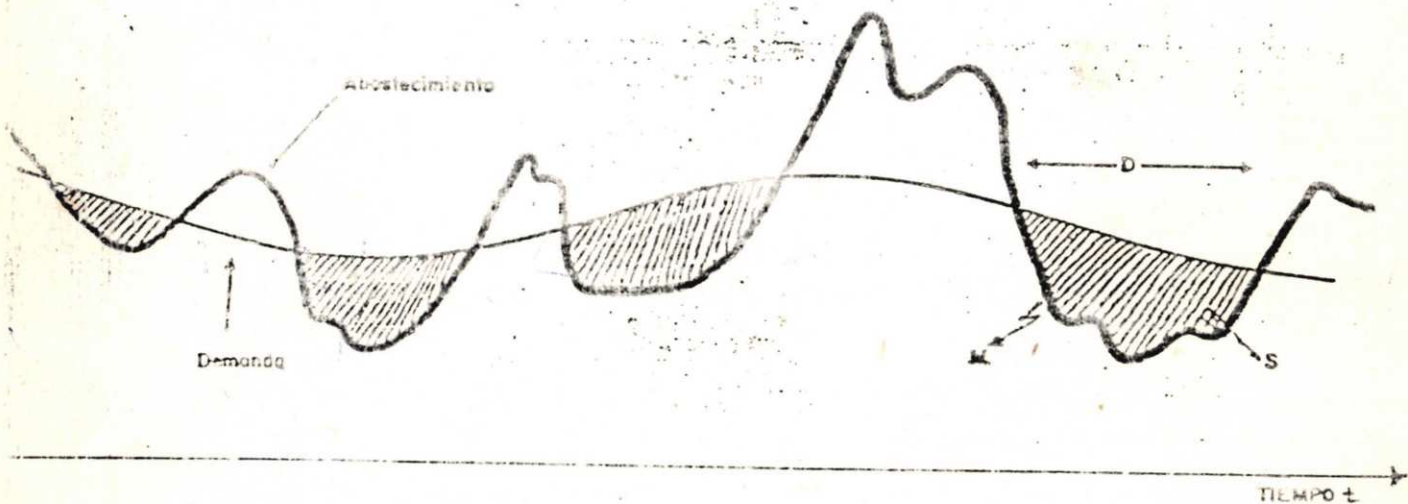
$\Delta = S_j = I_j - O_j$

DEFINICION DE SEQUIAS:

SERIE ABASTECIMIENTO MENOS DEMANDA

Fig. 2

ABASTECIMIENTO
DEMANDA



dentamente se puede tipificar en el orden creciente de estas cantidades, y en la simultaneidad de la ocurrencia de los niveles más críticos de estas cantidades.

Una definición general puede ser la siguiente: Las sequías expresan una condición de déficit de humedad o de volumen de agua para un uso, lugar y tiempo determinados.

Finalmente, una definición coherente y de creciente aceptación es la que utiliza la teoría de los runs (YEVJEVICH 1968) en donde las sequías se definen por la intersección de las curvas de abastecimiento y de demanda a lo largo del tiempo. Las características que se pueden determinar así son: La duración, la severidad y la intensidad de los eventos secos (Fig. 2).

El empleo de una definición universal como la anotada en el párrafo anterior y un procedimiento de cuantificación estandarizado de las sequías como el que nos permite la teoría de los runs, nos abre un campo enorme de investigación en el área de las sequías./29/

3. CAUSAS DE LAS SEQUIAS

Si nos atenemos a la definición de sequía dada en el capítulo anterior, podemos aceptar que el fenómeno es originado tanto en las variaciones climáticas como en las actividades del hombre. Es decir, las causas de las sequías pueden ser naturales y/o artificiales./4, 12/

De acuerdo al esquema mostrado en la Fig. 1, las entradas u oferta de agua al sistema pueden ser naturales o artificiales y, las demandas son generalmente artificiales. De todos los sistemas y subsistemas a los cuales podemos aplicar la definición de sequía como diferencias abastecimientos menos demanda, observamos uno, para el cual las entradas son las precipitaciones. Este sistema puede ser una cuenca de modo que el abastecimiento será producido por el clima y, las demandas por los diversos usos del agua.

Más que el clima, las sequías están asociadas con las fluctuaciones climáticas, las cuales pueden ser producto de la variabilidad natural, esperada para un área y tiempo determinados o de la variabilidad artificial producida por el hombre en forma deliberada o espontánea.

3.1 Variabilidad climática

La variabilidad o fluctuaciones climáticas son producidas espontáneamente por el sistema climático o por acción del hombre, que puede actuar a la vez en forma deliberada o espontánea.

3.1.1 Variabilidad climática natural

El clima se define como la generalización del comportamiento atmosférico y la síntesis de la sucesión interminable de estados del tiempo

individuales en un área determinada. En lo que respecta a nuestro país el clima es determinado por la intervención de los siguientes factores: La situación geográfica, la cordillera de los andes, el anticiclón del Pacífico, la corriente de Humboldt y la corriente del Niño. La interrelación de estos factores determina la existencia en el país de ocho tipos climáticos: Semicálido muy seco, cálido muy seco, templado húmedo, frío húmedo, frígido muy húmedo, polar muy húmedo, cálido húmedo y semicálido muy húmedo./16/

Como sabemos el clima de la tierra evoluciona muy lentamente y con cambios que se dan en períodos de miles de años. Los mecanismos por los cuales se originan estos cambios aún no se conocen aunque se tienen varias teorías al respecto. Hay varios enfoques que en síntesis dicen que estos cambios se deben a: 1) Influencias externas, 2) mecanismos internos, 3) factores extraterrestres y 4) una combinación de estos enfoques./12, 14/

Respecto a los cambios climáticos, debemos remarcar que éstos se dan en el largo plazo y, estrictamente hablando, no son los responsables de las sequías. La variabilidad climática si nos interesa, pues ellas son una de las causas del fenómeno que denominamos sequía.

La variabilidad o fluctuaciones climáticas naturales constituyen lo que podríamos denominar como perturbaciones estocásticas o aleatorias del sistema climático, que se superponen más o menos caóticamente, arriba y abajo de la tendencia principal direccionada por el clima.

En la Fig. 3a podemos apreciar la evolución del clima de la tierra a través de miles de años. En la Fig. 3c observamos una muestra (que es un punto, de longitud inapreciable en la Fig. 3a) consistente en unos 200 años.

Aquí apreciamos como la tendencia principal -el clima- es casi una constante mientras que las fluctuaciones alrededor de esta recta se suceden arriba y abajo. Se destacan además, como en la serie se presentan períodos "Húmedos" conformados por varios años y períodos "Secos" igualmente.

La variabilidad climática es importante para el diseño y operación de sistemas de recursos hídricos, debido a que los beneficios de esos sistemas son función directa de la confiabilidad de las operaciones del sistema y, éstas a su vez dependen de un apropiado entendimiento de la naturaleza de la variabilidad climática. Es importante destacar que históricamente los sistemas de recursos hídricos se han venido diseñando y operando en la asunción de que las variaciones climáticas del futuro próximo pueden esperarse que sean similares a las experimentadas en los últimos 100 o 200 años. Este enfoque histórico ha trabajado razonablemente bien y es probable que así continúe.
/19/

De todas formas, esta asunción tiene detractores, quienes piensan que actualmente estamos en un período de transición y que las grandes fluctuaciones climáticas que soporta ahora la tierra se deben a que tenemos ad portas un cambio significativo del clima. Al respecto, YEVJEVICH (1977) ha analizado los caudales de estaciones hidrométricas a través de todo el mundo con períodos de registro que llegan hasta los 150 años. Aplicando técnicas de correlación y análisis espectral él concluyó que los caudales en los últimos 100 años no han tenido una variación estadísticamente significativa y que por consiguiente, las proyecciones basadas en la estacionalidad temporal de la precipitación y los caudales son consistentes.

Un área de mucha importancia para el país son las nacientes de los ríos de la vertiente del Pacífico que colectan el agua precipitada allí para derramarlas sobre los valles y partes bajas que corresponden a la Costa, zona de primera importancia socio-económica. Cualquier anomalía en las precipitaciones sobre esta área andina trae consigo graves repercusiones para la economía de la región. En la actualidad todavía no se han hecho los estudios meteorológicos correspondientes que nos indiquen si las precipitaciones que dan origen a los ríos de la vertiente del Pacífico son producidas por masas de aire provenientes del Pacífico o del Atlántico.

3.1.2 Variabilidad climática artificial

Existe una serie de acciones que el hombre ha realizado y que producen espontánea o deliberadamente variaciones en el sistema climático sobre un área. Entre las obras del hombre que probablemente influyen en la variabilidad del clima tenemos a los embalses y sus grandes evaporaciones, las irrigaciones, la modificación del balance hidrológico al disminuir las descargas de los ríos al mar, etc., la forestación y deforestación de grandes áreas, la industrialización y urbanización con sus grandes influencias térmicas, contaminación, etc., y la producción de dióxido de carbono y otros gases y partículas que se cree sean los principales agentes que producen cambios en la composición atmosférica y que generan de esta forma anomalías en la circulación general de la atmósfera que pueden derivar en sequías.

La variabilidad del clima debido a acciones deliberadas del hombre se refiere a los experimentos de modificación artificial del clima como son la lluvia artificial, etc.

En este sentido se habla también de los esfuerzos de muchos científicos para introducir cambios deliberados en el clima e incluso de emplearlos con fines militares sin tener todavía un real conocimiento de las consecuencias.

3.2 Variación de las demandas

Las demandas constituyen cada una de las necesidades de agua requerida por los diferentes usos: Riego, hidroelectricidad, poblaciones e industrias, piscicultura, recreación y control de calidad de aguas, etc. Si estas demandas fuesen estáticas y la disponibilidad de agua, tal cual se ha descrito en 3.1, fuera la esperada no causarían mayores problemas. Esto porque ya sabíamos cuál zona es desértica, etc. y cuál sufre altas fluctuaciones de la precipitación, etc. Pero sucede, por un lado que los registros con los cuales contamos para estimar estas fluctuaciones son generalmente cortos y no nos informan fidedignamente cuánto de variable es la precipitación en una zona determinada. Es decir, con 20 años de información, por ejemplo, queremos visualizar toda la variabilidad del clima sobre una zona y diseñamos y construimos pensando que la secuencia de 20 años se repetirá exactamente y nos sorprende que se nos presente una gran avenida o una desastrosa sequía que no fueron sospechadas. Entonces concluimos que algo anda mal en el clima y que "nunca antes se vio algo similar aquí..." y que probablemente estamos frente a

CAMBIOS CLIMATICOS Y VARIABILIDAD CLIMATICA

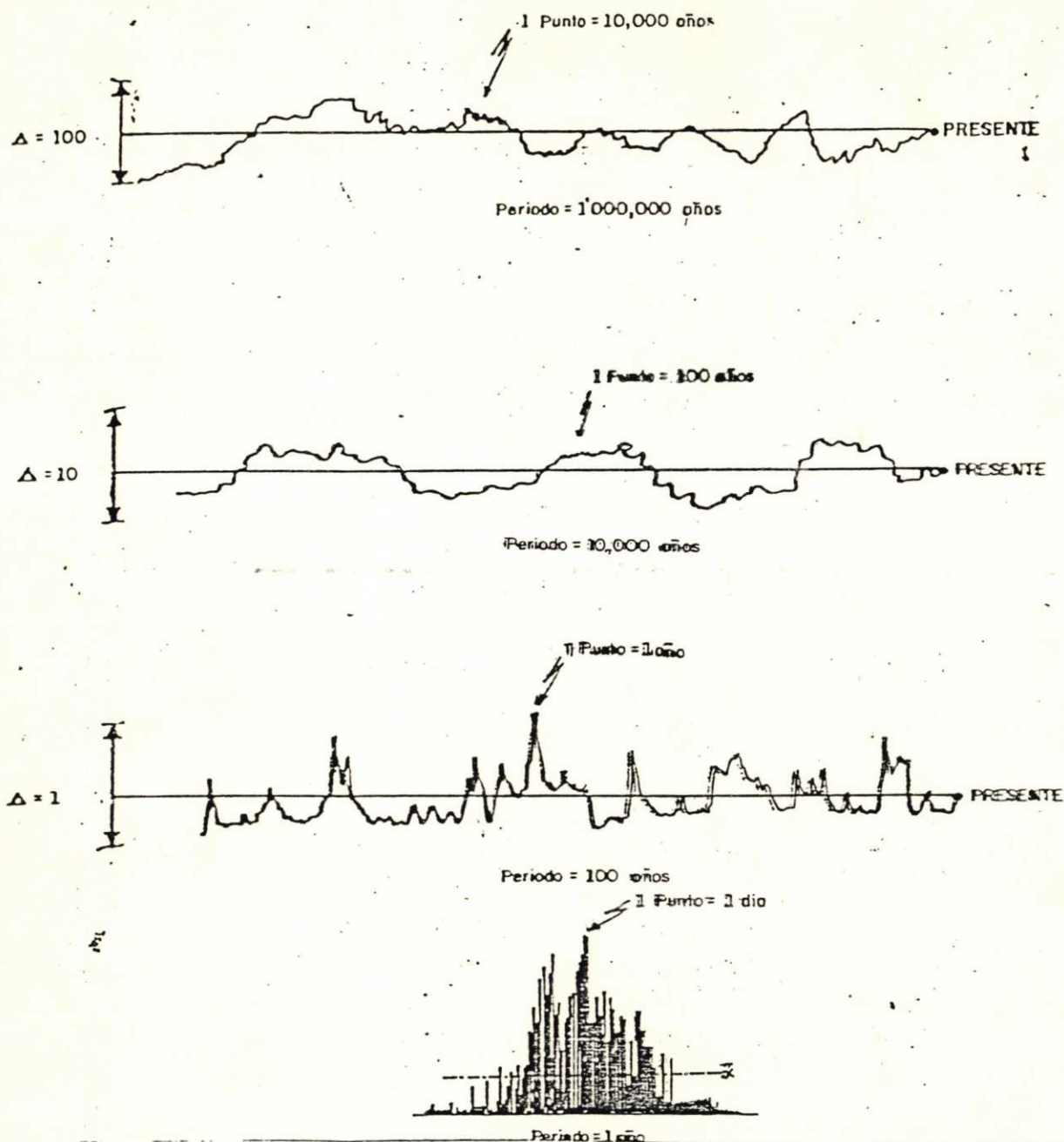


Fig.3 Secuencia figurada del clima de la Tierra a través del tiempo. Δ Indica el orden de magnitud de los cambios climáticos esperados en función del período de tiempo involucrado.

un grave cambio del clima./1/ Cuando con mucha probabilidad, la grave sequía o inundación eran eventos esperados, que podrían suceder dentro de lo que el sistema climático contiene como variabilidad natural para unos 100 o 200 años de segura estacionariedad.

Por otro lado, sabemos que las demandas no son estáticas y que éstas varían con el tiempo y el lugar. Por ejemplo, lo que la ciudad de Lima necesitaba de agua en 1881, no es la misma que en 1981, cien años después. No solamente ha habido crecimiento poblacional, sino que ahora la industrialización y la agricultura de riego han roto todos los records de requerimientos del líquido vital. Hace 100 años nuestras necesidades eran fácilmente satisfechas por el sistema del Rímac. Hoy nuestras demandas han presionado tanto nuestra disponibilidad natural del recurso que los han convertido en críticas y somos vulnerables a cualquier pequeña fluctuación del clima. Entonces podemos concluir, que en este caso, la variabilidad natural no nos produce sequías, sino más bien son las actividades del hombre.

4. IMPACTO DE LAS SEQUIAS

La historia de la humanidad muestra una serie de calamidades, muchas de las cuales son debidas a la ocurrencia de severas sequías. Las grandes civilizaciones como Egipto, China e India registran períodos secos con terribles consecuencias para su población por la miseria y hambruna que traían aparejados. El impacto para los pueblos antiguos muchas veces fue irreversible de modo que civilizaciones enteras simplemente desaparecieron de la faz de la tierra o tuvieron que emigrar./8, 11, 27/

En tiempos más recientes, todavía están frescos los recuerdos de la desastrosa sequía del SAHEL en el norte de Africa que duró desde 1968 hasta 1973 y que se calcula dejó más de 100,000 muertos. Cuando todos pensaban que las lluvias de 1973 daban fin a una sequía "inmemorial" como la que estaban pasando, nuevamente en 1975 se inició otra con similares características. Las consecuencias de estas sequías en el Africa fueron irreversibles y aún hoy se sienten sus efectos.

También Europa sufrió una severa sequía en 1975 - 1976, caracterizada por pronunciados descensos en la precipitación (debajo del 50% de la normal en Francia e Inglaterra) y altas temperaturas.

Igualmente en EE.UU. las grandes planicies fueron castigadas por una sequía en la década del 70 que se volvió crítica en 1975-1976. También el Nordeste Brasileño constituye un área en donde el problema de las sequías es crónico. Aquí una de las consecuencias es la elevación de las tasas de migración que fueron de 4% en 1940 y que en 1970 llegaron al 12%.

En nuestro país, las sequías han ocurrido también desde tiempos inmemorables. La última (1977-1979) todavía deja sentir sus efectos. Las pérdidas sumaron muchos miles de millones de soles principalmente en las cooperativas azucareras ubicadas en la costa norte.

El impacto de las sequías se tiene que analizar teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- 1) Separando los efectos de las sequías en la demografía, instituciones, economía, política, de un sistema dado.
- 2) Otra decisión es ver la ocurrencia e impacto de las sequías en términos de la perspectiva espacial y temporal, por ejemplo, en términos de localización geográfica, tipo de uso de agua y efectos a corto vs. largo plazo.
- 3) Finalmente, otra manera de examinar los efectos de las sequías es verlas a éstas involucradas en un gran contexto socio-cultural en el cual las condiciones locales, las variaciones regionales, la dependencia nacional o aspectos internacionales producen impactos diferenciados. Seguidamente describimos algunas ideas respecto al impacto de las sequías en la sociedad y en la economía.

4.1 Impacto social de las sequías

Se dice que no existe sequía en una zona-despoblada o sobre los océanos, por ejemplo, porque el fenómeno es producido fundamentalmente por las actividades humanas, la tecnología y las instituciones. Desde este punto de vista, el fenómeno no es producido exclusivamente por las fluctuaciones climáticas sino por la excesiva demanda sobre la oferta natural, es decir, más que un evento de la naturaleza es un acto cultural./27/

El agua es esencial en toda sociedad y juega un rol importantísimo en su florecimiento o decadencia. Dos aspectos fundamentales se observan en la disponibilidad de agua: Su capacidad para sustentar la vida de la población existente y sus actividades y, como un catalizador para futuras expansiones. La presencia del agua permite alcanzar los siguientes objetivos:

- 1) Garantiza la supervivencia de poblaciones y permite realizar actividades adicionales con el agua excedente.
- 2) Ayuda a alcanzar un crecimiento y desarrollo proveyendo capacidad de expansión, riqueza y estabilidad local, regional y nacional.
- 3) Facilita a través de proyectos específicos, por ejemplo (hidroelectricidad, recreación, control de avenidas, etc.) una política de propósitos múltiples, integrando esfuerzos de desarrollo.
- 4) Eleva la "calidad de vida" a través de servicios mejorados y contribuye a alcanzar el "bienestar social".

La Fig. 4 provee una forma de enumerar los impactos que sufre la sociedad al ocurrir una sequía. Aquí se destaca que cuanto más severa es la sequía, será más probable que sus efectos se sientan en el más alto nivel/27/ El carácter del impacto de la ocurrencia del fenómeno en una región dada dependerá en parte de la naturaleza de las fluctuaciones climáticas y en parte en la naturaleza de la sociedad. El impacto en sociedades subdesarrolladas con gran porcentaje de analfabetos, miseria y diversos conflictos es mayor que en las sociedades más desarrolladas.



- Pérdida de cosechos
- Reducción de tierras
- Reducción de hidroelectricidad
- Pérdidas en ganadería
- Pérdidas en pesquería
- Industria: fertilizantes, maquinaria
- Pérdida de ingresos
- Endeudamiento
- Elevación de precios
- Quiebra, bancarrota
- Pérdidas del gobierno
- Créditos y ayudas del gobierno e instituciones
- Importación de alimentos
- Ruptura de economía regional
- Costo de medidas-transporte, transferencias
- Costo de desarrollar nuevas medidas
- Daños a especies: animales, plantas
- Afectación de calidad del agua, aire
- Problemas de salud
- Desempleo
- Inseguridad, incerteza
- Conflictos sociales
- Migración
- Hambruna
- Miseria

4.2 Impacto económico de las sequías

A pesar de que el impacto económico de las sequías es relevante, poco se ha hecho para aplicar las técnicas desarrolladas por el análisis económico de proyectos hidráulicos. Una posible forma de estimar este impacto es procediendo de la siguiente forma./11/

- 1) Definir el uso de agua normal en un área (incluyendo el abastecimiento de agua por los sistemas hidráulicos y el agua suministrada naturalmente por la precipitación).
- 2) Derivar curvas de demanda (normalmente estimada desde el valor económico de la reducción en los productos, causados por la entrada de agua también reducidos) para el uso de agua principal definido.
- 3) Distribuir el agua disponible durante la sequía entre los usos de agua definidos.
- 4) Definir una estrategia de manejo para el agua disponible para cada uso durante la sequía.
- 5) Emplear curvas de demanda o curvas de pérdidas para los usos de agua definidos, para estimar el impacto económico directo por uso.
- 6) Adicionar impactos indirectos y emplear un modelo insumo-producto como garantía para estimar impactos secundarios.

5. PREDICCIÓN DE SEQUÍAS

Desde tiempos inmemorables, el hombre ha tratado de "visualizar" el futuro. Muchos esfuerzos intelectuales se han empleado en desarrollar técnicas que permitan el pronóstico o la predicción de acontecimientos en el futuro*. En general toda la ciencia y tecnología moderna están empeñados en esta tarea. Se hacen modelos y se simulan complejos sistemas en el computador tratando de estimar el comportamiento futuro de sociedades, empresas, viajes espaciales, máquinas, cultivos, puentes, edificios, embalses y aún la ocurrencia de fenómenos naturales de graves consecuencias como son terremotos, huracanes, inundaciones y sequías./25/

Hay dos enfoques principales en el área de la predicción de fenómenos naturales. El enfoque estocástico también llamado estadístico, probabilístico, sintético o matemático y el determinístico, también denominado dinámico, paramétrico o físico. Estos métodos se emplean solos o en forma combinada generalmente entre dos enfoques. La diferencia fundamental entre éstos se da en cuanto, el procedimiento estocástico estudia el proceso y su ocurrencia en términos probabilísticos, es decir a través de las leyes del azar, mientras que el determinístico lo hace en términos de certeza matemática y del análisis físico de procesos causa-efecto.

Al respecto es interesante mencionar que existe una vieja controversia

* En muchos estudios se hace una diferenciación respecto a los significados de Pronóstico y Predicción respectivamente. Aquí los tratamos como equivalente.

12/23

entre estas dos escuelas. Unos dicen que los procesos naturales, en nuestro caso, los hidrológicos, son estocásticos, y los otros, que por el contrario, éstos son determinísticos. Los primeros han impuesto una rigurosa y coherente teoría que ha permitido un vertiginoso desarrollo de la hidrología y los recursos hidráulicos en general. /7, 19, 30/

La esperanza de encontrar ciclos y periodicidades fuera de las estacionales es una quimera que fue perseguida durante muchos años. Por ejemplo, muchos creyeron que las lluvias anuales tenían algún ciclo de modo que el problema de predecir su ocurrencia se reducía a describir el ciclo que dirigía esta ocurrencia. Pero este enfoque determinístico ya pasó a la historia, pues la independencia en el tiempo de diversos procesos naturales, entre ellos la lluvia anual está probada. En el caso de las precipitaciones, existen registros en Europa y Norteamérica que poseen datos correspondientes acerca de 200 años, demostrándose mediante riguroso análisis estadísticos la inexistencia de ciclos plurianuales. Pruebas adicionales mostraron también que la estructura de la serie de tiempo no es diferente de la esperada para procesos aleatorios. /21, 23/

Este enfoque determinístico es el que subyace en algunas predicciones que sobre sequías se han venido haciendo basadas en periodicidades de la actividad solar no rigurosamente comprobadas y la relación de éstas con la presencia o ausencia de lluvias. La ausencia de registros consistentes y de análisis estadísticos adecuados de las relaciones supuestas motiva que estas predicciones no puedan comprobarse objetivamente, de modo que no podemos esperar de éstas más éxitos que lo que indica la casualidad. /1, 3, 5, 26/

En la predicción de las sequías es interesante mencionar tres aspectos concurrentes: Inicio, duración y terminación de las sequías. Además también hay que tener en cuenta el período de cobertura de la predicción que puede ser al corto, mediano o largo plazo según se trate de días o meses. Hay varios métodos disponibles que se pueden clasificar en sinópticos, estadísticos, físico-estadísticos y físico-matemáticos. De éstos, los más prometedores en nuestro caso son los dos últimos.

En conclusión podemos decir que la predicción de la ocurrencia, duración y terminación de las sequías es más factible en términos probabilísticos y de riesgo -con la concurrente justificación física del proceso- que en términos de certeza matemática. La predicción exacta o determinística está en sus inicios y el problema permanece todavía oscuro y aún insoluble. /14/

Al final, quizás terminaremos por aceptar la presencia de una señal estocástica predominante en estos procesos, producida por las complejas interrelaciones entre las miríadas de variables que gobiernan estos sistemas.

6. CARACTERIZACIÓN DE LAS SEQUÍAS

Las sequías se pueden analizar de varias formas que podemos agrupar en dos principales: Caracterización por índices y, caracterización estadística o estocástica.

6.1 Caracterización por índices

Un índice es básicamente un número o una letra que señala en forma indirecta el grado al cual algo determinado es afectado por una situación dada. /9/

Varios índices que caracterizan sequías se han propuesto, aunque en general son incompletos, empíricos o muy difíciles de aplicar debido a la información que requieren.

En general estos índices usan información de precipitación, temperatura, evapotranspiración anual, pérdida de humedad de los suelos, etc. Uno de los índices más logrados en este sentido es el de PALMER el cual es una función de diferencias pesadas acumuladas entre la precipitación real y los requerimientos de precipitación en términos de evapotranspiración. El factor de precipitación de LANG (1915, Alemania) desarrollado para ayudar en la clasificación climática de suelos es definido como $I = P/T$ en donde P es precipitación en mm y T es temperatura en °C. El Índice de Aridez de MARTONNE (1926, Francia) es usado para definir los límites climáticos de los desiertos, praderas y bosques. No tiene sensibilidad para zonas frías en donde $t + 10$ se aproxima a cero. Su expresión es $I = p / (t + 10)$ en donde P es la precipitación mensual en mm y t es la temperatura media mensual en °C. Un índice mensual de I es indicador a - proximado de aridez.

También se han usado índices de otro tipo como son la variabilidad y los deciles de precipitación anual. Los índices o coeficientes de variabilidad CV utilizan generalmente como variable a la lluvia y se pueden considerar como buenos indicadores de sequía. En general, estos coeficientes de variabilidad indican la existencia de zonas deficitarias en donde hay altos coeficientes de variabilidad y viceversa. Pero lamentablemente también estos índices inducen a confusión cuando aparecen valores de CV altos en zonas lluviosas, como, por ejemplo, la amazonía peruana. Esto se debe a que hay zonas en las que a grandes medias anuales de precipitación también le corresponden grandes variaciones en la desviación estándar (y a pesar de lo cual hay agua suficiente para los usos de agua en la zona) y viceversa en zonas secas, podemos tener pequeños CV debido a que a medias pequeñas de precipitación se le asocia una desviación estándar también pequeña, aunque este caso no constituye la generalidad. De esta forma uno no puede concluir que a altos CV les corresponde zonas secas, como regla general. Todo depende del régimen de precipitación de la región bajo estudio.

6.2 Caracterización estocástica de sequías

La caracterización estocástica de sequías permite la modelación matemática de características de duración, intensidad y severidad de sequías puntuales y areales. Empleando adecuados métodos estadísticos se pueden también realizar estudios de frecuencia, de probabilidades condicionales, etc. /2, 18, 24/

6.2.1 Sequías puntuales

Las sequías puntuales se refieren a un lugar determinado, tal como u-

na estación hidrométrica, un proyecto o área de pequeña extensión, etc. Las características que aquí se evalúan sirven para estimar los impactos de sequías en proyectos, los impactos de medidas de mitigación o también para apreciar riesgos, políticas y estrategias generales de a lviación de sequías./30/

Varias decisiones hay que hacer al analizar las sequías entre las que podemos mencionar las siguientes: Las que se refieren a la selección de las variables que definen el fenómeno, la selección de las variables que describen las sequías, la selección del intervalo de tiempo a estudiar, etc.

Las variables que definen las sequías pueden ser la lluvia y la nieve, la infiltración, la humedad del suelo, y los niveles freáticos. La selección de una depende del interés del usuario, de la disponibilidad de datos y de razones económicas también.

Las variables que describen las características de las sequías son principalmente la longitud T (duración), el déficit total (S_T) o D (run suma) y la intensidad M_T .

El intervalo de tiempo a estudiar depende también del particular interés del investigador y de las características que quiera destacar. Pueden ser semanas, meses, años o sus múltiplos.

6.2.2 Sequías regionales

Las características de las sequías puntuales se pueden volcar sobre un plano y regionalizar las tendencias sobresalientes. Para esto se realizan análisis previos que tratan de relacionar una característica cualquiera de una sequía puntual con algún parámetro fisiográfico o geográfico tal como la altitud, la latitud y/o la longitud entre otros.

Debido a que los registros de las estaciones frecuentemente son muy cortos podemos establecer modelos matemáticos para los registros de algunas estaciones representativas de la región y generar nuevas muestras de modo de estimar más fidedignamente las características regionales predominantes. Luego podemos trazar las isolíneas en base a la red de estaciones o puntos existentes o estableciendo una grilla, siendo este último procedimiento el más recomendado por su exactitud y economía.

Las características regionales más importantes a estudiar son el área de déficit, el área de déficit total y la intensidad del déficit máximo, todo esto a un nivel de truncación dado. (Fig. 5).

Como ejemplo de caracterización estocástica de sequías puntuales en nuestro país tenemos la realizada en el río Chicama (ALIAGA, 1980) sobre los registros de la estación hidrométrica de Salinar. Los objetivos principales del estudio fueron determinar las características de la sequía crítica, de la sequía histórica y, además el de ajustar la duración crítica de sequías generadas a una función teórica de probabilidad.

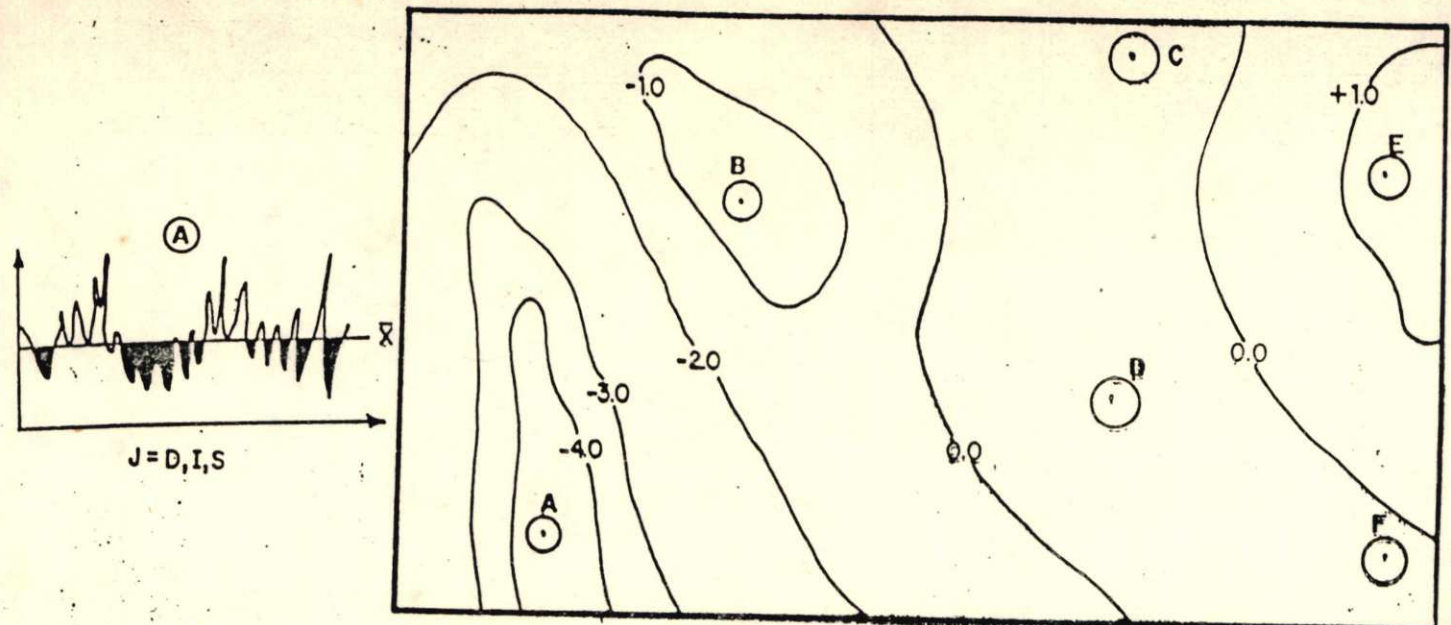
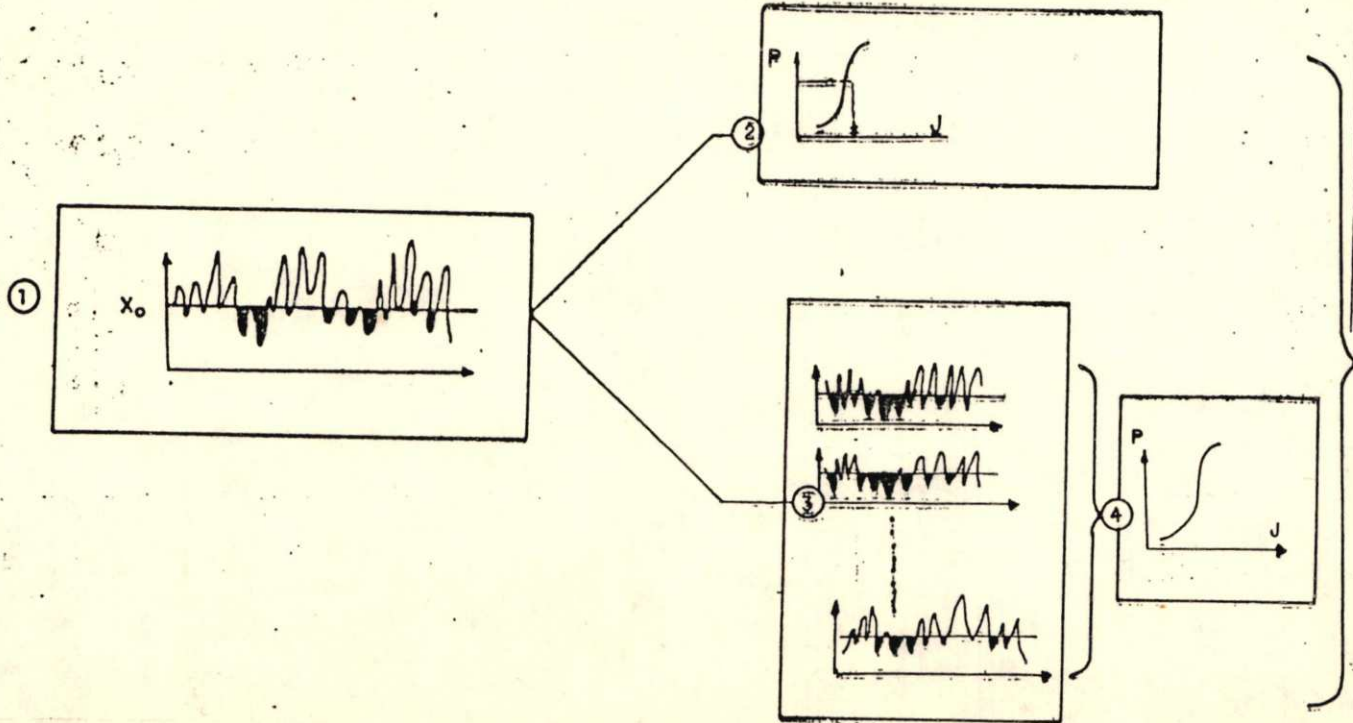


Fig.5. Características de una sequía puntual y regionalización. A, B, ... son estaciones medidoras en la zona. J es una característica cualquiera de la sequía: Duración, Intensidad, Severidad; la secuencia 1, 2, 3, 4 y 5 indica los pasos a seguir en una regionalización. En el paso 5, X, Y indican parámetros geográficos ó fisiográficos como son la Latitud, la Longitud ó la altitud de la estación etc.



5 $J = f(X, Y)$

6.2.3 Probabilidad de ocurrencia de sequías

Una caracterización estocástica de sequías se realizó sobre casi todo el territorio nacional empleando los registros de precipitación de aproximadamente 260 estaciones./24/

El estudio tuvo como objetivos principales mostrar la vulnerabilidad a las sequías o el riesgo asociado a su ocurrencia para todo el territorio nacional a excepción de la costa árida y la selva baja húmeda. Se definió evento seco como aquel valor anual igual o menor que el 75% de la normal (o el 60% en el caso mensual) y se procedió a establecer las frecuencias de eventos secos en cada estación pluviométrica.

Las relaciones establecidas para cada punto fueron:

- un año seco
 - dos y tres años secos consecutivos
 - un mes seco
 - dos, tres y cuatro meses secos consecutivos
- y las probabilidades condicionales:
- mes seco/año seco
 - 2, 3 y 4 meses secos consecutivos/año seco

En todos los casos, los meses que se analizaron fueron los del inicio de la temporada de lluvias como son setiembre, octubre, noviembre y diciembre. En ese sentido, por ejemplo, se estudió la relación existente entre los cuatro meses mencionados en una condición de sequía y el año seco correspondiente.

Luego se trató de regionalizar las asociaciones regionales de frecuencia halladas tratando siempre de trabajar con las tendencias predominantes de la característica estudiada. Se utilizó también diversa información como son mapas climatológicos, hidrológicos, fisiográficos, etc.

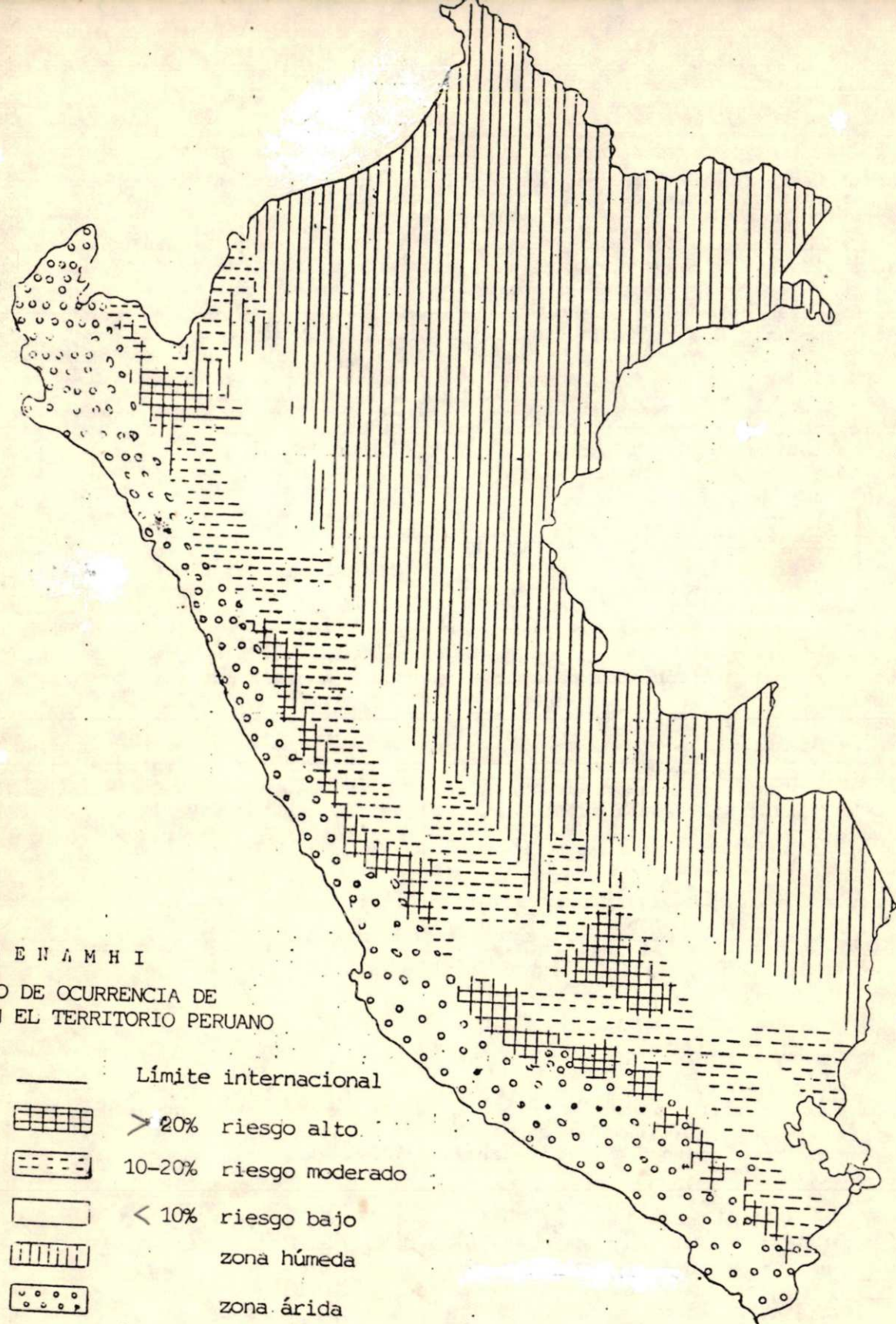
Los resultados más importantes entre otros, se refieren a la detección de zonas del país con alto riesgo de ocurrencia de sequías tales como casi toda la vertiente del Pacífico y las zonas de Cajamarca, Apurímac y Cuzco en la vertiente del Atlántico. (Fig. 6).

7. CONTROL DE LAS SEQUIAS

Este capítulo se refiere a todas aquellas acciones de orden técnico, económico o administrativo que tratan de mitigar el impacto de las sequías en los usuarios y en la economía en general (YEVJEVICH, 1980).

Estas medidas constituyen diferentes tecnologías adecuadas a cada problema específico y permiten implementar dentro de términos razonables una respuesta óptima desde el punto de vista económico y social. Existen diversas medidas que podemos elegir y que podemos agrupar en tres grandes tipos: 1) Medidas de abastecimiento orientado, 2) Medidas de demanda orientada, y 3) Medidas de minimización de efectos.

Seguidamente listamos las diversas medidas que constituyen lo que se ha



SENAMHI

RIESGO DE OCURRENCIA DE SEQUIAS EN EL TERRITORIO PERUANO

- Límite internacional
- [Grid pattern] > 20% riesgo alto
- [Dotted pattern] 10-20% riesgo moderado
- [White box] < 10% riesgo bajo
- [Horizontal hatching] zona húmeda
- [Vertical hatching] zona árida

Nota: Los porcentajes se refieren a la frecuencia de valores de precipitación anual menores o iguales al 75% del promedio anual

Fuente: Informe del Grupo de Trabajo del SENAMHI para el análisis de las sequías en el Perú. Nov. 1980.

denominado como tecnología del control de las sequías. Anotamos en cada caso unos breves comentarios ya que una descripción detallada de éstos así como su potencial y limitaciones caen fuera de los objetivos del presente estudio.

7.1 Abastecimiento orientado

Son medidas que se intentan para aumentar el abastecimiento durante las sequías. Se pueden dividir en tres áreas: 1) Mejor uso de abastecimientos existentes, 2) Desarrollo de nuevos abastecimientos y 3) Uso de enfoques complejos o no convencionales para incrementar el suministro.

7.1.1 Mejor uso de los abastecimientos existentes

- Este conjunto de medidas incluye:
- uso de almacenamiento de aguas superficiales
- uso de almacenamiento de aguas subterráneas
- transferencia e intercambio de agua entre cuencas y dentro de cuencas
- mejora del abastecimiento por conservación del agua

7.1.2 Desarrollo de nuevos abastecimientos

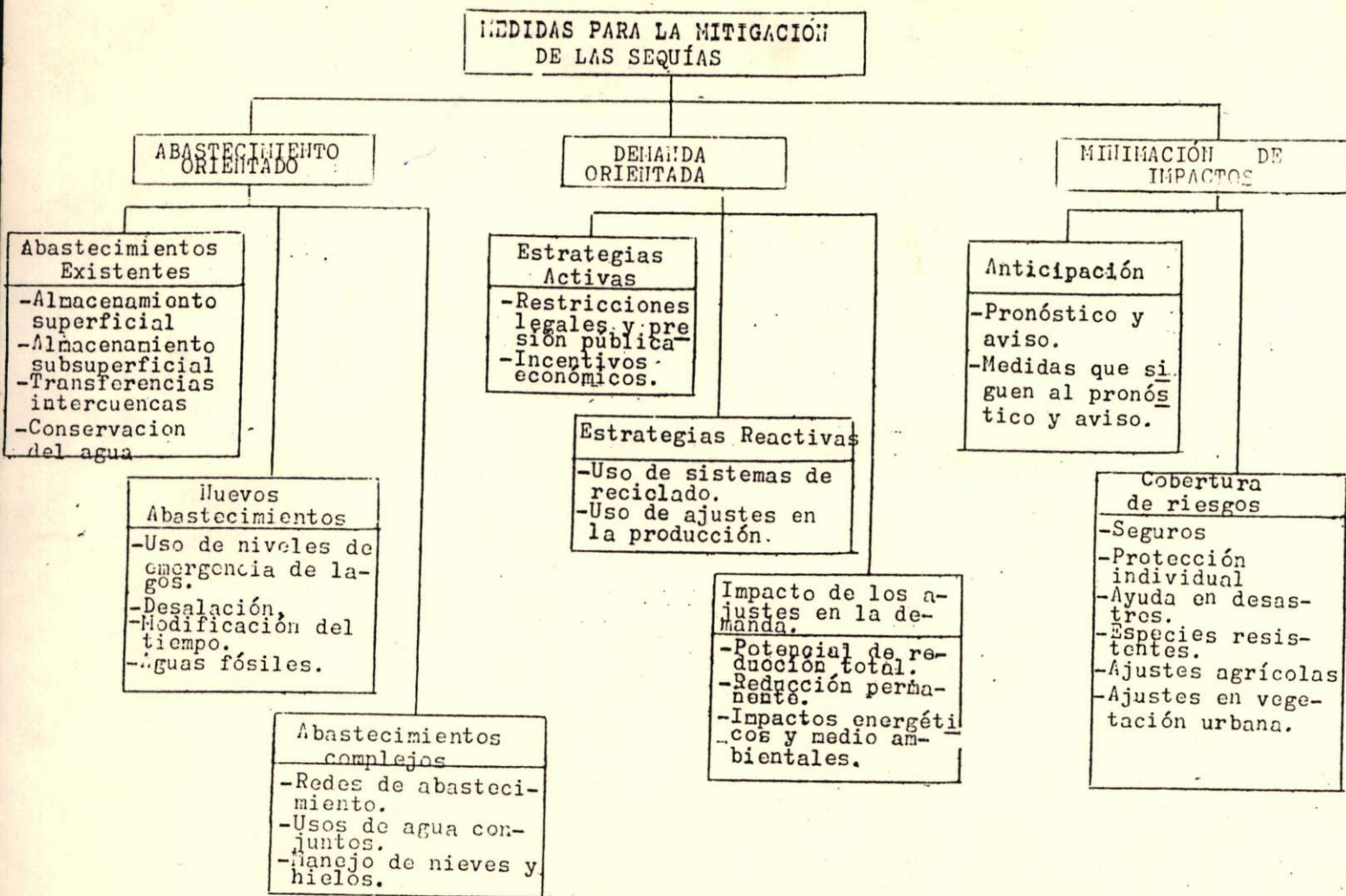
- Incluye la construcción de nuevos reservorios, además de nuevos desarrollos de aguas subterráneas, nuevas estructuras de canales, etc. Consignamos además otras medidas que pueden proporcionar nuevos abastecimientos y que normalmente no se usan en períodos de sequía pero que pueden jugar un papel muy importante en la mitigación de los efectos de las sequías.
- Uso de niveles fijos de lagos y embalses
- Desalación del agua de mar
- Modificación del clima
- Uso de aguas fósiles.

7.1.3 Alternativas complejas de abastecimiento de agua

- Los sistemas de recursos hídricos se están convirtiendo con el tiempo en más grandes y complejos. Sus objetivos están cambiando, sus necesidades expandiéndose, los criterios sobre calidad del agua continuamente evolucionando y también las restricciones sociales y medio ambientales son más versátiles y complejas a la vez. Con ellas, las medidas de mitigación de las sequías necesariamente también se convierten en complejas. Y para futuras sequías, la complejidad de los problemas también se incrementará. Algunos de esos nuevos y complejos abastecimientos de agua potenciales son presentados como medidas de mitigación de sequías.
- Conexión y extensión de grandes redes de abastecimiento
- Uso conjunto de todas las fuentes de agua
- Manejo de nieves y hielos.

 *mapa*

FIGURA 7. TECNOLOGÍA DEL CONTROL DE SEQUÍAS, SEGÚN YEVJEVICH



19/123

8.0 COMENTARIOS FINALES

Es necesario mencionar algunos hechos importantes al finalizar este trabajo. Primero, que constatamos lo poco que se ha hecho en nuestro país en cuanto a las sequías. A pesar de que vivimos en un desierto como es la costa peruana, nuestras costumbres en cuanto al uso del recurso hídrico no son consecuentes con esta situación. Necesitamos por eso desarrollar una conciencia colectiva al respecto y tecnologías de uso y manejo del recurso adecuados a esta realidad.

En segundo lugar, debemos de señalar la necesidad de prepararnos adecuadamente para combatir las sequías. Es deplorable ver que cada desastre natural, llámense éstos inundaciones, huaycos, sequías, etc., nos sorprende desprevenidos y siempre en la misma situación de impotencia y desorganización que la vez anterior. Recién pensamos en el fenómeno cuando lo tenemos encima y entonces ya poco es lo que podemos hacer; aunque justo se nos ocurra hacerlo todo, las pérdidas económicas ya serán importantes y, la inexistencia de las políticas y estrategias correspondientes sólo agravarán más la situación.

Finalmente, nos referiremos a la necesidad urgente de investigación en esta área de los conocimientos. Sabemos relativamente poco y mucho menos en cuanto se refiere a su ocurrencia y efectos en nuestro país. No hay posibilidad de éxito en la lucha por minimizar los impactos de la sequía en nuestro país, si no investigamos. El empirismo se nutre y a la vez promueve, perpetúa

el subdesarrollo. La investigación científica y su justa aplicación rompen con este círculo vicioso y nos permite responder con mejores posibilidades el reto que la naturaleza y las necesidades del hombre nos plantean.

9. CONCLUSIONES

1. Existen muchas definiciones de sequía, pero todas coinciden en la idea del déficit, de modo que una definición única y de aceptación universal tiene que hacer énfasis en este hecho.
2. La cuantificación de las sequías mediante una adecuada caracterización como la que permite el enfoque de la serie de diferencias abastecimiento menos demanda, posibilita alcanzar una definición versátil y adaptable a cualquier uso de agua o interés.
3. Las sequías son producidas por causas climáticas y/o por acción del hombre.
4. Los efectos de las sequías se dejan sentir en todas las actividades humanas, especialmente en la agricultura, la hidroelectricidad, el abastecimiento poblacional, la demografía y política entre otros.
5. La predicción de sequías especialmente en el mediano y largo plazo es casi imposible utilizando métodos determinísticos, mientras que los modelos estocásticos sí permiten una estimación de la ocurrencia del fenómeno con un riesgo asociado.
6. La caracterización mediante índices es incompleta y muy rígida mientras que la estadística permite la modelación matemática de las principales propiedades de las sequías con un rendimiento más completo y manejo más versátil.
7. Existen muchas estrategias y medidas que tratan de mitigar los efectos más o menos desastrosos de las sequías, siendo necesario que su establecimiento en situaciones críticas sea producto de estudios y planeamiento previos para que su empleo constituya una secuencia coherente de soluciones adecuadas a cada situación específica.
8. Es necesario realizar estudios en el área de las sequías que permitan diseñar las estrategias y tecnologías adecuadas a nuestra realidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alexander T. (1975) Amenazadores cambios en el clima del mundo. SENAMHI 20 p.
2. Aliaga S. (1980) Análisis de las características de sequías por el método experimental-Teoría del run. Tesis M.S. U.N.A., La Molina, Lima, Perú.
3. Chagnon S. (1980) Removing the confusion over drought and floods: The interface between scientists and Policy Makers -Water International- Jun. 1980, 2 p.
4. Daniel H. (1980) El hombre y la variabilidad climática. OMM-Programa Mundial sobre el Clima. CMM N° 543 Ginebra, Suiza, 32 p.
5. Diario Correo Tres años de verano insoportable. 16.1.1977, Lima, Perú.
6. Dracup J. et al. (1980) On the definition of droughts. Water Resources Research, Vol. 16, N° 2, April 1980, 5 p.
7. Dracup J. et al. (1980) On the statistical characteristics of drought events. Water Resources Research, Vol. 16 N° 2, April 1980, 7 p.
8. French R. (1980) Environmental Impact of Droughts. NATO A.S.I.: Droughts Lisboa, Portugal.
9. HIMAT (1980) Desarrollo de un índice para el estudio de sequías. División de Meteorología, Bogotá, Colombia, 30 p.
10. Hoffman M. (1978) Sequía urbana en el área de la Bahía de San Francisco: Un estudio de sus implicancias sociales e institucionales. Taller Argentino-Estadounidense sobre Sequías. Mar del Plata, Argentina, 1978
11. James L. (1980) Economic Impacts of Droughts. NATO A.S.I.: Droughts Lisboa, Portugal.
12. O.M.M. (1976) Declaración de la OMM sobre cambios climáticos en el Mundo. Comisión Ejecutiva de la O.M.M. SENAMHI, 16 p.
13. Palmer W. & Denny L. (1971) Drought Bibliography. NOAA Tech. Memo. EDS 20 Silver Springs, M. USA
14. Peixoto J. (1980) Limitations and Potential for Forecast of Drought Initiation, Duration and Termination. NATO A.S.I.: Droughts Lisboa, Portugal.
15. Pendola A. (1975) Análisis hidrológico de las sequías en Chile. ENDESA, Chile.
16. Planorh (1976) Diagnóstico de sequías. Bases Metodológicas, Lima, Perú.
17. Rossi G. (1980) Regional Analysis of Droughts: A Sicily Case Study. Faculty of Engineering, University of Catania, Italy, 18 p.

18. Salas J. (1978) Statistical Properties of Droughts. USA-Argentinian Workshop on Droughts. Mar del Plata, Argentina, 24 p.
19. Schaake J. & Kaczmarek Z. (1979) Climate variability and the design and operation of water resource systems. World Climate Conference. WMO. N° 537, Geneve, Z. 22 p.
20. SENAMHI (1970) Aspectos de las sequías del Perú. Seminario Regional sobre hidrología de sequías, Lima, Perú.
21. Serra A. (1972) A study on probability. Dep. Nac. Meteorología, Brasil, 15 p.
22. Sudene (1980) Drought in Northeastern Brazil. MINTER, Brasil, 31 p.
23. Vega G. (1979) Cálculo de la probabilidad de precipitación diaria en San José utilizando cadenas de Markov de primer orden. Nota Tec. N° 3, Inst. Met. Nac., Costa Rica.
24. Vera Fung G., Cáceres R. y Mannarelli L. (1980) Probabilidad de ocurrencia de sequías. Grupo de Trabajo del SENAMHI para el Análisis de las Sequías en el Perú. Lima, Perú. 23 p.
25. Vera Fung G. (1975) Métodos de predicción hidrológica. SENAMHI, Lima, Perú, 30 p.
26. Victoria J. (1980) Estudio del régimen hidrológico del Perú. Ciclos anuales y multianuales y la simultaneidad de sequías a nivel nacional. Lahmeyer International GmbH, Lima, Perú, 53 p.
27. Vlachos E. (1980) Social Impacts of Droughts. NATO A.S.I.: Droughts, Lisboa, Portugal.
28. WMO (1975) Drought and Agriculture. Prepared by O.E. Houman, Tech. Note 138, Geneve, Z.
29. Yevjevich V. (1980) Feasibility of Drought Control Technology. NATO A.S.I.: Droughts. Lisboa, Portugal.
30. Yevjevich V. (1980) Methods for Determining Statistical Properties of Droughts, Including the Risk. NATO A.S.I.: Droughts. Lisboa, Portugal.

