



### INSCRIPCIONES

CENTRO DE EDUCACION CONTINUA DE LA  
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES DE  
LA FACULTAD DE INGENIERIA, U. N. A. M.

Palacio de Minería Calle de Tacuba No. 5  
México 1, D. F.

### Horario de oficinas:

Lunes a viernes de 9 a 18 h.

**Cuota de inscripción \$ 3,000.00**

La cuota de inscripción incluye:

- una carpeta con las notas de los profesores
- bibliografía sobre el tema
- servicio de cafetería

### Requisitos

- Pagar la cuota de inscripción o traer oficio de la empresa o institución que ampare su inscripción, a más tardar una semana antes del inicio del curso
- Llenar la solicitud de inscripción
- Entregar copia de la cédula profesional

Para mayores informes hablar a los teléfonos

521-40-20      521-73-35      512-31-23

### CONSTANCIA DE ASISTENCIA

Las autoridades de la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., otorgarán una constancia de asistencia a los participantes que concurran regularmente y que realicen los trabajos que se les asignen durante el curso.

CIRCULA LIBRE DE PORTE  
POR VIA DE SUPERFICIE  
Y DENTRO DEL TERRITORIO NAL.  
ART. 17 LEY ORGANICA DE LA U N A M

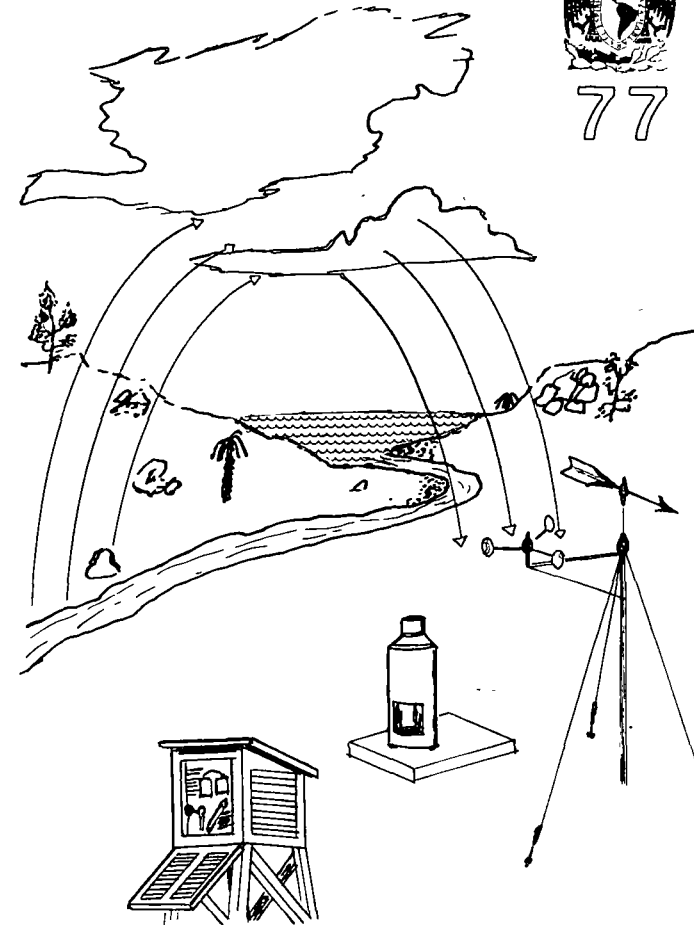


centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, u n a m

Palacio de Minería  
Calle de Tacuba No. 5  
México 1, D.F.



77



## HIDROLOGIA SUPERFICIAL

**DURACION:** 40 h.

**FECHAS:** del 24 de octubre al 7 de noviembre

**HORARIO:** lunes a viernes de 17 a 21 h.

**Coordinador:** Dr Rolando Springall.

Con patrocinio de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y la Comisión del Plan Nacional Hidráulico.

centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, u n a m



## PRESENTACION DEL CURSO

El Centro de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería, de la UNAM, en colaboración con la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, a través de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico, han preparado el presente curso con un grupo de especialistas en cada uno de los temas a tratar durante el desarrollo del programa.

## OBJETIVO

Este curso tiene por objeto proporcionar elementos para la actualización en hidrología superficial, mediante la presentación de las técnicas utilizadas actualmente en el análisis y su aplicación al diseño y operación de las estructuras hidráulicas.

## A QUIEN VA DIRIGIDO

Este curso está dirigido a los profesionales, relacionados con la hidrología o alguna de sus ramas, empleados en la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos o en cualquier otra dependencia gubernamental o institución particular relacionada con el manejo del agua.

## TEMARIO

### 1. INTRODUCCION

Definición, historia, aplicaciones y limitaciones de la hidrología.  
El ciclo hidrológico; sus componentes y funcionamiento.

### 2. TEMPERATURA Y HUMEDAD ATMOSFERICA

Temperatura atmosférica, humedad atmosférica, vientos.

### 3. LA PRECIPITACION

Formación, formas de precipitación, tipos, medición, ajuste de registros, histograma, precipitación media, análisis altura-aérea-duración, precipitación probable, curvas intensidad-duración-frecuencia.

### 4. EVAPOTRANSPIRACION

Factores que afectan la evaporación, medición de la evaporación, fórmulas para determinar la evaporación en vasos, el proceso de transpiración, factores que afectan la transpiración, determinación de la evapotranspiración, uso consuntivo, método de Blaney-Criddle modificado, requerimiento de riego en zonas tropicales.

### 5. EL ESCURRIMIENTO Y LA CUENCA

El proceso de escurrimiento, medición del escurrimiento, componentes de un hidrograma, definición de una cuenca, clasificaciones de una cuenca según sus características físicas.

### 6. LA AVENIDA MAXIMA PROBABLE

Aplicaciones, métodos estadísticos (Gumbel, Nash). Regionalización, determinación de la tormenta de diseño, aplicaciones del hidrograma unitario, análisis de flujos mínimos.

### 7. MODELOS MATEMATICOS QUE CONVIERTEN LA PRECIPITACION EN ESCURRIMIENTO

La fórmula racional, modelos para cuencas pequeñas: Modelo de Chow, Ipai-Wu y Seshapa-Rao, el hidrograma unitario, modelos que simulan el comportamiento del ciclo hidrológico: Modelos de Stanford.

### 8. HIDROLOGIA OPERACIONAL

Necesidad de su utilización, método de Fiering, método de los componentes, aplicación con el modelo MOSS-III (Monthly Stream-Flow Simulation).

### 9. INTRODUCCION A APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS

Funcionamiento de un vaso, estimación de la capacidad de una presa derivadora, estimación de la capacidad total de un vaso, funcionamiento de un sistema de vasos.

### 10. MESA REDONDA

## PROFESORES

ING. RAMON DOMINGUEZ M.

ING. ANTONIO FERNANDEZ ESPARZA

ING. JAVIER GONZALEZ V.

ING. OMAR LUCERO

ING. CESAR HERRERA TOLEDO

DR. ROLANDO SPRINGALL



centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS DEL CENTRO DE EDUCACION  
CONTINUA

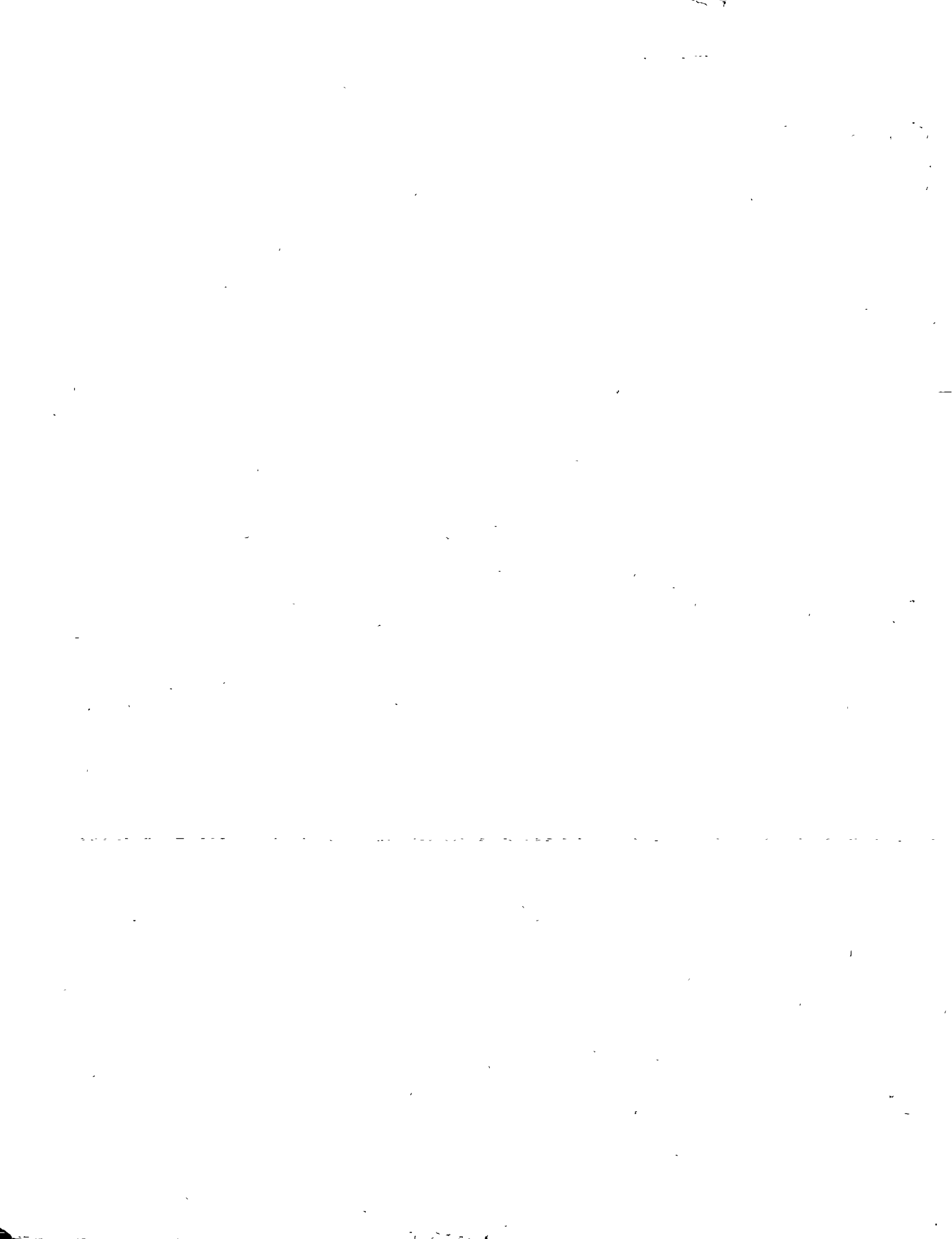
Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del Jefe del Centro de Educación Continua, Dr. Pedro Martínez Pereda, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso. Las personas que deseen que aparezca su título profesional precediendo a su nombre en la constancia, deberán entregar copia del mismo o de su cédula a más tardar el SEGUNDO DIA de clases, en las oficinas del Centro con la señorita Barraza, encargada de inscripciones.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona encargada de entregar las notas del curso. Las inasistencias serán computadas por las autoridades del Centro, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo del 80% de asistencia.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece el Centro están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados constituyendo verdaderos seminarios.

Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso. Las personas comisionadas por alguna institución deberán pasar a inscribirse en las oficinas del Centro en la misma forma que los demás asistentes entregando el oficio respectivo.

Con objeto de mejorar los servicios que el Centro de Educación Continua ofrece, al final del curso se hará una evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos por parte de los asistentes.







HIDROLOGIA SUPERFICIAL

Fecha: Del 24 de octubre al 7 de noviembre.

T E M Á

	PROFESOR	DIA	DURACION : 40 h
1. INTRODUCCION Definición, historia, aplicaciones y limitaciones de la hidrología. El ciclo hidrológico; sus componentes y funcionamiento.	Dr. Rolando Springall	Lunes 24	HORA 17 - 18 h
2. TEMPERATURA Y HUMEDAD ATMOSFERICA Temperatura atmosférica, humedad atmosférica, vientos.	Ing. Omar Lucero	Lunes 24	18 - 21 h
3. LA PRECIPITACION Formación, formas de precipitación, tipos, medición, ajuste de registros, histograma, precipitación media, análisis altura-área-duración, precipitación probable, curvas intensidad-duración-frecuencia.	Ing. Omar Lucero	Martes 25	17 - 21 h
4. EVAPOTRANSPIRACION Factores que afectan la evaporación, medición de la evaporación, fórmulas para determinar la evaporación en vasos, el proceso de transpiración, factores que afectan la transpiración, determinación de la evapotranspiración, uso consuntivo, método de Blaney-Criddle modificado, requerimiento de riego en zonas tropicales.	Ing. Antonio Fernández Esparza	Miércoles 26	17 - 21 h
5. EL ESCURRIMIENTO Y LA CUENCA El proceso de escurrimiento, medición del escurrimiento, componentes de un hidrograma, definición de una cuenca, clasificaciones de una cuenca según sus características físicas.	Dr. Rolando Springall	Jueves 27	17 - 21 h
6. LA AVENIDA MAXIMA PROBABLE Aplicaciones, métodos estadísticos (Gumbel, Levediev, Nash). Regionalización, determinación de la tormenta de diseño, aplicaciones del hidrograma unitario, análisis de flujos mínimos	Dr. Rolando Springall	Viernes 28	17 - 21 h

## HIDROLOGIA SUPERFICIAL

TEMA	PROFESOR	DIA	HORA
7. MODELOS MATEMATICOS QUE CONVIERTEN LA PRECIPITACION EN ESCURRIMIENTO La fórmula racional, modelos para cuencas pequeñas: Modelo de Chow, IPAI-WV y Seshapa-Rao, el hidrograma unitario, modelos que simulan el comportamiento del ciclo hidrológico: Modelos de Stanford.	Ing. César Herrera Toledo	Lunes 31 Martes 1o.	17 - 21 h 17 - 19 h
8. HIDROLOGIA OPERACIONAL Necesidad de su utilización, método de Fiering, método de los componentes, aplicación con el modelo MOSS-III (Monthly Stream-Flow Simulation).	Ing. Ramón Domínguez M.	Martes 1o. Jueves 3	19 - 21 h 17 - 21 h
9. INTRODUCCION A APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS Funcionamiento de un vaso, estimación de la capacidad de una presa derivadora, estimación de la capacidad total de un vaso, funcionamiento de un sistema de vasos.	Ing. Javier González V.	Viernes 4 Lunes 7	17 - 21 h 17 - 19 h
10. MESA REDONDA		Lunes 7	19 - 21 h



DIRECTORIO DE PROFESORES DEL CURSO: "HIDROLOGIA SUPERFICIAL"

DR. ROLANDO SPRINGALL  
Insurgentes Sur No. 254. Desp. 507  
México, D. F.  
Tel. 584-77-88

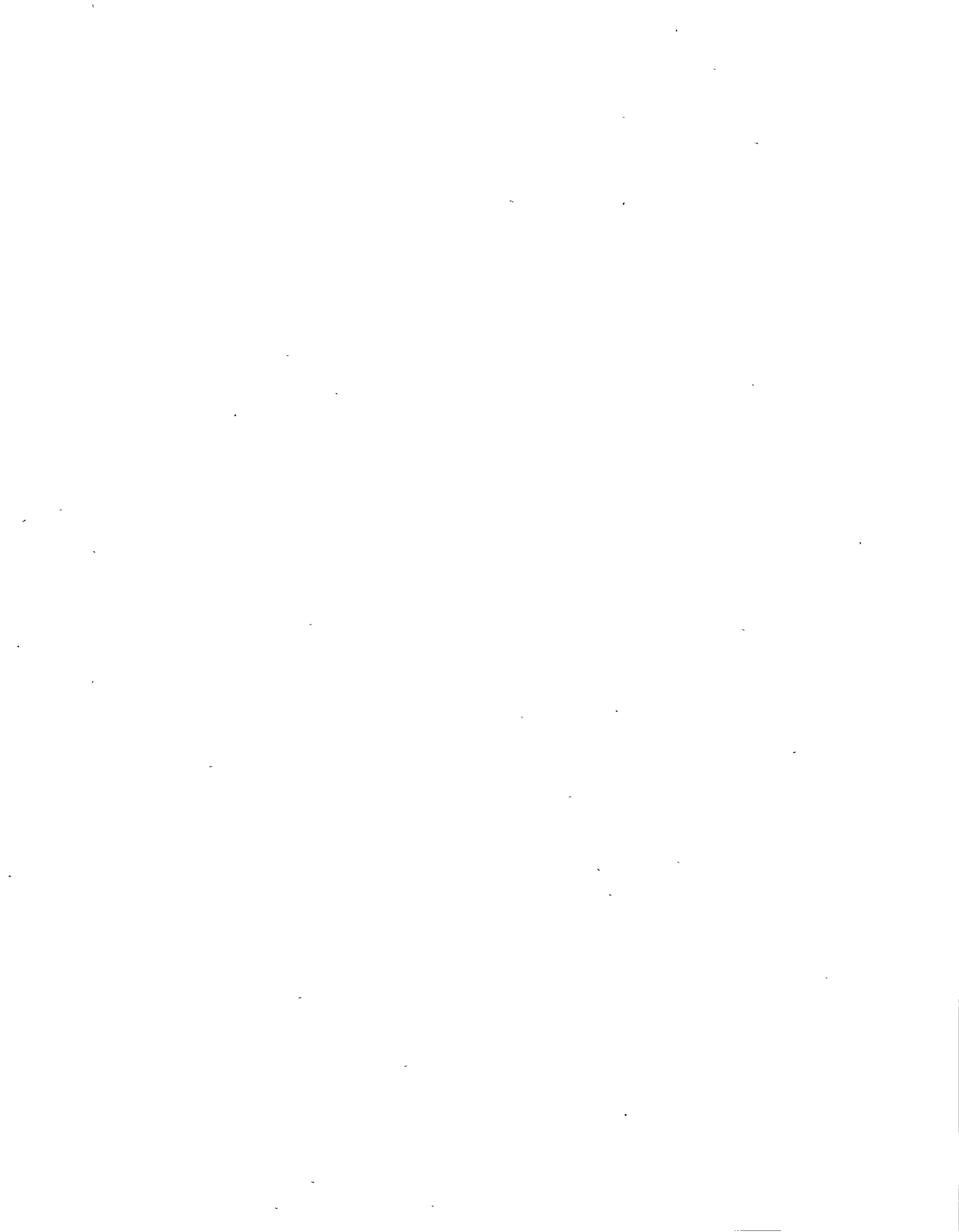
ING. JAVIER GONZALEZ VILLARREAL  
Melchor Ocampo No. 4557, 7o. Piso  
México 16, D. F.  
Tel. 511-00-36

ING. OMAR LUCERO  
Instituto de Ingeniería  
Ciudad Universitaria  
México 20, D. F.  
Tel. 548-97-95

ING. ANTONIO FERNANDEZ ESPARZA  
San Lorenzo #154 Desp. 402  
Col. del Valle  
México 12, D. F.  
Tel. 575-40-77 ext. 46

ING. CESAR HERRERA TOLEDO  
Tépica # 40 3er. Piso  
México 7, D. F.  
Tel. 574-25-16

ING. RAMON DOMINGUEZ M  
Instituto de Ingeniería  
Ciudad Universitaria  
México 20, D. F.  
Tel. 548-97-95



EVALUACION DE LA ENSEÑANZA

CURSO: HIDROLOGIA SUPERFICIAL

FECHA: DEL 24 de OCTUBRE AL 7 DE NOVIEMBRE 1977.

	DOMINIO DEL TEMA	EFICIENCIA EN EL USO DE AYUDAS AUDIOVISUALES	MANT. DEL INTERES (AMENIDAD, FACILIDAD DE EXPRESION, COMUNICACION CON LOS ASISTENTES)	PUNTUALIDAD
INTRODUCCION (Springall)				
TEMPERATURA Y HUMEDAD ATOMOSFERICA (Lucero)				
LA PRECIPITACION (Lucero)				
EVAPOTRANSPIRACION (Fernández)				
EL ESCURRIMIENTO Y LA CUENCA (Springall)				
LA AVENIDA MAXIMA PROBABLE (Springall)				
MODELOS MATEMATICOS QUE CONVIERTEN LA PRECIPITACION EN ESCURRIMIENTO (Herrera)				
HIDROLOGIA OPERACIONAL (Domínguez)				
INTRODUCCION A APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS (González)				
ESCUELA DE EVALUACION DEL 1 AL 10 edcs: 20, X, 77.				



EVALUACION DEL CURSO

	CONCEPTO	EVALUACION
1.	APLICACION INMEDIATA DE LOS CONCEPTOS EXPUESTOS	
2.	CLARIDAD CON QUE SE EXPUSIERON LOS TEMAS	
3.	GRADO DE ACTUALIZACION LOGRADO CON EL CURSO	
4.	CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL CURSO	
5.	CONTINUIDAD EN LOS TEMAS DEL CURSO	
6.	CALIDAD DE LAS NOTAS DEL CURSO	
7.	GRADO DE MOTIVACION LOGRADO CON EL CURSO	

ESCALA DE EVALUACION DE 1 A 10



1. ¿Qué le pareció el ambiente del Centro de Educación Continua?

Muy agradable       Agradable       Desagradable

2. Medio de comunicación por el que se enteró del curso:

Periódico Excélsior       Periódico Novedades       Folleto del Curso   
Cartel mensual       Radio Universidad       Comunicación carta, teléfono, verbal, etc.

3. Medio de transporte utilizado para venir al Palacio de Minería:

Automóvil particular       Metro       Otro medio

4. ¿Qué cambios haría usted en el programa para tratar de perfeccionar el curso?

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

5. ¿Recomendaría el curso a otras personas?      Si       No

6. ¿Qué curso le gustaría que ofreciera el Centro de Educación Continua?

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

7. ¿Qué servicios desearía que tuviese el CEC para los asistentes a cursos?

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

8. Otras sugerencias:

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_







centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

INTRODUCCION

ING. ROLANDO SPRINGALL  
OCTUBRE, 1977

PALACIO DE MINERÍA  
Tacuba 5, primer piso. México 1, D. F.



## 1. INTRODUCCION

### 1.1 Definición

De acuerdo con el U.S. Council for Science and Technology\* "Hidrología es la ciencia que trata de las aguas de la tierra, su ocurrencia, circulación y distribución, sus propiedades químicas y físicas y su reacción con el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivientes. El dominio de la hidrología abarca la historia de la existencia total del agua sobre la tierra".

De acuerdo con los métodos matemáticos, la hidrología paramétrica se define como "La aproximación a la hidrología en donde el ciclo hidrológico es tratado como un sistema determinado".

Dentro de la hidrología paramétrica el término "Simulación" se define como "El desarrollo y aplicación de modelos matemáticos para representar la iteración de la variación del tiempo en los procesos físicos".

### 1.2 Proceso Histórico

Es interesante previo al inicio del curso, revisar brevemente los progresos realizados en el pasado hacia el estado presente del conocimiento ---

---

\*Price W E, Heindl L A; What is hydrology? Trans Amer Geophys Union-49; 2; 529,1968.

por lo que respecta a la hidrología física. Es necesario considerar dos escuelas paralelas de investigación; el campo de la investigación dentro de la hidrología y el desarrollo paralelo de las técnicas de medición y cálculo. Aquí, el término ciencia se define como "El conocimiento adquirido por observación y experimentación, probadas en forma crítica y cimentadas bajo principios generales". La ciencia de la hidrología no significa que este completamente formalizada y se requiere de un trabajo considerable por hacer antes de que principios generales formales -- puedan ser desarrollados, mismos que satisfactoriamente representen toda la amplitud y profundidad de la ciencia.

Recordando una definición sobre el hombre, en la cuál se describe así -- mismo como un animal que hace herramientas. Esta referencia se refleja claramente en el desarrollo de la hidrología. El hidrólogo utiliza -- herramientas, por medio de las cuales mide y calcula, y junto con sus -- colegas de otras ciencias, sucesivamente ha desarrollado y manufacturado mejores implementos para observar los procesos y probar las teorías de su investigación. El desarrollo de las técnicas y equipos con los cuales observa y calcula han corrido en forma muy proxima, paralelamente a la investigación dentro de la ciencia de la hidrología. La innovación de nuevos métodos o técnicas de cálculo, a menudo resulta en progreso del desarrollo de la hidrología. Uno de los mejores ejemplos de esto es el desarrollo de la computación electrónica rápida, las cuales han originado

do un incremento considerable en las actividades de investigación, ayudando en una serie de pruebas críticas de viejas filosofías y un desarrollo más activo de nuevas teorías.

Para tener una idea clara de las etapas más definidas de los dos campos paralelos de investigación, los cuales se pueden referir como el desarrollo de la teoría y el desarrollo de las herramientas, es necesario regresar a tiempos pasados. Cuatro períodos de desarrollo pueden ser presentados

1. Filosofía primitiva; medidas y cálculos rudimentarios, 3500 A C - 1500 D C.
2. Filosofía basada en experimentación y desarrollo de técnicas de medición, 1500 D C - 1800 D C.
3. Período filosófico y desarrollo de técnicas de cálculo mejorado 1800 D C - 1954 D C.
4. Filosofía de la iteración de la hidrología integral y la era de la computación. 1954 D C a la fecha.

Biswas\* a desarrollado un libro que permite conocer con un mayor detalle la historia de la hidrología.

---

\*Biswas AK: History of Hydrology. Amsterdam, North Holland. 1971

En tabla 1.1 se muestra en orden cronológico el desarrollo paralelo que ha tenido la teoría, mediciones y técnicas de cálculo relacionadas con la hidrología, desde 1880 a 1972\*. Esto abarca parte del tercero y la totalidad del cuarto período antes mencionado.

### 1.3 Aplicaciones y Limitaciones

Para plantear las aplicaciones de la Hidrología, se debe partir de la premisa de que el hombre no puede existir sin el agua. Por lo anterior, en la época actual, el conocimiento de la hidrología y el disponer de gente preparada en este campo es de importancia fundamental para un efectivo manejo del agua, trascendental para nuestra sociedad.

Aunque el uso del agua para actividades domésticas es vital, su uso en la industria, comercio, agricultura y recreación es básico dentro del desarrollo del país.

Dado que el agua es un líquido vital y escaso, es lógico pensar que debemos de contar con técnicas adecuadas para la planeación, manejo y desarrollo de los aprovechamientos hidrológicos del país. Una planeación y manejo efectivo de los recursos de agua es el compromiso del hidrólogo y solo es posible alcanzarlo si se entiende claramente los sistemas físicos que deben manejar. Por otra parte, se requieren modelos matemáticos confiables para evaluar y predecir el funcionamiento de los sistemas

---

\*Fleming, G. "Computer Simulation Techniques in Hydrology"  
Elsevier, Environmental Science Series, 1975

TABLA 1.1

DESARROLLO PARALELO DE LA TEORIA, MEDICIONES  
Y TECNICAS DE CALCULO EN HIDROLOGIA DE 1880 A 1972\*

FECHA	TEORIA	MEDICIONES	CALCULO
1883	RIPPL Curva masa para el diseño del almacenaje		
1885, 1889	MANNING Fórmula de flujo		HOLLERITH Mejora la impresión de cartas para datos de entrada
1898		HERSCHEL Venturi	
1900	PLANCK Teoría sobre la radiación del cuerpo negro		
1905		SLICHTER Técnicas de trazadores en mediciones de flujo de agua subterránea	
1914	HAZEN Conceptos de Hidrología estocástica		
1915	HORTON Teoría de la licuación de la nieve		
1922	Se establece la Asociación Internacional de Hidrología Científica		
1924	FOSTER Curvas de frecuencia teórica aplicadas a la ingeniería		
1929	FOLSE Primeros intentos en simulación determinística de procesos del escurrimiento		
1930			BUSH Primera computadora analógica
1932	SHERMAN Teoría del Hidrograma Unitario		
1933	HORTON Teoría de la Infiltración. I.C.E. Envolventes de avenidas específicas		
1935	Mc CARTHY Métodos de tránsito de Muskinghum		
1936	Evolución de la Investigación de operaciones		
		BURNS & RAYNER Telemetría en Control de Poder	
			AITKEN Implementación de la máquina analítica
1941	GUMBEL Teoría de valores extremos en Hidrología		
1943			ECKERT & MAUCHLEY ENI Computadoras electrónicas ( primera generación de computadoras )
1944	BERNARD Meteorología en relación con las avenidas		
			NEWMANN Concepto de almacenamiento de memoria

TABLA 1.1 (cont.)

FECHA	TEORIA	MEDICIONES	CALCULO
1949		BARDEEN & BRATAIN	Inventi3n de los tr3nsistores CAMBRIDGE UNIV Primera computadora con almacenate en memoria, (segunda genera- ci3n de computadoras)
1950	SUGAWARA	Primer modelo de la fase de tierra total del Ciclo Hidrol3gico	
1951	KOHLER, LINSLEY	T3cnicas de correlaci3n coaxial	
1954	PHILIP	Desarrollos mas amplios de la teor3a de la infiltraci3n	
1955	LIGHTHILL & WHITHAM	Teor3a de la onda cinem3tica	
	HARVARD	Iniciaci3n de programas de investigaci3n en los aprovechamientos Hidr3ulicos	
1956		Aplicaci3n del an3lisis de sistemas a los aprovechamientos Hidr3ulicos	
		Programa de Stanford a los aprovechamientos Hidr3ulicos	BELL TELEPHONE Introducc a los datos por tel3fono y ter- minales de tele comunicacio- nes. Desarrollo en microcircuitos (tercera generaci3n de compu- tadoras)
1958	U.S. CORP OF ENGINEERS	Inicio del desarrollo del modelo SSARR	
1959	LINSLEY & CRAWFORD.	Concepto de la simulaci3n determin3stica usando computadoras digitales. Programa de investigaci3n de Stanford	
1960		Desarrollo acelerado en simulaci3n, sistemas e hidrolog3a estoc3stica	Introducci3n a computadoras con grande memoria y alta ve- locidad: IBM 360, BURROUGH B 5500, CDC, ICL, GEC
1962	PROGRAMA HARVARD SOBRE EL AGUA.	Integraci3n de los aspectos de econom3a, de ingenier3a y pol3ticas en los aprovechamientos hidr3ulicos	
	INSTITUTO BRITANICO DE HIDROLOGIA.	Se establece	
1965		Se inicia la Decada Hidrol3gica Internacional	
1967	PHILIP	Enfasis sobre microprocesos en Hidrolog3a	
39		Se implementa la predicc3n en tiempo real de las avenidas	



TABLA 1.1 (cont.)

FECHA	TEORIA	MEDICIONES	CALCULO
1970	Se aceleran los estudios en hidrología urbana		Se implementa el concepto de memoria virtual Computadoras en serie IBM-370
1971	Simulación de efectos sobre el uso de tierras		
1972	Aplicación de sistemas de gran escala en aprovechamientos regionales del agua Técnicas laser, ultrasónicas y electromagnéticas en la medición de flujo		

hidrológicos.

El hidrólogo juega un papel elemental en esta problemática y entendimiento de la misma. Su competencia tiene un tremendo impacto en todas las actividades de los aprovechamientos hidrológicos.

Este curso pretende proveer al estudiante de un entendimiento de los aspectos físicos de los sistemas hidrológicos y la manera en la cuál, las componentes hidrológicas pueden sintetizarse para una efectiva planeación y preparación de modelos de diseño.

Desde el punto de vista de diseño de una obra hidráulica, los principales objetivos de la hidrología pueden resumirse en dos grandes grupos\*

a) Obtención de la avenida máxima que con una determinada frecuencia puede ocurrir en un cierto lugar, lo cual es necesario considerar al diseñar vertedores, puentes y drenajes en general

b) Conocimiento de la cantidad, frecuencia y naturaleza de ocurrencia del transporte del agua sobre la superficie terrestre. Esto se requiere en el diseño de sistemas de irrigación, abastecimiento de agua aprovechamientos hidroeléctricos y navegación de ríos.

Por lo que respecta a las limitaciones de la hidrología, estas se relacionan con la información hidrológica disponible y la complejidad de los pro

\*R. Springall "Hidrología. Primera parte" Publicación del Instituto de Ingeniería, D 7, UNAM (Abril 1970)

cesos naturales con los cuales trata.

Lo anterior involucra que en general cada problema es único y es difícil analizarlos con un sistema deductivo riguroso. Esto ha involucrado que al tratar de uniformizarse los criterios, se plantean cada vez sistemas más complejos en donde interviene un mayor número de parámetros, que en ocasiones son difíciles de cuantificar.

Al aplicar un criterio hidrológico para el análisis de un problema, debe considerarse que la aplicación del mismo no involucra el resultado esperado, a menos que las bases con las que se elaboró dicho criterio sean las mismas a las del problema. En caso contrario deberá tomarse en cuenta este hecho en la interpretación del resultado y darle a este el peso que merece. Conforme se disponga de mayor información hidrológica se podrán ir ajustando los criterios existentes, elaborar otros y tener una mayor seguridad en los resultados hidrológicos que se obtengan.

La República Mexicana dispone de una amplia red de estaciones climatológicas controladas, principalmente por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y en parte por la Comisión Federal de Electricidad y la Comisión Internacional de Límites y Aguas. En la Tabla 1.2 se muestran las principales publicaciones de que se dispone en el país con información hidrológica. Por otra parte, la Dirección de Hidrología de la S.A. R.H. ha dividido el país en 37 regiones hidrológicas y dispone de planos

TABLA 1.2

INFORMACION HIDROLOGICA EN LA REPUBLICA MEXICANA

PUBLICACION	ALCANCE	FRECUENCIA	DEPENDENCIA
Boletín Hidrológico del Valle de México.	Datos Hidrométricos y Meteorológicos del Valle de México.	Anual	Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, SARH.
Boletín del Servicio Meteorológico Nacional.	Observaciones pluviométricas y termométricas*.	Mensual	Dirección General de Geografía y Meteorología, SARH.
Boletín Hidrométrico.	Escurremientos del río Colorado y otros ríos Internacionales del Oeste.	Anual	Comisión Internacional de Límites y Aguas, SRE.
Boletín Hidrométrica.	Datos Hidrométricos y climatológicos del río Papaloapan.	Anual	Comisión del Papaloapan, SARH.
Boletín Hidrológico.	Datos Hidrométricos*	Periódica	Comisión Federal de Electricidad.
Boletín Meteorológico.	Datos Meteorológicos*	Periódica	Comisión Federal de Electricidad.
Boletín Hidrológico.	Datos Hidrométricos**	Periódica	Dirección de Hidrología, SARH
Boletín Climatológico.	Datos Climatológicos región Hidrológica - No. 12-A (parcial)	Información hasta Dic. de 1972.	Dirección de Hidrología, SARH.

\* Se refieren a sus estaciones en toda la República Mexicana

\*\* Abarca información por región Hidrológica. El país está dividido en 37 regiones Hidrológicas.

indicando las estaciones Climatológicas e Hidrométricas que se encuentran en cada una de ellas. Además del nombre de la estación, consigna los años de registro y que dependencia la controla.

#### 1.4 Ciclo Hidrológico.

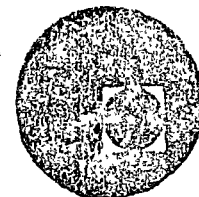
El ciclo Hidrológico es un proceso continuo por medio del cual el agua es transportada de los océanos a la atmósfera, a la tierra y regresa al mar. Dentro de este ciclo existen diversos subciclos. Un ejemplo de esto es la evaporación del agua de la superficie terrestre y su subsecuente precipitación sobre ella antes de regresar al océano. La fuerza que controla la totalidad del sistema del transporte del agua proviene del sol, el cual provee la energía requerida para la evaporación. Cabe hacer notar que las cualidades del agua también cambian durante su paso a través del ciclo; el agua de mar se convierte en agua fresca por la evaporación. En la fig. 1.1. se muestra la representación cualitativa del ciclo hidrológico y en la fig. 1.2. las fases que estudia la hidrología.

Como puede observarse en la fig. 1.2, las componentes del ciclo hidrológico involucran las diversas fases a que esta sujeta una cuenca hidrológica. Esto es básico en el análisis de los procesos hidrológicos y en el desarrollo de modelos de simulación, los cuales tratan al ciclo hidrológico como un sistema cerrado y definen en forma continua los parámetros de entrada y salida a dicho sistema.





centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

MODELO DE SIMULACION  
CONQUIN

ING. ANTONIO FERNANDEZ ESPARZA  
OCTUBRE, 1977

PALACIO DE MINERIA  
Tacuba 5, primer piso. México 1, D. F.





# MODELO DE SIMULACION CONQUIN

## I PRESENTACION DEL PROBLEMA.

### I.1 Introducción:

En el presente trabajo se aborda el problema de seleccionar la capacidad de conducción de que habrá de dotarse a una red de distribución de agua para riego el cual puede concebirse como el dimensionamiento de una fuente de servicio.

El criterio para seleccionar una determinada capacidad de una fuente de servicio es el de dotarla de tamaño suficiente para que pueda funcionar eficientemente en condiciones críticas extremas entendiéndose como tales las concentraciones de demanda. En este caso la fuente de servicio es la red de canales y el servicio que suministra es el riego.

Una demanda para riego se origina cuando la humedad en el suelo, en el que se desarrolla un cultivo es insuficiente para el desarrollo del mismo. De entre los factores que más influyen en este proceso pueden considerarse como de mayor importancia los climatológicos tales como lluvia, evaporación temperatura etc.; las características mismas del cultivo la capacidad de los suelos para retener agua en condiciones que pueda ser aprovechada por los cultivos así como las costumbres y prácticas de riego seguidas por los usuarios. Todos estos factores son de naturaleza aleatoria, lo cual hace que el proceso que los integra tenga

también la misma naturaleza casual.

En este trabajo se pretende reproducir el proceso que origina las demandas de riego, de tal suerte que se obtenga la información necesaria para diseñar la capacidad de conducción de la red de canales y sobre todo conocer la probabilidad de que dicha capacidad resulte insuficiente.

Con esta información es posible balancear dos aspectos importantes como son el económico y la eficiencia de la red de distribución ya que una red capaz de satisfacer la totalidad de las demandas a que está sujeta a lo largo de su vida útil, es una red muy costosa ya que requiere de una fuerte inversión inicial, con costos de conservación elevados y grandes pérdidas por evaporación y filtraciones. Un diseño razonable es aquel en que se consideren posibles reducciones de la capacidad de los canales con el conocimiento del riesgo que se corre de no satisfacer la totalidad de las demandas.

## 1.2 Presentación del Problema.

Al considerar a la red como una fuente de servicio sujeta a demandas casuales, el problema de la selección de la capacidad de la red de canales puede ser circunscrito a la determinación de la magnitud y frecuencia de las demandas, para lo cual es necesa

rio definir el proceso que las origina.

A partir del establecimiento de un determinado tipo de cultivo en la zona de riego, se inicia el proceso que origina las demandas en el momento en que el contenido de humedad en el suelo es insuficiente para el desarrollo de la planta.

Dentro del proceso que origina las demandas, pueden identificarse a los factores de mayor influencia en la distribución de las demandas a los siguientes:

Cultivo: La influencia del tipo de cultivo está definida por sus requerimientos de agua, los cuales dependen de las características propias de la planta y de su grado de crecimiento.

Suelo: para que el agua sea aprovechada por los cultivos deberá ser depositada en el suelo y el contenido de humedad resultante, deberá quedar comprendido entre ciertos límites y hasta una cierta profundidad. La primera limitación sobre el contenido de humedad depende de las características físicas del suelo y la segunda del grado de desarrollo de la raíz de la planta, ya que se considera que éstas extraen humedad del suelo hasta una profundidad igual a la radicular.

Lluvia: el efecto de la lluvia en la distribución de los riegos está definido por las recuperaciones del contenido de

humedad del suelo que produce.

En base de lo anterior se puede establecer el espaciamiento de las demandas, como el tiempo que tarda la planta en consumir el agua almacenada en el suelo, tomando en cuenta las recuperaciones del contenido de humedad aprovechable producidas por la lluvia.

Un proceso así establecido puede definir el espaciamiento y magnitud de las demandas de riego, sin embargo, sólo es aplicable a un determinado cultivo que se desarrolla en un tipo de suelo con una cierta variación de la precipitación.

A fin de conocer las demandas a que está sujeta la red de canales, es necesario definir tantos procesos como posibles combinaciones de los diferentes tipos de cultivo, de suelo y zonas de precipitación existentes en la zona de riego, de tal suerte que las demandas obtenidas no sólo estén identificadas por su magnitud y época del año en que se producen sino que también estén localizadas físicamente en la red.

Los tipos de cultivo por implantar constituyen el plan de cultivos el cual tiene como características principales la fecha de siembra y de cosecha de cada uno, los requerimientos parciales de agua a lo largo del ciclo vegetativo de cada cultivo, la ex

tensión en que se van a desarrollar y el requerimiento total de agua para el ciclo agrícola. Una vez elaborado el plan de cultivos se puede aceptar que la distribución de los mismos dentro de la zona de riego se hace en forma casual, ya que se puede desarrollar cualquier tipo de cultivo en cualquier parte del distrito de riego.

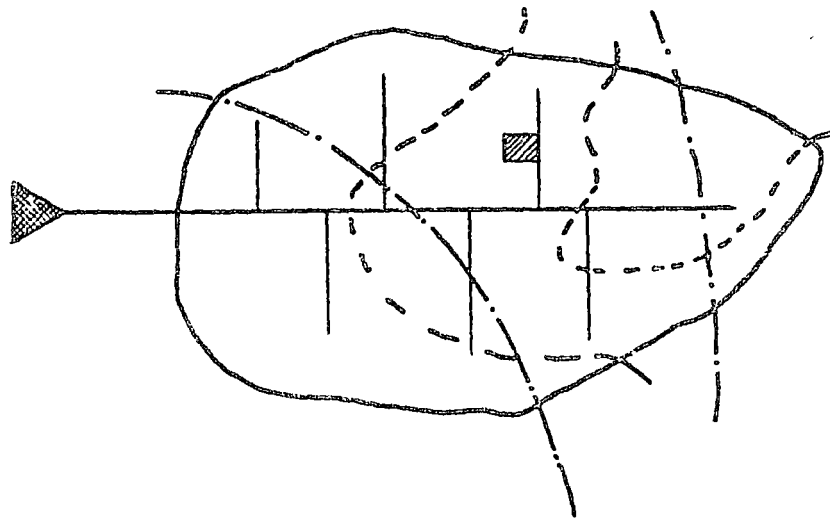
En un distrito de riego de regular tamaño es prácticamente imposible encontrar un solo tipo de suelo, lo que obliga a una clasificación de suelos en base a sus capacidades para retener humedad aprovechable por las plantas y por su localización dentro de la zona de riego.

La delimitación de las zonas de influencia de las diversas componentes de la demanda, adquiere una importancia especial en el caso de la precipitación, ya que una lluvia capaz de generalizar su contenido de humedad en una zona amplia del distrito de riego, puede tener como consecuencias una concentración de demandas que sea determinante en la selección de la capacidad de la red de canales. Los efectos de estas concentraciones serán mayores cuanto más extensa sea el área donde se producen, mayor sea la uniformidad de los suelos y del grado de desarrollo de los cultivos.

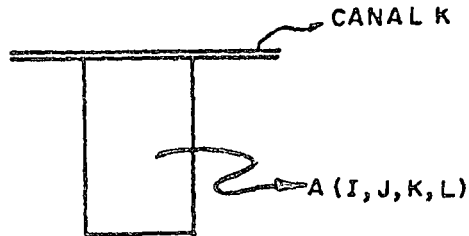
Para definir las características de la red de canales, se puede dividir la zona de riego en áreas unitarias e identificar a cada área por dos parámetros, uno determinista y el otro casual (Fig. A), el primero permanece constante durante la vida útil de la red y está compuesto por el tipo de suelo que la constituye, la zona de precipitación a que pertenece y el canal que le dá servicio; el parámetro casual está definido por el tipo de cultivo que desarrolla, el cual puede variar dentro de un mismo año si el plan de cultivos es muy intensivo.

La simulación consiste en el establecimiento de un modelo que representa a una red de canales trabajando con el criterio anterior, en forma tal, que al efectuar el funcionamiento del modelo a lo largo de un cierto número de años, para los cuales se tienen definidas las características del distrito de riego, se puedan conocer las demandas asociadas a cada tramo de la red en todos los intervalos de tiempo en que se dividió el período en estudio.

Lo anterior permite para cada tramo, elaborar un histograma de demandas, lo que a su vez fundamenta la selección de la capacidad de la red con una probabilidad dada de que resulte insuficiente.



- · - · - · LIMITE ZONAS CLIMATOLOGICAS  
 - - - - - LIMITE TIPO DE SUELO



A= AREA UNITARIA  
 I= Nº TIPO DE SUELO  
 J= Nº ZONA CL  
 K= CANAL QUE LE  
 L= CULTIVO

FIG. A

### 1.3 Objetivos:

1. - Establecer un método para seleccionar la capacidad de una red de canales, que permita el análisis de sistemas ya sea con fines de rehabilitación o de nueva implantación.

2. - Definir qué tipo de información debe ser recabada con la mayor precisión posible, lo cual se puede lograr mediante la introducción de cambios en las diferentes componentes de la demanda y observar que efectos producen en el comportamiento del indelo, de tal suerte que se obtenga la respuesta de cada una de las siguientes preguntas:

- a) En qué grado influye el factor suelo?
- b) Es necesaria tanta precisión en la recolección de datos climatológicos?
- c) Qué cambios producen las variaciones del plan de -cultivos? -



## II ANALISIS CRITICO DE CRITERIOS ACTUALMENTE EN USO.

El método normalmente empleado consiste en suponer un plan de cultivos para un ciclo agrícola y de acuerdo con las características medias de la zona de riego, así como con los promedios de la información climatológica, se determinan las demandas mensuales y la cantidad de agua que debe aportarse al distrito de riego en el ciclo agrícola.

El procedimiento anterior se efectúa un cierto número de veces con un plan de cultivos diferente en cada alternativa y se adopta como definitivo, el que produce los efectos más desfavorables.

Finalmente, en base al mes de máxima demanda se elaboran gráficas de coeficientes unitarios de gastos vs. hectáreas dominadas, estas gráficas definen la capacidad de cada tramo de la red en función del número de hectáreas que domina.

Este criterio tiende a definir capacidades de conducción excesivas, es decir, capacidades más que suficientes para satisfacer la totalidad de las demandas a que está sujeta la red durante su vida útil, sin tomar en cuenta la probabilidad de que se presente la combinación de componentes de la demanda que produjo la condición

de diseño, lo que tiene como consecuencia que los canales no lleguen a transportar los gastos para los que fueron diseñados y que su construcción implique una elevada inversión inicial, una conservación costosa y pérdidas considerables por evaporación y filtraciones, sin embargo, puede mejorarse dentro de los términos en que fue planteado si:

- a) Se considera la localización de los diversos tipos de cultivo dentro de la zona de riego.
- b) Se toman en cuenta los diversos tipos de suelo existentes en el distrito de riego.
- c) Se respeta la distribución de la lluvia dentro del distrito de riego, ya que al integrar la información climatológica en una sola, se definen lluvias generalizadas que tienden a producir concentraciones de demanda existentes.
- d) Se reducen los intervalos de tiempo en que se dividió el ciclo agrícola, dado que el total mensual de la precipitación no es indicativo de la variación de la misma durante el mes, pudiéndose presentar lluvias que sí aporten humedad aprovechable por las plantas, pero que al ser cuantificadas como total mensual, se consideren de efectos nulos.

### III. FORMULACION Y PROGRAMACION DEL MODELO.

#### III.1 Formulación del Modelo.

El modelo tiene por objeto representar el funcionamiento de una red de canales cuya política de operación es la demanda libre.

##### III.1.1 Especificación de Componentes.

El modelo propuesto puede considerarse dividido en dos partes principales; en la primera parte obtiene la distribución de los riegos en el tiempo y en la segunda, asocia la distribución de los riegos a la red de distribución.

##### III.1.2 Especificación de Variables.

###### A) Variables de Entrada.

a) Información Climatológica, representada por las distribuciones de la lluvia, temperatura y evaporación, a lo largo del período por simular, correspondiente a las diversas zonas climatológicas definidas dentro del distrito de riego.

b) Tipos de Suelo, definidos por sus características físicas relativas a la capacidad para retener humedad aprovechable por las plantas.

c) Plan de Cultivos, representado por cada uno de los cultivos que lo integran, los cuales están definidos por sus re-

querimientos parciales de agua a lo largo de sus respectivos ci cl os vegetativos, sus profundidades radicales y las extensiones en que van a ser desarrollados.

Para estimar los requerimientos parciales de agua de cada cultivo, existe una serie de criterios, la mayoría de ellos empíricos, que utilizan la información climatológica en un mayor o menor grado.

Con base en las fechas extremas del ciclo vegetativo y en la información climatológica, se puede determinar el uso consuntivo de una planta con una mayor o menor precisión, la cual depende del método empleado.

d) Características de la Red, definidas por el número de áreas unitarias que abastece cada tramo.

c) El avance de la Siembra de los Cultivos. esta variable depende de una serie de fenómenos casuales, los cuales van desde disponibilidad de créditos, hasta predicciones de condiciones de mercado hechas por los propios agricultores que calculan obtener un mejor precio para su producto si éste es temprano o tardío. Para definir una ley de avances de siembra fue necesario efectuar observaciones directas, las cuales se llevaron a cabo en diferentes distritos de riego del Noroeste y en la Comarca Lagunera, en

contrándose que para extensiones mayores de 500 Ha. , la ley de avances de siembra se puede asimilar a una curva S.

#### B) Variables de Condición

Para un intervalo de tiempo cualquiera y para todas las áreas unitarias en que se dividió la zona de riego, se tienen las siguientes variables de condición:

a) Estado del área unitaria en lo que se refiere a estar libre o estar ocupada por un cultivo.

b) Contenido de humedad en el suelo al inicio o al final del intervalo de tiempo.

c) Lámina de riego asociada al área unitaria en función de la capacidad del suelo en el intervalo de tiempo.

#### C) Variables Generadas.

Demandas de riego asociadas a todos los tramos de la red en todos los intervalos de tiempo.

### III.1.3 Especificación de Relaciones Funcionales.

#### A) Sistema Agua-Planta-Suelo.

Como se expuso anteriormente, se considera al suelo comportándose como un almacenamiento en el cual las demandas están representadas por la evapotranspiración, las aportaciones por los volúmenes llovidos o regados y el volumen alma-

cenado por el contenido de humedad aprovechable del suelo.

Las capacidades extremas de almacenamiento del suelo, están definidas por el Punto de Marchitamiento para el contenido de humedad mínimo permisible y por la Capacidad de Campo para el máximo.

El funcionamiento del sistema propuesto, para un intervalo de tiempo cualquiera (i), se ilustra en el siguiente diagrama:

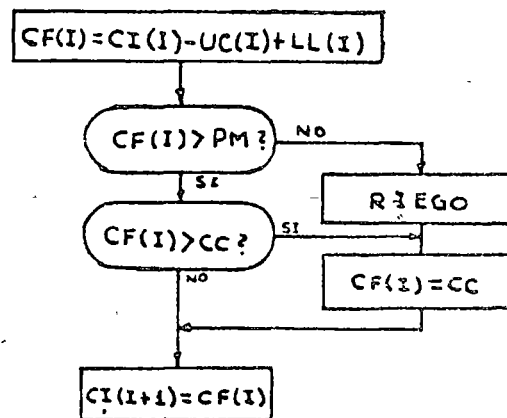


FIG 1

CI = Contenido de humedad al inicio del período

CF = Contenido de humedad al final del período

UC = Uso Consuntivo de la planta en el período

PM = Punto de Marchitamiento

CC = Capacidad de Campo

LL = Lluvia efectiva en el período

La lámina de riego necesaria para incrementar el contenido de humedad del suelo desde el punto de marchitamiento hasta la capacidad de campo, está definida por la siguiente relación:

$$L = DA \times (CC - PM) \times PR$$

Donde:

- L = Lámina de Riego
- DA = Densidad Aparente del Suelo
- PR = Profundidad Radicular del cultivo en el período.

El efectuar el funcionamiento anterior para todos los cultivos en los diferentes tipos de suelo y zonas de precipitación, se obtienen las láminas de riego, en cada intervalo de tiempo del período de simulación, para todas las combinaciones posibles de cultivo, suelo y precipitación, lo que define la distribución de los riegos en el tiempo.

#### B) Establecimiento de Cultivos en la zona de riego.

La asignación de cultivos a las distintas áreas unitarias de la zona de riego se hace a través de un proceso casual, en el cual para un intervalo de tiempo, todas las áreas unitarias desocupadas tienen la misma probabilidad de ser sembradas.

#### C) Cuantificación de Volúmenes de riego.

Si en un intervalo de tiempo cualquiera, se analizan todas las áreas unitarias en que se dividió la zona de riego, cada área ocupada tiene asociada, como resultado del funcionamiento del sistema agua-suelo-planta que le corresponde, la lámina de riego definida para el intervalo de tiempo, lo que permite una cuantificación del volumen de riego para cada área ocupada.

Dado que uno de los parámetros que identifican a las áreas unitarias es el tramo de la red que les dá servicio, se pueden asociar los volúmenes de riego correspondientes a cada área a los distintos tramos de la red, lo que define las demandas a que están sujetos todos los tramos en el intervalo de tiempo.

Cuando un cultivo alcanza su intervalo de cosecha se desocupa el área en que se desarrolló y a ésta se le declara en condiciones de recibir a otro tipo de cultivo.

Al efectuar la distribución anterior tantas veces como sea necesario para cubrir el período de simulación, se obtienen las demandas a que están sujetos todos los tramos de la red en todos los intervalos en que se dividió el período. Las demandas así obtenidas permiten la elaboración de un histograma para cada tramo, lo cual a su vez permite la selección de la capacidad de los tramos en base a la probabilidad de que resulte insuficiente.



#### III.1.4 Evaluación del Modelo.

La evaluación del modelo se basa en el hecho de que tanto el espaciamiento de los riegos como las láminas generadas, no tienen diferencias significativas con las obtenidas en la realidad bajo condiciones similares. La comprobación anterior fundamenta la aceptación del modelo.

#### III.2 Programación del Modelo.

El modelo propuesto puede ser programado para un computador digital obedeciendo la misma secuencia conceptual descrita anteriormente.

El programa fue derivado del siguiente diagrama de bloques.

PROGRAMA RIEGO

Nº DE ALTERNATIVAS  
Nº DE AÑOS  
Nº DE ESTACIONES PLUVIOMETRICAS  
Nº DE TIPOS DE SUELO  
Nº DE TIPOS DE CULTIVO  
PARAMETROS PARA GENERACION DE NUMEROS CASUALES

RANGO DE SIEMBRA EN DECENAS PARA CADA CULTIVO

LLAMA SUBROUTINA PLANTA

DETERMINA EL Nº TOTAL DE CULTIVOS Y EL Nº  
DE FUNCIONAMIENTOS DE SUELO POR EFECTUAR

AREA CORRESPONDIENTE A CADA CULTIVO

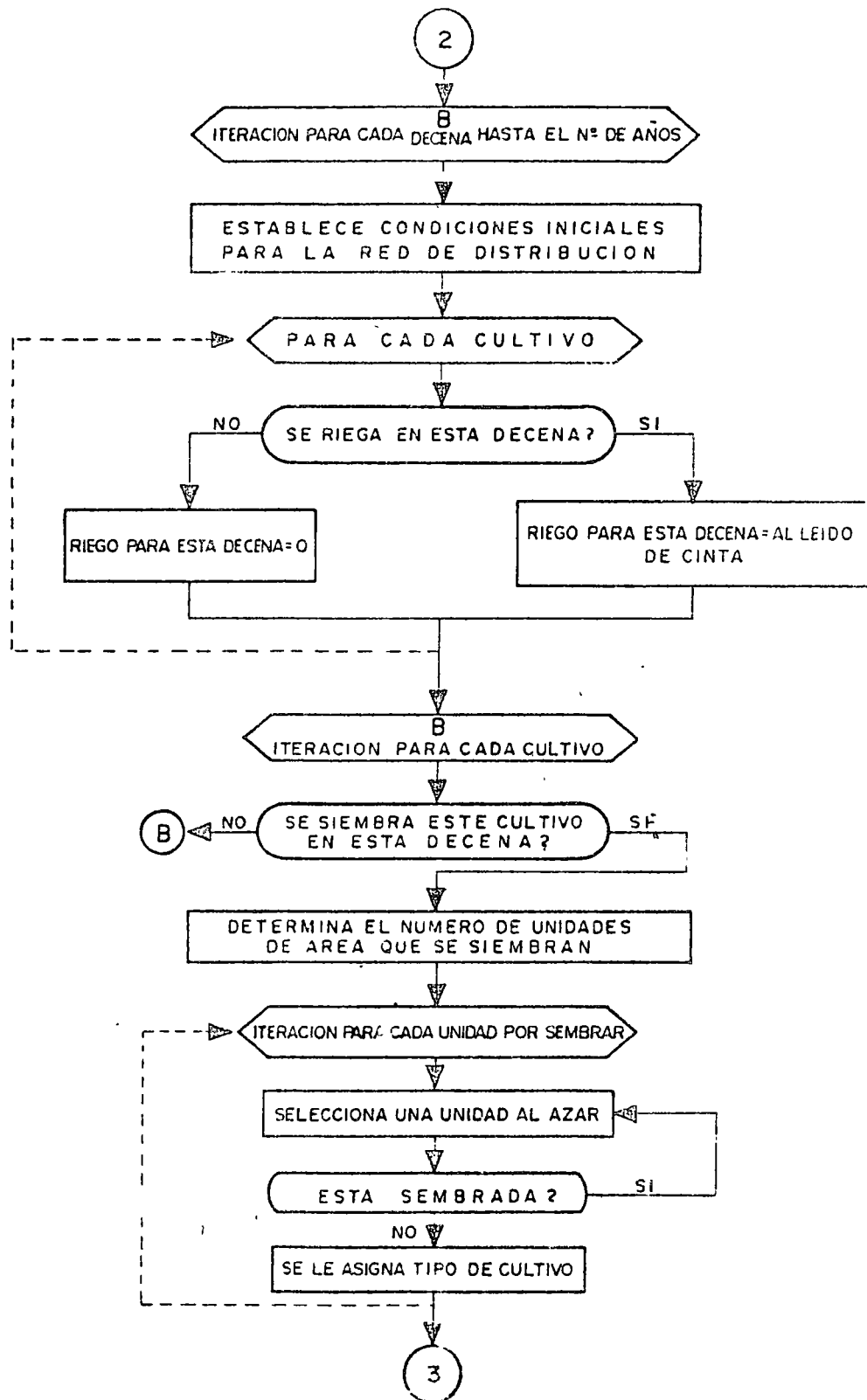
CARACTERISTICAS DE LA RED DE DISTRIBUCION

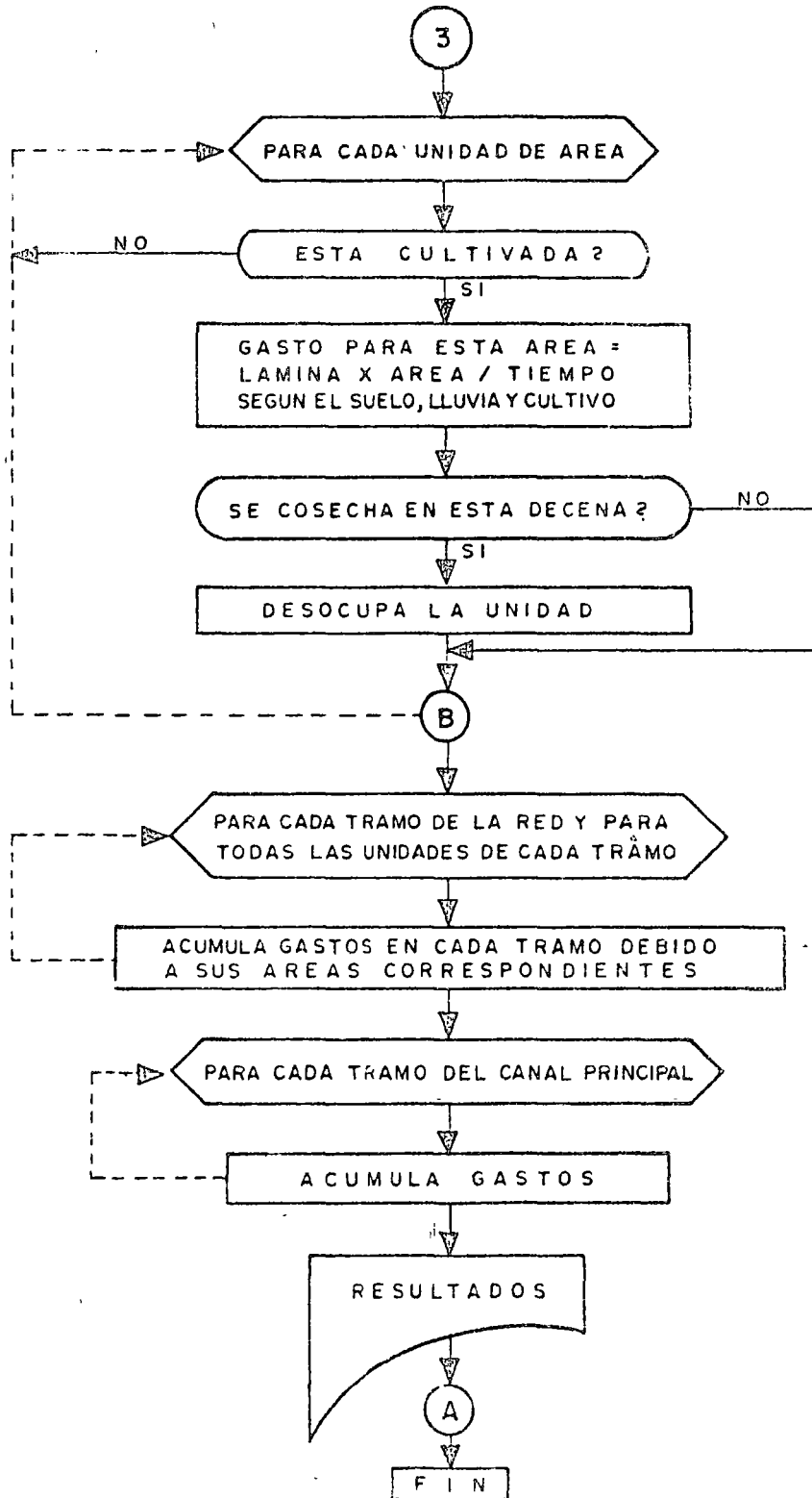
TIPO DE LLUVIA Y SUELO PARA CADA UNIDAD DE AREA

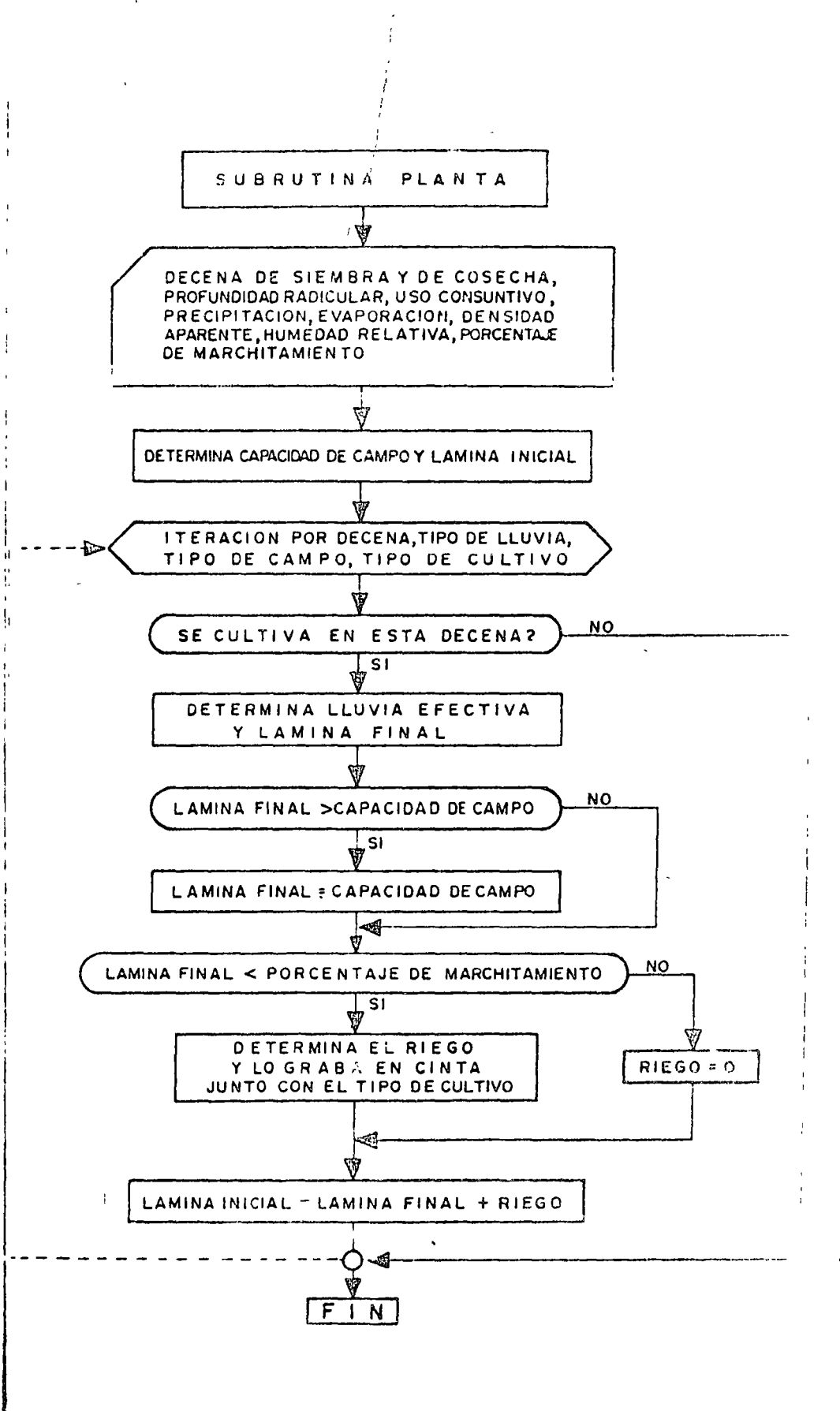
A  
I, Nº DE ALTERNATIVAS

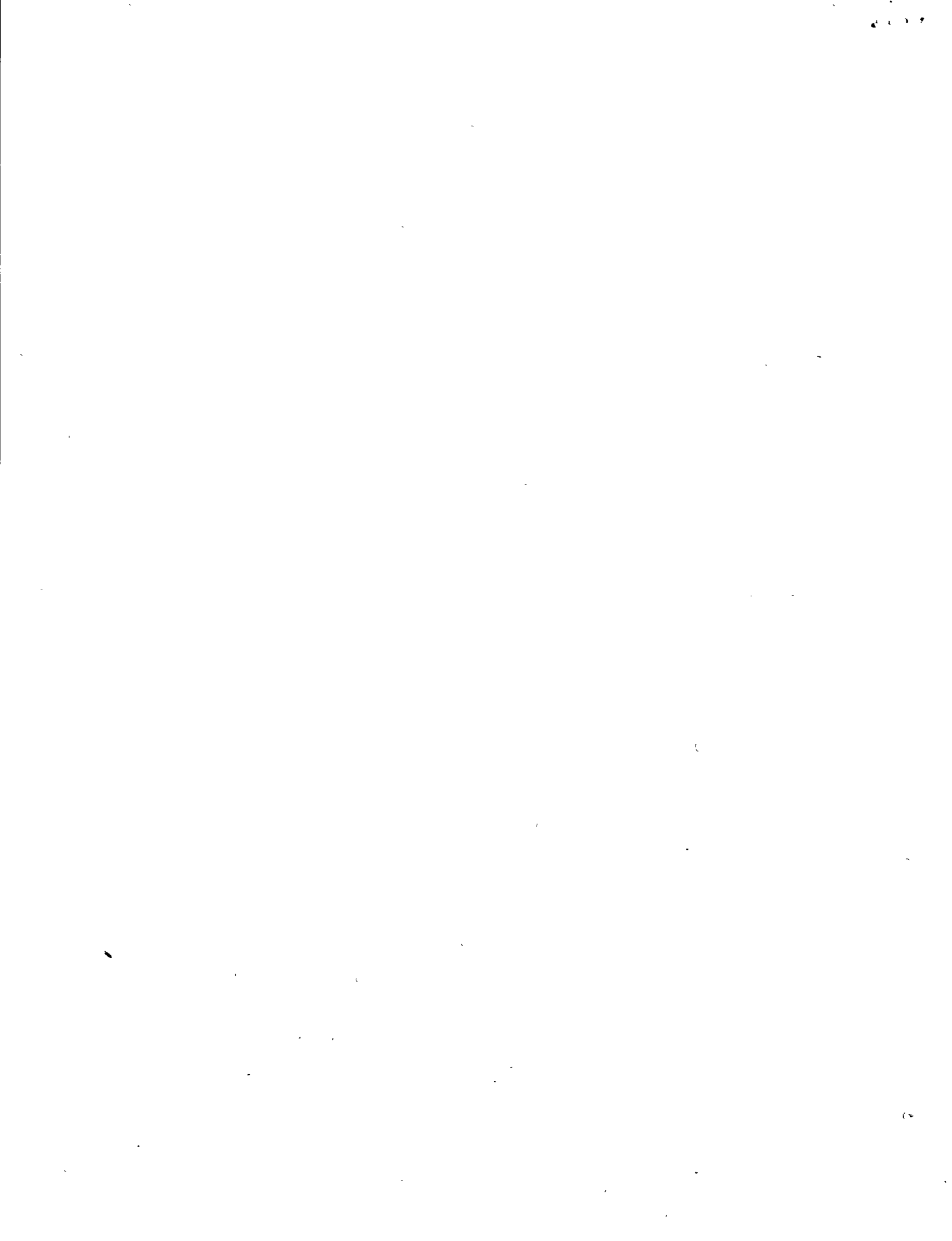
ESTABLECE CONDICIONES INICIALES PARA LA ZONA DE RIEGO

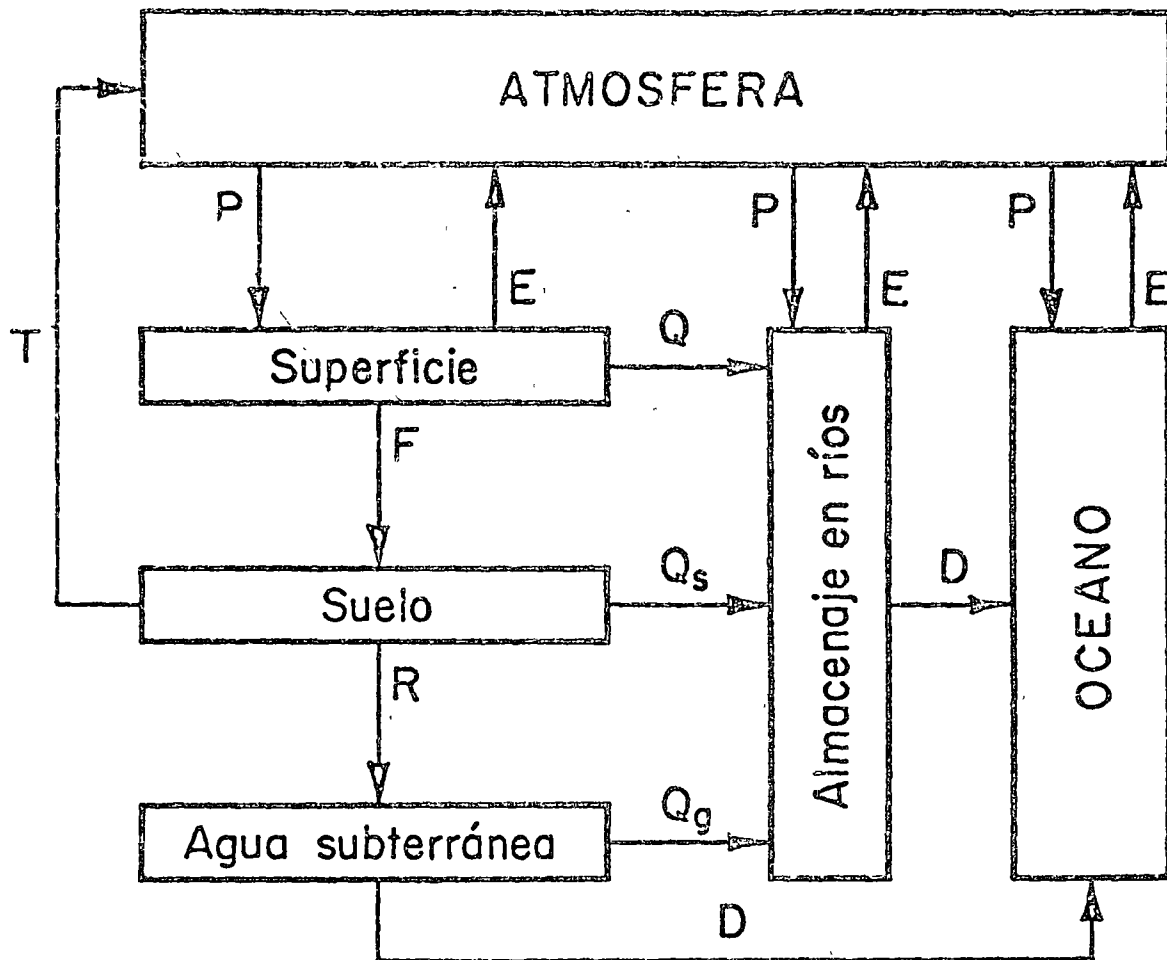
2











- |                               |                                      |                                   |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| E - Evaporación               | P - Precipitación                    | T - Transpiración                 |
| Q - Escurrimiento superficial | $Q_s$ - Escurrimiento subsuperficial | $Q_g$ - Escurrimiento subterráneo |
| F - Infiltración              | D - Descarga a los océanos           | R - Recarga                       |

Fig 1.1 Ciclo hidrológico. Representación cualitativa

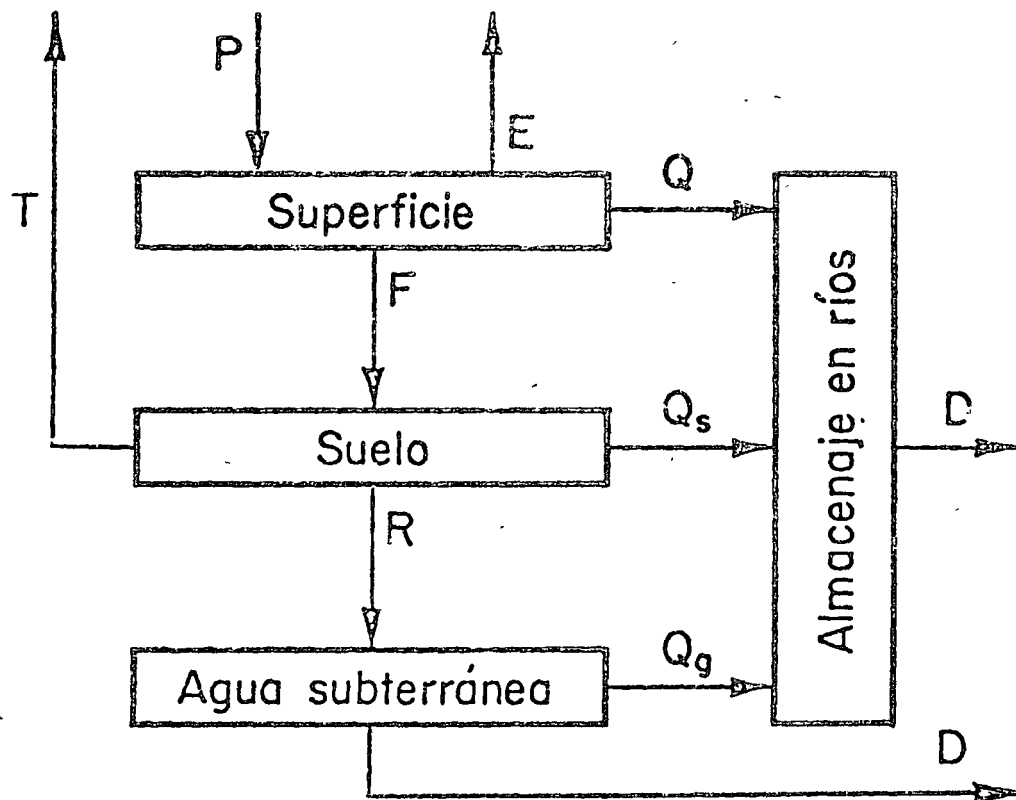
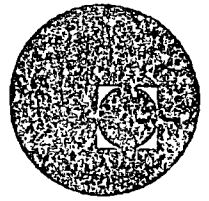


Fig 1.2 Fases que estudia la hidrología





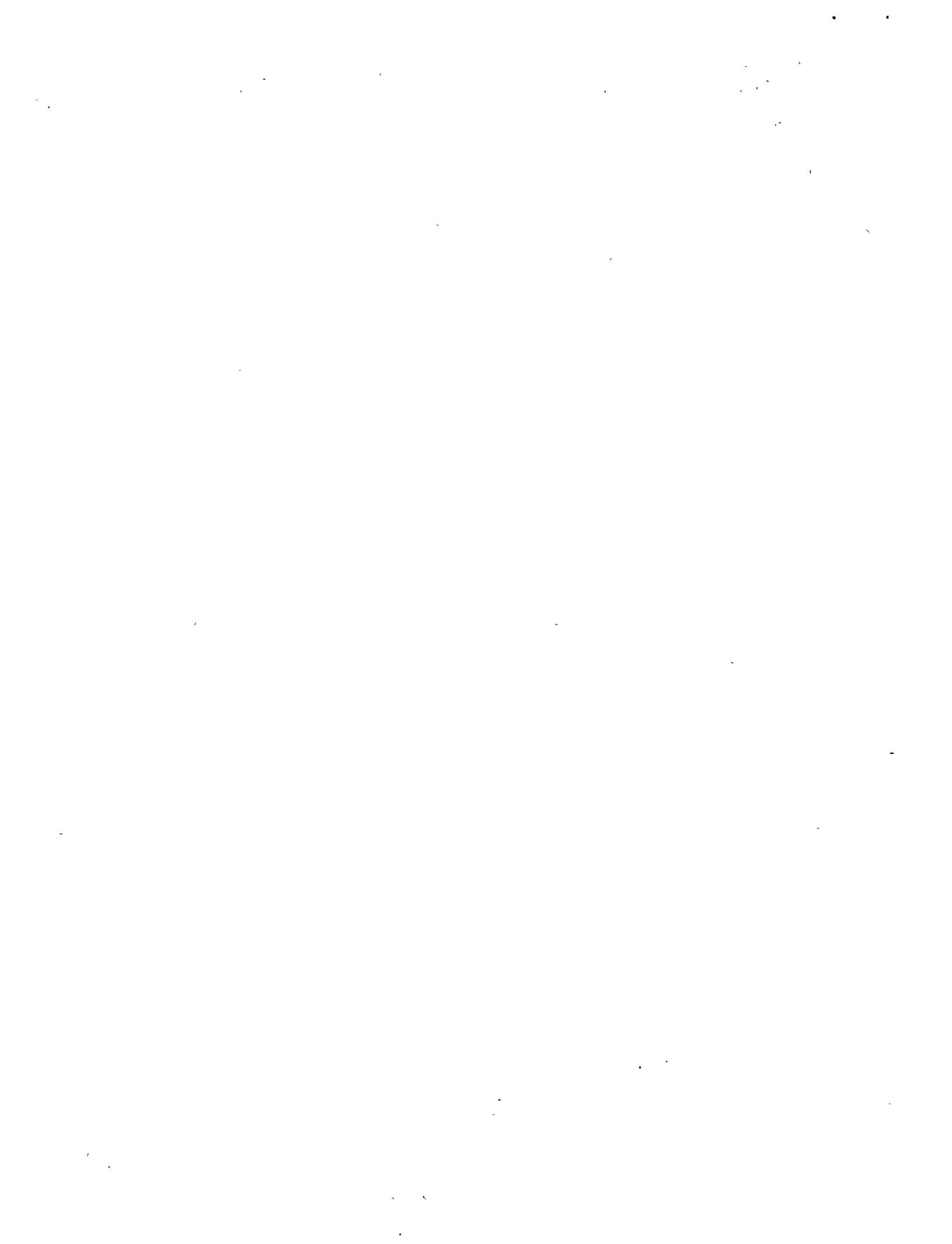
centro de educación continua  
división de estudios superiores  
facultad de ingeniería, unam



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

MODELOS MATEMATICOS QUE CONVIERTEN LA  
PRECIPITACION EN ESCURRIMIENTO

ING. CESAR HERRERA TOLFO  
OCTUBRE, 1977



# MODELOS MATEMATICOS QUE CONVIERTEN LA PRECIPITACION EN ESCURRIMIENTO.

## INTRODUCCION

Entre los problemas que se le presentan al Hidrólogo con frecuencia destacan: estimar volúmenes de escurrimiento en sitios donde no hay estaciones de medición, o bien, extender registros de escurrimiento en estaciones con datos correspondientes a un periodo corto. La información de volúmenes de escurrimiento es necesaria para una serie de aplicaciones, como son: determinar el volumen de almacenamiento de una presa, definir la capacidad de un canal, definir la capacidad de un vertedor o definir la elevación de bordos de contención. Los usos de la información se multiplican si se considera a la vez aspectos de calidad del agua en adición a los volúmenes.

En este capítulo se describen algunos métodos que relacionan la precipitación con el escurrimiento. La importancia de los métodos reside en el hecho de que generalmente se dispone de datos de precipitación y no de escurrimiento; de manera que a través de estas relaciones es posible obtener los volúmenes de escurrimiento. Se hace referencia a métodos empíricos inicialmente, que solo requieren de datos de precipitación y características fisiográficas; posteriormente se describen métodos apoyados en precipitación y escurrimiento, y finalmente un modelo de simulación que pretende reproducir los elementos del ciclo hidrológico en la fase correspondiente a los procesos en tierra y canales.

## 2. Método Racional

La fórmula racional es una fórmula empírica que ha tenido amplia aceptación debido a que puede ser aplicada en forma muy simple.

Propuesta por Mulvaney en 1851 la fórmula racional puede expresarse de la siguiente manera:

$$Q=CIA$$

donde

Q= descarga de pico

C= coeficiente de escurrimiento que depende de las características del área drenada

I= intensidad de lluvia

A= área de drenaje

El coeficiente de escurrimiento pretende tomar en cuenta las características de la superficie drenada, como son el tipo de suelo en áreas de drenaje natural, o tipos de construcciones y de revestimientos en áreas urbanas.

La intensidad de lluvia, corresponde a una lluvia con duración igual al periodo de concentración del escurrimiento en el sitio de interés; es decir, al tiempo que tarda, el escurrimiento generado en el sitio más alejado de la descarga, en llegar al sitio de estudio.

La fórmula racional permite obtener el gasto máximo, por lo que a pesar de su simplicidad, su empleo está limitado a cuencas pequeñas o bien a problemas de drenaje urbano, donde no es necesario

conocer la forma del hidrograma.

Viessman <sup>1/</sup> presenta dos aplicaciones interesantes de la fórmula racional. una ,para calcular el drenaje en aeropuertos y otra para un área urbana.

Para el caso de un aeropuerto, el tiempo de concentración está definido por la expresión

$$T = \frac{1.8 (1.1 - C) \sqrt{D}}{\sqrt[3]{S}}$$

donde C= coeficiente de escurrimiento

D= distancia al punto más alejado de la descarga

S= pendiente del terreno

En la fig. 1 se reproduce una gráfica que permite realizar el cálculo directamente.

Conocido el tiempo de concentración, y con datos de precipitación, expresados en una curva de intensidad - duración - frecuencia, se calcula la intensidad correspondiente a esa duración. El valor del coeficiente de escurrimiento varía entre 0.90 para áreas pavimentadas y 0.30 para áreas naturales.

Reunidos esos elementos, la aplicación de la fórmula racional es inmediata.

---

<sup>1/</sup> referencia 1

En el caso de drenaje urbano, el cálculo del tiempo de concentración es más complicado. Generalmente se supone que el ciclo tiempo está compuesto por el tiempo que tarda en llegar el agua a la alcantarilla más cercana y el tiempo que transcurre mientras viaja el agua por la alcantarilla, hasta llegar al sitio de estudio (o al colector principal). La primera parte se calcula con apoyo en curvas como las de la fig. 1.1 aunque también depende del criterio del calculista; el tiempo en la alcantarilla, se calcula bajo la hipótesis de que la conducción está llena, es decir como conducto a presión, empleando hemogramas.

El coeficiente de escurrimiento parece drenaje urbano puede seleccionarse de la tabla 1.1 Los datos de precipitación conviene tenerlos en forma de curvas intensidad duración frecuencia. De esa manera, la aplicación de la fórmula es también inmediata.

El método racional debe ser usado con reservas debido a la generalidad de su alcance y al hecho de que los coeficientes de escurrimiento se han determinado en áreas particulares, por lo que su aplicación en otras zonas requiere de una calibración de los coeficientes.

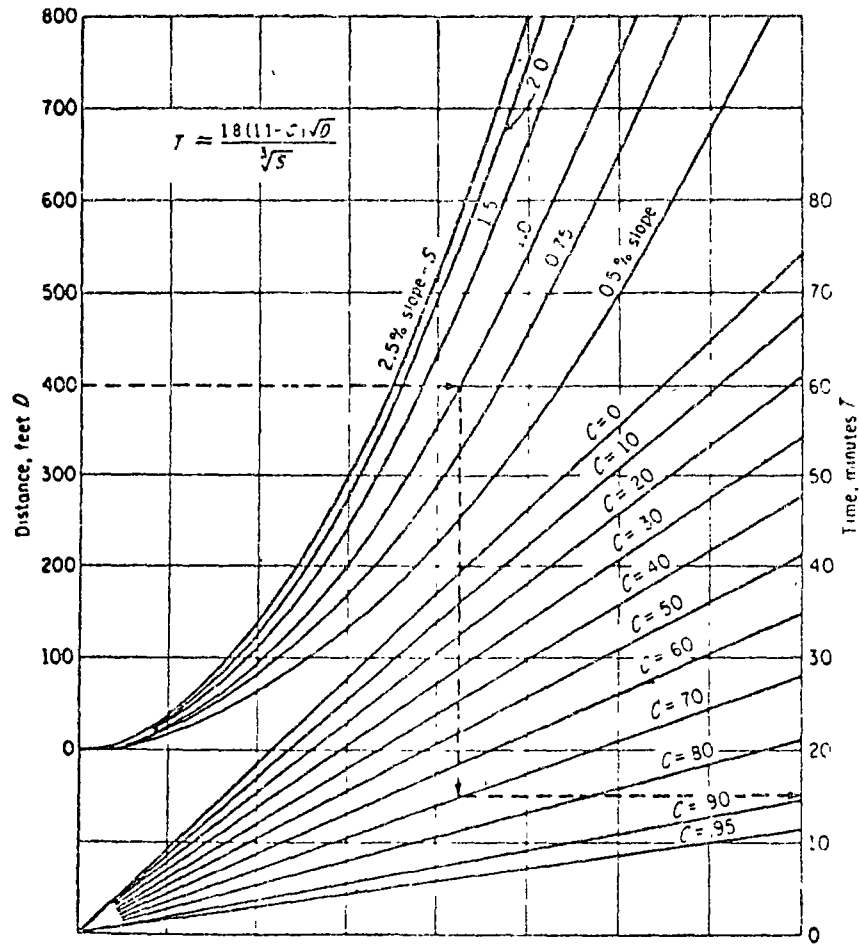


Fig.1.1 Curvas de tiempo de concentración. (Ref.1)

Tabla.1.1 Valores típicos C para periodos de retorno de 5-10 años. (Ref.1)

Description of area	Runoff coefficients
<b>Business</b>	
Downtown areas	0.70-0.95
Neighborhood areas	0.50-0.70
<b>Residential</b>	
Single-family areas	0.30-0.50
Multiunits, detached	0.40-0.60
Multiunits, attached	0.60-0.75
Residential (suburban)	0.25-0.40
Apartment dwelling areas	0.50-0.70
<b>Industrial</b>	
Light areas	0.50-0.80
Heavy areas	0.60-0.90
Parks, cemeteries	0.10-0.25
Playgrounds	0.20-0.35
Railroad yard areas	0.20-0.40
Unimproved areas	0.10-0.30
<b>Streets</b>	
Asphaltic	0.70-0.95
Concrete	0.80-0.95
Brick	0.70-0.85
Drives and walks	0.75-0.85
Roofs	0.75-0.95
<b>Lawns; Sandy Soil</b>	
Flat, 2%	0.05-0.10
Average, 2 to 7%	0.10-0.15
Steep, 7%	0.15-0.20
<b>Lawns; Heavy Soil</b>	
Flat, 2%	0.13-0.17
Average, 2 to 7%	0.18-0.22
Steep, 7%	0.25-0.35



### 3. Métodos de Chow y de I-Pai Wu.

Los métodos de Chow e I-Pai Wu representan un avance en la determinación de gastos máximos y forma del hidrograma. El método de Chow está basado en el concepto de hidrograma unitario e hidrograma unitario sintético; permite calcular el gasto de pico y toma en cuenta factores que afectan directamente la cantidad de lluvia en exceso, o de escurrimiento. El método de I-Pai-Wu define la forma del hidrograma además del gasto máximo. Está basado en un modelo lineal para obtener hidrogramas unitarios instantáneos. Los dos modelos han sido descritos ampliamente por Springall <sup>1/</sup> por lo que a continuación se reproduce el documento correspondiente elaborado por ese autor.

---

<sup>1/</sup> referencia 2

### 3. Hidrograma Unitario

El hidrograma unitario se define como el hidrograma producido por un centímetro de lluvia en exceso (escurrimiento directo), generado por una lluvia distribuida uniformemente, con intensidad uniforme, dentro de un periodo específico.

El hidrograma unitario constituye una herramienta de gran utilidad en hidrología puesto que puede verse como un impulso unitario en un sistema lineal, de manera que se le aplica el principio de superposición.

Con objeto de facilitar la descripción del método, se presenta inicialmente una revisión breve de las componentes de un hidrograma.

#### A. Componentes del hidrograma.

Un hidrograma está formado por cuatro partes: 1) escurrimiento superficial directo; 2) interflujo, 3) flujo base o flujo subterráneo y 4) precipitación sobre el canal. En la figura 3.1 se ilustra esa composición.

Se distinguen además tres zonas: una ascendente, otra denominada cresta y una última denominada recesión (Fig. 3.2)

Especial importancia para el análisis de hidrogramas unitarios reviste la componente de flujo o escurrimiento base, ya que por definición el hidrograma unitario se refiere al escurrimiento directo. Linsley <sup>1/</sup> menciona que debido a que no existe una base real para distinguir

---

<sup>1/</sup> referencia 5.

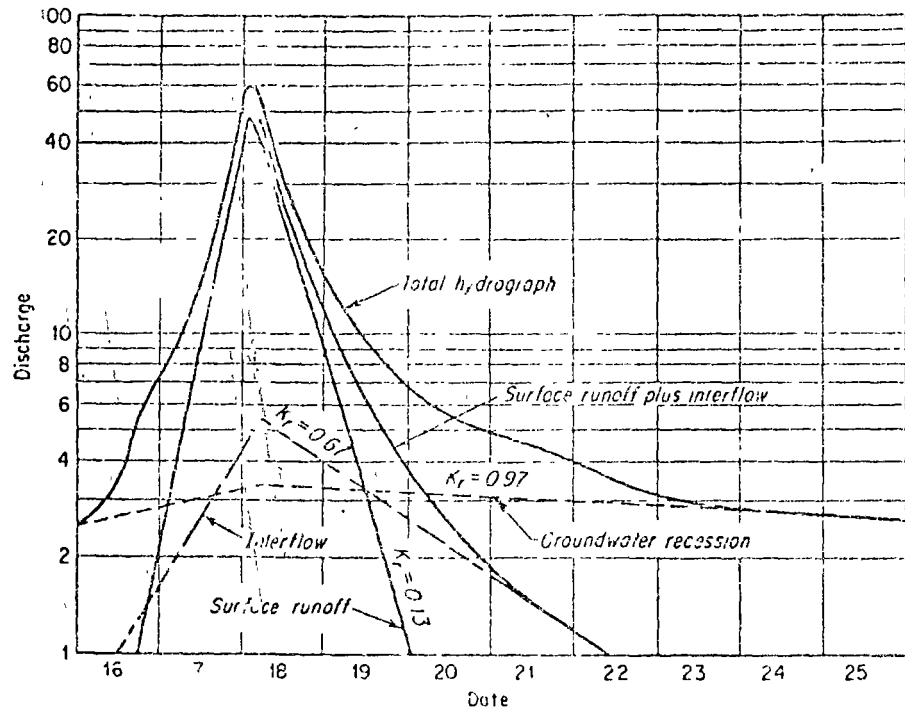


Fig. 3.1 Gráfica semilogarítmica de un hidrograma, mostrando el método de recesión de análisis.

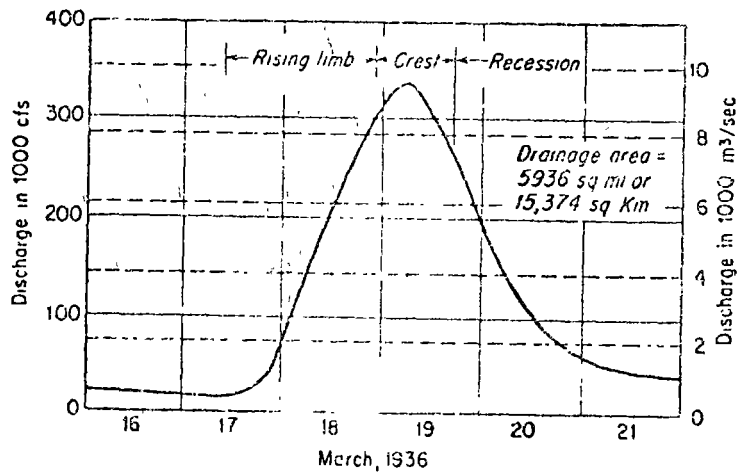


Fig. 3.2 Un hidrograma típico (Río Potomac en Shepherdstown, Virginia del Oeste).

el escurrimiento superficial del escurrimiento base, y dado que la definición de las dos componentes es arbitraria, los métodos de separación son también arbitrarios. Presenta ese autor tres procedimientos para separación que se describen en seguida.

- i) El escurrimiento directo termina N días después que ocurre el gasto máximo. El tiempo se calcula con la expresión (en días)

$$N = 0.8 A^{0.2}$$

donde A es el área de drenaje de la cuenca en kilómetros cuadrados.

- ii) El método más ampliamente utilizado consiste en extender la recesión que existía antes de la tormenta a un punto bajo el pico del hidrograma, y a partir de ese punto se traza una línea recta que lo una con el punto del hidrograma correspondiente al día N. (ver fig. 3.3, línea ABC).

- iii) Este método consiste en proyectar la línea de recesión a un punto debajo del de inflexión del limbo descendente. A continuación se traza un limbo ascendente desde el punto de inicio de subida del hidrograma, hasta conectar con la línea de recesión proyectada.

En la fig. 3.3, la línea ADE se obtuvo de esta manera.

Cualquiera que sea el método, en general se complicará porque los hidrogramas no suelen ser aislados. Para esos casos se dictan recomendaciones en la referencia de Linsley mencionada.

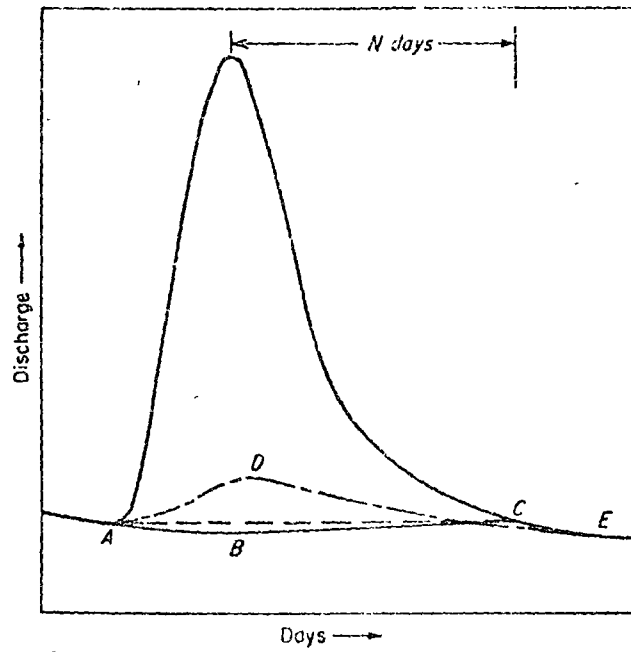


Fig.3.3 Algunos procedimientos simples de separación, flujo-base

## B. Determinación del Hidrograma unitario

Para obtener el hidrograma unitario es recomendable contar con varios registros de tormentas para verificar que la lluvia se distribuye uniformemente. Viessman <sup>1/</sup> sugiere para seleccionar las tormentas las siguientes indicaciones

- i) La duración de la tormenta debe ser aproximadamente igual al 10 a 30% del tiempo de ascenso del escurrimiento
- ii) El escurrimiento directo para la tormenta seleccionada debe ser 1 a 5 cm.
- iii) Deben analizarse varias tormentas para obtener un promedio de ordenadas para una duración de hidrograma seleccionada.
- iv) Las ordenadas de escurrimiento directo para cada tormenta deben reducirse para que representen 1 cm. de escurrimiento directo
- v) El hidrograma unitario final para una duración específica se obtiene ajustando las ordenadas para obtener 1 cm de escurrimiento directo.

## C. Hidrogramas unitarios para diferentes duraciones

Al sumar un hidrograma unitario para duración de tormenta  $t$ , a otro igual pero defasado un tiempo  $t$ , el hidrograma resultante es un hidrograma para 2 cm de escurrimiento directo y con duración  $2 t$ .

Al dividir las ordenadas entre 2, el resultado es un hidrograma unitario producido por una tormenta de duración  $2 t$ . (fig. 3.4) Esto no es mas que la aplicación del principio de superposición mencionado

---

<sup>1/</sup> referencia 1

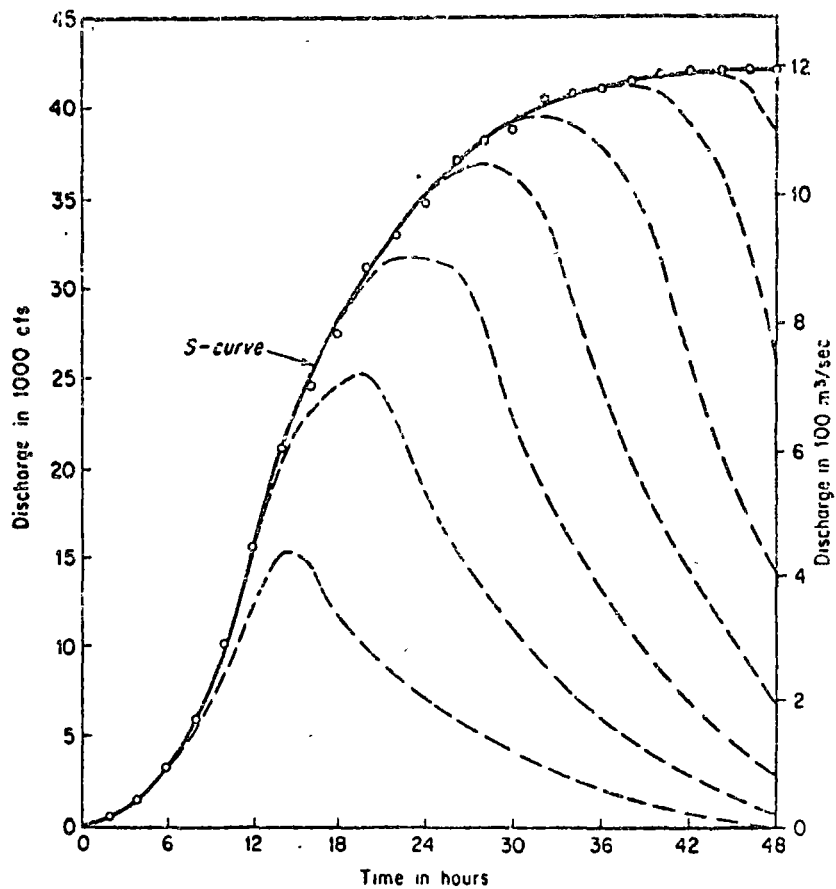


Fig. 3.4 Ilustración gráfica de la Curva S.

antes. Si se suma una serie de hidrogramas unitarios, cada uno de-  
 fasado un tiempo  $t$ , se obtiene la curva denominada curva S que re-  
 presenta la suma de los hidrogramas. A partir de la curva S es  
 posible obtener hidrogramas unitarios para duraciones diferentes  
 (múltiples de  $t$ ). En la figura 3.5 se muestra esquemáticamente el  
 procedimiento.

D. Hidrograma Unitario Instantáneo <sup>1/</sup>

Si la duración de la lluvia tiende a cero, el hidrograma unitario  
 resultante se le llama hidrograma unitario instantáneo. De esta  
 manera, el hidrograma es independiente de la duración de la  
 lluvia en exceso.

Si se tiene una lluvia en exceso  $I(z)$ , de duración  $t_0$  y el hidrograma  
 unitario instantáneo se expresa como  $u(t-z)$ , la ordenada del  
 hidrograma para tiempo  $t$  es:

$$Q(t) = \int_0^{t' \leq t_0} u(t-z) I(z) dz$$

donde la integral se denomina integral de convolución,  $u(t-z)$  es  
 una función del núcleo,  $I(z)$  es la función de entrada y  $t'=t$  cuando  
 $t \leq t_0$  y  $t' = t_0$  cuando  $t > t_0$  Fig. 3.6

Para resolver la ecuación integral se utilizan diversos métodos,  
 como transformarla a un sistema de ecuaciones lineales considerando  
 incrementos finitos de tiempo.

---

<sup>1/</sup> ref.6:



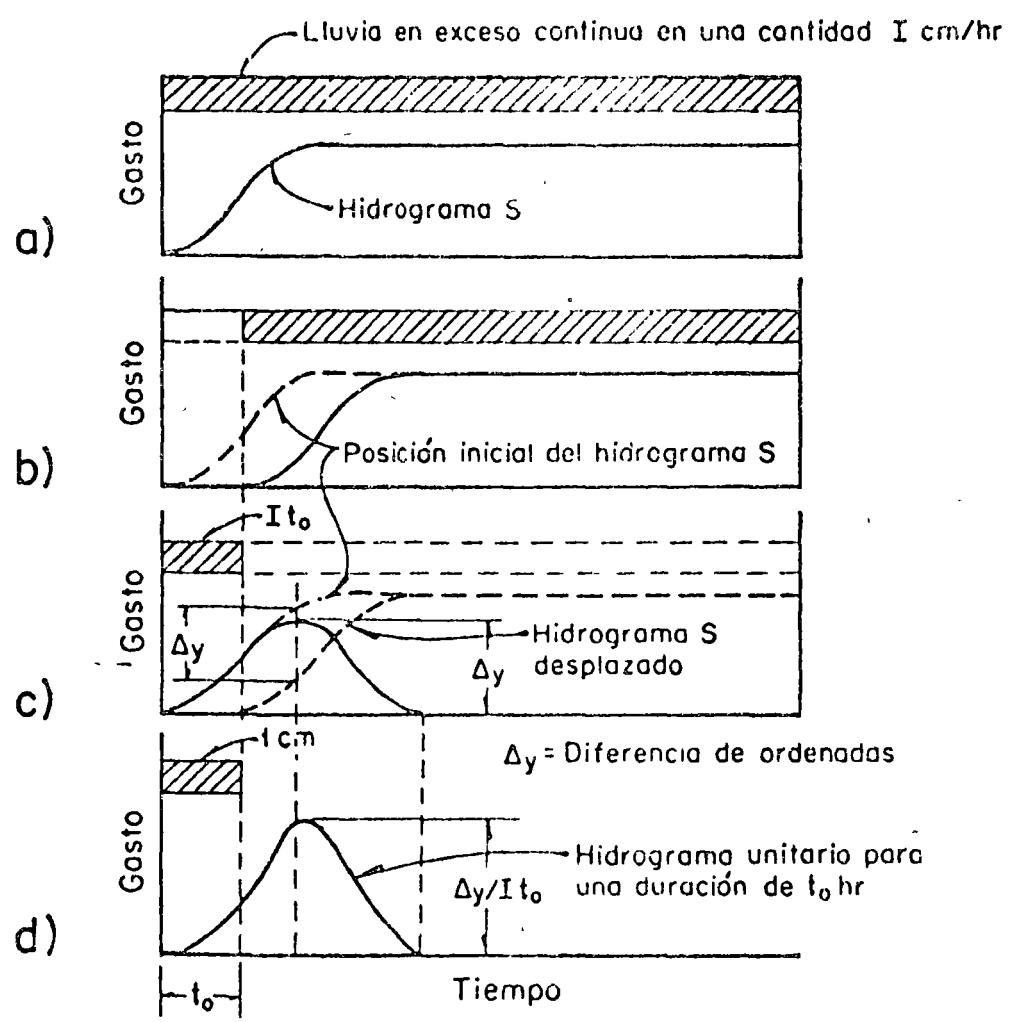
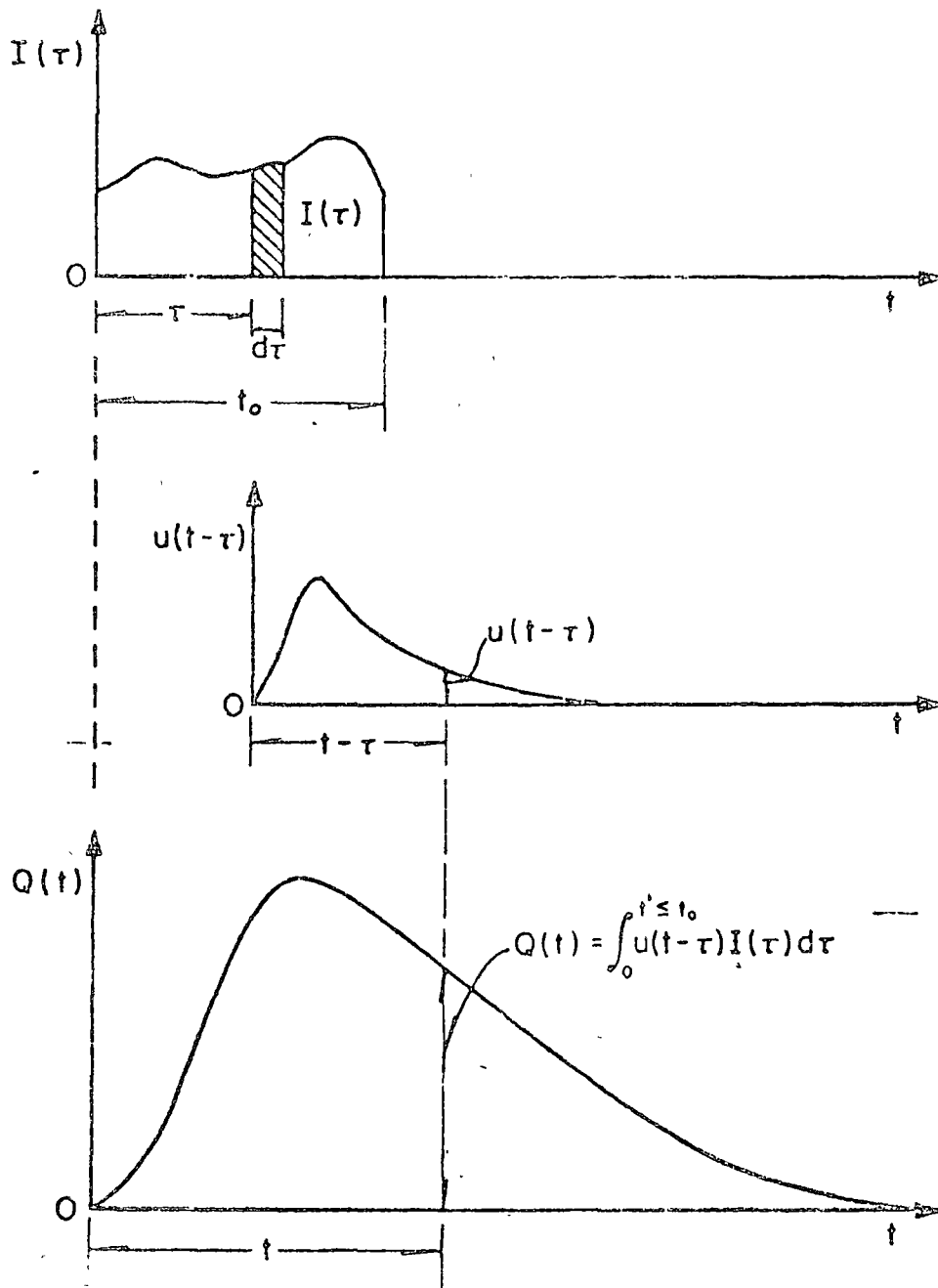


Fig. 3.5.4 Deducción de un hidrograma unitario por medio del método del hidrograma S



3.6 Relación de  $I(\tau)$  y el hidrograma unitario instantáneo

4. Métodos de Simulación. El Modelo de Stanford.

El Modelo de Stanford fue el primer modelo de simulación hidrológica; apareció por primera vez en 1960 y desde entonces ha sido modificado en diversas ocasiones hasta llegar a la versión SWM IV, a la cual se hará referencia en los siguientes párrafos.

La información que requiere el modelo es de suma importancia por lo que se hace referencia en primer lugar al manejo de los datos, tanto climatológicos, como físicos de la cuenca.

La descripción del modelo se inicia haciendo referencia al ciclo hidrológico en el sentido físico, para relacionar posteriormente las funciones del modelo a éste:

A. Manejo de datos para simulación

Los datos de entrada para el modelo son de tres tipos: parámetros hidrometeorológicos; b) parámetros de proceso y; c) parámetros físicos. Los primeros son básicamente precipitación y evaporación; a los segundos corresponde la información sobre el orden de magnitud de los procesos que afectan el movimiento y la distribución del agua en la fase terrestre del ciclo hidrológico. La información del tercer grupo representa las características físicas de la cuenca que pueden ser expresadas en términos geométricos. En la tabla 4.1 se muestran diferentes parámetros que corresponden a los tres tipos mencionados.

Tabla.4.1 Clasificación de datos para modelos determinísticos.  
(Ref.4)

DATA CLASSIFICATION		
HYDROMETEOROLOGIC PARAMETERS	PROCESS PARAMETERS	PHYSICAL PARAMETERS
<b>PRECIPITATION</b> snow, rain, hail, dew <b>EVAPORATION</b>  <b>RADIATION</b> short and long wave <b>TEMPERATURE</b> air, water and earth <b>WIND SPEED AND DIRECTION</b> <b>HUMIDITY, VAPOR PRESSURE</b> <b>CLOUD</b> <b>RIVER STAGE</b> <b>STREAMFLOW VOLUME AND VELOCITY</b> <b>GROUNDWATER LEVEL</b> <b>DIVERSIONS</b>  <b>TIDE</b>  <b>SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION</b> <b>BED SEDIMENT LOAD</b>	<b>Interception Storage</b>  <b>MOISTURE STORAGE</b> Surface and lower zones  <b>INFILTRATION</b>  <b>INTERFLOW</b>  <b>TRANSPIRATION</b>  <b>CONSUMPTIVE WATER USED BY VEGETATION</b>  <b>OVERLAND FLOW ROUGHNESS</b> <b>TIME DELAY HISTOGRAMS</b> <b>UNIT HYDROGRAPHIC RESPONSE</b> <b>MUSKINGHAM COEFFICIENTS</b> <b>RECESSION RATES</b> interflow, groundwater  <b>GROUNDWATER FLOW</b>  <b>INACTIVE GROUNDWATER</b>  <b>SNOWMELT PARAMETERS</b> melt rates due to radiation, condensation convection, ground <b>SNOW DENSITY</b>  <b>SNOW PACK WATER CONTENT</b> maximum volume equivalent <b>EROSION RATE PARAMETERS</b>	<b>LAND SURFACE</b> <b>ELEVATION AREA ZONES</b> <b>OVERLAND FLOW LENGTH</b> <b>GEOLOGIC TYPE</b> <b>VEGETATION COVER (AREAS)</b> <b>SOIL TYPE AND SIZE CLASSIFICATION</b> <b>LAND-USE TYPES</b> <b>LAND FORMATION CLASSIFICATION</b> <b>IMPERVIOUS AREAS</b>  <b>NATURAL CHANNEL NETWORK</b> <b>CONTRIBUTING AREA</b> <b>LENGTH, SLOPE, CROSS-SECTION</b> <b>AND ROUGHNESS OF CHANNEL</b>  <b>URBAN CHANNEL NETWORK</b> <b>LENGTH, SLOPE, DRAINAGE AREA</b> <b>CULVERT DIAMETER</b> <b>ROUGHNESS</b>  <b>RESERVOIRS</b> <b>CONTRIBUTING AREA</b> <b>MAXIMUM ELEVATION AND STORAGE</b> <b>MINIMUM ELEVATION AND STORAGE</b> <b>SPILLWAY CREST</b>  <b>AREA-ELEVATION-CAPACITY-DISCHARGE</b> relationship <b>OPERATING RULES</b>

i) Parámetros hidrometeorológicos

Se hace referencia solamente a los parámetros de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento, indicadores en la tabla 5.1. La precipitación es el dato más importante para el modelo de simulación. Dentro de este concepto se incluye agua, nieve y rocío. Para los fines de este escrito, se utiliza solamente lluvia. La precipitación presenta variaciones temporal y espacial. Existen instrumentos que permiten registrar la variación temporal en un punto; generalmente se trata de estimar la variación espacial usando los datos de estaciones de medición en diferentes sitios. Para esto último pueden usarse los siguientes métodos: media aritmética, polígonos de Thiessen y método de isoyetas.

La evapotranspiración se define como la transferencia de agua del estado líquido al estado gaseoso. Para fines del modelo de Stanford, se requiere conocer la evapotranspiración potencial; esta se define como la máxima rapidez con que se lleva a cabo la transferencia de agua, si se supone una fuente de abastecimiento limitada. Se mide, observando la pérdida de agua de una superficie de agua, generalmente de un evaporómetro.

Los registros de escurrimiento representan una medida de la respuesta de una cuenca a las variaciones temporales y a los procesos hidrológicos internos. Estos registros son de parti-

cular importancia para el modelo de simulación pues se usan durante la calibración para verificar la reproducción de los procesos del ciclo. Existen diversos métodos para medir el escurrimiento; el más común consiste en medir la velocidad del agua en distintos tramos de una sección transversal e integrarlos para obtener un valor medio.

La importancia de la información es evidente para el modelo de simulación, puesto que la respuesta dependerá de su veracidad. Es por ello necesario contar con aplicar este tipo de metodología.

## ii) Parámetros Físicos

Los parámetros físicos se requieren para definir las características de retención y repulsión del agua en una cuenca; pueden ser agrupados en:

- a) superficie del terreno
- b) red de canales de drenaje natural
- c) red de canales de drenaje urbano
- d) almacenamiento

- Superficie del terreno

En relación a los parámetros de superficie existen dos enfoques, uno que divide la superficie en áreas regulares (retícula) para proceder a cálculos por elemento ; el otro, que emplea el Modelo de Stanford se denomina sistemas de parámetros globales

y considera cada unidad de una cuenca (segmento) como un área homogénea con características uniformes. Las características físicas del escurrimiento superficial se representan por una serie de almacenamientos lineales o como escurrimiento en planos, con pendiente media, longitud media, etc. También se le representa como un conjunto de unidades cada una con características uniformes. Estos tipos de enfoque se ilustran en la fig. 4.1

La mayoría de los modelos determinísticos tiende a favorecer el empleo de los modelos de parámetros globales; el de Stanford entre ellos.

Para representar adecuadamente las condiciones físicas del terreno, deben considerarse los procesos que componen el ciclo hidrológico y las condiciones físicas que afectan dichos procesos. Así, los primeros son: escurrimiento superficial y detención, infiltración, evapotranspiración, intercepción, área impermeable y escurrimiento. Las condiciones físicas son: área, elevación, pendiente, longitud de escurrimiento superficial, cubierta vegetal y densidad, tipo de suelo, geología y uso del suelo. El Modelo de Stanford define la forma en que cada una de estas condiciones define la forma en que cada una de estas condiciones entra como

Data Management for Simulation The Occurrence

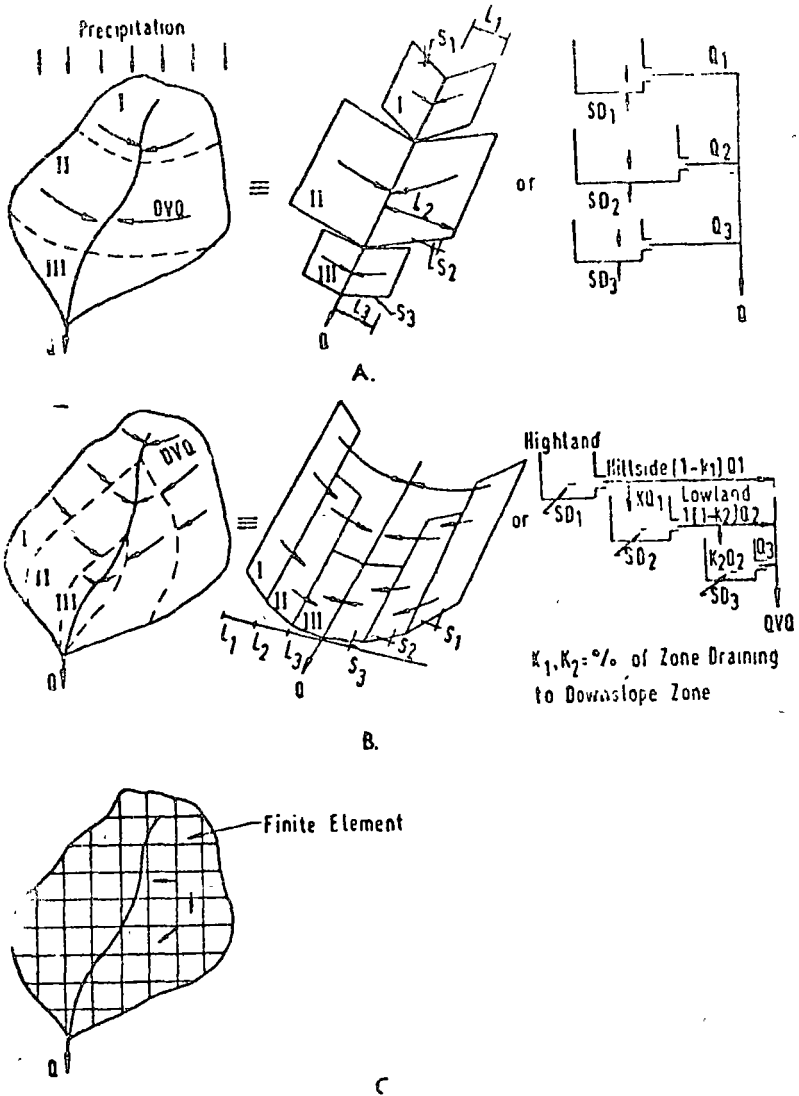


Fig.4.1 Area de representación de una cuenca (A) y (B) Parámetro de sistemas global;(C) Sistema distribuído.



dato para la simulación.

Red de canales de drenaje natural.

El escurrimiento superficial de una cuenca entra a la red de canales. La contribución a los canales varía dependiendo de las características del terreno y de la tormenta. Los primeros se han mencionado con anterioridad.

El sistema de canales actúa como un almacenamiento largo y angosto; recibe agua superficial y subsuperficial, la almacena temporalmente en los canales y la descarga finalmente. El sistema de canales tiene pendientes variables y secciones transversales diferentes, recibe agua en forma acuática, por lo que tanto el escurrimiento como el almacenamiento en el canal varían a lo largo del sistema.

El sistema de canales puede dividirse en una serie de tramos y para cada uno se determinan secciones transversales, pendiente, área tributaria, almacenamiento en áreas planas y rugosidad, esto mediante mapas, fotografías y recorridos de campo.

La división por tramos requiere de un proceso cuidadoso. Considerese una cuenca a la que se tiene que dividir por segmento.

Primero se divide la cuenca en segmentos de terreno, cuyas fronteras pueden ser poligonos de Thiessen, isoyetas o división topológicas, y que representan áreas con precipitación "sensiblemente" uniforme. A continuación, dividase la cuenca en segmentos

representan áreas del terreno con suelos uniformes o cobertura vegetal uniforme, etc.

La superposición de los mapas así formados define posibles segmentos que pueden ser usados en el modelo.

El sistema de canales se divide en tramos definiendo "puntos de flujo" (flow points), sobre el río en varios lugares. Estos puntos definen tramos y son los sitios que pueden obtenerse hidrogramas. Cada tramo deberá asignarse a un solo segmento.

#### Redes de canales de Drenaje Urbano

Difiere de la red de canales de drenaje natural en dos aspectos. Primeramente, drenar áreas tributarias compuestas de superficies permeables e impermeables, pero con mayor proporción de estas últimas; en segundo lugar, el sistema de conducción puede estar formado por una combinación de conductos creados y abiertos.

La simulación de áreas urbanas por tanto debe contemplar la respuesta de las áreas impermeables directamente conectadas y la respuesta de áreas permeables con su escurrimiento subsuperficial asociado. Para esto, debe medirse el área de superficies impermeables, así como la red de drenaje definida por tramos, especificando longitud, pendiente, rugosidad y sección transversal.

### - Almacenamientos

En la simulación es importante conocer las características fijas de un almacenamiento, como son la relación volúmen - elevación área-elevación y elevación-descarga. Asimismo, importantes son las reglas de operación del almacenamiento, que varían en el tiempo. Toda la información debe conocerse para simular sistemas de canales que contienen almacenamientos.

### iii) Parámetros de Proceso

Al considerar el ciclo hidrológico como un proceso determinista, se supone que las relaciones entre muchos factores que interactúan. Los valores numéricos empleados para cuantificar los factores que afectan la distribución y movimiento del agua se denominan parámetros. Estos parámetros incluyen infiltración, almacenamiento de humedad del suelo, percolación y flujo subterráneo.

Para entender la función de los parámetros de proceso, supóngase una cuenca y un parámetro físico, como la longitud de un tramo de canal, constante en un periodo determinado. La entrada y salida de agua a la cuenca puede definirse mediante la medición de parámetros hidrometeorológicos. La respuesta de la cuenca varía durante el periodo debido a las relaciones cambiantes y a los valores de los parámetros. La evaluación de los parámetros de proceso que reproducen la respuesta de la cuenca es el objetivo de la calibración del modelo.

En un modelo conceptual, como es el de Stanford, los parámetros de proceso se determinan combinando mediciones directas y evaluaciones indirectas durante la etapa de calibración. Esta diferencia surge por la dificultad que presenta la medición directa de todos los procesos en campo.

Finalmente, es importante que el número de parámetros de proceso que se evalúan por calibración sea mínimo puesto que el grado de dificultad para calibrar está en razón directa del número de parámetros.

### B. El Ciclo Hidrológico.

El ciclo se visualiza considerando que se inicia en la evaporación de agua de los océanos (Fig. 4.2). El vapor resultante es transportado por masas de aire en movimiento. Bajo condiciones adecuadas, el vapor se condensa para formar nubes que se convierten en precipitación posteriormente. La precipitación que llega a la superficie de la tierra se dispersa de diversas maneras la mayor parte es retenida temporalmente en el suelo, cerca del lugar en donde cae, y regresa a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas. Una parte del agua se dirige hacia los cauces, sobre y a través de la capa superficial para convertirse en almacenamiento subterráneo. Bajo la influencia de la gravedad, tanto el agua superficial como la subterránea se mueven

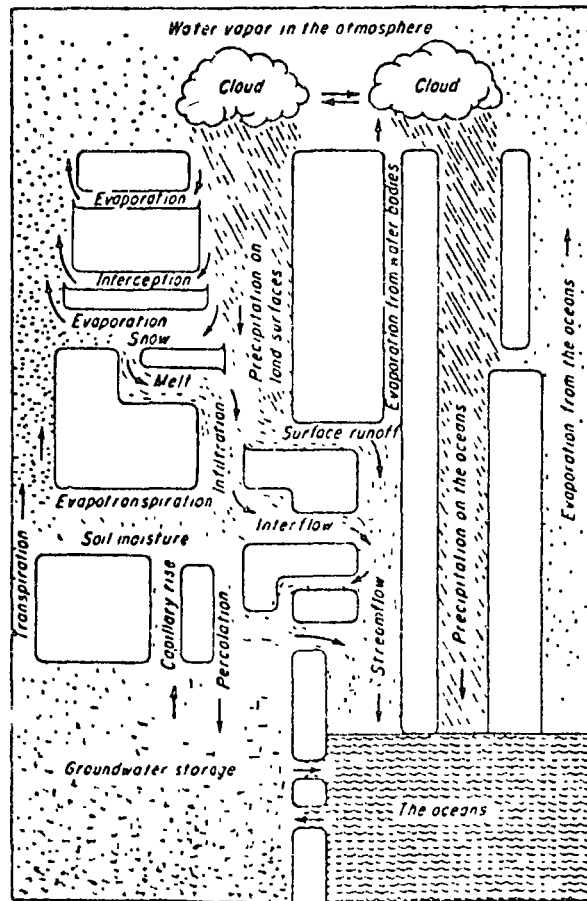
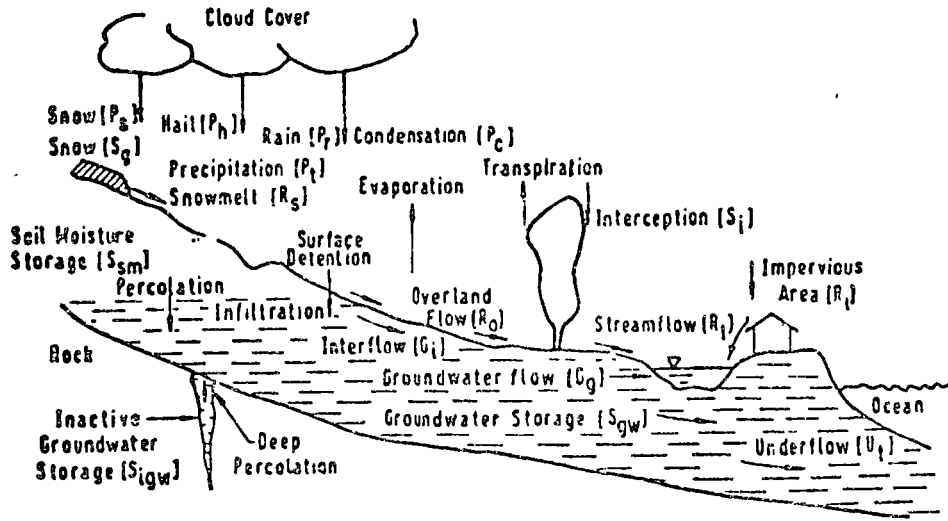


Fig. 4.2 Representación del ciclo hidrológico.  
(Refs. 4 y 5)

hacia menores elevaciones y eventualmente pueden descargar al océano. Una parte del agua superficial y subterránea regresan a la atmósfera por evaporación directa.

El ciclo hidrológico es un medio conveniente de delinear en forma aproximada el alcance de la hidrología como la porción entre la precipitación sobre la tierra y el regreso de esa agua a la atmósfera o al océano.

El movimiento del agua en las varias fases del ciclo hidrológico es errático tanto en tiempo como en área.

La variación temporal es relativamente fácil de seguir si se usan intervalos de tiempo suficientemente cortos para el análisis; la variación espacial, en cambio, es compleja. Para salvar este problema se divide el área de la cuenca en varias subcuencas o segmentos pero, esto da lugar a un aumento notable en el tiempo de computación. El modelo de Stanford se utiliza en cuencas divididas por segmentos como se describirá mas adelante.

### Descripción del Modelo de Stanford.

Ayudados en la lámina 43, se describen brevemente las principales funciones del modelo a continuación:

- a) Ajuste de la Precipitación. Se utiliza un factor  $K_1$  que ajusta la precipitación medida en la estación de cada segmento a la precipitación media del mismo.
- b) Intercepción. Se define como el proceso por el cual la precipitación es retenida en hojas, ramas y tallos de la vegetación, así como los desechos vegetales que cubren el suelo. Desde ahí es evaporada sin incrementar el almacenamiento de humedad del suelo.

La pérdida por intercepción es simulada con un parámetro  $EPX^M$ , que representa el volumen máximo de almacenamiento de intercepción en el segmento, expresado en milímetros. La capacidad de almacenamiento de intercepción generalmente es reducida, de 2 a 3 mm, por lo que su influencia en tormentas importantes es muy reducida, sin embargo en el balance anual puede ser de consideración.

- c) Escurrimiento en áreas impermeables. El área impermeable se define como la superficie del terreno con capacidad de infiltración nula. Se distinguen dos tipos de áreas: aquellas que están conectadas directamente y aquellas que lo están indirectamente. A las primeras corresponden áreas que están en la vecindad del sistema de canales y las segundas, son áreas que drenan a superficies donde la capacidad de infiltración es mayor que cero.

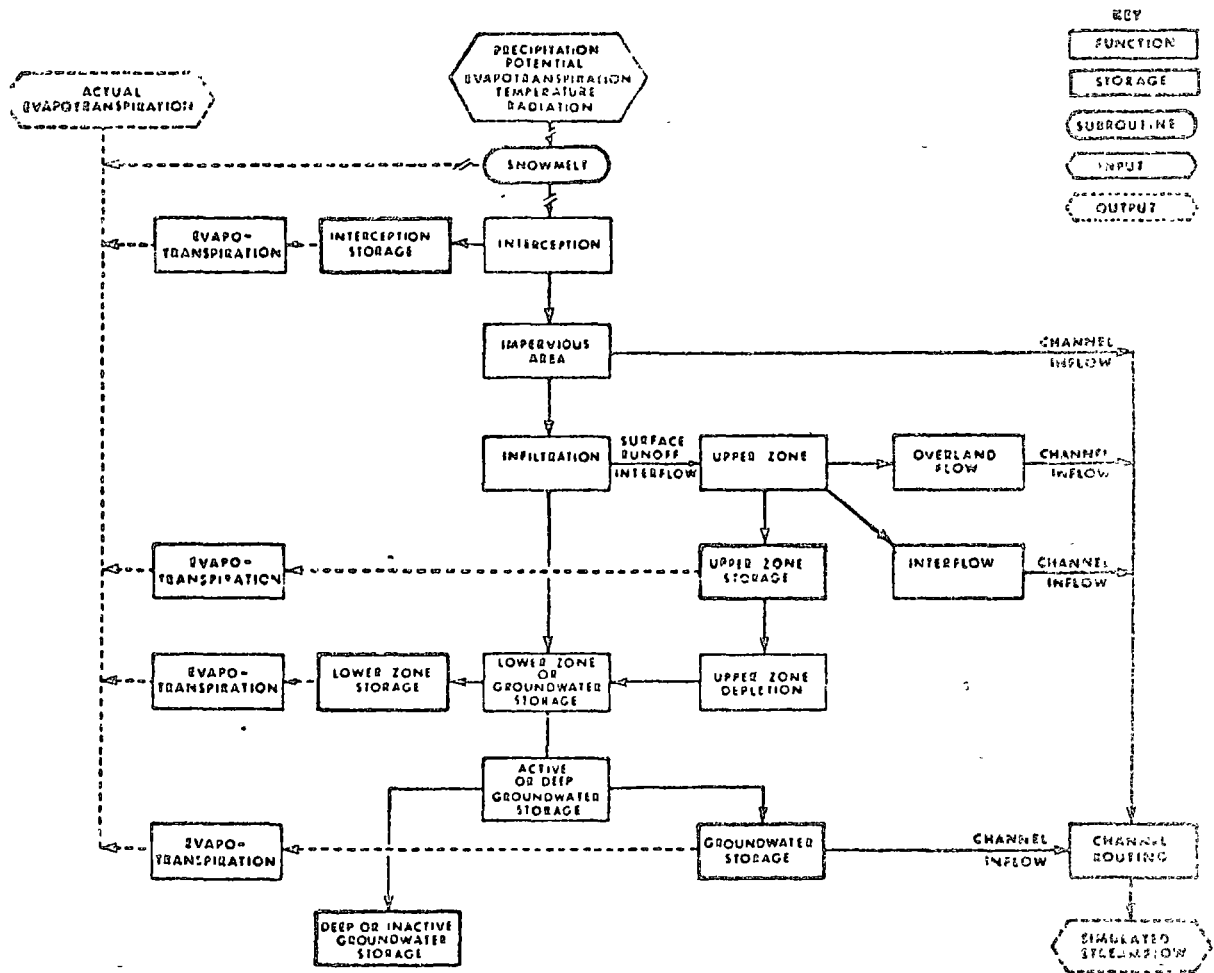


Fig. 4.3 Diagrama de flujo para el modelo de Simulación de Stanford. (Ref.3)



El factor de área impermeable A representa el porcentaje de dicha área. El área que se asigne al factor A debe ser precisamente la que esté directamente conectada al sistema de canales. En general, una cuenca tiene del orden del 3% de área impermeable, por lo que este parámetro es poco significativo en el caso de avenidas.

En el modelo, parte del volumen que se precipita sobre el área impermeable (descontando el volumen de intercepción), pasa a ser aportación a los canales.

d) Infiltración.- Se define como el movimiento de agua hacia el perfil del suelo, a través de la superficie del suelo. La rapidez de infiltración es la rapidez con la que el agua entra al perfil del suelo por unidad de tiempo. Cuando el suministro de humedad a la superficie del suelo (precipitación), supera la rapidez de infiltración, entonces esta infiltración es la máxima que ocurre y se le denomina "capacidad de infiltración". Esta capacidad varía en el tiempo debido a cambios en la humedad del suelo y a las características del suelo.

Crawford y Linsley desarrollaron una función de infiltración que es usada en el modelo de Stanford y pretende satisfacer dos criterios:

- a) representar la rapidez de infiltración media continuamente
- y
- b) representar la variación espacial de la infiltración.

La expresión propuesta es:

$$\bar{f}_t = \frac{INF}{(LZS_{t-1}/LZSN)^b}$$

donde:

$\bar{f}_t$  : capacidad de infiltración media, sobre el segmento,,  
en el instante t.

INF : parámetro que representa un índice de nivel de in-  
filtración, relacionado físicamente a las caracter-  
rísticas de la cuenca.

LZS<sub>t-1</sub> : valor real del almacenamiento de humedad del suelo,  
al tiempo t-1.

LZSN: valor nominal del almacenamiento de humedad del sue-  
lo en la zona baja, equivalente a la capacidad de  
campo.

b: exponente.usualmente con valor 2.

INF y LZSN son parámetros fijos en la expresión mencionada.  
Se obtienen al calibrar el modelo.

La condicipon de variación temporal se cumple con la expre-  
sión anterior; para la de variación superficial se requiere  
conocer la distribución de frecuencias de la infiltración en  
el terreno, y su función acumulada correspondiente. Como eso es  
difícil de determinar, se aproxima con una distribución acu-  
mulada lineal (Fig.#4). Se observa que de esa manera se toman  
en cuenta áreas con capacidad de infiltración menor que la  
humedad suministrada  $\bar{p}$ . La posición de la línea XY varía con-  
tinuamente y está determinada por el valor de  $\bar{f}$ , calculado con  
la expresión dada anteriormente, que corresponde a la capacidad  
de infiltración media, por lo que se mide al 50% de área. Con

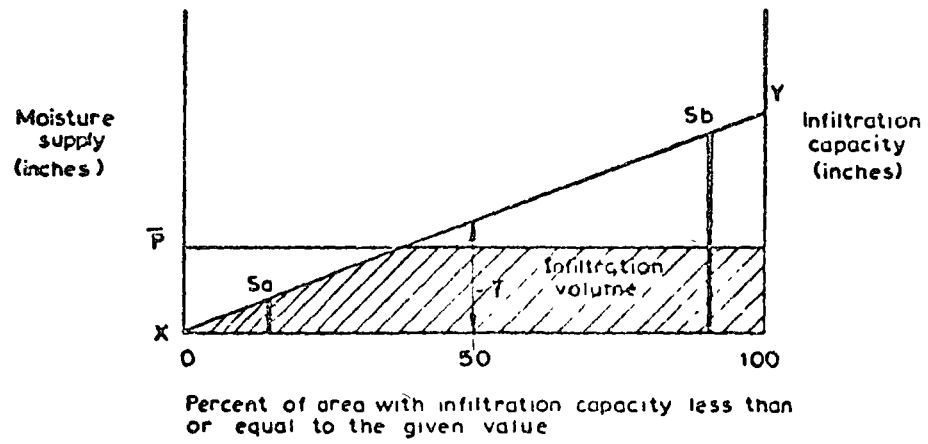


Fig.4.4 Distribución acumulada de frecuencias de la capacidad de infiltración.(Ref.4)

fines ilustrativos obsérvese la Fig.4, donde se muestra una secuencia que corresponde a la ocurrencia sucesiva de distintas alturas de precipitación.

e) Almacenamiento de Humedad del Suelo. Constituye el corazón del modelo de balance. Si la capacidad de almacenamiento se define en términos de una capacidad absoluta que no puede ser excedida, entonces, cuando se excede, ocurre un cambio en las características de escurrimiento del segmento; por esa razón, en el modelo de Stanford la humedad del suelo o almacenamiento de la zona baja se define con una capacidad nominal LZSN. La zona baja representa el almacenamiento en la zona de aeración, desde cerca de la superficie del suelo hasta la parte inferior de la zona de raíces de las plantas del segmento. La humedad contenida en el suelo debajo de esa zona no entra al proceso hidrológico en forma importante; la que se encuentra en la superficie del suelo puede ser removida por evaporación y transpiración. Para ello, se simula una zona superior UZS. La capacidad nominal de esa zona (UZSN) es tratada en forma similar a la zona baja (Fig.4.5)

f) Interflujo.- También conocido como flujo subsuperficial, es el agua que se mueve lateralmente, a través de los estratos superficiales del suelo; depende, en parte, de la geología de la cuenca. Por ejemplo, en el caso de áreas cársticas, donde el suelo limoso da lugar a muchos canales subsuperficiales, la componente de interflujo puede ser importante. En el modelo de Stanford, el volumen de escurrimiento descontando la infiltración, incluye el interflujo y el escurrimiento super-

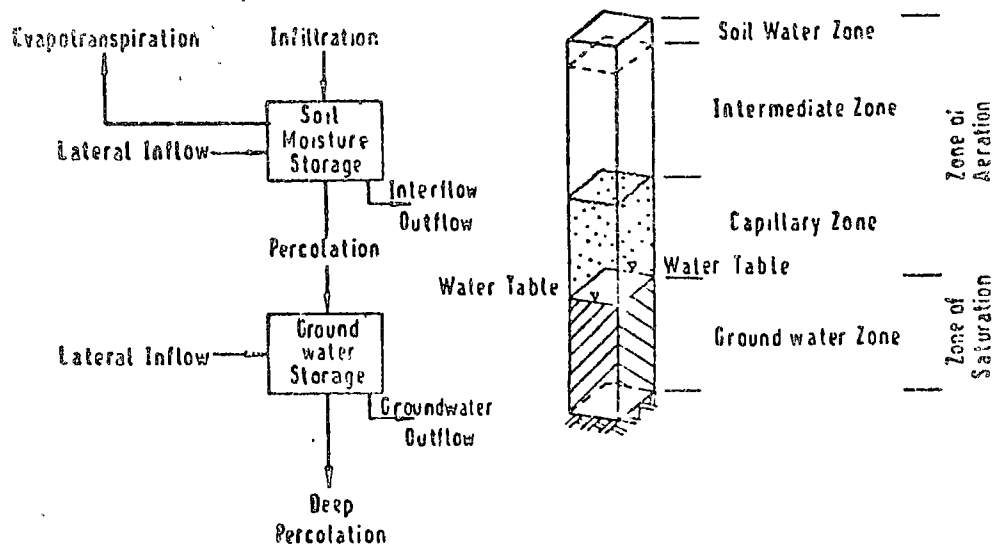


Fig.4.5 Zonas generales de agua subsuperficial. (Ref.4)

ficial. El agua disponible para interflujo está basada en la humedad del suelo y la rapidez de infiltración local. La expresión que rige el proceso es una función del cociente de humedad de la zona baja ( $LZS/LZSN$ ). Como en el caso de la infiltración, el nivel de la función se ajusta por medio de un parámetro INTERFLOW. Se define una variable  $C$ , en adición, que fija la posición de la línea mostrada en la Fig. 4.6

$$C = \text{INTERFLOW} \cdot 2^{(LZS/LZSN)}$$

Esta línea divide el triángulo de detención superficial en dos porciones: detención del escurrimiento superficial y detención por interflujo.

La salida del volumen de interflujo a la corriente (INTF) se lleva a cabo de acuerdo con la función :

$$\text{INTF} = \alpha \cdot \text{SRGX}$$

donde SRGX es el volumen de agua en el almacenamiento del interflujo. Para el caso particular de incremento de tiempo de una hora, en la simulación, la expresión para  $\alpha$  es:

$$\alpha = (1 - \text{IRC})^{1/24}$$

donde IRC es la rapidez de recesión de interflujo diaria, constante.

- g) Almacenamiento en la zona superior. El volumen de detención definido por el interflujo y el escurrimiento superficial avanzan hacia capas inferiores de suelo; al hacerlo, están sujetos a una detención en la zona superior. La cantidad retenida es una función de  $UZS/UZSN$ . La fracción retenida es alta

cuando el cociente es bajo, y es cero cuando el cociente es 3. Esta función representa la infiltración retardada del agua que escurre en los canales.

h) **Escorrimento Superficial.** Se define como el movimiento de agua, hacia los canales, que ocurre sobre la superficie del terreno. En términos del modelo, corresponde al escorrimento superficial aquella parte del volumen detenido que escapa de la zona de almacenamiento superior. El escorrimento superficial simula el retraso que ocurre al escurrir el agua hacia la red de canales. Permite a la vez infiltración en caso de que supere la capacidad de infiltración. El modelo realiza dos tipos de cálculo: uno es básicamente la ecuación de continuidad que determina la cantidad de agua detenida al final de un incremento de tiempo; el otro está dirigido a simular la infiltración retrasada. La salida del proceso de escorrimento superficial  $Q$  se almacena para transitarlo posteriormente en el canal.

i) **Vaciado de la Zona Superior.** - El agua retenida temporalmente en la zona superior puede moverse eventualmente hacia la zona inferior por medio del proceso de infiltración. El volumen de percolación depende de los cocientes de los almacenamientos superior e inferior.

$$PERC = 0.003 \text{ INFILTRATION} \cdot UZSN \left( \frac{UZS}{UZSN} - \frac{LZS}{LZSN} \right)^3$$

donde INFILTRATION es el parámetro del nivel de infiltración.

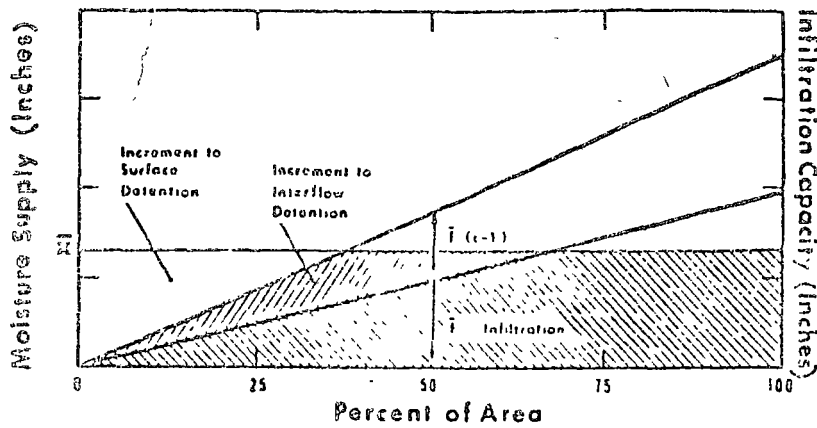


Fig. 4.6 Gráfica de la función que define la posición de la línea de interflujo. (Ref.3)

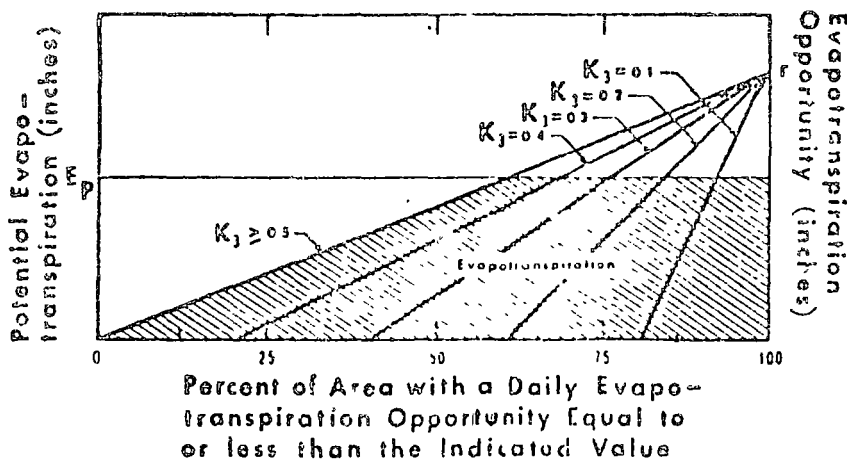


Fig. 4.7 Gráfica que ilustra la variación supuesta en la oportunidad de evapotranspiración en un segmento de cuenca. Se ilustra además el método para calcular la evapotranspiración real. (Ref.3)



- j) **Función de la Zona Baja.**- La Zona baja recibe a la infiltración y percolación de la zona superior en cada intervalo y divide ese volumen entre el almacenamiento de la zona baja y el almacenamiento de agua subterránea. Esta es una función del cociente  $LZS/LZSN$ . Cuando el cociente es muy pequeño, prácticamente toda el agua se retiene en la zona baja; cuando el cociente aumenta hasta uno, el volumen se divide entre los dos almacenamientos; con valores del cociente mayores que uno, mayor proporción pasa al almacenamiento de agua subterráneo.
- k) **Agua Subterránea.**-El almacenamiento de agua subterránea y flujo subterráneo se refieren a la acumulación de agua en la zona de almacenamiento subterráneo y a su descarga. En algunas cuencas, sucede que parte del agua subterránea pasa a niveles inferiores a los más bajos de la corriente del canal, entrando a la zona de almacenamiento subterráneo inactivo.

El agua que se encuentra en el almacenamiento subterráneo activo contribuye al sistema de canales vaciando el almacenamiento de acuerdo con la relación:

$$GWF = \beta (1 + KV \cdot GWS) \cdot SGW.$$

donde

GWF: incremento de flujo de agua subterránea.

SGW: almacenamiento de agua subterránea.

$\beta$ : una constante de vaciado.

$KV \cdot GWS$ : este producto determina la rapidez de la recesión.

- l) **Evapotranspiración.**-Es la pérdida de agua desde el terreno y superficies de agua de una cuenca debido a procesos combi-

nados de evaporación y transpiración:

El modelo de Stanford calcula la evapotranspiración total contabilizando los siguientes componentes:

$$E_{total} = E_{intercepción} + E_{superficies\ de\ agua\ zona\ superior} + E_{zona\ inferior} + E_{agua\ subterránea}$$

La evapotranspiración simulada es la real. Se definen dos conceptos:

- Evapotranspiración potencial: que corresponde a la máxima rapidez con que las hojas y superficie del terreno suel- tan el agua considerando un suministro ilimitado de agua.
- Oportunidad de Evapotranspiración: Es un índice de la hu- medad disponible para evapotranspiración.

La forma en que ocurre la evapotranspiración en las dife- rentes etapas es la siguiente:

- i) Evapotranspiración del almacenamiento de intercepción: Ocurre como rapidez de evapotranspiración potencial, mientras existe almacenamiento de interflujo.
- ii) Evapotranspiración de la superficie de detención: Se calcula en forma indirecta mediante la adición del almu- cenamiento de retención superficial restante, al suminis- tro de humedad del suelo.
- iii) Evapotranspiración de la zona superior: Se calcula con la rapidez potencial cuando el almacenamiento de humedad

en la zona superior excede el valor nominal UZSN; de lo contrario, si es menor, las pérdidas por evapotranspiración ocurren con una rapidez menor que la potencial.

- iv) Evapotranspiración desde el almacenamiento de la zona inferior. Está basada en el concepto de oportunidad de evapotranspiración y está determinado por la densidad vegetal y la variación superficial de suministro de humedad.

La variación superficial de la oportunidad de evapotranspiración está representada por una función lineal y el proceso de evapotranspiración ocurre de la siguiente manera: una vez que se satisface la evapotranspiración potencial de los almacenamientos de intercepción y zona superior, la evapotranspiración remanente se aplica a la zona inferior. Como se muestra en la Fig. 4.7 la localización de la recta indicada está dada por la expresión:

$$r = \left( \frac{0.25}{1-K_3} \right) \left( \frac{LZS}{LZSM} \right)$$

donde  $r$ : oportunidad de evapotranspiración máxima.  
 $K_3$ : índice de extracción de humedad de la vegetación desde la zona baja.

- v) Evapotranspiración del almacenamiento de agua subterránea. Ocurren con una rapidez constante especificada por el parámetro  $K_{24EL}$  siempre que no haya sido satisfecha la evapotranspiración desde otras fuentes.
- m) Escurrimiento en canales. El modelo de Stanford utiliza un método de Muskingum modificado para transitar avenidas.

Esto requiere de un hidrograma de tiempos de retraso, que se obtiene determinando las áreas tributarias de cada tramo, estimando las velocidades en los canales en puntos sucesivos del sistema de canales y finalmente calculando el tiempo de flujo hasta la salida de la cuenca. Los gastos trasladados se transitan mediante la expresión:

$$O_2 = I_1 - KSI (I - O_1)$$

El empleo de esta expresión permite determinar finalmente los volúmenes de escurrimiento a la salida de la cuenca.

Comentarios acerca de la calibración.-

El proceso de calibración requiere de considerar valores iniciales para los parámetros, a partir de la información básica. Se requiere hacer algunas corridas y comparar los resultados generados respecto a los datos, es decir, comparar el hidrograma simulado respecto al real.

Actualmente se cuenta con rutinas de optimización que permiten variar los parámetros automáticamente, buscando por ejemplo minimizar las diferencias entre los volúmenes mensuales simulados y los históricos.

### REFERENCIAS

1. Viessman, W.Jr, Terence E. Harbaugh and John W. Knapp. "Introduction to Hydrology". Intext Educational Publishers. New York. 1972.
2. Springall, Rolando. "Drenaje en Cuencas Pequeñas". Instituto de Ingeniería, UNAM. 1969.
3. Linsley, R.K.Jr. "Rainfall -Runoff Models" en Systems Approach to Water Management, Asit K. Biswas Ed. Mc. Graw Hill. 1976. pp. 16-53
4. Fleming, George. "Computer Simulation Techniques in Hydrology". Elsevier, New York, 1975.
5. Linsley, R.K. Jr., Max A. Hohler and Joseph L.H. Paulhus. "Hydrology for Engineers", Second Ed. Mc Graw. New York. 1975.
6. Springall, Rolando . 'Escorrente en Cuencas Grandes' Instituto de Ingeniería, UNAM 1967

### BIBLIOGRAFIA

- Chow, Ven Te. (ed.)., "Handbook of Applied Hydrology. New York: Mc Graw Hill Co. 1964.
- Overton, Donald and Michael E. Meadows. "Stormwater Modeling" Academic Press. New York. 1976.



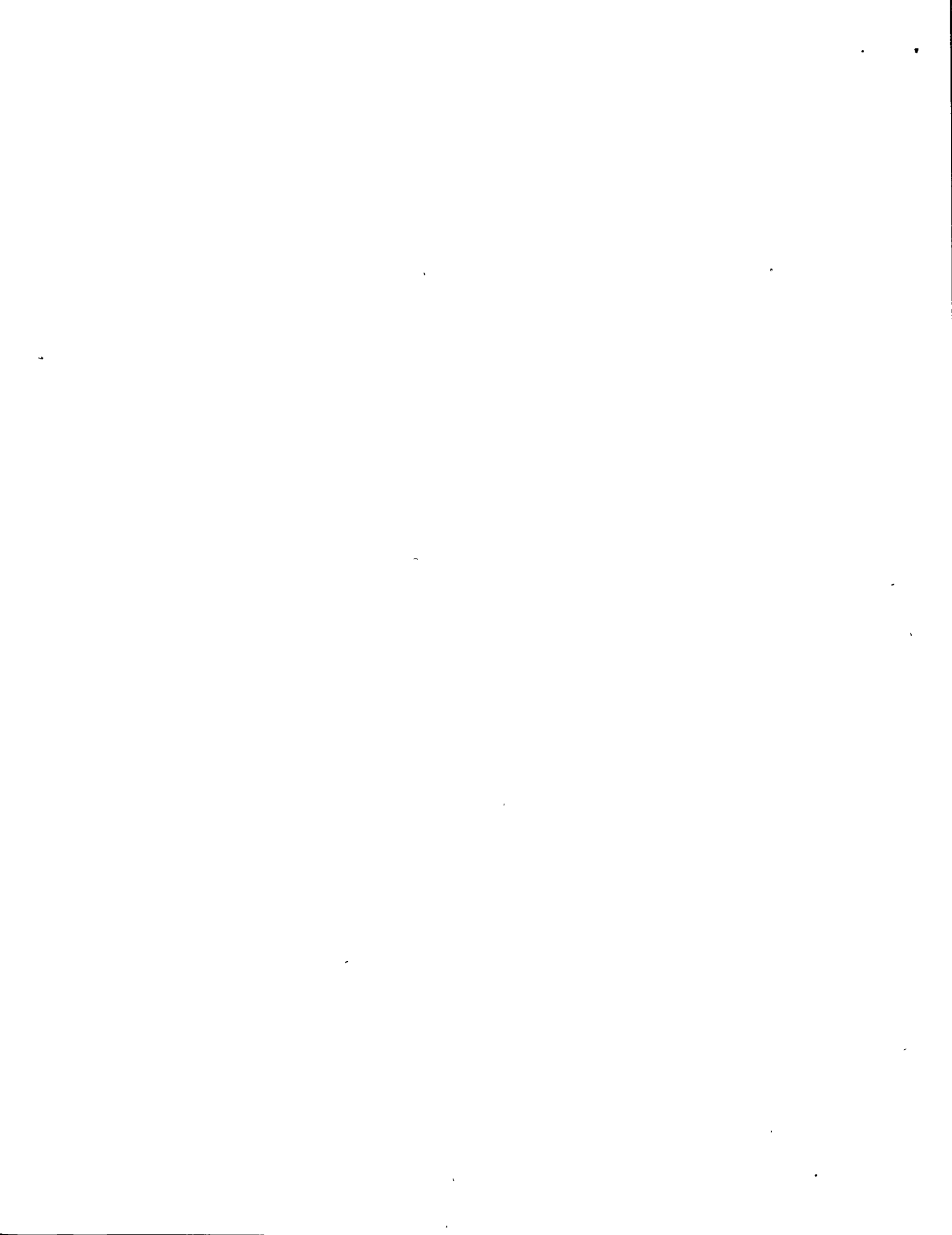
**HIDROLOGIA SUPERFICIAL**

**EVAPOTRANSPIRACION**

**DETERMINACION DE COEFICIENTES UNITARIOS DE RIEGO**

**Ing. José Antonio Fernández Esparza**

**Octubre, 1977**





## DETERMINACION DE COEFICIENTES UNITARIOS DE RIEGO

### 1. - Objetivos

La finalidad de la presente tarea es la de familiarizar al estudiante con la determinación de los coeficientes unitarios de riego y su aplicación en el cálculo de la capacidad de los canales, para el diseño eficiente y económico de un sistema de conducción y distribución de agua en un proyecto de riego.

### 2. - Análisis teórico

El rendimiento óptimo de los cultivos a desarrollar en una zona de riego depende fundamentalmente del hecho de proporcionar la lámina de agua adecuada en cada caso, su determinación deberá tomar en cuenta las características particulares de los cultivos, las propiedades físicas de los suelos, así como los factores climáticos de la región.

En el presente trabajo se empleará fundamentalmente el método empírico de Blaney y Criddle modificado. La interrelación de los factores que intervienen en adecuado aprovechamiento de los recursos disponibles, se refleja a través de los coeficientes unitarios de riego.

### 3. - Problema

Obtener los coeficientes unitarios de riego para una superficie total de aprovechamiento agrícola de 4 400 ha, localizada en una zona cuya latitud es de 30 ° Norte. De acuerdo al plan de cultivos y características que se proponen:



Plan de Cultivos

Cultivo	Superficie	Ciclo vegetativo	Coefficiente global	Profundidad radicular
Algodón	1000	Abril-Septiembre	0.65	0.50
Pastos	300	Enero-Diciembre	0.75	0.40
Sorgo I	600	Mayo-Septiembre	0.70	0.45
Sorgo 2	200	Diciembre-Abril	0.70	0.45
Maíz I	800	Junio-Septiembre	0.80	0.50
Maíz 2	1100	Diciembre-Marzo	0.80	0.50
Frijol	400	Diciembre-Febrero	0.65	0.40
Total	4400			

Temperatura media mensual ( °C)

E	F	M	A	M'	J	J'	A'	S	O	N	D
12.5	13.4	17.2	18.7	23.2	21.9	20.8	20.0	19.8	17.6	15.5	14.0

Precipitación ( mm)

AÑO	E	F	M	A	M'	J	J'	A'	S	O	N	D
1	12	8	3	0	4	73	142	171	229	84	20	17
2	0	0	18	0	17	127	170	250	129	80	72	14
3	12	0	0	0	0	46	195	94	220	46	32	8



### Datos varios

Precipitación efectiva aprovechable *	70 % en exceso de 5 mm
Densidad aparente	1.2
Capacidad de campo	0.25
Punto de marchitamiento permanente	0.13
Humedad inicial	Capacidad de campo
Eficiencia de conducción	85 %
Eficiencia parcelaria	70 %
Lapso de simulación	Mensual
Período de análisis	Tres años

#### 4. - Solución

La solución se desarrollará en tres etapas:

- a). - Cálculo de usos consuntivos
- b). - Determinación de láminas de riego
- c). - Obtención de coeficientes unitarios de riego

##### a) Cálculo de usos consuntivos

La determinación del uso consuntivo de cada cultivo propuesto, se hizo tomando en consideración su ciclo vegetativo, obteniendo mes a mes el valor de los coeficientes de desarrollo ( $K_c$ ) correspondientes, tomados de las respectivas curvas de desarrollo. Los valores así obtenidos se presentan en la Tabla No. 1.

\* Criterio simplista.



CULTIVO MES	MASTOS	ALGODON	SORGO 1	SORGO 2	MAIZ 1	MAIZ 2	FRIJOL
1	0.48			0.82		0.88	1.10
2	0.58			1.08		1.08	0.84
3	0.74			0.87		0.96	
4	0.86	0.24		0.65			
5	0.91	0.40	0.38				
6	0.93	0.83	0.82		0.51		
7	0.94	1.02	1.08		0.88		
8	0.92	0.88	0.87		1.08		
9	0.88	0.63	0.65		0.96		
10	0.80						
11	0.68						
12	0.56			0.38		0.51	0.67

TARLA No 1 COEFICIENTES DE DESARROLLO Kc DE ACUERDO AL  
CICLO VEGETATIVO DE CADA CULTIVO





Debido a que se emplearon los valores medios mensuales de la temperatura, sólo será necesario hacer la determinación de los usos consuntivos en el lapso de un año.

En la Tabla No. 2 se presenta la secuela seguida en la determinación de usos consuntivos.

En la segunda columna de dicha tabla, se consignan los valores de las temperaturas correspondientes a los meses de desarrollo de cada cultivo.

Los valores del porcentaje de horas-luz (p) se obtuvieron de las tablas publicadas en el Memorándum Técnico 231 de la S.R.H., considerando el valor de 30 ° de latitud Norte (tercera columna).

Los valores de f y  $K_t$ , consignados en las columnas 4 y 5 respectivamente, se calcularon de acuerdo a las expresiones:

$$f = (0.0457 t + 0.812) p$$

$$K_t = 0.03114 t + 0.2396$$

en donde t es la temperatura media mensual en °C.

El cálculo de los usos consuntivos mensuales (columna 9) se hizo afectando los valores de la columna 8 por la relación  $K/K'$  en la que K es el -- coeficiente global correspondiente al cultivo y  $K'$  se obtiene como la relación de la suma de los valores de la columna 8 y la suma de los valores -- de la columna 4.



Finalmente se obtiene el uso consuntivo total en el ciclo como la suma de los usos consuntivos mensuales correspondientes (suma de los valores de la columna 9).

Los resultados obtenidos (por cultivo) se muestran también en la Tabla No. 2.



Detalle del cálculo de la relación K/K'

Algodón:

$$K' = \frac{58.08}{96.82} = 0.60 \quad K \text{ global} = 0.65$$

$$\underline{K/K' = 1.08}$$

Pastos:

$$K' = \frac{110.2}{164.54} = 0.67 \quad K \text{ global} = 0.75$$

$$\underline{K/K' = 1.12}$$

Sorgo I

$$K = \frac{55.74}{82.29} = 0.68 \quad K \text{ global} = 0.70$$

$$\underline{K/K' = 1.03} \quad 0.74$$

Sorgo 2

$$\underline{K/K' = 1.30}$$

Maíz I

$$\underline{K/K' = 1.08} \quad K \text{ global} = 0.80$$

Maíz 2

$$\underline{K/K' = 1.33}$$

Frijol

$$\underline{K/K' = 1.16} \quad 0.66$$



MO	Temp. °C	Relative Humidity (%)	f (cm)	K <sub>t</sub>	-K <sub>t</sub>	K <sub>c</sub>	fK <sub>t</sub> K <sub>c</sub>	U.C. (cm)
①	②	③	P A S T U R E			④	⑤	⑥
FEB	12.5	7.30	10.10	0.629	6.35	0.48	3.05	3.42
FEB	13.4	7.03	10.01	0.657	6.58	0.58	3.82	4.28
MAR	17.2	8.38	13.39	0.775	10.38	0.74	7.68	8.60
APR	18.7	8.72	14.53	0.822	11.94	0.86	10.27	11.50
MAY	23.2	9.53	17.84	0.962	17.16	0.91	15.62	17.49
JUN	21.9	9.49	17.20	0.922	15.86	0.93	14.75	16.52
JUL	20.8	9.67	17.04	0.887	15.11	0.94	14.20	15.90
AUG	20.0	9.22	15.91	0.862	13.71	0.92	12.61	14.12
SEP	14.8	8.34	14.30	0.856	12.24	0.88	10.77	12.06
OCT	17.6	7.99	12.91	0.788	10.17	0.80	8.14	9.12
NOV	15.5	7.19	10.93	0.722	7.89	0.68	5.36	6.00
DIC	14.0	7.14	10.38	0.676	7.02	0.56	3.93	4.40
SUMAS			164.54				110.20	123.41

ALGODON

APR	18.7	8.72	14.53	0.822	11.94	0.24	2.87	3.10
MAY	23.2	9.53	17.84	0.962	17.16	0.40	6.86	7.41
JUN	21.9	9.49	17.20	0.922	15.86	0.83	13.16	14.21
JUL	20.8	9.67	17.04	0.887	15.11	1.02	15.42	16.65
AUG	20.0	9.22	15.91	0.862	13.71	0.88	12.06	13.02
SEP	14.8	8.34	14.30	0.856	12.24	0.63	7.71	8.33
SUMAS			96.82				58.08	62.72

SORGO I

MAY	23.2	9.53	17.84	0.962	17.16	0.38	6.52	6.72
JUN	21.9	9.49	17.20	0.922	15.86	0.82	13.01	13.40
JUL	20.8	9.67	17.04	0.887	15.11	1.08	16.32	16.81
AUG	20.0	9.22	15.91	0.862	13.71	0.87	11.93	12.29
SEP	14.8	8.34	14.30	0.856	12.24	0.65	7.96	8.20
SUMAS			82.29				55.74	57.42

SORGO II

DIC	14.0	7.14	10.38	0.676	7.02	0.38	2.67	3.47
FEB	12.5	7.30	10.10	0.629	6.35	0.82	5.21	6.77
FEB	13.4	7.03	10.01	0.657	6.58	1.08	7.11	9.24
MAR	17.2	8.38	13.39	0.775	10.38	0.87	9.03	11.74
APR	18.7	8.72	14.53	0.822	11.94	0.65	7.76	10.09
SUMAS			58.41				31.78	41.31

MAIZ I

JUN	21.9	9.49	17.20	0.922	15.86	0.51	8.09	8.74
JUL	20.8	9.67	17.04	0.887	15.11	0.88	13.30	14.36
AUG	20.0	9.22	15.91	0.862	13.71	1.08	14.81	15.99
SEP	14.8	8.34	14.30	0.856	12.24	0.96	11.75	12.69
SUMAS			64.45				47.95	51.78

MAIZ II

DIC	14.0	7.14	10.38	0.676	7.02	0.51	3.58	4.76
FEB	12.5	7.30	10.10	0.629	6.35	0.88	5.59	7.43
FEB	13.4	7.03	10.01	0.657	6.58	1.08	7.11	9.46
MAR	17.2	8.38	13.39	0.775	10.38	0.96	9.96	13.25
SUMAS			43.88				26.24	34.90

FRISO

DIC	14.0	7.14	10.38	0.676	7.02	0.67	4.70	5.45
FEB	12.5	7.30	10.10	0.629	6.35	1.10	6.99	8.11
FEB	13.4	7.03	10.01	0.657	6.58	0.84	5.53	6.41
SUMAS			30.49				17.22	19.97





b) CALCULO DE LAMINAS DE RIEGO, LAMINA REAL, CAPACIDAD DE CAMPO, PUNTO DE MARCHITAMIENTO PERMANENTE Y POLITICA DE HUMEDAD PARA CADA CULTIVO

1- PASTOS

$$\text{Lamina de riego} = \frac{2}{3} (C.C. - P.H.P.) D.A. \times P_{\text{ref. radicular}}$$

$$\therefore \text{Lamina de riego} = \frac{2}{3} (0.25 - 0.13) 1.2 \times 0.4 = 0.0384 \text{ m} = 38.4 \text{ mm}$$

$$\text{Lamina real a aplicar} = \frac{\text{Lamina de riego}}{\text{Efectividad \eta_{aplicacion}} \times \text{Efectividad \eta_{absorcion}}} = \frac{0.0384 \text{ m}}{(0.85)(0.7)} = 0.0645 \text{ m}$$

$$\therefore \text{Lamina real} = 64.5 \text{ mm}$$

$$C.I.(I) = C.C. \times D.A. \times h_r = 0.25 \times 1.2 \times 0.4 = 0.12 \text{ m} = 120 \text{ mm} = (C.C.)$$

$$P.H.P. = 0.13 \times 1.2 \times 0.4 = 0.0624 \text{ m} = 62.4 \text{ mm}$$

$$\text{Politica de humedad} = C.C. - \frac{2}{3} (C.C. - P.H.P.) = 120 - \frac{2}{3} (120 - 62.4)$$

$$P.H. = 81.6 \text{ mm}$$

2- ALGODON

$$\text{Lamina de riego} = \frac{2}{3} (0.25 - 0.13) 1.2 \times 0.5 = 48 \text{ mm}$$

$$\text{Lamina real} = \frac{48 \text{ mm}}{0.595} = 80.7 \text{ mm}$$

$$C.I.(I) = 0.25 \times 1.2 \times 0.5 = 150 \text{ mm} = (C.C.)$$



$$DMP = 0.13 \times 1.2 \times 0.5 = 0.078 \text{ m} = 78 \text{ mm}$$

$$P.H. = 150 - \frac{2}{3} (150 - 78) = 102 \text{ mm}$$

### 3- SORGO 1

$$\text{Lámina de riego} = \frac{2}{3} (0.25 - 0.13) 1.2 \times 0.45 = 43.2 \text{ mm}$$

$$\text{Lámina real} = \frac{43.2 \text{ mm}}{0.595} = 72.6 \text{ mm}$$

$$CI(1) = 0.25 \times 1.2 \times 0.45 = 135 \text{ mm} = CC$$

$$DMP = 0.13 \times 1.2 \times 0.45 = 70.2 \text{ mm}$$

$$PH = 135 - \frac{2}{3} (135 - 70.2) = 91.8 \text{ mm}$$

### 4- SORGO 2

$$\text{Lámina de riego} = \frac{2}{3} (0.25 - 0.13) 1.2 \times 0.45 = 43.2 \text{ mm}$$

$$\text{Lámina real} = \frac{43.2 \text{ mm}}{0.595} = 72.6 \text{ mm}$$

$$CI(1) = 0.25 \times 1.2 \times 0.45 = 135 \text{ mm} = CC$$

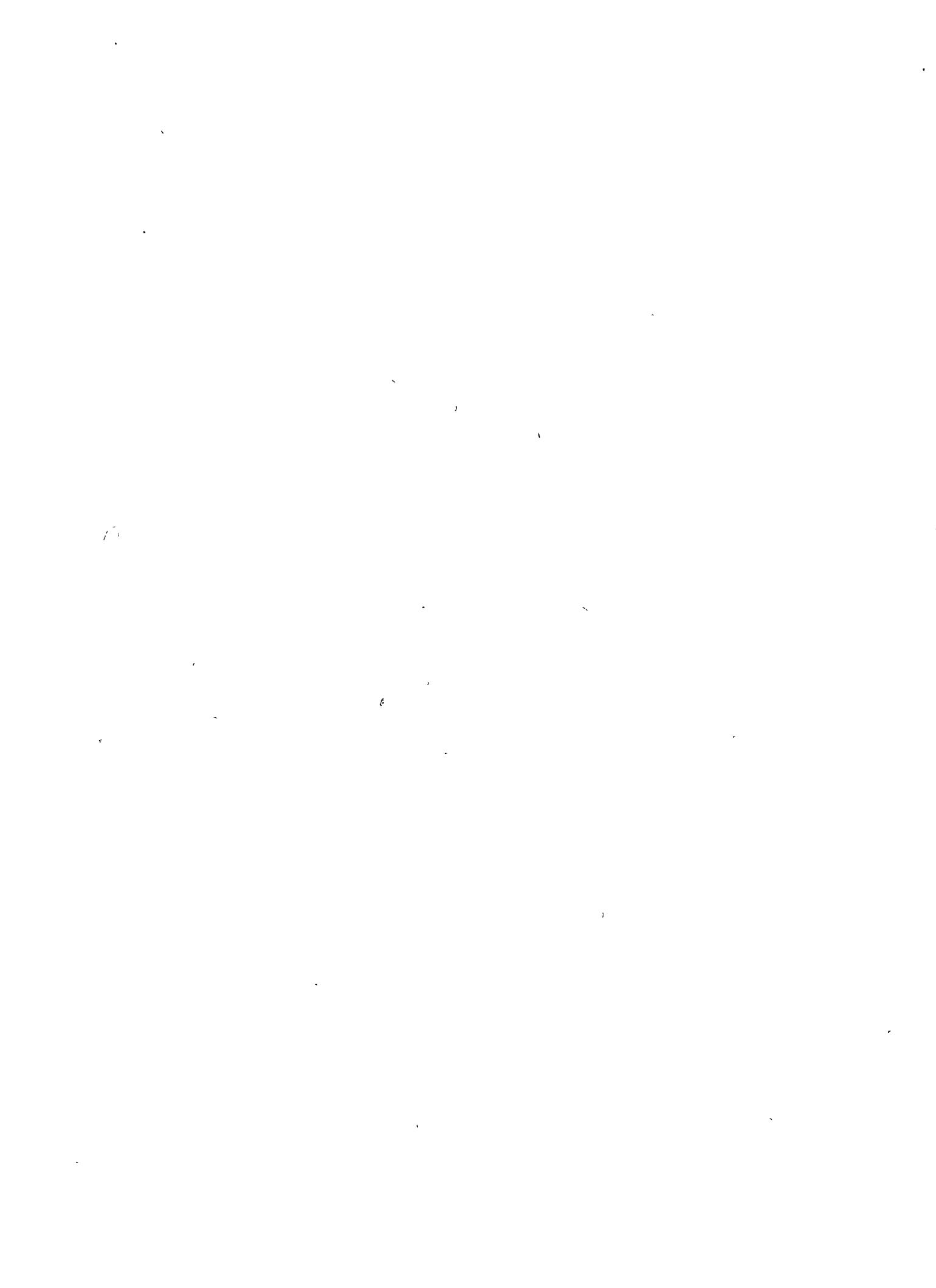
$$DMP = 0.13 \times 1.2 \times 0.45 = 70.2 \text{ mm}$$

$$PH = 135 - \frac{2}{3} (135 - 70.2) = 91.8 \text{ mm}$$

### 5- MAIZ 1

$$\text{Lámina de riego} = \frac{2}{3} (0.25 - 0.13) 1.2 \times 0.5 = 48 \text{ mm}$$

$$\text{Lámina real} = \frac{48 \text{ mm}}{0.595} = 80.7 \text{ mm}$$



$$CI(1) = 0.25 \times 1.2 \times 0.5 = 150 \text{ mm (cc)}$$

$$DMP = 0.13 \times 1.2 \times 0.5 = 78 \text{ mm}$$

$$PH = 150 - \frac{2}{3} (150 - 78) = 102 \text{ mm}$$

### 6- UAIU 2

$$\text{Lamina de arzo} = 48 \text{ mm}$$

$$\text{Lamina real} = 80.7 \text{ mm}$$

$$CI(1) = 150 \text{ mm} = \text{cc}$$

$$DMP = 78 \text{ mm}$$

$$PH = 102 \text{ mm}$$

### 7- FRISOU

$$\text{Lamina de arzo} = 38.7 \text{ mm}$$

$$\text{Lamina real} = 64.5 \text{ mm}$$

$$CI(1) = 120 \text{ mm} = \text{cc}$$

$$DMP = 62.4 \text{ mm}$$

$$PH = 81.6 \text{ mm}$$

2



### Precipitación aprovechable

• AÑO	E	F	M	A	M'	J	J'	A'	S	O	N	D
1	4.9	2.1	0	0	0.	47.6	95.9	116.2	156.8	55.3	10.5	8.4
2	0	0	9.1	0	8.4	85.4	115.5	171.5	86.8	52.5	46.9	6.3
3	4.9	0	0	0	0	28.7	133.0	62.3	154.0	28.7	18.9	2.1

#### c) Determinación de los coeficientes unitarios de riego

En base a los valores anterioremente calculados y mediante la aplicación del modelo de simulación conqum, se hizo la determinación de los coeficientes unitarios de riego como sigue:

Considerando como valor inicial de humedad la correspondiente a la capacidad de campo (columna 1), se resta de éste el uso consuntivo correspondiente y se agrega la lluvia aprovechable, obteniéndose los resultados presentados en la columna 4, que corresponden al estado de humedad al final del período. Si éste supera a la política de riego predeterminada, se pasa al siguiente mes, considerando este valor como inicial. En caso contrario habrá que dar riego suficiente hasta lograr la capacidad de campo. También podría ocurrir que la humedad al final del período fuera superior a la capacidad del campo, en este caso se considerará como valor inicial del siguiente período el correspondiente a la capacidad de campo ya que el exceso se pierde por gravedad.

Debido a la amplitud del período considerado en la simulación (un mes)-





MODELO DE SIMULACION CONQUIN PARA

PASTOS

SUPERFICIE = 300 Ha.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
MES	CI (I) (mm)	UC (I) (mm)	LL (I) (mm)	CF (I) (mm)	RIEGO (mm)	N: RIEGO	RIEGO REAL (mm)	VOLUMEN REAL (m <sup>3</sup> × 10 <sup>3</sup> )
E	120.0	34.2	4.9	90.7				
F	90.7	42.8	2.1	50.0	70.0	1.82	117.4	352.2
M	120.0	86.0	0	34.0	86.0	2.24	144.5	433.5
A	120.0	115.0	0	5.0	115.0	2.99	192.8	578.6
M	120.0	174.9	0	-54.9	174.9	4.55	293.5	880.5
J	120.0	165.2	47.6	2.2	117.6	3.66	197.4	592.2
J	120.0	159.0	95.9	56.9	63.1	1.64	105.8	317.4
A	120.0	141.2	116.2	95.0				
S	95.0	120.6	156.8	131.2				
O	120.0	91.2	55.3	84.1				
N	84.1	60.0	10.5	13.6	106.4	2.77	178.7	536.1
D	120.0	44.0	8.2	84.4				
E	84.4	34.2	0	50.2	69.8	2.01	129.4	388.8
F	120.0	42.8	0	77.2	42.8	1.11	76.6	214.8
M	120.0	86.0	9.1	43.1	76.9	2.00	129.0	387.0
A	120.0	115.0	0	5.0	115.0	2.99	192.8	578.6
M	120.0	174.9	8.4	53.5	66.5	1.73	111.6	334.8
J	120.0	165.2	85.4	40.2	79.8	2.08	134.2	402.6
J	120.0	159.0	115.5	76.5	43.5	1.13	72.9	218.7
A	120.0	141.2	171.5	150.3				
S	120.0	120.6	86.8	86.2				
O	86.2	91.2	52.5	47.5	72.5	1.89	121.9	365.7
N	120.0	60.0	46.9	106.9				
D	106.9	44.0	6.8	69.2	50.8	1.32	85.1	255.3
E	120.0	34.2	4.9	90.7				
F	90.7	42.8	0	47.9	72.1	1.88	121.3	363.9
M	120.0	86.0	0	34.0	86.0	2.24	144.5	433.5
A	120.0	115.0	0	5.0	115.0	2.99	192.8	578.6
M	120.0	174.9	0	-54.9	174.9	4.55	293.5	880.5
J	120.0	165.2	28.7	-16.5	136.5	3.55	228.9	686.7
J	120.0	159.0	133.0	94.0				
A	94.0	141.2	62.3	15.1	104.9	2.73	176.1	528.3
S	120.0	120.6	154.0	153.4				
O	120.0	91.2	28.7	57.5	62.5	1.63	105.1	315.3
N	120.0	60.0	18.9	78.9	41.1	1.07	69.0	207.0
D	120.0	44.0	2.1	78.1	41.9	1.09	68.0	204.0

\* max.

\* max.



MODELO DE SIMULACION CONQUIN

PARA ALGODON

SUPERFICIE = 1000 Ha

MES	(mm) CI (I)	(mm) UC (I)	(mm) LL (I)	(mm) CF (I)	(mm) RIEGO	N: RIEGOS	(mm) LAMINA RIEGO REAL	(m <sup>3</sup> × 10 <sup>3</sup> ) VOLUMEN REAL
A	150.0	31.0	0.0	119.0	105.1	2.19	176.7	1767
M	119.0	74.1	0	44.9	94.5	1.97	158.9	1589
J	150.0	142.1	47.6	55.5	70.6	1.47	118.6	1186
J	150.0	166.5	95.9	79.4				
A	150.0	130.2	116.2	136.0				
S	136.0	83.3	156.8	209.5				

A	150.0	31.0	0	119.0				
M	119.0	74.1	8.4	53.3	96.7	2.01	162.2	1622
J	150.0	142.1	85.4	93.3	56.7	1.18	95.2	952
J	150.0	166.5	115.5	99.0	51.0	1.06	85.5	855
A	150.0	130.2	171.5	191.3				
S	150.0	83.3	86.8	153.5				

A	150.0	31.0	0	119.0				
M	119.0	74.1	0	44.9	105.1	2.19	176.7	1767
J	150.0	142.1	28.7	36.6	113.4	2.36	190.4	1904
J	150.0	166.5	133.0	116.5				
A	116.5	130.2	62.3	48.6	101.4	2.11	170.3	1703
S	150.0	83.3	154.0	220.7				

max



MODELO DE SIMULACION CONQUINPARA SORGO 1

SUPERFICIE = 600 Ha.

MES	(mm) CI(I)	(mm) UC(I)	(mm) LL(I)	(mm) CF(I)	(mm) RIESGO	Nº RIEGOS	(mm) LAPINA RIEGO REAL	(m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> ) VOLUMEN REAL
M	135	67.2	0	67.8	67.2	1.55	112.5	675.0
J	135	134	47.6	48.6	86.4	2.00	145.2	871.2
J	135	168.1	95.9	62.8	72.2	1.67	121.2	727.2
A	135	122.9	116.2	128.3				
S	128.3	82	156.8	203.1				

M	135	67.2	8.4	76.2	58.8	1.36	98.7	592.2
J	135	134	85.4	86.4	48.6	1.12	81.3	487.8
J	135	168.1	115.5	82.4	52.6	1.22	88.6	531.6
A	135	122.9	171.5	183.6				
S	135	82	86.8	139.8				

M	135	67.2	0	67.8	67.2	1.55	112.5	675.0	* max
J	135	134	28.7	29.7	105.3	2.44	177.1	1062.6	
J	135	168.1	133	99.9					
A	99.9	122.9	62.3	39.9	95.1	2.22	161.2	967.2	
S	135	82	154	207.0					



MODELO DE SIMULACION CONQUIN

PARA SORGO 2

SUPERFICIE = 200 Ha

MES	(mm) CI(I)	(mm) UC(I)	(mm) LL(I)	(mm) CF(I)	(mm) RIEGO	Nº RIEGOS	(mm) LAPANTA RIEGO REGA	(m³ x 10³) VOLUMEN REGA
D	135	34.7	8.4	108.7				
E	108.7	67.7	4.9	45.9	89.1	2.06	149.5	299.0
F	135	92.4	2.1	44.7	90.3	2.09	151.7	303.4
M	135	117.4	0	17.6	117.4	2.72	197.5	395.0
A	135	100.9	0	34.1	100.9	2.33	169.2	338.4

↓ max

D	135	34.7	6.3	106.6				
E	106.6	67.7	0	38.9	96.1	2.22	161.2	322.4
F	135	92.4	0	42.6	92.4	2.14	155.4	310.8
M	135	117.4	9.1	26.7	108.3	2.51	182.2	364.4
A	135	100.9	0	34.1	100.9	2.33	169.2	338.4

D	135	34.7	2.1	102.4				
E	102.4	67.7	4.9	39.6	95.4	2.21	160.4	320.8
F	135	92.4	0	42.6	92.4	2.14	155.4	310.8
M	135	117.4	0	17.6	117.4	2.72	197.5	395.0
A	135	100.9	0	34.1	100.9	2.33	169.2	338.0

↓ max





MODELO DE SIMULACION CONQUIN

DADA MAIZ 1

SUPERFICIE = 800 Ha

MES	(mm) QI(I)	(mm) UC(I)	(mm) LL(I)	(mm) CF(I)	(mm) RIEGO	Nº RIEGOS	(mm) LANTINA RIEGO REAL	(m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> ) VOLUMEN REAL
J	150	87.4	47.6	110.2				
J	110.2	143.6	95.9	62.5	87.5	1.82	146.9	1175.2
A	150	159.9	116.2	106.3				
S	106.3	126.9	156.8	136.2				
J	150	87.6	85.6	148				
J	148	143.6	115.5	119.9				
A	119.9	159.9	171.5	131.5				
S	131.5	126.9	86.8	91.4	58.6	1.22	98.4	787.2
J	150	87.4	28.7	91.3	58.7	1.22	98.4	787.2
J	150	143.6	133.0	139.4				
A	139.4	159.9	62.3	41.8	108.2	2.25	181.6	1452.8
S	150	126.9	154.0	177.1				

4 mdc



MODELO DE SIMULACION CONQUIN

PARA MAIZ 2

SUPERFICIE = 1100 Ha.

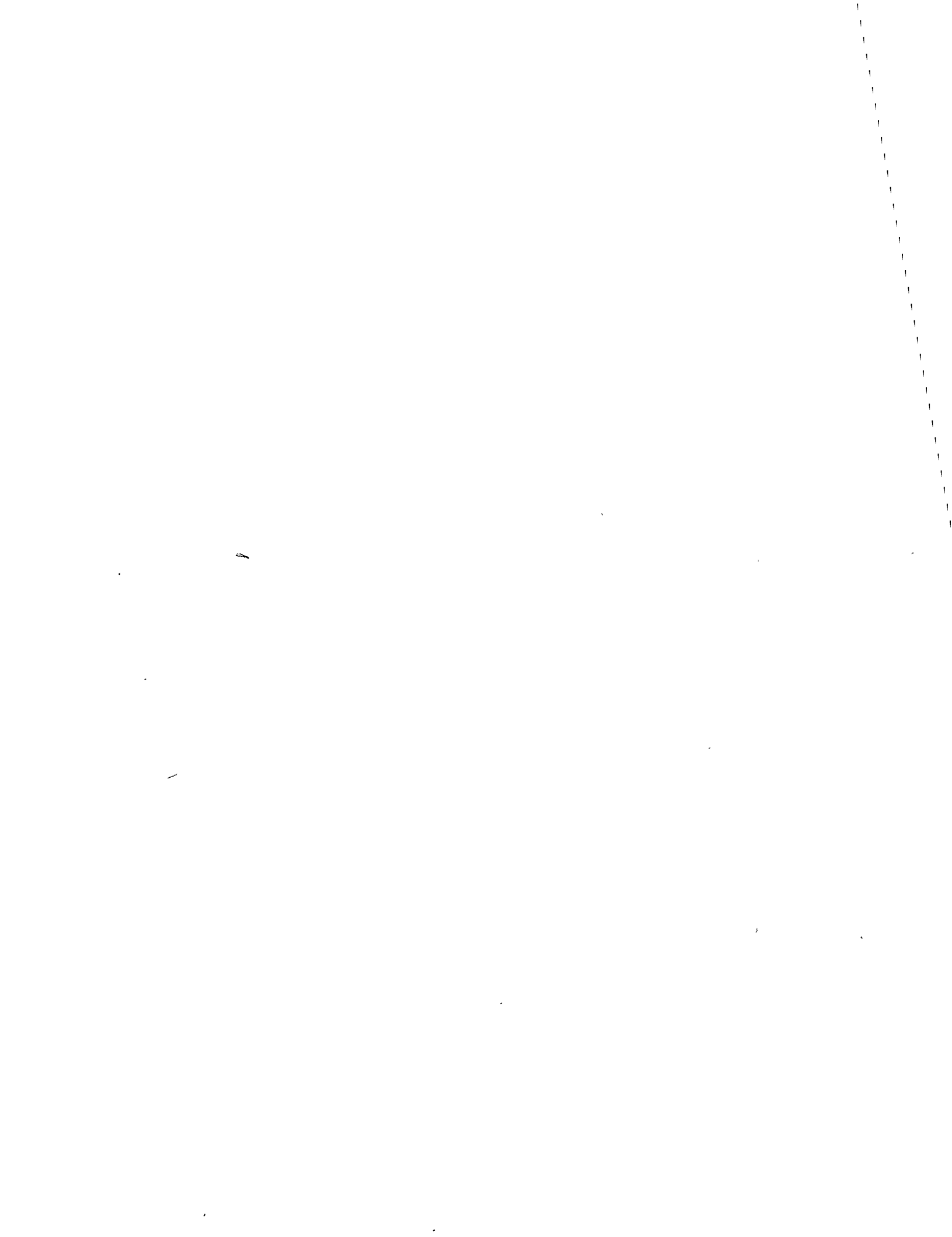
MES	(mm) CI(I)	(mm) UC(I)	(mm) LL(I)	(mm) CF(I)	(mm) RIESGO	N: RIESGO	(mm) LANTIA RIESGO REAL	(m <sup>3</sup> x 10 <sup>3</sup> ) VOLUMEN REAL
D	150	47.6	8.4	110.8				
E	110.8	74.3	4.9	41.4	108.6	2.26	182.4	2006.4
F	150	94.6	2.1	57.5	92.5	1.93	155.7	1712.7
M	150	132.5	0	17.5	132.5	2.76	222.7	2449.7

\* max

D	150	47.6	6.3	108.7				
E	108.7	74.3	0	34.4	115.6	2.41	194.5	2139.5
F	150	94.6	0	55.4	94.6	1.97	159	1749
M	150	132.5	9.1	26.6	123.4	2.57	207.4	2281.4

D	150	47.6	2.1	104.5				
E	104.5	74.3	4.9	35.1	114.9	2.39	192.9	2121.9
F	150	94.6	0	55.4	94.6	1.97	159	1749
M	150	132.5	0	17.5	132.5	2.76	222.7	2449.7

\* max



MODELO DE SIMULACION CONQUINDADA FRINOLUSUPERFICIE = 400 Ha

MES	(mm) CI (I)	(mm) UC (I)	(mm) LL (I)	(mm) CF (I)	(mm) RIEGO	Nº RIGOS	(mm) LAMINA RIEGO REAL	( $10^3 \times 10^3$ ) VOLUMEN REAL
D	120	54.5	8.4	73.9	46.1	1.20	77.4	309.6
E	120	81.1	4.9	43.8	76.2	1.98	127.7	510.8
F	120	64.1	2.1	58.0	62.0	1.61	103.8	415.2

D	120	54.5	6.3	71.8	48.2	1.26	81.3	325.2	*max
E	120	81.1	0	38.9	81.1	2.11	136.1	544.4	
F	120	64.1	0	55.9	64.1	1.67	107.7	430.8	

D	120	54.5	2.1	67.6	52.4	1.36	87.7	350.8
E	120	81.1	4.9	43.8	76.2	1.98	127.7	510.8
F	120	64.1	0	55.9	64.1	1.67	107.7	430.8



11-11

CALCULO DE LOS GASTOS UNITARIOS MAXIMOS DE CADA  
CULTIVO (\*)

1- PASTOS

$$q_p = \frac{V_p^{(*)} (m^3 \times 10^3) (1000 \text{ Hts}/m^3)}{\text{Superficie (tiempo = seg. por mes)}} = \frac{880.5 \times 10^3 \text{ m}^3 (10^3 \text{ Hts}/m^3)}{300 \text{ Ha} (2592 \times 10^3 \text{ s})}$$
$$q_p = \underline{\underline{1.132 \text{ Hts/s/Ha}}}$$

2- ALGODON       $q_a = \frac{1904 \times 10^3 \text{ Hts}}{1000 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{\underline{0.764 \text{ Hts/s/Ha}}}$

3- JORGO 1       $q_{s1} = \frac{1062.6 \times 10^3 \text{ Hts}}{600 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{\underline{0.683 \text{ Hts/s/Ha}}}$

4- JORGO 2       $q_{s2} = \frac{395 \times 10^3 \text{ Hts}}{200 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{\underline{0.762 \text{ Hts/s/Ha}}}$

5- MAIZ 1       $q_{m1} = \frac{1452.8 \times 10^3 \text{ Hts}}{800 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{\underline{0.701 \text{ Hts/s/Ha}}}$

6- MAIZ 2       $q_{m2} = \frac{2449.7 \times 10^3 \text{ Hts}}{1100 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{\underline{0.859 \text{ Hts/s/Ha}}}$

7- FRONON       $q_f = \frac{544.4 \times 10^3 \text{ Hts}}{400 \text{ Ha} \times 2592 \text{ s}} = \underline{\underline{0.525 \text{ Hts/s/Ha}}}$

- (1) Datos obtenidos de los modelos de simulación conguin para cada cultivo  
(\*) Volumen req. máximo para cada cultivo.





sería necesario recetar riegos fraccionados (columna 6) para que el ejemplo resulte ilustrativo.

El número de riegos (columna 7) se obtuvo dividiendo el complemento necesario para lograr la capacidad de campo entre el valor de la lámina de riego previamente obtenida (columna 7).

La columna 8 se calcula multiplicando los valores de columna 7 por la lámina real de riego.

Finalmente la columna 9 muestra los valores de la lámina de riego real multiplicados por la superficie correspondiente, expresando los resultados en  $m^3 \times 10^3$ .

Una vez que se ha realizado la simulación para cada cultivo mes a mes durante los 3 años, se eligen los valores máximos del gasto unitario y se ordenan en orden decreciente, como se muestra en la Tabla de resultados finales y se procede a elaborar la representación gráfica de ellos.

#### 5. - Resultados

El resumen de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla de Resultados Finales y se ilustra en la gráfica de coeficientes unitarios de riego.

#### 6. - Conclusiones y recomendaciones

El empleo de la gráfica de coeficientes unitarios de riego permitirá obtener la capacidad de diseño de los canales del sistema de conducción y distribución.

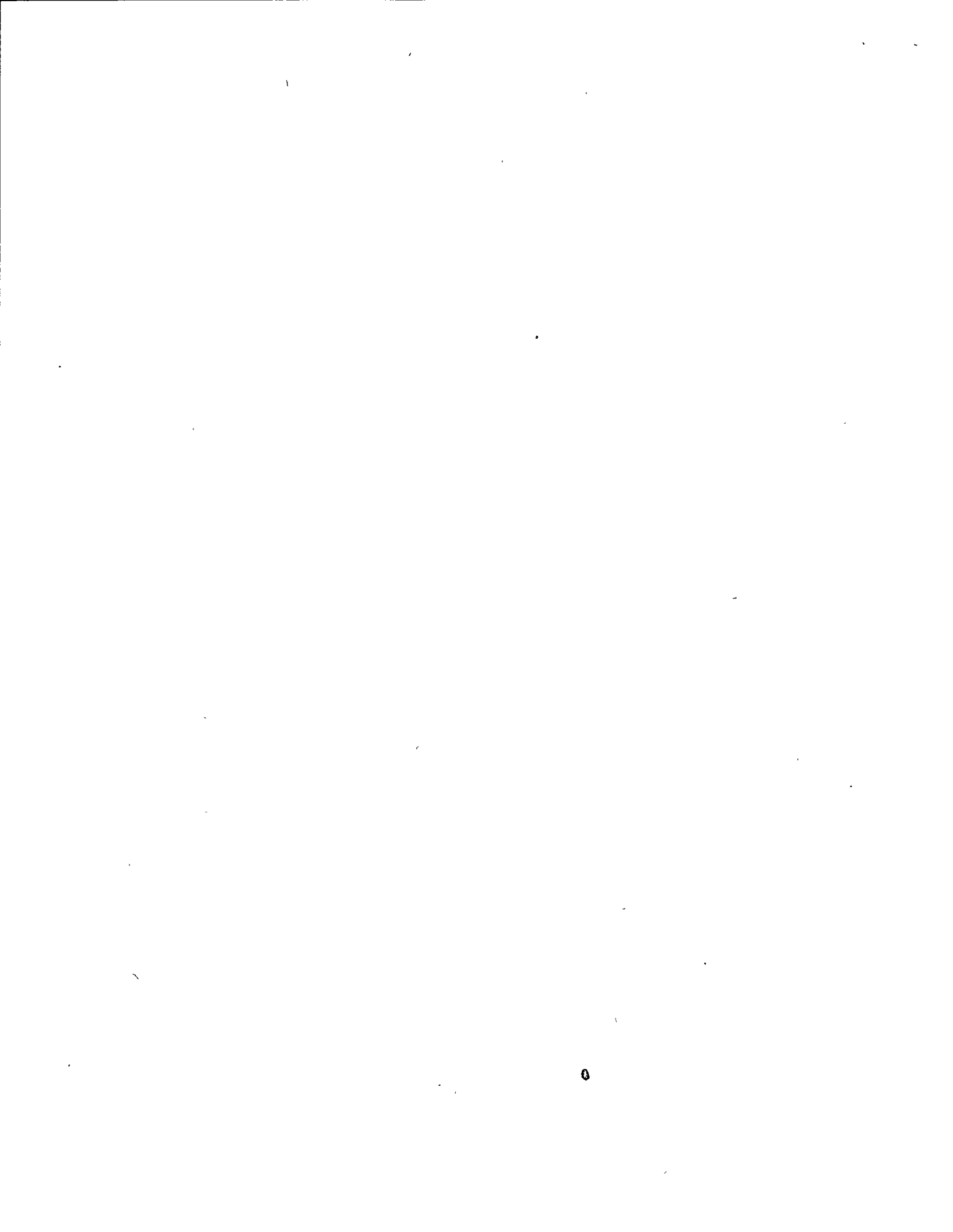


TABLA DE RESULTADOSFINALES

lts/s/Ha	Ha	Ha	$m^3 \times 10^3$	$m^3 \times 10^3$	lts/s/Ha	
$q_i$	$A_i$	$A_i$ acum	$V_i$	$V_i$ acum.	$q_{if} = \frac{V_{i\text{acum}} \times 10^3}{A_{i\text{acum}} \times \Delta t}$	Cultivo
1.132	300	300	880.5	880.5	1.132	Pasto
0.859	1100	1400	2449.7	3330.2	0.918	maíz 2
0.764	1000	2400	1904.0	5234.2	0.841	Algodón
0.762	200	2600	395.0	5629.2	0.835	Soya 2
0.701	800	3400	1452.8	7082.0	0.804	maíz 1
0.683	600	4000	1062.6	8144.6	0.785	Soya 1
0.525	400	4400	544.4	8689.0	0.762	Frijol



Es notorio el efecto del tamaño de la superficie dominada en el valor del coeficiente unitario de riego, cuyo valor aumenta en cuanto el área disminuye.

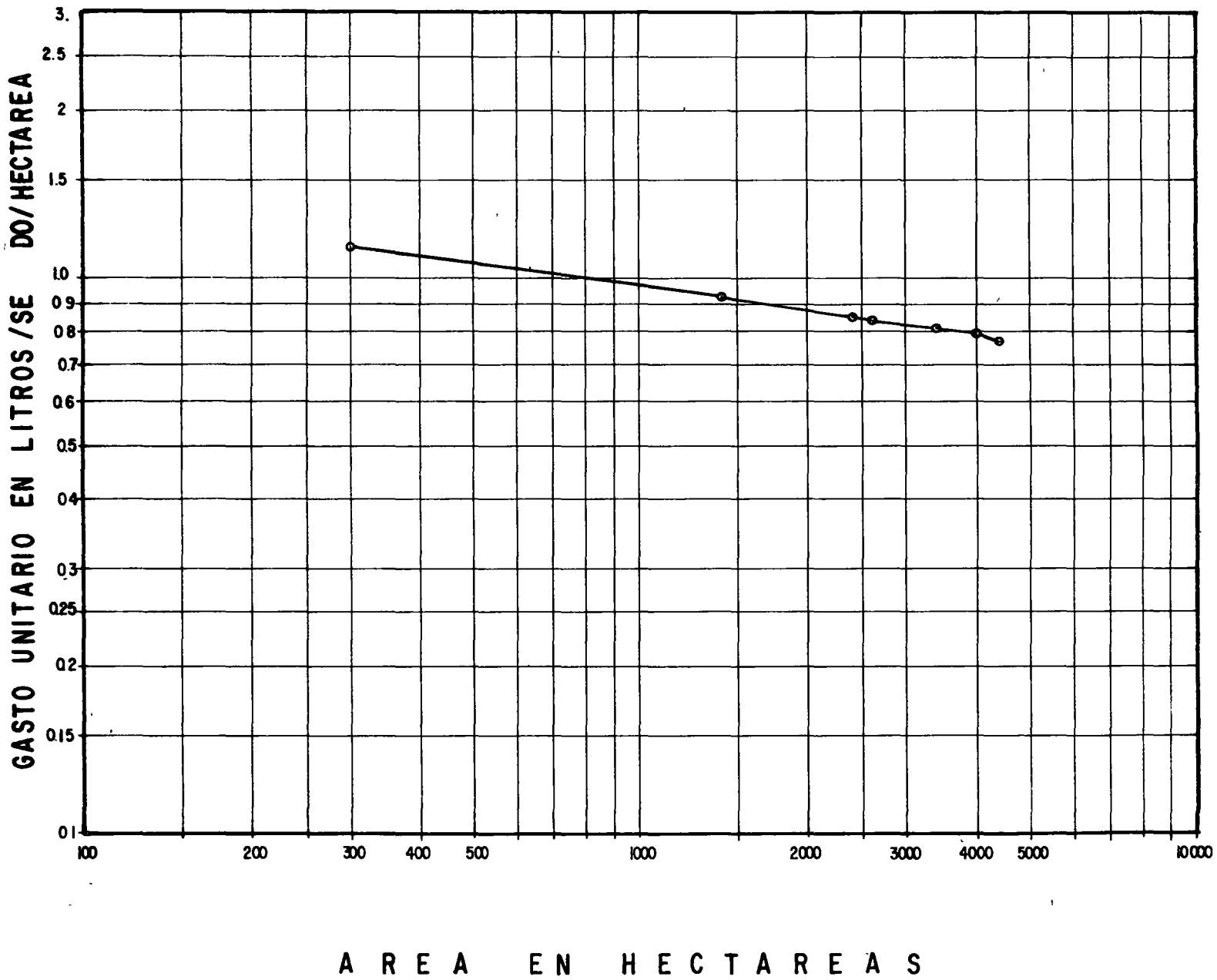
El período considerado en el análisis (un mes), resulta ser muy amplio, en casos reales podría no ser representativo de las condiciones que se deben considerar. Se recomienda efectuarlo a nivel decenal como mínimo.

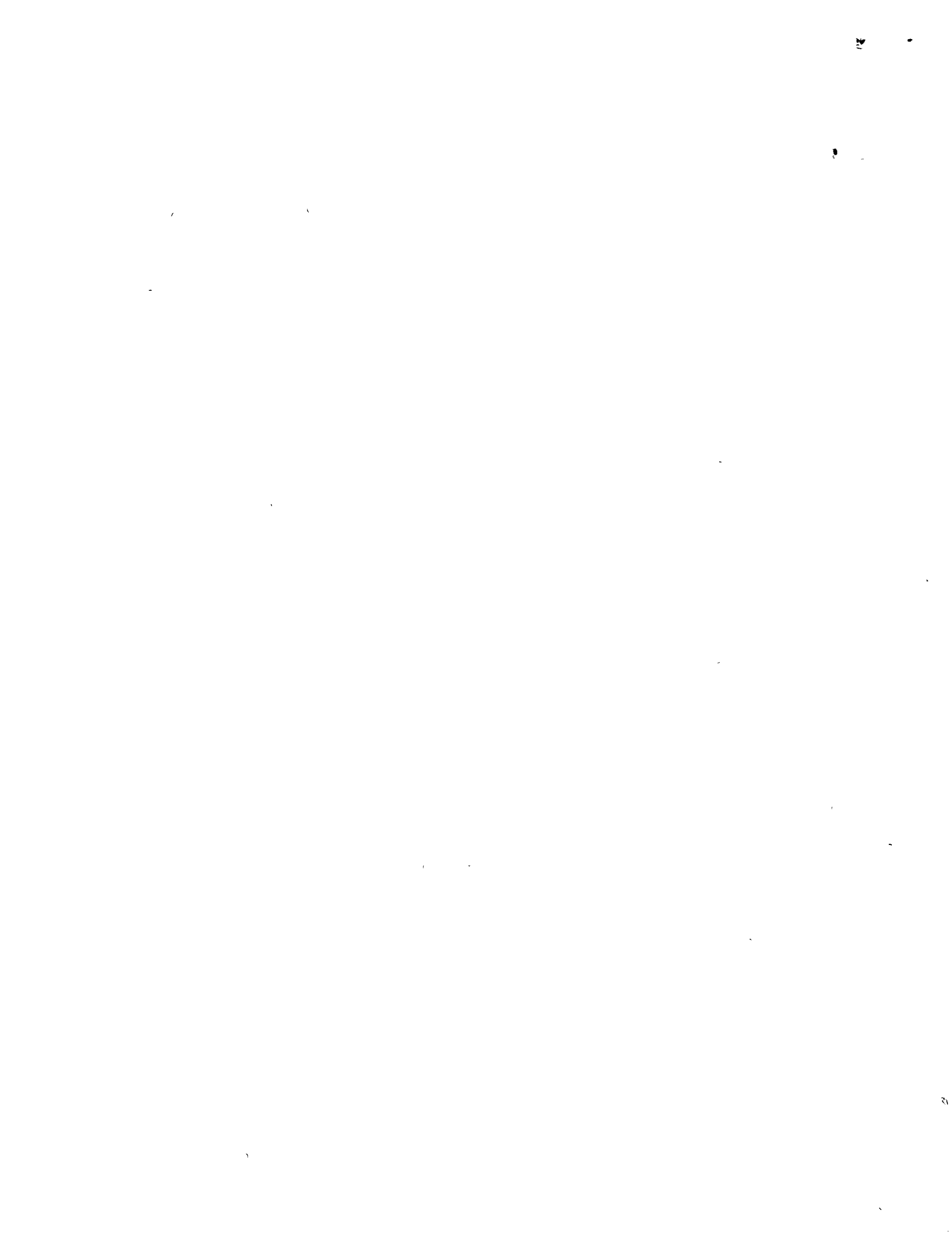
El procedimiento empleado resulta ser muy laborioso (no obstante, las simplificaciones propuestas), sin embargo, es simple y muy lógico.

Se recomienda el empleo de un programa de computadora para su aplicación.



# COEFICIENTES UNITARIOS DE RIEGO







**HIDROLOGIA SUPERFICIAL**

**EVAPOTRANSPIRACION**

**El Uso Consuntivo**

**ING. JOSE ANTONIO FERNANDEZ ESPARZA**

**OCTUBRE 1977.**



### .3 EL USO CONSUNTIVO

#### .3.1 Consideraciones generales

Una gran parte del agua aplicada a las tierras de regadío es consumida por la evaporación y la transpiración. Como en la práctica es difícil separar estos dos procesos, se les considera como uno solo y se denomina Evapotranspiración o bien, Uso Consuntivo.

Según la definición dada en el Apartado .1 de esta Norma, el uso consuntivo incluye todas las pérdidas por evaporación y transpiración de las plantas agrícolas y de la vegetación natural que medra en las parcelas, más la evaporación propia del suelo. Es por tanto, el mejor índice a emplear para determinar las Necesidades de Riego (NR).

La medición del uso consuntivo para cada una de las condiciones físicas y climáticas que pueden ocurrir en una zona de riego dada puede que, además de ser costosa, requiera de mucho tiempo para llevarla al cabo. En general, los resultados de las investigaciones, diferentes mediciones del uso consuntivo y los datos meteorológicos observados en una determinada zona, constituyen la información de base para estimar las necesidades de riego en aquellas otras zonas donde únicamente se dispone de datos climatológicos.

#### .3.2 Los factores que intervienen

En el Esquema de la Lámina .1.2.3-1 se han indicado algunos de los factores que tienen influencia en la cantidad de agua que consume el complejo suelo-planta. En un lugar determinado, algunos son constantes en sus efectos y varia-



bles otros, dentro del ciclo agrícola y de un año a otro.

Algunos de los factores que influyen en el uso consuntivo tienen que ver con los aspectos humanos y muchos otros - con el medio ambiente, tales como los climáticos, el abastecimiento del agua a las plantas, el tipo de suelo y las características topográficas del terreno. En seguida se describen algunos de los más destacados

a) Temperatura

De los factores climáticos posiblemente la temperatura sea la que mayor influencia tiene en el uso consuntivo, por ser la que principalmente determina en un lugar dado el tipo de cultivos más adecuados para lograr una producción remunerativa, y la rapidez con que esos cultivos consumen el agua.

Por otra parte, según la distribución que la temperatura tenga en el período en que la planta se desarrolla, el uso consuntivo puede variar entre límites muy amplios.

b) Humedad

En general, cuando la humedad tiene valores bajos, tanto la evaporación como la transpiración aumentan, y disminuyen cuando la humedad es alta.

c) Viento

Cuando, durante el período de desarrollo de las plantas, se presentan vientos calientes y secos, de ordinario afectan la cantidad de agua que aquéllas consumen; en términos generales puede decirse que, cuando hay movimiento de las masas de aire, la evaporación del agua por la superficie foliar de las plantas se efectúa con mayor rapidez.

d) Período de desarrollo de las plantas

En las cantidades de agua que consumen las plantas tiene mucha influencia la etapa y el período total de desarrollo de las mismas; estas dos características están íntimamente relacionadas con la temperatura del lugar. En general, tanto el período de desarrollo como el ciclo agrícola anual tienen mucha importancia en la determinación de las necesidades de agua que requiere el uso consuntivo de las plantas.

e) La Latitud del lugar

Aunque la Latitud apenas si puede considerarse como un factor climático, tiene mucha influencia en el valor



valor que pueda alcanzar el uso consuntivo de los diversos tipos de plantas. Durante el verano, el número de horas de luz solar es mayor en las latitudes al Norte del Ecuador que en éste; además, la transpiración aumenta cuando los días son de mayor duración. Lo anterior equivale a un aumento en el período de desarrollo de las plantas.

f) El abastecimiento del agua

En las regiones áridas y semiáridas, donde la irrigación es absolutamente necesaria, la cantidad de agua disponible y su distribución por riegos en general afectan al valor del uso consuntivo. Por ejemplo, si la superficie del suelo es humedecida con frecuencia y el valor de la evaporación es alto, entonces, aumentará la cuantía del uso consuntivo.

g) La calidad del agua

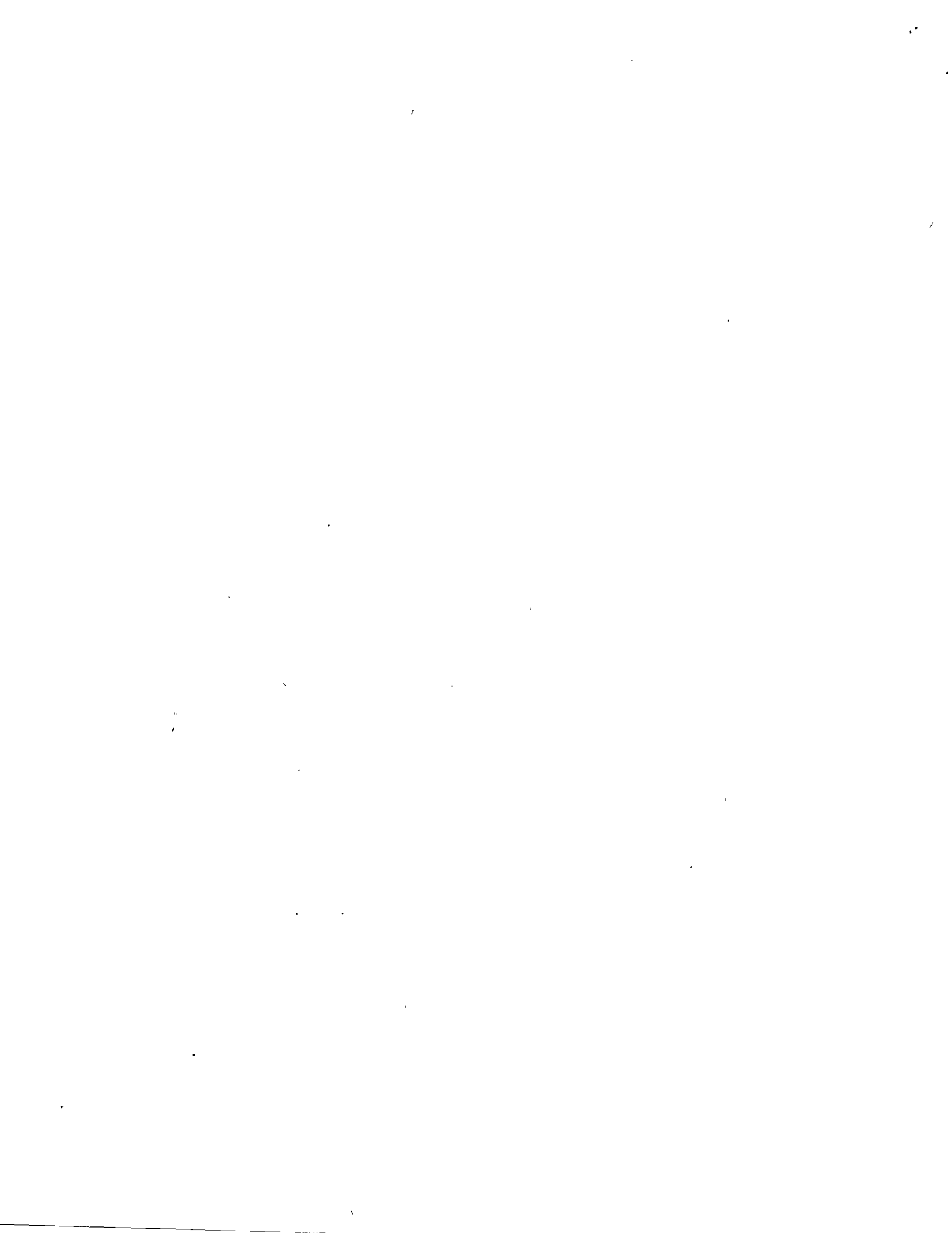
En algunos lugares, la calidad del agua influye también en las necesidades de agua para el riego. El agua que se necesita para el lavado de las sales nocivas en el suelo se considera como una cantidad adicional a la que requiere el complejo suelo-planta para satisfacer su uso consuntivo, como ya se dijo en el Apartado 2 de esta Norma, cuando se trató sobre las necesidades para la Irrigación ( $N_{ir}$ ). En términos muy generales, para el control de la salinidad en el suelo se necesita alrededor de un 20 por ciento más del agua necesitada por el uso consuntivo.

h) Fertilidad del suelo

Cuando se mejora la fertilidad del suelo con abonos químicos u otros medios, en general aumentan los rendimientos de las cosechas por hectárea y por consiguiente, hay un incremento en el consumo de agua; aunque ese aumento, por lo pequeño, rara vez se toma en cuenta en el cálculo del uso consuntivo.

i) Plagas y enfermedades de las plantas

En aquellos lugares donde las plagas y las enfermedades afectan seriamente el crecimiento natural de las plantas, de ordinario disminuye la cantidad de agua consumida por transpiración. En los años en que las pérdidas de las cosechas son muy fuertes, por los daños que las plagas ocasionan a los cultivos, el uso consuntivo se reduce notoriamente.





### .3.3 Los métodos más empleados

#### .3.3.1 Generalidades

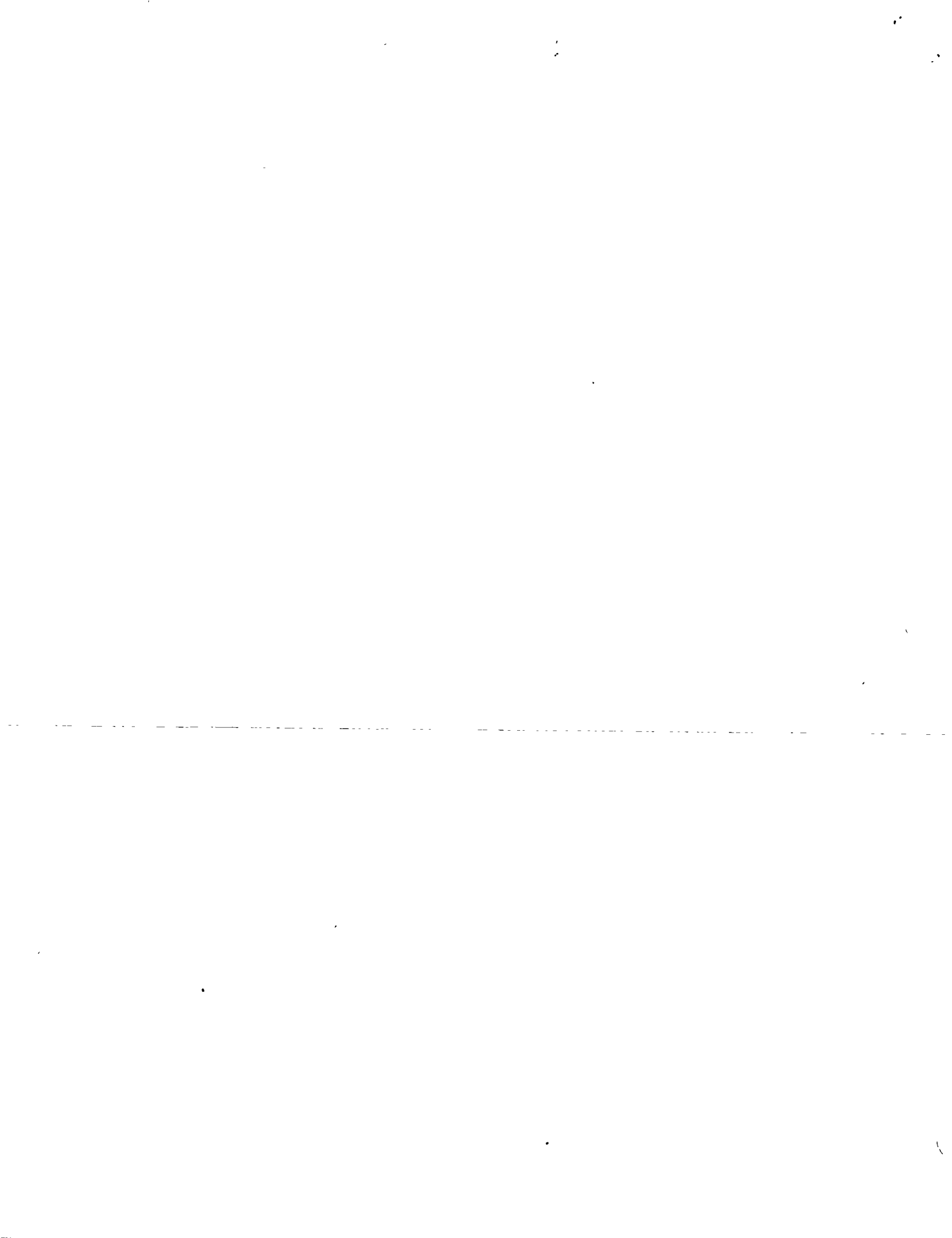
Para determinar la cantidad de agua que consume el complejo suelo-planta se han empleado varios métodos; debiendo se tener presente que tiene influencia en el método elegido, el agua utilizada por las plantas agrícolas, por lo que a su procedencia se refiere: precipitación solo o ésta y el riego artificial con agua de procedencia superficial o subterránea.

Puede decirse que es posible calcular los valores del uso consuntivo para diferentes tipos de cultivos, utilizando los resultados obtenidos en las determinaciones sobre la humedad del suelo o con los valores de la evaporación medida en lisímetros o tanques, mediante los datos obtenidos en los riegos y los climatológicos, o bien de alguna otra manera.

Para los cultivos en proceso de riego, se pueden usar los datos sobre láminas de riego aplicadas, número de riegos en el ciclo agrícola anual, eficiencia de riego, capacidad de campo de los suelos y duración del período de desarrollo, para hacer la estimación de los valores del uso consuntivo. Y esos valores observados en cierta región o zona, pueden utilizarse para hacer la estimación del U.C. en otras que tengan condiciones climáticas comparables, cuando se disponga de datos registrados sobre temperatura y precipitación en ambas localidades.

Por muchos años, los ingenieros en irrigación han determinado el uso consuntivo por medio de datos climatológicos. Algunos investigadores han ideado ciertos métodos para predecir la evapotranspiración por medio de datos climatológicos; entre otros, C. W. Thornthwaite en 1948 elaboró un procedimiento para determinar la evapotranspiración o uso consuntivo a partir de datos atmosféricos. Por otra parte, investigadores como J. L. Penman y otros, aplicando el principio de la conservación de la energía, correlacionaron los valores observados de la evapotranspiración en tanques con observaciones meteorológicas; de esa manera obtuvieron un índice para estimar la evapotranspiración.

En los E.U.A., los estudios llevados al cabo en 1942 por H. F. Blaney y otros, indicaron que los datos mensuales durante el período de desarrollo de las plantas, sobre evaporación, evapotranspiración, temperatura media y porcentaje de horas de insolación pueden utilizarse para obtener cuantitativamente las necesidades de agua del uso consuntivo. -



Para ello, elaboraron ciertas fórmulas para calcular el uso consuntivo, a partir de los datos registrados sobre temperatura, humedad ambiente y horas de insolación diaria.

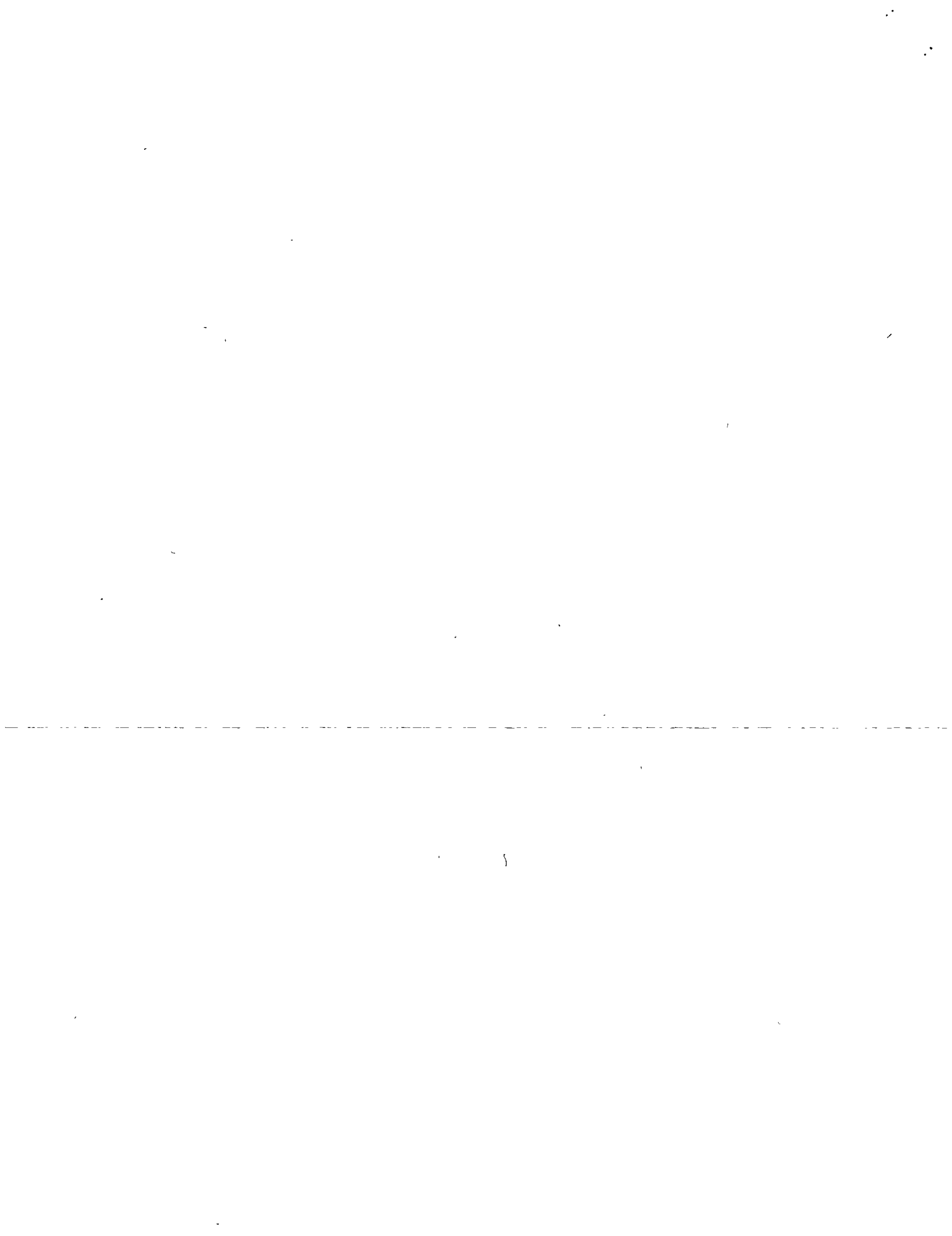
Por último, en 1945, H. F. Blaney y W. D. Criddle simplificaron una de las fórmulas antes mencionadas, eliminando el factor humedad ambiente y propusieron una nueva fórmula para determinar el uso consuntivo. Véanse 11/ y 15/.

A la hora de considerar los posibles métodos disponibles para calcular el uso consuntivo, es importante tener en cuenta que los diferentes factores indicados en términos generales en la Sección .3.2 de esta Norma y que intervienen en la determinación del uso consuntivo, no actúan de un modo independiente, pues unos influyen sobre los otros y todos determinan en conjunto la cantidad de agua que necesita el complejo planta-suelo para que las plantas logren su desarrollo y rindan una cosecha remunerativa. Como todos estos factores varían en forma notoria de uno a otro lugar, el valor del uso consuntivo también variará, aun tratándose de una misma clase o variedad de planta cultivada.

Por lo explicado antes resulta bastante difícil y a veces imposible, considerar a todas y cada una de las condiciones que en un futuro sistema de riego pueden presentarse. Las determinaciones prácticas del uso consuntivo, aun cuando éste pueda medirse en forma directa en los sistemas ya en operación, sólo dan valores medios; pero, no obstante, sirven de una muy buena orientación para valorar la cantidad de agua necesaria para el regadío.

Ya se ha dicho anteriormente que las determinaciones directas del uso consuntivo, ya sea por estudios de campo o vía experimental, generalmente son difíciles, costosas y requieren de cierto tiempo para llevarlas al cabo; por esto, también se han ideado varios métodos indirectos que permiten obtener el uso consuntivo en función de ciertos datos climatológicos registrados.

Los dos métodos indirectos que emplean fórmulas empíricas para la determinación del uso consuntivo en función de datos atmosféricos y que se emplean con más frecuencia, son el de Thornthwaite y el de Blaney y Criddle que en esta Norma se describirán con mayor detalle. Investigadores tales como C. R. Hedke, Lowry y Johnson, Penman y otros, han obtenido también fórmulas empíricas más o menos elaboradas para determinar el uso consuntivo; para mayores detalles sobre estos métodos se recomienda consultar la literatura especializada disponible, entre otras las siguientes: 1/, 2/, 3/, 4/, 5/, 6/, 7/, 8/ y 15/.



### 3.3.2 El Método de Thornthwaite

Este método se basa en el hecho que, según Thornthwaite, el desarrollo vegetativo de un cultivo cualquiera, que tiene lugar en un mes dado, no es función únicamente de la temperatura, aunque sea ésta uno de los factores climáticos más preponderantes, sino que también interviene la etapa de desarrollo en que se encuentre la o las plantas en el mes considerado. Por esa razón, un cultivo puede tener necesidades muy diferentes en dos meses distintos con igual temperatura media, y en un mismo mes, dos cultivos diferentes, por el simple hecho de no encontrarse cada uno en la misma etapa de desarrollo. Cuando se consideran las necesidades de agua para satisfacer el uso consuntivo en una zona dada, en la que haya cierta diversidad de cultivos, las diferentes necesidades de cada cultivo tienden a compensarse entre sí; esto permite obtener un valor medio para el uso consuntivo en función de la temperatura media.

Con apoyo en lo anterior y utilizando datos obtenidos en lisímetro, de California y Nuevo México, E.U.A., Thornthwaite concluyó que el uso consuntivo, para un conjunto de cultivos, era una función de la temperatura y obtuvo una ecuación que representa la relación entre ambos factores. Véase la ecuación (2).

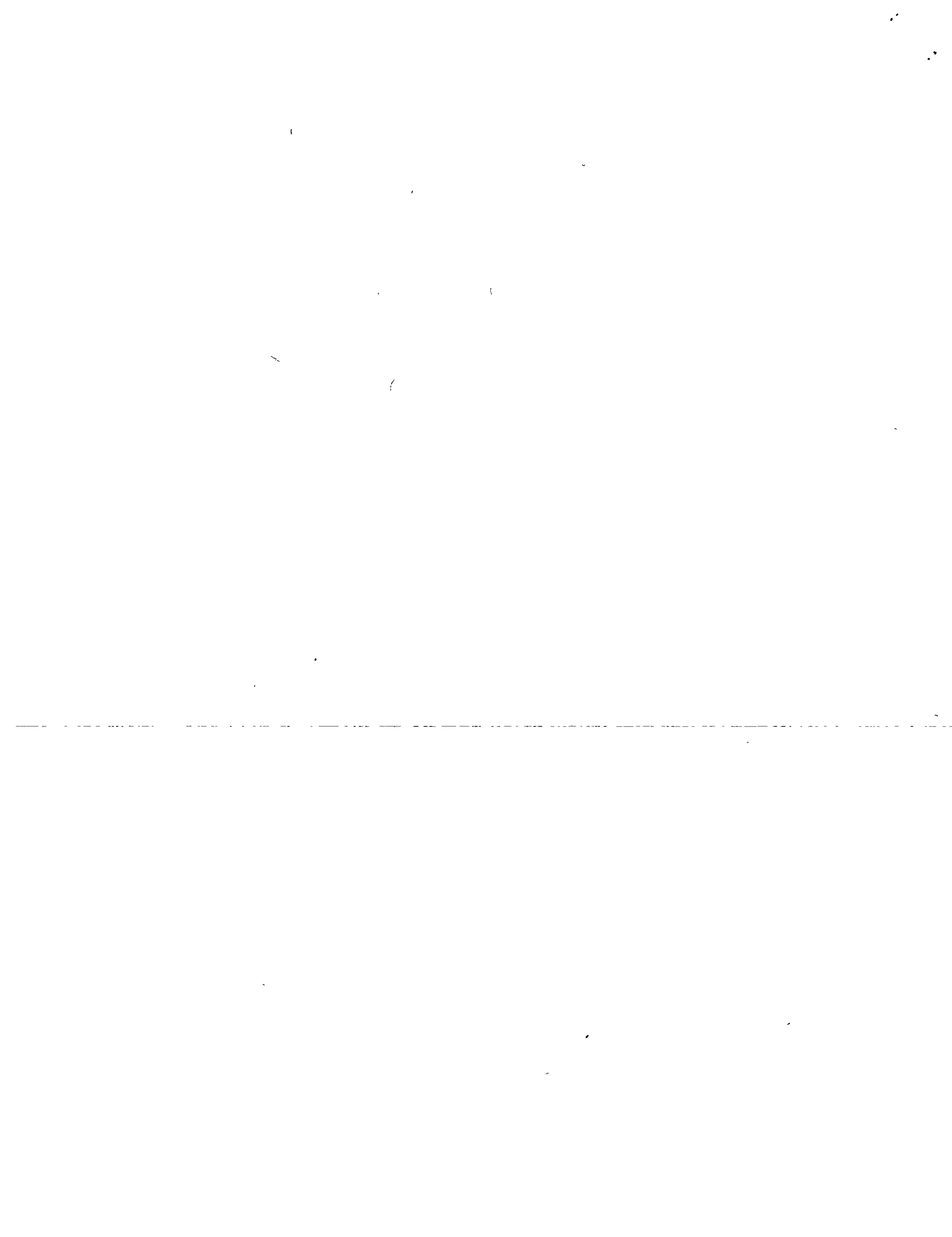
Por las consideraciones hechas por Thornthwaite para establecer su ecuación, es por lo que los valores del uso consuntivo calculados con ésta, en zonas de cultivos diversificados, coinciden mucho con los valores observados en las mediciones directas en dichas zonas. Sin embargo, en aquellas zonas con monocultivo o con tendencia a éste, la coincidencia es ya mucho menor. Pero hay todavía otra circunstancia más, aun cuando se trate de una diversificación semejante en regiones o zonas con igual temperatura media en un mes dado, los valores calculados y los observados del uso consuntivo no resultan iguales.

Por todas las razones antes apuntadas, Thornthwaite introdujo en su fórmula un factor que denominó "eficiencia de la temperatura". El valor mensual de este factor se determina con la ecuación siguiente:

$$E_t = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (1)$$

La suma anual de las eficiencias de la temperatura correspondientes a cada mes ( $E_t$ ), es la Eficiencia Anual (I).

La fórmula de Thornthwaite para calcular la evapotranspi



ración o el uso consuntivo mensual, es entonces la siguiente:

$$u.c = 1.6 \left( \frac{10 t}{I} \right)^a \quad (2)$$

en la que:

u.c = Uso consuntivo mensual, en centímetros

t = Temperatura media mensual, en grados centígrados

I = Es la eficiencia anual de la temperatura. Es la suma de los valores de  $E_t$  para cada uno de los doce meses del año.

$$a = 0.000\ 000\ 675\ I^3 - 0.0000771\ I^2 + 0.01792\ I + 0.49239 \quad (3)$$

Para determinar el uso consuntivo para un grupo cualquiera de cultivos por el método de Thornthwaite, se necesitan conocer los siguientes datos básicos:

- a) El período de desarrollo de los cultivos considerados.
- b) La temperatura media mensual en la zona estudiada.

Con ayuda de la ecuación (1) se obtienen las eficiencias de la temperatura ( $E_t$ ) mensuales; con las ( $E_t$ ) se encuentra la eficiencia anual (I) y, con ésta el uso consuntivo mensual (u.c) por medio de la ecuación (2).

Finalmente, el uso consuntivo total (UC) resulta de la fórmula (4):

$$U.C = \sum_{j=1}^n u.c \quad (4)$$

en la que:

u.c = uso consuntivo mensual, fórmula (2)

n = número de meses en el período de desarrollo correspondiente a la planta.

11



Para facilitar la determinación del uso consuntivo por medio del Método de Thornthwaite, se dispone de una tabla con los valores de la eficiencia mensual de la temperatura ( $E_t$ ) en función de la media mensual, y de un nomograma que permite obtener el u.c en función de la temperatura media mensual en el mes y de la eficiencia anual de la temperatura (I).

En seguida se hace una breve descripción del orden en que se hace el cálculo para obtener el uso consuntivo con el método de Thornthwaite.

- 1.- Se calculan las temperaturas medias mensuales para los meses que comprenda el período de desarrollo de los cultivos.
- 2.- Conocida la temperatura media mensual, en la Tabla 1 se obtiene la eficiencia de la temperatura para cada mes ( $E_t$ ).

Para valores de temperatura mayores de 26.5 grados centígrados, los de la evapotranspiración son prácticamente iguales para cualquier valor de la eficiencia anual de la temperatura (I); y los valores de la evapotranspiración pueden obtenerse directamente de la Tabla 1-A.

- 3.- Se suman las eficiencias de la temperatura ( $E_t$ ) para los doce meses del año y se obtiene la eficiencia anual de la temperatura (I).
- 4.- Conociendo el valor de I, se puede obtener el valor del exponente (a) con la fórmula (3) y resolviendo la ecuación (2), se obtiene el valor del uso consuntivo mensual (u.c). El nomograma dado por Thornthwaite en la publicación citada en la referencia bibliográfica 4/ y reproducido en 12/ permite resolver gráficamente la ecuación (2).
- 5.- Por último, con la suma de los valores de u.c para todos los meses del período de desarrollo de los cultivos en estudio, se obtiene el U.C total, con la fórmula (4).

El método de Thornthwaite tiene algunas desventajas derivadas del hecho que la fórmula básica es aplicable preferentemente al caso de una zona tomada en conjunto, con una cierta diversificación de cultivos; por consiguiente, los resultados que con la misma se obtengan pueden diferir del uso consuntivo de algunos cultivos en particular. Por otra parte, no obstante el haber introducido el factor de efi-

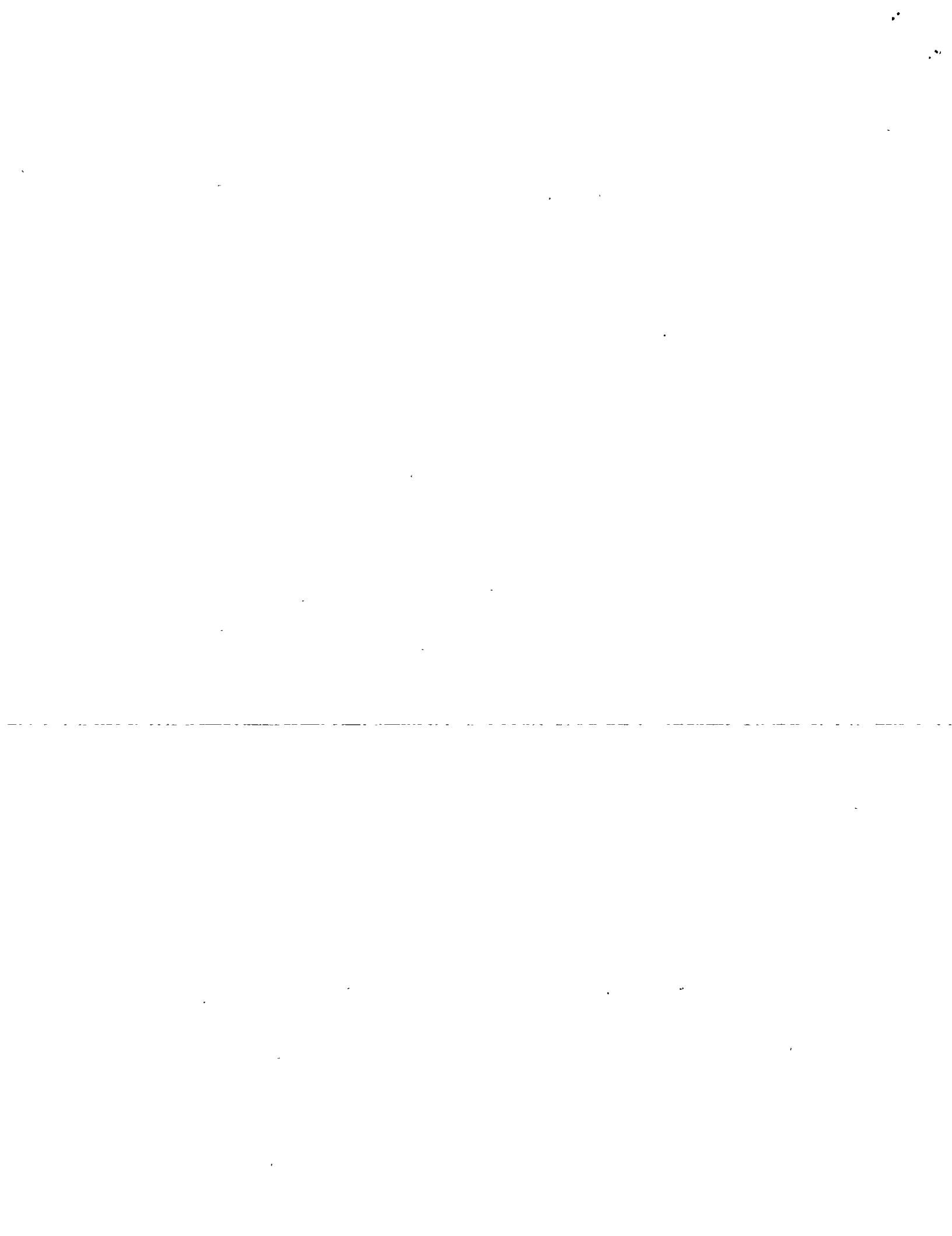






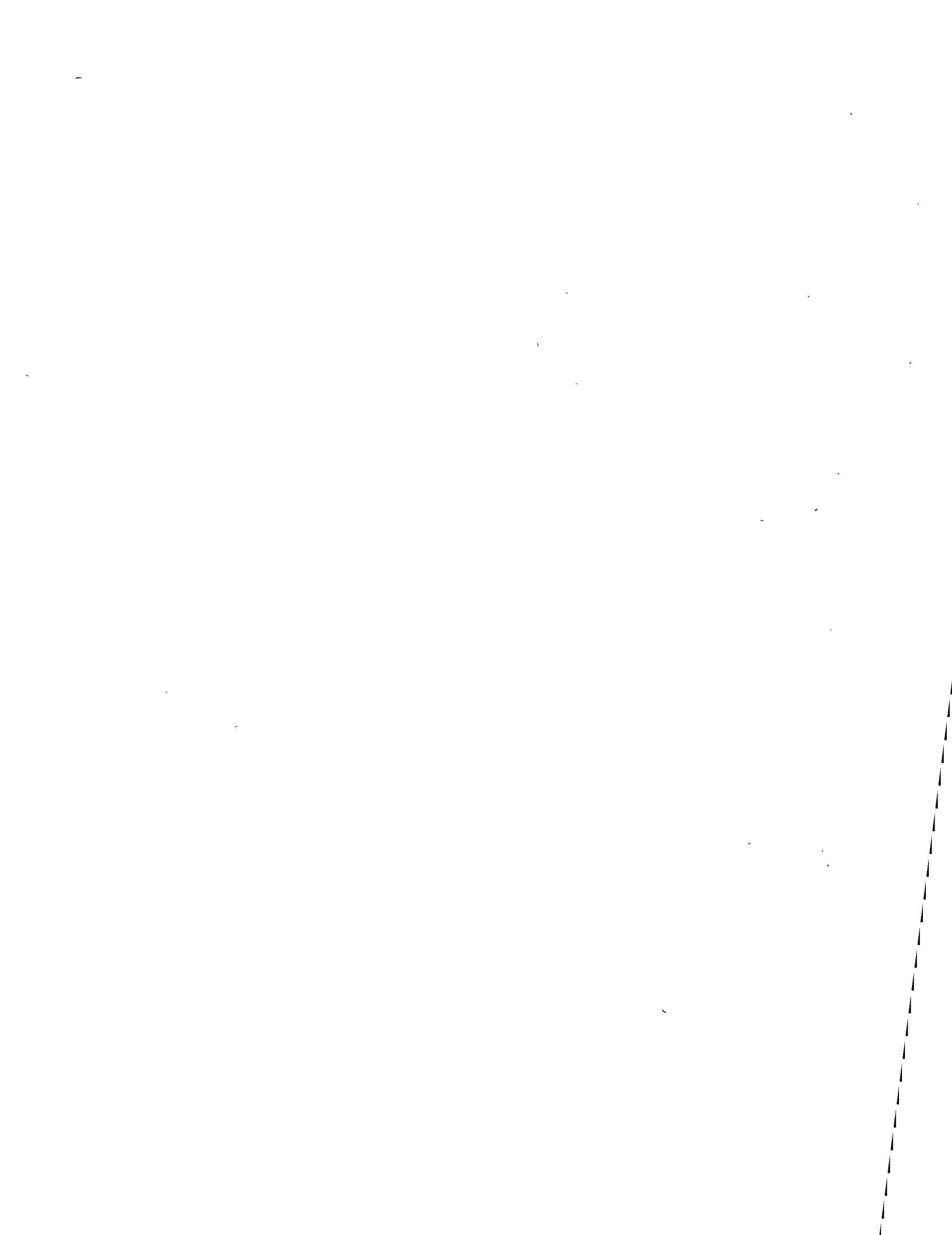
TABLA 1-A

VALORES DE LA EVAPOTRANSPIRACION CUANDO LA TEMPERATURA MEDIA MENSUAL ES SUPERIOR A 26.5°C.

t										
en°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
26	-	-	-	-	-	13.50	13.59	13.68	13.77	13.86
27	13.95	14.03	14.12	14.20	14.29	14.37	14.45	14.53	14.62	14.70
28	14.78	14.86	14.94	15.01	15.09	15.17	15.24	15.32	15.39	15.47
29	15.54	15.61	15.68	15.75	15.82	15.89	15.95	16.02	16.08	16.15
30	16.21	16.27	16.33	16.40	16.46	16.52	16.58	16.63	16.69	16.74
31	16.80	16.85	16.91	16.96	17.02	17.07	17.12	17.17	17.21	17.26
32	17.31	17.35	17.40	17.44	17.49	17.53	17.57	17.61	17.64	17.68
33	17.72	17.76	17.79	17.83	17.86	17.90	17.93	17.96	17.99	18.02
34	18.05	18.08	18.10	18.13	18.15	18.18	18.20	18.22	18.25	18.27
35	18.29	18.31	18.32	18.34	18.35	18.37	18.38	18.39	18.41	18.42
36	18.43	18.44	18.45	18.45	18.46	18.47	18.47	18.48	18.48	18.49
37	18.49	18.49	18.49	18.50	18.50	18.50	-	-	-	-
38	18.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-

NOTA:

Los valores después de 26.5°C son prácticamente los mismos para cualquier valor de la eficiencia anual de la temperatura (1).



ciencia de la temperatura, con el cual se trata de tomar en cuenta la influencia de las diferencias en horas de insola-  
ción, la temperatura es el factor que mayor influencia tie-  
ne en los resultados obtenidos con dicha fórmula.

Por último, cabe advertir que con la fórmula elaborada -  
por Thornthwaite se obtiene la evapotranspiración potencial  
que, según Penman, es "el consumo de agua de un cultivo que  
cubre totalmente la superficie del suelo y que nunca tiene  
deficiencia de humedad". Por consiguiente, hay una cierta  
diferencia con el uso consuntivo según se ha definido en el  
Apartado .1 de esta Norma, en vista de que en muy pocas oca-  
siones los cultivos se encuentran bajo circunstancias tan -  
favorables. Véase 4/ y 10/.





EJEMPLO 1 - DETERMINACION DEL USO CONSUNTIVO  
 APLICACION DEL METODO DE THORNTHWAITE

CULTIVO: ALGODONERO  
 PERIODO DE DESARROLLO: 6 meses - Abril a Septiembre  
 REGION LAGUNERA, COAH-DGO.  
 LATITUD: 25° 30' N

MES	t en °C	E <sub>t</sub> (a)	a (b)	I (c)	$\frac{10t}{I}$	$\left(\frac{10t}{I}\right)^a$	$1.6 \left(\frac{10t}{I}\right)^a = \text{u.c. en cm}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Enero	13.0	4.25	--	--	--	--	--
Febrero	15.8	5.71	--	--	--	--	--
Marzo	18.4	7.19	--	--	--	--	--
Abril	22.6	9.82	--	--	2.13	5.822	9.3
Mayo	25.4	11.71	--	--	2.40	7.689	12.3
Junio	27.0	12.85	--	--	2.55	8.855	14.2
Julio	26.7	12.63	--	--	2.52	8.615	13.8
Agosto	26.1	12.21	--	--	2.46	8.145	13.0
Septiembre	24.2	10.89	--	--	2.28	6.824	10.9
Octubre	21.0	8.78	--	--	--	--	--
Noviembre	16.2	5.93	--	--	--	--	--
Diciembre	12.6	4.05	--	--	--	--	--
Total	--	106.02	2.33	106.02	--	--	73.5

NOTAS:

- Valores leídos en la Tabla 1, en función de la temperatura media mensual.
- Valor calculado con la ecuación (3):  

$$a = 0.000\ 000\ 675\ I^3 - 0.0000771\ I^2 + 0.01792\ I + 0.49239$$
- Es la suma de los valores de E<sub>t</sub> para los doce meses del año, anotados en la columna (3).



### .3.3.3 El método de Blaney y Criddle

#### .3.3.3.1 Explicación del método

Este método es aplicable especialmente en aquellas zonas de riego en las que no se tienen datos obtenidos experimentalmente o por mediciones directas sobre la cantidad de agua que las plantas consumen, pero donde se cuenta con registros de datos climatológicos; pues esto permitirá relacionar los usos consuntivos así obtenidos, con los de otras zonas donde se hayan efectuado observaciones directas.

El método de Blaney y Criddle, como el de Thornthwaite, se basa también en las temperaturas medias mensuales, pero en los cálculos considera de un modo directo al porcentaje de horas de luz solar o insolación total en el año que corresponde a cada mes. De esta manera, la estimación del uso consuntivo está más acorde con la influencia que la temperatura y las horas de insolación tienen en el desarrollo de las plantas.

El método incluye el cálculo de lo que Blaney y Criddle denominan "factor mensual de uso consuntivo", expresado así:

$$f = \frac{t \cdot p}{100} \quad (1)$$

fórmula en la cual:

f = factor mensual de uso consuntivo, en pulgadas. Se considera que cuando se cuenta con agua suficiente, el uso consuntivo de los cultivos varía directamente con este factor.

t = temperatura media mensual, en grados Fahrenheit.

p = porcentaje en horas de insolación que corresponde al mes con relación a las del año. Los valores de (p) varían con la latitud del lugar en cuestión y, por consiguiente, aunque las temperaturas medias de un mes sean iguales en dos zonas distintas, los factores mensuales de uso consuntivo pueden ser diferentes.

La expresión matemática de la fórmula de Blaney y Criddle es la siguiente, en unidades inglesas:

$$u.c = k f = k \cdot p \left( \frac{t}{100} \right) \quad (2)$$



$$f = \frac{p \cdot t}{100} \quad (3)$$

$$U.C = \sum_{j=1}^n k \cdot f = K \cdot F \quad (4)$$

en las que:

- u.c = Uso consuntivo mensual, en pulgadas
- k = Coeficiente empírico mensual de uso consuntivo, para cada cultivo
- f = Factor mensual de uso consuntivo
- p = Porcentaje en horas de insolación en el mes con relación a las del año
- t = Temperatura media mensual, en grados Fahrenheit
- U.C = Uso Consuntivo o evapotranspiración total para el período de desarrollo del cultivo, en pulgadas.
- K = Coeficiente empírico global de uso consuntivo, correspondiente a un cultivo determinado en el período de desarrollo o ciclo agrícola; es el promedio de los valores mensuales de (k). El valor de (K) depende de cada cultivo y de su respectivo período de desarrollo.
- n = Número de meses que abarca el período de desarrollo del cultivo
- F = Factor global de uso consuntivo. Es la suma de los factores mensuales de uso consuntivo para el período considerado. Asimismo, es la suma de los productos de la temperatura media mensual y de los porcentajes de horas de insolación en el mes con relación a las del año.

Si la temperatura media mensual se indica en grados centígrados y el uso consuntivo en centímetros, las fórmulas anteriores se expresan de la siguiente manera:

$$u.c = k \cdot p \left( \frac{t + 17.8}{21.8} \right) \quad (2A)$$

$$f = p \left( \frac{4.57 t + 81.3}{100} \right) = p \left( \frac{t + 17.8}{21.8} \right) \quad (3A)$$

$$U.C = K \sum_{j=1}^n p \left( \frac{t + 17.8}{21.8} \right) \quad (4A)$$



El factor global de uso consuntivo (F) puede calcularse para aquellas zonas en las cuales se dispone de datos registrados sobre temperaturas ambientes y las horas de insolación diaria. El período diario de insolación depende de la latitud del lugar.

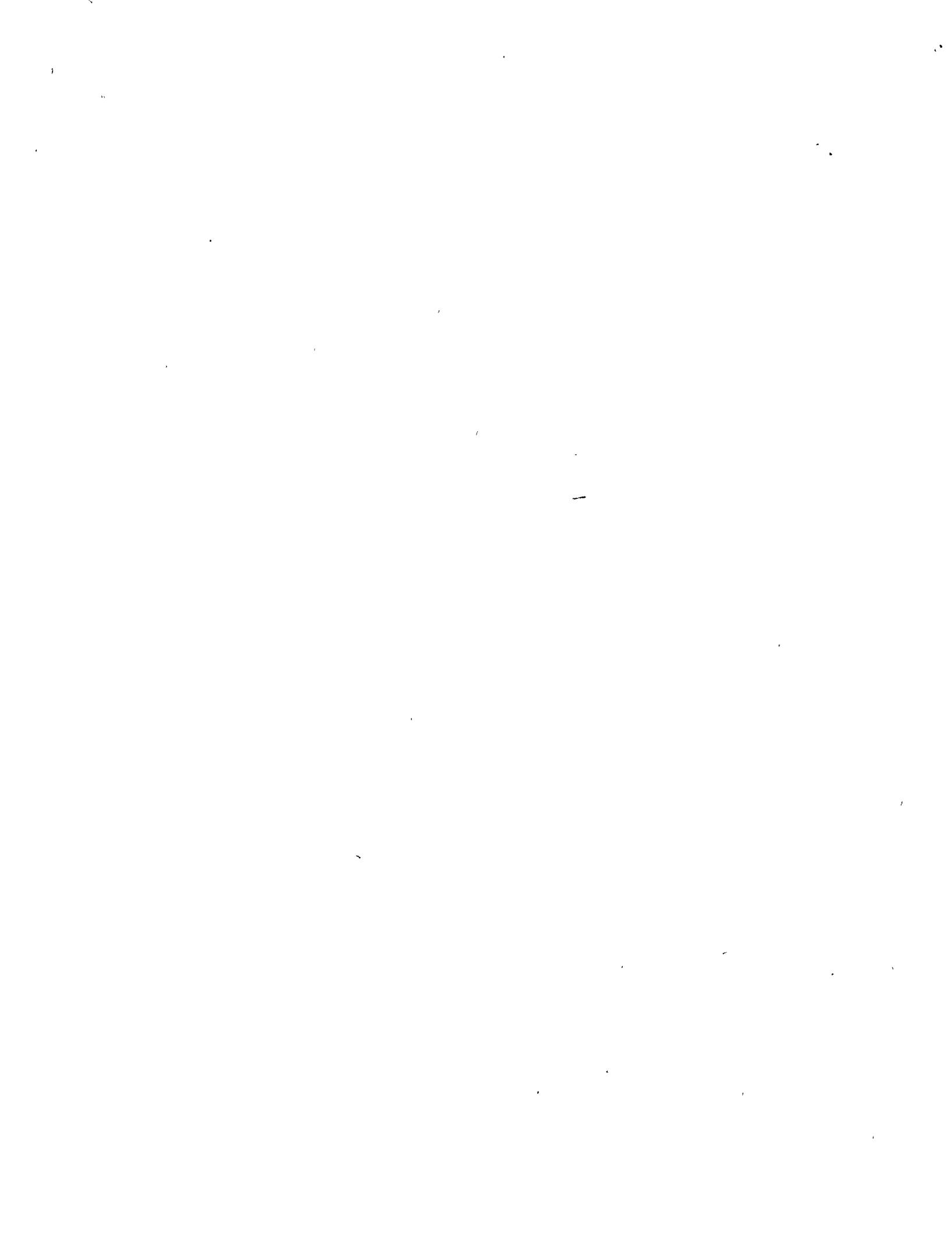
Por lo hasta aquí explicado, el uso consuntivo total (U.C) de un cultivo cualquiera, se obtiene multiplicando (F) por el coeficiente empírico global (K) aplicable a dicho cultivo; para lo cual pueden utilizarse los valores de (K) encontrados por Blaney y Criddle.

El coeficiente (K), que es igual a  $\frac{U.C}{F}$ , muestra algunas variaciones, debidas a lo difícil que es llevar al cabo las mediciones directas del uso consuntivo y a los errores a que éstas pueden estar sujetas por las muy diversas condiciones en que se ejecutan los estudios. Tales variaciones se deben, principalmente, a los cambios en el clima de un lugar a otro; la diferencia en los suelos; la mayor o menor disponibilidad de agua para satisfacer las necesidades de los cultivos; los procedimientos seguidos en la medición del uso consuntivo; el rendimiento de las plantas y otros diversos factores que también influyen y cambian de un lugar a otro.

A pesar de lo indicado en la segunda parte del párrafo anterior, y con apoyo en el conocimiento personal de las condiciones físicas que privan en las zonas como en las que realizaron sus estudios Blaney y Criddle, lograron éstos obtener los coeficientes (K) aplicables, independientemente de la localidad, para ciertos cultivos, considerando que se desarrollan en condiciones normales. Hay que tomar en cuenta que estos coeficientes son globales, es decir, son valores medios correspondientes al período de desarrollo de los cultivos. Sus valores y cultivos a que se aplican, se dan en la Tabla 3, según los valores dados por Blaney y Criddle.

En aquellas zonas donde se tengan datos experimentales confiables, los coeficientes globales de uso consuntivo (K) de cada cultivo, deben ajustarse para que correspondan a las condiciones locales.

En cuanto a los coeficientes empíricos mensuales de uso consuntivo (k), éstos muestran diferencias todavía mayores que los coeficientes globales (K). Cuando se trata de períodos mensuales o más cortos, es necesario tomar en cuenta al conjunto de factores que pueden tener influencia en el crecimiento de los cultivos; por ejemplo: el clima, las plagas, etc.





De ordinario, no se tienen disponibles los valores del coeficiente empírico mensual ( $k$ ), únicamente los valores globales de ( $K$ ), dados por Blaney y Criddle, circunstancia ésta que muchas veces limita el empleo del método de Blaney-Criddle a la obtención únicamente del uso consuntivo total para el período de desarrollo de los diversos cultivos.

### .3.3.3.2 Aplicación de la fórmula de Blaney-Criddle

En general, cuando se tiene disponible suficiente información sobre los resultados obtenidos en el campo respecto al uso consuntivo del complejo suelo-planta en una cierta zona de riego, mayor es la aproximación que puede esperarse de las suposiciones y estimaciones que se hagan cuando se trate de aplicar esos resultados en otras zonas donde se carezca de esos datos pero en las que se tengan observaciones climatológicas.

De ordinario, no se cuenta con suficientes datos observados sobre el uso consuntivo, entonces, deben hacerse las siguientes consideraciones para la aplicación de la fórmula empírica de Blaney-Criddle para el uso consuntivo que aquí se trata.

- 1.- El uso consuntivo (U.C) para todo el período de desarrollo de cada cultivo, varía con el factor global de uso consuntivo (F).
- 2.- El crecimiento y rendimiento de los cultivos no están limitados, durante su período de desarrollo, por causas debidas a una aplicación inadecuada del agua.
- 3.- La fertilidad y productividad del suelo, se suponen iguales en las diversas partes de la zona de riego estudiada.
- 4.- El período de desarrollo de los cultivos como alfalfa, pastos, hortalizas y vegetación natural, se supone comprendido dentro del tiempo libre de heladas aunque, generalmente, se extiende más allá de éste. El rendimiento de los cultivos que dependen del crecimiento vegetativo, varía únicamente con la duración del período de su desarrollo.

Para la aplicación de la fórmula de Blaney-Criddle, en la determinación del uso consuntivo para el período de desarrollo de un cultivo cualquiera, se utilizan los si-



güientes datos:

- 1.- Tabla 2 - Porcentajes de horas de insolación en el mes (p) con relación a las del año, on función de la latitud del lugar.
- 2.- Tabla 3 - Coeficientes globales de uso consuntivo (K) para definir el cultivo.
- 3.- Tabla 4 - Valores de  $\frac{t + 17.8}{21.8}$ , en relación con las temperaturas medias mensuales, en grados centígrados.
- 4.- Fórmula (4A) - En caso de poder contar con los coeficientes empíricos mensuales (k) =  $\frac{u.c}{f}$ , determinados experimentalmente en otra zona con características climáticas semejantes comparable a la del Estudio, se pueden obtener los valores del uso consuntivo mensual aplicando la fórmula (2A), o bien, con el nomograma presentado en la referencia bibliográfica 11/.

Como comentarios finales sobre los métodos ya descritos, Thornthwaite y Blaney-Criddle; conviene hacer mención que cuando se trata de calcular el uso consuntivo para cultivos de verano (algodonero), el método de Thornthwaite da valores un poco mayores que el de Blaney-Criddle. Cuando de cultivos de invierno se trata (trigo), sucede lo contrario. En lo anterior tiene mucho que ver la influencia del período de insolación y su intervención en la fórmula de cada método.

Por último y como conclusión a los métodos antes descritos es de interés señalar que, mientras no se disponga de los datos necesarios obtenidos por determinaciones directas del uso consuntivo, los métodos indirectos constituyen una herramienta muy valiosa para obtener los valores del uso consuntivo en una zona de riego en operación o en proyecto.

Las ventajas que el método de Blaney-Criddle tiene sobre el de Thornthwaite, que se manifiestan en la facilidad de cálculo del uso consuntivo específico de cada cultivo, en las diversas zonas donde se cuente con disponibilidad de datos meteorológicos que permiten correlacionar los datos resultantes del uso consuntivo con los de otras zonas donde se cuente con observaciones experimentales directas, ha hecho que la SRH lo haya adoptado preferentemente en los es

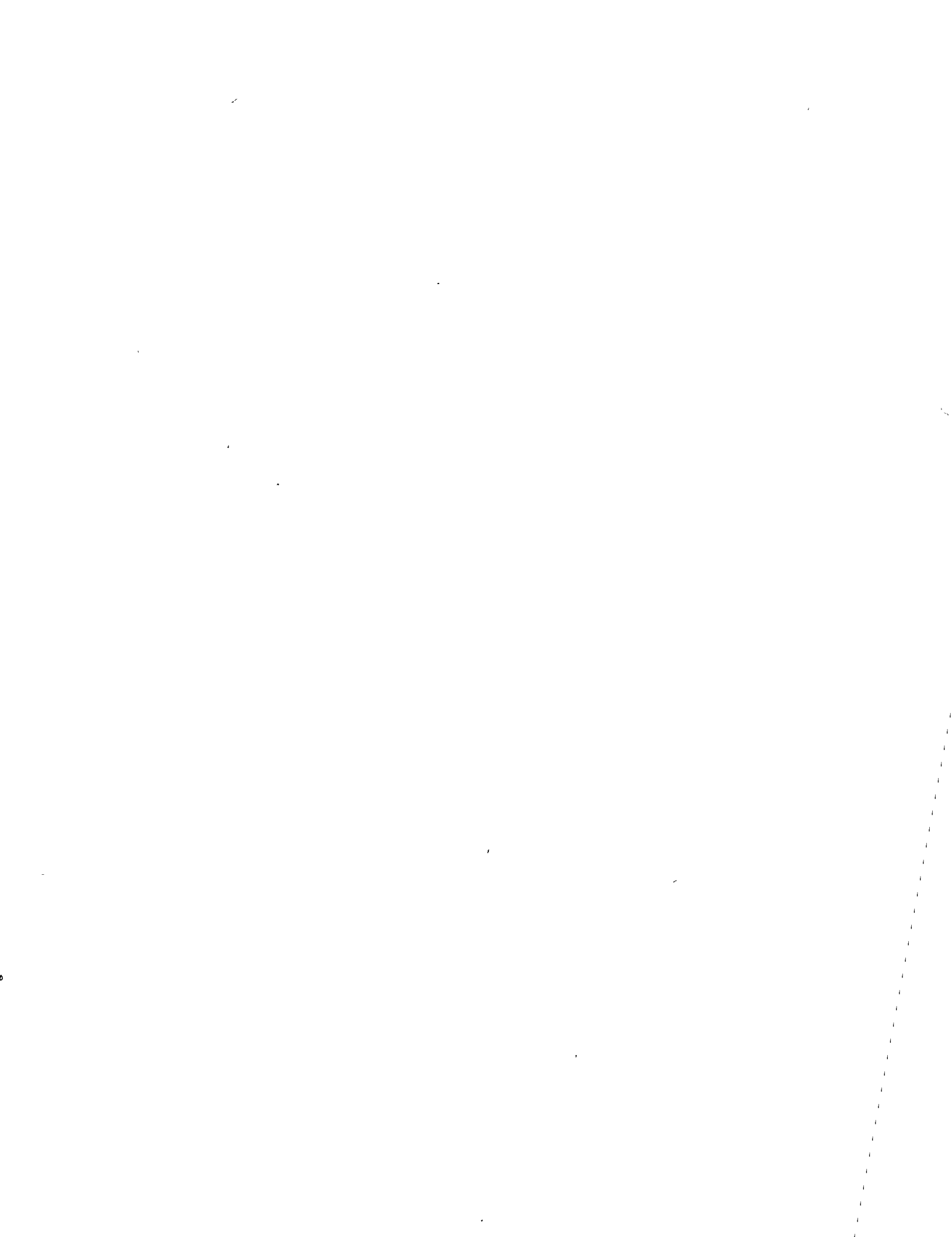


TABLA 2

PORCENTAJE DE HORAS DE INSOLACION EN EL MES CON  
RELACION A LAS DEL AÑO (p), EN FUNCION DE LA LATITUD.

Lat. Nte.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
15°	7.94	7.37	8.44	8.45	8.98	8.80	9.03	8.83	8.27	8.26	7.75	7.88
16°	7.93	7.35	8.44	8.46	9.01	8.83	9.07	8.85	8.27	8.24	7.72	7.83
17°	7.86	7.32	8.43	8.48	9.04	8.87	9.11	8.87	8.27	8.22	7.69	7.80
18°	7.83	7.30	8.42	8.50	9.09	8.92	8.16	8.90	8.27	8.21	7.66	7.74
19°	7.79	7.28	8.41	8.51	9.11	8.97	9.20	8.92	8.28	8.19	7.63	7.71
20°	7.74	7.26	8.41	8.53	9.14	9.00	9.23	8.95	8.29	8.17	7.59	7.66
21°	7.71	7.24	8.40	8.54	9.18	9.05	9.29	8.98	8.29	8.15	7.54	7.62
22°	7.66	7.21	8.40	8.56	9.92	9.09	9.33	9.00	8.30	8.13	7.50	7.55
23°	7.62	7.19	8.40	8.57	9.24	9.12	9.35	9.02	8.30	8.11	7.47	7.50
24°	7.58	7.17	8.40	8.60	9.30	9.20	9.41	9.05	8.31	8.09	7.43	7.46
25°	7.53	7.13	8.39	8.61	9.32	9.22	9.43	9.08	8.30	8.08	7.40	7.41
26°	7.49	7.12	8.40	8.64	9.38	9.30	9.49	9.10	8.31	8.06	7.36	7.35
27°	7.43	7.09	8.38	8.65	9.40	9.32	9.52	9.13	8.32	8.03	7.36	7.31
28°	7.40	7.07	8.39	8.68	9.46	9.38	9.58	9.16	8.32	8.02	7.22	7.27
29°	7.35	7.04	8.37	8.70	9.49	9.43	9.61	9.19	8.32	8.00	7.24	7.20
30°	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.34	7.99	7.19	7.14
31°	7.25	7.00	8.36	8.73	9.57	9.54	9.72	9.24	8.33	7.95	7.15	7.09
32°	7.20	6.97	8.37	8.75	9.63	9.60	9.77	9.28	8.34	7.95	7.11	7.05

NOTA:

Tabla tomada de la Referencia 19/.



TABLA 3

COEFICIENTE EMPIRICO GLOBAL DEL USO CONSUNTIVO  
PARA DEFINIR EL CULTIVO (K).

CULTIVO	PERIODO DE DESARROLLO		COEFICIENTE K	
	(1)	(2)	(3)	
Alfalfa		Entre heladas	.80	a .90
Plátano		Año completo	.80	a 1.00
Haba, Frijol, etc.		3 meses	.60	a .70
Cacao		Año completo	.70	a .80
Café		Año completo	.70	a .80
Maíz		4 meses	.75	a .85
Algodonero		7 meses	.60	a .70
Dátil		Año completo	.65	a .80
Linaza		7 a 8 meses	.70	a .80
Cereales pequeños		3 meses	.75	a .85
Sorgo		4 a 5 meses	.70	a .80
Semillas oleaginosas		3 a 5 meses	.65	a .75
<b>Frutales:</b>				
Aguacate		Año completo	.50	a .55
Toronja		Año completo	.55	a .65
Naranja y limón		Año completo	.45	a .55
Nuez de nogal		Entre heladas	.60	a .70
De hojas caducas		Entre heladas	.60	a .70
<b>Pasturas:</b>				
Pastos		Entre heladas	.75	a .85
Trébol blanco		Entre heladas	.80	a .85
Papa		3 a 5 meses	.65	a .75
Arroz		3 a 5 meses	1.00	a 1.10
Henequén		Año completo	.65	a .70
Remolacha de azúcar		6 meses	.65	a .75
Caña de azúcar		Año completo	.80	a .90
Tabaco		4 meses	.70	a .80
Jitomate (tomate)		4 meses	.65	a .70
Hortalizas		2 a 4 meses	.60	a .70
Vid		5 a 7 meses	.50	a .60

## NOTAS:

- 1) Los valores más pequeños de (K) son para regiones costeras y los mayores para las áridas.
- 2) Los valores de (K) dados en esta Tabla son los recomendados por Blaney y Criddle 19/.

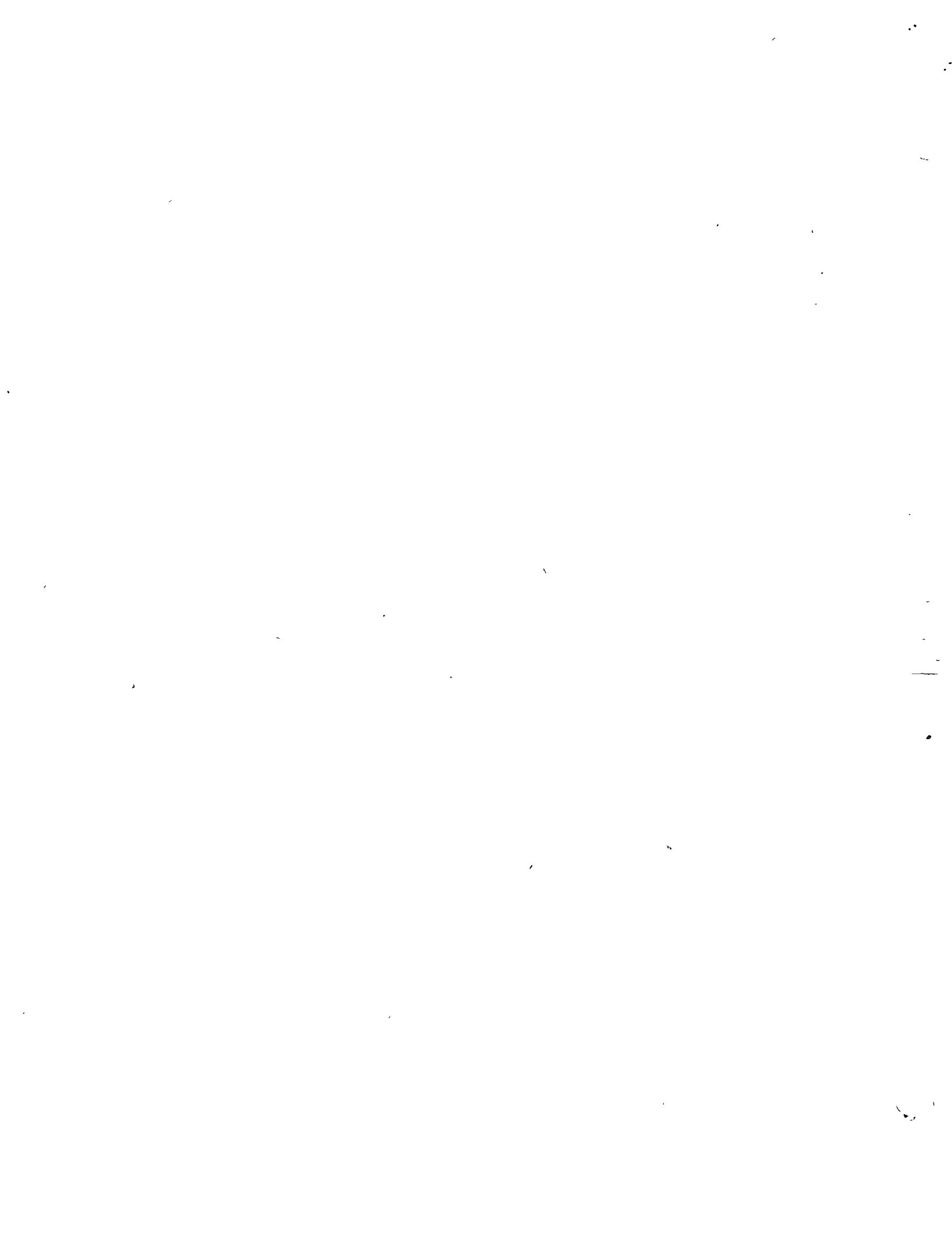




TABLA 4

VALORES DE  $\frac{t + 17.8}{21.8}$ , EN RELACION CON LAS TEMPERATURAS

MEDIA MENSUALES EN GRADOS CENTIGRADOS.

t en °C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
3	0.954	0.959	0.963	0.968	0.972	0.977	0.982	0.986	0.991	0.995
4	1.000	1.005	1.009	1.014	1.018	1.023	1.028	1.032	1.037	1.041
5	1.046	1.051	1.055	1.060	1.064	1.069	1.074	1.078	1.083	1.087
6	1.092	1.097	1.101	1.106	1.110	1.115	1.120	1.124	1.129	1.133
7	1.138	1.143	1.147	1.152	1.156	1.161	1.165	1.170	1.174	1.179
8	1.183	1.188	1.193	1.197	1.202	1.206	1.211	1.216	1.220	1.225
9	1.229	1.234	1.238	1.243	1.247	1.252	1.257	1.261	1.266	1.270
10	1.275	1.280	1.284	1.289	1.293	1.298	1.303	1.307	1.312	1.316
11	1.321	1.326	1.330	1.335	1.339	1.344	1.349	1.353	1.358	1.362
12	1.367	1.372	1.376	1.381	1.385	1.390	1.394	1.399	1.404	1.408
13	1.413	1.418	1.422	1.427	1.431	1.436	1.441	1.445	1.450	1.454
14	1.459	1.464	1.468	1.473	1.477	1.482	1.487	1.491	1.496	1.500
15	1.505	1.510	1.514	1.519	1.523	1.528	1.532	1.537	1.541	1.546
16	1.550	1.555	1.559	1.564	1.568	1.573	1.578	1.582	1.587	1.591
17	1.596	1.601	1.605	1.610	1.614	1.619	1.624	1.628	1.633	1.637
18	1.642	1.647	1.651	1.656	1.660	1.665	1.670	1.674	1.679	1.683
19	1.688	1.693	1.697	1.702	1.706	1.711	1.716	1.720	1.725	1.729
20	1.734	1.739	1.743	1.748	1.752	1.757	1.762	1.766	1.771	1.775
21	1.780	1.785	1.789	1.794	1.798	1.803	1.808	1.812	1.817	1.821
22	1.826	1.831	1.835	1.840	1.844	1.849	1.854	1.858	1.863	1.867
23	1.872	1.867	1.881	1.886	1.890	1.895	1.899	1.904	1.908	1.913
24	1.917	1.922	1.926	1.931	1.935	1.940	1.945	1.949	1.954	1.958
25	1.963	1.968	1.972	1.977	1.981	1.986	1.991	1.995	2.000	2.004
26	2.009	2.014	2.018	2.023	2.027	2.032	2.037	2.041	2.046	2.050
27	2.055	2.060	2.064	2.069	2.073	2.078	2.083	2.087	2.092	2.096
28	2.101	2.106	2.110	2.115	2.119	2.124	2.129	2.133	2.138	2.142
29	2.147	2.152	2.156	2.161	2.165	2.170	2.175	2.179	2.184	2.188
30	2.193	2.198	2.202	2.207	2.211	2.216	2.221	2.225	2.230	2.234
31	2.239	2.244	2.248	2.253	2.257	2.262	2.266	2.271	2.275	2.280
32	2.284	2.289	2.293	2.298	2.302	2.307	2.312	2.316	2.321	2.325
33	2.330	2.335	2.339	2.344	2.348	2.353	2.358	2.362	2.367	2.371
34	2.376	2.381	2.385	2.390	2.394	2.399	2.404	2.408	2.413	2.417
35	2.422	2.427	2.431	2.436	2.440	2.445	2.450	2.454	2.459	2.463



**EJEMPLO 2 - CALCULO DEL USO CONSUNTIVO PARA EL PERIODO DE DESARROLLO.**

METODO BLANEY - CRIDDLE

CULTIVO: ALGODONERO

REGION LAGUNERA, COAH-DGO.

LATITUD: 25° 30' N

PERIODO DE DESARROLLO: Abril a Septiembre = 6 meses

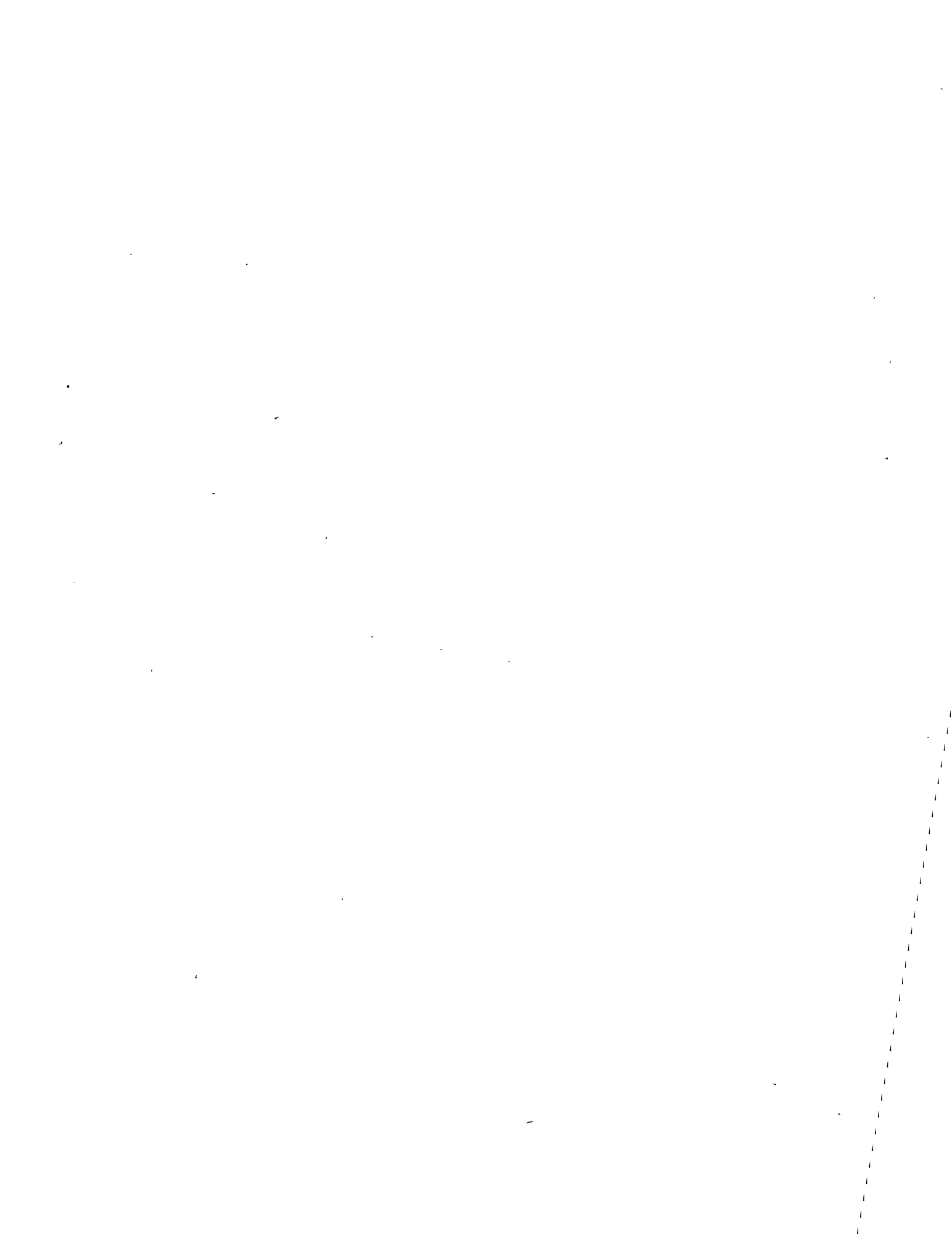
Fórmula de Blaney - Criddle  $U.C = K \cdot F = K \sum_{j=1}^n f$  (4)

$$f = p \left( \frac{t + 17.8}{21.8} \right) \quad (3A)$$

MES	t en °c	p (a)	$\frac{t + 17.8}{21.8}$ (b)	f	K(c)	U.C (cm) (d)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (3) (4)	(6)	(7)
Abril	22.6	8.63	1.853	16.0	- -	- -
Mayo	25.4	9.35	1.982	18.5	- -	- -
Junio	27.0	9.26	2.055	19.0	- -	- -
Julio	26.7	9.46	2.041	19.3	- -	- -
Agosto	26.1	9.09	2.014	18.3	- -	- -
Septiembre	24.2	8.31	1.927	16.0	- -	- -
S u m a		- -		107.1	0.65	69.6

**NOTAS:**

- a) Valores leídos de la Tabla 2
  - b) Valores leídos de la Tabla 4
  - c) Valor tomado de la Tabla 3
  - d) Valor calculado con la ecuación (4). Como sólo se conoce el valor global de K, únicamente se puede calcular el valor de U.C para el período de desarrollo del algodón.
- Para el cálculo de los valores mensuales de u.c, véase el ejemplo dado en el Inciso .3.5.2 de esta Norma.



tudios que se ejecutan para determinar el uso consuntivo de los cultivos en los diferentes distritos de riego que la Secretaría administra y opera. Véanse 6/ y 11/.

#### .3.3.4 El método gravimétrico

En el Inciso .3.3.1 de esta Norma, se dijo que entre los varios métodos utilizados para determinar la evapotranspiración o uso consuntivo figuraban los directos y los indirectos, estos últimos basados en fórmulas empíricas que correlacionan los valores del uso consuntivo y ciertos datos meteorológicos observados. Entre los métodos indirectos se describieron con mayor detalle los más usados: el de - - Thornthwaite y el de Blaney-Criddle.

Ahora y a continuación, se hará una breve descripción de dos métodos que sirven para determinar en forma directa el uso consuntivo: el gravimétrico y el del lisímetro.

El método gravimétrico consiste en determinar en el laboratorio, pesando en una báscula diferentes muestras de un suelo dado, las variaciones de humedad que ocurren en cada una de las diversas capas del perfil, hasta una cierta profundidad o la que alcancen las raíces del cultivo para el que se trata de obtener el consumo de agua del complejo - planta-suelo,

En función de las características del suelo y de las variaciones de humedad es posible hacer la determinación de la cantidad de agua, expresada como lámina en centímetros, consumida en un período de tiempo dado por el conjunto - - suelo-planta.

La expresión matemática siguiente permite obtener la lámina:

$$L = \Delta P_s \cdot D_a \cdot P_r \quad (1)$$

en la que cada término significa lo siguiente:

L - Es igual a la lámina de agua, en cm, consumida por el complejo suelo-planta durante el período de tiempo considerado.

$\Delta P_s$  - Es la variación de la humedad en por ciento respecto al peso seco del suelo, en el mismo período de tiempo considerado.

$D_a$  - Es la densidad aparente del suelo, número abstracto.



$P_r$  - Es la profundidad del perfil de suelo o la profundidad radicular del cultivo, en metros.

El procedimiento para determinar la humedad del suelo - consiste en sacar varias muestras del mismo por medio de una barrena (tipo Veihmeyer u otra similar), para cada espesor de las capas del perfil estudiado; por ejemplo, cada 30 cm. Estas muestras se guardan en botes de lámina cerrados herméticamente que se pesan y secan en estufa a unos 110°C hasta que adquieren un peso constante. Posteriormente, por diferencia de pesos, se obtiene la humedad de la muestra en por ciento del peso seco del suelo.

Varios días después de la operación anterior, se sacan otras muestras del mismo suelo en lugares adyacentes y nuevamente se obtiene el porcentaje de humedad. La lámina de agua consumida en el tiempo transcurrido se obtiene con las diferencias de humedad que se hayan calculado, aplicando la fórmula (1).

### .3.3.5 El método del lisímetro

El lisímetro es un aparato que sirve para medir en forma directa y por medio de un procedimiento gravimétrico la cantidad de agua consumida por un cultivo y el suelo en que se apoya y lo provee de agua y otras sustancias alimenticias.

El aparato diseñado por W.O. Pruitt es un tanque cilíndrico de unos 6 metros en diámetro aproximadamente y 95 cm de alto, donde se colocan el suelo y el cultivo que se estudian.

El tanque se coloca sobre una báscula de precisión que permite observar las variaciones de peso que pueda tener el tanque, por el agua que pierda el suelo. El agua que consume el cultivo se obtiene en función de las variaciones de peso registradas.

Otros investigadores como Thornthwaite y Livingston han diseñado evaporímetros parecidos al descrito anteriormente, aunque con ligeras variantes.

Por último, debe indicarse la disponibilidad de otros procedimientos que permiten determinar la humedad de un suelo con objeto de calcular el agua que consume el complejo planta-suelo; tales como el de la conductividad eléctrica y los que requieren de los dispositivos conocidos como Tensiómetros.

Para ver con mayor detalle estos métodos deben consultar





se, entre otras, las referencias bibliográficas 1/, 2/ y 12/.

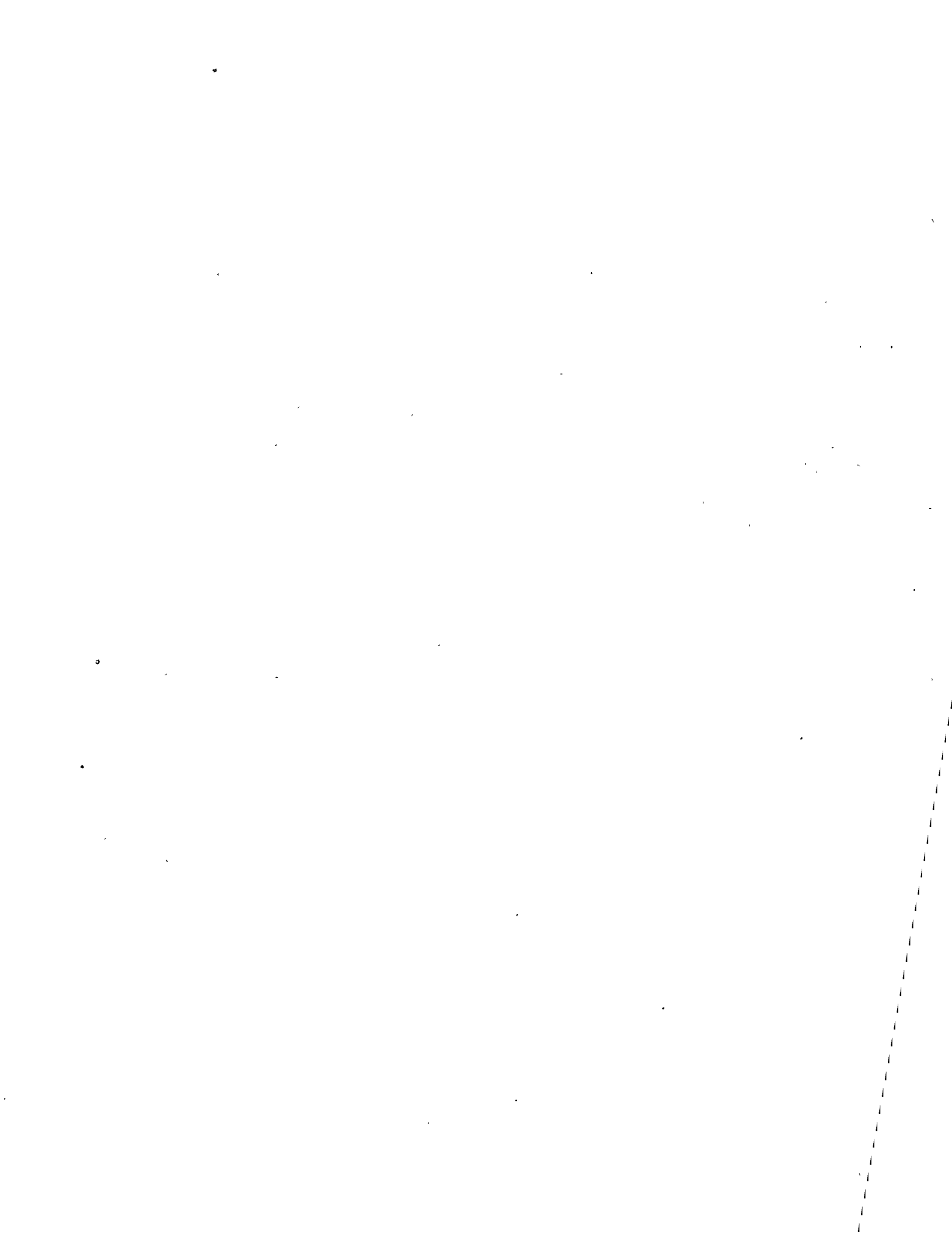
### .3.4 Datos observados sobre el uso consuntivo de algunos cultivos

En la Dirección General de Distritos de Riego de la SRH, así como en las Oficinas Foráneas de Riego y Drenaje adscritas a esta Dirección General, se tienen disponibles los datos observados en parcelas experimentales de algunos distritos de riego, sobre el uso consuntivo de algunos cultivos.

A continuación se dan algunos valores observados del uso consuntivo para el período de desarrollo de algunos cultivos, calculados por el método gravimétrico en dos distritos de riego cercanos entre sí. Estos datos se presentan solamente como información general para el Proyectista.

Distrito de Riego No. 38 Río Mayo, Son. Latitud aprox: 27°		Distrito de Riego No. 41 Río Yaqui, Son. Latitud aprox: 27° 30'N	
CULTIVO	U.C (cm)	CULTIVO	U.C (cm)
Cártamo	38	Linaza	41
Trigo	40	Trigo	41
Linaza	41	Maíz	56
Algodonero	70	Sorgo	60
Alfalfa	78	Frijol Soya	65
		Algodonero	71
		Alfalfa	90

Los datos antes dados fueron proporcionados por el Departamento de Ingeniería de Riego y Drenaje, de la Dirección General de Distritos de Riego de la S.R.H., en 1968.



### .3.5 La distribución mensual del uso consuntivo

#### .3.5.1 Generalidades

La distribución mensual del uso consuntivo se obtiene mediante la aplicación del método de Blaney-Criddle ya expuesto en el Inciso .3.3.3 de esta Norma.

El método original de Blaney-Criddle hace intervenir al coeficiente empírico mensual ( $k$ ) para obtener el uso consuntivo mensual de un cierto cultivo y dada la dificultad de contar con los valores de ( $k$ ), problema que se menciona en .3.3.3.1 donde se explica el método en cuestión, se ha tratado de salvar la dificultad antes indicada mediante la introducción del concepto llamado "la curva de desarrollo específica del cultivo", o bien de otro concepto denominado: "la curva única", como a continuación se explicará:

#### .3.5.2 Con el método de Blaney-Criddle y la curva de desarrollo del cultivo

Este procedimiento, en esencia es el Método de Blaney y Criddle con las modificaciones necesarias para hacer intervenir en la fórmula del uso consuntivo mensual, obtenida por dichos autores, a un coeficiente climático mensual ( $k_t$ ) y a un coeficiente mensual que depende del desarrollo de cada cultivo ( $k_d$ ), en vez del coeficiente mensual de uso consuntivo ( $k$ ).

El coeficiente climático mensual ( $k_t$ ) permite lograr un mejor ajuste de la relación temperatura y evapotranspiración en cada uno de los meses que comprende el período de desarrollo en los cultivos que interesen. Para ello el factor de temperatura ( $t$ ) en la fórmula de Blaney-Criddle se corrige mediante ( $k_t$ ), según la siguiente expresión puesta en el sistema métrico decimal:

$$k_t = 0.03114 (t) + 0.2396 \quad (6)$$

en la que ( $t$ ) es la temperatura media mensual, en grados centígrados.

El coeficiente de desarrollo ( $k_d$ ) para un mes dado dentro del período total de desarrollo correspondiente a un cierto cultivo, no es más que el coeficiente mensual de uso consuntivo ( $k$ ) en la fórmula de Blaney-Criddle, resultante en la curva de desarrollo respectiva.



La curva de desarrollo relativo representa cómo evoluciona en el tiempo el crecimiento de la planta, con relación - al que ésta alcanza en el período total de desarrollo.

El período total de desarrollo de un cultivo dado es el tiempo que en total requiere la planta para su completo crecimiento vegetativo, la floración y fructificación.

En la referencia bibliográfica 9/, el Proyectista puede consultar información muy útil sobre el coeficiente de - desarrollo ( $k_d$ ) y las curvas de desarrollo relativo para algunos cultivos.

Los valores mensuales de ( $k_d$ ) se determinan en el campo, en forma experimental para cada cultivo. La representación gráfica de los valores de este coeficiente, en función del porcentaje de desarrollo relativo es una curva en forma de campana, como se ilustra para el caso del algodón en la Lámina .1.2.3-2, que se presenta más adelante.

La fórmula para obtener el uso consuntivo mensual con el método de Blaney-Criddle y aplicando la curva de desarrollo de cada cultivo, es la siguiente:

$$u.c = f \cdot k_t \cdot k_d \quad (7)$$

y el valor del uso consuntivo total para el período de - desarrollo del cultivo, se obtiene con la siguiente expresión:

$$U.C = \sum_{j=1}^n f \cdot k_t \cdot k_d \quad (8)$$

En ambas ecuaciones los términos tienen las siguientes acepciones:

$u.c$  = uso consuntivo mensual, en centímetros.

$f$  = Factor mensual de uso consuntivo. Es igual a:

$p \left( \frac{t + 17.8}{21.8} \right)$  ; según la fórmula (3A), dada en .3.3.3.1 de esta misma Norma.

$k_t$  = Coeficiente climático mensual, dado por la expresión (6).

$k_d$  = Coeficiente de desarrollo para cada cultivo, obtenido en forma experimental.

$U.C$  = Uso consuntivo total para el período de desarrollo de cada cultivo, en centímetros.



$\sum_{j=1}^n$  Suma del primero al último mes en el período de desarrollo total del cultivo.

El procedimiento de cálculo a seguir para obtener la distribución mensual del uso consuntivo de un cierto cultivo con el método indicado en este Inciso .3.5.2 consiste en los siete pasos siguientes:

- 1.- Se calculan los valores de (f) con la expresión (3A), dada en .3.3.3.1 de esta Norma.
- 2.- Se calculan los valores de ( $k_t$ ) con la fórmula (6).
- 3.- Se calculan los valores de  $f \cdot k_t$
- 4.- Se obtienen los valores mensuales de ( $k_d$ ) por medio de la curva de desarrollo relativo del cultivo en cuestión.

Para esto, se divide la curva de desarrollo específica en tantas partes como número de meses abarque el período total de desarrollo. La ordenada media en cada intervalo, da el valor de ( $k_d$ ) mensual.

- 5.- Se calculan los valores del uso consuntivo mensual (u.c) por medio de la fórmula (7).
- 6.- Se obtiene el valor del uso consuntivo total (U.C) para el período total de desarrollo del cultivo, por medio de la fórmula (8).
- 7.- Se corrigen los valores mensuales y el total del uso consuntivo, obtenidos en los pasos 5 y 6, como a continuación se indica:

El ajuste se obtiene con la expresión siguiente:

$$(U.C)' = \frac{K}{K'} (U.C) \quad (9)$$

en la que:

$$K' = \frac{\sum_{j=1}^n f \cdot k_t \cdot k_d}{\sum_{j=1}^n} \quad (10)$$

(U.C)' = uso consuntivo total ajustado, en centímetros.





K = coeficiente empírico global dado por -  
Blaney y Criddle para cada cultivo. -  
(Tabla 3)

U.C = uso consuntivo total, obtenido con la  
ecuación (8), en centímetros.

La corrección anterior se debe a que, en general, es necesario ajustar el valor del uso consuntivo total que resulta cuando se utilizan los coeficientes mensuales - climáticos ( $k_t$ ) y de desarrollo ( $k_d$ ), en vez de los valores del coeficiente empírico global (K) determinados por Blaney y Criddle.

Los cálculos para los diversos pasos antes indicados, se facilitan mucho cuando se tienen ya tabulados los valores - de  $f$  y  $k_t$  para cada mes y además, las curvas de desarrollo relativo para cada cultivo que interese.

La Secretaría de Recursos Hidráulicos cuenta con diver--sas tablas y gráficas, tanto de esos valores como del uso - consuntivo y su distribución mensual para algunos cultivos en los diversos distritos de riego que opera y administra. El Proyectista debe consultar la información disponible - -véanse entre otras, las referencias bibliográficas 9/, 10/ y 12/- o recabarla en la Oficina de Riego y Drenaje de la Dirección General de Distritos de Riego, en la SRH.

### .3.5.3 Ejemplo de aplicación

A continuación se presenta en forma tabular el Ejemplo - número 3, para explicar el cálculo de la distribución men--sual del uso consuntivo por medio del método de Blaney- - Criddle modificado, aplicando la curva de desarrollo relati--vo para el algodónero, presentada en la Lámina .1.2.3-2.



**EJEMPLO 3 - DISTRIBUCION MENSUAL DEL USO CONSUNTIVO  
 APLICACION DEL METODO DE BLANEY-CRIDDLE, Y LA CURVA  
 DE DESARROLLO DEL CULTIVO (Factor  $k_d$ )**

**CULTIVO:** Algodonero  
**Región:** Lagunera, Coah-Dgo.  
**Latitud:** 25° 30' N.  
**Período de desarrollo:** Abril a Septiembre = 6 meses

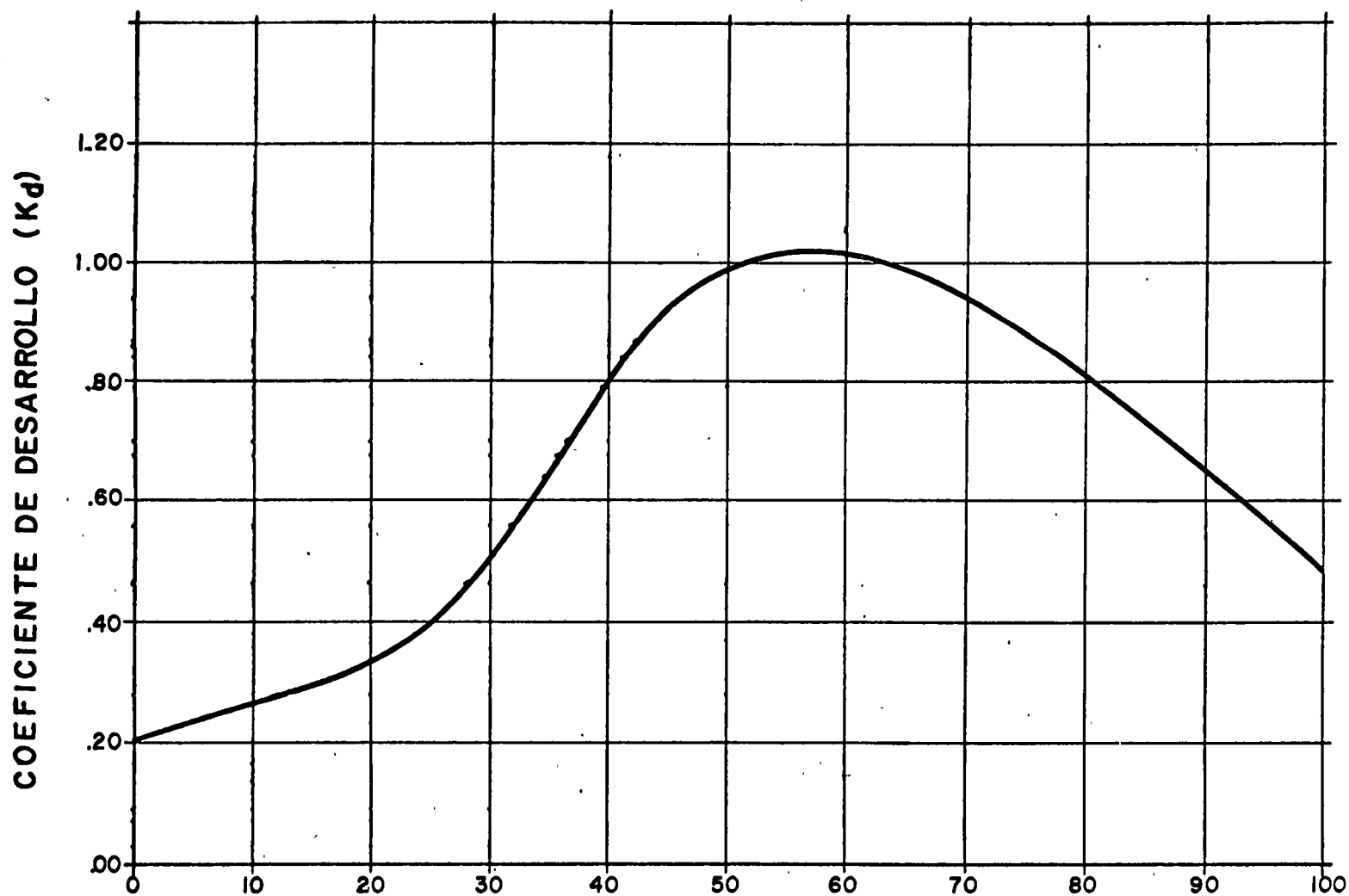
MES	t en °C	p (a)	$\frac{t+17.8}{21.8}$ (b)	f	$K_t$ (c)	$f \cdot k_t$	$K_d$ (d)	U.C cm (e)	K (f)	$K'$ (g)	$\frac{K}{K'}$	(U.C) cm (h)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)=(3)(4)	(6)	(7)=(5)(6)	(8)	(9)=(7)(8)	(10)	(11)	(12)=(10)÷(11)	(13)=(12)(9)
Abril	22.6	8.63	1.853	16.0	0.943	15.10	0.25	3.8	- - -	- - -	- - -	3.5
Mayo	25.4	9.35	1.982	18.5	1.031	19.10	0.40	7.6	- - -	- - -	- - -	7.0
Junio	27.0	9.26	2.055	19.0	1.080	20.52	0.82	16.8	- - -	- - -	- - -	15.4
Julio	26.7	9.46	2.041	19.3	1.071	20.67	1.02	21.1	- - -	- - -	- - -	19.3
Agosto	26.1	9.09	2.014	18.3	1.052	19.25	0.87	16.7	- - -	- - -	- - -	15.3
Sept.	24.2	8.31	1.927	16.0	0.993	15.89	0.62	9.9	- - -	- - -	- - -	9.1
Suma	- -			107.1	- -	- -	- -	75.9	0.65	0.71	0.916	69.6

**NOTAS:**

- a) Valores leídos de la Tabla 2.
- b) Valores leídos de la Tabla 4.
- c) Valores calculados con la ecuación:  $k_t = 0.03114 (t) + 0.2396$
- d) Valores obtenidos para cada mes, de la curva de desarrollo del algodón, Lámina .1.2.3-2
- e) Valores calculados con la ecuación:  $u.c = f \cdot k_t \cdot k_d$ ;  $U.C = \sum_{j=1}^n f \cdot k_t \cdot k_d$
- f) Valor tomado de la Tabla 3
- g) Valor calculado con la ecuación (10)
- h) Valor corregido del uso consuntivo. Se obtiene con la ecuación:  $(U.C)' = \frac{K}{K'} (U.C)$



# CURVA DE DESARROLLO DEL ALGODONERO



Tomada de la Ref. Bibl. 9/  
Edición 1971

DESARROLLO RELATIVO EN POR CIENTO

LAMINA .1.2.3-2



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

PLANNING OF IRRIGATION SYSTEMS FOR AGRICULTURE WITH  
THE AID OF A SIMULATION MODEL

ING. JOSE LUIS SANCHEZ BRIBIESCA

OCTUBRE, 1977.





# Planning of Irrigation Systems for Agriculture with the Aid of a Simulation Model

J. L. SANCHEZ BRIBIESCA

Professor of Hydraulic Engineering

Universidad Nacional Autónoma de México (National University of Mexico), Mexico, D.F.

## SYNOPSIS

*When constructing irrigation works, their capacity should be based mainly on the water demands of the crops they are meant to serve, and on the relation between profits due to crop yield and costs due to irrigation expenses. The possibility is envisaged, by means of the proposed simulation model, of establishing an irrigated culture area where expected crop yields can be estimated beforehand, if a certain irrigation policy is followed.*

*The simulation model consists of three main parts :*

- (1) Crop growth and its water uptake, as imposed by different irrigating policies.*
- (2) Satisfaction of water requirements by the crop taking into account both conduction and application losses.*
- (3) Evaluation of profits (comparisons of crop yield with irrigation costs) for N simulated years.*

## Introduction

Irrigation water requirements depend on plant physiology, irrigation techniques and water distribution. The first item is perhaps the main one, and it includes a diversity of subjects such as soil Physics, climatological characteristics and basic Botany.

Several researchers have intended the planning of water supply to crops by means of simulation models<sup>(5)(12)(16)(21)(23)(22)</sup>, but it is the author's opinion that the model proposed by J.C. Flinn<sup>(13)</sup> can, as to this writing, be considered the most complete.

It is the purpose of this paper to present a systematic approach to the computation of irrigation water needs, including several subjects not considered by the Canadian researcher. The model estimates the effects on final crop yield of soil moisture content, soil moisture tension, actual and potential evapotranspiration, rainfall, nitrogen fertilization, depth of water-table and

waterlogging. Some aspects of surface irrigation are also taken into account, as a means to estimating water losses. As to water distribution problems, Clement's criteria are used<sup>(3)</sup>, this allowing more realistic calculations of irrigation works.

The integrated model introduced in this paper appraises the relationship between expected benefit from crop yields according to a previously selected irrigation policy, and expected costs of required works.

Experimental support to certain assumptions has been attempted, and several screening tests have been performed at the University of Mexico, with more or less satisfactory results.

## Analysis of Data

Suppose an agricultural zone as exemplified in Figure 1 is to be irrigated, and the size of the serving channel has to be calculated. The zone has six farms



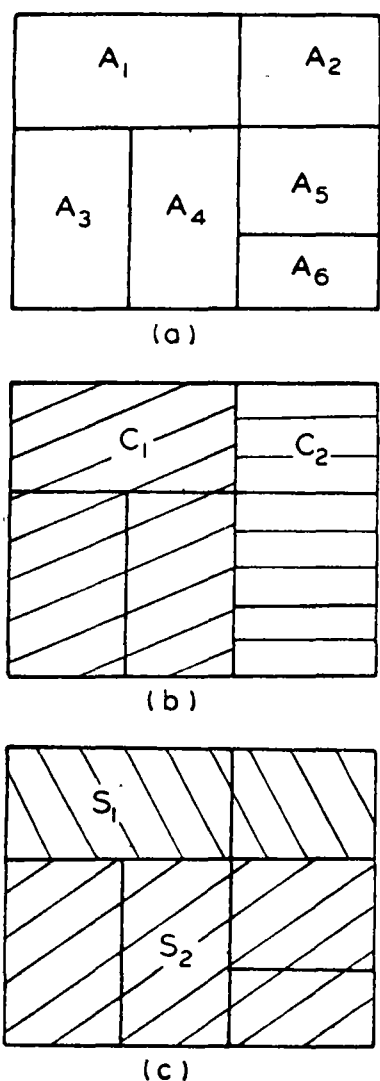


FIGURE 1: Hypothetical distribution of forms ( $A_{1-6}$ ), crops ( $C_{1-2}$ ) and soil types ( $S_{1-2}$ ) in the irrigated zone.

with areas  $A_j$ , located on soil type  $S_1$  and  $S_2$ , to be sown with crops  $C_1$  and  $C_2$ .

The following data are assumingly available :

- Topography—land slopes
- Agronomy —root depth of crops, soil constants, infiltration rate, 'soil water content versus soil water tension' graphs, depth of water-table, 'crop factor' according to Penman's formula, and maximum attainable yield for each crop.
- Climate —daily pan evaporation and rainfall.

A graph similar to Figure 2 can be obtained for each considered crop.

The relation between percentage of yield,  $Y$ , and relative evapotranspiration,  $Ea/ET_p$ , varies according to nitrogen fertilization. Optimum yield is attained with maximum required nitrogen ( $F_o$ ), with either lower ( $F_1, F_2$ ) or higher ( $F_3, F_4$ ) quantities of added nitrogen, crops yield less than optimum. These graphs were obtained from the work of several researchers<sup>(1)(2)(4)(11)(14)(20)(22)(27)</sup>. Percentage yield refers here to the value for each state of the vegetative cycle, as shown in Figure 3.

The relationship between relative evapotranspiration,  $Ea/ET_p$ , and soil water tension,  $\psi$ , for several  $ET_p$  values is also shown in the graphs. Potential evapotranspiration  $ET_p$  is the amount of water required by climatological demand, under conditions of low soil water tension (near field capacity).  $ET_p$  is obtained daily from Penman's formula :

$$ET_p = E_o \times K_o$$

where,  $E_o$  is the daily atmospheric evaporation, and  $K_o$  is a 'crop factor', as shown in Figure 3.

The graphs described were compiled from several researcher's experiments<sup>(6)(8)(13)(17)(18)(23)(24)(28)</sup>.

Modifications to the  $Ea/ET_p$  ratio under conditions of excessive soil water ( $h$ ) are presented in the central part of the graphs in Figure 2. With raising water-table levels yield is reduced according to evaporative demand  $ET_p$ , and rainfall  $R$ , as stated in Hooghoudt's work<sup>(17)</sup>.

If the water-table is shallower than 15 cm, the crops are considered 'submerged', and the computation of damage due to submergence is made with the aid of graphs similar to Figure 5 [from a compilation by Salamin<sup>(28)</sup>].

Climatological data (Figure 4) are either recorded or simulated from prior information. The author experimentally confirmed the unreliability of temperature as an index of the crop's stage of development.

### The Model : Part One

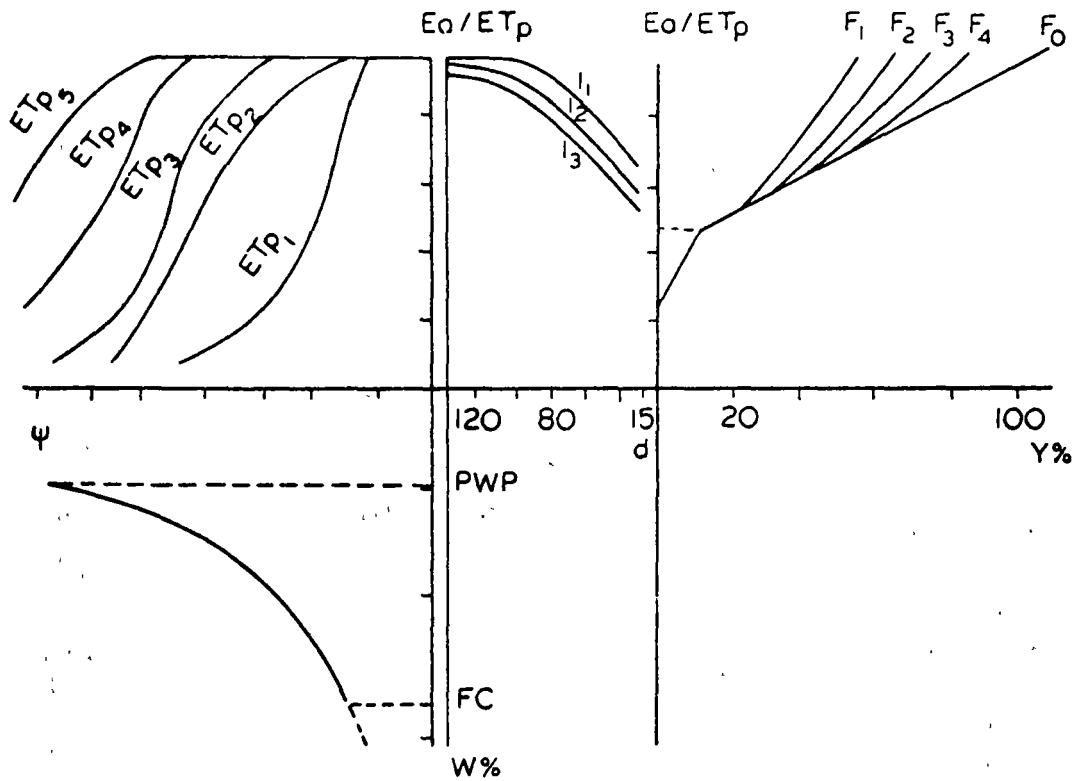
The goal of this part is to determine the amount and distribution time of water as required by a selected irrigation policy, and at the same time, to calculate expected crop yields. The irrigation policy is defined as the necessity to apply water when soil moisture reaches a selected value  $W_{pol} = Kp (FC - PWP)$ , for  $0 < Kp < 1$ , where,  $FC$  = field capacity

$$PWP = \text{permanent wilting percentage.}$$

Computations are carried out in order to know the depth of the water-table  $d_i$ , soil moisture content  $W_i$ , and percentage yield  $Y_i$ , on a daily basis, with the values for the previous day,  $d_{i-1}$  and  $W_{i-1}$ , and rainfall, evaporation, and fertilization data.

If  $d_{i-1}$  is less than  $d_{min}$ , which is about 15 cm the crop is submerged and unable to transpire ( $Ea \sim 0$ ), yield is reduced according to a submergence factor  $fD$  from Figure 5. When agricultural drainage is available, drained water can be calculated ( $D_i$ ).





PWP - Permanent wilting percentage  
 FC - Field capacity  
 $ET_{p_{1-5}}$  Values of potential evaporation

d - Water table depth  
 $I_{1-3}$  Values ( $ET_p$ ) rainfall  
 $F_{0-5}$  Fertilization levels

FIGURE 2: Graphical representation of important relationships: soil water content versus tension (W versus  $\psi$ ); water tension versus relative evapotranspiration ( $\psi$  versus  $Ea/ET_p$ ); and relative evapotranspiration versus yield ( $Ea/ET_p$  versus Y).

In case of rainfall, infiltrable water is estimated as the difference between the rain height and runoff:

$$\phi_i = (I - O)_i$$

(Graphs of the Soil Conservation Service)

Remaining soil moisture will be:

$$W_i = W_{i-1} + \phi - D_i$$

and crop yield will be:  $Y - f_D$

If  $d_{min} < d_{i-1} < d_{max}$ , the crop is 'logged', and actual evapotranspiration  $Ea$  is calculated taking into account potential evapotranspiration  $ET_{pi} = K_{oi} \times Eo_i$ ; excess water is then determined

$$I_i = \phi_i + W_{i-1} - E_{a_i} - D_i;$$

finally,  $(Ea/ET_p)_i$  and then  $E_{a_i}$ .

These computations require several trials (Figure 2), and at last lead to the estimation of  $Y_i$ .

Soil moisture becomes:

$$W_i = W_{i-1} + \phi_i - E_{a_i} - D_i = I_i$$

When  $d_i > I_{max}$

and if  $W_i \geq FC$ , then  $W_i = FC$

and  $L_{a_i} = LT_{pi}$

If, on the other hand

$W_{POL} < W_i < FC$ , then soil water tension and  $LT_{pi} = K_{oi} \times Eo_i$  must be known, and yield is determined following the graphs in Figure 2;  $W_i$  becomes  $W_{i-1} - E_{a_i} + \phi_i$ .

When  $W_i \leq W_{POL}$ , irrigation will be necessary by an amount  $FC - W_i$ ; computation continue as described so far.

In this way,  $y_i$  and applied water can be computed daily, and total final yield

$$Y_T = \sum_{i,j} \frac{Y_i}{N} y_j - \sum_{j,D} J_{D_i}$$

and its corresponding water requirement can be known.



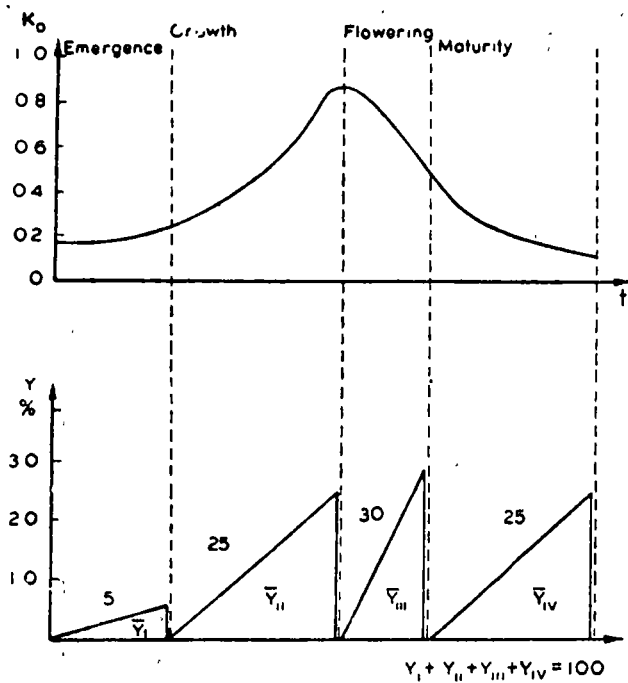


FIGURE 3 : Crop factor ( $K_0$ ) and percentage of final yield ( $Y$ ) attributed to each stage of growth.

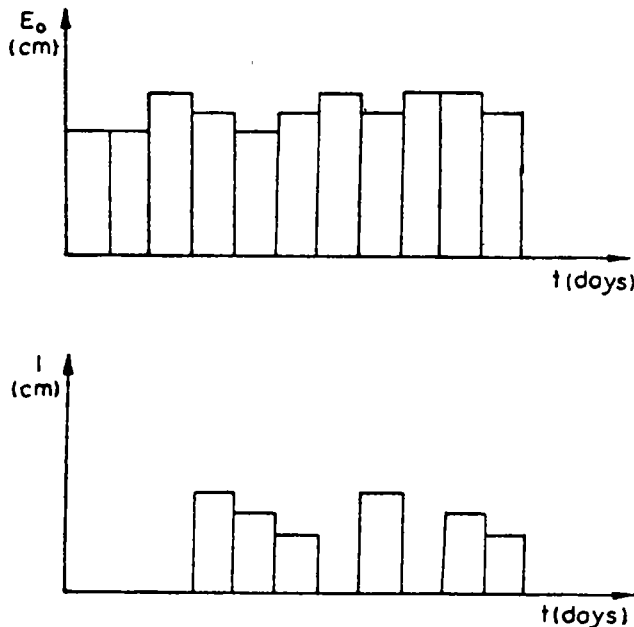


FIGURE 4 : Hypothetical daily evaporation ( $E_0$ ) and rainfall ( $I$ ) records.

Since, on the other hand, water needs are being recorded, the times of supply and the possibility of simultaneous demand can be known.

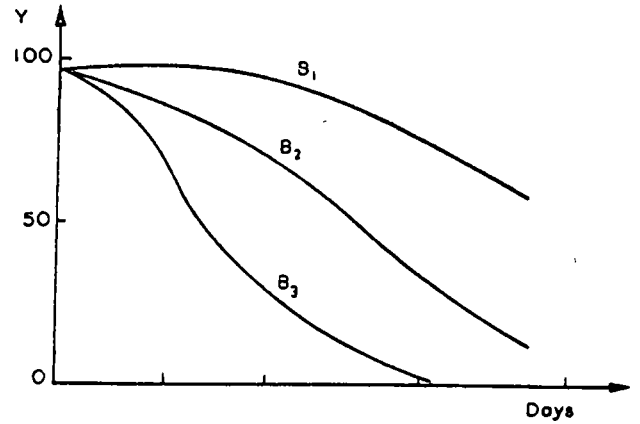


FIGURE 5 : Percentage yield  $Y$  according to duration of submergence for different stages of development ( $B_{1-3}$ ).

The Model : Part Two

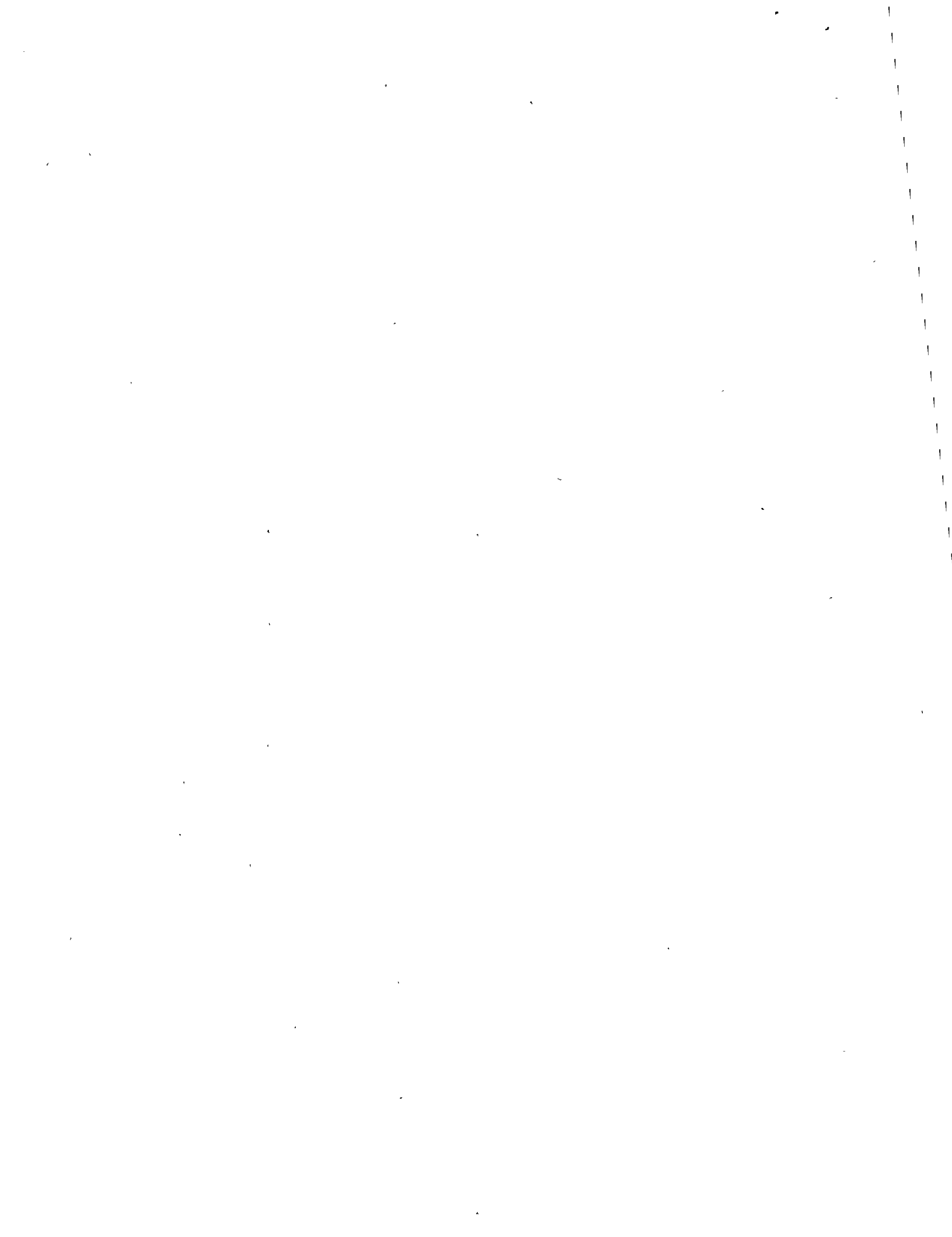
According to the author's tests, it is difficult to relate, by means of simple formula, length, slope and permeability of irrigated land with water sheet depth or modulus (i.e., discharge to the farm). For each particular case, however, results show that a fixed relationship does exist, and can be described. Since irrigation is always given to the same land area, these parameters will not change, and the applied dose will, therefore, vary between short limits because of modified roughness. Because of the infiltration mechanisms, humidification of the soil profile is not a uniform process, and the actual water dose required will have to be checked in each particular case, with the aid of field tests.

The fact that plant water needs calculated as described in the previous chapter have to be modified by experimental doses, should not be disappointing ; in the first place, information on times of water application is important, and besides, actual plant requirements are useful as a guide when fixing the size of irrigated areas.

The time of water application depends on sheet depth and on the infiltration coefficient  $K$ ,  $\left( t = \frac{d}{K} \right)$ . All through the application time, modular discharge  $Q = K \cdot A$  must be maintained.

On the basis of time of water demand, available time  $T$  can be known. According to Clement's ideas<sup>(3)</sup> the probability of service must be  $p = t/T$  for each farm considered. Then it is possible to estimate the discharge that the serving channel must supply to the  $N$  simultaneously demanding forms, with a specified probability of future :

$$Q = \sum_i^N Q_i \cdot (N_i p_i + \tau_i \sqrt{n_i p_i (1 - p_i)})$$





where,  $Q$  = modular discharge

$p_i$  = probability of service

$n_i$  = number of farms in similar conditions

$\tau_i$  = probability coefficient for a predetermined failure.

Interested readers can look for more detailed explanations in Clement's original paper<sup>(3)</sup>.

With the described procedure, it is possible to know the discharge of every channel (and works to control them) that will serve the whole irrigated area.

If several channels are analyzed, irrigation-area-ratios for the zone, and a graph relating these ratios to served area can be built.

This allows for an easy and reliable way of computing all channels inside the irrigated zone.

It might appear that proposed criteria are useful only for one crop distribution. This limitation can be avoided by simulating for several crop distributions, simply by taking into account the percentage of land cultivated with each selected crop. A computer programme is available to allocate crops at random. In such a case, it would be necessary to repeat computations for several crop distributions, and to join the results in a single graph, as shown in Figure 6. (Irrigation coefficient versus served area).

### The Model : Part Three

As has been described in part one of the model, crop yield and benefits as a result of an irrigation policy can be estimated.

As a first step, the availability of required water has to be checked; the cost of structures for water application as described in part two can be determined next; the final step would be the estimation of the present value of the annualities of structure costs, leading to a decision taking.

### Conclusion

It might be thought that by pretending to include all the complicated phenomena in a simple formulation, very serious mistakes would be obtained. Actually, the proposed method gives the planner a more or less complete procedure for decision making based on consideration of many facts involved, even if some of them are roughly accounted for.

In fact, irrigation planning is generally based simply on the planner's experience, leading at times to absurd extrapolations.

It is the author's opinion that he has pointed out a procedure that can help the planning of irrigated lands. The paper also suggest future lines of research in agriculture. In fact, it is not reasonable simply to perform "factorial" experiments in order to check the influence of fertilizers or soil texture on yield, but rather realistic

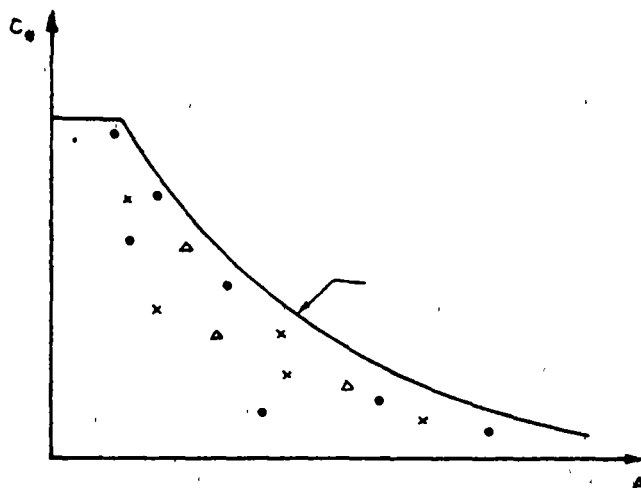


FIGURE 6 : Relationship between irrigation coefficient  $C_e$  and served area  $A$ .

results by means of elaborate research should be aimed at.

### Acknowledgements

Research was carried out at the Institute of Engineering (Instituto de Ingeniería, UNAM), under the auspices of the Secretary of Hydraulic Resources (Secretaría de Recursos Hidráulicos). Author is indebted with all the members of his staff which made possible to realize this work, specially to the biologists Miss Riemann and Miss Sánchez.

### Bibliographical References

- (1) BAUER, A.; YOUNG, R. A. and OZBUN, J.L. : "Effects of Moisture and Fertilizer on Yields of Spring Wheat." *Agron. J.*, Vol. 57, 1965, pp. 354-356.
- (2) CARLSON, C.W.; ALESSI, J. and MICKELSON, R.H. : "Evapotranspiration and Yield of Corn as Influenced by Moisture Level, Nitrogen Fertilization and Plant Density." *Soil Sci. Soc. Proc.*, Vol. 23, 1959, pp. 242-245.
- (3) CLEMENT, R. : "Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant a la demande." *Houille Blanche*, Vol. 5, 1966, pp. 553-575.
- (4) DALE, R. and SHAW, R. : "Effect on Corn Yields of Moisture Stress and Stand at two Fertility Levels." *Agron. J.*, Vol. 57, pp. 475-479.
- (5) DARLEY, P.R. and RYDZEWSKI, J.R. : "A Simulation Model for the Optimal Design and Operation of Irrigation Systems Based on Yield-Water Deficit Relationships." *Sym. Int. Con. Irr. and Drain.* 3, 1972, R-5, S 36.
- (6) DENMEAD, O.T. and SHAW, R.H. : "Evapotranspiration in Relation to the Development of the Corn Crop." *Agron. J.*, Vol. 51, 1959, pp. 725-726.
- (7) DENMEAD, O.T. and SHAW, R.H. : "The Effects of Soil Moisture Stress at Different Stages of Growth on the Development and Yield of Corn." *Agron. J.*, Vol. 52, 1960, pp. 272-274.



- (8) DENMEAD, O. T. and SHAW, R. H. : "Availability of Soil Water to Plants as Affected by Soil Moisture Content and Meteorological Conditions." *Agron. J.*, Vol. 54, 1962, pp. 385-390.
- (9) EDEN, A.; ALDERMAN, G.; BAKER, C. J. L.; NICHOLSON, H. H. and FIRTH, D. H. : "The Effect of Ground Water-level upon Productivity and Composition of Fenland Grass." *J. Agric. Sci.*, Vol. 41, 1951, pp. 191-202.
- (10) FAO/UNESCO : "Irrigation, Drainage and Salinity." Hutckinson, Paris, 1973, pp. 260-279.
- (11) FERNANDEZ, R. and LAIRD, R. J. : "Efecto de la Humedad del Suelo y de la Fertilizacion con Nitrogeno sobre la Calidad y el Rendimiento del Trigo." *Folleto Tecnico S. A. 6.*, No. 27, 1958.
- (12) FLINN, J. C. and MUSGRAVE, W. F. : "Development and Analysis of Input-Output Relations for Irrigation Water." *Austr. J. Agric. Econ.*, Vol. 11, 1967, pp. 1-19.
- (13) FLINN, J. C. : "The Simulation of Crop-Irrigation Systems." In J. B. Dent, edo, "Systems Analysis in Agricultural Management." John Wiley and Sons, Australia, 1971, pp. 123-152.
- (14) GRIMES, D. W. and MUSICK, J. T. : "Effect of Plant Spacing, Fertility and Irrigation Management on Grain Sorghum Production." *Agron. J.*, Vol. 52, 1960, pp. 647-650.
- (15) HAGAN, R. M., ed. : "Irrigation of Agricultural Lands." *Am. Soc. Agron., Wisc.*, 1967.
- (16) HAGAN, R. M. and STEWART, J. I. : "Water Deficits, Irrigation Design and Programming." *J. Irrig. Drain. Div.*, Vol. 98, 1972, pp. 215-235.
- (17) HOOGHOUDT, S. B. : "Resultaten van het grondwaterstands proefuel te Nieuwbeerta." *Versl. Techn. Bijenk. Hidrol. Comm. TNO*, Vol. 1-6, 1952, pp. 56-63.
- (18) JENSEN, M. E. : "Les besoins d'eau des Cultures." *Trans. Int. Comm. Irrig. and Drain*, 7th Congress Irrig. and Drain., Mexico, 2, 1969, F Q 23.
- (19) KOZLOWSKI, T. T., ed. : "Water Deficits and Plant Growth." Academic Press, N. Y., 1968.
- (20) LEGGETT, G. E. : "Relationships between Wheat Yield, Available Moisture and Available Nitrogen in Eastern Washington Dryland Areas." *Wash. Agr. Exp. Sta. Bull. Nr. 609*, 1959.
- (21) LEMBKE, W. D. and JONES JR., B. A. : "Selecting a Method for Scheduling Irrigation Using a Simulation Model." *Trans. A. S. A. E.*, 1972, pp. 284-286.
- (22) MUSICK, J. T.; GRIMES, D. W. and HERRON, G. M. : "Irrigation Water Management and Nitrogen Fertilization in Grain Sorghums." *Agron. J.*, Vol. 55, 1963, pp. 295-298.
- (23) NICHOLSON, H. H. and FIRTH, D. H. : "The Effect of Ground Water-Level on the Performance and Yield of Some Common Crops." *J. Agric. Sci.*, Vol. 43, 1953, pp. 95-104.
- (24) PENMAN, H. L. : "Natural Evaporation from Open Water, Bore Soil and Grass." *Proc. Royal Soc.*, Vol. 193A, 1948, pp. 120-145.
- (25) PIERRE, W. H.; KIRKHAM, D.; PESEK, J. and SHAW, R. : "Plant Environment and Efficient Water Use." *Amer. Soc. Agron. Soil Sci. Soc. Amer.*, 1966.
- (26) ROBINS, J. S. and DOMINGO, C. E. : "Some Effects of Severe Soil Moisture Deficits at Specific Growth Stages in Corn." *Agron. J.*, Vol. 45, 1953, pp. 618-621.
- (27) ROBINS, J. S. and DOMINGO, C. E. : "Moisture and Nitrogen Effects on Irrigated Spring Wheat." *Agron. J.*, Vol. 54, 1962, pp. 135-138.
- (28) SALAMIN III *Congres International des Irrigation et du Drainage (To sec Poiree and Olier "Assainissement Agricole" Eyrolles, Paris 1969).*
- (29) SLATYER, R. O. : "Plant Water Relationships." Academic Press, N. Y., 1967.
- (30) STEWART, J. I. and HAGAN, R. M. : "Function to Predict Effects of Crop Water Deficits." *J. Irrig. Drain. Div.*, Dec. 1973, IR4, pp. 421-439.
- (31) TAYLOR, S. A. and ASHCROFT, G. L. : "Physical Edaphology." W. H. Freeman and Co., Sn. Fco., 1972.
- (32) WISER, E. H. : "Irrigation Planning Using Climatological Data." *Proc. A.S.A.E.*, Vol: 91, 1965, pp. 1-12.



**HIDROLOGIA SUPERFICIAL**

**EVAPOTRANSPIRACION**

**APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS Y DE RIEGO**

**ING. JOSE ANTONIO FERNANDEZ  
ESPARZA**

**OCTUBRE DE 1977**



## APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS Y DE RIEGO

### LLUVIA EFECTIVA O APROVECHABLE

Se denomina lluvia efectiva o aprovechable a la fracción de la precipitación total que pueden utilizar los cultivos para satisfacer las necesidades de agua.

Hay varios métodos para cuantificar dicha lluvia efectiva, únicamente se explicarán los métodos empleados en el departamento de canales y distritos de riego de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.

### METODO DE DEPARTAMENTO DE CANALES:

Se aplica la fórmula de Prescott que considera que cuando el 80 % de la precipitación es mayor o igual a 0.9 de la evapotranspiración a la potencia de 0.75 determinada por el método analítico de Thornthwaite, se toma en cuenta

Es decir:

$$\text{Si } 0.8 P \geq 0.9 E^{0.75}$$

Donde:

p- Precipitación

E - Evapotranspiración determinada por el método de Thornthwaite.

El método de Thornthwaite, es aceptable en zonas húmedas con vegetación abundante, aumentando los errores en zonas semiáridas o áridas. La falla que tiene este método, es que no toma en cuenta el tipo de cultivo ni





el tipo de suelo.

El método de Thornthwaite, consiste en una relación simple que emplea datos climatológicos accesibles, basándose en la latitud y la temperatura, demostrándose que esta última constituye un buen índice de la energía en un lugar específico.

La relación es:

$$E = 1.6 \left( \frac{10T}{I} \right)^a$$

Donde:

E - Evapotranspiración mensual en cm

T - Temperatura media mensual en °C

a - Constante que depende del lugar y es función del índice de la eficiencia anual de temperatura (I), cuyo valor es:

$$a = 0.000\ 000\ 675I^3 - 0.0000771I^2 + 0.01792I + 0.49239$$

I - Índice anual de temperatura. Es la suma de los índices de las eficiencias mensuales de temperatura. (i)

$$I = \sum_{i=1}^{12} i, \quad i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

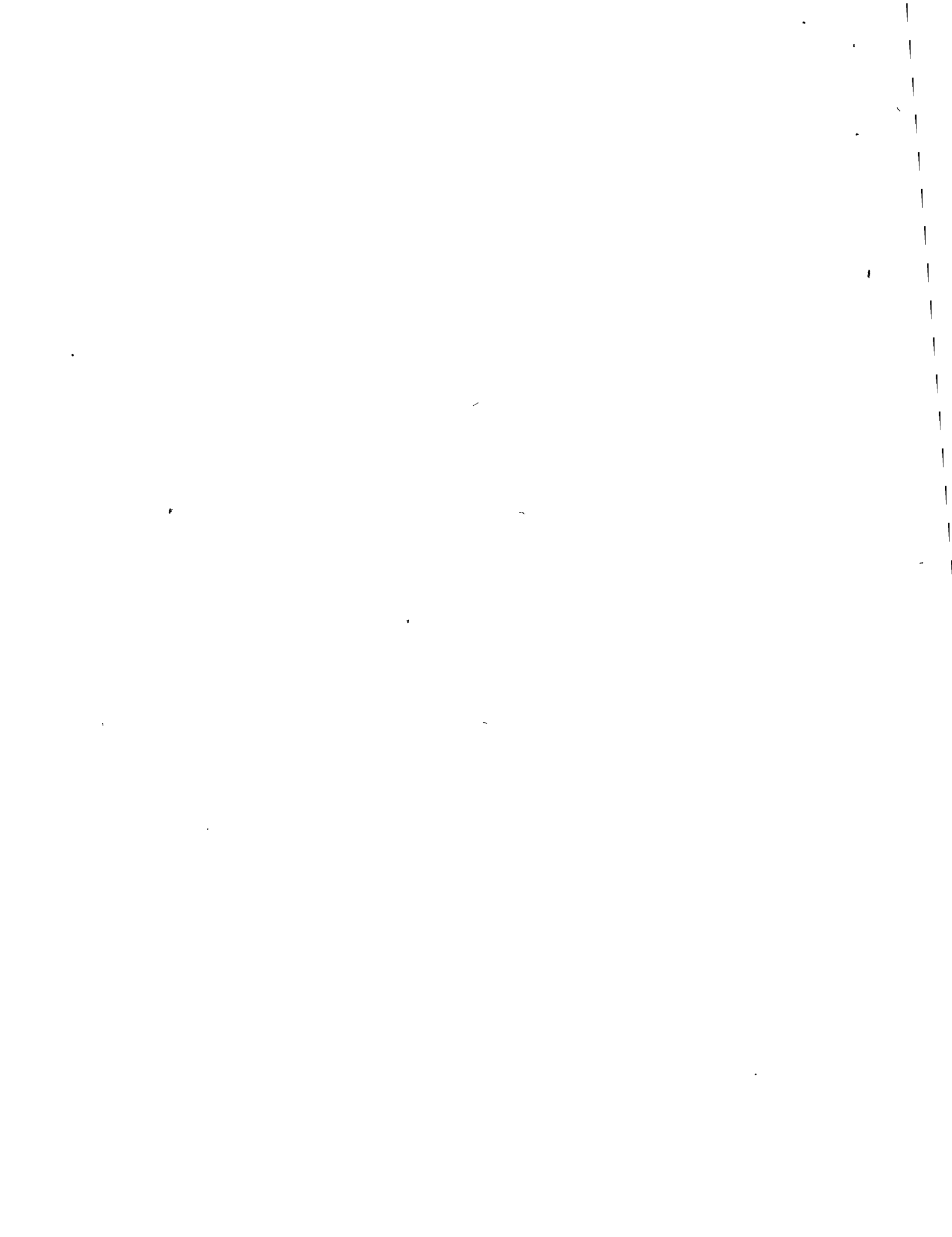
La secuela de cálculo es la siguiente:

1. - Se calculan las temperaturas medias mensuales (T)

2. - Se calculan los valores de las eficiencias mensuales de temperatura por medio de la fórmula.

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

3. - Se determina el valor de la eficiencia anual de la temperatura, su-



mando los valores calculados.

4. - Se calcula el exponente "a" aplicando la fórmula.

$$a = 0.000\ 000\ 675I^3 - 0.0000771I^2 + 0.01792I + 0.49239$$

5. - Se estima la evapotranspiración en el mes considerando en función de la temperatura media anual aplicando la fórmula.

$$E = 1.6 \left( \frac{10T}{I} \right)^a$$

En la tabla de la siguiente hoja se muestra un cálculo de lluvia efectiva aplicando la fórmula de Prescott al método de Thornthwaite.



Método de Thornthwaite para una serie de datos.

MESES	TEMPERATURA MEDIA EN °C	I	Evapotranspi- ración en cms
Enero	13.9	4.70	4.39
Febrero	15.7	5.65	5.40
Marzo	17.9	6.90	6.60
Abril	19.4	7.79	7.80
Mayo	20.1	8.22	8.50
Junio	20.1	8.22	8.50
Julio	19.3	7.73	7.70
Agosto	19.3	7.73	7.70
Septiembre	18.5	7.25	7.00
Octubre	16.8	6.24	5.90
Noviembre	15.5	5.55	5.30
Diciembre	14.3	4.91	4.60
TOTALES		I = 80.91	



Método de Prescott cuando  $0.8P > 0.9E^{0.75}$

MESES	Precipit. (mm)	0.8P (cm)	E (cm)	$E^{0.75}$	$0.9E^{0.75}$	Lluvia efectiva 50%
Enero	10.3	0.82	4.39	3.03	2.73	
Febrero	2.8	0.22	5.40	3.54	3.19	
Marzo	8.3	0.66	6.60	4.12	3.71	
Abril	34.0	2.72	7.80	4.67	4.20	
Mayo	64.5	4.36	8.50	4.98	4.48	
Junio	77.6	6.21	8.50	4.98	4.48 *	3.58
Julio	70.2	5.62	7.70	4.62	4.16 *	3.58
Agosto	68.3	5.46	7.70	4.62	4.16 *	3.58
Septiembre	70.5	5.64	7.00	4.30	3.87 *	3.58
Octubre	38.3	3.06	5.90	3.79	3.41	
Noviembre	13.2	1.06	5.30	3.49	3.14	
Diciembre	5.9	0.47	4.60	2.14	2.83	

\* Valores de  $0.8P > 0.9E^{0.75}$

$$\text{Lluvia efectiva } 50\% = \frac{(77.6 + 70.2 + 68.3 + 70.5) / 100}{4 \text{ (meses)}} \times 0.50 = 3.58 \text{ mm.}$$





METODO APLICADO EN EL DEPARTAMENTO DE DISTRITOS  
DE RIEGO

Dependiendo del número de estaciones hidrométricas la secuela de dicho método es la siguiente:

1.- Sobre el plano de la zona se trazan los polígonos de Thiessen, para seleccionar las estaciones representativas de cada área, dependiendo de la influencia que tengan en la zona de riego.

2.- Se calculan las lluvias decenales para todo el periodo de datos de las estaciones de medición seleccionadas. Estos datos se integran a partir de la información recabada sobre la altura de precipitación diaria..

Para fines prácticos se consideran 36 decenas al año.

3.- Se obtienen lluvias decenales medias prorrateando los datos de las estaciones seleccionadas de acuerdo con la influencia relativa de cada una de ellas sobre la zona de riego en estudio.

4.- Se construyen tablas y gráficas de frecuencia para cada una de las 36 decenas al año de acuerdo con el siguiente criterio:

- Para una decena se enlistan todos los datos en orden descendente del periodo.

- Se asigna un número de orden "m" a cada uno de los datos de la lista. Así al mayor valor le corresponde m=1, al que sigue m=2, etc.

- Se calcula la frecuencia relativa de los datos decenales mediante la expresión:

$$f = \frac{m}{N+1} (100\%)$$

Donde N es el número de años.

5.- Se selecciona una frecuencia de diseños que de acuerdo a la Secretaría de Recursos Hidráulicos es una probabilidad del 80%.



6.- Se lee en las gráficas o bien interpolando en las tablas para cada una de las 36 decenas del año se calcula la altura de lluvia decenal para la frecuencia seleccionada.

7.- A partir de una relación empírica de lámina de lluvia diaria, propuesta por el ingeniero Luis Zierold Reyes de la Subsecretaría de Operación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, se estiman las láminas de precipitación aprovechable para cada mes del año.

Como dichas tablas requieran datos de lluvia diaria, para utilizarlas es necesario dividir las lluvias decenales entre el número de días con lluvia apreciable en esa decena.

8.- Finalmente se integra la lluvia mensual aprovechable sumando las obtenidas para cada una de las 3 decenas del mes.



POE EJEMPLO:

Para el mes de abril la gráfica es:

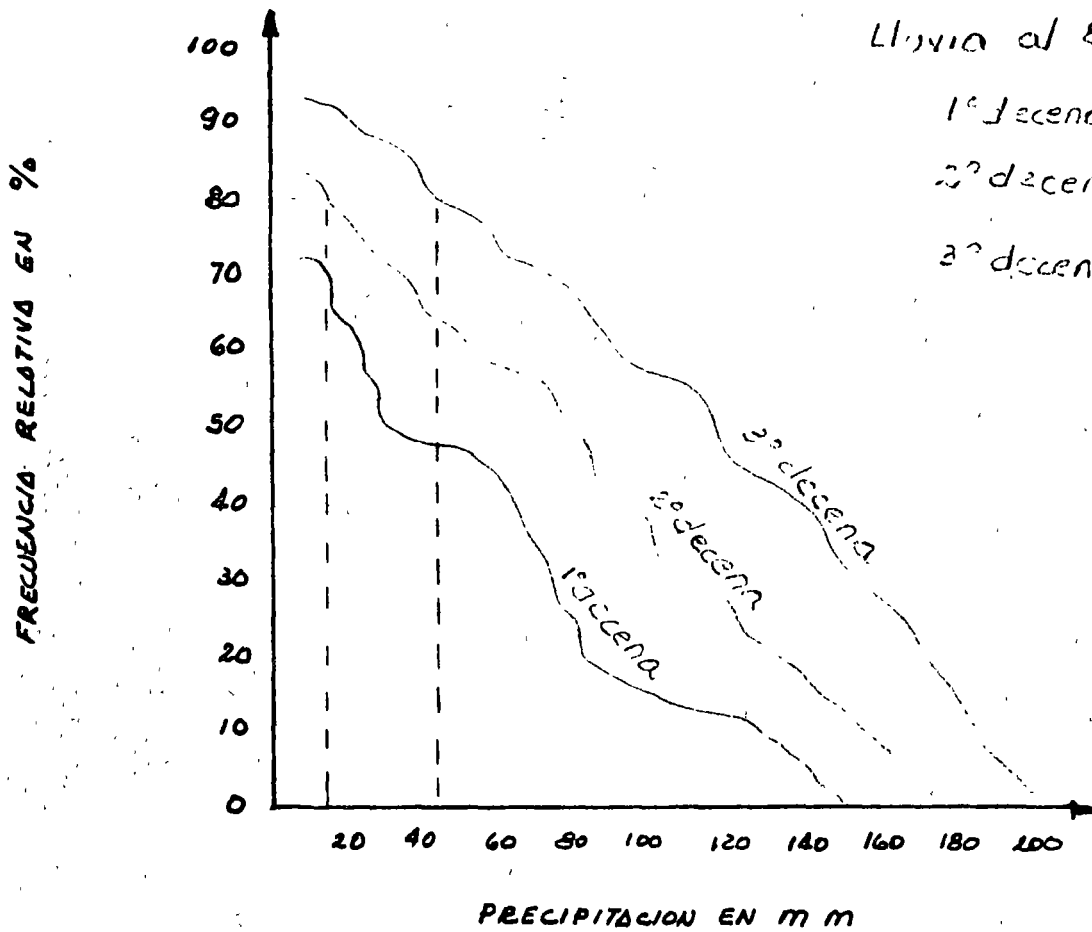
MES: ABRIL

Lluvia al 80% en mm

1ª decena - 0.0

2ª decena - 17.0

3ª decena - 43.2





### Nota sobre la determinación de la lluvia aprovechable por los cultivos. -

A continuación se expone la metodología adoptada por esta oficina para estimar la lluvia aprovechable:

1. De planos de la zona se seleccionan las estaciones pluviométricas que se consideren representativas del área, tratando que estén distribuidas lo más uniformemente posible. En nuestra zona se tomaron las estaciones C. Altamirano y Las Gaitas.
2. Se recopilan los datos de altura de precipitación diaria de las estaciones consideradas.
3. En cada estación se calculan las lluvias decenales para todo el período de datos (se consideran 36 decenas/año).
4. Para todo el período de datos se obtienen las lluvias decenales medias ~~promediando~~ <sup>promediando</sup> los datos de las estaciones consideradas.
5. Se construye una tabla o gráfica de frecuencias para cada una de las 36 decenas del año, de acuerdo con el siguiente criterio:
  - a) Para una decena determinada, se enlistan los datos de todos los años del período en orden descendente de magnitud.
  - b) Se asigna un número de orden  $m$  a cada uno de los datos de la lista. Así, al mayor valor le corresponde  $m=1$ ; al que le sigue  $m=2$ , etc.
  - c) Se calculan las frecuencias relativas de los datos decenales mediante la expresión:
$$f = \frac{m}{n+1} (100\%)$$
siendo  $n$  el número de años analizado.
6. Se selecciona la frecuencia de diseño. En la generalidad de los casos un valor de 30% parece adecuado.
7. Leyendo en las gráficas, o bien, interpolando en las tablas, para cada una de las 36 decenas del año se calcula la altura de lluvia decenal para la frecuencia seleccionada.





8. Hasta ahora hemos estado trabajando con lluvias acumuladas cada diez días, las tablas publicadas por el Ing. Zierold para calcular la lluvia aprovechable requieren datos de lluvia diaria. Para poder utilizar las tablas es necesario obtener la altura de precipitación diaria a partir de la decenal acumulada, la cual pudo ocurrir en uno solo de los diez días, o en dos, o tres, etc. La esperanza matemática de días con lluvia en la decena es de cinco. De acuerdo con esto para obtener la lluvia diaria es necesario dividir entre 5 la altura de precipitación decenal.
9. De las tablas publicadas por el Ing. Zierold se obtiene la lluvia diaria aprovechable en cada decena y, de acuerdo a las consideraciones expuestas en el punto anterior, se multiplica por 5 para obtener la lluvia decenal aprovechable.
10. Se integra la lluvia mensual aprovechable sumando la aprovechable en cada una de las tres decenas del mes.



INGENIEROS CONSULTORES Y PROYECTISTAS

PROYECTO: Las Garzas, Gro.

CALCULO: H. H. P.

FECHA: 19/II/75.

DETALLE: Calculo de lluvia aprovechable.

REVISOR: \_\_\_\_\_

FECHA

FECHA

1956

1957

1958

mes	Las Garzas	Cd. Altamirón	Promedio
E	—	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
F	—	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
M	—	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
A	—	3.1 5.0 5.0	0.0 0.0 5.0
M	—	0.8 101.2 101	0.8 101.2 101
J	—	74.7 88.3 122.0	74.7 88.3 122
J	—	87 129 96	87 129 96
A	—	22 35.5 61	22 35.5 61
S	—	(876) (876) (876)	(876) (876) (876)
O	—	0.0 48.5 0.0	0.0 48.5 0.0
N	—	1 1 23.5	1 1 23.5
D	—	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0

mes	Las Garzas	Cd. Altamirón	Promedio
E	(7.8) (7.6) (7.6)	(5.4) (5.4) (5.4)	6.5 6.5 6.5
F	(0.1) (0.1) (0.1)	(0.2) (0.2) (0.2)	0.2 0.2 0.2
M	(0.1) (0.1) (0.1)	0.0 0.0 0.0	0.1 0.1 0.1
A	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
M	0.0 0.0 14.5	(19.0) (19.0) (19.0)	9.5 9.5 16.8
J	3.2 46.4 40.0	0 63 34	1.6 54.7 37
J	10.0 25.0 29.0	61.1 77 14	35.55 51 21.5
A	59.7 77.0 110.0	33 35 50	46.55 56 80
S	28.1 87.6 80.0	39.3 72 117.5	33.7 79.8 99.75
O	0.0 27.1 20.2	0.0 19.5 12	0.0 23.5 16.1
N	15.5 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	7.8 0.0 0.0
D	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0

mes	Las Garzas	Cd. Altamirón	Promedio
E	56.2 (56.2) 56	13.5 87.0 1.0	33.1 71.6 28.1
F	(0.8) (0.8) (0.8)	0.0 0.0 0.0	0.4 0.4 0.4
M	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
A	(8.0) (8.0) (5.0)	0.0 0.0 0.0	4.0 4.0 4.0
M	(2.5) (2.5) (2.5)	0.0 0.0 38.0	1.3 1.3 3.3
J	(41.5) (41.5) (41.5)	45.4 9.3 7.0	43.5 25.4 24.3
J	(65.5) (65.5) (65.5)	(61.4) (61.4) (61.4)	77.5 77.5 77.5
A	(77.7) (77.7) (77.7)	(63.1) (63.1) (63.1)	70.4 70.4 70.4
S	(119.3) (119.3) (119.3)	(67.6) (67.6) (67.6)	94.5 94.5 94.5
O	(28.6) (28.6) (28.6)	4.6 2.2 0.2	15.1 15.4 14.4
N	(23.8) (23.8) (23.8)	40.0 13.0 0.0	32.9 19.4 12.9
D	(4.5) (4.5) (4.5)	0.0 0.2 0.0	2.3 2.4 2.3



INGENIEROS CONSULTORES Y PROYECTISTAS

PROYECTO: Las Garzas, Gro.

CALCULO: H. H. P.

19/II/75.

DETALLE: Cálculo de lluvias aprovechable.

REVISOR: \_\_\_\_\_

FECHA

FECHA

1959

1960

1961

mes	Las Garzas	Cd. Altamirón	Promedio
E	(4.5) 4.5 (4.5)	0.0 0.0 0.0	2.3 2.3 2.3
F	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
M	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
A	(15.8) (15.8) (15.8)	0.0 3.1 0.0	7.9 9.5 7.9
M	(44.8) (44.8) (44.8)	(31.3) (30.5) (30.2)	37.6 37.6 37.6
J	(70.7) (70.7) (70.7)	(98.6) (98.6) (98.6)	84.7 84.7 84.7
J	(50.0) (50.0) (50.0)	(89.8) (89.8) (89.8)	69.9 69.9 69.9
A	(129.0) (129.0) (129.0)	(106.3) (106.3) (106.3)	117.7 117.7 117.7
S	(59.8) (59.8) (59.8)	(69.6) (69.6) (69.6)	54.2 54.2 54.2
O	(34.5) (34.5) (34.5)	33.5 39.5 16.0	34.0 37.0 25.3
N	(1.8) (1.8) (1.8)	0.0 0.0 0.0	0.9 0.9 0.9
D	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0

mes	Las Garzas	Cd. Altamirón	Promedio
E	0.0 0.0 0.0	(0.5) (0.5) (0.5)	0.0 0.3 0.0
F	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
M	(0.3) (0.3) (0.3)	0.0 0.0 0.0	0.15 0.15 0.15
A	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
M	(7.1) (7.1) (7.1)	0.0 0.0 7.5	3.6 3.6 7.3
J	(68.5) (68.5) (68.5)	(22.5) (22.5) (22.5)	45.5 45.5 45.5
J	(122.8) (122.8) (122.8)	33 87.5 71.5	63.1 105.2 97.2
A	(59.8) (59.8) (59.8)	(63.1) (63.1) (63.1)	59.0 59.0 59.0
S	(61.3) (61.3) (61.3)	(35.2) (35.2) (35.2)	48.8 48.8 48.8
O	(24.0) (24.0) (24.0)	30.0 52.5 17.0	27.0 38.3 20.5
N	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
D	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0

mes	Las Garzas	Cd. Altamirón	Promedio
E	0.0 0.0 0.2	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.1
F	0.0 0.0 0.0	(0.2) (0.2) (0.2)	0.1 0.1 0.1
M	0.0 0.0 0.1	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.05
A	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0	0.0 0.0 0.0
M	(5.0) (5.0) (5.0)	0.0 6.5 0	2.5 5.8 2.5
J	(85.5) (85.5) (85.5)	(41.0) (41.0) (41.0)	63.3 63.3 63.3
J	(116.0) (116.0) (116.0)	56.5 62.0 127.5	86.3 89.0 121.8
A	(88.3) (88.3) (88.3)	(22.0) (22.0) (22.0)	55.2 55.2 55.2
S	(61.3) (61.3) (61.3)	(69.6) (61.6) (61.6)	65.5 65.5 65.5
O	31.1 1.5 5.5	(21.3) (21.3) (21.3)	26.2 11.4 13.4
N	29.5 45.5 0.0	(2.2) (2.2) (2.2)	15.4 23.9 1.1
D	0.0 0.0 0.0	(0.6) (0.6) (0.6)	0.3 0.3 0.3



INGENIEROS CONSULTORES Y PROYECTISTAS

PROYECTO: Las Garzas, Gro.

CALCULO: H. H. P.

19/10/75  
FECHA

DETALLE: Calculo de lluvia aprovechable.

REVISOR: \_\_\_\_\_

FECHA

1962

1963

1964

mes	Las Garzas	Cd. Altavirgan	Promedio
E	0.0	(54)	2.7
	0.0	(54)	2.7
	0.0	(54)	2.7
F	0.0	(0.2)	0.1
	0.0	(0.2)	0.1
	0.0	(0.2)	0.1
M	0.0	(0.1)	0.1
	0.0	(0.1)	0.1
	0.0	(0.1)	0.1
A	0.0	0.0	0.0
	1.2	0.0	0.6
	0.0	0.0	0.0
M	3.6	4.0	3.8
	54.0	13.4	33.7
	10.0	0.0	5.0
J	8.8	5.2	7.05
	29.2	32.2	30.25
	112.3	82.5	100.4
J	122.8	45.2	84.0
	107.6	40	73.8
	50.6	53.5	55.05
A	(86.4)	(63.1)	74.8
	(86.4)	(63.1)	74.8
	(86.4)	(63.1)	74.8
S	66.7	80.0	73.35
	147.0	118.5	132.75
	74.8	0.0	37.4
O	96.2	(213)	53.8
	183	(213)	19.5
	3.6	(213)	17.5
N	0.0	(2.2)	1.1
	0.0	(2.2)	1.1
	0.0	(2.2)	1.1
D	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0

mes	Las Garzas	Cd. Altavirgan	Promedio
E	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
A	0.0	(0.3)	0.15
	0.0	(0.3)	0.15
	0.0	(0.3)	0.15
M	(11.7)	1.0	6.4
	(11.7)	1.0	6.4
	(11.7)	15.0	13.4
J	(35.1)	(46.5)	41.1
	(35.7)	(46.5)	41.1
	(35.7)	(46.5)	41.1
J	46.5	(71.0)	58.8
	71.0	(71.0)	71.0
	98.5	(71.0)	84.5
A	84.0	78.5	81.25
	114.5	103.0	108.75
	184.0	159.5	171.75
S	(101.7)	(32.0)	69.9
	(101.7)	(32.0)	61.1
	(101.7)	(32.0)	69.9
O	(38.7)	30.5	34.6
	(38.7)	14.0	26.9
	(38.7)	25.0	31.7
N	8.0	0.0	4.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
D	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0

mes	Las Garzas	Cd. Altavirgan	Promedio
E	43.5	33.5	28.5
	1.0	0.0	0.5
	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
A	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	0.0	0.0	0.0
	0.0	2.5	1.25
	11.0	12.0	11.5
J	(102.7)	7.5	50.1
	(102.7)	160.0	131.4
	(102.7)	116.5	110.6
J	(112.0)	9.70	107.5
	(112.0)	145.0	129.0
	(112.0)	41.0	124.0
A	(74.3)	94.0	84.2
	(74.3)	73.0	73.7
	(74.3)	99.5	86.4
S	(187.2)	116.0	151.6
	(187.2)	122.5	154.9
	(187.2)	76.5	131.9
O	36.0	50.0	43.0
	20.0	26.5	24.25
	1.0	0.0	0.5
N	(0.2)	7.0	3.6
	(0.2)	0.0	0.1
	(0.2)	6.0	3.1
D	4.0	6.0	4.5
	5.0	4.5	3.8
	0.0	0.0	0.0





INGENIEROS CONSULTORES Y PROYECTISTAS

PROYECTO: Las Garzas, Gro.

CALCULO: H. H. P.

FECHA: 17/II/75.

DETALLE: Calculo de lluvia aprovechable.

REVISOR: \_\_\_\_\_

FECHA

FECHA

1965

1966

1967

mes	Las Garzas	Cd. Altamirán	Promedio
E	(3.7)	0.0	1.9
	(3.7)	0.0	1.9
	(3.7)	2.0	2.9
F	0.0	(0.2)	0.1
	0.0	(0.2)	0.1
	0.0	(0.2)	0.1
M	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
A	3.0	1.5	2.3
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	6.0	9.0	4.5
	2.0	19.0	10.5
	0.0	0.0	0.0
J	(40.2)	16.0	28.1
	(40.2)	21.5	35.9
	(40.2)	141.5	90.9
J	(87.5)	(86.3)	87.8
	(87.5)	(86.3)	87.8
	(87.5)	(86.3)	87.8
A	(105.0)	(63.1)	84.1
	(105.0)	(63.1)	84.1
	(105.0)	(63.1)	84.1
S	(53.5)	(49.3)	61.7
	(53.5)	(49.3)	61.7
	(53.5)	(49.3)	61.7
O	(27.6)	(21.3)	24.5
	(27.6)	(21.3)	24.5
	(27.6)	(21.3)	24.5
N	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
D	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0

mes	Las Garzas	Cd. Altamirán	Promedio
E	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	0.0	0.0	0.0
	1.0	0.0	0.5
	0.0	0.0	0.0
A	(11.0)	14.5	12.8
	(11.0)	0.0	5.5
	(11.0)	0.0	5.5
M	(21.5)	0.0	10.5
	(21.5)	22.5	22.0
	(21.5)	174.5	98.0
J	(29.3)	0.5	29.7
	(59.3)	225.5	142.4
	(59.3)	66.0	67.1
J	(108.0)	146.0	127.0
	(108.0)	71.0	87.5
	(108.0)	119.0	113.5
A	(64.3)	22.5	43.7
	(64.3)	14.5	69.7
	(64.3)	49.5	56.9
S	116.0	98.5	107.25
	90.5	11.5	51.0
	14.0	26.0	20.0
O	17.5	21.0	19.25
	13.0	42.5	27.75
	0.5	5.0	6.75
N	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
D	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0

mes	Las Garzas	Cd. Altamirán	Promedio
E	31.0	30.0	30.5
	90.5	88.5	89.5
	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
A	1.5	0.0	0.75
	1.0	6.0	3.5
	0.0	6.0	0.0
M	0.0	0.0	0.0
	12.0	16.0	14.0
	3.5	41.0	22.25
J	(82.7)	58.5	70.6
	(82.7)	51.5	67.1
	(82.7)	83.5	85.6
J	(100.2)	133.5	116.9
	(100.2)	28.5	64.4
	(100.2)	100.5	100.4
A	(124.5)	66.5	95.5
	(124.5)	130.5	127.5
	(124.5)	119.5	122.0
S	(46.0)	(48.3)	97.2
	(46.0)	(48.3)	97.2
	(46.0)	(48.3)	97.2
O	39.5	22.0	30.75
	69.0	18.0	43.5
	8.0	2.5	5.25
N	0.0	(0.3)	0.4
	0.0	(0.3)	0.4
	0.0	(0.3)	0.4
D	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	14.5	7.3



INGENIEROS CONSULTORES Y PROYECTISTAS

PROYECTO: Las Garzas, Gro.

CALCULO: H. H. I.

19/11/75

DETALLE: Calculo de horas aprovechables.

REVISOR: \_\_\_\_\_

FECHA

FECHA

1968

1969

1970

Mes	Las Garzas	Cd. Altamirano	Promedio
E	0.0	0.0	0.0
	3.0	0.0	1.5
	1.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0
	0.0	7.5	3.75
	0.0	0.0	0.0
M	3.0	6.5	4.75
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
A	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	(378)	43.5	41.7
	(378)	45.5	42.7
	(375)	26.5	33.2
J	(750)	(75.5)	75.3
	(75.0)	(75.5)	75.3
	(75.0)	(75.5)	75.3
J	59.0	(90.2)	74.6
	38.5	(70.2)	64.4
	59.5	(90.2)	74.9
A	154.0	(79.5)	116.8
	36.5	(79.5)	58.0
	139.0	(79.5)	109.3
S	(583)	11.5	34.9
	(58.3)	42.5	50.4
	(58.3)	112.0	85.2
O	67.5	66.5	61.0
	18.5	77.5	48.0
	28.5	19.5	24.0
N	0.5	1.0	0.75
	0.0	0.0	0.0
	2.5	1.0	1.75
D	6.0	4.5	5.25
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0

Mes	Las Garzas	Cd. Altamirano	Promedio
E	4.0	3.0	3.5
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	0.0	0.0	0.0
	1.0	0.0	0.5
	0.0	0.0	0.0
A	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	0.0	0.0	0.0
	0.0	1.0	0.5
	10.0	1.5	5.75
J	2.0	0	1.0
	21.0	24.5	22.75
	76.0	70.5	73.25
J	(1015)	58.5	80.0
	(1015)	96.5	99.0
	(1015)	158.0	129.8
A	(1232)	(632)	93.2
	(1232)	(632)	93.2
	(1232)	(632)	93.2
S	(1075)	(696)	88.6
	(1075)	(696)	88.6
	(1075)	(696)	88.6
O	6.5	(213)	13.9
	32.0	(213)	26.7
	0.0	(213)	10.7
N	0.0	(2.2)	1.1
	0.0	(2.2)	1.1
	0.0	(2.2)	1.1
D	0.0	(0.6)	0.3
	0.0	(0.6)	0.3
	0.0	(0.6)	0.3

Mes	Las Garzas	Cd. Altamirano	Promedio
E	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
F	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
A	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	(63)	0.0	3.2
	(63)	0.0	3.2
	(63)	0.0	3.2
J	(1642)	120.5	112.4
	(1042)	38.5	71.4
	(1042)	89.0	96.6
J	(855)	28.0	56.8
	(855)	68.0	76.8
	(855)	64.5	75.0
A	(835)	(60.0)	71.8
	(835)	(60.0)	71.8
	(835)	(60.0)	71.8
S	(900)	(785)	84.3
	(900)	(785)	84.3
	(900)	(785)	84.3
O	(177)	71.0	44.4
	(177)	7.0	12.4
	(177)	2.0	9.4
N	4.0	7.0	5.5
	23.0	0.0	11.5
	0.0	0.0	0.0
D	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0



INGENIEROS CONSULTORES Y PROYECTISTAS

PROYECTO: Las Garzas, Cro.

CALCULO: 11.11.75

20/II/75

DETALLE: Calculo de horas aprovechables.

REVISOR: \_\_\_\_\_

FECHA

FECHA

1971

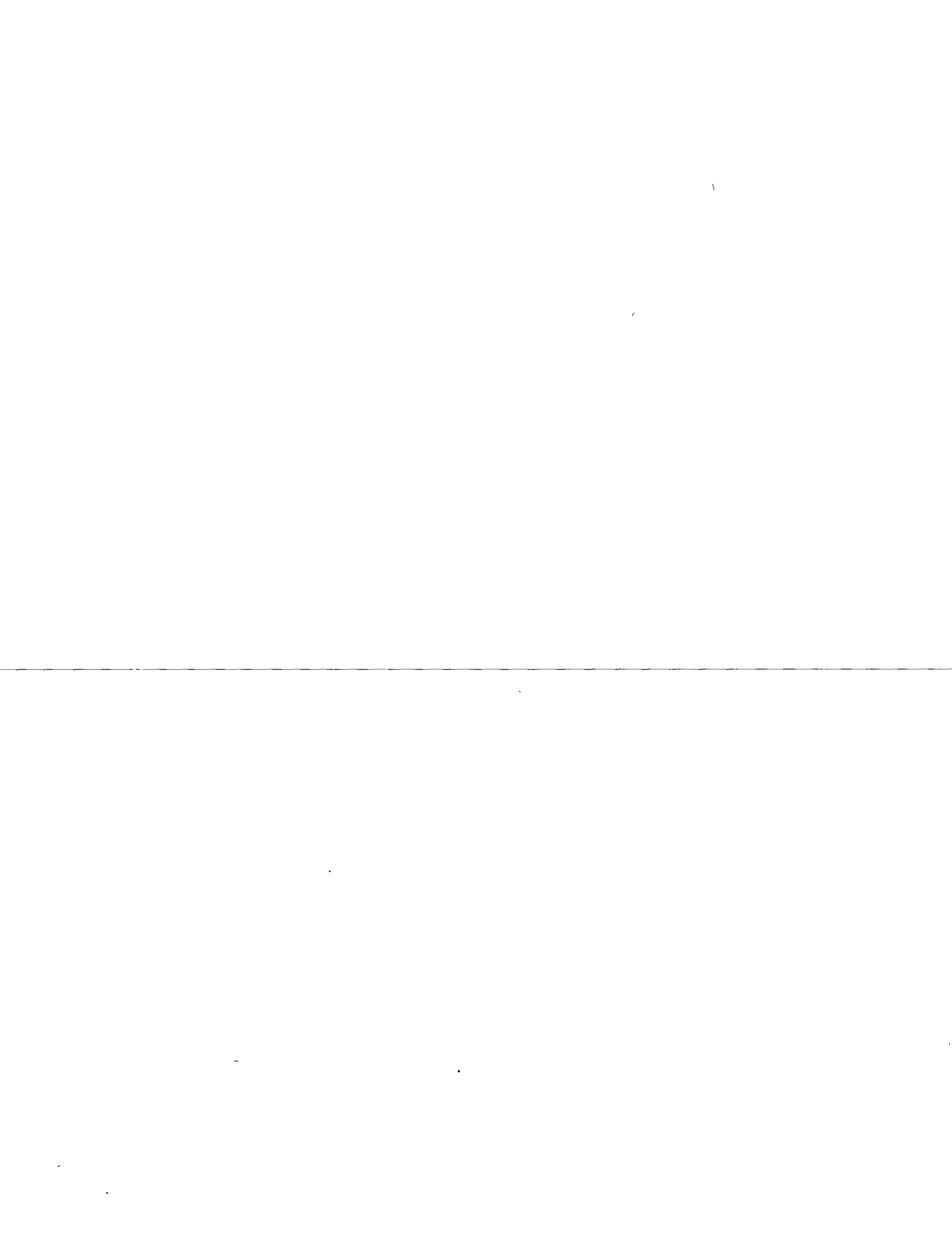
1972

1973

Mes	Las Garzas	Cd. Altamirán	Promedio
E	00	0.0	6.0
	00	0.0	0.0
	00	0.0	0.0
F	00	0.0	0.0
	00	0.0	0.0
	00	0.0	0.0
M	(0.3)	(0.1)	6.2
	(0.3)	(0.1)	0.3
	(0.3)	(0.1)	0.2
A	(2.4)	(0.7)	1.6
	(2.4)	(0.7)	1.6
	(2.4)	(0.7)	1.5
M	(12.1)	(11.0)	15.6
	(12.1)	(11.0)	12.6
	(12.1)	(11.0)	12.0
J	21.0	1.0	11.0
	28.0	74.5	51.25
	53.0	66.0	62.
J	(72.3)	56.5	64.4
	(72.3)	52.5	62.4
	(72.3)	78.0	75.2
A	(106.3)	45.5	101.2
	(106.3)	49.5	75.2
	(106.3)	73.0	69.9
S	(71.3)	64.5	66.2
	(71.3)	82.0	76.4
	(71.3)	79.0	75.4
O	(41.2)	17.5	21.4
	(41.3)	0.0	20.7
	(41.3)	11.0	22.7
N	5.0	0.0	2.5
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
D	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.1
	0.0	0.0	0.0

Mes	Las Garzas	Cd. Altamirán	Promedio
E	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.1
	0.0	0.0	0.0
F	0.0	1.0	0.1
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.1
M	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.1
	0.0	0.0	0.0
A	(1.2)	0.0	1.5
	(3.0)	1.5	2.2
	(3.0)	0.1	1.2
M	(21.3)	0.0	10.7
	(21.3)	0.0	10.7
	(21.3)	75.0	48.2
J	13.5	36.0	24.75
	129.5	78.0	113.15
	75.5	62.5	69.0
J	(131.3)	59.0	92.5
	(131.3)	21.5	50.4
	(131.3)	213.5	202.4
A	(56.0)	45.5	50.8
	(56.0)	78.0	67.0
	(56.0)	62.5	61.3
S	(76.3)	17.5	57.9
	(76.3)	18.5	72.4
	(76.3)	38.0	67.2
O	20.0	26.0	23.0
	36.0	0.5	19.25
	0.0	0.0	0.0
N	44.0	0.0	22.0
	10.0	0.0	5.0
	1.5	0.0	0.15
D	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0

Mes	Las Garzas	Cd. Altamirán	Promedio
E	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
F	0.0	(1.2)	6.1
	0.0	(1.2)	0.1
	0.0	(1.2)	0.1
M	0.0	6.6	0.0
	0.0	0.6	0.0
	0.0	0.0	0.0
A	6.5	0.0	3.25
	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0
M	0.0	(1.5)	9.3
	3.4	(18.5)	11.0
	12.5	(18.5)	15.5
J	20.5	(29.2)	24.9
	52.2	(21.2)	41.1
	139.2	(21.0)	24.2
J	(57.7)	(83.5)	71.6
	(57.7)	(83.5)	71.6
	(57.7)	(83.5)	71.6
A	(67.5)	80.3	73.4
	(67.5)	116.1	73.9
	(67.5)	47.9	73.9
S	(87.5)	(62.1)	74.8
	(87.5)	(62.1)	74.8
	(87.5)	(62.1)	74.8
O	72.5	(21.3)	46.7
	102.5	(31.3)	61.9
	23.0	(21.2)	22.2
N	0.0	(0.5)	0.25
	0.0	(0.5)	0.25
	0.0	(0.5)	0.25
D	0.0	(0.6)	0.3
	0.0	(0.6)	0.3
	0.0	(0.6)	0.3



PROYECTO: LOS GARCEROS, G.R.O.

CALCULO: M. Acosta

16/17/75

DETALLE: CALCULO DE LUMEN SPKOV.

REVISOR: \_\_\_\_\_

FECHA

FECHA

ENERO

FEBRERO

MARZO

	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1956	0	0	0
7	6.5	6.5	6.5
8	33.1	21.6	25.1
9	2.3	2.3	2.3
1960	0.3	0.3	0.3
1	0.0	0.0	0.1
2	2.7	2.7	2.7
3	0	0	0
4	35.5	0.5	0.0
5	1.2	1.2	2.2
6	0	0	0
7	30.5	89.5	0
8	0	1.5	0
9	3.5	0.0	0
1970	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0

	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1956	0	0	0
7	0.2	0.2	0.2
8	0.4	0.4	0.1
9	0	0	0
1960	0	0	0
1	0.1	0.1	0.1
2	0.1	0.1	0.1
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0.1	0.1	0.1
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	3.8	0
9	0	0	0
1970	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0.1	0.1	0.1

	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1956	0	0	0
7	0.1	0.1	0.1
8	0	0	0
9	0	0	0
1960	0.15	0.15	0.15
1	0	0	0.5
2	0.1	0.1	0.1
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0.5	0
7	0	0	0
8	4.8	0	0
9	0	0.5	0
1970	0	0	0
1	0.2	0.2	0.2
2	0	0	0
3	0	0	0

ABRIL

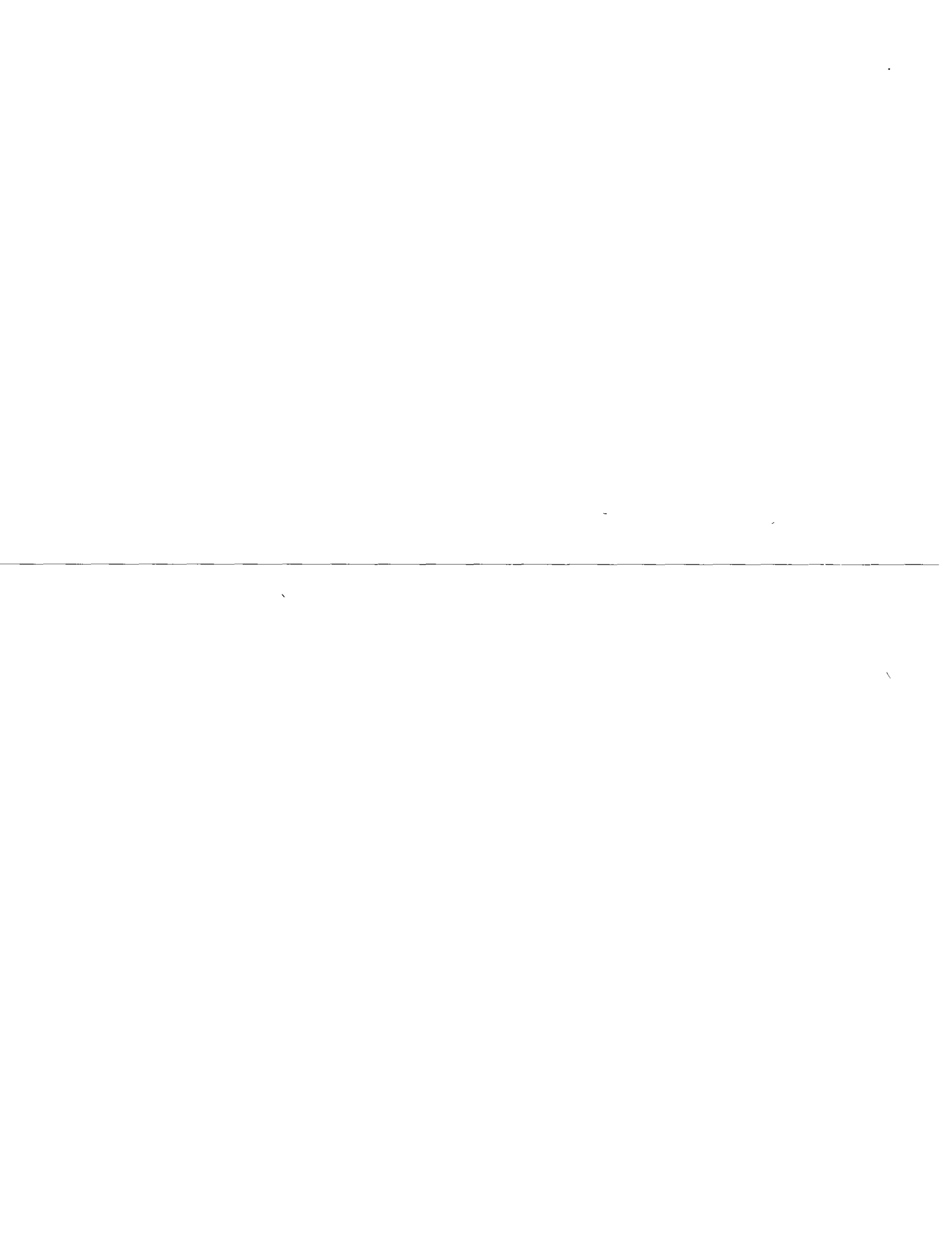
MAYO

JUNIO

	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1956	0	0	0.5
7	0	0	0
8	7.0	7.0	7.0
9	2.2	2.5	2.9
1960	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0.6	0
3	0.2	0.2	0.2
4	0	0	0
5	2.3	0	0
6	12.8	5.5	5.5
7	0.5	3.5	0
8	0	0	0
9	0	0	0
1970	0	0	0
1	1.6	1.6	1.6
2	1.5	2.2	1.5
3	3.7	0	0

	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1956	0.8	10.2	10.0
7	9.5	7.5	16.8
8	1.3	1.3	30.3
9	37.6	37.6	37.6
1960	3.6	3.6	3.6
1	2.5	5.2	5.5
2	3.8	33.7	5.0
3	6.4	6.4	13.4
4	0	1.3	11.5
5	4.5	10.5	0.0
6	10.5	22.0	9.5
7	0	14.0	22.3
8	41.7	42.7	33.2
9	0	0.5	5.5
1970	3.2	3.2	3.2
1	15.6	12.6	1.0
2	10.7	10.7	4.2
3	9.3	11.0	15.4

	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1956	79.7	88.3	122.0
7	1.6	54.7	37.0
8	43.5	35.4	24.3
9	84.7	84.7	84.7
1960	45.5	45.5	45.5
1	63.3	63.3	63.3
2	7.1	11.3	10.4
3	41.1	41.1	41.1
4	55.1	131.4	110.6
5	88.1	35.9	90.9
6	29.2	142.4	62.7
7	70.6	67.1	85.6
8	75.3	75.3	75.3
9	1.0	52.4	73.3
1970	112.4	71.4	96.6
1	11.9	51.3	62.0
2	34.2	113.3	69.0
3	24.9	41.1	84.2





C. I. E. P. S., S. C.  
INGENIEROS CONSULTORES Y PROYECTISTAS

PROYECTO: \_\_\_\_\_

CALCULO: \_\_\_\_\_

16/11/12

DETALLE: \_\_\_\_\_

REVISOR: \_\_\_\_\_

FECHA

FECHA

JULIO

AGOSTO

SEPT.

	1ª	2ª	3ª
	Decena	Decena	Decena
1956	870	1290	760
7	356	510	215
8	775	275	775
9	429	679	679
1960	431	1052	972
1	363	410	1218
2	840	738	551
3	552	710	848
4	1875	1290	1275
5	878	878	878
6	1270	875	1135
7	1167	674	1004
8	746	644	749
9	820	990	1298
1970	568	768	750
1	647	624	752
2	932	827	2024
3	716	716	716

	1ª	2ª	3ª
	Decena	Decena	Decena
1956	220	355	810
7	467	360	820
8	707	727	707
9	1177	1177	1177
1960	590	590	590
1	352	352	352
2	748	748	748
3	818	1088	1718
4	542	737	864
5	841	841	841
6	432	847	867
7	965	1815	1820
8	1168	580	1893
9	932	432	932
1970	718	718	718
1	1012	782	842
2	508	670	613
3	739	739	739

	1ª	2ª	3ª
	Decena	Decena	Decena
1956	(676)	(676)	(676)
7	337	748	458
8	845	945	945
9	512	512	512
1960	489	489	489
1	655	655	655
2	724	1326	374
3	679	679	679
4	1516	1516	1319
5	617	617	617
6	1073	510	200
7	972	972	972
8	349	507	852
9	556	556	556
1970	843	843	843
1	682	764	754
2	579	224	672
3	748	748	748

OCTUBRE

NOVIEMBRE

DICIEMBRE

	1ª	2ª	3ª
	Decena	Decena	Decena
1956	0	485	0
7	0	233	161
8	151	151	184
9	340	370	253
1960	170	383	205
1	262	114	134
2	388	178	125
3	346	264	319
4	430	343	05
5	245	215	245
6	178	278	68
7	308	435	53
8	620	490	340
9	184	267	107
1970	414	124	97
1	274	207	270
2	130	193	00
3	267	319	222

	1ª	2ª	3ª
	Decena	Decena	Decena
1956	10	10	23.6
7	7.8	0	0
8	32.9	19.4	12.9
9	0.9	0.9	0.7
1960	0	0	0
1	15.9	23.9	11
2	1.1	1.1	11
3	4.0	0	0
4	3.6	2.1	0.1
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0.7	0.4	0.4
8	0.5	1.1	1.2
9	1.1	1.1	1.1
1970	5.5	4.5	0
1	2.5	0	0
2	2.0	5.0	0.7
3	0.3	0.3	0.3

	1ª	2ª	3ª
	Decena	Decena	Decena
1956	0	0	0
7	0	0	0
8	2.3	2.4	2.3
9	0	0	0
1960	0	0	0
1	0.3	0.3	0.3
2	0	0	0
3	0	0	0
4	4.5	3.5	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	1	0	2.3
8	5.3	0	0
9	0.3	0.3	0.3
1970	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0.3	0.3	0.3



# INGENIEROS CONSULTORES Y PROYECTISTAS

PROYECTO: ESTACIONAMIENTO

CALCULO: loc. 1. 16/11/15

DETALLE: CALCULO DE CANTIDAD PAQU

REVISOR: \_\_\_\_\_ FECHA

FECHA

ENERO

FEBRERO

MARZO

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	385	895	231
2	331	716	65
3	305	65	27
4	65	27	27
5	55	23	23
6	27	19	03
7	23	15	21
8	19	05	0
9	03	03	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	04	58	1
2	02	04	01
3	01	02	01
4	01	01	01
5	01	01	01
6	01	01	01
7	0	01	01
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	48	05	02
2	02	05	02
3	02	05	01
4	01	05	01
5	01	05	01
6	0	05	0
7	0	05	0
8	0	05	0
9	0	05	0
10	0	05	0
11	0	05	0
12	0	05	0
13	0	05	0
14	0	05	0
15	0	05	0
16	0	05	0
17	0	05	0
18	0	05	0

ABRIL

MAYO

JUNIO

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	128	75	79
2	79	55	55
3	70	40	40
4	35	35	16
5	35	2	15
6	26	16	25
7	15	06	22
8	15	02	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	417	1042	1010
2	379	427	100
3	156	376	480
4	127	337	376
5	105	220	332
6	95	156	223
7	73	140	203
8	67	110	168
9	43	107	156
10	32	105	155
11	21	100	124
12	22	64	115
13	22	50	73
14	15	56	55
15	05	55	50
16	0	13	55
17	0	13	55
18	0	05	0

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	1124	1424	1220
2	847	1314	1106
3	727	1138	1104
4	753	823	766
5	706	817	909
6	633	753	856
7	551	714	847
8	455	671	842
9	435	622	753
10	411	527	733
11	319	518	670
12	291	455	623
13	277	411	627
14	242	411	520
15	170	309	455
16	171	305	411
17	16	224	370
18	10	225	243



INGENIEROS CONSULTORES Y PROYECTISTAS

PROYECTO: LAS GUZAS, GRD

CALCULO: M. Acosta

16/10/75.

DETALLE: CALCULO DE LLUVIA IMPROV

REVISOR: \_\_\_\_\_

FECHA

FECHA

JULIO

AGOSTO

SEPT

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	127.0	129.0	202.4
2	116.9	129.0	129.8
3	107.5	105.2	129.5
4	93.2	79.0	121.8
5	87.8	89.5	113.5
6	87.0	89.0	100.4
7	86.3	87.5	97.2
8	84.0	80.4	76.0
9	80.0	77.5	87.8
10	77.5	76.8	84.8
11	74.6	73.8	77.5
12	71.6	71.6	75.2
13	69.2	71.0	75.0
14	64.4	69.9	74.9
15	63.1	64.4	71.6
16	58.5	64.4	67.9
17	56.8	62.4	55.1
18	35.6	51.0	71.5

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	117.7	127.5	171.8
2	116.8	117.7	122.0
3	101.2	105.3	117.7
4	95.5	83.2	109.3
5	93.2	84.1	93.3
6	84.2	78.2	89.9
7	84.1	74.8	86.4
8	81.8	73.9	84.1
9	74.8	73.7	80.0
10	73.7	71.8	74.8
11	71.8	70.4	73.7
12	70.1	69.7	71.8
13	59.0	67.0	70.4
14	55.2	59.0	61.3
15	50.8	59.0	61.0
16	46.4	56.0	59.0
17	43.7	55.2	56.9
18	22.0	35.5	55.2

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	151.6	154.9	131.9
2	107.3	132.8	98.6
3	97.2	97.2	97.7
4	74.5	74.5	74.5
5	88.6	88.6	88.6
6	84.3	84.3	85.2
7	74.8	72.8	84.3
8	73.4	76.9	75.4
9	69.9	74.8	74.8
10	69.6	72.4	69.9
11	68.2	69.9	68.6
12	65.5	69.6	67.2
13	61.7	65.5	65.5
14	57.9	61.7	61.7
15	54.2	54.2	54.2
16	48.8	51.0	48.8
17	34.9	50.7	37.4
18	33.7	48.8	20.0

OCTUBRE

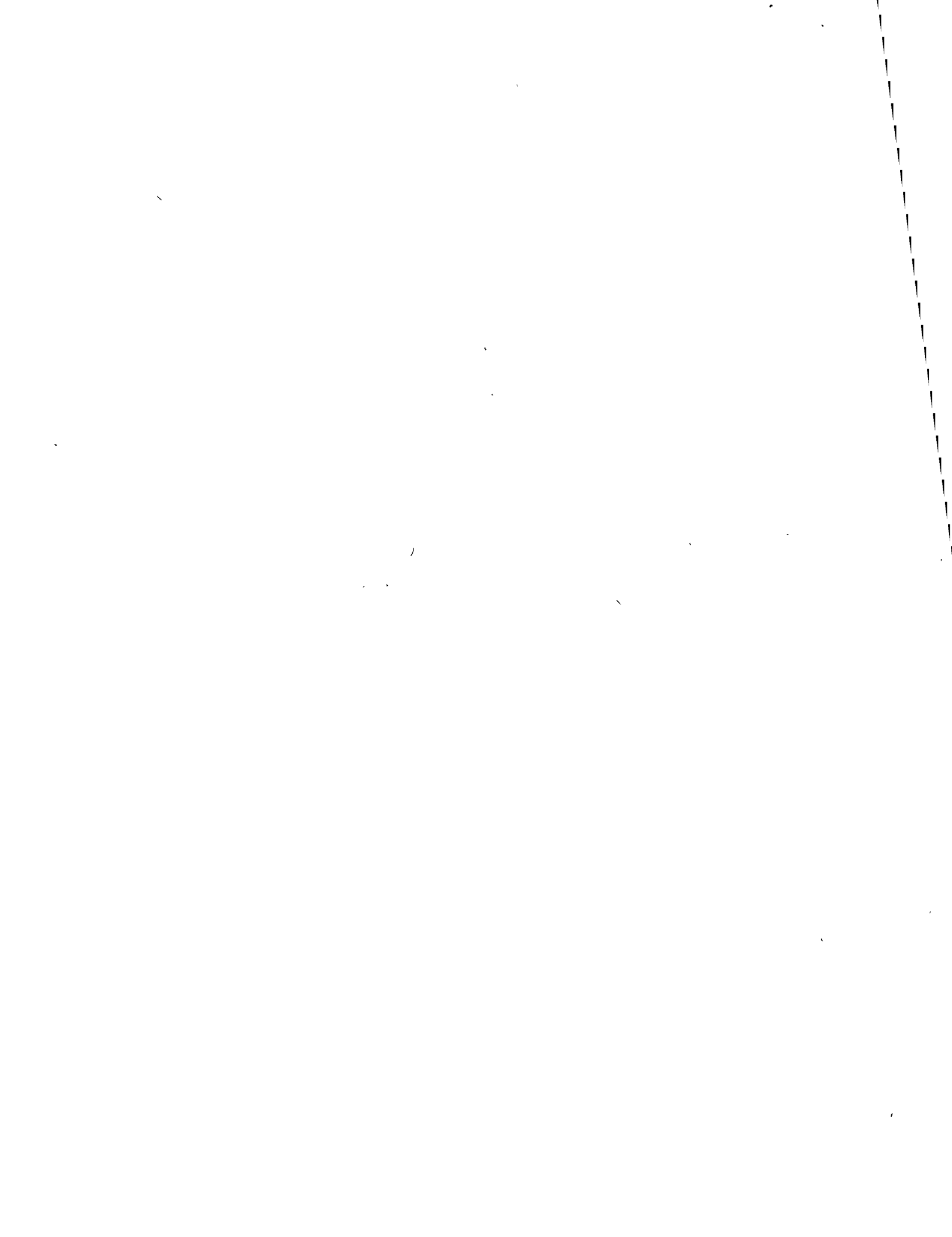
NOVIEMBRE

DICIEMBRE

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	67.0	61.0	31.9
2	58.5	48.5	27.7
3	46.4	48.0	25.3
4	44.4	43.5	24.5
5	43.0	38.3	24.0
6	34.6	37.0	22.2
7	34.0	27.8	20.5
8	30.8	26.7	18.1
9	27.4	26.1	14.4
10	27.0	24.5	13.4
11	26.3	24.3	12.5
12	21.5	23.3	10.7
13	21.0	21.7	9.2
14	19.3	21.9	6.8
15	15.1	21.3	5.3
16	13.9	15.4	0.5
17	0	12.4	0
18	0	11.4	0

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	32.9	23.4	23.5
2	22.0	19.4	12.9
3	15.9	11.5	1.8
4	7.8	5.0	1.1
5	5.5	1.1	1.1
6	4.0	1.1	1.1
7	3.6	1.0	0.9
8	2.5	0.9	0.8
9	1.1	0.4	0.4
10	1.1	0.3	0.3
11	1.0	0.1	0.1
12	0.9	0	0
13	0.8	0	0
14	0.4	0	0
15	0.3	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0

m	1ª Decena	2ª Decena	3ª Decena
1	5.3	3.8	7.8
2	4.5	2.4	2.3
3	2.8	0.3	0.3
4	0.3	0.3	0.3
5	0.8	0.3	0.3
6	0.8	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0



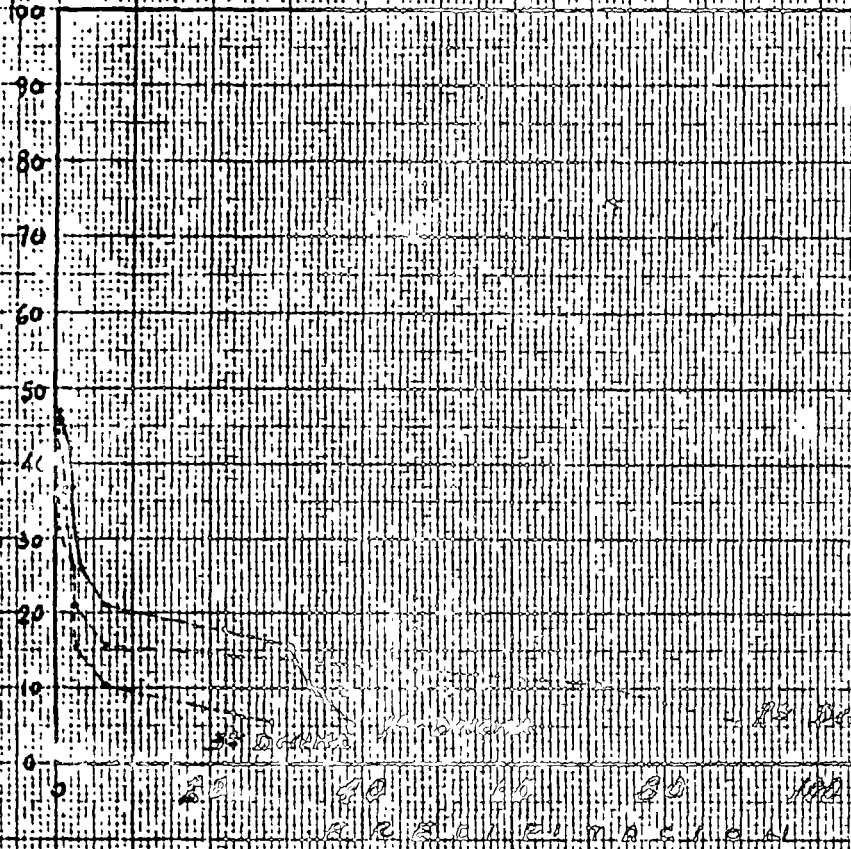
PROYECTO "LAS GARZAS", GRO.  
LUBIA APROVECHABLE

MES: ENERO

Luvia al 80% en mm.

1ª decena:	0.0
2ª decena:	0.0
3ª decena:	0.0

FRECUENCIA RELATIVA EN PORCIENTO



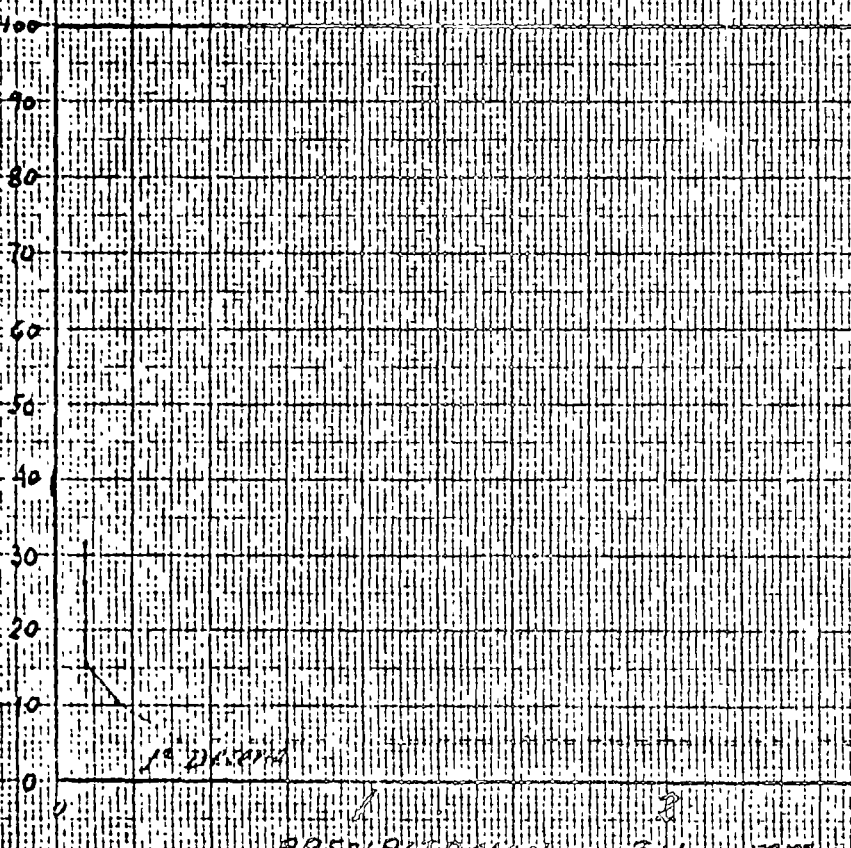
20 30 40 50 60 70 80 90 100  
PRECIPITACION EN mm

MES: FEBRERO

Luvia al 80% en mm.

1ª decena:	0.0
2ª decena:	0.0
3ª decena:	0.0

FRECUENCIA RELATIVA EN PORCIENTO



1 2 3 4  
PRECIPITACION EN mm





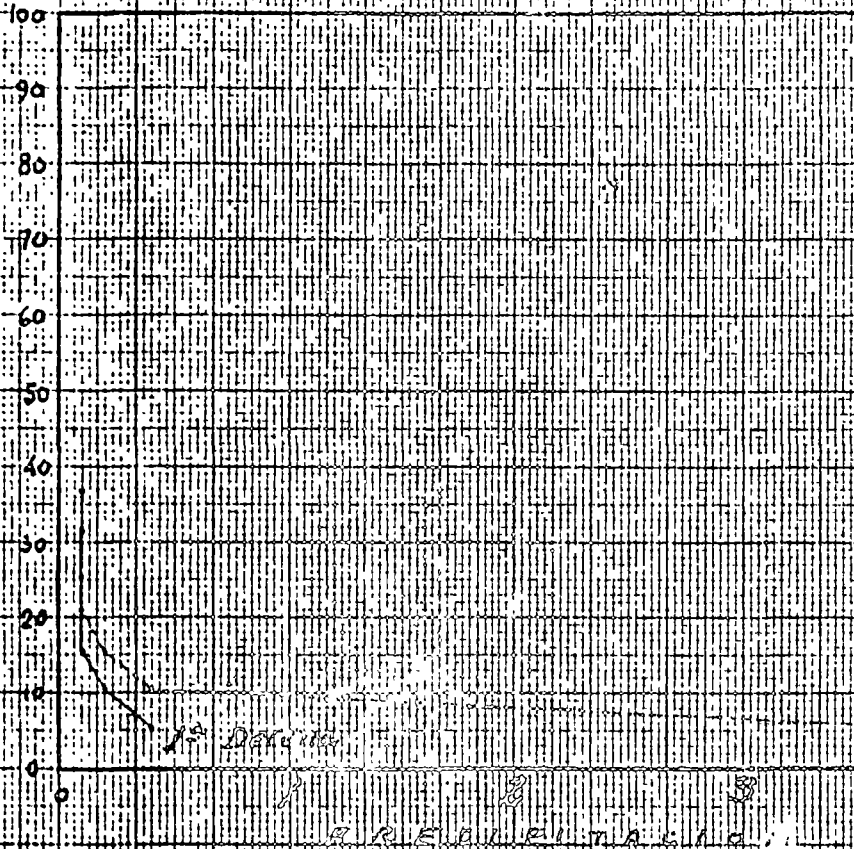
PROYECTO "LAS GARZAS", Gto.  
LUVIA APROVECHABLE

MES: MARZO

Lluvia al 80% en mm.

1ª decena	0.0
2ª decena	0.0
3ª decena	0.0

FRECUENCIA RELATIVA EN PORCIENTO



MES: ABRIL

Lluvia al 80% en mm.

1ª decena	0.0
2ª decena	0.0
3ª decena	0.0

FRECUENCIA RELATIVA EN PORCIENTO



PRECIPITACION EN mm



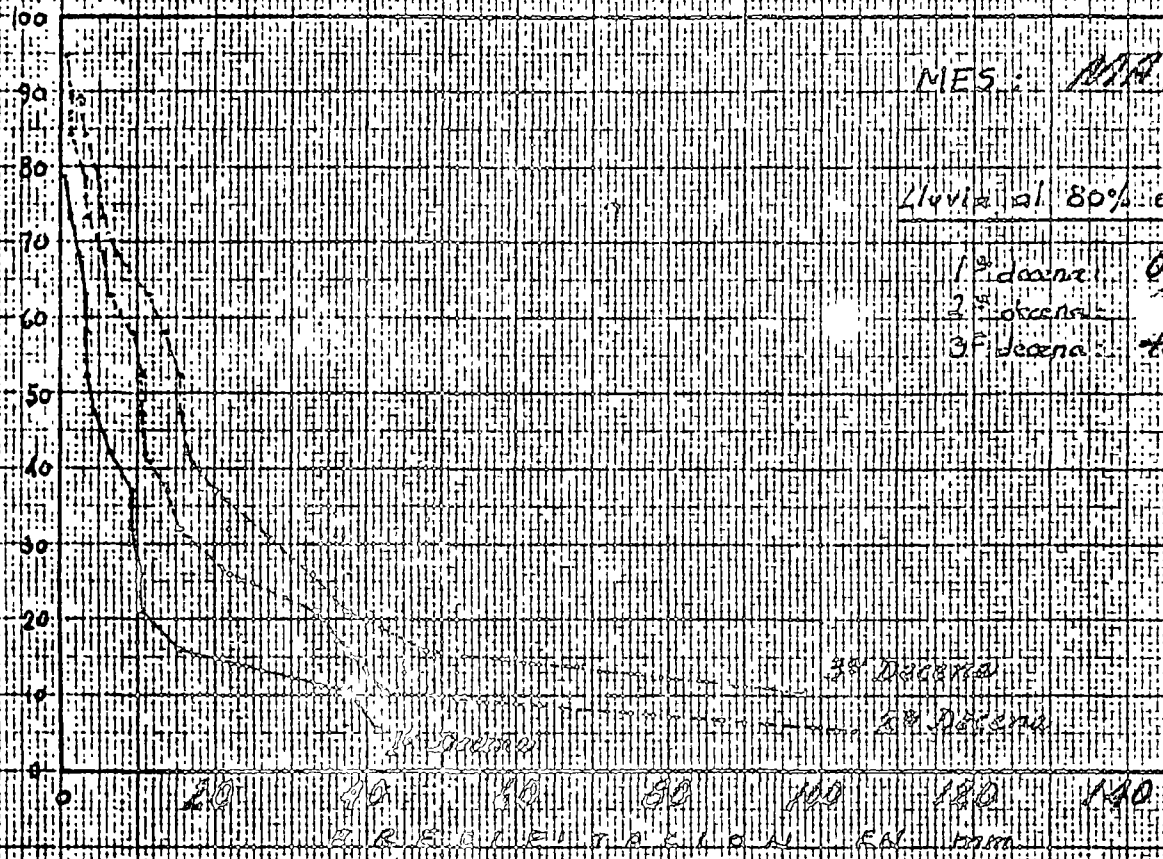
PROYECTO "LAS GARZAS", Geo.  
 LLUVIA APROVECHABLE

MES: MAYO

Lluvia al 80% en mm

1ª Decena	0.0
2ª Decena	1.3
3ª Decena	4.3

FRECUENCIA RELATIVA EN PORCIENTO

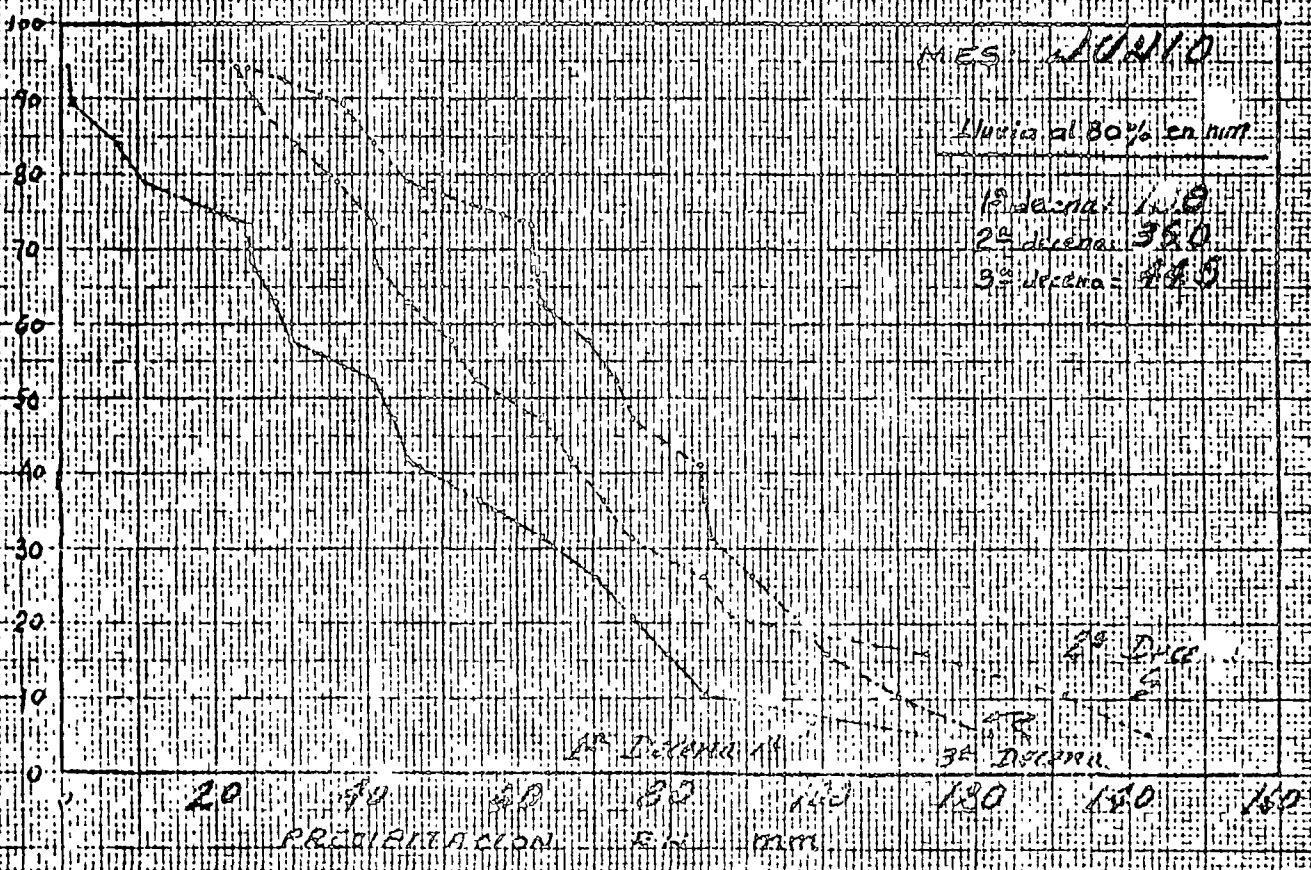


MES: JUNIO

Lluvia al 80% en mm

1ª Decena	1.0
2ª Decena	35.0
3ª Decena	44.0

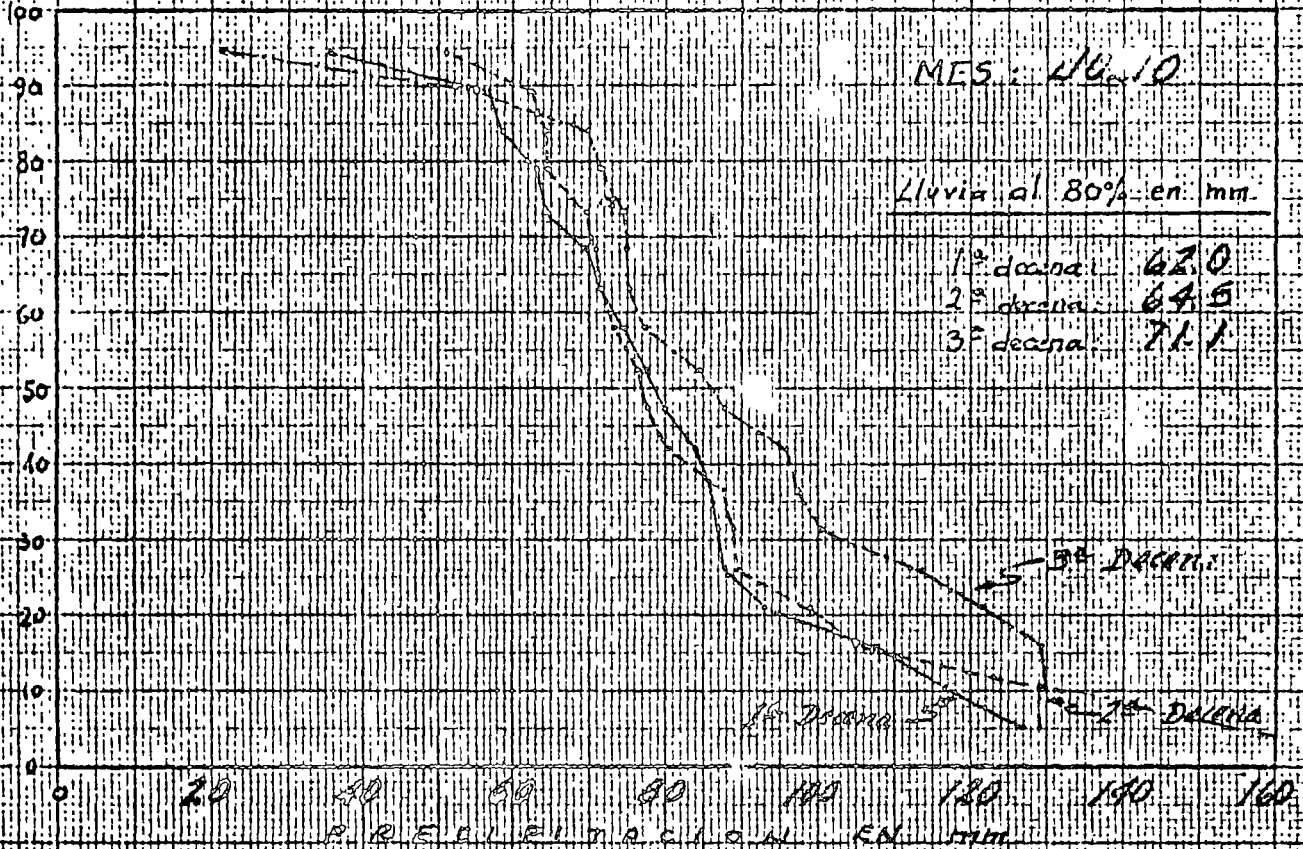
FRECUENCIA RELATIVA EN PORCIENTO



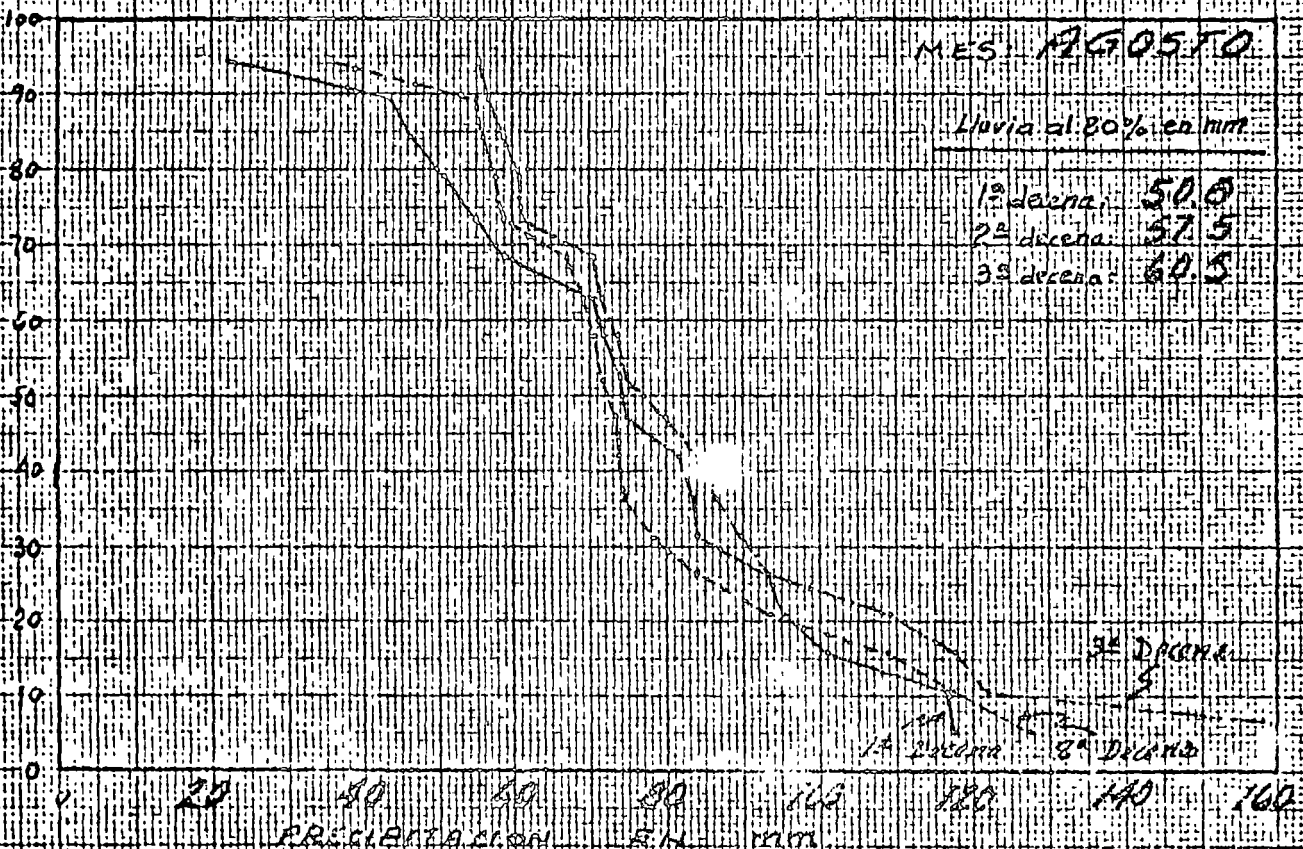


PROYECTO "LAS GARZAS", Geo.  
 LLUVIA APROXIMABLE

FRECUENCIA RELATIVA EN PORCIENTO

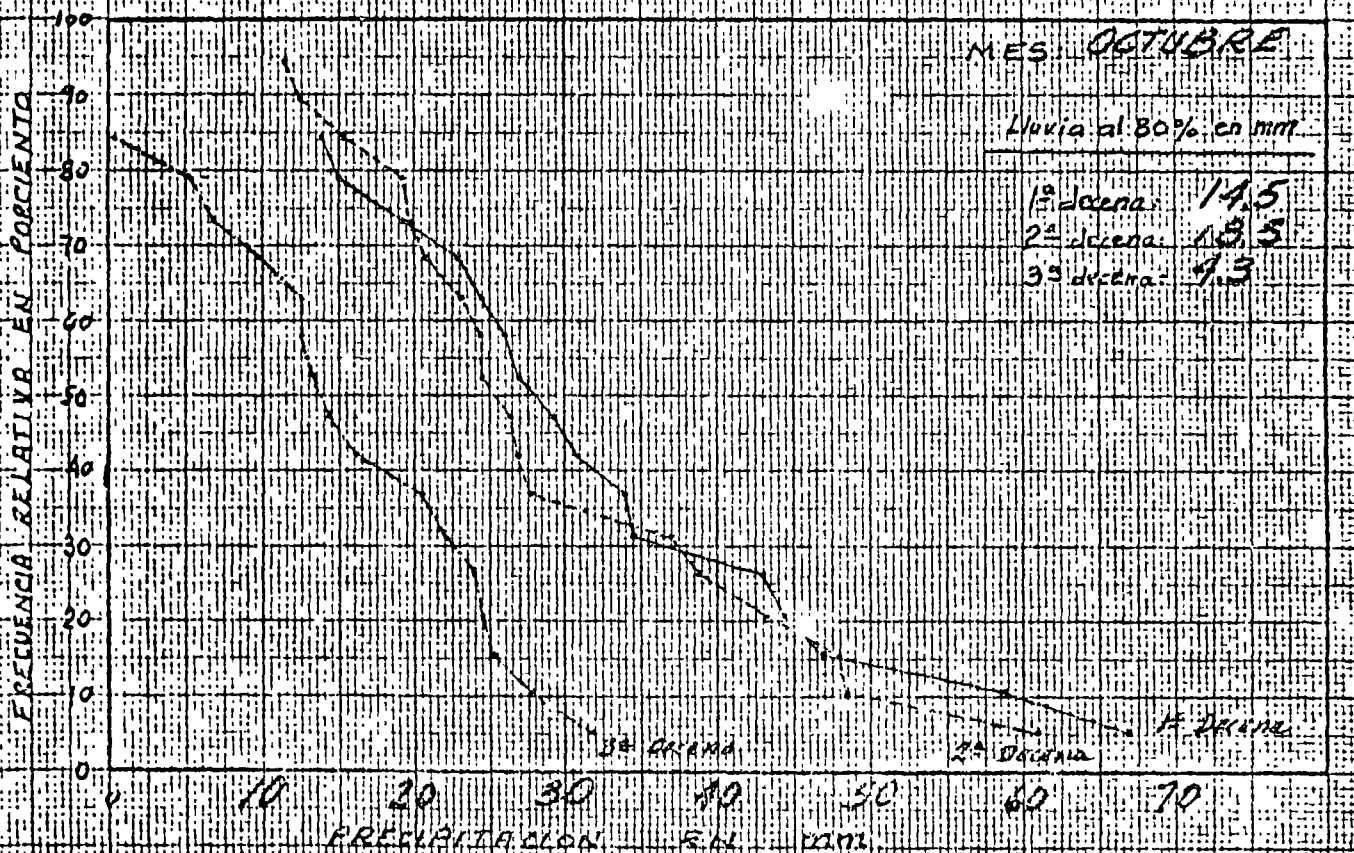
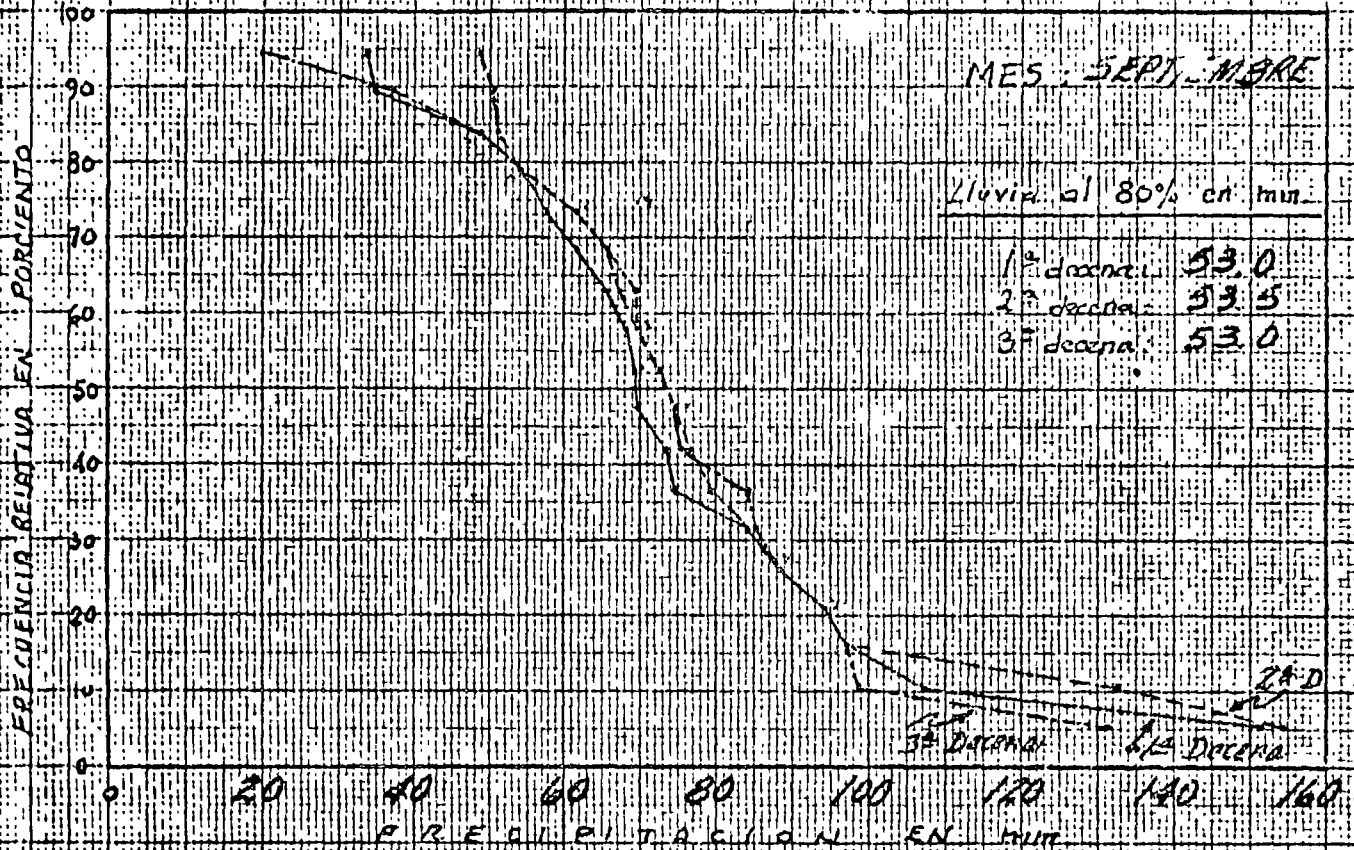


FRECUENCIA RELATIVA EN PORCIENTO





PROYECTO "LAS GARZAS", Geo.  
LLUVIA APROVECHABLE





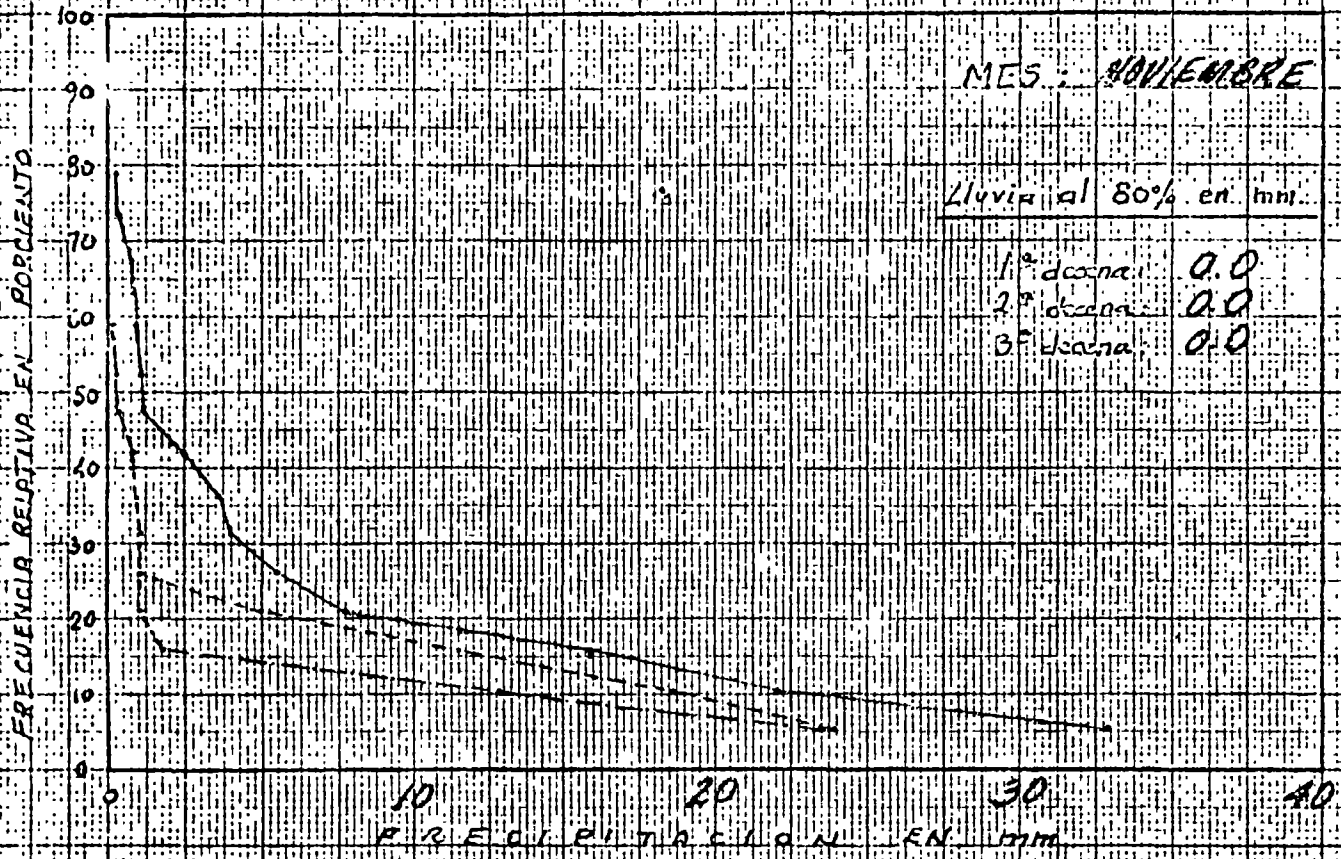


PROYECTO "LAS GARZAS", Geo.  
 Lluvia Aprovechable

MES: **NOVIEMBRE**

Lluvia al 80% en mm.

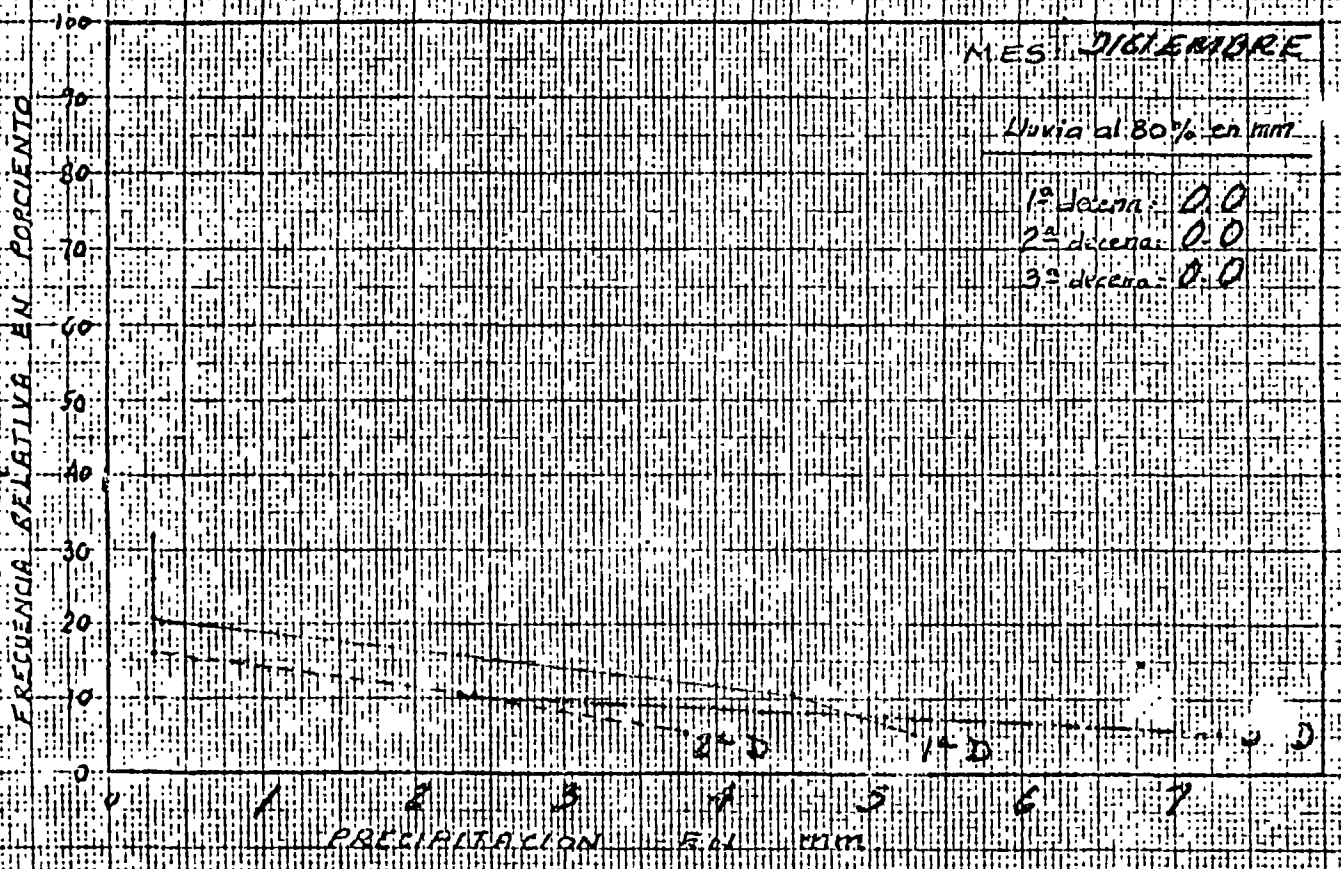
1ª decena:	0.0
2ª decena:	0.0
3ª decena:	0.0



MES: **DICIEMBRE**

Lluvia al 80% en mm.

1ª decena:	0.0
2ª decena:	0.0
3ª decena:	0.0





INGENIEROS CONSULTORES Y PROYECTISTAS

PROYECTO: L-15 GARZ-13, GNO.

CALCULO 17 AGOSTO

18-10-75

DETALLE: LLUVIA APROVECHABLE MENSUAL

REVISO: \_\_\_\_\_

FECHA

FECHA

MESES	Lluvia <del>diaria</del> al 80%			Lluvia <del>diaria</del>			LLUVIA APTOV diurna			LLUVIA APTOV mensual (mm)
	1º D	2º D	3º D	1º D	2º D	3º D	1º D	2º D	3º D	
ENERO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FEBRERO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MARZO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ABRIL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MAYO	0.0	2.8	4.3	0.0	0.7	0.9	0.0	3.5	4.5	8.0
JUNIO	10.0	35.0	44.5	2.0	7.0	8.9	10.0	34.0	48.1	72.1
JULIO	62.0	64.5	71.1	12.4	12.9	14.2	59.5	62.0	67.0	157.5
AGOSTO	50.0	57.5	60.5	10.0	11.5	12.1	49.0	55.0	57.0	161.0
SEPTIEMBRE	53.0	53.5	53.0	10.6	10.7	10.6	50.5	51.5	50.5	152.5
OCTUBRE	14.5	18.5	4.3	2.9	3.7	0.9	14.5	18.5	4.3	37.5
NOVIEMBRE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DICIEMBRE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

\*

Mes	Lluvia aprovechable mensual (cm)
Enero	0
Febrero	0
Marzo	0
Abril	0
Mayo	0
Junio	9
Julio	19
Agosto	16
Sept	15
Octubre	4
Nov.	0
Dic.	0

\* se desprecia la lluvia mensual aprovechable menor que 2.0 cm.



INGENIEROS CONSULTORES Y PROYECTISTAS

PROYECTO: Las Galizas Gro.

CALCULO: H. H. P.

20/II/75.

DETALLE: Cálculo de lluvias proyectable

FECHA

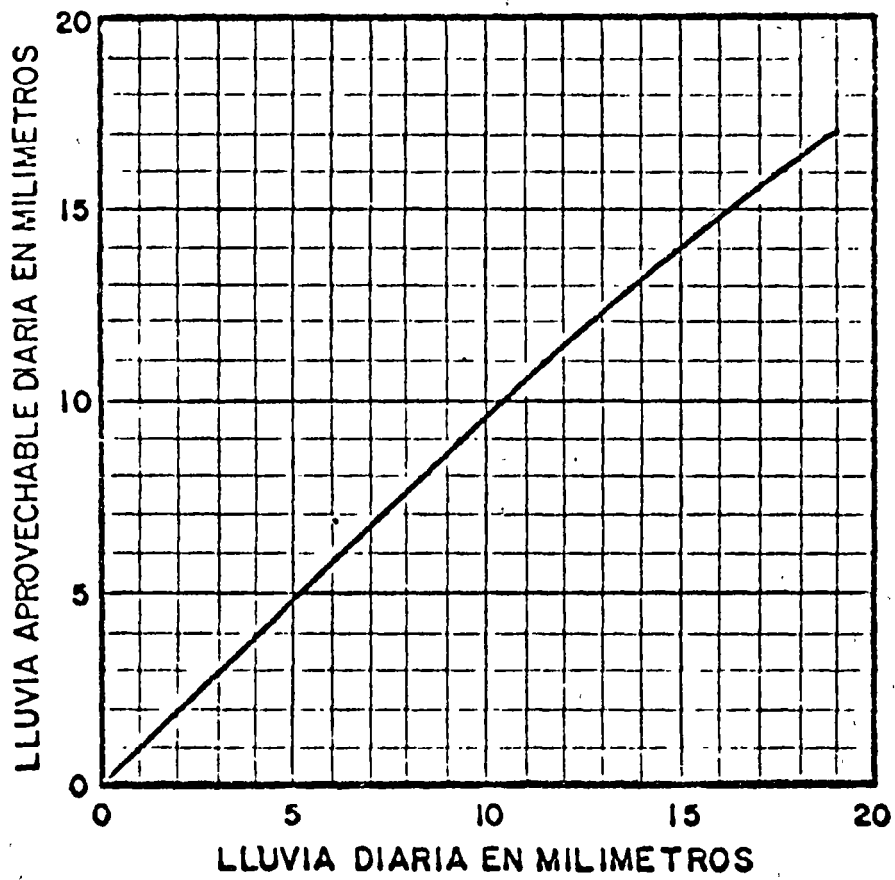
REVISO:

FECHA

Nº de Orden	f (%)
1	5.26
2	10.53
3	15.79
4	21.05
5	26.32
6	31.58
7	36.84
8	42.11
9	47.37
10	52.63
11	57.89
12	63.16
13	68.42
14	73.68
15	78.95
16	84.21
17	89.47
18	94.74

$$f = \frac{m}{n+1} \times 100 = (\%)$$





GRAFICA PARA DETERMINAR LA LLUVIA  
APROVECHABLE DIARIA



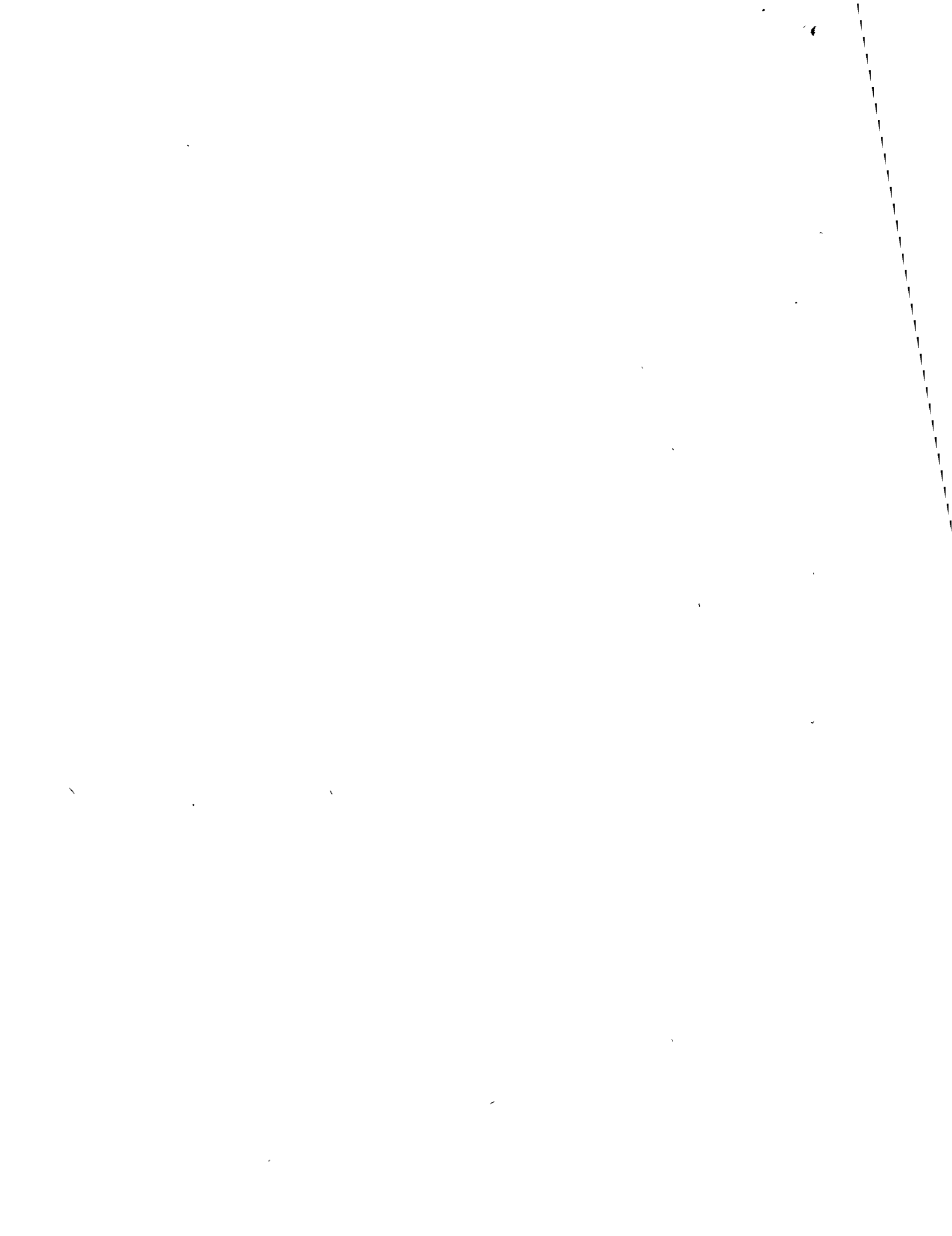


# HIDROLOGIA SUPERFICIAL

## PRECIPITACION

Ing. Omar Lucero

Ocrubre, 1977

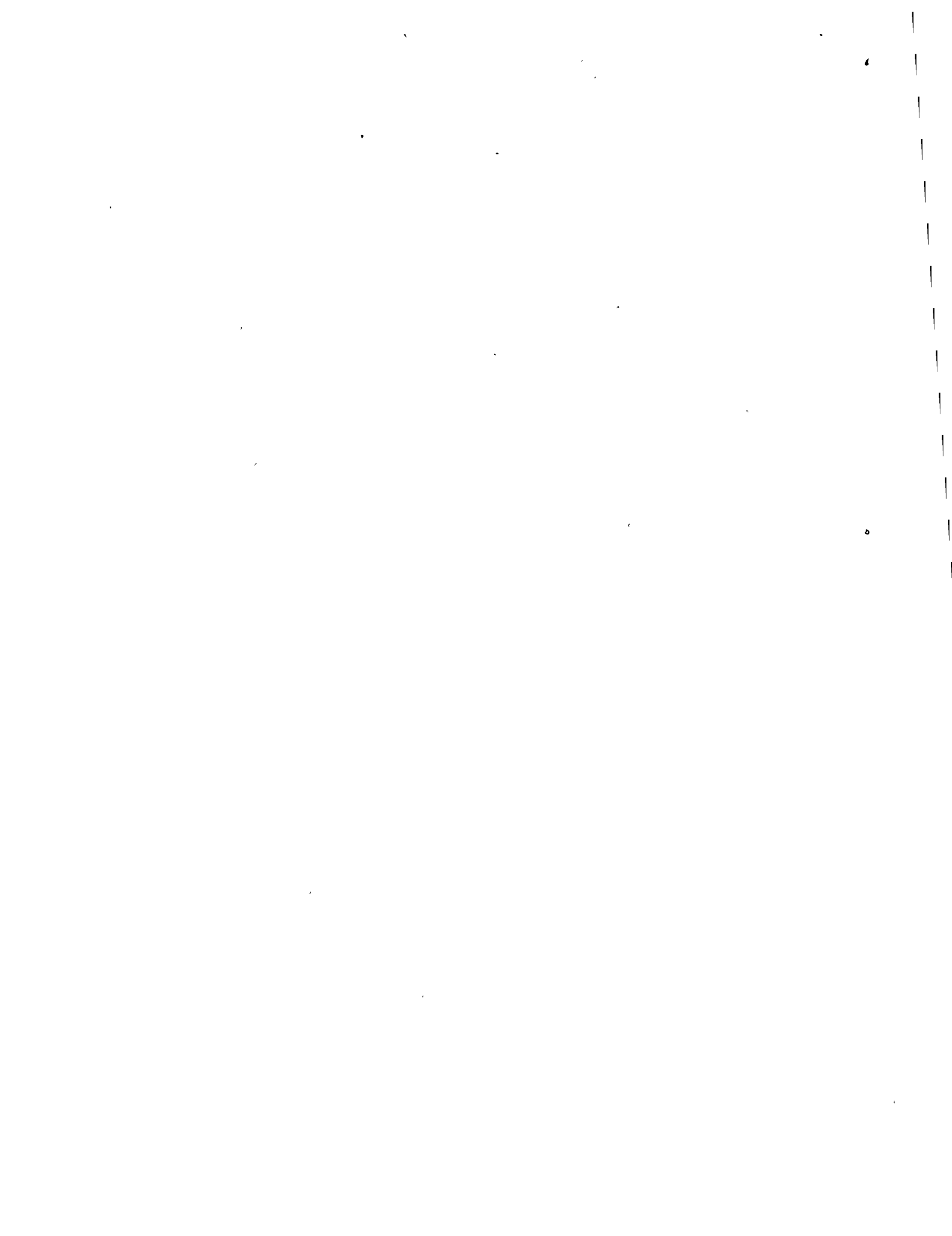


### 3.4.2 ERRORES EN LA PRECIPITACION AREAL MEDIA

La precipitación media constituye una información de primera necesidad en los estudios hidrológicos, sin embargo ella no se puede medir directamente. Para su determinación se debe apelar a los métodos de cálculo anteriormente señalados. Evidentemente si se colocase un enorme número de pluviómetros se podría conocer con gran exactitud la precipitación caída en una zona, pero de esta manera los costos de implementación de la red ascenderían a cifras excesivamente grandes. Además en no pocos casos una distribución masiva de pluviómetros no es posible debido a factores logísticos. Finalmente los errores que existen en la medición de otras variables del ciclo hidrológico volverían inciertos los beneficios que podrá proveer un exacto conocimiento de la precipitación areal media.

Cuando el objetivo consiste en obtener la precipitación media en una cuenca pequeña un solo pluviómetro puede ser funcionando durante algunos meses de lluvia, para poder determinar una recta de regresión entre el valor areal medio de la precipitación y la precipitación medida en el pluviómetro que ha de permanecer en forma permanente. De esta manera se obtienen mejores resultados (Amdrocho et al., 1968).

Según Linsley y Kohler (1951) cuando se utiliza únicamente un

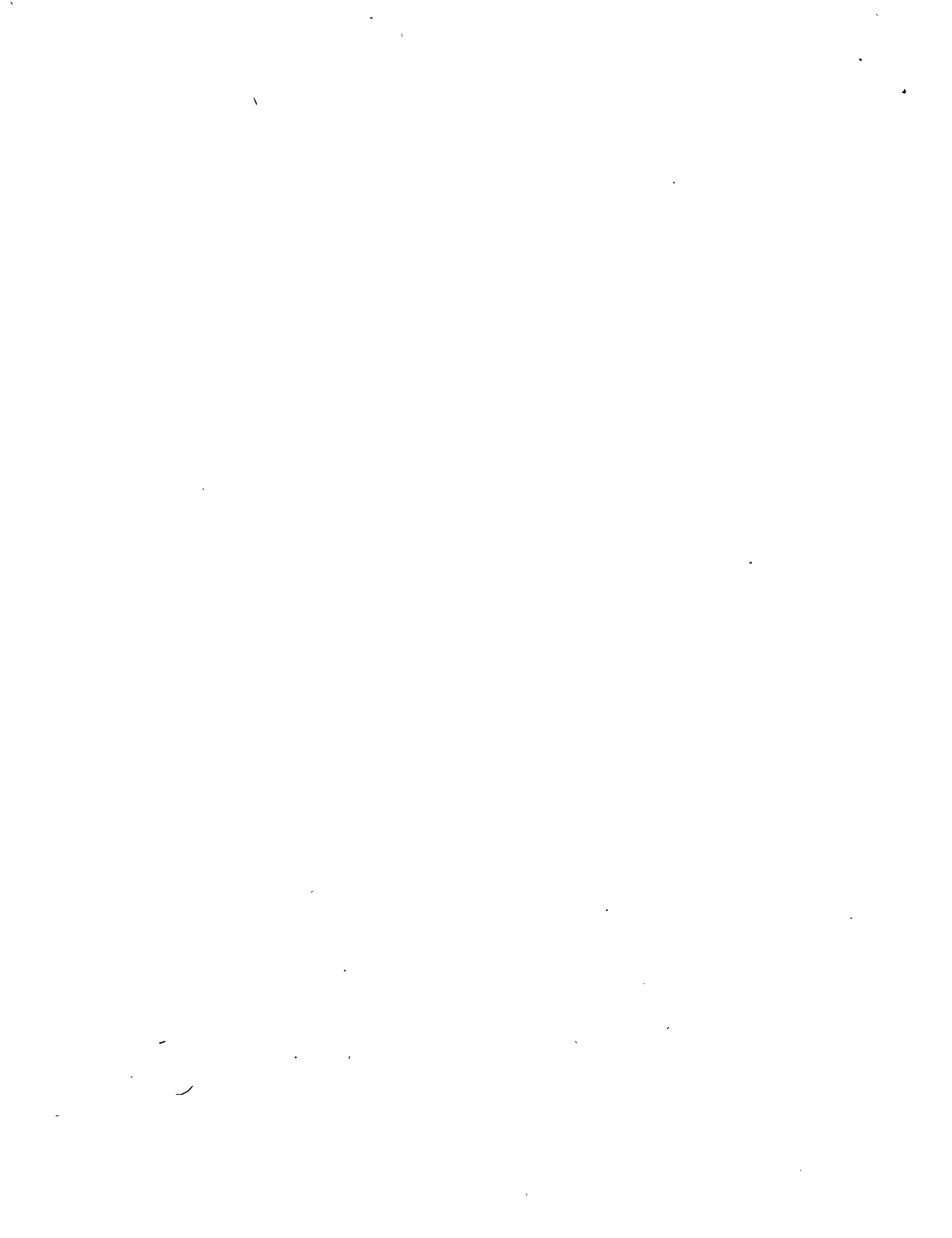


pluviómetro en una cuenca pequeña, del orden de 200 millas cu  
dradas, este debe ser colocado en el centro de la misma. Estu-  
dios efectuados por ellos indicaron que cuando el pluviómetro  
fué colocado en una esquina del área (de 10 millas por 22 millas)  
el error en el cálculo de la precipitación media era casi el do  
ble del error cometido utilizando un único pluviómetro en el  
centro del área.

Una metodología de uso muy común para el estudio de los erro-  
res en el cálculo de la precipitación media, la constituye el  
trabajar con parte de una red pluviométrica, suponiendo que el  
valor provisto por toda la red es el "correcto"; de esa manera  
se estudian cuales son las variaciones que se producen en el  
valor de la precipitación media a medida que va disminuyendo  
el número de pluviómetros incluidos.

Debe destacarse que si bien el valor de la precipitación media  
depende de la densidad de la red pluviométrica, el error en la  
detección de los valores máximos de lluvia caída en la zona  
puede alcanzar porcentajes considerables.

Al respecto se han tabulado en la tabla No 3.4 (Nicks, 1965)  
los valores máximos de lluvia total observados con cuatro den  
sidades pluviométricas, en una red de investigación que tenía  
un pluviómetro cada 9 millas cuadradas. Se observa que en es  
te caso particular los valores máximos obtenidos con el total



de los pluviómetros, 158, no difieren sustancialmente de los valores obtenidos con una red de 80 pluviómetros, sin embargo reducir la densidad de la red a la cuarta parte, 40 pluviómetros, puede dar origen a diferencias que comienzan a ser significativas. Se observa en la tabla mencionada que los valores máximos de lluvia puntual observados con una red de 20 instrumentos tienen poca relación con los que ocurrieron en la cuenca.

Nicks señala, sin embargo, que el total de 158 pluviómetros en la red, podría ser disminuido a 10 sin desmedro en el cálculo de la precipitación media.

En un estudio sobre redes pluviométricas, desarrollado por Hendrick, Comer (1970), también se analizaron las diferencias obtenidas en la precipitación media y en los valores máximos puntuales registrados, en una cuenca de 43 millas cuadradas, de acuerdo a la densidad pluviométrica. Estos resultados, graficados en la Figura No 3.14, muestran nuevamente que la detección de valores máximos es muy sensible a la densidad de la red pluviométrica, no ocurriendo así para los valores de lluvia media en el área (trazo superior de la figura).

#### CONTROL, AJUSTE DE DATOS

Uno de los primeros problemas que encuentra el hidrólogo al iniciar un estudio, es que muy posiblemente los datos pluvio-



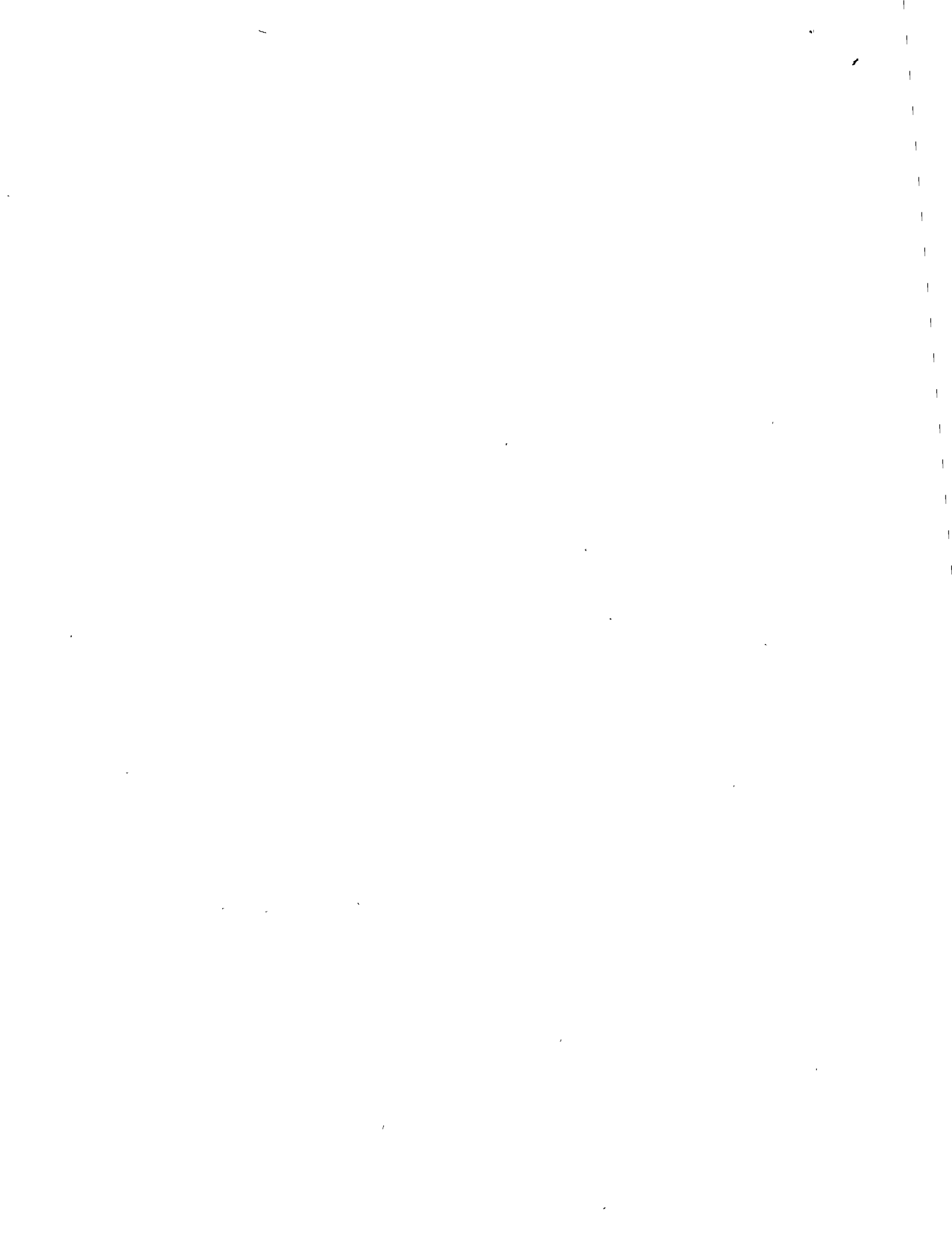


métricos existentes no estén exentos de error. El procedimiento por el cual estos errores se defectan y corrigen se denomina "depuración". Si el estudio hidrológico incluye la implementación de una red pluviométrica en una cuenca, la necesidad de la depuración de la información pluviométrica obtenida es de rigor.

Las razones que obligan a depurar la información pertenecen a dos grupos: errores debidos al observador y errores debido al instrumento. Entre los errores provenientes del observador están las equivocaciones producidas en la medición de la lluvia, registro incorrecto de la fecha en que se produjo la lluvia o lectura tardía del volumen caído (frecuentemente no se efectúan las mediciones los fines de semana) con los consiguientes inconvenientes de evaporación parcial del agua dentro del pluviómetro, y la incorrecta atribución del volumen caído, a un solo día cuando pudo haber provenido de dos o más días seguidos con lluvia.

Entre los errores que provienen del instrumental se encuentran los causados por pérdidas debidas a roturas del pluviómetro, obstrucciones en el embudo, mal funcionamiento en el caso del pluviógrafo, registro incorrecto de la fecha en que se colocó la faja.

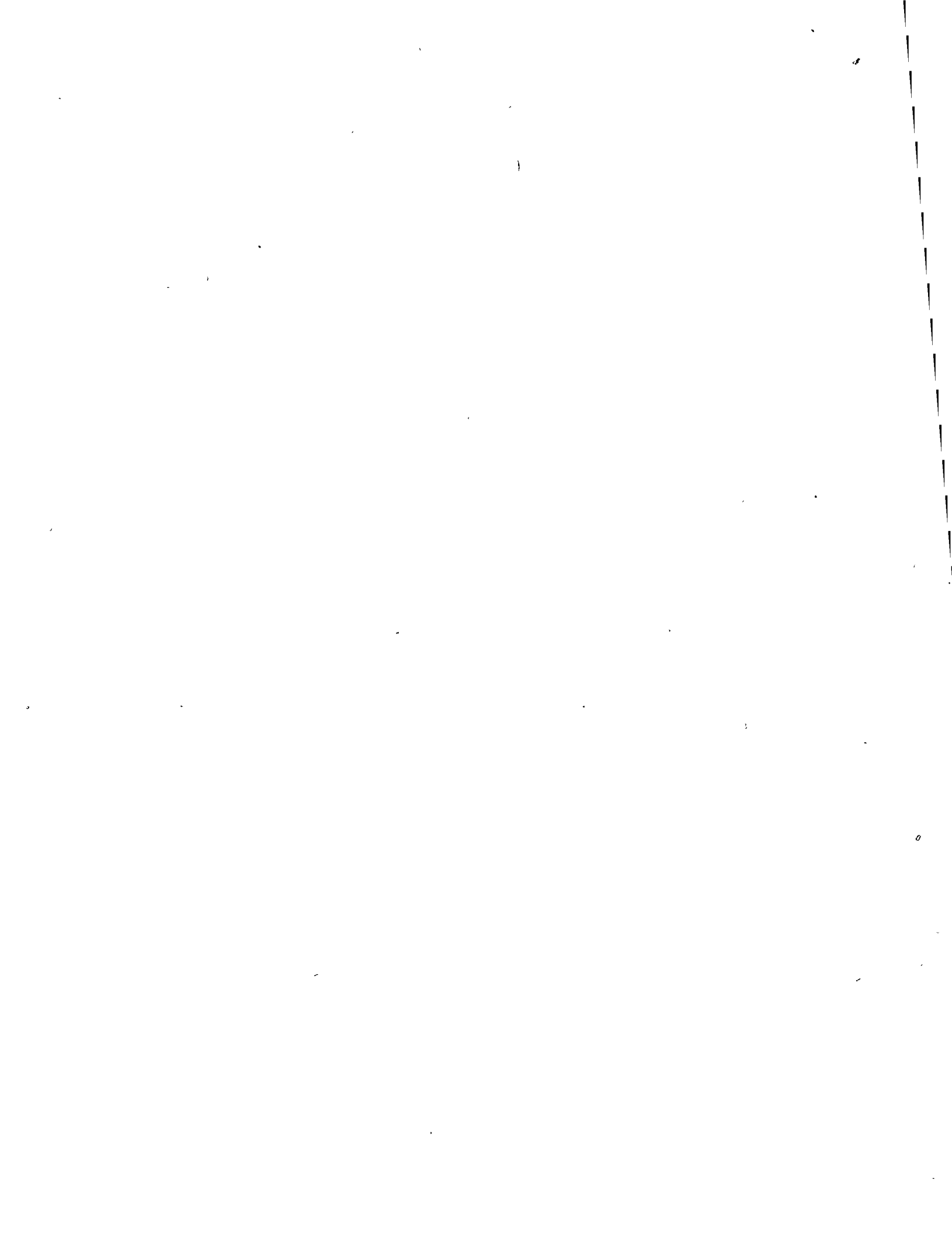
Al depurar la información pluviométrica, el primer punto a considerar



es el control de la fecha de la precipitación. Este control rara vez se puede efectuar con toda la información meteorológica a la vista (mapas sinópticos, fotos de satélite), puesto que la depuración de la información pluviométrica siempre debe ser un compromiso entre el objetivo ideal de un control detallado al máximo de la información, y el costo y tiempo empleados. Además siempre debe tenerse presente que el dato que no midió se ha perdido definitivamente. Lo más que se puede obtener es una estimación del mismo, por consiguiente no tiene justificación aumentar los costos en busca de una dudosa exactitud.

Una metodología sencilla y adecuada para controlar la fecha, de la lluvia, consiste en escribir en planillas encolumnadas, los valores registrados de lluvia en todas las estaciones de la cuenca. De esta manera los días lluviosos aparecerán como franjas escritas. Véase la figura No 3.15 conjuntamente con el mapa de la cuenca.

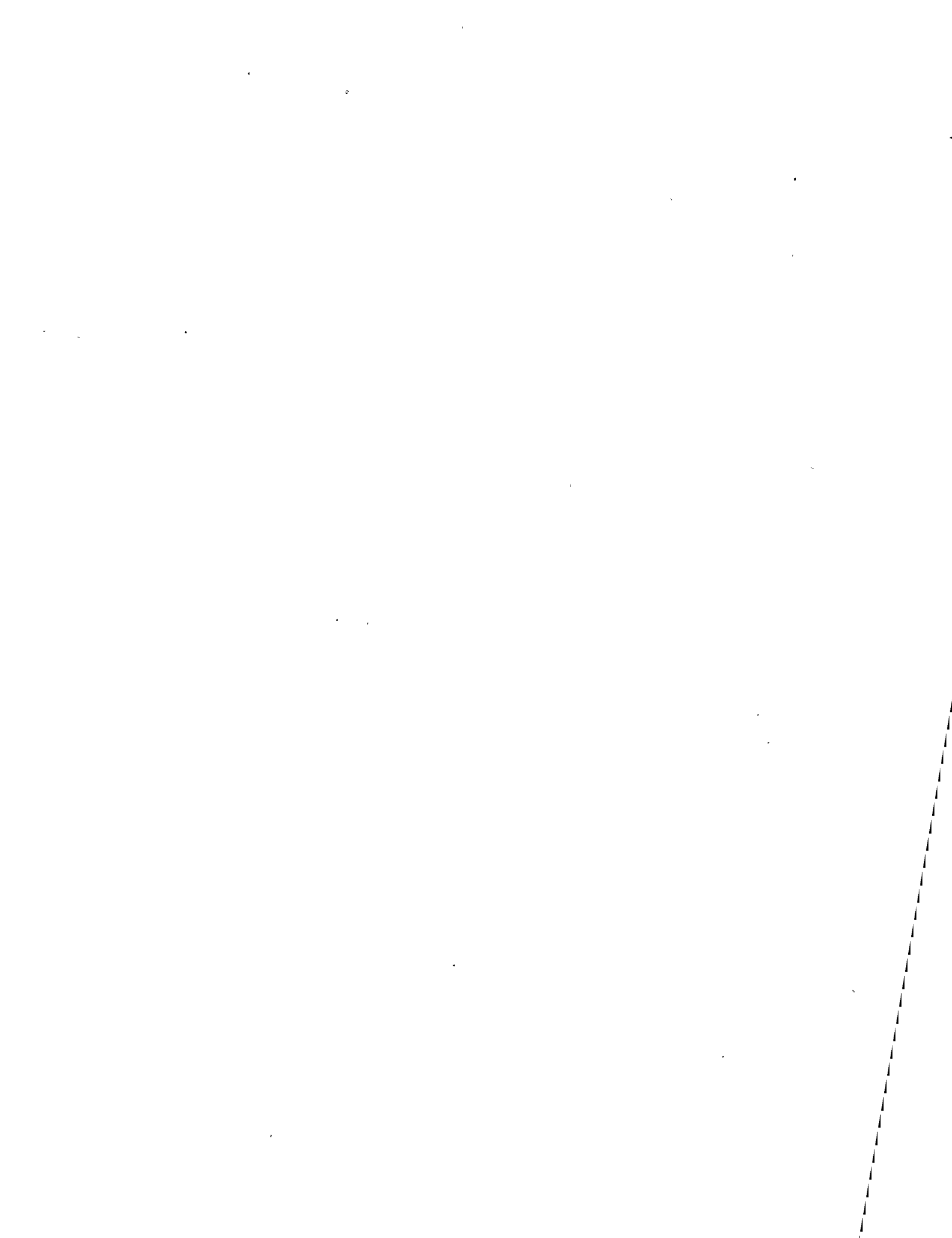
Sin embargo se presentan dudas cuando la precipitación no ocurrió por el pasaje de una extensa perturbación sinóptica, sino que fué producida por cumulonimbus producidos en forma aislada. Si las tormentas que se presentaron en la zona fueron escasas en relación al tamaño de la cuenca, puede existir una marcada indefinición respecto de sí sobre un puesto pluviométrico no llovió o si llovió pero la cantidad de lluvia caída no fué anotada. En estos casos se puede pensar que la utilización de mapas sinópticos puede aumentar la información disponible para



tomas una decisión sobre bases más seguras, sin embargo no siempre esto es cierto y además el recurrir a los mapas sinópticos eleva considerablemente los tiempos y costos de la depuración. Disponer de observaciones de ecos de radar meteorológico es altamente efectivo para saber si llovió o no sobre una región, pero además de ser raro la disponibilidad del mismo, la elaboración de la información del radar aumentaría los costos de depuración del dato de lluvia a niveles que en la mayoría de los estudios hidrológicos no se justifican.

Si existen pluviógrafos dentro de la cuenca, ellos pueden ayudar de manera efectiva al control de la fecha en que ocurrió la precipitación. En general las estaciones meteorológicas de la categoría tienen pluviógrafo, y usualmente son puestas al cuidado de personal elegido bajo criterio de idoneidad más estrictos. Por esas razones al efectuar el control de la fecha de lluvia normalmente se considera correcta a la información proveniente de las estaciones meteorológicas de la categoría a menos que existan razones fundadas para dudar de la calidad.

Un inconveniente frecuente es descubrir que para un período de lluvia de más de un día, el observador efectuó una única lectura, generalmente el último día de lluvia. Esta situación será evidente por el alto valor de lluvia registrado, relativo a los otros puestos pluviométricos, además si se acumulan los valores de precipitación de puestos pluviométricos vecinos ge-

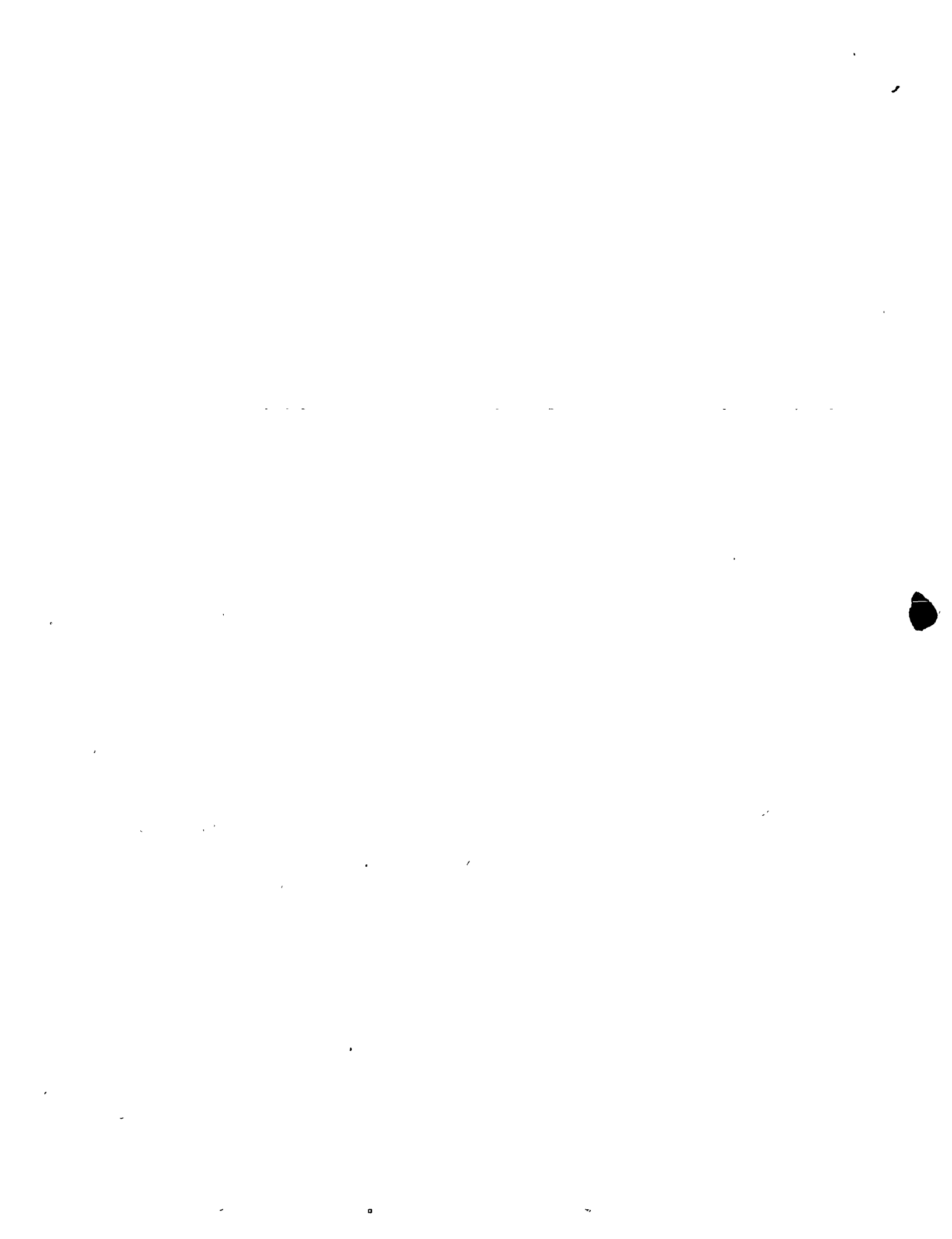


neralmente se obtienen similares órdenes de magnitud de lluvia caída. En este caso se debe prorrotear la cantidad acumulada e incorrectamente registrada en el último día; una manera simple de hacerlo es efectuar el prorroteo en los otros días de manera proporcional al porcentaje diario del total de lluvia caída en un puesto vecino durante toda la secuencia lluviosa.

Una vez controlada la fecha se debe proceder al control de las cantidades registradas. A menos que los valores registrados en un pluviómetro sean anormalmente más grandes que los registrados en otros más cercanos, no es una tarea obvia y evidente decidir cuando un dato es o no es correcto.

El control de las magnitudes de lluvia caída registradas, se tiene que basar en un minucioso conocimiento de las características temporales y espaciales de la lluvia. Cabe señalar que ese conocimiento sólo se posee en unos pocos países, porque para obtenerlo hacen falta buenas redes, y también redes observacionales construídas especialmente para la investigación.

A pesar de lo anteriormente expuesto, no se está tampoco totalmente inerte frente al problema de estimación de la veracidad de un dato de lluvia. Por supuesto que cuando el conocimiento de las características de la distribución de la lluvia es pobre y la densidad de la red es baja, disminuye la confiabilidad en los resultados obtenidos, a pesar de que es necesario





aumentar el grado de sofisticación de las técnicas matemáticas.

Los métodos de control de cantidad de lluvia caída se pueden di  
vidir en dos grandes ramas: Métodos de control basados en la  
consistencia del dato con el campo de lluvia, es decir consis-  
tencia externa a la serie de un pluviómetro, y los métodos ba-  
sados en el grado de consistencia que tiene el valor observado,  
con referencia a los datos que integran la serie del puesto plu-  
viométrico, es decir consistencia interna. Este último método,  
basado en las propiedades de la serie de datos observados en el  
puesto pluviométrico requiere cautela en su uso; a pesar de  
ello con frecuencia hay que apelar a él, puesto que el pluvió-  
metro más cercano a veces se halla tan lejos que poco apoyo pue-  
de dar.

Cabe señalar que las dificultades aumentan a medida que dismi-  
nuye el período de observación. Es más fácil depurar datos de  
lluvia anual que datos de lluvia diaria, debido a que la confi-  
guración del campo pluviométrico anual es más suave que el cam-  
po pluviométrico diario.

Un ejemplo de método basado en la consistencia externa es el  
uso de mapas isohietales para descubrir valores que no siguen  
las características generales del campo pluviométrico.



Los criterios de aceptación o rechazo de un dato en base a la consistencia interna, es decir la consistencia del dato referida a toda la serie observada, en esencia se basan en la probabilidad de aparecer que tiene el valor registrado.



## Frecuencia de Chaparrones de Determinada Duración

Las curvas de masa de tormentas fuertes, muestran chaparrones intensos que pueden tener duraciones de cinco minutos y llegar hasta la duración total de la tormenta.

Para una determinada duración, el chaparrón más intenso es el que se considera el máximo de esa tormenta. A partir de todas las tormentas en un año se pueden obtener el chaparrón máximo anual, para la duración especificada, o todos los chaparrones, independientes entre sí, que superarán un valor base. De esta manera al analizar todos los años de registro se puede obtener una serie de máximo anuales, primer caso, o una serie de duración parcial, segundo caso.

El análisis estadístico de las series de duración parcial y de las series de máximos anuales producen valores diferentes para tiempos de retorno pequeño, aunque convergen para tiempos de retorno mayores de 10 años. En general, es más conveniente usar la serie de máximos anuales, para el cálculo de eventos extremos que excedan un tiempo de recurrencia de 10 años.

En EE.UU. de América han sido calculados los coeficientes de conversión para pasar de los valores de una serie anual a los valores de una serie de duración parcial y viceversa:



Coeficientes de conversión entre series de máx. anuales, duración -  
parcial.

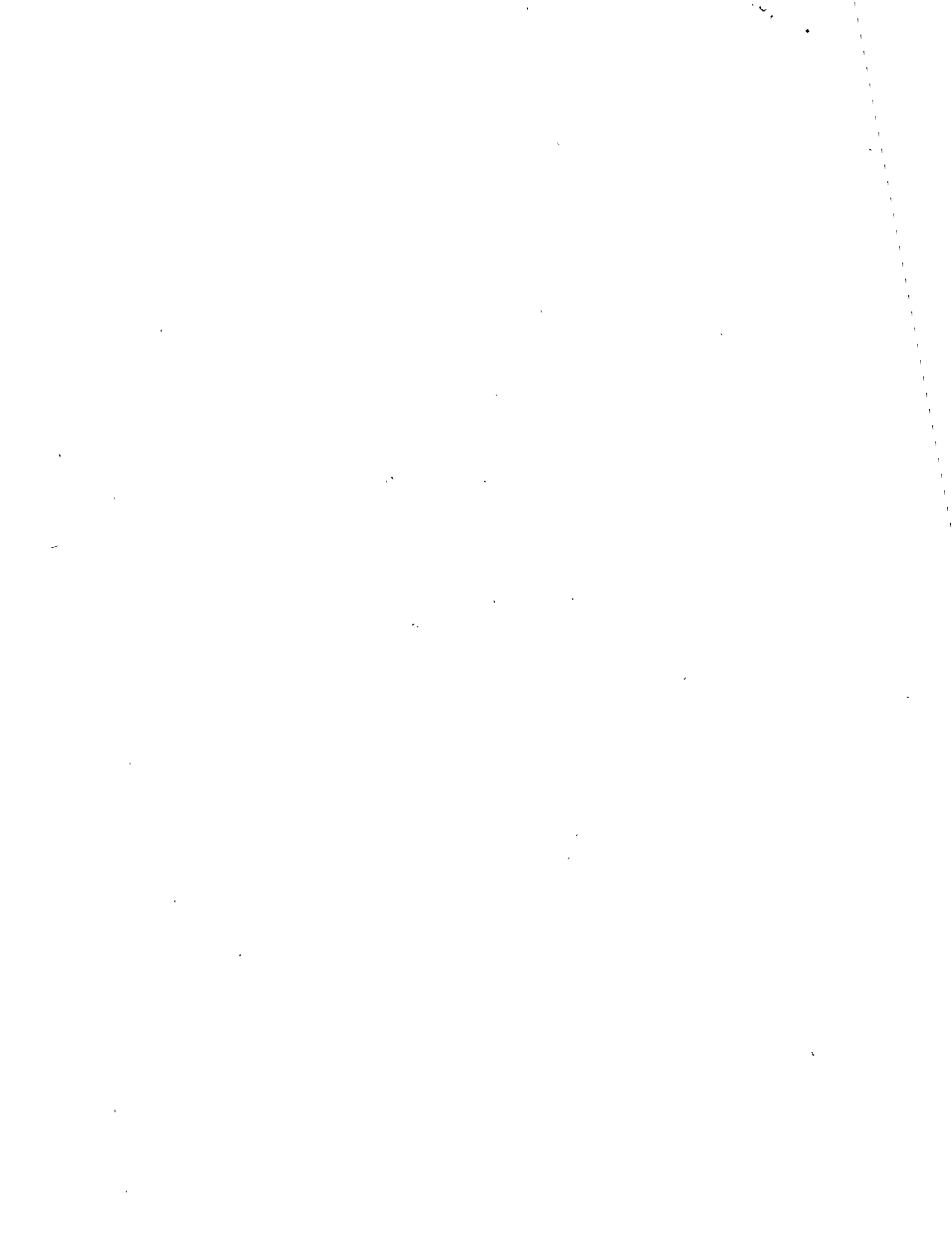
Período de retorno	Anual a duración parcial	Duración parcial a anual
1 en 2 años	1.14	0.88
1 en 5 años	1.04	0.96
1 en 10 años	1.01	0.99

El análisis de las curvas de masa de los chaparrones muestra que --  
cuanto más corta la duración del mismo, mayor es la intensidad de la pre-  
cipitación.

Si se grafican los valores de intensidad de lluvia en función de la dura-  
ción del chaparrón, se obtienen una serie de curvas de forma hiperbólica, -  
cada una de ellas correspondiente a un determinado tiempo de retorno. Es-  
ta relación se puede representar por una ecuación de la siguiente forma:

$$i = \frac{c T_r}{(D + b)^n}$$

donde c, b y n son constantes, de D es la duración (en minutos) del chaparrón  
y  $T_r$  el tiempo de retorno.





**HIDROLOGIA SUPERFICIAL**

**LA AVENIDA MAXIMA PROBABLE**

**Dr. Rolando Springall  
Octubre, 1977**



## 6. LA AVENIDA MAXIMA PROBABLE

### 6.1 Antecedentes

Para analizar los diversos criterios existentes para determinar la Avenida Maxima Probable que para una cierta frecuencia de incidencia se puede presentar en el sitio por analizar, se requiere conocer por una parte el tamaño de la cuenca y por otro la información hidrológica disponible. En la tabla 6.1 se muestra la forma de seleccionar el criterio mas adecuado para deducir la avenida de diseño, de acuerdo con los requerimientos antes mencionados.

Antes de analizar los criterios correspondientes a este capítulo de acuerdo con la tabla 6.1, es conveniente primero plantear la forma de seleccionar para una obra determinada el período de retorno que le corresponde al evento hidrológico para su diseño

### 6.2 Período de retorno de los eventos hidrológicos\*

El período de retorno  $T$  de un evento hidrológico de magnitud dada  $Y$  se define como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual ese evento puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio. Si un evento igual o mayor a  $Y$  ocurre una vez en  $T$  años, su probabilidad de de ocurrencia  $P(Y)$  es igual a  $1/T$  en  $T$  casos, o sea que

---

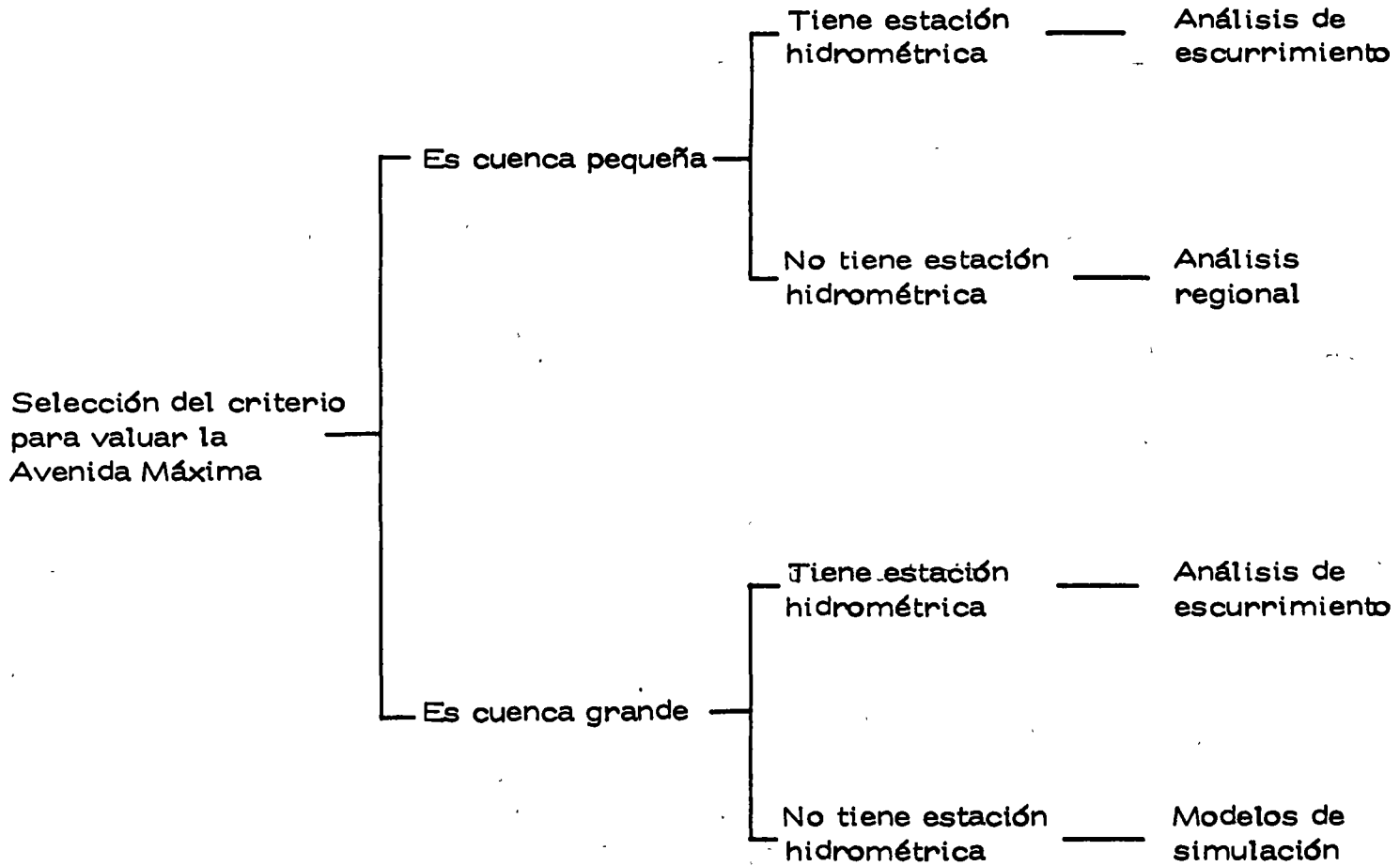
\*Notas complementarias al inciso 8.4 de la publicación:  
R. Springall G "Análisis estadístico y probalístico de datos hidrológicos" Facultad de Ingeniería, UNAM, Cap. 8 ( 1975 )



TABLA 6.1

SELECCION DE LA METODOLOGIA

N





$$T = \frac{1}{P(Y)} \quad (6.1)$$

La definición anterior permite el siguiente desglose de relaciones de --  
probabilidades:

- La probabilidad de que Y ocurra en cualquier año

$$P(Y) = \frac{1}{T} \quad (6.2)$$

- La probabilidad de que Y no ocurra en cualquier año

$$P(\bar{Y}) = 1 - P(Y) = 1 - \frac{1}{T} \quad (6.3)$$

- La probabilidad de que Y no ocurra en n años sucesivos

$$P(\bar{Y})^n = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (6.4)$$

- La probabilidad conocida como de ocurrencia o riesgo R, de que Y ocurra al menos una vez en n años sucesivos

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (6.5)$$

Si se considera que n sea la vida de diseño operacional de una obra, la ec 6.5 permite determinar a partir de la asignación de un cierto riesgo de que la obra falle, el período de retorno de la misma. En la tabla 6.2 se indican los períodos de retorno correspondientes a diversos niveles de riesgo y períodos de diseño.

De lo anterior se tiene que la asignación de un período de retorno a un evento hidrológico para realizar el diseño de una obra, si se acepta que la vida

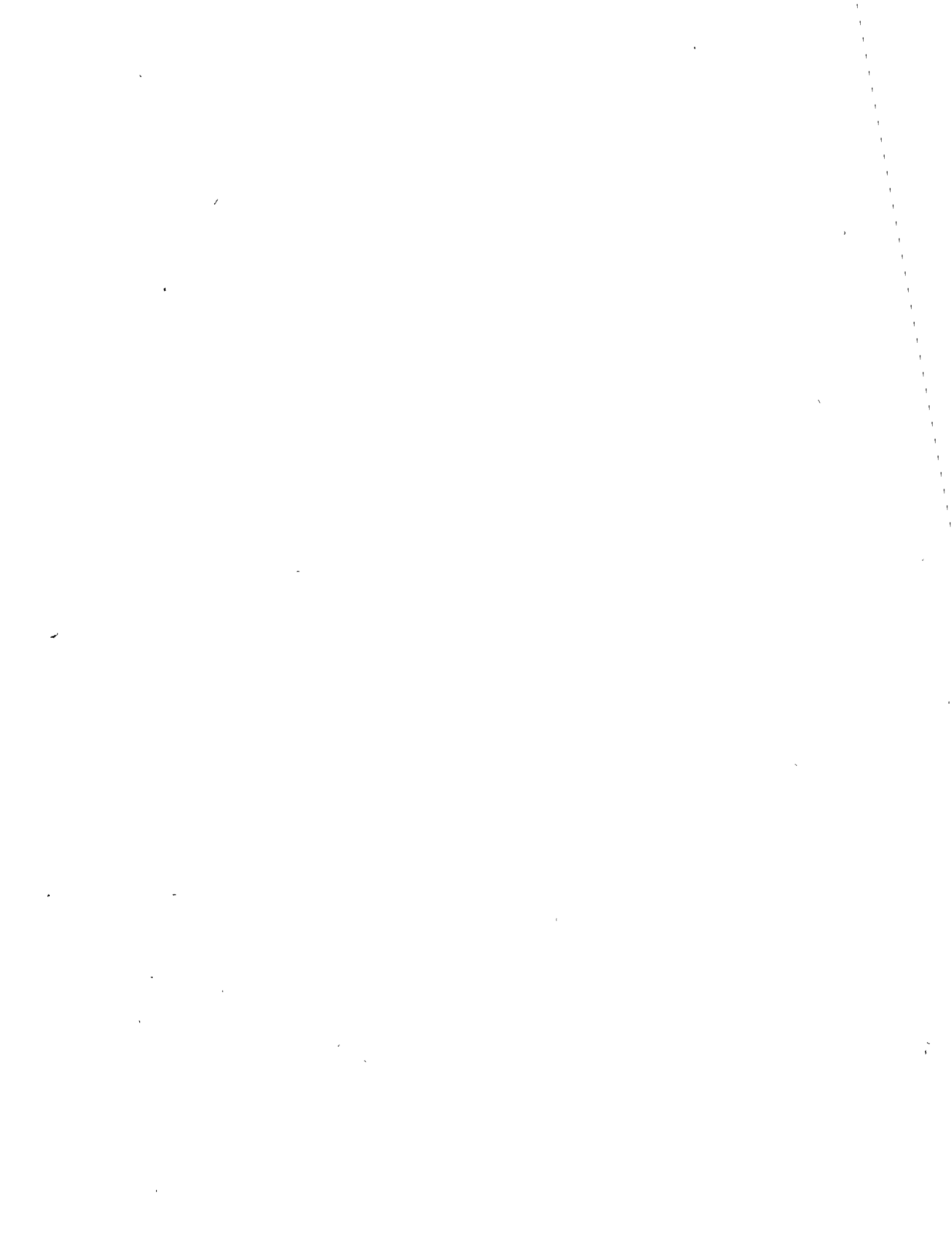




TABLA 6.2

PERIODOS DE RETORNO ASOCIADO CON DIVERSOS GRADOS DE RIESGO  
Y VIDA DE DISEÑO ESPERADA

Riesgo %	Vida de diseño esperada, en años							
	2	5	10	15	20	25	50	100
75	2.00	4.02	6.69	11.0	14.9	18.0	35.6	72.7
50	3.43	7.74	14.9	22.1	29.4	36.6	72.6	144.8
40	4.44	10.3	20.1	29.9	39.7	49.5	98.4	196.3
30	6.12	14.5	28.5	42.6	56.5	70.6	140.7	281
25	7.46	17.9	35.5	52.6	70.0	87.4	174.3	348
20	9.47	22.9	45.3	67.7	90.1	112.5	224.6	449
15	12.8	31.3	62.0	90.8	123.6	154.3	308	616
10	19.5	48.1	95.4	142.9	190.3	238	475	950
5	39.5	98.0	195.5	292.9	390	488	976	1,949
2	99.5	248	496	743	990	1,238	2,475	4,950
1	198.4	498	996	1,492	1,992	2,488	4,975	9,953

4



de diseño es constante, es función directa del riesgo que se tenga durante su vida operacional, de que se presente un evento mayor al de diseño. Para cuantificar la probabilidad de ocurrencia o riesgo de que se presente en una obra hidráulica un evento mayor al de diseño requiere tener en cuenta:

- Costo de la obra
- Daños que se pueden tener al presentarse una falla
- Costo de mantenimiento
- Inconvenientes y perjuicios en el caso de falla
- Riesgos de vidas humanas

De ser factible cuantificar los daños que se pudieran ocasionar tanto humanos como materiales, el período de retorno asignado a un evento para el diseño de una obra hidráulica se puede realizar con apoyo de la ec 6.5, efectuando un análisis económico entre el costo de las obras y el costo de los daños por falla de la obra\*

Usualmente lo anterior es difícil de hacer, por lo que es común utilizar para la selección del evento de diseño, períodos de retorno ó criterios preestablecidos. Así, en la tabla 6.3 se muestran los períodos de retorno recomendables para estructuras menores análogamente en las tablas 6.4 y 6.5 se muestran los períodos de retorno recomendables para la -

---

\*Navarro, J.L., Sánchez, J.L. y Téllez, J.F. "Un criterio para la selección del período de retorno para el diseño de obras de desvío" Pub. Tec. SRH, Vol. III, No. 1 (1974) pp 52-59

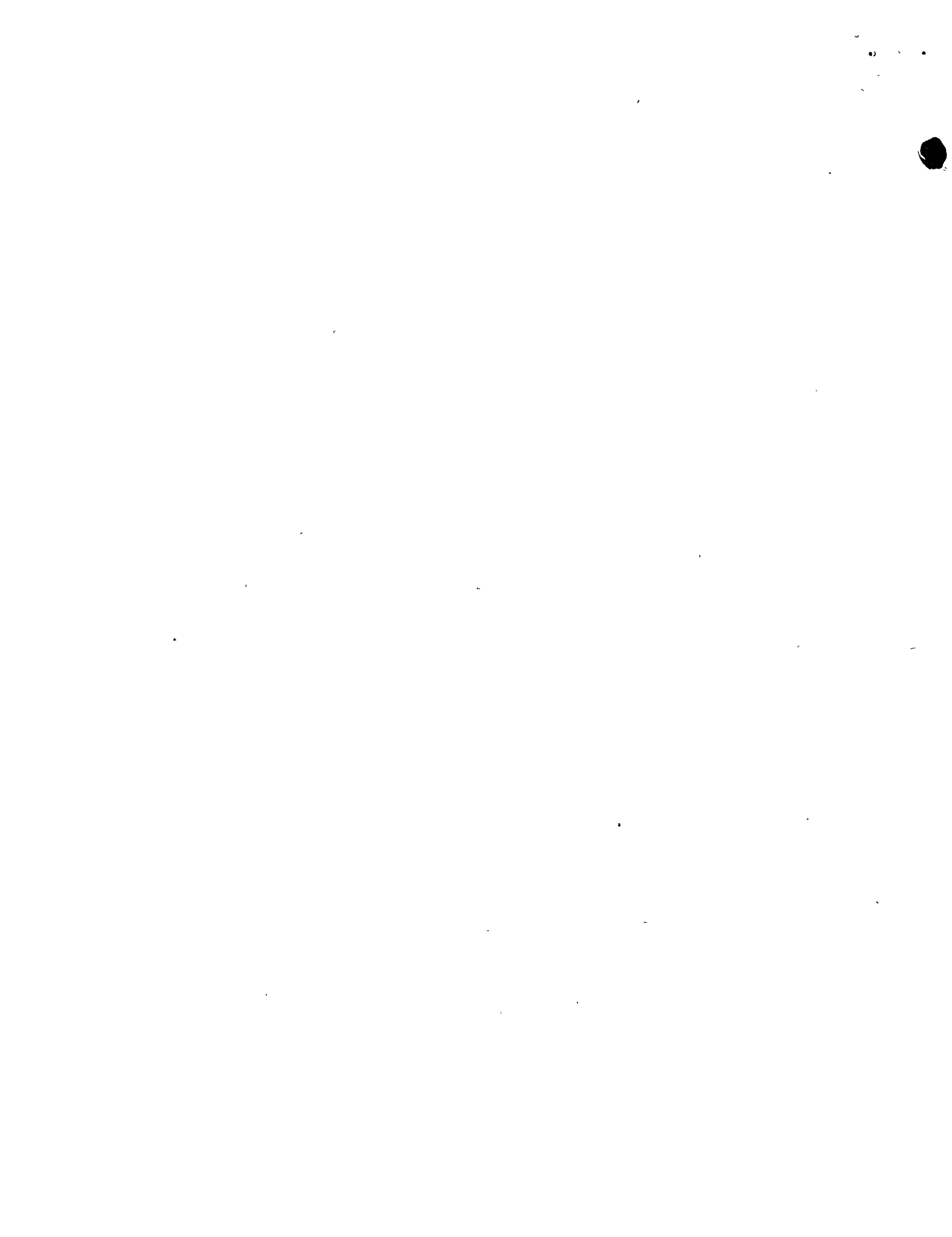


TABLA 6.3

PERIODOS DE RETORNO DE DISEÑO RECOMENDABLES  
PARA ESTRUCTURAS MENORES

Tipo de estructura	Período de retorno ( años )
Puente sobre carretera importante, donde el remanso puede causar daños excesivos por inundación u ocasionar la falla del puente	50 a 100
Puente sobre carreteras menos importantes o alcantarillas sobre carreteras importantes	25
Alcantarillas sobre caminos secundarios, drenaje de lluvia o contracunetas	5 a 10
Drenaje lateral de los pavimentos, donde puede tolerarse encharcamiento con lluvia de corta duración	1 a 2
Drenaje de Aeropuertos	5
Drenajes urbanos	2 a 10
Bordos	2 a 50

1

TABLA 6.4

PERIODO DE RETORNO DE DISEÑO RECOMENDABLE PARA PRESAS PEQUEÑAS

Clasificación	Diseño del vertedor	Diseño del libre bordo
a)	P 100	P100 +.12 (PMP-P100)
b)	P100 +.12 (PMP-P100)	P100 +.40 (PMP-P100)
c)	P100 +.26 (PMP-P100)	PMP

P100 corresponde a una altura de precipitación de 6 horas y un período de retorno de 100 años

PMP es la altura de precipitación máxima probable para una duración de 6 horas





TABLA 6.5

EVENTO DE DISEÑO RECOMENDABLES PARA  
ESTRUCTURAS MAYORES

CATEGORIA	Avenida de Diseño del Vertedor
MAYOR	Máxima Probable ; La avenida más severa considerada razonablemente posible sobre la cuenca
INTERMEDIA	Proyecto estándar ; Basada en la más severa tormenta o condiciones metereológicas consideradas razonablemente representativas de la región (Ver tabla 6.4 )
PEQUEÑA	Intervalo de recurrencia de 50 a 100 años ( Ver tabla 6.4 )



selección de los eventos de diseño.

La clasificación para las presas pequeñas ( tabla 6.4 ) corresponde a los siguientes tres grupos

Clase ( a )            Estructura localizada en áreas rurales o agrícolas cu  
ya falla puede dañar rancherías, tierras dedicadas a  
la agricultura, caminos secundarios.

Clase ( b )            Estructuras localizadas en áreas predominantemente  
rurales o agrícolas cuya falla pueda causar daños ais  
lando áreas habitables, caminos principales o vías de  
ferrocarril, o causar interrupción del uso de servi--  
cios de importancia pública.

Clase ( c )            Estructuras localizadas donde su falla pueda causar -  
pérdidas definitivas, serios daños a zonas habitacio-  
nales , industriales y comerciales; servicios públicos,  
caminos ó ferrocarriles.

-            Para la continuación de estas notas ver incisos 8.5 a  
8.8 del artículo;

R. Springall G "Análisis estadístico y probalístico de  
datos hidrológicos" Facultad de Ingeniería, UNAM, -  
Cap. 8 ( 1975 )



HIDROLOGIA SUPERFICIAL

HIDROLOGIA OPERACIONAL

ING. RAMON DOMINGUEZ MORA

OCTUBRE, 1977.



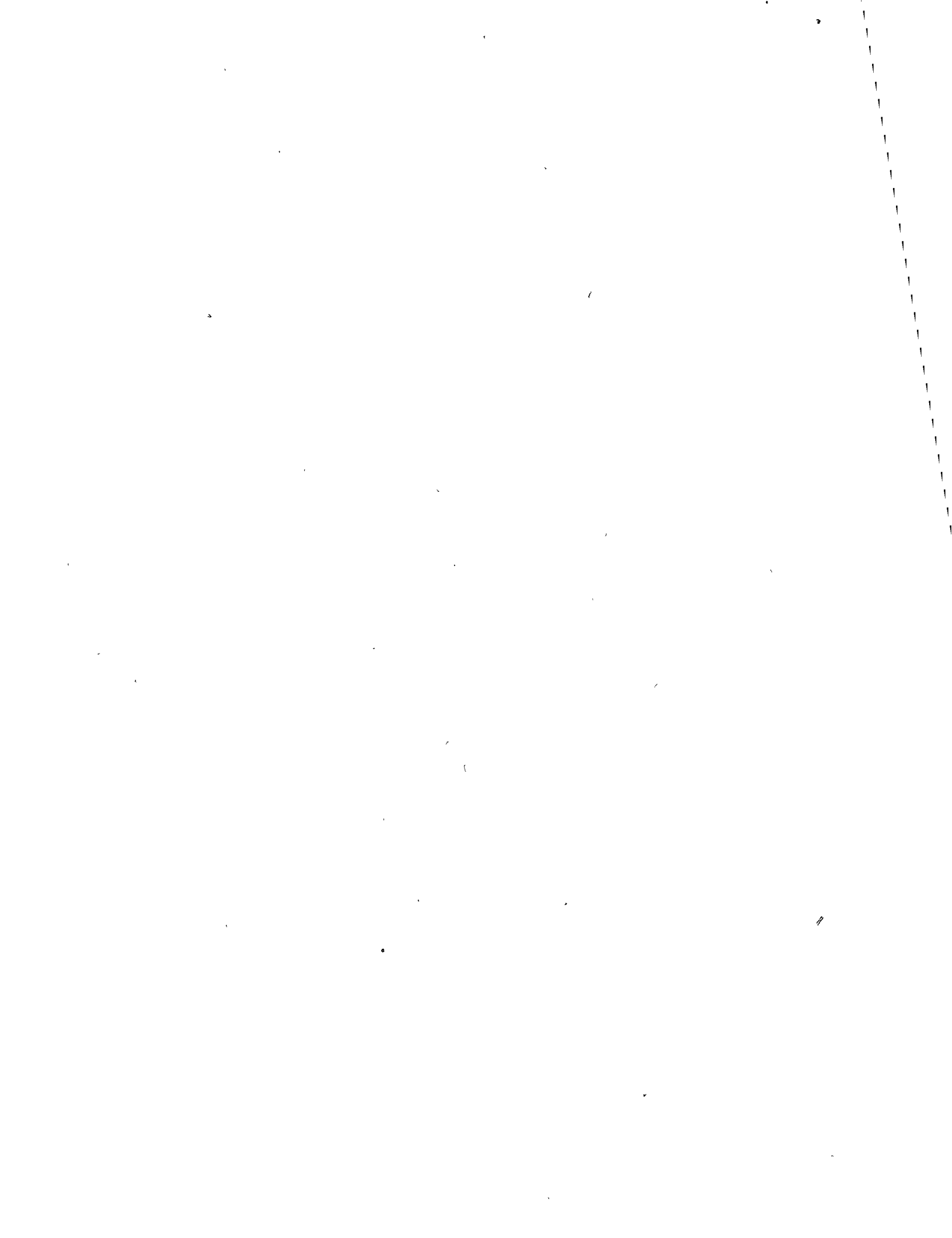
## 1. INTRODUCCION

En épocas recientes se ha desarrollado una gran cantidad de métodos para la generación de registros hidrológicos. Muchos de estos métodos están inclusive programados para su fácil aplicación mediante computadoras.

Dado el estado actual de la técnica relativa al tema, parece ser más importante que el desarrollo de nuevos métodos, tratar de ordenar lo hecho hasta la fecha, para facilitar su comprensión y con ello su uso.

Con la generación de registros hidrológicos simulados, se pretende mejorar el estudio de las alternativas de diseño de obras de aprovechamiento y control del agua. Para ello, se busca que los registros simulados, sin ser una reproducción de los históricos, si reproduzcan las características más importantes de los mismos, a los que se considera como una muestra de los valores que podrían presentarse. Una manera útil de diferenciar a los diferentes métodos es a través de saber cuales son las características estadísticas que mejor reproducen, de tal manera que la selección del método más adecuado a cada problema, pueda realizarse de manera lógica, según se muestra en la fig 1.

Lo primero que debe destacarse es, que es lo que se pretende dise-





ñar, para que fin se destinará, cuales son los eventos que pueden influir de manera decisiva en el funcionamiento de la obra. Teniendo claras estas ideas, es posible seleccionar adecuadamente a la variable o las variables que deben simularse, si es correcto generarlas aisladamente, o bien, es necesario generarlas en conjunto respetando la correlación entre ellas, definir el intervalo de tiempo adecuado para la simulación, etc.

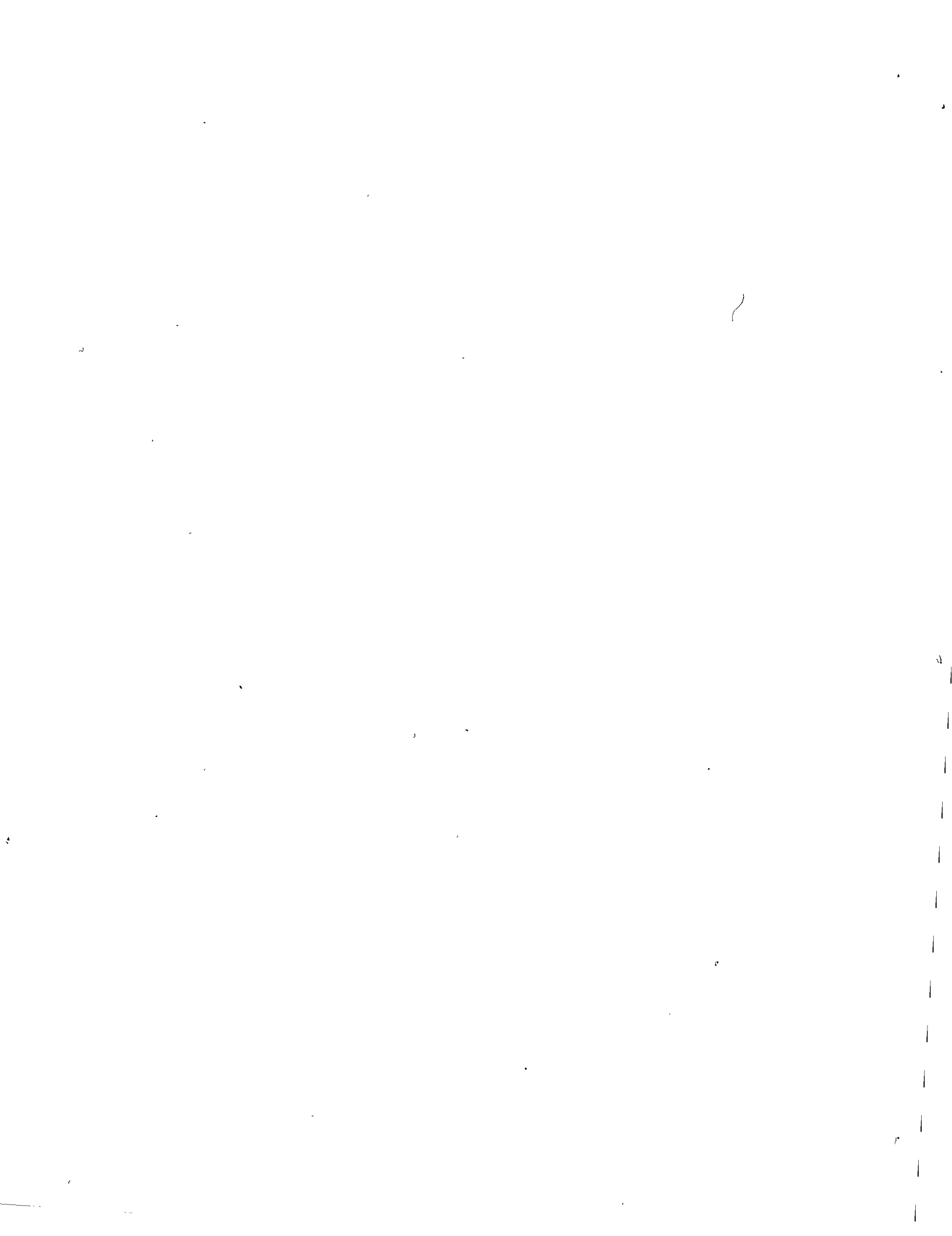
Para aclarar ideas, se puede pensar en los siguientes ejemplos:

1. Se busca conocer la posible evolución de los niveles en la presa La Angostura para determinar la frecuencia con la que se sobrepasa el nivel máximo de operación o bien se baja del nivel mínimo de operación.

Las descargas de la presa son conocidas y se cuenta con registros diarios durante 12 años, de lluvias, escurrimientos y evaporaciones.

La curva Elevaciones-Capacidades es tal que 1 m de desnivel corresponde a  $420 \times 10^6 \text{ m}^3$  de almacenamiento.

Si se considera la gran capacidad de la presa, se concluye que la generación de registros simulados puede hacerse con intervalos mensuales, debido a que los eventos que pudieran presentarse en intervalos menores no pueden provocar un cambio importante en los niveles de la presa. Por otro lado, si se tiene un registro de escurrimientos, no tiene objeto simular registros de lluvia, de tal manera que las variables por simular son los volúmenes de escurrimiento y evaporación, con intervalos mensuales. Por otro lado, la lámina de evaporación en el mes en que esta es máxima, a fluctuado desde un valor mínimo de 0.19 m en 1966, hasta un máximo de 0.23 m en 1972, de tal manera que los volúmenes evaporados serán mucho menores que los escurrimientos y su variación de un año a otro es muy pequeña. Estas úl



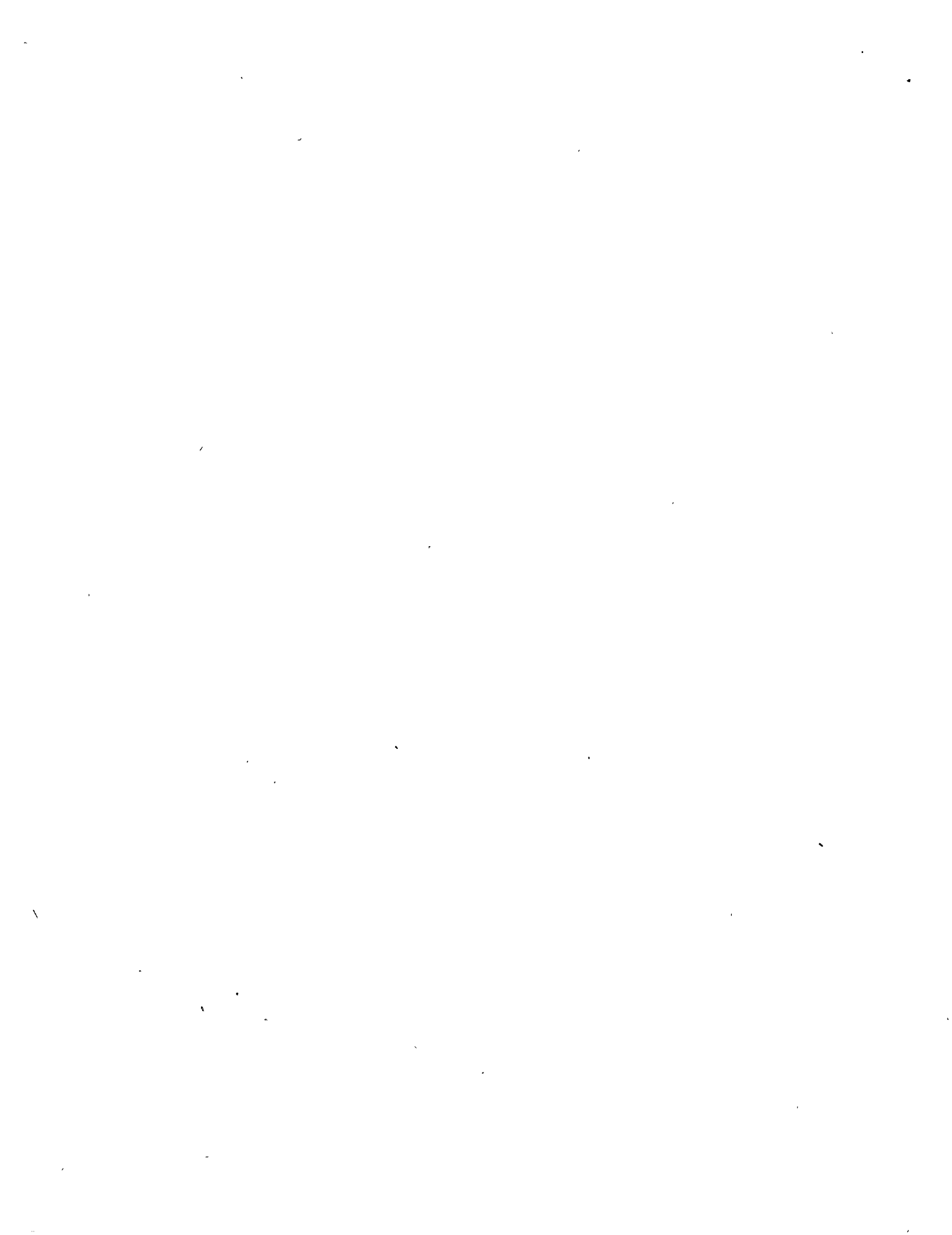
timas consideraciones hacen ver que el problema puede resolverse generando independientemente los volúmenes de escurrimiento y los de evaporación y que inclusive si estos últimos no se generan, sino que se supone que tomarán los valores medios mensuales del registro histórico, los errores que se cometan no influirán en el resultado.

2. Se requiere conocer la capacidad de los lagos de Texcoco, para que satisfagan requisitos prefijados en cuanto a la frecuencia de déficit. El agua almacenada se destinará a riego y la demanda correspondiente es conocida. Nuevamente, en este problema el orden de magnitud de las dimensiones es tal que no se requiere generar simultáneamente registros de evaporación y de escurrimiento. Además, como el régimen de demanda es precisamente el contrario del de escurrimientos, el mes en que podrían presentarse los déficits está completamente definido, por lo que es suficiente con generar los volúmenes por temporadas, dividiendo estos en temporada de avenida y temporada de secas, con la ventaja adicional de que la correlación entre los volúmenes escurridos en una y otra es nula y por lo tanto, pueden generarse independientemente.

En el siguiente capítulo se hará una descripción de los principios generales en que se basan diferentes métodos, haciendo énfasis en las características estadísticas que reproducen. Existen programas de computadora de todos los métodos que se describen.

## 2. DESCRIPCION DE LOS METODOS

En este capítulo se describen cinco métodos para generar registros hidrológicos. Cada uno de ellos debe utilizar en su desarrollo la función de distribución de probabilidades que mejor se ajuste a la información histórica. En el caso de registros hidrológicos las funciones de distribución más comúnmente utilizadas son:



a) Función de distribución normal.

Esta función es muy utilizada debido a que según ella se distribuyen muchas variables y a que numéricamente es muy sencilla de manejar. Sin embargo, en los fenómenos hidrológicos, las variables más comunes tienen una función de distribución asimétrica y con límite inferior acotado por lo que la distribución normal pocas veces se ajusta a los datos históricos. Otra ventaja de esta función de distribución es que el resultado de cualquier combinación lineal de variables independientes con distribución normal, resulta en otra distribución del mismo tipo.

b) Función de distribución log Normal.

Si los logaritmos de una variable tienen distribución normal, entonces la variable tiene distribución Log Normal. Esta función es también fácil de manejar numéricamente y, además es asimétrica y acotada inferiormente, por lo que se ajusta a muchas variables asociadas a fenómenos hidrológicos. La principal desventaja en su utilización es que la suma de variables aleatorias con distribución Log Normal tiene una función de distribución que no es Log Normal.

c) Función de distribución Gamma.

Esta función de distribución depende de tres parámetros. Su utilización en estadística es más reciente que las otras dos debido a que es más difícil de manejar numéricamente. Sin embargo, está acotada inferiormente y puede adoptar cualquier asimetría variando sus parámetros. Aun cuando en general la suma de dos variables Gamma no tiene distribución Gamma, en casos particulares en que su segundo parámetro vale 1; sí lo es.

Los cinco métodos que se describen a continuación pueden utilizarse con cualquiera de las tres funciones de distribución descritas.



## 2.1 Método de Tomas-Fiering<sup>1</sup>.

En este método la generación del registro hidrológico es secuencial, de manera que el valor generado de un mes cualquiera  $j$ , correspondiente al año  $i$ , es función de:

- La media de los valores históricos del mes  $j$ .
- Una desviación, proporcional a la desviación del mes anterior  $j-1$ , respecto a su media y al coeficiente de correlación entre ambos meses.
- Un número aleatorio  $\delta_{ij}$  con media cero y cuya función de distribución puede ser cualquiera de las descritas.

La expresión general para la generación es.

$$X_{ij} = \bar{X}_j + \frac{\rho_j S_j}{S_{j-1}} (X_{i,j-1} - \bar{X}_{j-1}) + \delta_{ij} (1 - \rho_j^2)^{1/2} \quad (2.1)$$

En donde

- $X_{ij}$  valor generado para el año  $i$  y el mes  $j$ .
- $\bar{X}_j$  media de los valores históricos del mes  $j$ .
- $S_j$  desviación estándar de los valores históricos del mes  $j$ .
- $\rho_j$  coeficiente de correlación entre los valores históricos del mes  $j$  y los del mes  $j-1$ .

Mediante este método es posible reproducir las medias y las desviaciones estándar de cada mes, así como el coeficiente de correlación entre cada mes y el que le antecede. La función de distribución de las desviaciones históricas respecto a la media sólo se reproduce si estas tienen distribución normal.

En la fig 2 se comparan los coeficientes de correlación histórica con los generados mediante este método.





## 2.2 Método de González V-Domínguez<sup>2</sup>

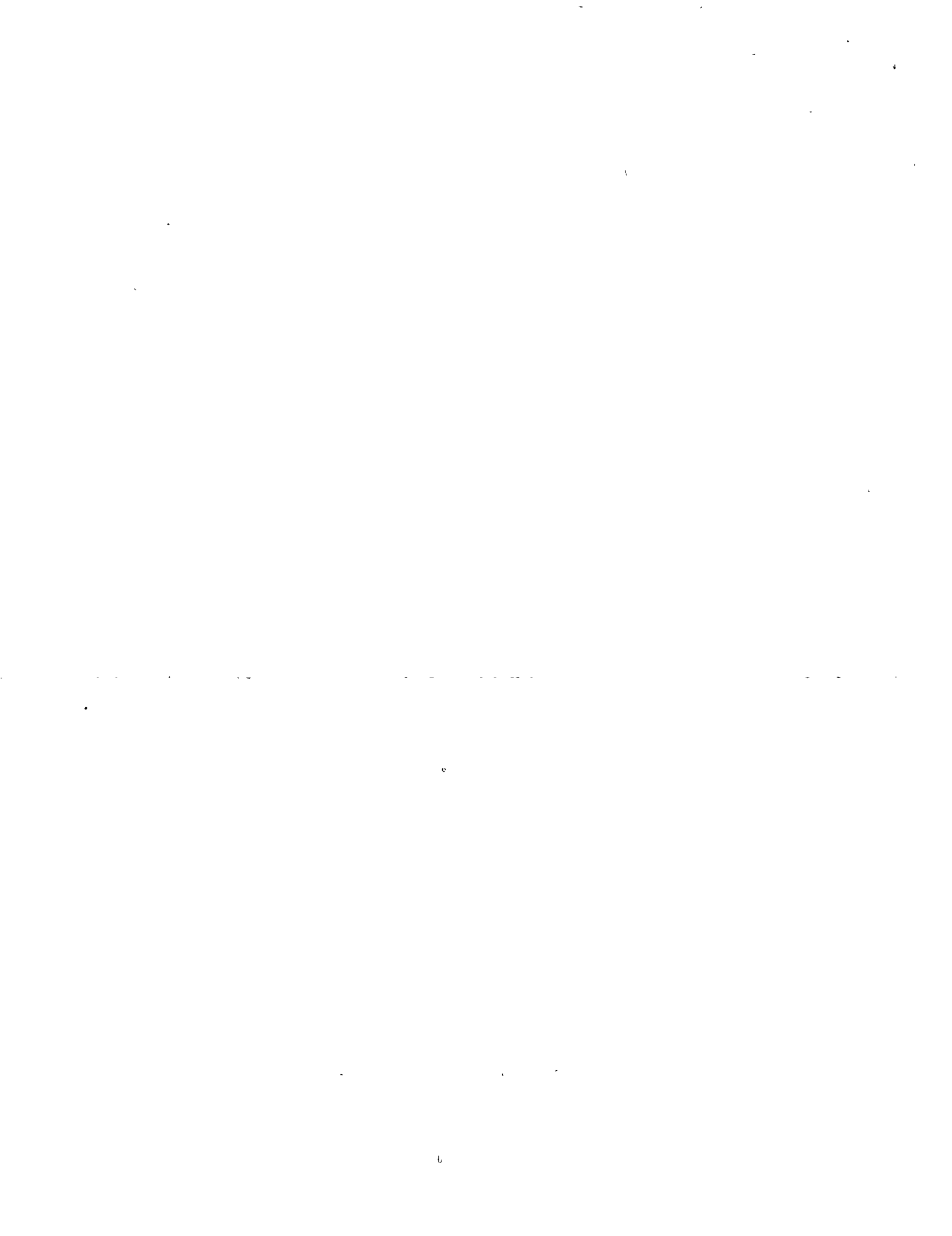
En este método la generación de los valores es simultánea. Ha sido desarrollado sobre todo para variables con función de distribución Gamma, pero puede extenderse a variables con distribución Normal o Log Normal, con la restricción de que en el último caso, no se reproduce la función de distribución de los valores históricos. La descripción que sigue se refiere a su aplicación para la función de distribución Gamma.

Las propiedades de la función de distribución Gamma que se aprovechan son:

- Si  $Q$  es una variable aleatoria con distribución Gamma, parámetros  $(\alpha, \beta, \delta)$ , entonces la variable  $\frac{Q-\delta}{\beta}$  tiene distribución Gamma con parámetros  $(\alpha, 1, 0)$ . A esta última función se le llama Gamma de 1 parámetro. Esta propiedad es válida también en el sentido inverso.
- Si dos variables aleatorias  $X$  y  $Y$  independientes, están distribuidas según funciones Gamma con parámetros  $(x, 1, 0)$  y  $(y, 1, 0)$  respectivamente, entonces la variable  $Z = X + Y$  estará distribuida según una función Gamma con parámetros  $(x + y, 1, 0)$ .

La idea del método es generar para cada mes un número aleatorio con distribución Gamma de un parámetro; aprovechando la primera propiedad, se puede transformar a este en un valor con función de distribución Gamma de tres parámetros y, aprovechando la segunda se le puede hacer igual a la suma de tres valores aleatorios, uno de ellos es común con el del mes anterior, otro con el correspondiente al mes siguiente y el tercero corresponde únicamente al mes en cuestión.

Si la función de distribución de los valores históricos del mes  $i$  es Gamma con parámetros  $(A_i, B_i, D_i)$ , para que en la ge-



neración se conserve la función de distribución, se requiere que:

$$A_i = \alpha_{i-1} + \alpha_i + \gamma_i \quad i = 2, 3, \dots, 11, 12 \quad (2.2)$$

$$A_1 = \alpha_{12} + \alpha_1 + \gamma_1$$

Para que la correlación entre el mes  $j$  y el  $j-1$  se conserven:

$$\rho_{j, j-1} = \frac{\alpha_{j-1}}{\sqrt{A_j \cdot A_{j-1}}} \quad (2.3)$$

Mediante las ecuaciones (2.2) y (2.3) se encuentran los valores de  $\alpha_j$ ,  $j=1, 2, \dots, 12$  y  $\gamma_j$ ,  $J = 1, 2, \dots, 12$ .

La simulación se realiza generando 24 variables aleatorias con función de distribución Gamma de un parámetro ( $\alpha_j$ ,  $\gamma_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, 12$ ). Cada grupo de tres variables se suma siguiendo la secuencia establecida en (2.2), al valor resultante se le multiplica por  $B_i$  y se le suma  $D_i$ .

El método permite reproducir medias, desviaciones estandar, correlaciones mensuales y la función de distribución de los valores históricos si esta es Gamma o Normal.

En la fig 3 se muestra un ejemplo de la función de distribución de los valores históricos y la de los valores generados mediante este método.

### 2.3 Modelo de líneas quebradas<sup>3, 4</sup>.

La principal característica de este modelo es conservar el correlograma del registro histórico. Esta programado para valores mensuales pero la teoría puede extenderse a valores diarios.



El modelo consiste básicamente en obtener cada valor generado como la suma de las ordenadas correspondientes a varias líneas rectas con quiebres a diferentes frecuencias (fig 4a). Las ordenadas sobre cada línea se obtienen interpolando linealmente valores aleatorios independientes con distribución normal. Se aplica a los valores residuales (los valores históricos originales transformados para tener media cero y desviación estandar uno). Se han hecho algunas generaciones de valores mensuales mediante dos líneas quebradas. En este caso, se requiere conocer cuatro parámetros que pueden obtenerse a partir de dos puntos del correlograma histórico. El modelo se aplicó a los datos de evaporaciones mensuales registrados en la estación climatológica San Fernando, Tamaulipas. En la fig 4b se puede observar la comparación entre el correlograma de los datos históricos y el obtenido a partir del registro simulado.

#### 2.4 Modelo análisis de componentes<sup>5, 6.</sup>

En este método se considera al registro histórico como una serie cronológica formada por la suma de los siguientes componentes

1. Tendencia de la media ( $\bar{X}(t)$ )
2. Componente cíclica ( $y(t)$ )
3. Componente autorregresiva ( $Z(t)$ )
4. Ruido o componente aleatoria ( $r(t)$ )

Los valores generados están dados entonces por la expresión

$$x(t) = \bar{X}(t) + y(t) + z(t) + r(t)$$

La determinación de cada componente se hace con base en el registro histórico como se muestra enseguida:

- 1) Tendencia. El valor de la tendencia se obtiene ajustando al registro histórico un polinomio de la forma

$$X(t) = \bar{X} + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n \quad (A)$$



No existe evidencia de que los registros hidrológicos provocados por fenómenos naturales tengan una tendencia a crecer o decrecer a largo plazo, por lo que normalmente sólo se considera en la ecuación (A) el primer término del segundo miembro.

Componente cíclica. Si del registro histórico se remueve la tendencia, el resultado es una nueva serie, a la que se le puede ajustar una suma de senoídes con diversas amplitudes y períodos, es decir, se puede tener:

$$Y(t) = \sum A_n \text{ Sen } (2\pi f_n t + \phi_n)$$

El ajuste de la nueva serie deberá hacerse para una  $n$  finita, de modo que el período de cada senoíde pueda ser interpretado en términos del fenómeno que se estudia. Así, por ejemplo, si se analizan series mensuales, es evidente que existirá una senoíde con período de 12 meses. Para identificar los períodos fundamentales puede utilizarse la técnica del espectro. Una vez identificadas las frecuencias más importantes, el problema se reduce a encontrar los valores.

$$A_n, \quad \phi_n \quad n = 1, 2, \dots$$

que hacen que la función  $Y_n$  sea lo más parecida posible a  $x(t) = \bar{X}(t)$

Las desviaciones que subsisten después de remover la tendencia y la componente cíclica, pueden presentar un fenómeno de persistencia, es decir, que a valores grandes tiende a seguir le valores grandes y a valores pequeños valores pequeños. Es te fenómeno de persistencia se debe a que existe una correlación entre lo que pasa en un momento dado y lo que ha pasado previamente. Esto último puede representarse por:





$$Z(t) = b_1 Z(t-1) + b_2 Z(t-2) + \dots$$

Nuevamente el número de coeficientes debe ser finito y si no existe evidencia de lo contrario es preferible considerar que vale 1, ó sea que

$$Z(t) = b_1 A(t-1)$$

y debe encontrarse de tal manera que el ajuste entre

$$Z(t) \text{ y } x(t) - \bar{X}(t) - Y(t) \text{ sea el mejor posible}$$

Después de quitar al registro original la tendencia, la componente cíclica y la componente autorregresiva, a lo que queda se le llama ruido y se le ajusta una función de distribución cualquiera.

Como puede verse, de la exposición anterior, el problema principal del método radica en la selección del número de términos que debe tener cada componente. Por otro lado, los ciclos que se presentan en los registros históricos no son siempre de tipo senoidal.

## 2.5 Método de componentes principales<sup>7</sup>

Como ya se dijo, en algunos casos puede ser importante generar los registros de dos o más estaciones o bien de dos o más variables simultáneamente. Esto genera un problema adicional en el cálculo debido a que además de respetar las características estadísticas de cada variable, es necesario conservar la correlación entre las variables. El método de componentes principales puede operarse en conjunto con cualquiera de los anteriores. Consiste básicamente en conocer primero, la correlación cruzada entre las diferentes variables. Una vez conocida la correlación, se remueve mediante una matriz de transformaciones lineales, dando lugar a nuevas variables

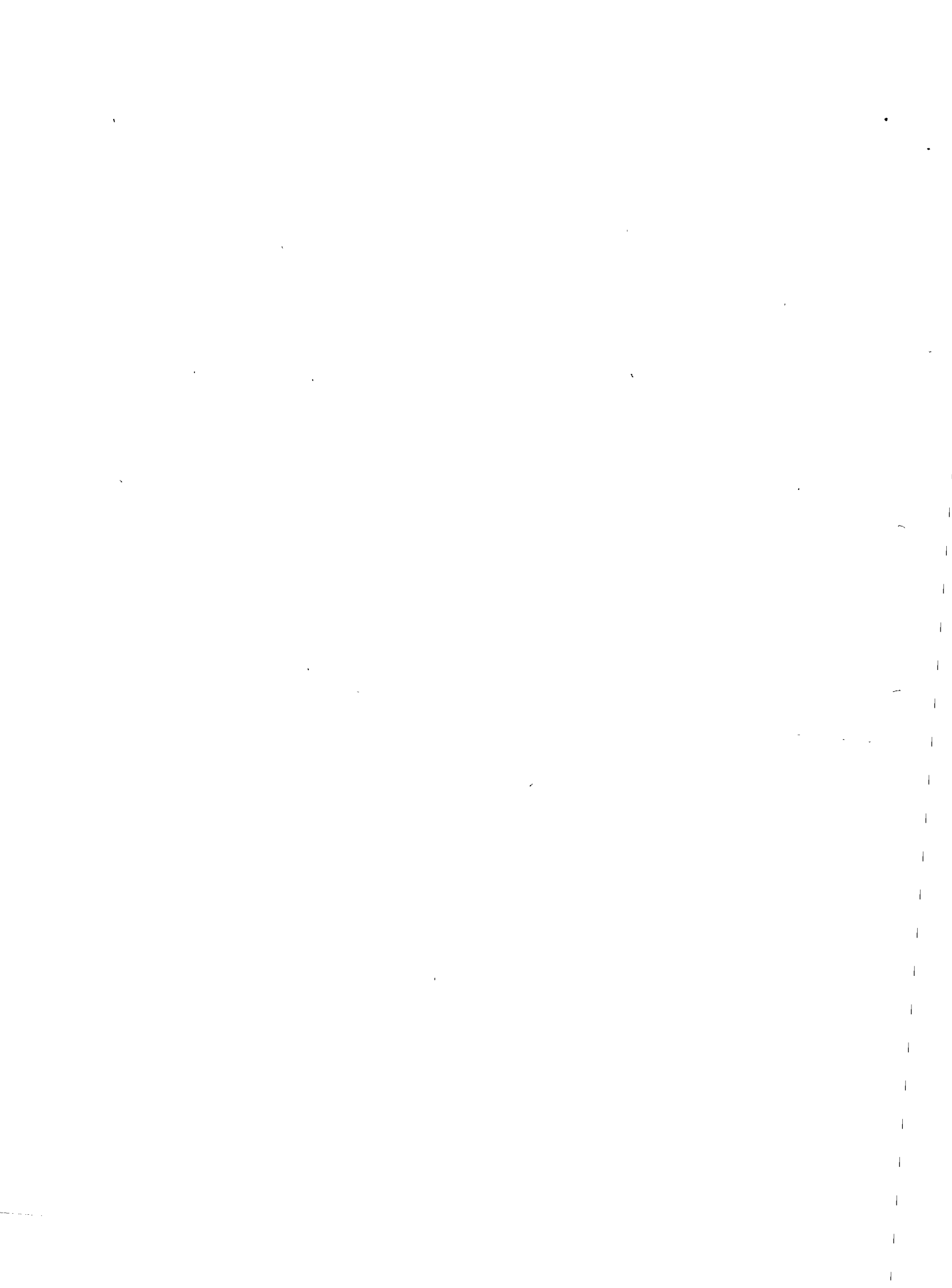


auxiliares independientes entre sí. Las variables auxiliares pueden generarse independientemente una de la otra, con cualquiera de los métodos descritos anteriormente y, una vez generados, se aplica la transformación lineal inversa.

Matalás<sup>8</sup>, propuso un método alternativo en donde la generación se hace de manera directa pero tiene la desventaja de que sólo puede ser utilizado, sí para cada una de las variables la correlación entre meses es función únicamente del de fasamiento en el tiempo y no del tiempo mismo.

En cualquier caso, los métodos implican el uso de transformaciones lineales, con las que la forma de la función de distribución se pierde (con excepción del caso en que la función sea normal).

En la tabla 1 se presenta un resumen de las características estadísticas que se conservan con cada uno de los métodos.



## R E F E R E N C I A S

- 1) FIERING y JACKSON, 1971. "Synthetic Streamflows", American Geophysical Union, Washington, D.C.
- 2) GONZALEZ, V.F. y DOMINGUEZ, M.R., 1972. "Un método para generación de registros operacionales de volúmenes mensuales en un río". Quinto Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- 3) GARCIA, L.E., Dawdu. D.R. y MEJIA, J.M., agosto 1972. "Long Memory Monthly Streamflow Simulation by a Broken Line Model", Water Resources Research, Vol. 8, N° 4.
- 4) MEJIA, J.M., RODRIGUEZ-ITURBE, I. y DAWDY, D.R., agosto 1972. "Streamflow Simulation, 2. The Broken Line Process as a Potential Model for Hydrologic Simulation", Water Resources Research, Vol. 8, N° 4.
- 5) QUIMPO, R.G., enero 1972. "Stochastic Analysis of Daily River Flows", Journal of the Hydraulics Division.
- 6) KOTTEGODA, N.T., 1970. "Statistical Methods of River Flow Synthesis for Water Resources Assessment", The Institution of Civil Engineers, Proceedings, Supplement, Paper 7339 S.
- 7) CAPELLA, V.A. y SANCHEZ, B. J.L., 1967, "Elaboración de un modelo matemático para el estudio de la cuenca del Bajo río Bravo, Tamps.", Informe de trabajo del Instituto de Ingeniería de la UNAM.
- 8) MATALAS, N.C., 1967, "Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology", Water Resources Research, Vol. 3, N° 4.



TABLA 1

MODELOS	CARACTERISTICAS ESTADISTICAS QUE SE CONSERVAN.
THOMAS-FIERING (Markov orden uno)	Media y desviación estandar de cada temporada y el coeficiente de correlación cruzada de orden uno entre las temporadas.
GONZALEZ V-DOMINGUEZ	Media, desviación estandar de cada temporada y la distribución de probabilidad de los datos de cada temporada, como también el coeficiente de correlación cruzada de orden uno entre las temporadas.
LINEAS-QUEBRADAS	Media y desviación estandar de cada temporada. El autocorrelograma de todos los datos que componen el registro histórico.
ANALISIS DE COMPONENTES	Media, componentes cíclica, autorregresiva y aleatoria del conjunto de datos del registro histórico.
COMPONENTES PRINCIPALES	Para la generación simultánea de registros sintéticos conservando el coeficiente de correlación cruzada entre ellos.





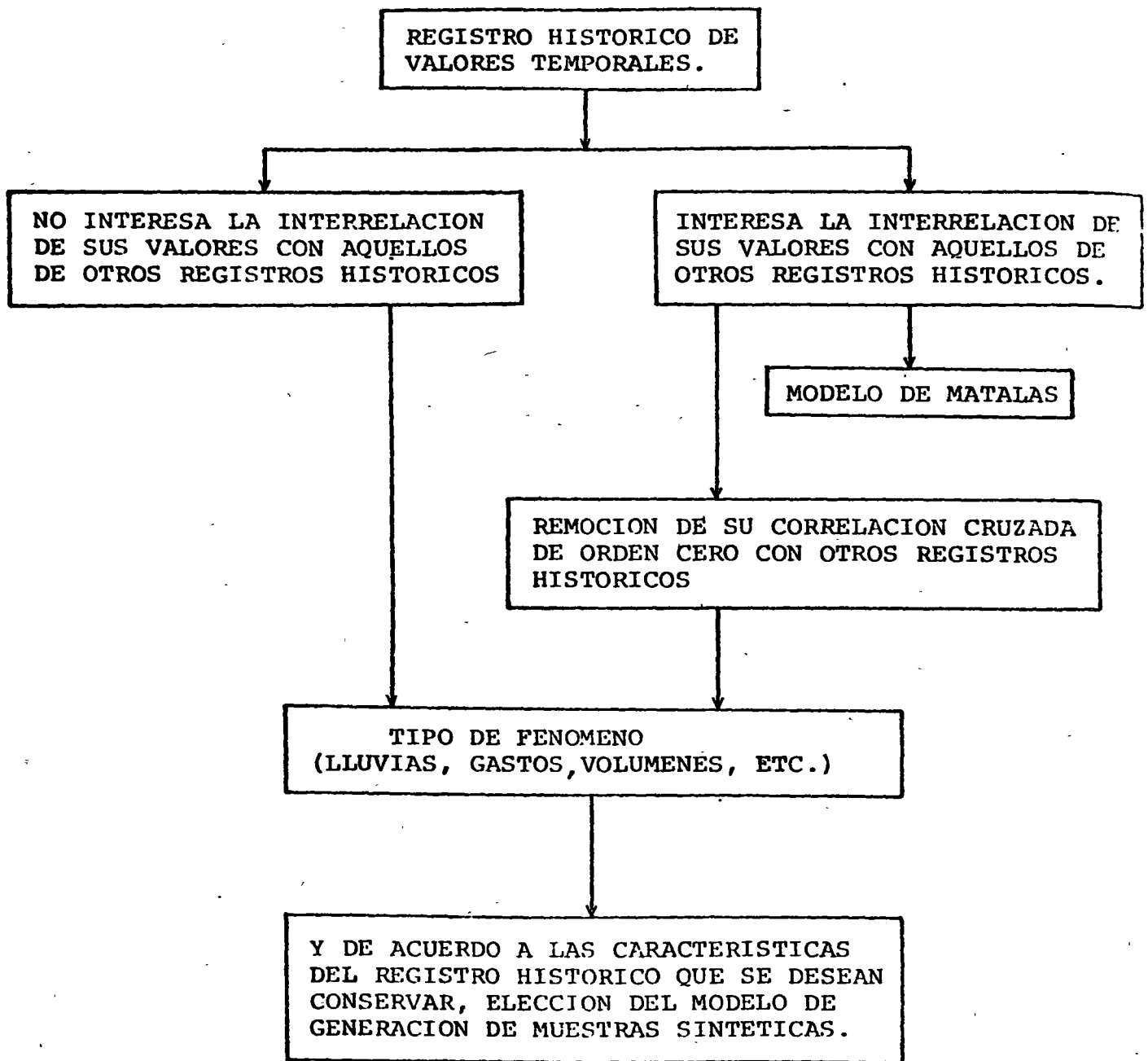
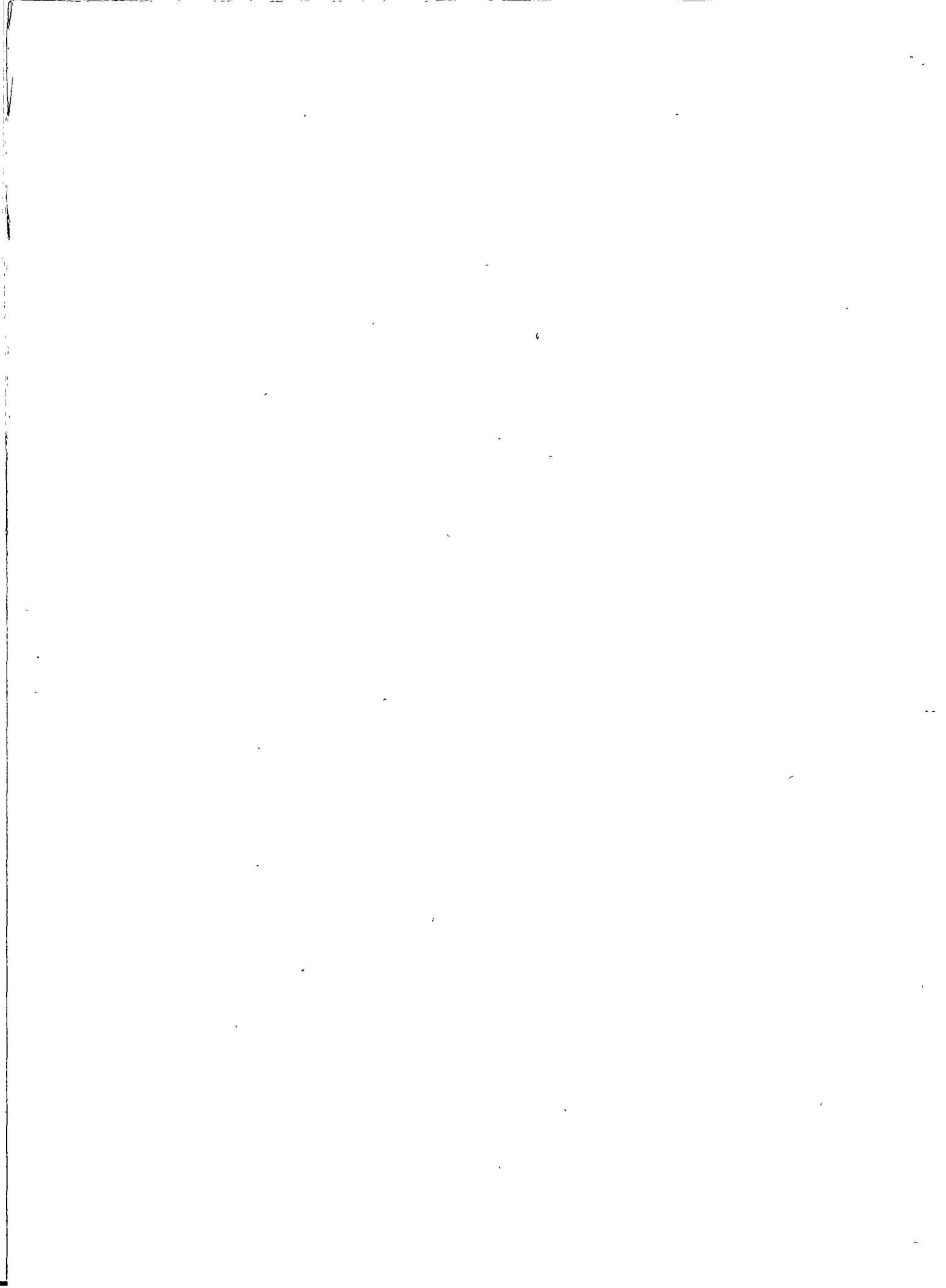


Fig 1 Esquema para la elección del modelo de generación de muestras sintéticas.



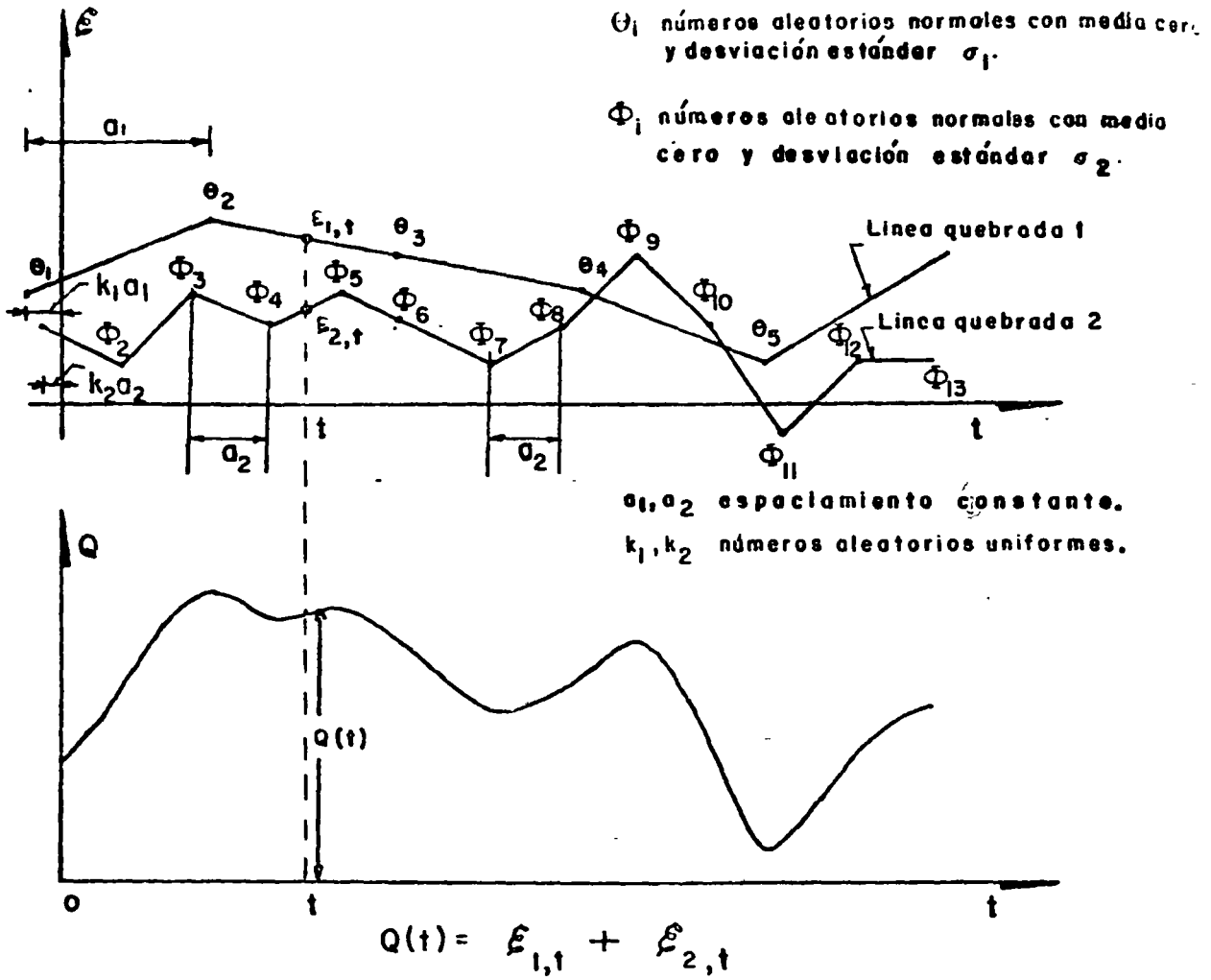


Fig. 4a. Proceso de líneas quebradas.

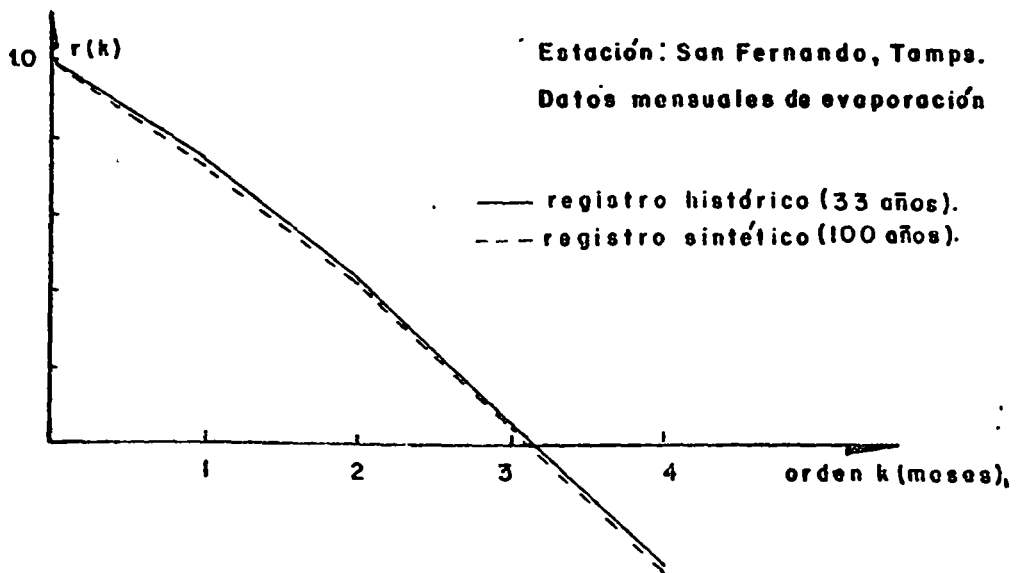
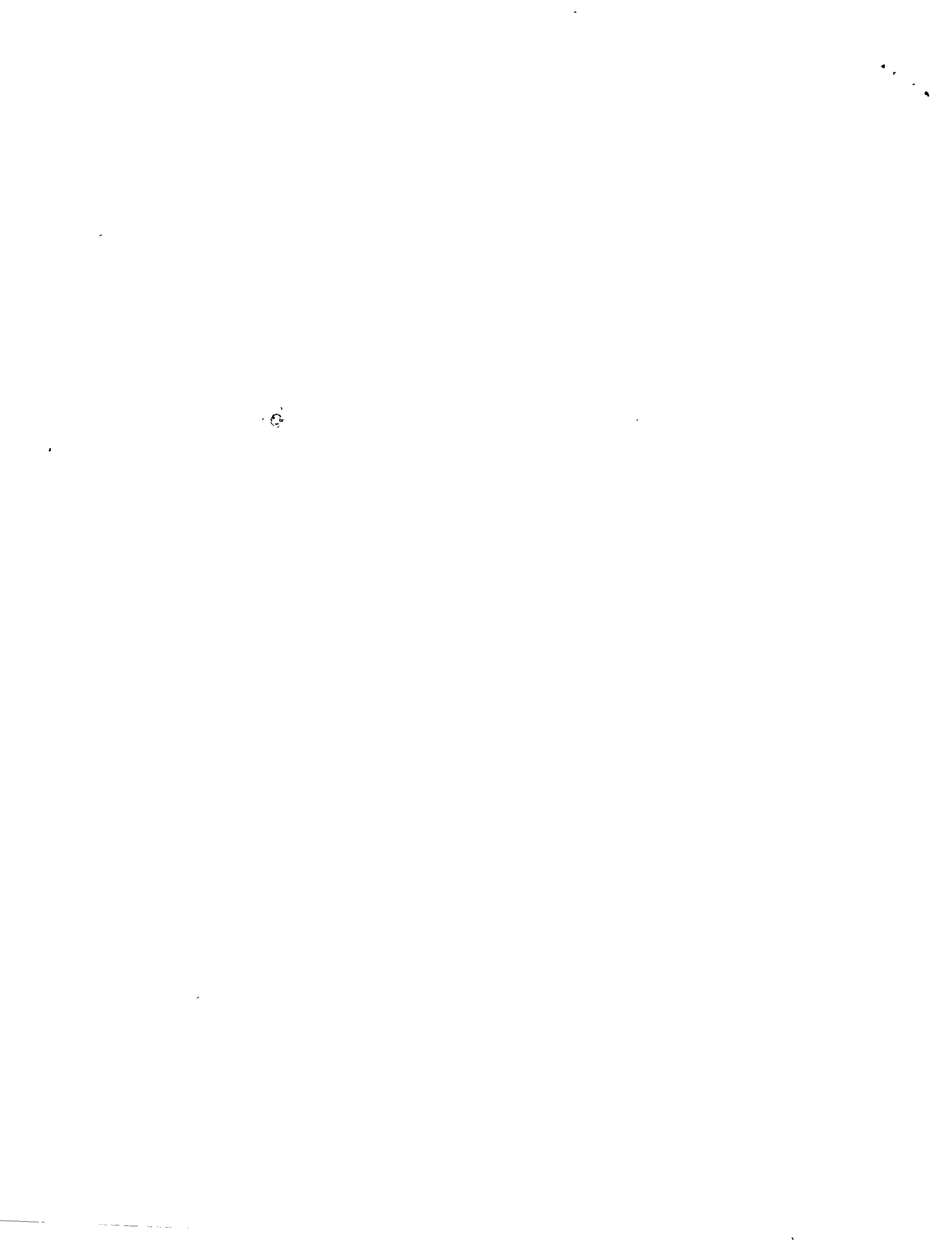


Fig. 4b. Correlograma.



**HIDROLOGIA SUPERFICIAL**

**ANALISIS ESTADISTICO Y PROBABILISTICO DE  
DATOS HIDROLOGICOS**

**Dr. Rolando Springall**

**Octubre, 1977**



# I N D I C E

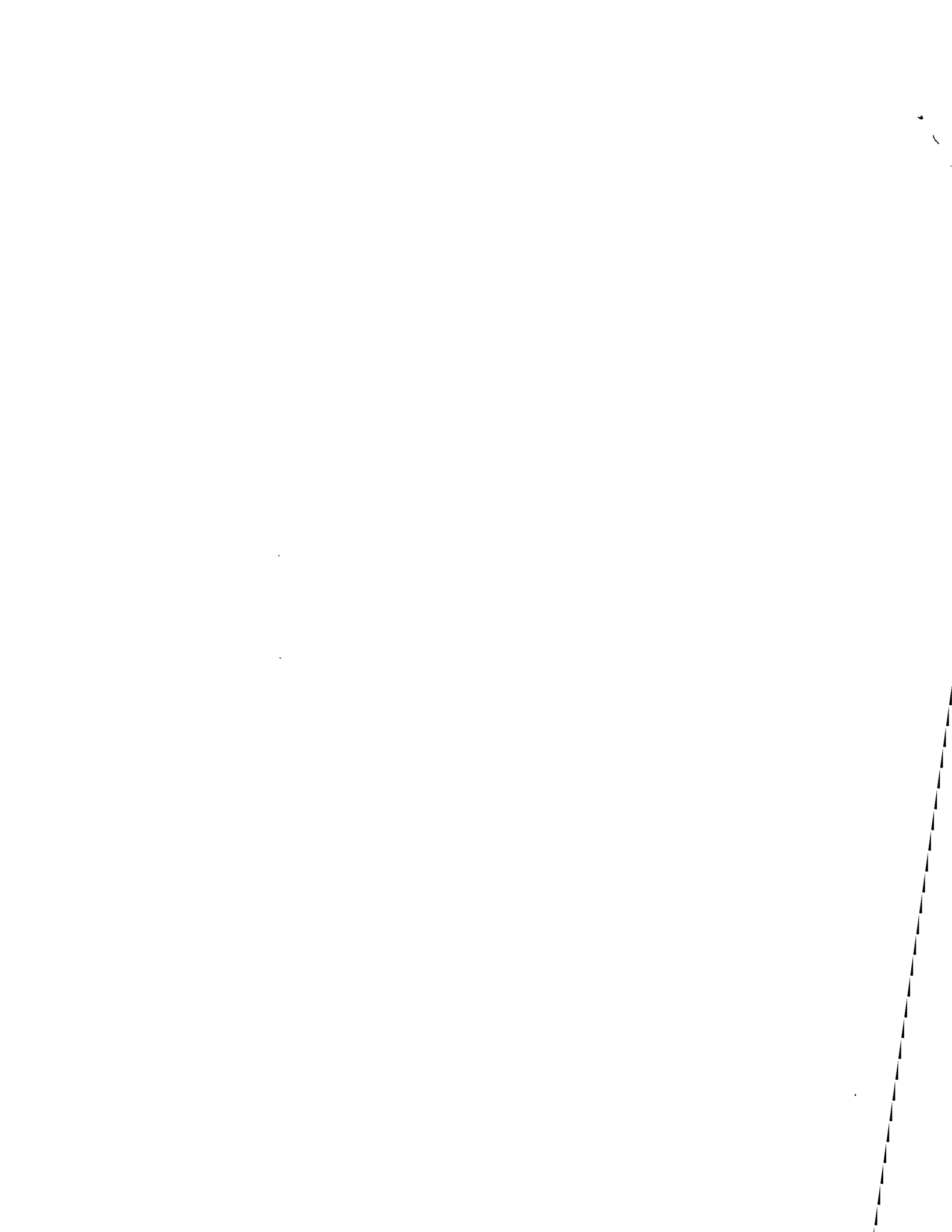
---

8.	<u>ANALISIS ESTADISTICO Y PROBABILISTICO DE DATOS HIDROLOGICOS</u>	1
8.1	<u>Fundamentos de probabilidad y estadística</u>	1
8.1.1	Distribución de frecuencias y probabilidades	3
8.1.2	Parámetros estadísticos	10
8.1.3	Pruebas F y t	15
8.1.4	Ajuste de distribuciones	20
8.2	<u>Correlación lineal simple</u>	30
8.3	<u>Correlación lineal múltiple</u>	49
8.4	<u>Ordenamiento de datos hidrológicos</u>	63
8.4.1	Selección de un registro	63
8.4.2	Período de retorno	64
8.4.3	Períodos de retorno de los datos	68
8.4.4	Períodos de retornos de los eventos de diseño	70
8.5	<u>Distribuciones de datos hidrológicos</u>	74
8.5.1	Distribución de valores extremos Tipo I	75
8.5.2	Distribuciones ajustadas por mínimos cuadrados	82
8.5.3	Distribución de frecuencias aplicada a dos poblaciones	91

10



8.6	<u>Extrapolación de las curvas de frecuencias</u>	96
8.7	<u>Análisis de gastos máximos anuales</u>	98
8.8	<u>Análisis de lluvias</u>	100
8.8.1	Distribuciones de alturas de lluvia por una duración constante	101
8.8.2	Curvas de alturas de lluvia-duración-período de retorno	101
8.8.2.1	Criterio propuesto por Chow	103
8.8.2.2	Ajuste por correlación lineal múltiple	105
8.8.3	Ajustes y utilización de las curvas de altura de lluvia-duración-período de retorno	121
8.9	<u>Generación de Información Hidrológica</u>	128
8.9.1	Series Cronológicas	129
8.9.2	Procesos de Generación	133
8.9.2.1	Promedios móviles	133
8.9.2.2	Proceso de suma de armónicas	138
8.9.2.3	Proceso autorregresivo	139



## 8. ANALISIS ESTADISTICO Y PROBABILISTICO DE DATOS HIDROLOGICOS

En los capítulos anteriores se han indicado los elementos que inter -  
vienen en el proceso general lluvia-escorrimento, así como la for -  
ma de medirlos y cuantificarlos.

Aquí se introducen los conceptos de probabilidad y estadística aplicados  
al análisis de datos hidrológicos; primero se plantean los funda -  
mentos de probabilidad y estadística, para después aplicarlos a los  
registros de datos hidrológicos y proceder al estudio de las técnicas  
más comunes de probabilidad y estadística utilizadas en el análisis  
de dichos registros.

### 8.1 Fundamentos de probabilidad y estadística

A continuación se presenta un breve resumen de los conceptos de esta

10

tadística más usuales en hidrología a fin de resaltar fundamentalmente la importancia que tienen estos en la solución de los problemas hidrológicos, sin pretender desarrollar una teoría de los mismos, para lo cual al final del capítulo se proporciona una lista bibliográfica de libros relativos al tema.

Desde el punto de vista estadístico, un registro de datos hidrológicos se conoce como una muestra del comportamiento del fenómeno que se está analizando y midiendo, y al conjunto de todos los posibles registros bajo ciertas condiciones: población o universo del mismo fenómeno. Al proceso de observación o de registro se le llama experimento y las respuestas obtenidas de éste se conocen como resultados. En hidrología, los resultados así definidos tienen una descripción numérica y se les denomina variables aleatorias.

De acuerdo con lo anterior se ve que al analizar cualquier registro de datos hidrológicos, se tiene exclusivamente una muestra de estos y que nunca es factible disponer de la población de ellos, ya que los datos están ligados a fenómenos naturales cuyos resultados con siempre cambiantes. El problema por lo tanto es conocer que tan representativos son los resultados obtenidos de la muestra, del universo de los mismos. Es aquí donde las técnicas estadísticas son de gran utilidad, ya que si la muestra es representativa de la población permite hacer deducciones de esta, en relación con la naturaleza de la

11

población.

El análisis estadístico de datos hidrológicos se puede hacer utilizando alguno de los modelos de distribuciones de probabilidad más usuales o bien, con base en un ajuste de los mismos mediante cierta técnica matemática que es generalmente la de mínimos cuadrados.

#### 8.1.1 Distribución de frecuencias y probabilidades.

Las variables aleatorias pueden ser discretas o continuas, dependiendo de la forma como se obtengan los resultados; por ejemplo, el número de días de lluvia es una variable aleatoria discreta, mientras que las alturas de lluvia son variables aleatorias continuas. Sin embargo, para propósitos prácticos una variable discreta puede tratarse arbitrariamente como continua, ajustando una función continua a la variación, o bien una continua como discreta, dividiendo las variables continuas en intervalos y agrupándolos en números discretos.

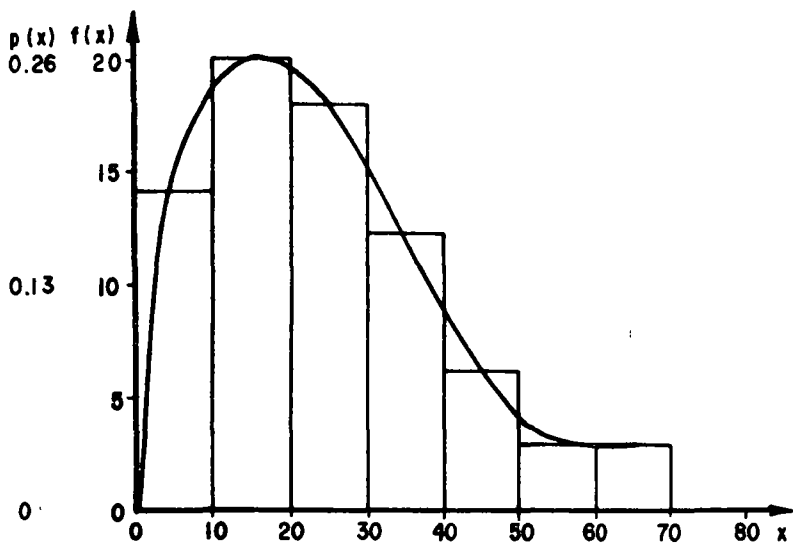
Para conocer la distribución de frecuencias de una muestra de variables aleatorias discretas es necesario dividir los datos ya obtenidos u observados en intervalos de clase o categorías a fin de valuar la frecuencia de cada intervalo. Si "z" es el número de datos agrupados en cierto intervalo de clase  $\Delta x_i$ , la frecuencia de ese intervalo de clase se define como

$$f_i = \frac{z}{\Delta x_i} \quad (8.1)$$

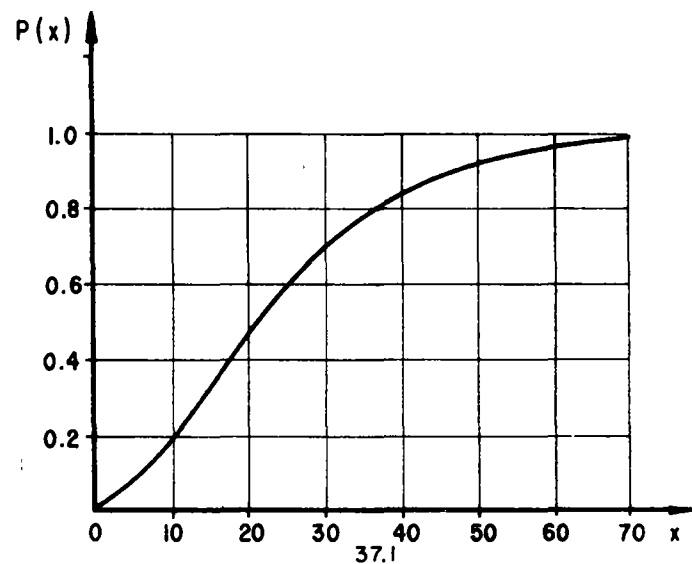




Si se grafica la frecuencia  $f_i$  correspondiente a cada intervalo de clase  $\Delta x_i$ , se obtiene lo que se conoce como distribución de frecuencias - - (Fig 8.1); sin embargo, esta distribución sacrifica cierta información - - contenida en el grupo de datos, ya que se trabaja con intervalos de clase en lugar de los valores específicos de cada una de las variables alea- torias.



a) Distribución de frecuencias y probabilidades



b) Distribución acumulada de probabilidades

Fig. 8.1 Distribuciones Estadísticas



La probabilidad  $p$  de que un valor  $x$  esté comprendido en un cierto intervalo de clase, se obtiene dividiendo el número de datos "z" contenidos en ese intervalo entre el número total de datos "n" de la muestra. Si el intervalo está acotado entre los valores de  $a$  y  $b$ , lo anterior se puede expresar como

$$p(a \leq x \leq b) = \frac{z_{ab}}{n} \quad (8.2)$$

Sustituyendo la ec 8.1 en la 8.2, se tiene que

$$p(a \leq x \leq b) = \frac{1}{n} \sum_a^b f_i \Delta x_i \quad (8.3)$$

lo cual implica que la probabilidad de que  $x$  fluctúe entre  $a$  y  $b$  es el área del histograma comprendido entre esos valores. La probabilidad total de todas las posibles variaciones es igual a uno. Si en lugar de frecuencias se utilizan probabilidades, la distribución obtenida se conoce como distribución de probabilidades; a su vez esta y la de frecuencias se denominan distribuciones estadísticas.

Para una variable aleatoria continua, la probabilidad de una variación puede considerarse como la probabilidad  $p(x)$  de un valor discreto contenido en el intervalo de  $x$  a  $(x + \Delta x)$ . Como  $x$  es un valor continuo,  $\Delta x$  tiende a  $dx$  y la probabilidad  $p(x)$  llega a ser una función continua denominada densidad de probabilidad. De la ec 8.3, si  $\Delta x$  tiende a  $dx$ , se tiene que



$$p(a \leq x \leq b) = \frac{1}{n} \int_a^b f(x) dx = \int_a^b p(x) dx \quad (8.4)$$

La probabilidad acumulada de una variación (fig 8.1b) es la probabilidad de que la variable aleatoria tenga un valor igual o menor que un cierto valor asignado  $x$ . Dicha probabilidad puede designarse como  $P(X \leq x)$  y expresarse de acuerdo con la ec 8.4 como

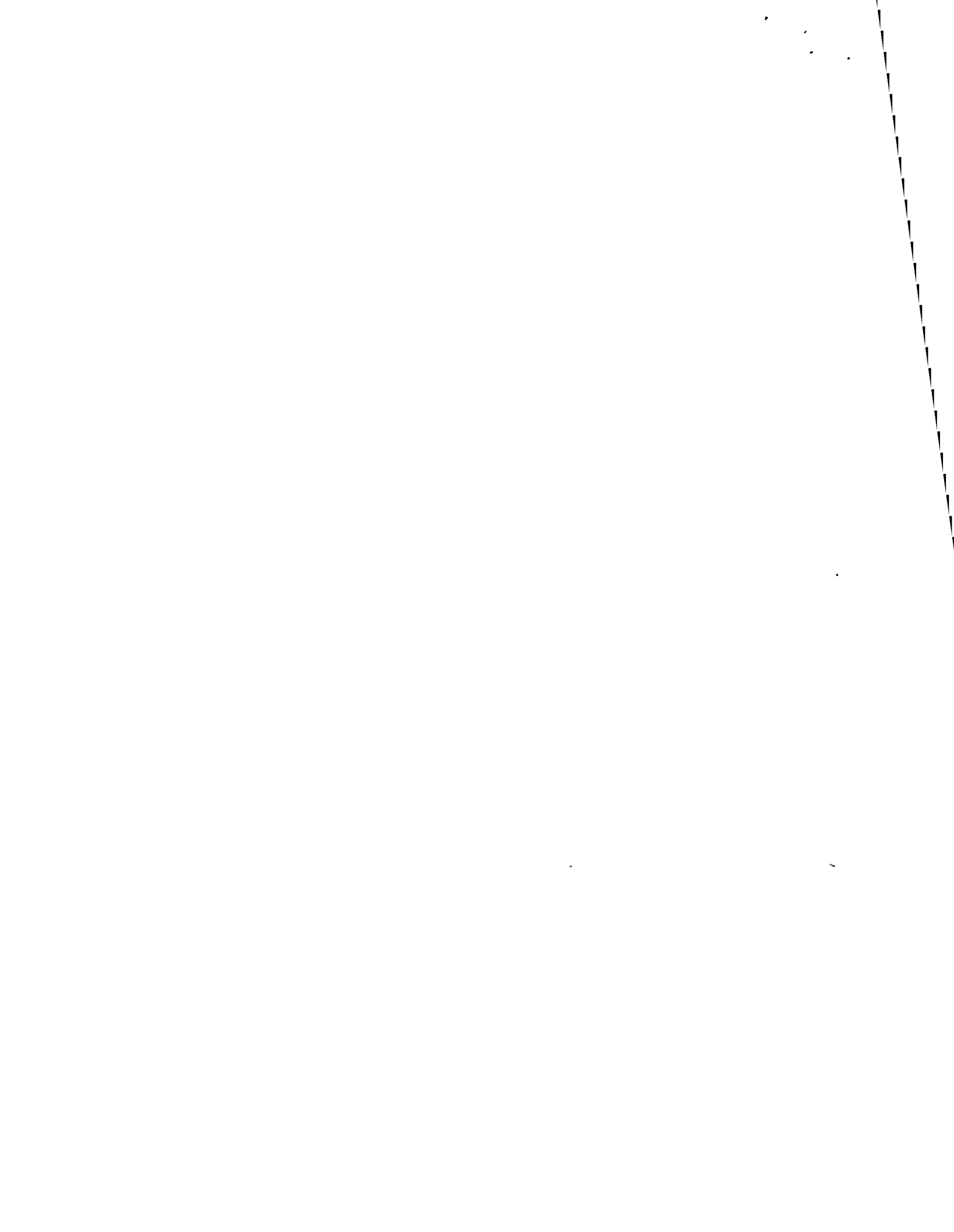
$$P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x p(x) dx \quad (8.5)$$

donde, en este caso, la distribución de probabilidades se considera ilimitada. Si el límite superior de la integral  $x = \infty$ , entonces  $P(X \leq x) = 1$ , lo que constituye el evento seguro. Si la distribución de probabilidades es limitada, o sea que la densidad de probabilidades  $p(x)$  se define para un cierto intervalo ( $a \leq x \leq b$ ), la ecuación anterior también es válida, considerando que  $p(x) = 0$  para todos los valores de  $x$  fuera del intervalo especificado.

En la Tabla 8.1 se muestran las distribuciones de probabilidades más usuales, así como sus parámetros más importantes.

Ejemplo 8.1 Determinar la distribución de frecuencias, de probabilidades y su acumulada, del registro de lluvias mostrado en la Tabla 8.2. Obtener la altura de lluvia para una probabilidad acumulada de 0.8.

Para conocer la distribución de frecuencias de las alturas de lluvia



T A B L A 8.1

DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDADES MAS USADAS EN HIDROLOGIA

Nombre de la distribución	EXPRESION MATEMATICA	Media	Variancia	Nomenclatura
POISSON	$p(x) = \frac{m^x e^{-m}}{x!} \quad m = np$	m	m <sup>2</sup>	a - parámetro b - parámetro c - parámetro n - número total de datos
NORMAL	$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} z^2}; \quad z = \frac{x - \mu}{\sigma}$	0	1	N - frecuencia total p - probabilidad de ocurrencia de un evento
GAMMA	$p(x) = \frac{x^a e^{-x/b}}{b^{a+1} \Gamma(a+1)} \quad b > 0, x > -1, \text{ para } x \neq 0$ $p(x) = 0 \quad \text{para } x \neq 1$ $(a + 1) = a!$	b (a+1)	b <sup>2</sup> (a+1)	p(x) - densidad de probabilidad p(z) - densidad de probabilidad
PEARSON Tipo III	origen en el modo $2\beta_2 = 3\beta_1 + 6$ $p(x) = p_0 \left(1 + \frac{x}{a}\right)^c e^{-cx/2}$ $c = \frac{4}{\beta_1} - 1; \quad a = \frac{c}{2} \frac{\mu_3}{\mu_2}$ $p_0 = \frac{N}{a} \frac{c^{c+1}}{e^c \Gamma(c+1)}; \quad 1 = \frac{\mu_3^2}{\mu_2^3}; \quad 2 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2}$	modo - $\mu_{3/2} \mu_2$	$\sqrt{\mu_2}$	x - variable y - variable z - variable normalizada $\mu$ - media de las x $\mu_2$ - segundo momento $\mu_3$ - tercer momento $\mu_4$ - cuarto momento $\mu_y$ - media de las y $\sigma_x$ - desviación estandar de las x $\sigma_y$ - desviación estandar de las y
EXTREMA Tipo I	$p(x) = \frac{1}{c} e^{-(ax)/c} - e^{-(a+x)/c}$	0.5772 c - a	$\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{c}{\sqrt{6}}$	
LOGNORMAL	$p(x) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-(y - \mu_y)^2 / 2\sigma_y^2}$ $y = \ln x$	$e^{\mu_y + \sigma_y^2 / 2}$	$\mu (\sigma_y^2 - 1)^{1/2}$	





(Tabla 8.2) se procedió a seleccionar un intervalo de clasificación, que de acuerdo con el tamaño de la muestra se consideró conveniente de 10 mm. Para efectos de cálculo, a todos los valores de la altura de lluvia entre 0.1 y 10 se les asignó un valor de 5, entre 10.1 y 20 de 15, etc (Tabla 8.3, cols 1 y 2). Seleccionados los intervalos se procedió a contar cuantos valores caen dentro de cada uno de estos, para valuar su frecuencia de acuerdo con la ec 8.1 (Tabla 8.3, col 3).

En la fig 8.1a se muestra la distribución de frecuencias o histograma de las alturas de lluvia, la cual se obtuvo graficando la pareja de valores obtenidos de la tabla 8.3, cols 2 y 3. (histograma).

Aplicando la ec 8.2 a los datos de la tabla 8.3, col 3, se tiene en la col 4, el valor de la probabilidad, el que al vertir en gráfica, respecto a la col 1, se obtiene la distribución de probabilidad de las lluvias analizadas (fig 8.1a). Finalmente, sumando los valores de la probabilidad obtenida en la col 4, se deduce la probabilidad acumulada de los valores de la lluvia analizada, col 5, cuya gráfica se indica en la fig 8.1b.

De la fig 8.1b se deduce que si  $p = 0.8$  se obtiene una altura de lluvia de 37.1 mm.

Esto implica que la probabilidad de que se presente un valor menor o igual a 37.1 es de 80 por ciento, así:

$$P(x \leq 37.1) = 0.80$$



TABLA 8.2 Alturas de lluvias con duración de 6 horas

No. Orden	hp (mm)	No. Orden	hp (mm)	No. Orden	hp (mm)	No. Orden	hp (mm)
1	10.9	20	8.7	39	21.3	58	5.7
2	14.6	21	2.9	40	17.2	59	15.5
3	20.6	22	8.9	41	36.1	60	18.5
4	11.9	23	32.3	42	49.5	61	30.7
5	64.0	24	56.6	43	20.0	62	10.5
6	20.9	25	3.6	44	4.6	63	3.5
7	32.0	26	11.0	45	27.3	64	13.9
8	28.8	27	52.5	46	49.7	65	4.3
9	2.6	28	46.3	47	34.6	66	22.6
10	35.8	29	5.2	48	49.0	67	45.0
11	17.7	30	42.5	49	25.3	68	10.0
12	38.4	31	17.5	50	27.2	69	9.6
13	16.3	32	64.5	51	38.8	70	22.7
14	6.8	33	28.5	52	52.4	71	23.0
15	17.0	34	19.6	53	11.5	72	26.2
16	6.8	35	30.9	54	15.8	73	31.7
17	25.3	36	27.5	55	70.00	74	29.9
18	36.3	37	10.3	56	24.0	75	25.9
19	16.5	38	21.1	57	16.5	76	34.5

TABLA 8.3 Análisis de Frecuencias y probabilidades.

1	2	3	4	5
Marcas de Clase	Intervalo de clase $\Delta x_i$	Frecuencia $\Delta x_{ifi}$	Probabilidad $p_i$	Probabilidad acumulada $P_t$
5	0.1 - 10	14	0.18	0.18
15	10.1 - 20	20	0.26	0.44
25	20.1 - 30	18	0.24	0.68
35	30.1 - 40	12	0.16	0.84
45	40.1 - 50	6	0.08	0.92
55	50.1 - 60	3	0.04	0.96
65	60.1 - 70	3	0.04	1.00



### 8.1.2 Parámetros estadísticos

Las características fundamentales de una distribución estadística se pueden conocer a partir de sus parámetros. A continuación se indican los más importantes en hidrología.

La media aritmética o media de una muestra de un conjunto de valores se define como

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8.6)$$

donde  $x_i$  son los valores de la muestra y  $n$  el número total de estos.

Para referirse a la media del universo o población se utiliza la letra  $\mu$ . La media permite conocer la tendencia central de una distribución estadística.

En el caso de una distribución de frecuencias, como se pierde información al trabajar con intervalos de clase en lugar de los datos originales, la media de dicha distribución se valúa como

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i f_i \Delta x_i}{n} \quad (8.7)$$

donde  $x_i$  es el valor representativo de un intervalo de clase  $\Delta x_i$ ,  $f_i$  su frecuencia correspondiente,  $k$  el número total de intervalos de clasificación y  $n$  el número total de datos.

Para conocer que tan dispersos están los valores de una muestra



respecto de su media, se utiliza lo que se conoce como la desviación estandar de la muestra, la cual se expresa como

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (8.8)$$

donde  $x_i$  son los valores de las muestras,  $\bar{x}$  su media (ec 8.6) y  $n$  el número total de valores de la muestra.

Análogamente, la desviación estandar de una distribución de frecuencias se valúa como

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 f_i \Delta x_i}{n-1}} \quad (8.9)$$

donde las variables tienen el mismo significado que en la ec 8.7. En caso de que la desviación estandar se refiera al universo, esta se indica con la letra  $\sigma$ . Al cuadrado de la desviación estandar se le llama variancia; para una muestra se designa con  $S^2$  y para el universo con  $\sigma^2$ .

La relación entre la desviación estándar y la media se conoce como coeficiente de variación  $C_v$ .

**Ejemplo 8.2** Calcular los parámetros estadísticos principales de la distribución obtenida en el ejemplo 8.1, trabajando con los valores específicos y con los intervalos de clase.





- a) Análisis usando los valores específicos de las alturas de lluvia.

Para facilitar el cálculo se elaboró la Tabla 8.4

De la Tabla 8.4, col 2 y aplicando la ec 8.6, se tiene que la media de los valores específicos de la altura de lluvia es

$$\bar{x} = \frac{1888.10}{76} = 24.84$$

De la col 4, con la ec 8.8, se deduce una variancia de

$$S^2 = \frac{1}{76 - 1} (19,142.24) = 255.23$$

siendo su desviación estandar y coeficiente de variación de

$$S = \sqrt{S^2} = 15.98$$

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} = 0.64$$

- b) Análisis considerando intervalos de clase.

Para la obtención de las características de la distribución de frecuencias de las lluvias se elaboró la Tabla 8.5

De la Tabla 8.5, col 3, se tiene, aplicando la ec 8.7, que la media de la distribución de frecuencia de lluvias es de

$$\bar{x} = \frac{1870}{76} = 24.605 \doteq 24.61$$

De la col 6, y la ec 8.9, se deduce que la variancia de la distribución de frecuencias de lluvias resulta de

$$S^2 = \frac{1}{76-1} (18,688.16) = 249.18$$

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

Tabla 8.4 Ordenamiento para el cálculo de las características de la muestra (ejemplo 8.2)

NO. ORDEN	$X_i$	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$
1	10.90	-13.94	194.32
2	14.60	-10.24	104.85
3	20.60	-4.24	17.97
4	11.90	-12.94	167.44
5	64.00	39.16	1533.50
6	20.90	-3.94	15.50
7	32.00	7.16	51.26
8	28.80	3.96	15.68
9	2.60	-22.24	494.61
10	35.80	10.96	120.10
11	17.70	-7.14	50.97
12	38.40	13.56	183.87
13	16.30	-8.54	72.93
14	6.80	-18.04	325.44
15	17.00	-7.84	61.46
16	6.80	-18.04	325.44
17	25.30	0.46	0.21
18	36.30	11.46	131.33
19	16.50	-8.34	69.55
20	8.70	-16.14	260.49
21	2.90	-21.94	481.36
22	8.90	-15.94	254.08
23	32.30	7.46	55.65
24	56.60	31.76	1008.69
25	3.60	-21.24	451.13
26	11.00	-13.84	191.54
27	52.50	27.66	765.07
28	46.30	21.46	460.53
29	5.20	-19.64	385.72
30	42.50	17.66	311.87
31	17.50	-7.34	53.87
32	64.50	39.66	1572.91
33	28.50	3.66	13.39
34	19.60	-5.24	27.45
35	30.90	6.06	36.70
36	27.50	2.66	7.07
37	10.30	-14.54	211.41

NO. ORDEN	$X_i$	$X_i - \bar{X}$	$(X_i - \bar{X})^2$
38	21.10	-3.74	13.98
39	21.30	-3.54	12.53
40	17.20	-7.64	58.36
41	36.10	11.26	126.78
42	49.50	24.66	608.11
43	20.00	-4.84	23.42
44	4.60	-20.24	409.65
45	27.30	2.46	6.05
46	49.70	24.86	618.01
47	34.60	9.76	95.25
48	49.00	24.16	583.70
49	25.30	0.46	0.21
50	27.20	2.36	5.56
51	38.80	13.96	194.88
52	52.40	27.56	759.55
53	11.50	-13.34	177.95
54	15.80	-9.04	81.72
55	70.00	45.16	2039.42
56	24.00	-0.84	0.70
57	16.50	-8.34	69.55
58	5.70	-19.14	366.33
59	15.50	-9.34	87.23
60	18.50	-6.34	40.19
61	30.70	5.86	34.33
62	10.50	-14.34	205.63
63	3.50	-21.34	455.39
64	13.90	-10.94	119.68
65	4.30	-20.54	421.89
66	22.60	-2.24	5.01
67	45.00	20.16	406.42
68	10.00	-14.84	220.22
69	9.60	-15.24	232.25
70	22.70	-2.14	4.57
71	23.00	-1.84	3.38
72	26.20	1.36	1.84
73	31.70	6.86	47.05
74	29.90	5.06	25.60
75	25.90	1.06	1.12
76	34.50	9.66	93.31
Suma	1,888.10		19,142.24



TABLA 8.5 PROCESAMIENTO DE CALCULO (ejemplo 8.2)

$x_i$	$f_i \Delta x_i$	$x_i f_i \Delta x_i$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(x_i - \bar{x})^2 f_i \Delta x_i$
1	2	3	4	5	6
5	14	70	-19.60	384.16	5,378.24
15	20	300	- 9.60	92.16	1,843.20
25	18	450	0.40	0.16	2.88
35	12	420	10.40	108.16	1,297.92
45	6	270	20.40	416.16	2,496.96
55	3	165	30.40	924.16	2,772.48
65	3	195	40.40	1,632.16	4,896.48
<b>S U M A</b>	<b>76</b>	<b>1,870</b>		<b>3,557.12</b>	<b>18,688.16</b>

y la desviación estándar  $S = \sqrt{S^2} = 15.78$  y  $C_V = \frac{15.78}{24.61} = 0.64$

c) Comparación de los resultados

La comparación de los valores obtenidos de los principales parámetros estadísticos del ejemplo 8.1, trabajando con los valores específicos de las alturas de lluvia y con sus intervalos de clase respectivos se muestra en la tabla siguiente:

RESULTADOS PARAMETROS CON	(a) valores específicos	(b) intervalos de clase
Media ( $\bar{x}$ )	24.84	24.61
Desv. Estándar (S)	15.98	15.78
Variancia ( $S^2$ )	255.23	249.18
Coef. Variación ( $C_V$ )	0.64	0.64



De la comparación de estos valores se deduce que el empleo de cualquiera de las técnicas presentadas conduce a resultados satisfactorios que aparentemente, no modifican de forma significativa la precisión de los mismos. Esto se debió a que había una buena concordancia en la distribución de los valores utilizados en el ejemplo. Conforme se incrementa el intervalo de clase y existe dispersión en los datos se incrementa la diferencia de las características de la distribución al aplicar los criterios antes mencionados.

### 8.1.3 Pruebas F y t

La forma de la variación de una variable se puede utilizar para conocer los cambios físicos ocurridos en la cercanía de la misma. Para determinar si dos grupos de datos  $n_1$  y  $n_2$ , son de una misma población o de diferentes poblaciones con distribución normal, se utiliza la relación de sus variancias  $S_1^2$  y  $S_2^2$ , denominada también prueba F, donde

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (8.10)$$

así F es el valor de una variable aleatoria que tiene distribución F con parámetros  $\nu_1 = n_1 - 1$  y  $\nu_2 = n_2 - 1$ . Los valores tabulados de la distribución F muestran los valores de esta, que pueden ser excedidos con una probabilidad de 0.05 ó 0.01, valores que constituyen el nivel de significancia, en términos de los grados de libertad





$v_1$  y  $v_2$ .

Si el valor de F obtenido de la ec 8.10 excede del valor tabular para el nivel de significancia seleccionada, la diferencia entre las variaciones de los dos grupos o muestras analizadas es significativo en un sentido estadístico, pudiendose concluir la igualdad o no de las poblaciones a que pertenecen. La estadística de la media y de la desviación estándar de una muestra, se pueden utilizar también para conocer la longitud de un registro hidrológico, de tal forma que la media de los datos esté comprendida entre ciertos límites seleccionados de la media de la población. Para esto, se utiliza la distribución t, cuya variable aleatoria t con n-1 grados de libertad está dada por la ec.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}} \quad (8.11)$$

con intervalo de confianza

$$\bar{x} \pm t_{\alpha/2} \sqrt{\frac{s}{n}}$$

En las tablas de la distribución de t, se muestra el valor de t para diversos grados de libertad  $v = n-1$  y niveles de significancia  $\alpha$ . De la ec 8.11 se puede obtener el valor de n procediendo por tanteos, ya que t es función de n. Esta ecuación permite hacer comparación de medias, similares a las expuestas para las variancias, así como conocer la variación de la media de la población a partir de la media de la muestra.



Ejemplo 8.3 Determinar si los registros de lluvia de la estación climatológica de Tepames, Col son de la misma población, ya que la estación sufrió un cambio en sus registros en 1954, según se vió en el ejemplo 3.5.

Como en 1954 los registros sufrieron un cambio, se procede a determinar si los correspondientes al ciclo 1948 a 1953 son de la misma población que los tomados de 1954 a 1959. Para esto se calcula las características de cada una de las muestras y posteriormente se aplica la prueba F.

De las columnas 2, y aplicando la ec 8.6, la media ( $\bar{P}$ ) de las precipitaciones anuales resulta

$$\begin{array}{l} \text{Muestra 1} \\ \text{(1948 - 1953)} \\ \bar{P}_1 = \frac{5693.4}{6} = 948.90 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Muestra 2} \\ \text{(1954 - 1959)} \\ \bar{P}_2 = \frac{3707.7}{6} = 617.95 \end{array}$$

De las columnas 4, y aplicando la ec 8.8, la variancia ( $S^2$ ) de las precipitaciones anuales para cada una de las muestras resulta

$$\begin{array}{l} \text{Muestra 1} \\ \text{(1948 - 1953)} \\ S_1^2 = \frac{1}{6-1} (334,425.42) = 66,885.08 \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Muestra 2} \\ \text{(1954 - 1959)} \\ S_2^2 = \frac{1}{6-1} (433,774.64) = 86,754.92 \end{array}$$

Con estos valores, aplicando la prueba F ( ec 8.10 ) se obtiene

$$F = \frac{66885.08}{86754.92} = 0.771 = F \text{ cal}$$



MUESTRA 1			
Año	Pa (mm)	Pa - $\bar{P}_1$	(Pa - $\bar{P}_1$ ) <sup>2</sup>
1	2	3	4
1948	1167.90	219.00	47961.00
1949	754.60	-194.30	37752.49
1950	759.70	-189.20	35796.64
1951	1088.20	139.30	19404.49
1952	1272.30	323.40	104587.56
1953	650.70	-298.20	88923.24
n 6	5693.40		334425.42

MUESTRA 2			
Año	Pa (mm)	Pa - $\bar{P}_2$	(Pa - $\bar{P}_2$ ) <sup>2</sup>
1	2	3	4
1954	359.80	-258.15	66641.42
1955	1151.00	533.05	284142.30
1956	714.90	96.95	9399.30
1957	508.90	-109.05	11891.90
1958	603.10	-14.85	220.52
1959	370.00	-247.95	61479.20
n 6	3707.70		433774.64

De los valores tabulados para la distribución F, con grados de libertad  $\nu_1 = \nu_2 = 6-1 = 5$ , a fin de que la hipótesis de igualdad de variancias se verifique, es decir que ambas muestras pertenezcan a una misma población, el valor de F que no puede ser excedido con un nivel de significancia  $\alpha = 0.01$  es  $F_{0.01} = 11.00$ , por lo que se concluye que siendo  $F_{tab} > F_{cal}$  ambas muestras son de la misma población o bien el valor F con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$  y

$$\nu_1 = \nu_2 = 5$$

$$F_{0.05} = 5.05 = F_{tab}$$

por lo tanto

$$F_{cal} = 0.771 < 5.05 = F_{tab}$$



obteniéndose la misma conclusión.

Ejemplo 8.4 Si en la Estación Climatológica de Calnali, Hgo., de un registro de 43 años, se tiene una media de las alturas de lluvia máximas anuales diarias de 111.5 mm con una desviación estandar de 25.1 mm. ¿Cuántos años de registro se requieren, para que con una probabilidad de 95 por ciento, la media de la muestra esté dentro del 5 por ciento de la media verdadera?

Lo anterior implica que  $\mu$  varíe entre  $0.95 \bar{x}$  y  $1.05 \bar{x}$ . De la ec. 8.11 se tiene que

$$\bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

que define las fluctuaciones de la media del universo en base a la media de la muestra.

Entonces,

$$\frac{t_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}}{\bar{x}} = 0.05$$

de donde

$$n = \frac{(t_{\alpha/2})^2 (S/\bar{x})^2}{(0.05)^2}$$

Como el valor de  $t$  es función de  $n$ , esta ecuación se tiene que resolver por tanteos; afortunadamente, la fluctuación de  $t$  para valores de  $n$  ma-





yores de 30 años es pequeña. Así, para 95 por ciento de probabilidades, el nivel de significancia es  $\alpha = 1 - 0.95 = 0.05$  y  $\alpha/2 = 0.025$  y  $t_{\alpha/2} = t_{0.975}$ ; de una tabla de esta distribución se obtiene que para  $\nu = 30 - 1$  grados de libertad,  $t_{0.975} = 2.04$  y para un número infinito de grados de libertad,  $t_{0.975} = 1.96$ . Considerando  $t_{\alpha/2} = 1.96$  y los valores dato de la muestra, se tiene, sustituyendo en la ecuación anterior, que

$$n = \frac{(1.96)^2 (25.1/111.5)^2}{(0.05)^2} = 77.72 = 78 \text{ años}$$

lo que implica que se requieren 78 años de registro para que la media de la muestra de los datos esté dentro del 5 por ciento de la media verdadera o de la población.

#### 8.1.4 Ajuste de distribuciones

Como se indicó al principio del inciso, si se dispone de una muestra hidrológica de datos de tamaño  $n$  y se desean conocer sus propiedades estadísticas, la manera de lograrlo es aceptando a priori que dicha muestra tiene una cierta distribución de probabilidades conocidas, y de ahí inferirlas. Si se hace esto, antes de proceder a utilizar y analizar dicha distribución se requiere conocer que tan cierto es que la distribución elegida se pueda utilizar como representativa del conjunto de datos o muestra disponible.



En estadística existen criterios y técnicas para probar lo anterior, dependiendo del tamaño de la muestra, e inferir cual es la distribución - más adecuada para una muestra de datos:

a) Prueba  $\chi^2$

Conviene utilizarla cuando el número de observaciones es grande.

Si se considera que  $f_i$  y  $e_i$  son respectivamente para los  $k$  intervalos las frecuencias observadas del fenómeno y las esperadas teóricamente de acuerdo con la ley de distribución de probabilidad escogida como representativa del fenómeno; entonces el valor:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - e_i)^2}{e_i} \quad (8.12)$$

tiene distribución  $\chi^2$  con ( $\nu = k - 1 - m$ ), grados de libertad; en las tablas de distribución  $\chi^2$ , se muestran los valores de esta variable - para diversos grados de libertad y niveles de significancia.

Si al utilizar la ec 8.12, el valor calculado es mayor que el tabular, se deduce que la distribución elegida como modelo de las frecuencias observadas de los resultados que se están analizando, no es la correcta; si es menor, se acepta.

Al utilizar esta prueba se debe tener cuidado de que en cada intervalo de clase se tengan por lo menos cinco observaciones.



b) Prueba de Kolmogorov - Smirnov (K & S)

Esta prueba permite hacer comparaciones entre dos distribuciones acumuladas y conviene utilizarla cuando el tamaño de la muestra es pequeña. Para aplicar esta prueba, se grafican tanto los valores de la muestra en orden creciente asignándole a cada valor la misma probabilidad, así como la distribución acumulada de la función con la cual se desea ver, si es o no representativa de la muestra. Una vez graficadas las dos distribuciones, se valúa la máxima ordenada  $D$  existente entre ellas.

Para determinar si la diferencia  $D$  está dentro del intervalo aceptable y la distribución elegida es la correcta, se calcula de los valores tabulados el valor máximo correspondiente a la prueba de Kolmogorov - Smirnov, de acuerdo con el tamaño de la muestra y el nivel de significancia.

Si el valor determinado de la diferencia en ordenada o frecuencia máxima entre las dos distribuciones, excede de la diferencia tabulada, se deduce que no es correcta la distribución elegida como representativa de los datos y será necesario probar el ajuste para otras distribuciones

Ejemplo 8.5      Aplicación de la prueba  $\chi^2$

En la tabla 8.6, se presentan los registros de gastos máximos aforados del río de la Laja en la estación hidrométrica Pericos, Gto., sobre la -



cuenca Lerma - Santiago. Se desea conocer si los valores tienen una distribución estadística normal utilizando la prueba  $\chi^2$ .

Para aplicar la prueba  $\chi^2$  al registro de gastos máximos, se requiere ajustar éstos considerando intervalos de clase. Dado el rango de valores de los gastos máximos se consideraron 4 marcas de clase. La variación de las marcas de clase así como el estudio correspondiente se muestra en la tabla 8.7.1

De la ec (8.6) se deduce para los valores mostrados en la tabla (8.6) que la media de los gastos es:

$$\bar{X} = \frac{5186.8}{34} = 152.6$$

Y de la ecuación (8.7), para la distribución de frecuencias (Tabla 8.7.1) se deduce que:

$$\bar{x} = \frac{5300}{34} = 155.9$$

Como no existe una diferencia significativa en los valores obtenidos, se concluye que los intervalos de clase elegida son los apropiados.

En la Tabla 8.7.2 se muestra el cálculo de las frecuencias esperadas de acuerdo a una distribución normal. Así, en las cols 1 y 2 se indican respectivamente los intervalos de clase elegidos para la distribución de los gastos y los límites de clase asociados a cada intervalo.





Tabla 8.6 Gastos máximos registrados en la Estación Pericos, Gto.

Orden	Año	Q máx
1	1929	16.40
2	1930	188.00
3	31	228.00
4	32	114.00
5	33	170.00
6	34	134.00
7	35	312.00
8	36	222.00
9	37	230.00
10	38	219.00
11	39	193.00
12	1940	109.00
13	41	174.00
14	42	108.00
15	43	231.00
16	44	335.00
17	45	141.00

Orden	Año	Q máx
18	46	30.90
19	47	105.00
20	48	84.10
21	49	49.70
22	1950	64.20
23	51	125.00
24	52	93.40
25	53	182.00
26	54	92.90
27	55	381.00
28	56	129.00
29	57	33.80
30	58	224.00
31	59	92.60
32	1060	131.00
33	61	81.80
34	1962	162.00
SUMA		5186.80

Tabla 8.7.1 Análisis de Frecuencias.

Marca de Clase ( $X_i$ )	Intervalo de Clase ( $\Delta X_i$ )	Frecuencia ( $f_i \Delta X_i$ )	$X_i f_i \Delta X_i$
50	0-100	10	500
150	101-200	15	2250
250	201-300	6	1500
350	301-400	3	1050
SUMA		34	5300



Para obtener los valores estandarizados para los límites de clase correspondientes, se aplica la ecuación:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s}$$

donde  $x$  es el límite de clase,  $\bar{x}$  es la media de los gastos máximos y  $s$  la desviación estandar de los gastos máximos deducida de la distribución de frecuencias.

De la ec (8.9) para la información mostrada en la Tabla 8.7.1, se obtiene una desviación estandar de la muestra de 91.92, con lo cual considerando  $\bar{x} = 155.90$ , la ecuación anterior se transforma a

$$z = \frac{x - 155.90}{91.92}$$

cuyos valores para los límites de clase se indican en la Tabla 8.7.2, col 3. En las cols 4 y 5 se tiene respectivamente el área bajo la curva de la distribución normal correspondientes a los valores de  $z$  encontrados y el área para cada intervalo de clase. Esta última se deduce sumando o restando, los dos valores sucesivos de la col 4, dependiendo del signo de la variable  $z$ ; con igual signo se restan y con signo diferente se suma. Estos valores representan la frecuencia relativa de ocurrencia del evento.

Multiplicando la frecuencia relativa (col 5) de cada evento por el número



ro total de ellos ( $n = 34$ ) se obtiene la frecuencia esperada para los valores ajustados a la distribución normal (col 6). Finalmente en la col 7 se tiene la frecuencia observada, la cual se dedujo en la Tabla 8.7.1. En la Tabla 8.7.3 se ordenan las frecuencias antes indicadas para la aplicación de la ec 8.12.

Así, se deduce que

$$\chi^2_{\text{cal}} = 2.5162 \doteq 2.52$$

De las Tablas  $\chi^2$  se deduce para  $\nu = k-1-m=4-1-2 =$  grados de libertad y un nivel de significancia  $\alpha = 5\%$  que

$$\chi^2_{0.95} = 3.84; \text{ y para } \alpha = 1\%, \chi^2_{0.99} = 6.63.$$

En ambos casos  $\chi^2_{\text{cal}} < \chi^2_{\text{tab}}$  por lo que se puede concluir que para los niveles de significancia probados, los gastos máximos anuales registrados de la Estación Pericos, Gto. sobre el Río de la Laja tienen una distribución normal.

#### Ejemplo 8.6 Aplicación de la prueba de Kolmogorov & Smirnov.

Comprobar la validez del ajuste a la distribución normal de los gastos máximos en el Río de La Laja, Gto., analizada en el ejemplo anterior. Para valuar la diferencia máxima en ordenada "D" que existe entre las distribuciones observada y teórica, en la Tabla 8.8 se proporciona el ordenamiento de los datos Tabla 8.6 y su frecuencia acumulada. En la



Tabla 8.7.2 Cálculo de la Frecuencia Esperada Considerando que Distribución Normal.

1	2	3	4	5	6	7
AXi	Limites de clase X	Z=F (X)	Area baja la Curva Normal de o a z	Area para Cada intervalo de clase	Frecuencia Esperada	Frecuencia Observada
	0	-1.6960	0.4550			
0-100	100.50	-0.6026	0.2341	0.2209	7.5-8	10
101-200	200.50	0.4852	0.1862	0.4203	14.2-14	15
201-300	300.50	1.5731	0.4422	0.2560	8.7-9	6
301-400	400.50	2.6610	0.4961	0.0539	1.8-2	3

Tabla 8.7.3 Ordenación de cálculo para la aplicación de la Prueba " $\chi^2$ ".

	$f_i$	$e_i$	$(f_i - e_i)$	$(f_i - e_i)^2$	$\frac{(f_i - e_i)^2}{e_i}$
1	10	7.5	2.5	6.25	0.8333
2	15	14.2	0.8	0.64	0.0450
3	6	8.7	-2.7	7.29	0.8379
4	3	1.8	1.2	1.44	0.8000
S U M A					2.5162





fig 8.2 se muestra el histograma acumulado de los valores de la muestra, ordenados de menor a mayor (Tabla 8.8 col. 3) asignándole a cada uno la misma probabilidad o frecuencia  $1/n$  (Tabla 8.8, col. 1) y la distribución acumulada de frecuencia de los valores esperados correspondientes a la distribución normal teórica (Tabla 8.7.2 cols 1 y 6) con  $P(X \leq x)$ . De la fig 8.2 se deduce la diferencia en ordenada máxima entre (a) y (b):  $D = 0.105$ . De la tabla de distribución K & S, con  $n=34$  y  $\alpha = 0.01$  y  $0.05$ ,  $D^* = 0.200$ . Como  $D < D^*$  se acepta la distribución normal como representativa de los gastos máximos anuales.

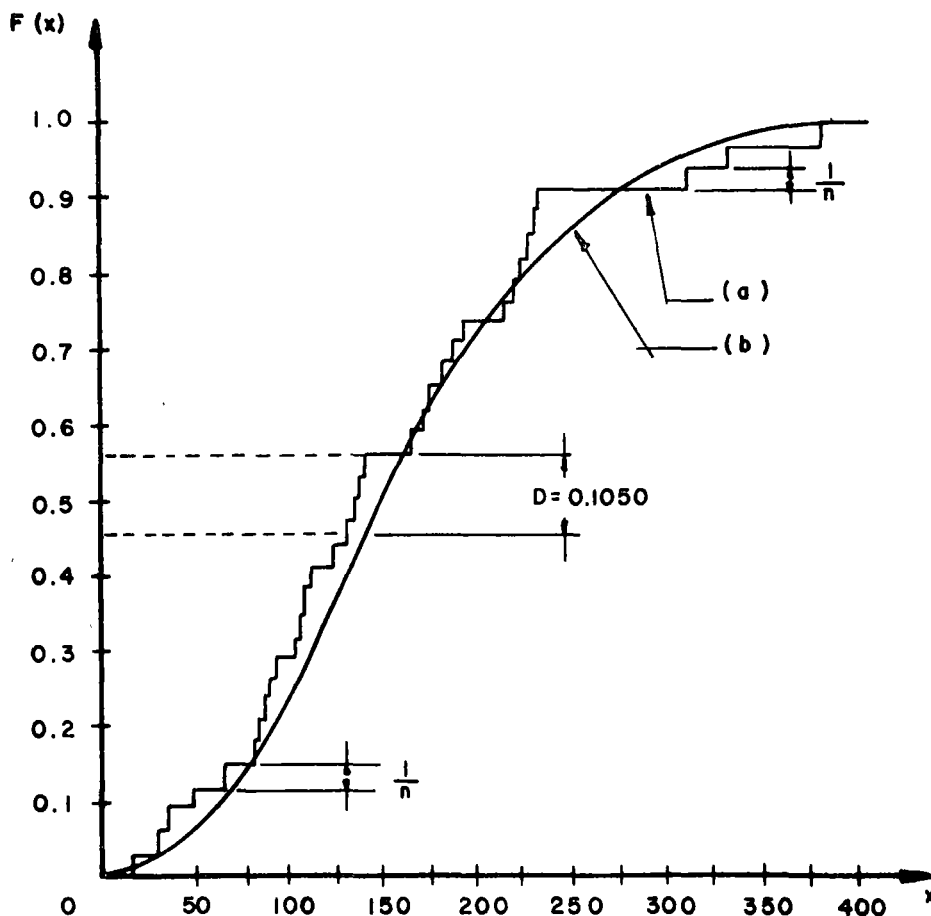
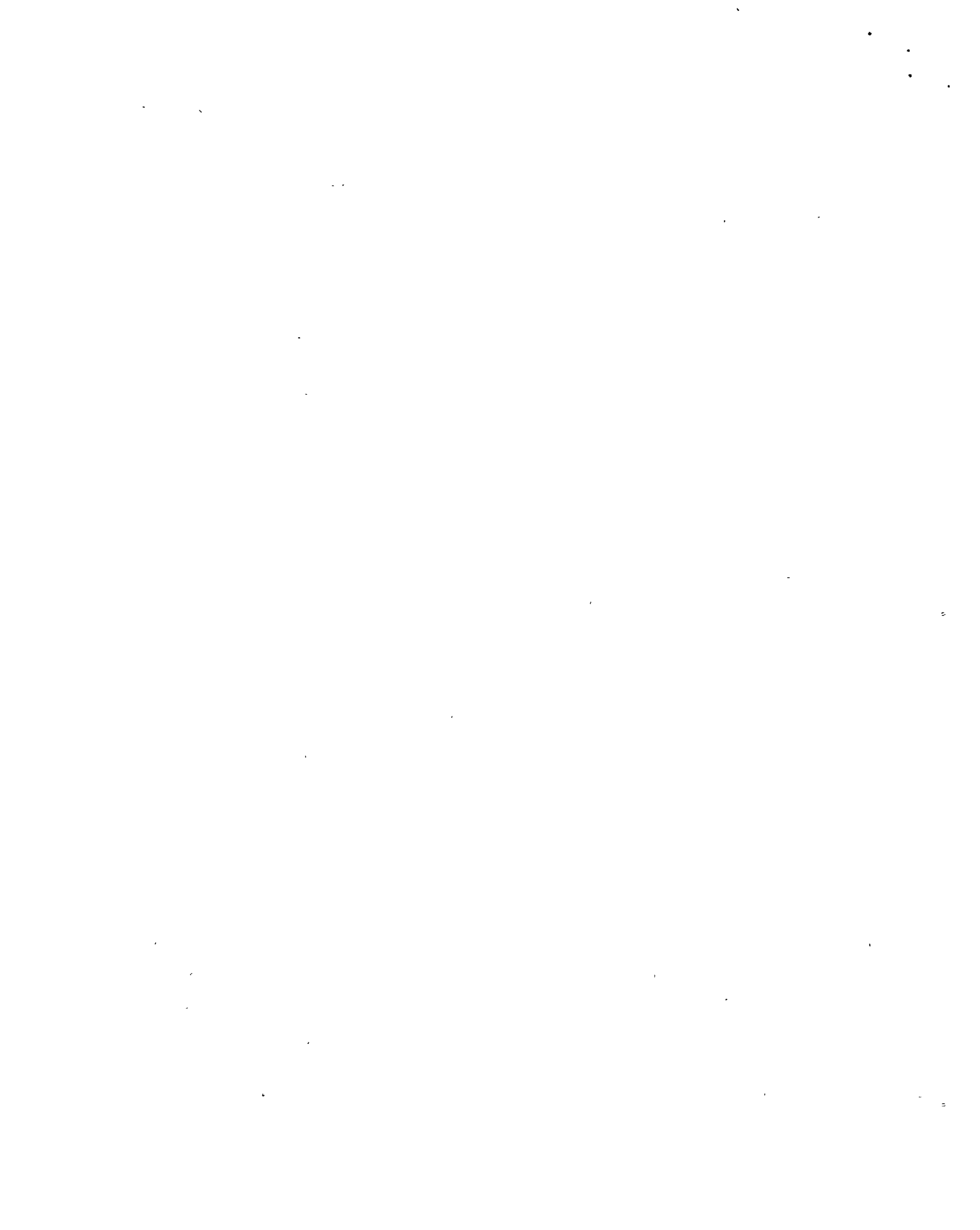


Fig. 8.2 Distribuciones Acumuladas



Tabla 8.8 Ordenación de los datos y frecuencias acumuladas.

Orden (i)	Q máx ( $X_i$ ) $m^3/seg$	$X_i$ de menor a mayor	F ( $X_i$ ) (i/n)
1	2	3	4
1	16.40	16.40	0.03
2	188.00	30.90	0.06
3	228.00	33.80	0.09
4	114.00	49.70	0.12
5	170.00	64.20	0.15
6	134.00	81.80	0.18
7	312.00	84.10	0.21
8	222.00	92.60	0.24
9	230.00	92.90	0.26
10	219.00	93.40	0.29
11	193.00	105.00	0.32
12	109.00	108.00	0.35
13	174.00	109.00	0.38
14	108.00	114.00	0.41
15	231.00	125.00	0.44
16	335.00	129.00	0.47
17	141.00	131.00	0.50
18	30.90	134.00	0.53
19	105.00	141.00	0.56
20	84.10	162.00	0.59
21	49.70	170.00	0.62
22	64.20	174.00	0.65
23	125.00	182.00	0.68
24	93.40	188.00	0.71
25	182.00	193.00	0.74
26	92.90	219.00	0.76
27	381.00	222.00	0.79
28	129.00	224.00	0.82
29	33.80	228.00	0.85
30	224.00	230.00	0.88
31	92.60	231.00	0.91
32	131.00	312.00	0.94
33	81.80	335.00	0.97
34	162.00	381.00	1.00



## 8.2 Correlación lineal simple

El análisis de correlación se utiliza para conocer cómo una variable independiente ( $x$ ) afecta a una variable dependiente ( $y$ ). Si existe solo una variable independiente involucrada, al proceso de análisis se le conoce como de correlación simple; si hay más de una variable independiente, se denomina correlación múltiple.

Es conveniente antes de proceder a un análisis de correlación simple de una serie de parejas de datos, graficar estos, con el fin de conocer la tendencia de la naturaleza en la relación de los datos. Si su forma tiene de a una línea recta, la relación se dice lineal, si es curva, la relación se denomina curvilínea. Esta última es factible cambiarla a lineal realizando transformaciones de los ejes coordenados.

Una vez graficadas las parejas de valores de datos y conocida su tendencia, se correlacionan para conocer cual es la relación que mejor se ajusta a dicha tendencia. Por tanto, si la tendencia es una línea recta, a la cual se denomina recta de regresión, para calcular su ecuación, se puede utilizar el método de mínimos cuadrados.

En la fig 8.3 se muestra una serie de parejas de datos ( $x_i, y_i$ ) en cuya correlación simple, la ecuación de la recta de regresión se puede escribir como



$$y_i' = a + b x_i \quad (8.13)$$

la cual plantea el problema de calcular los valores de los parámetros  $a$  y  $b$ , tales que proporcionen el mejor ajuste de los datos. Para esto, como ya se indicó se puede utilizar el método de los mínimos cuadrados, el cual se basa en que la suma de los errores al cuadrado sea mínimo.

El error ( $e$ ) para cada punto muestreado se obtiene como

$$e_i = y_i - (a + b x_i) \quad (8.14)$$

donde  $y_i$  es el valor dato, y  $(a + b x_i)$  es el valor inferido u obtenido de la ecuación de la recta de regresión.

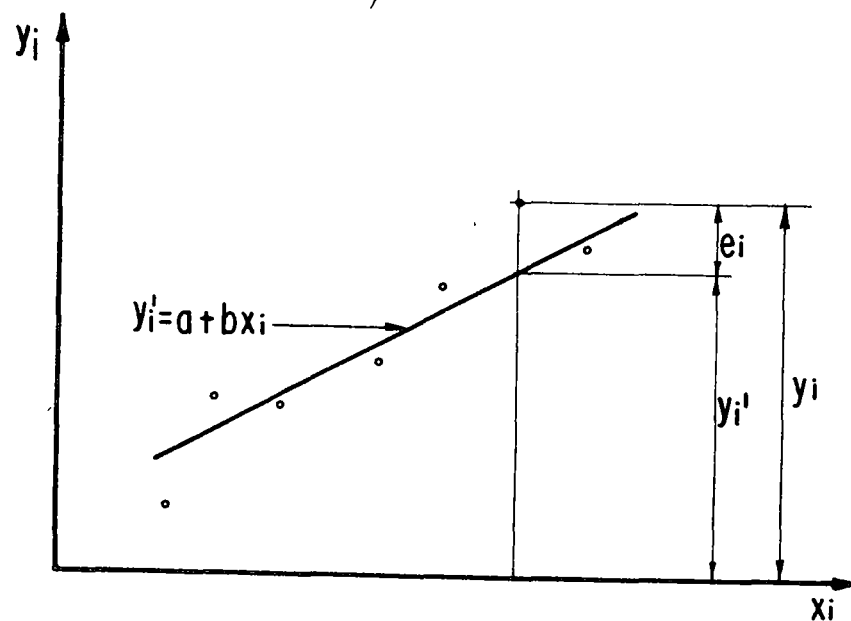


Fig. 8.3 Correlación simple





Haciendo que la sumas de los errores ( $e_i$ ) al cuadrado de cada punto dato ec (8.14) sea mínimo, se obtienen las ecuaciones simultáneas

$$\sum_{i=1}^n y_i = an + b \sum_{i=1}^n X_i$$

$$\sum_{i=1}^n X_i y_i = a \sum_{i=1}^n X_i + b \sum_{i=1}^n X_i^2$$

donde

$n$  número de pareja de dato.

Se tienen entonces dos ecuaciones con dos incógnitas,  $a$  y  $b$  que son los parámetros buscados. De otra forma, demuestra que pueden calcularse según se relacionen.

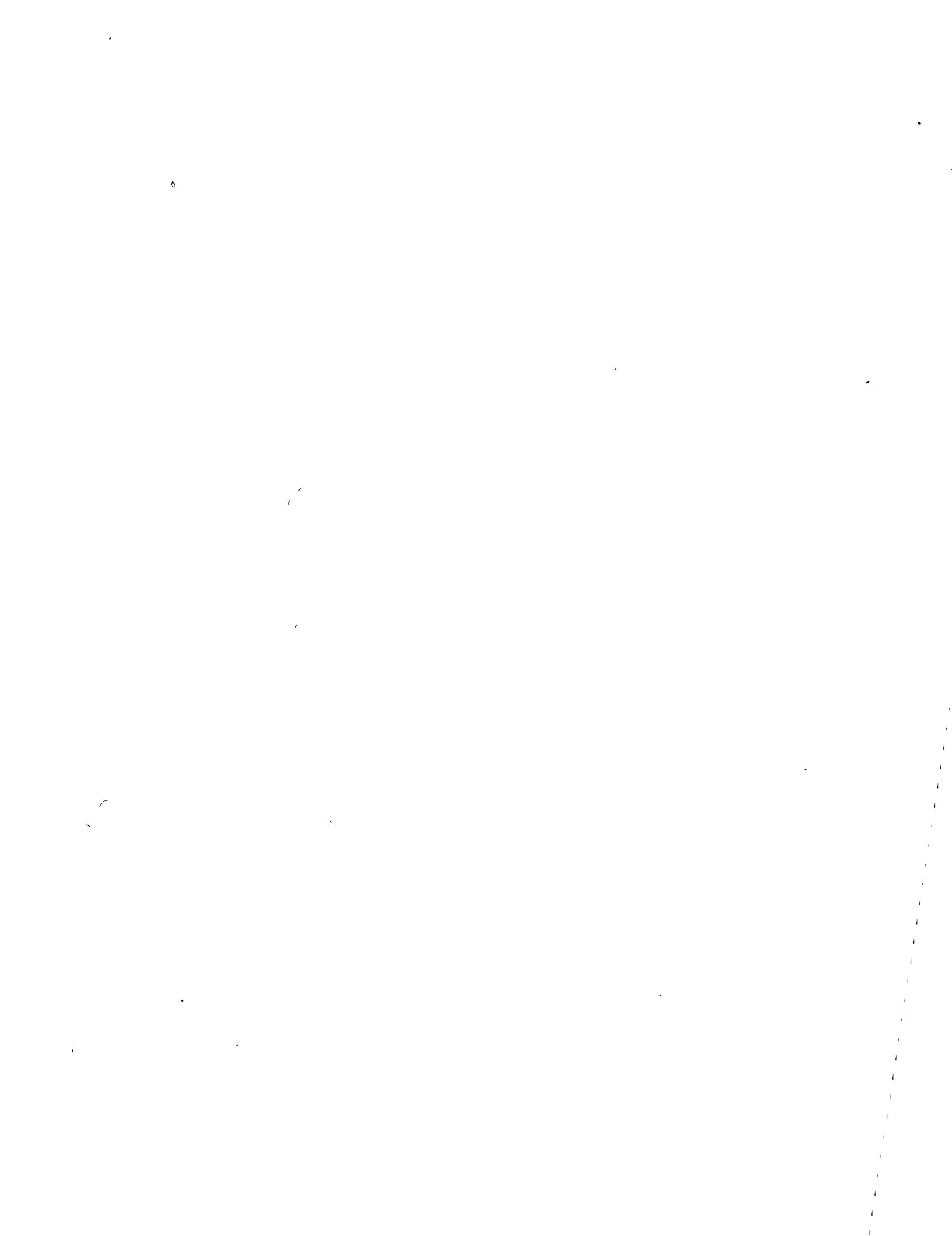
$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (8.15)$$

y

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad (8.16)$$

donde

$$S_{xx} = n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \quad (8.17)$$



$$S_{xy} = n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (8.18)$$

$\bar{x}$  y  $\bar{y}$  son la media de los valores  $x_i$  y  $y_i$  respectivamente -  
(ec. 8.6).

La ecuación de la recta de regresión (ec 8.13) así obtenida es para cada  $x_i$ , la media de la variación de la variable dependiente  $y_i$ . Conforme la pareja de los valores  $x_i, y_i$  tiendan a agruparse sobre una línea recta la variancia del error  $e_i$  tenderá a cero. La variancia del error se puede escribir como

$$s_e^2 = \frac{S_{yy}}{n(n-2)} \left[ 1 - \frac{(S_{xy})^2}{S_{xx}S_{yy}} \right] = S_y^2 \left[ 1 - r_{xy}^2 \right] \quad (8.19)$$

siendo

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{(S_{xx} S_{yy})^{1/2}}$$

donde  $S_{yy}$  es una expresión similar a la ec (8.17) sustituyendo a las  $x_i$  por  $y_i$ ,  $S_y^2$  la variancia de las  $y_i$ , y  $r_{xy}$  se le denomina coeficiente de correlación lineal. Este coeficiente es un índice que proporciona una idea de que tan agrupadas están las parejas de valores  $x_i, y_i$  a la curva de ajuste, en este caso a una línea recta. Obsérvese que si  $r_{xy}$  vale 1 ó -1, de la ec 8.19 se obtiene que la variancia del error

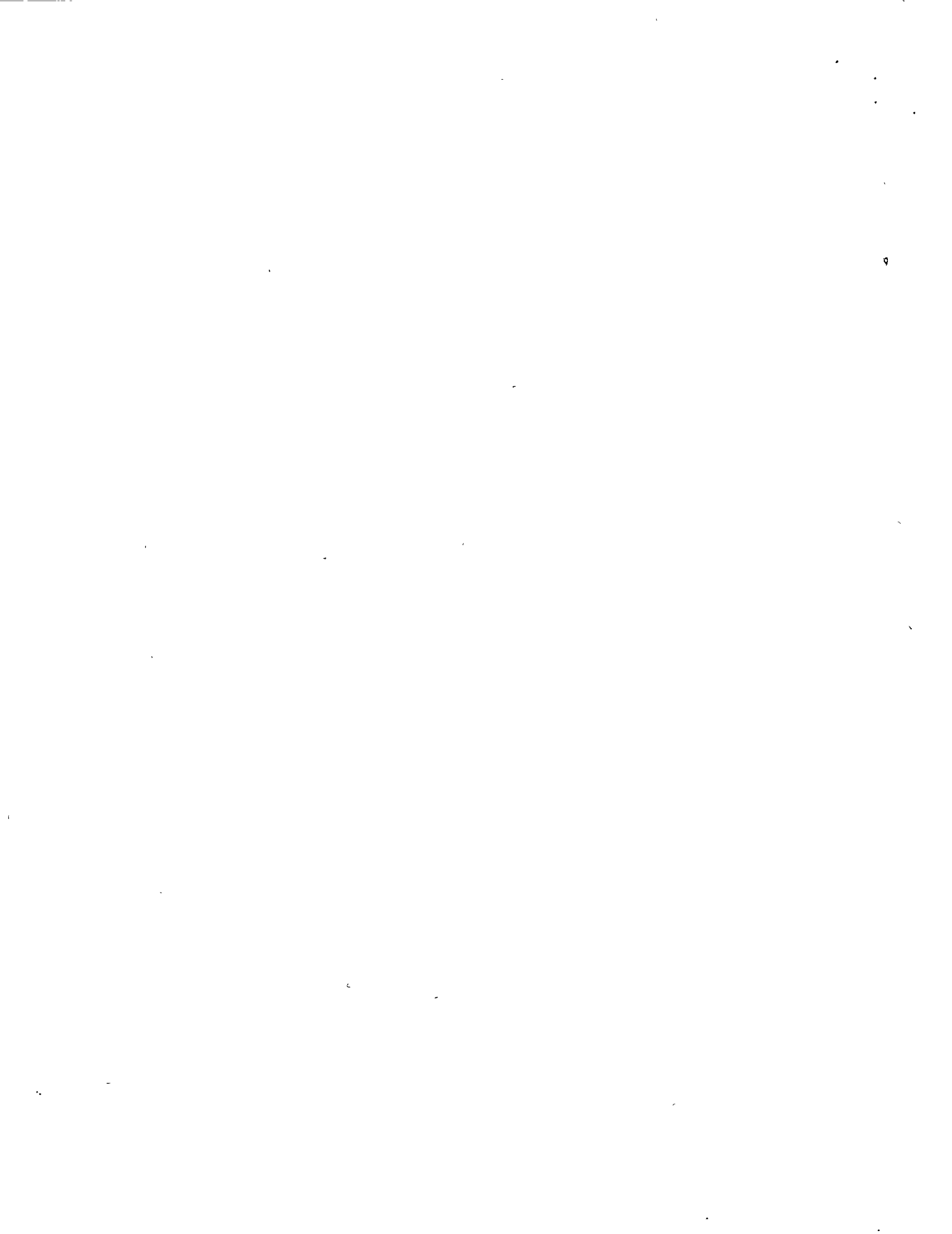


es cero, y por tanto, todos los puntos  $(X_i, Y_i)$  están sobre la curva o una recta.

Conforme el valor de  $r_{xy}$  tiende a cero, la correlación de los puntos en estudio se aleja de una línea recta. Si  $r_{xy}$  vale cero implica que la variancia del error es igual a la variancia de la variable dependiente  $y$ , y en este caso, la ecuación de regresión no es mejor que la media para estimar la variable dependiente y por lo tanto, no hay correlación entre las dos variables.

Si se analiza la ec 8.13 y 8.14, se ve que para cada valor inferido de la variable dependiente se tendrá un cierto error, en función de que tan correlacionadas estén las variables. Una medida de la variación de los puntos con respecto a la recta de regresión se puede deducir del error estándar de la estimación, que es análogo a la desviación estándar de una variable cuando se trata de conocer la dispersión respecto de su media. Para cada valor de la variable independiente  $x = x_0$ , se puede conocer cual es el error estándar para un cierto nivel de significancia  $\alpha$  de la variable dependiente  $y$ , al utilizar la ec 8.13, aplicando la ecuación:

$$\xi = \pm t_{\alpha/2} \text{ Se } \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{n(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \quad (8.20)$$



donde  $t_{\alpha/2}$  se obtiene para la distribución "t" con  $n-2$  grados de libertad.

De esta manera, de las ecs 8.13 y 8.20, se obtiene que

$$y = a + bx \pm \xi \quad (8.21)$$

que permite calcular el valor de la variable dependiente y con un cierto intervalo de confianza, para cualquier valor de la variable independiente  $x$ .

#### Ejemplo 8.7 Aplicación de la correlación lineal simple.

En la tabla mostrada (8.9), se proporcionan los gastos medios mensuales aforados por estaciones hidrométricas sobre una corriente localizada en el límite de los Estados de Tabasco y Chiapas dentro de la cuenca del Río Grijalva durante el año de 1969. Se desea obtener, por medio de un análisis de correlación lineal simple, la ecuación que relaciona dichos gastos y su coeficiente de correlación, así como el gasto medio - esperado en el Río Mezcalapa cuando se presente en el Río Grijalva un gasto medio de  $Q_{Med} = 3,500 \text{ m}^3/\text{seg}$ .

Como se trata de obtener una relación del tipo (ec 8.13):  $y^1 = a + bx$ , asignamos a los gastos las variables  $y^1 =$  variable dependiente a la Est. Reforma del Río Mezcalapa;  $x =$  variable independiente a la Est. Malpaso II sobre el Río Grijalva. Para facilidad de cálculos elaboramos la tabla 8.10.





Tabla 8.9 Gastos medios mensuales aforados durante el año de 1969

Orden	1969 Mes	Río Grijalva Estación Malpaso II Gasto medio (m <sup>3</sup> /s)	Río Mezcalapa Estación Reforma Gasto medio (m <sup>3</sup> /s)
1	Enero	321.08	175.97
2	Febrero	222.81	75.83
3	Marzo	155.41	45.94
4	Abril	274.58	77.57
5	Mayo	431.65	131.18
6	Junio	446.52	136.05
7	Julio	456.84	171.13
8	Agosto	1270.04	475.75
9	Septiembre	2089.29	897.42
10	Octubre	1618.41	710.58
11	Noviembre	431.72	268.30
12	Diciembre	509.33	224.12

Tabla 8.10 Ordenamiento del cálculo ( ejemplo 8.7 )

1	2	3	4	5	6
Orden	xi	yi	(xi) <sup>2</sup>	(yi) <sup>2</sup>	(xi)(yi)
1	321.08	175.97	103092.37	30965.44	56500.45
2	222.81	75.83	49644.30	5750.19	16895.68
3	155.41	45.94	24152.27	2110.48	7139.54
4	274.58	77.57	75394.18	6017.10	21299.17
5	431.65	131.18	186321.72	17208.19	56623.85
6	446.52	136.05	199380.60	18509.60	60749.05
7	456.84	171.13	208702.79	29285.48	78179.03
8	1270.04	475.75	1613001.60	226338.06	604221.53
9	2089.29	897.42	4365132.70	805362.66	1874970.63
10	1618.41	710.58	2619250.93	504923.94	1150009.78
11	431.72	268.30	186382.16	71984.89	115830.48
12	509.33	224.12	259417.05	50229.77	114151.04
	8227.68	3389.84	9889872.18	1768685.80	4156570.23



De la Tabla 8.10 se obtienen los siguientes valores:

$$\sum_{i=1}^n X_i = 8227.68$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i = 3389.84$$

$$\sum_{i=1}^n (X_i)^2 = 9,889,872.18$$

$$\sum_{i=1}^n (Y_i)^2 = 1,768,685.80$$

$$\sum_{i=1}^n X_i Y_i = 4,156,570.23$$

Cálculo de los parámetros a y b

De la ec (8.17) se deduce que

$$S_{xx} = 12 (9889,872.18) - (8227.68)^2 = 50983747.96$$

y de la ec (8.18)  $S_{xy} = 12 (4156570.23) - (8227.68) (3389.84) = 21988323.99$

La media de los datos (ec 8.6) son:

$$\bar{y} = \frac{3389.84}{12} = 282.48$$



$$\bar{x} = \frac{8227.68}{12} = 685.64$$

Sustituyendo los valores anteriores en las ecs (8.15) y (8.16) se obtiene

$$b = \frac{21988323.99}{50983747.98} = 0.4310$$

$$a = 282.48 - 0.4310 (685.64) = -13.03$$

Por tanto, la ecuación de la recta de regresión que proporciona el mejor ajuste entre los valores de los gastos medios mensuales en los ríos Grijalva (x) y Mezcalapa (y) resulta según la ec. 8.13

$$y' = -13.03 + 0.4310 x$$

siendo su coeficiente de correlación, teniendo en cuenta que

$$S_{yy} = 12 (1768685.80) - (3389.84)^2 = 9733214.38$$

igual a

$$r^2 = \frac{(21988323.99)^2}{(50983747.98)(9733214.38)} ; r = 0.9871$$

En la fig. 8.4 se muestran los valores datos, así como la ecuación de mejor ajuste entre ellos.

Para conocer el gasto medio que circula por el Río Mezcalapa, cuando aguas abajo en el Río Grijalva se presentó un gasto de  $3500 \text{ m}^3/\text{seg}$  de la ec. de la recta de regresión encontrada se tiene que

$$Q \text{ Mezcalapa} = f(Q \text{ Grijalva})$$

$$y = f(x)$$



Río Mezcalapa  
Estación Reforma

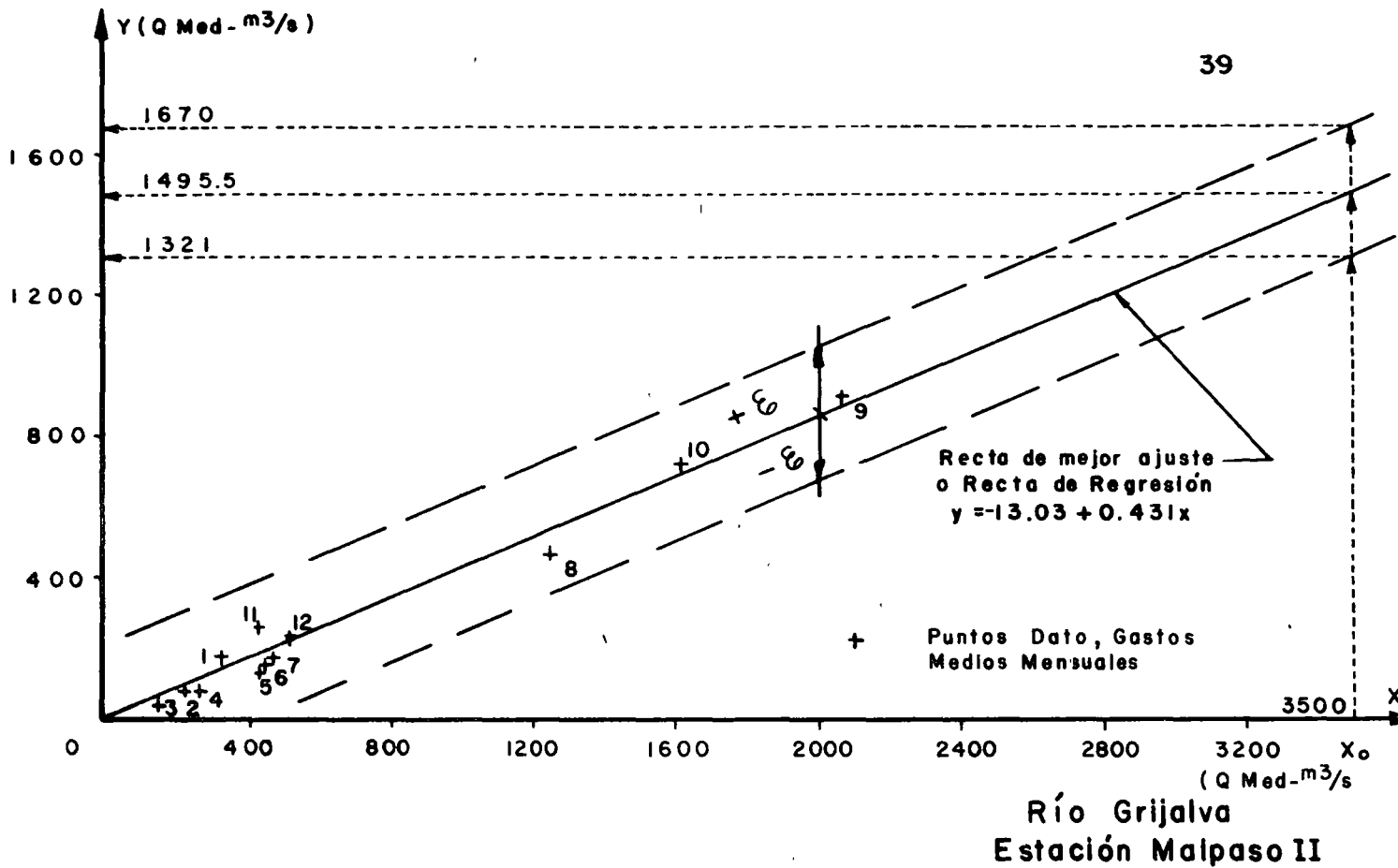


Fig. 8.4 Recta de Regresión obtenida para relacionar los gastos medios mensuales, aforados en las estaciones hidrométricas Reforma y Malpaso II.

Por lo que si  $x = 3500$

$$y' = -13.03 + 0.4310 (3500) = 13.03 + 1508.50$$

$$y' = 1495.47 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

resultaría el gasto medio en el Río Mezcalpa, obtenido de la recta de regresión.

Considerando para valuar el error estándar de la predicción un nivel de significancia de 0.95, ( $\alpha = 0.05$ ) y  $\alpha/2 = 0.025$  y grados de libertad

$$\nu = n - 2 = 12 - 2 = 10$$

de los valores tabulados de la distribución "t" se deduce:





$$t_{\frac{\alpha}{2}} = t_{0.025} = \underline{\underline{2.228}}$$

siendo la variancia del error (ec 8.19) igual a

$$\begin{aligned} Se^2 &= \frac{S_{yy}}{n(n-2)} \left[ 1 - \frac{(S_{xy})^2}{S_{xx}S_{yy}} \right] = \frac{9733214.38}{12(12-2)} \left[ 1 - \frac{(21988323.99)^2}{(50983747.98)(9733214.38)} \right] \\ &= 81110.12 (1 - 0.97) = 8110.12 (0.03) = 2083.89 \\ Se &= \sqrt{2083.89} = \underline{\underline{45.65}} \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores en la ec 8.20, con  $X_0 = 3500$

$$\begin{aligned} \xi &= \pm (2.228) (45.65) \sqrt{1 + \frac{1}{12} + \frac{12(3500 - 685.64)^2}{50983747.98}} = \\ &= \pm 101.7082 \sqrt{1 + 0.0833 + 1.8643} = \pm 101.7082 (1.7169) \end{aligned}$$

así, el intervalo de confianza:  $\xi = \pm 174.62$

por tanto, se podría afirmar que el gasto medio más probable ( $P = 0.95$ )

esperado en la estación Reforma cuando se presentan  $3500 \text{ m}^3/\text{seg}$ . en

la estación Malpaso II sería, con su intervalo de confianza de.

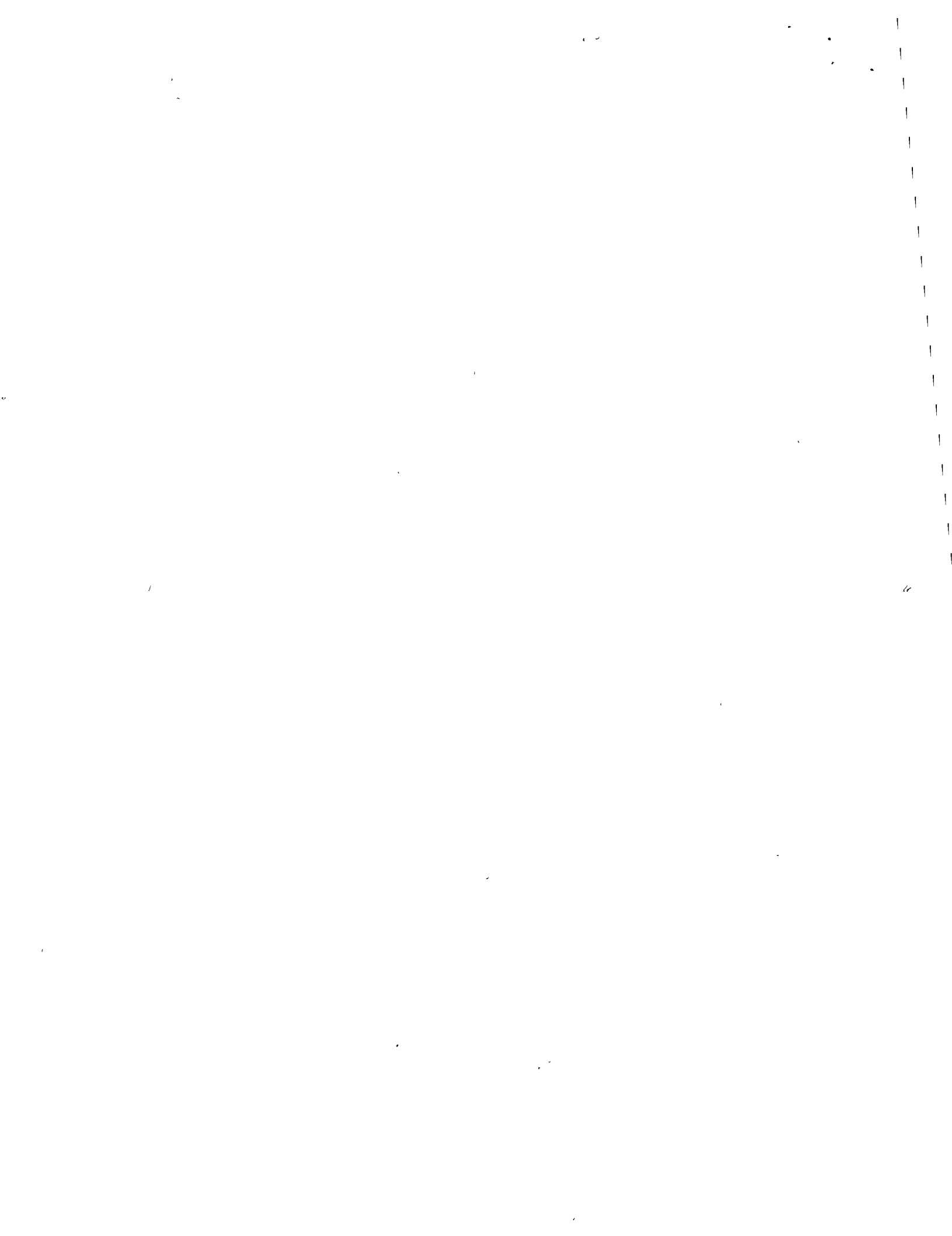
$$y = 13.03 + 0.4310 (3500) \pm 174.62$$

$$y = 1495.47 \pm 174.62$$

así

$$Q \text{ Med máximo} = 1495.47 + 174.62 = 1670 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$Q \text{ Med mínimo} = 1495.47 - 174.62 = 1321 \text{ m}^3/\text{seg}$$



Puede notarse que el error estándar de la predicción  $Y_0$  intervalo de confianza resulta el 11.7 % del valor obtenido para  $y'$ .

Ejemplo 8.8 En la tabla (8.11) se proponen los gastos máximos mensuales aforados (col. 3) y su correspondiente lectura sobre la escala de referencia (col. 4) del Rfo Mezcalapa, Estación Las Peñitas, en el Edo. de Chiapas correspondiente a la cuenca del Rfo Grijalva. El cero de la escala se encuentra en la cota + 50.00 m respecto al banco de nivel. Se desea encontrar, aplicado el método de correlación lineal simple, la ecuación que mejor relacione dichos valores, su coeficiente de correlación, así como el gasto máximo mensual esperado en la corriente cuando se tenga una lectura de escala de 6.80 m.

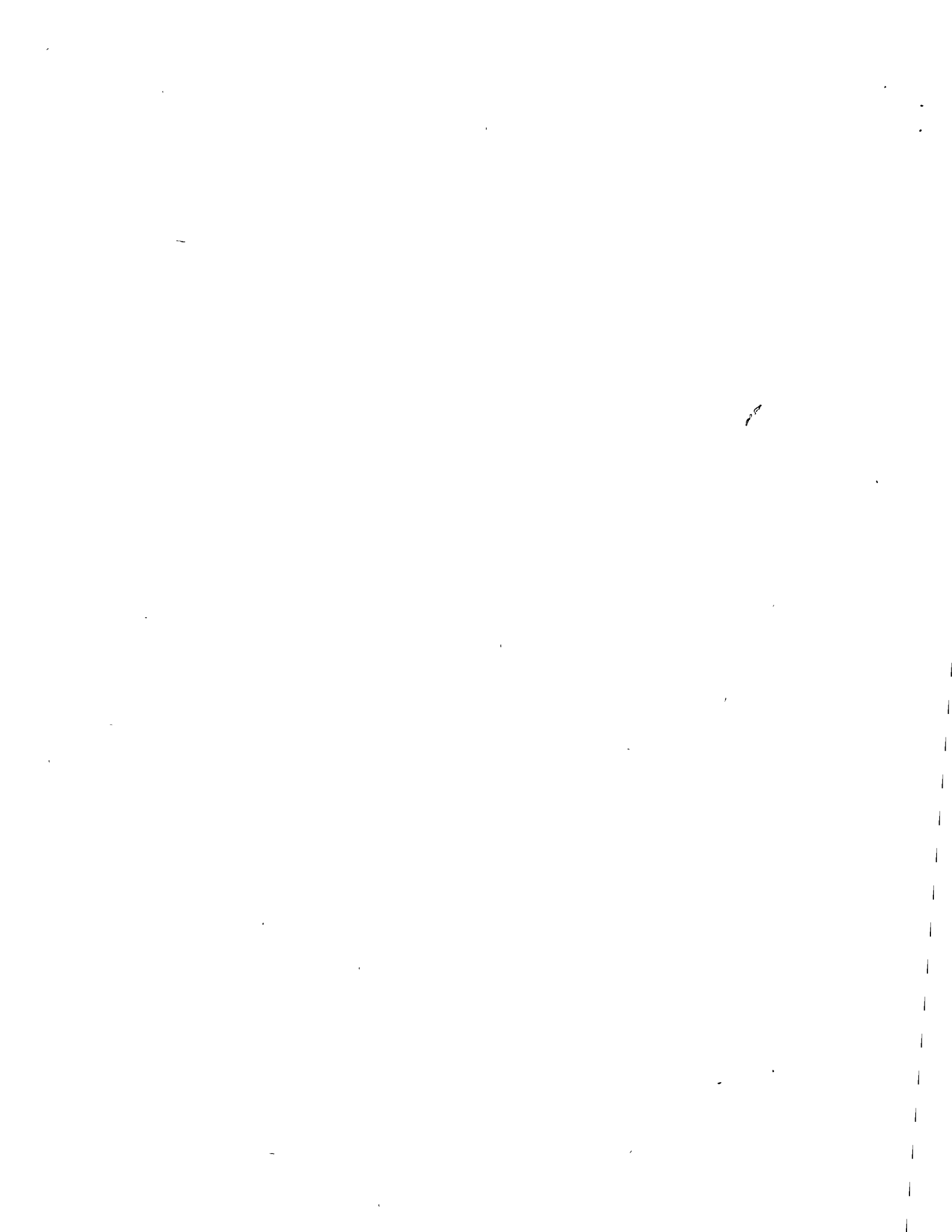
La relación pedida corresponde que la ecuación de una curva de elevaciones-gastos para el río en estudio. Esta curva generalmente tiene la forma :

$$Q = a_0 h^b$$

Q gasto que pasa por sección ( $m^3/seg$ )

h tirante hidráulico o elevación de la superficie del agua respecto a un punto. (m)

$a_0, b$  parámetros, función de las características particulares del escurrimiento.



Siendo esta la forma de la ecuación buscada, para poder utilizar el análisis de correlación lineal en vez de la curvilínea, será necesario efectuar ciertas transformaciones de forma tal que pueda relacionar linealmente, así tomando logaritmos se tiene

$$\log Q = \log a_0 + b \log h$$

y considerando

$$y' = \log Q$$

$$x = \log h$$

$$a = \log a_0$$

queda

$$y' = a + bx$$

que es la ecuación de una recta con pendiente  $b$  y ordenada al origen  $a$ ,

con la característica de la recta de regresión pudiendo así emplear el

análisis lineal deseado. Para la secuencia de cálculo, se elaboró la -

Tabla 8.12

De dicha tabla se tienen los siguientes valores:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 7.0620 \quad ; \quad \sum_{i=1}^n y_i = 36.1844$$

$$\sum_{i=1}^n (x_i)^2 = 4.3971 \quad ; \quad \sum_{i=1}^n (y_i)^2 = 110.7134$$



Tabla 8.11 Gastos máximos mensuales en la escala de tirantes correspondiente al Río Mezcalapa en la estación La Peñita durante el año de 1969.

1	2	3	4
Orden	Mes	Gasto máximo mensual ( m <sup>3</sup> /s )	Lectura en la escala de tirantes respecto al ce-ro ( m )
1	Enero	1156.000	4.16
2	Febrero	445.740	2.75
3	Marzo	325.450	2.41
4	Abril	457.000	2.86
5	Mayo	506.500	2.97
6	Junio	560.500	3.09
7	Julio	884.500	3.69
8	Agosto	2230.000	5.30
9	Septiembre	4000.000	6.40
10	Octubre	3765.000	6.42
11	Noviembre	2490.000	5.39
12	Diciembre	944.000	3.68

Tabla 8.12 Ordenamiento de cálculo.

1	2	3	4	5	6	7	8
Orden	h	q	xi	yi	(xi) <sup>2</sup>	(yi) <sup>2</sup>	(xi)(yi)
1	4.16	1156.00	0.6191	3.0645	0.3832	9.3911	1.8972
2	2.75	445.74	0.4393	2.6493	0.1929	7.0187	1.1638
3	2.41	325.45	0.3820	2.5119	0.1459	6.3096	0.9595
4	2.86	457.00	0.4564	2.6599	0.2083	7.0750	1.2139
5	2.97	506.50	0.4728	2.7050	0.2235	7.3170	1.2789
6	3.09	560.50	0.4900	2.7490	0.2401	7.5570	1.3470
7	3.69	884.50	0.5670	2.9469	0.3214	8.6842	1.6708
8	5.30	2230.00	0.7243	3.3483	0.5246	11.2111	2.4251
9	6.40	4000.00	0.8062	3.3483	0.6499	12.9751	2.9040
10	6.42	3765.00	0.8075	3.5763	0.6520	12.7899	2.8878
11	5.39	2490.00	0.7316	3.3962	0.5352	11.5341	2.4846
12	3.68	944.00	0.5658	2.9750	0.3201	8.8586	1.6832
Suma:			7.0620	36.1844	4.3971	110.7134	21.9158





$$\sum_{i=1}^n x_i y_i' = 21.9158$$

sustituyendo los valores anteriores en la ec (8.17) se tiene que

$$S_{xx} = 12(4.3971) - (7.0620)^2 = 2.8934$$

y de la ec (8.18)

$$S_{xy} = 12(21.9158) - (36.1844) = 7.4554$$

siendo la medida de los datos:

$$\bar{y} = \frac{36.1844}{12} = 3.0153$$

$$\bar{x} = \frac{7.0620}{12} = 0.5885$$

Sustituyendo los valores en las ecs (8.15) y (8.16) se tiene que

$$b = \frac{7.4554}{2.8934} = 2.58 \quad y$$

$$a = 3.0153 - 2.58 (0.5885) = 1.50$$

Por tanto, la ecuación de la recta de regresión (en escala doble-logarítmico por la transformación hecha) que proporciona el mejor ajuste entre los valores de los gastos máximos mensuales ( $y$ ) y su correspondiente lectura en la escala ( $x$ ) sobre el Rfo Mezcalapa resulta, según la ec.(8.13)

$$y' = 1.50 + 2.58 x$$

pero de acuerdo con la transformación hecha y la forma de la ecuación de una curva E-Q, se tiene que



$$a = \log a_0 = 1.50$$

$$a_0 = \text{antilog } 1.50 = 31.62$$

así la ecuación de la cifra E-Q que proporciona el mejor ajuste a los datos en escala normal o aritmética resulta

$$Q = 31.62 (h)^{2.58}$$

En las figs 8.5 y 8.6 se muestran las relaciones existentes entre los datos y estas ecuaciones.

Su coeficiente de correlación considerando

$$S_{yy} = 12(110.7134) - (36.1844)^2 = 19.25$$

se obtiene de la ec (8.19) como

$$r = \frac{7.4554}{[(2.8934)(19.2500)]^{1/2}} = \frac{7.4554}{7.4630}$$

$$r = 0.9989$$

que involucra un ajuste prácticamente sin error apreciable.

Para conocer el gasto máximo mensual que circula por la sección en el Río Mezcalapa cuando se tiene una lectura de 6.80 m en la escala aforara en su margen, se pueden utilizar las ecuaciones de la recta de re-gresión y de la curva encontradas. Así,

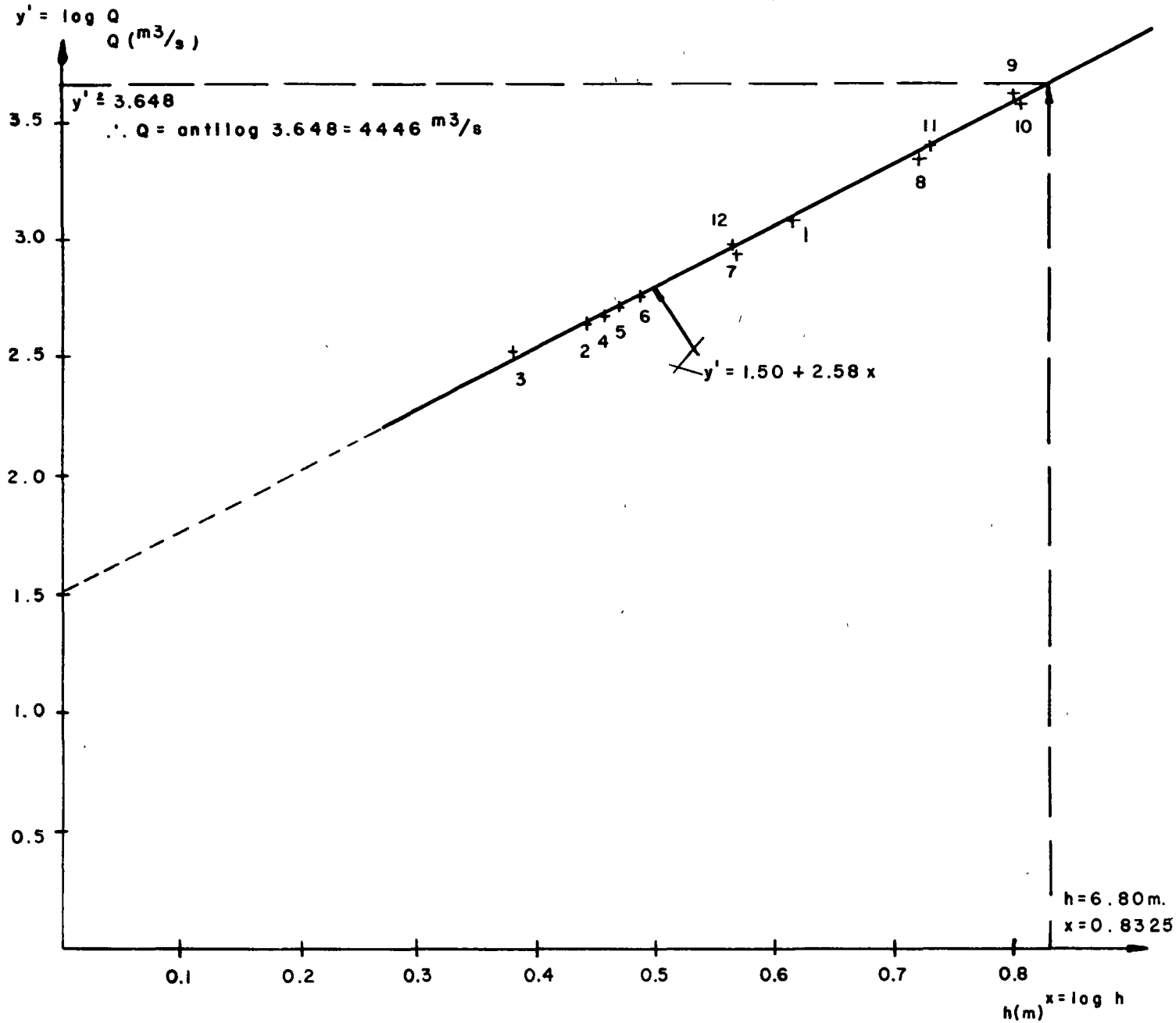
$$Q \text{ Mezcalapa} = f (h \text{ escala})$$

$$y = f (x)$$

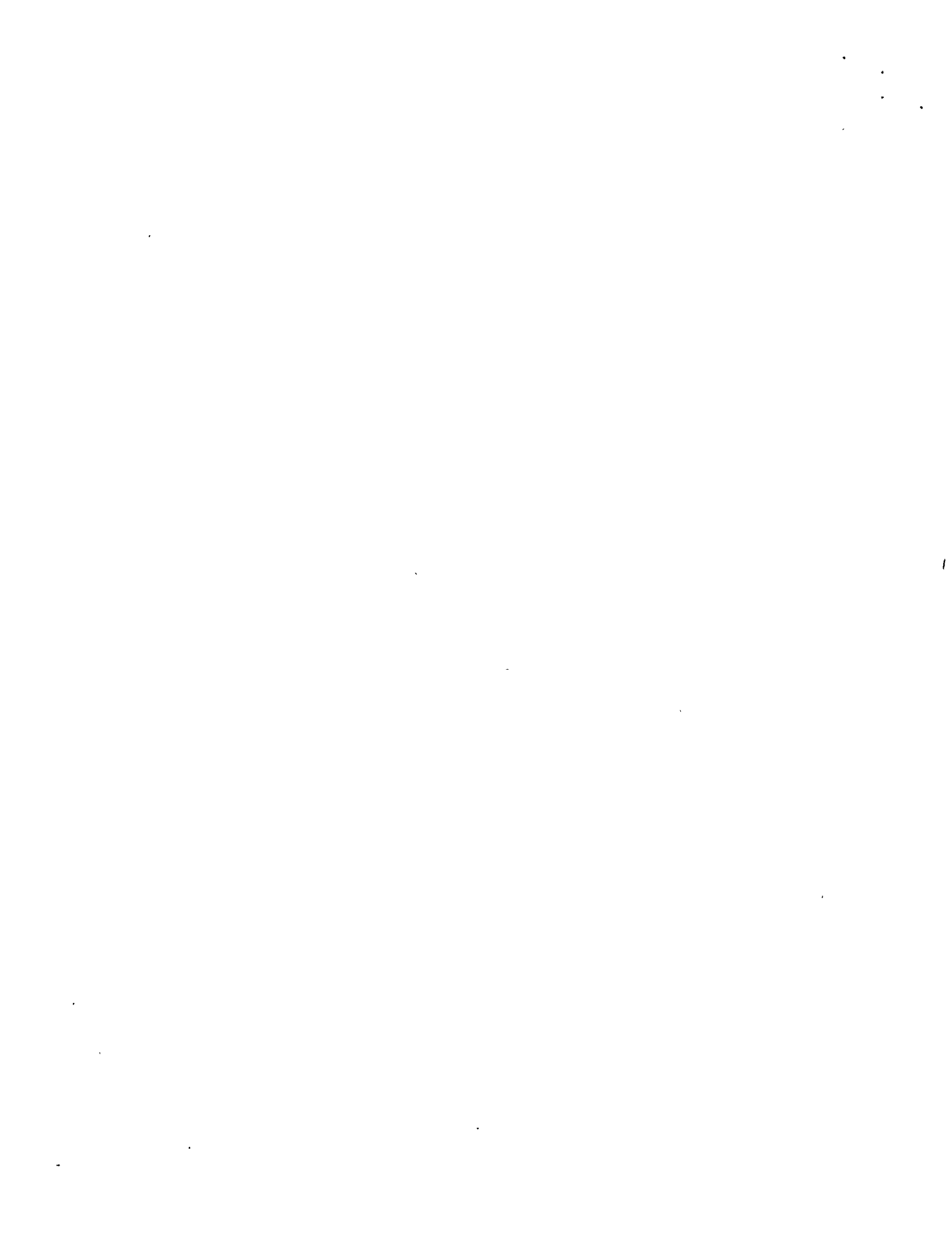
como:

$$y' = 1.50 + 2.58 x$$





**Fig. 8.5** Recta de Regresión ( $y = 1.50 + 2.58x$ ) obtenida para relacionar los gastos máximos mensuales en el Río Mezcalapa y las lecturas correspondientes en la escala de Referencia. Escala aritmética.



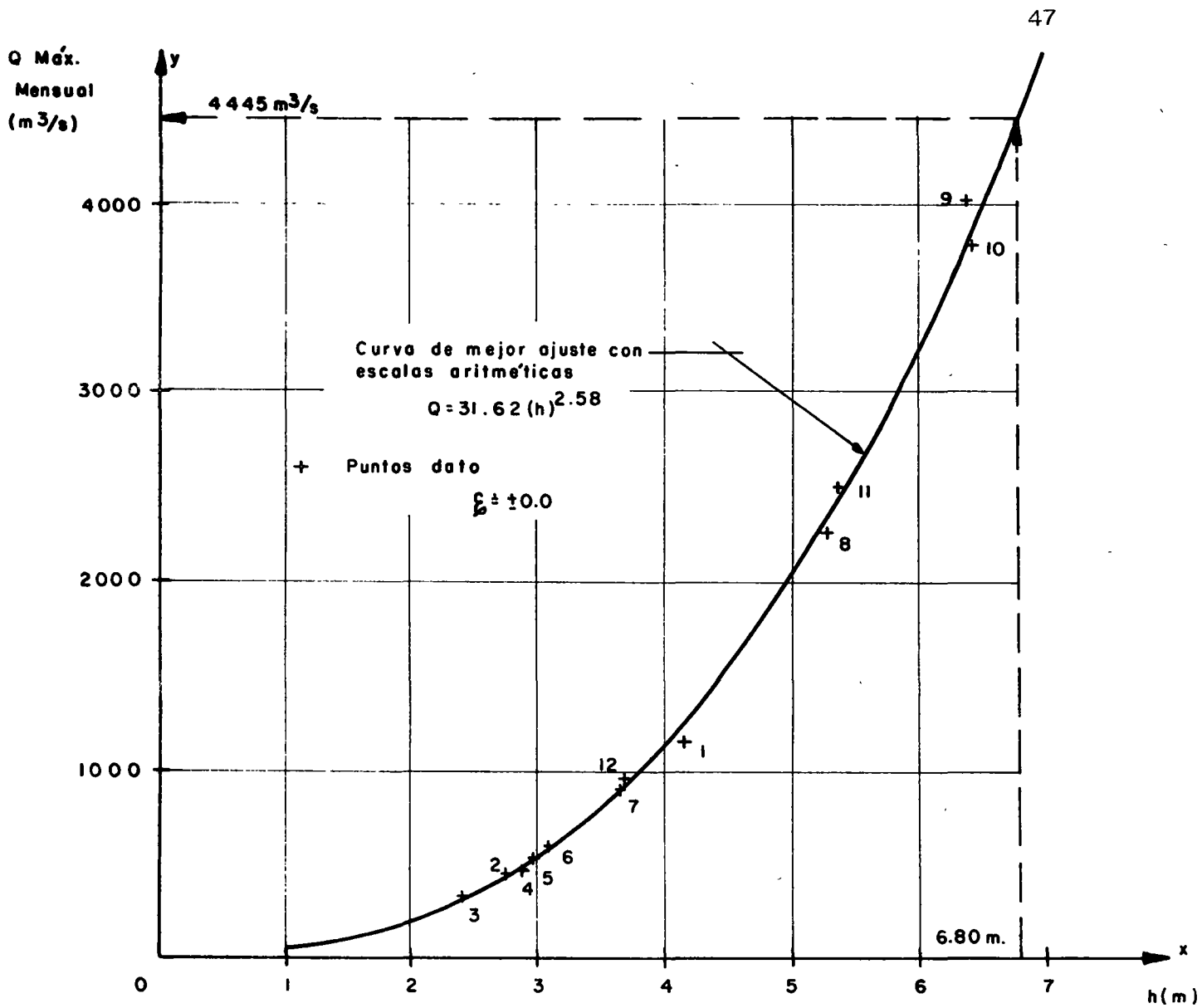


Fig. 8.6 Curva de mejor ajuste obtenida para relacionar los gastos máximos mensuales en el Río Mezcalapa y las lecturas correspondientes en la escala de referencia. Curva Elevaciones-Gastos de la Estación Hidrométrica Las Peñitas.





siendo  $x = \log h = \log 6.80 = 0.8325$

subst:  $y' = 1.50 + 2.58 (0.8325) = 1.50 + 2.1478 = 3.6478$

$$y = \log Q; Q = \text{antilog}(y') = \text{antilog}(3.6478)$$

$$QM = \underline{4444} \text{ m}^3/\text{seg} \text{ recta de regresión, o bien la}$$

ecuación de la curva E - Q.

$$Q = 31.62 (h)^{2.58}$$

$$= 31.62 (6.80)^{2.58} = 31.62 (140.60) = \underline{4445.80} \text{ m}^3/\text{seg}$$

Si se elige para valorar el error un nivel de significancia de 0.95,  $\alpha = 0.5$

y  $\frac{\alpha}{2} = 0.025$

los grados de libertad  $\nu = n-2 = 12-2 = 10$ , de los valores tabulados para la distribución "t" obtenemos:

$$t_{\frac{\alpha}{2}} = t_{0.025} = 2.228 \quad y$$

la variancia del error "Se<sup>2</sup>" de acuerdo a la ec (8.19) es

$$Se^2 = \frac{19.25}{12(12-2)} \left[ 1 - \frac{(7.4554)^2}{(2.8934)(19.25)} \right] = 0.00034$$

y la desviación estándar:  $Se = 0.018$

Sustituyendo los valores en la ec (8.20) con  $X_0 = 0.8325$  se tiene

$$\xi = \pm (2.228) (0.018) \sqrt{1 + \frac{1}{12} + \frac{12 (0.8325 - 0.5885)^2}{2.8934}} =$$



$$\begin{aligned} \epsilon &= \pm 0.0401 \sqrt{1 + 0.0833 + 0.2467} = \pm 0.0401 \sqrt{1.33} = \\ &= \pm 0.0401 (1.153) = \pm 0.0462 \\ &= \pm 0.0462 \end{aligned}$$

por tanto, de la ec (8.21)

$$y = a + bx \pm \epsilon$$

vemos que el valor para el error estándar o intervalo de confianza -

$\epsilon = \pm 0.0462$  en esta curva elevaciones - gastos resulta tan pequeño, que el valor del gasto máximo mensual más probable que se presenta en el Río Mezcalapa cuando la lectura sobre la escala es de 6.80 m, se obtiene directamente de las ecuaciones encontradas, depreciando el error o intervalo de confianza, sin que esto afecte a la predicción en forma - significativa, así

cuando  $h = 6.80 \text{ m}$

$$QM = 4445 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Lo anterior es de esperarse pues el coeficiente de correlación prácticamente tiene el valor de la unidad.

### 8.3 Correlación lineal múltiple

Esta técnica de análisis se utiliza cuando la variable dependiente "y" es función de dos o más variables independientes  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Es muy usada en hidrología para obtener relaciones por ejemplo entre los gas-



tos máximos y las características fisiográficas de la cuenca en estudio, para determinar fórmulas de tiempos de pico, para generación de escu<sup>rrimientos</sup>; etc. El valor por estimar  $y'$  se puede conocer a partir de una ecuación lineal del tipo

$$y' = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \quad (8.22)$$

donde las  $a_i$  se determinan a partir de los datos disponibles y de tal manera que la suma de los errores al cuadrado sea mínima. A partir de esto, los parámetros  $a_i$  se obtienen al resolver el siguiente sistema:

$$\begin{pmatrix} N & x_{1i} & x_{2i} & x_{ni} \\ x_{1i} & x_{1i}^2 & x_{1i} x_{2i} & x_{1i} x_{ni} \\ & & & \\ x_{ni} & x_{ni} x_{1i} & x_{ni} x_{2i} & x_{ni}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \\ a_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_i \\ x_{1i} y_i \\ \\ x_{ni} y_i \end{pmatrix} \quad (8.23)$$

donde  $N$  es el número de grupos de valores  $(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}, y_i)$  y las sumas son desde  $i$  hasta  $N$ .

A partir de una ecuación similar a la (8.14) y de acuerdo con la ec (8.9) se puede obtener la variancia del error como

$$Se^2 = \sum y_i^2 - S_n^2 \quad (8.24)$$



donde

$$S_n^2 = a_0 \sum y_i + a_1 \sum x_{1i} y_i + \dots + a_n \sum x_{ni} y_i \quad (8.25)$$

Las ecs (8.24) y (8.25) permiten conocer que tanto influyen cada una de las variables independientes ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) en el valor de  $y$ . Suponiendo que se desea saber que tanto influye la variable  $x_n$  en el cálculo de  $y$ , se procede de la siguiente manera; se calcula utilizando la ec (8.25) la variancia  $S_{n-1}^2$  de las restantes variables, pero sin tener en cuenta el último término función de  $x_n$ . Conocidas las variancias, se aplica la prueba  $F$  (ec 8.10) considerando que

$$F = \frac{N - n - 1}{S_e^2} \frac{(S_n^2 - S_{n-1}^2)}{n - (n - 1)} \quad (8.26)$$

Comparando el valor calculado de  $F$  según la ec (8.26) y el valor tabular de  $F$  con grados de libertad  $\nu_1 = N - n - 1$  y  $\nu_2 = N - (n - 1)$ , si el primero es mayor que el segundo, el ajuste de " $y$ " mejora si se utiliza  $x_n$ .

Obsérvese que el criterio anterior se puede efectuar suponiendo simultáneamente varias variables  $x_1$ , pero siempre comparando con respecto a la ec (8.22). Por el proceso iterativo de este análisis, conviene siempre empezar comprando el valor observado de " $y$ " con el obtenido mediante el ajuste de " $y$ ," este último función de dos y tres variables de





pendientes, y así sucesivamente.

Otra manera de ver como influye cada variable de  $x_i$ . Para cada ec (8.22) se valúan los parámetros  $a_i$  y se calculan con los valores datos los valores de  $y'$ , obteniéndose finalmente el coeficiente de correlación entre estos valores y los valores datos de  $y$ . De esta manera se encuentra cual es la mejor ec (8.22) para determinar los valores de  $y$ .

Ejemplo 8.9 A partir del análisis de las características de las subcuencas aforas más representativas correspondientes a la cuenca del Río Pánuco, se desea obtener una relación que permita conocer el gasto máximo para diversas períodos de retorno. Una vez definida la relación, obtener el gasto máximo para la cuenca del Río Pánuco hasta su desembocadura para un período de retorno de 25 años.

Las cuencas que se seleccionaron para el análisis se muestran en la Tabla 8.13. La información de estaciones, gastos máximos y año de registros se obtuvieron del "Boletín Hidrológico No. 32, Tomo I" editado por la Secretaría de Recursos Hidráulicos, a las cuales se les calculó sus características fisiográficas más importantes (capítulo 2), relacionando estas con el gasto máximo registrado y su período de retorno (véase inciso 8.4.3)



TABLA 8.13

CARACTERISTICAS DE LAS SUBCUENCAS SELECCION  
NADAS PARA EL ANALISIS

Corriente Río	Estación Nombre	Area (km <sup>2</sup> ) A	Pendiente cauce prin_ cipal S	Long.Cauce Principal (m) L
Tampaón	El Pujal	23373	0.0076	325 000
Moctezuma	Pte.Maza_ cintla	17238	0.0077	215 000
Amajac	Temamatla	6884	0.0135	155 000
Tempoal	Tempoal	5275	0.0139	150 000
Axtla	Requetemú	661	0.0792	25 000

Corriente Río	Estación Nombre	Desnivel entre origen y sección de aforos (m) E	Gasto máximo (m <sup>3</sup> /seg) Q <sub>máx</sub>	Período de retorno (años) Tr
Tampaón	El Pujal	2474	5410	6.50
Moctezuma	Pte.Maza_ cintla	1647	5233	4.33
Amajac	Temamatla	2087	4037	3.25
Tempoal	Tempoal	2085	3295	2.60
Axtla	Requetemú	1979	2696	2.17



Después de revisar diversas ecuaciones, se propuso para iniciar el estudio una ecuación de liga del tipo

$$Q_M = a A^b S^c T^d$$

que involucra la relación basada, siendo  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  los parámetros a determinar. Aunque lógicamente al hacer intervenir en el problema - solo cinco subcuencas, para procesar la ecuación planteada, se tiene - muy poca información para realizar el ajuste de los parámetros y utilizarlos para hacer inferencia. Por claridad se prefirió sacrificar información y trabajar solo con cinco subcuencas. Hecha la aclaración anterior, como la ecuación propuesta representa una relación no lineal, se hace la transformación necesaria para aplicar el procedimiento visto en la correlación lineal múltiple. Tomando logaritmos decimales se tiene que

$$\log Q_M = \log a + b \log A + c \log S + d \log Tr$$

$$\log Q_M = y'$$

con lo cual

$$\log a = a_0, b = a_1, c = a_2, d = a_3$$

$$\log A = x_1, \log S = x_2, \log Tr = x_3$$

queda  $y' = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$ , que es la relación lineal pedida. De acuerdo al sistema (8.23) indicando con



$$\sum_{i=1}^n = \sum ; x_{1i} = x_1, x_{2i} = x_2, x_{3i} = x_3, y_i = y,$$

las ecuaciones asociadas a la matriz serían

$$\begin{aligned} y &= a_0 n + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 + a_3 \sum x_3 \\ yx_1 &= a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 x_2 + a_3 \sum x_1 x_3 \\ yx_2 &= a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + a_2 \sum x_2^2 + a_3 \sum x_2 x_3 \\ yx_3 &= a_0 \sum x_3 + a_1 \sum x_1 x_3 + a_2 \sum x_2 x_3 + a_3 \sum x_3^2 \dots (I) \end{aligned}$$

que es un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas. Para resolver el sistema se elaboró la Tabla 8.14

Substituyendo los resultados de la Tabla 8.14 en el sistema, se tiene que

$$\begin{aligned} 18.008 &= 5a_0 + 18.986 a_1 - 9.060 a_2 + 2.714 a_3 \\ 68.681 &= 18.986 a_0 + 73.576 a_1 - 35.404 a_2 + 10.712 a_3 \\ -32.824 &= 9.060 a_0 - 35.404 a_1 + 17.112 a_2 - 5.168 a_3 \\ 9.868 &= 2.714 a_0 + 10.712 a_1 - 5.168 a_2 + 1.615 a_3 \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema, se deduce los valores de los parámetros que son:

$$\begin{aligned} a_0 &= 5.5541 &= \log a & a = \text{antilog } a_0 = 743600 \\ a_1 &= 1.8736 &= b \\ a_2 &= 2.2136 &= c \\ a_3 &= 2.1207 &= d \end{aligned}$$





Tabla 8.14 Ordenamiento del cálculo

Orden	Q máx (m <sup>3</sup> /s)	Area (/2m <sup>2</sup> )	Pendiente (S <sup>-m</sup> /m)	Período de Retorno (Tr-años)	y log Q	X <sub>1</sub> log A	X <sub>2</sub> log S	X <sub>3</sub> log Tr
1	5410	23373	0.0076	6.50	3.735	4.369	-2.119	0.813
2	5233	17238	0.0077	4.33	3.720	4.238	-2.113	0.637
3	4037	6884	0.0135	3.25	3.606	3.837	-1.870	0.512
4	3295	5275	0.0139	2.60	3.516	3.516	-1.857	0.415
5	2696	661	0.0792	2.17	3.431	2.821	-1.101	0.337
					18.008	18.986	-9.060	2.714

X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	y X <sub>1</sub>	y X <sub>2</sub>	y X <sub>3</sub>
19.088	4.490	0.661	-9.258	3.552	-1.723	16.318	-7.914	3.037
7.961	4.465	0.406	-8.955	2.700	-1.346	15.765	-7.860	2.370
7.723	3.497	0.262	-7.175	1.965	-0.957	13.836	-6.743	1.846
13.846	3.448	0.172	-6.910	1.544	-0.771	13.083	-6.529	1.459
7.958	1.212	0.114	-3.106	0.951	-0.371	9.679	-3.778	1.156
73.576	17.112	1.615	-35.404	10.712	-5.168	68.681	-32.824	9.868

s



y finalmente la ecuación buscada resulta

$$y' = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$$

$$\log QM = \log a + b \log A + c \log S + d \log Tr$$

$$\log QM = 5.541 - 1.8736 \log A - 2.2136 \log S + 2.1207$$

$$\log Tr \dots (I)$$

$$QM = a A^b S^c Tr^d$$

así

$$QM = 743600 A^{-1.8736} S^{-2.2136} Tr^{2.1207}$$

$$Qm = 743600 \frac{Tr^{2.12}}{(A^{1.87})(S^{2.21})} \text{ (m}^3\text{/seg)}$$

y de acuerdo a la ecuación (8.24) la variancia del error será:

$$Se^2 = y_i^2 - S_n^2$$

$$\begin{aligned} \text{donde (8.25)} \quad S_n^2 &= a_0 \sum y + a_1 \sum yx_1 + a_2 \sum yx_2 + a_3 \sum yx_3 = \\ &= 5.5541 (18.008) - 1.8736 (68.681) - 2.2136 \\ &\quad (-32.824) + 2.1207 (9.868) = 64.9238 \end{aligned}$$

por otro lado

$$\bar{y}_i^2 = 64.9259$$

subst en (8.24)

$$Se^2 = 64.9259 - 64.9238 = 0.0021$$

y la desv. estándar del error.



$$S_e = \sqrt{S_e^2} = \sqrt{0.0021} = 0.0456$$

Si el gasto máximo para el Río Pánuco asociado a un  $T_r = 25$  años, resultaría según la ecuación obtenida, en la estación de Las Adjuntas -

$$A = 61063 \text{ km}^2$$

$$\log QM = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 ; A = 61063 \text{ km}^2 ; S = 0.0071 ; T_r = 25 \text{ años}$$

$$= 5.5541 - 1.8736 (\log A) - 2.2136 (\log S) + 2.1207 (\log T_r)$$

$$= 5.5541 - 1.8736 (4.7858) - 2.2136 (-2.1487) + 2.1207 (1.3979)$$

$$= 4.3085 \quad \log QM = 4.3085$$

$$QM = \text{antilog } 4.3085$$

$$QM = 20340 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$T_r = 25 \text{ años}$$

Ejemplo 8.10 Se desea conocer la relación existente entre los gastos máximos ( $Q_{\text{máx}}$ ) del Río Pánuco en función de sus afluentes principales como lo son los Ríos Moctezuma, Amajac y Tempoal. La ecuación perdida resultaría del tipo ( $Q = Q_{\text{máx}}$ )

$$Q_P = a + bQ_M + cQ_A + dQ_T, \text{ y obtener los registros}$$

de 1959 y 60 de la est. Temamatla faltantes.

Para obtener la relación deseada, se eligieron sobre las corrientes afectadas, las estaciones hidrométricas más representativas en cuanto a sus aforos de gastos circulantes, resumiendo estas:



- (P) Rfo Pánuco - Estación Las Adjuntas
- (M) Rfo Moctezuma - Estación Tierra Blanca
- (A) Rfo Amajac - Estación Temamatla
- (T) Rfo Tempoal - Estación Tempoal, asignando a cada

una de ellas un período de registro de 8 años para el proceso de cálculo, datos que se muestran en la Tabla 8.15

siendo la relación entre los gasto máximos:

$$QP = a + b QM + c QA + d QT$$

$$QP = y, QM = x_1, QA = x_2, QT = x_3$$

$$a = a_0, b = a_1, c = a_2, d = a_3 \text{ queda:}$$

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$$

relación que es posible resolverla, encontrando los valores de los parámetros  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  tales que proporcionen el mejor ajuste a los valores reales y por medio del análisis de correlación lineal múltiple - (con 4 valores); así de acuerdo al sistema (8.23) el planteamiento material se transforma indicando con:

$$\sum_{i=1}^n = \sum ; x_{1i} = x_1, x_{2i} = x_2, x_{3i} = x_3, y_i = y$$

a las ecuaciones





$$\begin{aligned} \sum y &= a_0n + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 + a_3 \sum x_3 \\ \sum yx_1 &= a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1x_2 + a_3 \sum x_1x_3 \\ \sum yx_2 &= a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1x_2 + a_2 \sum x_2^2 + a_3 \sum x_2x_3 \\ yx_3 + a_0 \sum x_3 + a_1 \sum x_1x_3 + a_2 \sum x_2x_3 + a_3 \sum x_3^2 \end{aligned}$$

que es un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas. Para resolver el sistema se elaboró la Tabla 8.16

Sustituyendo los valores de la Tabla 8.16 en el sistema se tiene que

$$27.065 = 8a_0 + 4.302a_1 + 6.616a_2 + 10.101a_3$$

$$17.8451 = 4.302a_0 + 4.9336a_1 + 4.2504a_2 + 7.182a_3$$

$$22.5447 = 6.616a_0 + 4.2504a_1 + 5.9343a_2 + 8.5987a_3$$

$$39.4159 = 10.101a_0 + 7.1820a_1 + 8.5987a_2 + 15.2140a_3$$

Resolviendo el sistema se encuentran los valores de los parámetros que son  $a_0 = 1.2496 = a$ ;  $a_1 = -0.0164 = b$ ;  $a_2 = -0.8029 = c$ ;  $a_3 = 2.2226 = d$  y la ecuación buscada es

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$$

$$QP = a + b QM + c QA + d QT$$

$$QP = 1.2496 - 0.0164 QM - 0.8029 QA + 2.2226 QT$$

$$\text{en } (m^3 \times 10^3) \quad \dots(I)$$

De acuerdo a la ecuación (8.24) la variancia del error será:

$$Se^2 = \sum y_i^2 - S_n^2$$



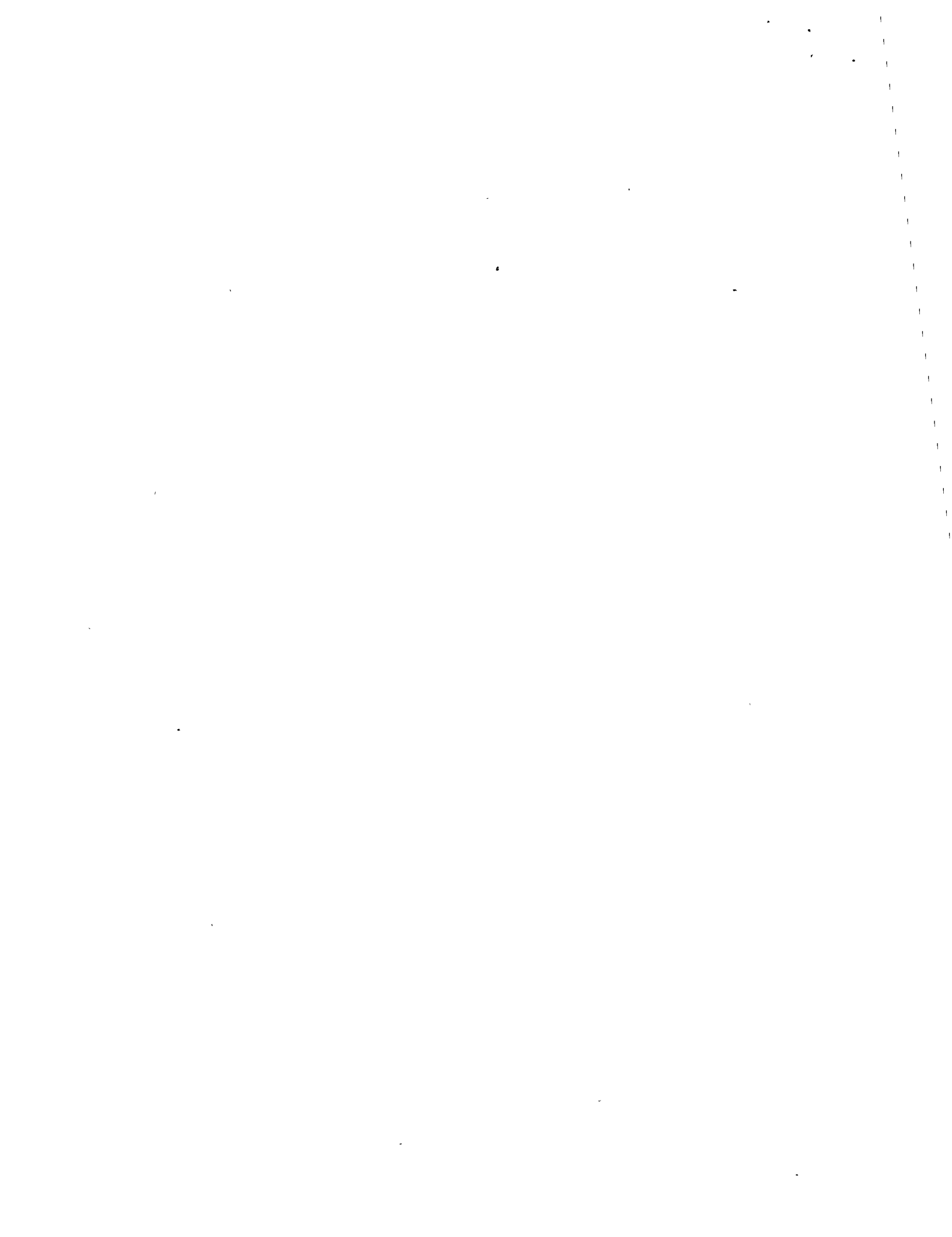
Tabla 8.15 Relación entre gastos máximos aforados.

Gastos máximos aforados en miles de m<sup>3</sup>  
Estación

Orden	Año	Las Adjuntas y	Tierra Blanca x <sub>1</sub>	Tamamatla x <sub>2</sub>	Tempoal x <sub>3</sub>
1	1961	3.295	0.290	0.828	0.853
2	1962	1.735	0.157	0.642	0.739
3	1963	4.037	0.287	0.774	1.800
4	1964	2.038	0.225	0.604	0.748
5	1965	2.621	0.327	0.856	0.793
6	1966	5.410	0.341	0.522	1.778
7	1967	5.233	0.005	1.118	2.245
8	1968	2.696	0.670	1.272	1.145
n=8	S U M A	27.065	4.302	6.616	10.101

Tabla 8.16 Procesamiento de cálculo.

x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	x <sub>3</sub> <sup>2</sup>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	yx <sub>1</sub>	yx <sub>2</sub>	yx <sub>3</sub>
0.0841	0.6855	0.7276	0.2401	0.2473	0.7062	0.9555	2.7282	2.8106
0.0246	0.4121	0.5461	0.1007	0.1160	0.4744	0.2723	1.1138	1.2821
0.0823	0.5990	3.2400	0.2221	0.5166	1.3932	1.1586	3.1246	7.2666
0.0506	0.3648	0.5595	0.1359	0.1683	0.4517	0.4585	1.2309	1.5244
0.1069	0.7327	0.6288	0.2799	0.2593	0.6788	0.8570	2.2435	2.0784
0.1162	0.2724	3.1612	0.1780	0.6062	0.9281	1.8448	2.8240	9.6189
4.0200	1.2499	5.040	2.2415	4.5042	2.5099	10.4921	5.8504	11.7480
0.4489	1.6179	1.311	0.8522	0.7671	1.4564	1.8063	3.4293	3.0869
4.9336	5.9343	15.2142	4.2504	4.2504	7.180	17.8451	22.5447	39.4159



donde (8.25) 
$$S_n^2 = a_0 \sum y + a_1 \sum yx_1 + a_2 \sum yx_2 + a_3 \sum yx_3 =$$

$$= 1.2496 (27.065) - 0.0164 (17.8451) -$$

$$- 0.8029 (22.5447) + 2.2226 (39.4159) = 103.0324$$

siendo 
$$y_i^2 = 105.1085$$

subst en (8.24)

$$S_e^2 = 105.1085 - 103.0324 = 2.0761$$

y la deav. estándar del error

$$S_e = \sqrt{S_e^2} = \sqrt{2.0761} = \pm 1.441 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{seg}$$

Los registros correspondientes a la estación Temamatla serían en función de la relación encontrada y las demás estaciones:

$$QA = \frac{1}{d} \left[ QP - (a + b QM + QT) \right]$$

Los registros para 1959 y 1960 para las estaciones independientes son:

Año	Q <sub>máx</sub> en (m <sup>3</sup> × 10 <sup>3</sup> )		
	Las Adjuntas (QP)	Tierra Blanca (QM)	Tempoal (QT)
1959	2.222	0.4310	1.508
1960	2.189	0.1741	1.277

subst para 1959:

$$QA_{59} = \frac{1}{2.2226} \left[ 2.222 - (1.2496 - 0.0164 \times 0.4310 - 0.8029 \times 1.508) \right] =$$

$$QA_{59} = 0.9854 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ b} = 985.4 \text{ m}^3/\text{seg}$$



para 1960 :

$$QA_{60} = \frac{1}{2.2226} \left[ 2.189 - (1.2496 - 0.0164 \times 0.1741 - 0.8029 \times 1.277) \right] =$$

$$QA_{60} = 0.8853 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{seg.} = 885.3 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

#### 8.4 Ordenamiento de datos hidrológicos

##### 8.4.1 Selección de un registro

Los datos hidrológicos disponibles son generalmente presentados en orden cronológico. En la fig. 8.7 se muestra un registro de ocho años de gastos medios diarios en orden de ocurrencia incluyendo solo los picos de aquellos valores que son mayores o iguales a  $250 \text{ m}^3/\text{seg.}$

En general muchos de los datos originales de que se disponen, no tienen significancia práctica en el análisis de los mismos, debido a que usualmente el diseño hidrológico de un proyecto, es gobernado solo por alguna ó algunas condiciones críticas. Por esta razón generalmente se trabaja solo con dos tipos de datos, conocidos como series de valores extremos y series de duración parcial.

La serie de valores extremos incluye solo el valor más grande ó más pequeño de los valores comprendidos en el registro, en un cierto intervalo constante de tiempo. Si el intervalo de tiempo es un año, la serie obtenida se le conoce como "serie anual", y si contiene los valores más





grandes se le denomina serie de "máximos anuales"; si se refiere a los valores menores, se le llama serie de "mínimos anuales". (fig 8.7 b)

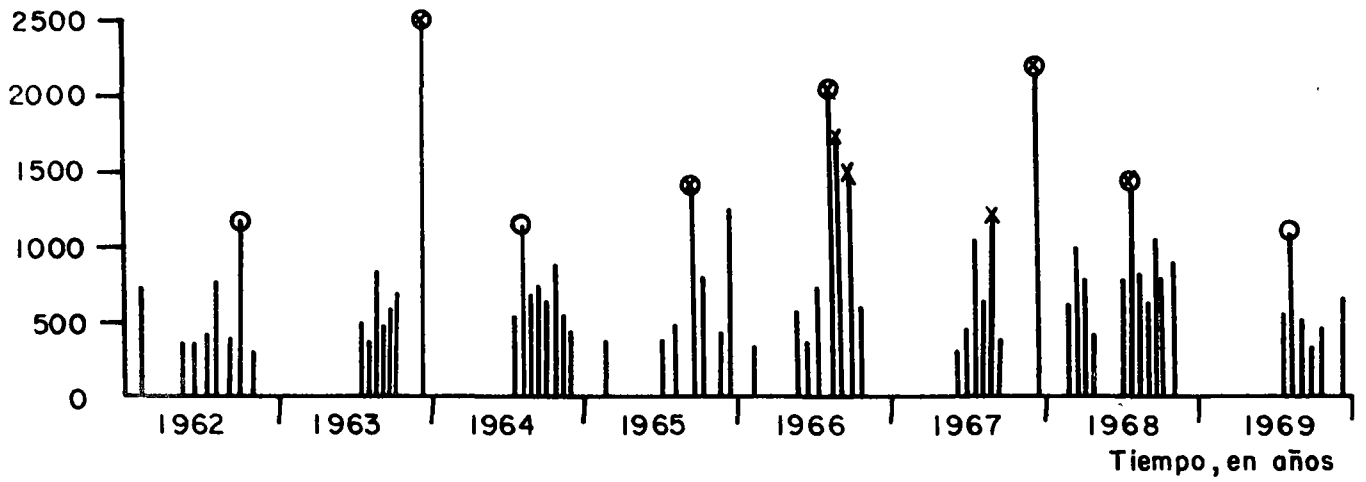
La serie de duración parcial constituye una serie de datos, los cuales se seleccionan de forma tal que su magnitud sea mayor que un cierto valor base, esto se escoge para que el número de valores en la serie sea igual al número de años de registro, la serie de datos resultante se le denomina "serie de excedentes anuales", (fig 8.7 c).

La selección de que tipo de serie de datos debe usarse en un diseño, se basa en la aplicación que se le va a dar al análisis, de los datos, los excedentes anuales se emplean si el segundo valor más grande en el año puede afectar en el diseño. La serie de máximas anuales se utiliza cuando en el diseño gobiernan las condiciones más críticas. En general estos tipos no difieren mucho, excepto en los valores bajos, y para efectos de comparación, conviene utilizar las dos series. Tradicionalmente los gastos se analizan como serie de máximos anuales y los lluviosos como serie de excedentes anuales.

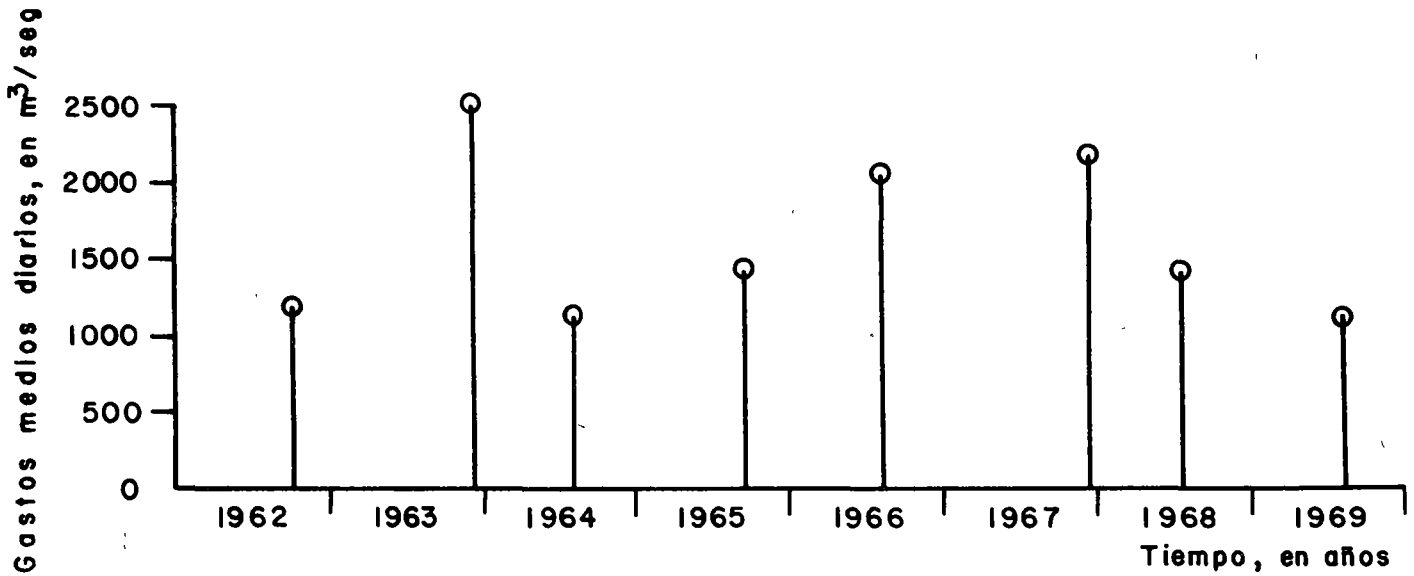
#### 8.4.2 Período de retorno

En un análisis de frecuencias de datos hidrológicos, el primer objetivo es determinar el intervalo de recurrencia o período de retorno  $T$ , de un evento hidrológico de una magnitud dada "y". El período de retorno se -

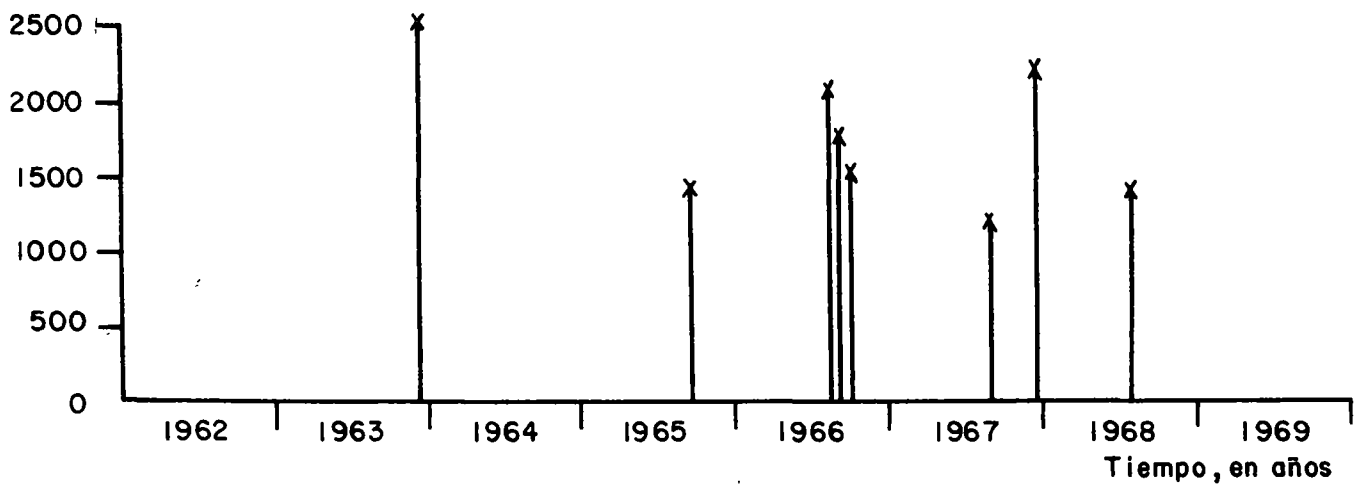




a) Datos originales



b) Máximos anuales



c) Excedentes anuales

Fig. 8.7 Arreglo de datos hidrológicos en orden de ocurrencia



define como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual un evento de magnitud dada "y" puede ser igualada o excedido por lo menos una vez en promedio. Si un evento igual o mayor a "y" ocurre una vez en T años, su probabilidad de recurrencia  $P(Y \geq y)$  es igual a 1 en T casos, o sea que

$$P(Y \geq y) = 1/T \quad (8.27)$$

y análogamente

$$T = \frac{1}{P(Y \geq y)} = \frac{1}{1 - P(Y \leq y)} \quad (8.28)$$

Una serie de máximas anuales y una de excedentes anuales, difieren en el sentido de que un valor máximo anual ocurre exactamente una vez en un año, mientras que un valor excedente anual ocurre en promedio, una vez en un año. La relación teórica entre las probabilidades de ambas series ha sido deducida por Chow\*.

Si "Pe" es la probabilidad de que una variable en una serie de excedentes anuales sea igual o mayor que "y", y "r" el número en promedio de eventos por año, entonces  $Pe/r$  es la probabilidad de que un evento sea igual a "y" o mayor, y  $1 - Pe/r$  es la probabilidad de que un evento sea

---

\* Ven Te Chow "Frequency analysis of hidrologic data with special application to rainfall intensities" Universidad de Illinois, Bull. Series No. 414, julio 1953.



menor que "y". Así, la probabilidad de que un evento de magnitud "y", llegue a ser un máximo de los "r" eventos en un año es  $(1 - P_e/r)^r$ .

Se demuestra que esta probabilidad, tiende a  $e^{-P_e}$  cuando "P<sub>e</sub>" es pequeña en comparación con "r", lo cual es cierto en la mayoría de los casos.

Por lo anterior, la probabilidad "P<sub>m</sub>" de que una máxima anual sea igualada o excedida es igual a

$$P_m = 1 - e^{-P_e} \quad (8.29)$$

Si T<sub>m</sub> y T<sub>e</sub> son respectivamente los períodos de retorno para los valores máximos anuales y excedentes anuales, de la ec. 8.27 se tiene que  $P_m = 1/T_m$  y  $P_e = 1/T_e$ , los que sustituyendo en 8.29 y ordenando, se tiene que

$$-\frac{1}{T_e} = \log_e \left( \frac{T_m - 1}{T_m} \right) \quad (8.30)$$

En esta ecuación se ve que para los valores de T mayores de 10 años, los valores de T<sub>m</sub> y T<sub>e</sub> son prácticamente iguales, por lo que para propósitos prácticos se puede concluir que si se dispone de un registro mayor de 10 años, el análisis de datos hidrológicos no difiere sensiblemente ya sea que se use para ello una serie de máximas anuales o bien una serie de excedentes anuales.





### 8.4.3 Períodos de retorno de los datos

Para el análisis de datos hidrológicos en relación con sus períodos de retorno, se requiere por una parte conocer la probabilidad de recurrencia de la distribución observada y por otra, la probabilidad de recurrencia correspondiente al evento que se desee obtener, ligado a la distribución teórica de mejor ajuste.

La obtención de los períodos de retorno ligados a los datos, se pueden valorar a partir de diversos criterios, pocos de los cuales tienen una explicación teórica. A continuación se analiza la obtención de las expresiones más usuales para valorar los períodos de retorno, refiriéndose estos a series de máximas y excedentes anuales.

Sea que se dispongan de  $n$  observaciones de una cierta distribución de eventos. Estos  $n$  valores se pueden arreglar en orden de magnitudes diferentes, asignándole a cada uno un número de orden  $m$ , el cual para el valor más grande es igual a uno, para el siguiente es dos, etc. Puede demostrarse \* que la media  $\bar{x}$  del número de veces que el  $m$ -avo valor más grande puede ser igualado o excedido en  $N$  futuros tanteos es

$$\bar{x} = N \frac{m}{n + 1} \quad (8.31)$$

---

\* Ven Te Chow "Frequency analysis of hydrologic data with special application to rainfall intensities" Universidad de Illinois, Bull Series No. 414, Appendix 1, Julio de 1953.



Para valores máximos anuales,  $T_m$  puede definirse como el tiempo en años para  $N$  futuros tanteos de que el  $m$ -avo valor más grande de los máximos anuales puede ser igualado o excedido una vez en promedio. Lo anterior implica que  $T_m = N$  cuando  $\bar{x} = 1$ . Sustituyendo estos valores en la ec 8.31 se tiene que

$$T_m = \frac{n+1}{m} \quad (8.32)$$

Esto indica que el período de retorno de un valor máximo anual es igual al número de años de registro más uno, dividido entre el número de orden. En el caso de los valores excedentes anuales, como se refieren a los valores más grandes,  $N/(n+1)$  tiende a  $N/n$  y la ec 8.32 se transforma en

$$T_e = \frac{n}{m} \quad (8.33)$$

que implica que el período de retorno de un valor excedente anual es igual al número de años de registro dividido entre el número de orden.

Utilizando la ec 8.32 o la ec 8.33, ya sea que se analicen valores máximos o excedentes anuales, es posible disponer de una relación entre los valores en estudio y sus períodos de retorno o bien su frecuencia de incidencia.

Generalmente, el siguiente paso en el análisis de datos hidrológicos es conocer la distribución de dichos valores y posteriormente inferir, basándose en una cierta frecuencia de incidencia, el valor que se puede presentar.



Antes de proceder al estudio del ajuste de los datos por medio de una cierta distribución, conviene ver la otra concepción del período de re tor no, la cual está ligada al evento que en última instancia se desea ob te ne r del análisis de estos datos para el diseño de una obra.

Ejemplo 8.11 En la tabla 8.17 se muestran los gastos máximos anuales en el Rfo Fuerte aforados por la Estación Hidrométrica Las Cañas, situada 4 km aguas abajo de la Presa Miguel Hidalgo en el Edo. de Sinaloa y correspondiente a la cuenca hidrológica del Rfo Fuerte. Se desea obtener para cada uno de los gastos su correspondiente período de re tor no en términos de máximos anuales y de excedentes anuales.

Para el cálculo de los períodos de retorno "T" asociados a la serie de máximos anuales ( $T_m$ ) y a la serie de duración parcial o excedentes anua les ( $T_e$ ) se elaboró la Tabla 8.18

Los valores de " $T_m$ " y " $T_e$ " se obtuvieron empleando las ecuaciones (8.32) y (8.33) respectivamente, con  $n = 18$  años de registro.

#### 8.4.4 Períodos de retornos de los eventos de diseño

Si  $P_m$  es la probabilidad de que un valor máximo anual "y" sea igua lado o excedido en un año,  $(1-P_m)$  es la probabilidad de que no se sobre pase "y" en un año en particular. Análogamente,  $(1-P_m)^N$  es la probabilidad de que "y" sea igualado o excedido en N años, y por lo tanto



TABLA 8.17 Gastos Máximos Anuales en orden de ocurrencia en el Río Fuerte, Sinaloa.  
Valores en (m<sup>3</sup>/seg).

ORDEN \ AÑO	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960
1	457.0	111.0	766.0	7477.0	659.0	110.9	161.7	169.0	8562.0
2	2264.0	1079.0	822.0	400.0	107.0	110.0	3888.0	1624.0	235.6
3	2229.0	1210.0	1619.0	1124.6	114.0	113.0	800.0	1127.6	212.4
4	324.4	857.6	1167.6	544.9	123.7	120.0	190.0	1202.9	268.8
5	332.0	53.8	651.6	694.0	161.0	129.0	303.1	343.5	709.4
MAXIMO ANUAL	2264.0	1210.0	1619.0	7477.0	659.0	129.0	3888.0	1624.0	8562.0
MAXIMOS EXCEDENTES ANUALES	2264.0 2229.0	1210.0 1079.0 857.6	1619.0 1167.6	7477.0 1124.6	_____	_____	3888.0	1624.0 1202.9 1127.6	8562.0

ORDEN \ AÑO	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969
1	452.0	166.8	259.8	469.3	171.6	192.1	188.1	203.7	213.0
2	298.2	187.0	477.0	224.9	147.0	206.8	208.1	225.0	207.9
3	697.2	187.0	460.9	436.4	152.0	1507.0	174.0	740.0	175.3
4	511.0	210.0	456.3	607.4	169.2	1251.8	168.8	1000.0	168.5
5	504.6	328.8	824.0	222.0	169.2	439.2	595.0	685.0	175.3
MAXIMO ANUAL	697.2	328.8	824.0	607.4	171.6	1507.0	595.0	1000.0	213.0
MAXIMOS EXCEDENTES ANUALES	_____	_____	824.0	_____	_____	1507.0 1251.8	_____	1000.0	_____





Tabla 8.18 Ordenamiento de cálculo.

Año	Gasto Máximo Anual de Mayor a Menor	Número de orden m	Tm (años)	Año	Gastos Máximos Excedentes Anuales de Mayor a Menor	Número de orden m	Te (años)
1960	8562.0	1	19.00	1960	8562.0	1	18.00
1955	7477.0	2	9.50	1955	7477.0	2	9.00
1958	3888.0	3	6.33	1958	3888.0	3	6.00
1952	2264.0	4	4.75	1952	2264.0	4	4.50
1959	1624.0	5	3.80	1952	2229.0	5	3.60
1954	1619.0	6	3.17	1959	1624.0	6	3.00
1966	1507.0	7	2.71	1954	1619.0	7	2.57
1953	1210.0	8	2.38	1966	1507.0	8	2.25
1968	1000.0	9	2.11	1966	1251.8	9	2.00
1963	824.0	10	1.90	1953	1210.0	10	1.80
1961	697.2	11	1.73	1959	1202.9	11	1.64
1956	659.0	12	1.58	1954	1167.6	12	1.50
1964	607.4	13	1.46	1959	1127.6	13	1.38
1967	595.0	14	1.36	1955	1124.6	14	1.29
1962	328.8	15	1.27	1953	1079.0	15	1.20
1969	213.0	16	1.19	1968	1000.0	16	1.13
1965	171.6	17	1.12	1953	857.6	17	1.06
1957	129.0	18	1.06	1963	824.0	18	1.00



$$P_n = 1 - (1 - P_m)^N$$

De la ec 8.27,  $P_m = 1/T_m$ , por lo que

$$P_n = 1 - (1 - 1/T_m)^N = 1 - (1 - N/T_m)$$

en donde

$$T_m = \frac{N}{P_n} \quad (8.34)$$

que implica que el período de retorno ligado al evento que se quiera obtener, es función del intervalo de tiempo en el cual se desea que no sea igualado dicho evento entre la probabilidad de que si sea igualado o superado. Así por ejemplo, para el diseño del vertedor de una presa, si se tiene que a dicha obra se le asigna una vida útil de 50 años, y si se considera que la avenida de diseño del vertedor tenga una probabilidad de 0.01 de que se presente o sea superada durante ese lapso, la avenida de diseño tendrá, de acuerdo con la ecuación anterior un período de retorno de 5,000 años.

En el caso de trabajar con series de duración parcial y valores de excedentes anuales, el período de retorno para determinar el evento de diseño tiene una expresión similar a la ec (8.34).

Si se considera que la vida útil de una cierta obra es constante, de la ec (8.34) se tiene que el período de retorno es función inversa de la pro



babilidad de ocurrencia del evento. Para valuar la probabilidad de ocurrencia, lo que se podría llamar también la probabilidad de riesgo, se requiere tener en cuenta : (a) Costo de la obra; (b) Daños que se pueden tener al presentarse una falla; (c) Costo de Mantenimiento; (d) Inconvenientes y perjuicios en caso de que falle la obra; (e) riesgo de vidas humanas.

De lo anterior se ve el porqué de la diferencia entre los períodos de retorno de obras de drenaje y las presas. En general si falla una obra de drenaje los percances ocasionados son mínimos comparados con los originados por la falla de una presa. Así, en el caso de diseño de vertederos de presas los períodos de retorno son muy grandes; en cambio, en el caso de puentes importantes fluctúa usualmente de 100 a 200 años, en el caso de obras de alcantarillado para drenaje de caminos de 25 a 50 años, drenaje en ciudades y aeropuertos de 5 a 10 años.

#### 8.5 Distribuciones de datos hidrológicos

Conocidos los períodos de retorno correspondientes a cada uno de los datos de una muestra, es posible así proceder a la obtención de su distribución de probabilidades y hacer inferencias.

En la Tabla 8.1 se indican las principales distribuciones teóricas de probabilidades utilizadas en hidrología, así como sus características.

Por otra parte en el subinciso 8.1.4 se vió como se puede conocer e



interpretar si alguna distribución teórica seleccionada es representativa de los datos de una muestra. En este inciso se plantean las distribuciones más usuales y su relación entre las características de un cierto evento hidrológico y sus frecuencias ó períodos de retorno.

#### 8.5.1 Distribución de valores extremos Tipo I

Esta distribución fué propuesta por Gumbel \* para el análisis de frecuencias de avenidas. Considerando que cada máximo anual es el valor extremo observado en una muestra de un año, se tendrán si se dispone de un número infinito de muestras anuales, que la probabilidad acumulada  $P(y)$  de cualquiera de los extremos (máximos anuales) sea menor a la variable ilimitada "y", se aproxima a la expresión.

$$P(y) = e^{-e^{-(a+y)/c}} \quad (8.35)$$

donde "a" y "c" son parámetros estadísticos, cuyos valores obtenidos por el método de los momentos, para una población infinita, se calculan como:

$$a = 0.5772 c - \bar{y}$$

$$c = \left( \frac{\sqrt{6}}{\pi} \right) S_y$$

donde  $\bar{y}$  es la media y  $S_y$  la desviación estandar de los valores de la población.

Como la muestra es siempre finita, Gumbel considera que

---

\* E. J. Gumbel "The Return Period of Floods Flows", Annals Mathematical Statistics, Vol XII, No. 2. junio 1941.





$$a = \bar{y}_N c - \bar{y} \quad (8.36)$$

y:

$$c = S_y / \sigma_N \quad (8.37)$$

donde  $\bar{y}_N$  y  $\sigma_N$  son valores solo función del tamaño de la muestra.

Sus valores se indican en la Tabla 8.19

La probabilidad complementaria de  $P(y)$  es la probabilidad  $P_m$  de que un máximo anual de magnitud "y" sea igualado ó excedido. Por lo tanto:

$$P_m = 1 - P(y) = 1 - e^{-e^{-(a+y)/c}}$$

y teniendo en cuenta la ec 8.27, la ecuación anterior se puede expresar como

$$\frac{T_m - 1}{T_m} = e^{-e^{-(a+y)/c}}$$

trasponiendo y simplificando, se llega a que:

$$Y = -a - c \log_e \log_e \frac{T_m}{T_m - 1} \quad (8.38)$$

Sustituyendo en esta ecuación las ec 8.36 y 8.37, y ordenando se tiene

que

$$y = \bar{y} - \frac{S_y}{\sigma_N} \left( \bar{y}_N + \log_e \log_e \frac{T_m}{T_m - 1} \right) \quad (8.39)$$

expresión que permite hacer inferencias de los valores de  $y$  para cualquier período de retorno  $T_m$ , conociendo el tamaño  $N$  de la muestra de datos de máximos anuales, su media  $\bar{y}$  y su desviación estándar  $S_y$ .



Tabla 8.19 Valores de  $\bar{Y}_N$  y  $\sigma_N$ 

N	$\bar{Y}_N$	$\sigma_N$	N	$\bar{Y}_N$	$\sigma_N$
8	.4843	.9043	49	.5481	1.1590
9	.4902	.9288	50	.54854	1.16066
10	.4952	.9497	51	.5489	1.1623
11	.4996	.9676	52	.5493	1.1638
12	.5035	.9833	53	.5497	1.1653
13	.5070	.9972	54	.5501	1.1667
14	.5100	1.0095	55	.5504	1.1681
15	.5128	1.02057	56	.5508	1.1696
16	.5157	1.0316	57	.5511	1.1708
17	.5181	1.0411	58	.5515	1.1721
18	.5202	1.0493	59	.5518	1.1734
19	.5220	1.0566	60	.55208	1.17467
20	.52355	1.06283	62	.5527	1.1770
21	.5252	1.0696	64	.5533	1.1793
22	.5268	1.0754	66	.5538	1.1814
23	.5283	1.0811	68	.5543	1.1834
24	.5296	1.0864	70	.55477	1.18536
25	.53086	1.09145	72	.5552	1.1873
26	.5320	1.0961	74	.5557	1.1890
27	.5332	1.1004	76	.5561	1.1906
28	.5343	1.1047	78	.5565	1.1923
29	.5353	1.1086	80	.55688	1.19382
30	.53622	1.11238	82	.5572	1.1953
31	.5371	1.1159	84	.5576	1.1967
32	.5380	1.1193	86	.5580	1.1980
33	.5388	1.1226	88	.5583	1.1994
34	.5396	1.1255	90	.55860	1.20073
35	.54034	1.12847	92	.5589	1.2020
36	.5410	1.1313	94	.5592	1.2032
37	.5418	1.1339	96	.5595	1.2044
38	.5424	1.1363	98	.5598	1.2055
39	.5430	1.1388	100	.56002	1.20649
40	.54362	1.14132	150	.56461	1.22534
41	.5442	1.1436	200	.56715	1.23598
42	.5448	1.1458	250	.56878	1.24292
43	.5453	1.1480	300	.56993	1.24786
44	.5458	1.1499	400	.57144	1.25450
45	.54630	1.15185	500	.57240	1.25880
46	.5468	1.1538	750	.57377	1.26506
47	.5473	1.1557	1000	.57450	1.26851
48	.5477	1.1574		.57722	1.28255



La ec 8.39 se puede transformar en

$$y = \bar{y} + S_y K \quad (8.40)$$

donde

$$K = - \frac{1}{\sigma_N} \left( \bar{Y}_N + \log_e \log_e \frac{T_m}{T_m - 1} \right) \quad (8.41)$$

denominado por Chow\* como factor de frecuencia, el cual depende del tamaño de la muestra de datos y del período que se esté analizando. -

En la Tabla 8.20 proporcionar algunos valores de K

En el caso de utilizar excedentes anuales en lugar de máximos anuales, se pueden utilizar las expresiones anteriores solo teniendo en cuenta la ec 8.30. Así, para excedentes anuales la ec 8.39 se transforma en

$$Y = \bar{Y} - \frac{S_y}{\sigma_N} \left( \bar{Y}_N - \log_e T_e \right) \quad (8.42)$$

Observese que tanto la ec(8.39) como la (8.42), si se grafican en un papel de probabilidades especial, y contra  $T_m$  o  $T_e$ , se obtiene la ecuación de una recta. El hecho de que estas ecuaciones representan una línea recta, no implica que los datos de la muestra que se está analizando estén sobre la línea, por lo que es necesario conocer el intervalo de confianza de los resultados obtenidos del análisis de frecuencias. Así para cierto valor  $T_m$ , se tendrá que

$$y - \Delta y < y < y + \Delta y$$

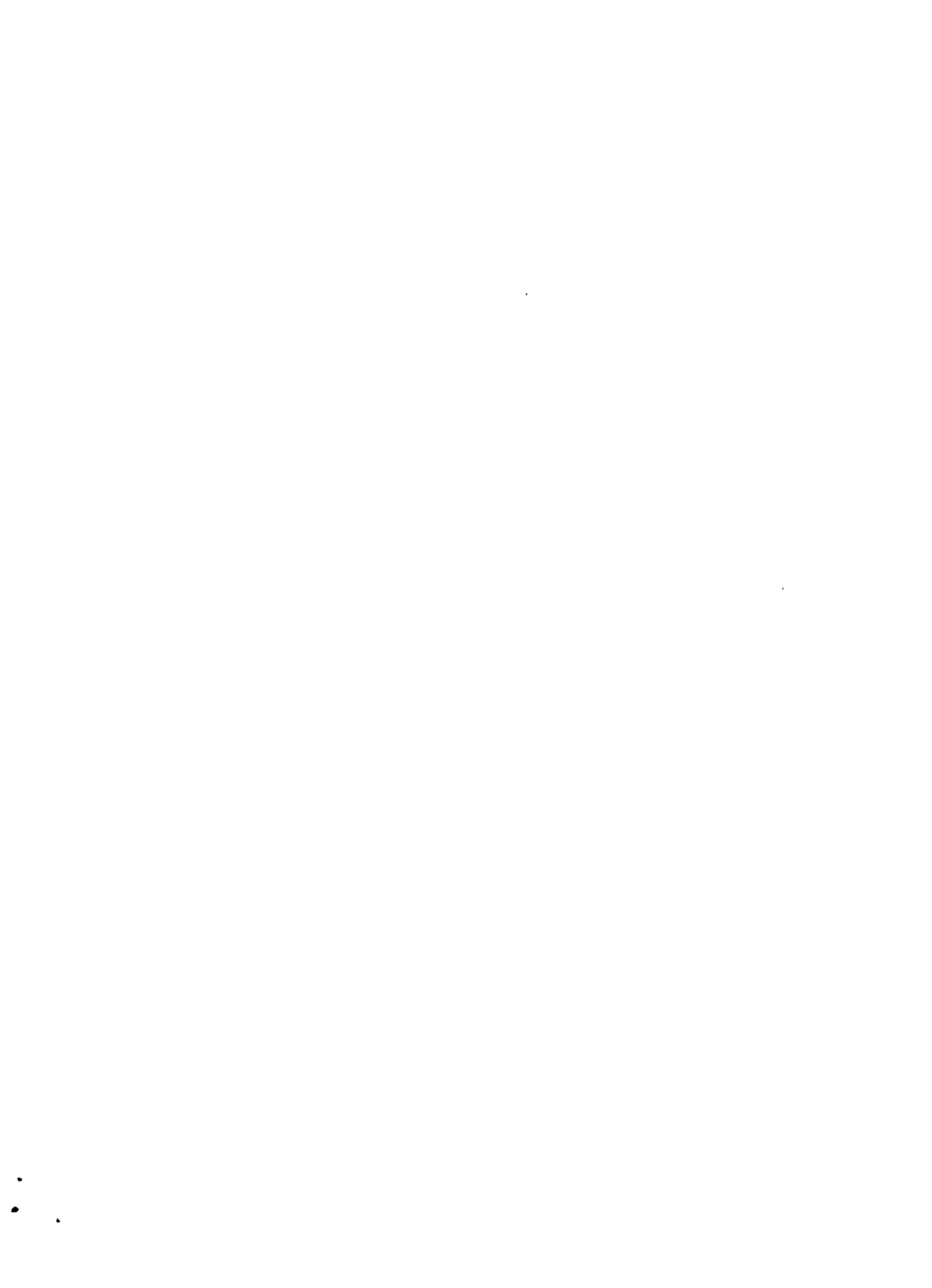
---

\*Ven Te Chow " A General Formula for Hydrologic Frequency Analysis".  
Trnas. Amer. Geophys. Union. Vol 32, No.2, abril 1952.



Tabla 8.20 Valor del factor de frecuencia K para diferentes tamaños de muestra y período de retorno.

T años n años	5	10	15	20	25	30	50	60	75	100
15	0.967	1.703	2.117	2.410	2.632	2.823	3.321	3.501	3.721	4.005
20	0.919	1.625	2.023	2.302	2.517	2.690	3.179	3.352	3.563	3.836
25	0.888	1.575	1.963	2.235	2.444	2.614	3.088	3.257	3.463	3.729
30	0.866	1.541	1.922	2.188	2.393	2.560	3.026	3.191	3.393	3.653
35	0.851	1.516	1.891	2.152	2.354	2.520	2.979	3.142	3.341	3.598
40	0.838	1.495	1.866	2.126	2.326	2.489	2.943	3.104	3.301	3.554
45	0.829	1.478	1.847	2.104	2.303	2.464	2.913	3.078	3.268	3.520
50	0.820	1.466	1.831	2.086	2.283	2.443	2.889	3.048	3.241	3.491
55	0.813	1.455	1.818	2.071	2.267	2.426	2.869	3.027	3.219	3.467
60	0.807	1.446	1.806	2.059	2.253	2.411	2.852	3.008	3.200	3.446
65	0.801	1.437	1.796	2.048	2.241	2.398	2.837	2.992	3.183	3.429
70	0.797	1.430	1.788	2.038	2.230	2.387	2.824	2.979	3.169	3.413
75	0.792	1.423	1.780	2.029	2.220	2.377	2.812	2.967	3.155	3.400
80	0.788	1.417	1.773	2.020	2.212	2.368	2.802	2.956	3.145	3.387
85	0.785	1.413	1.767	2.013	2.205	2.361	2.793	2.946	3.135	3.376
90	0.782	1.409	1.762	2.007	2.198	2.353	2.785	2.938	3.125	3.367
95	0.780	1.405	1.757	2.002	2.193	2.347	2.777	2.930	3.116	3.357
100	0.779	1.401	1.752	1.998	2.187	2.341	2.770	2.922	3.109	3.349





donde  $y$  es el valor obtenido de la ec (8.39) y  $\Delta y$  el intervalo de confianza con una cierta probabilidad.

Gumbel propone para calcular los intervalos de confianza con una probabilidad del 68%, lo siguiente:

- 1) Para el valor más grande de la muestra analizada (número de orden  $m = 1$ )

$$\Delta y_1 = S_y F(N) \quad (8.42 a)$$

donde  $S_y$  es la desviación estándar de la muestra y  $F(N)$  es función del tamaño de la muestra  $N$  (fig 8.8.a)

- 2) Para el segundo valor más grande (número de orden  $m = 2$ )

$$\Delta y_2 = \frac{0.661 (N + 1)}{N - 1} \Delta y_1 \quad (8.42 b)$$

- 3) Para los otros valores de la muestra

$$\Delta y = \frac{0.877}{N} \Delta y_1 F(T_m) \quad (8.42 c)$$

donde  $F(T_m)$  es una función de  $T_m$ , cuyos valores si  $T_m \leq 10$  años se encuentran en la fig 8.8.b. Para valores de  $T_m$  mayores de 10 años, se tiene que:

$$F(T_m) = T_m^{0.5} \quad (8.42 d)$$

- 4) Para extrapolar a valores mayores al máximo de la muestra, el intervalo de confianza se considera constante e igual a  $\Delta y_1$



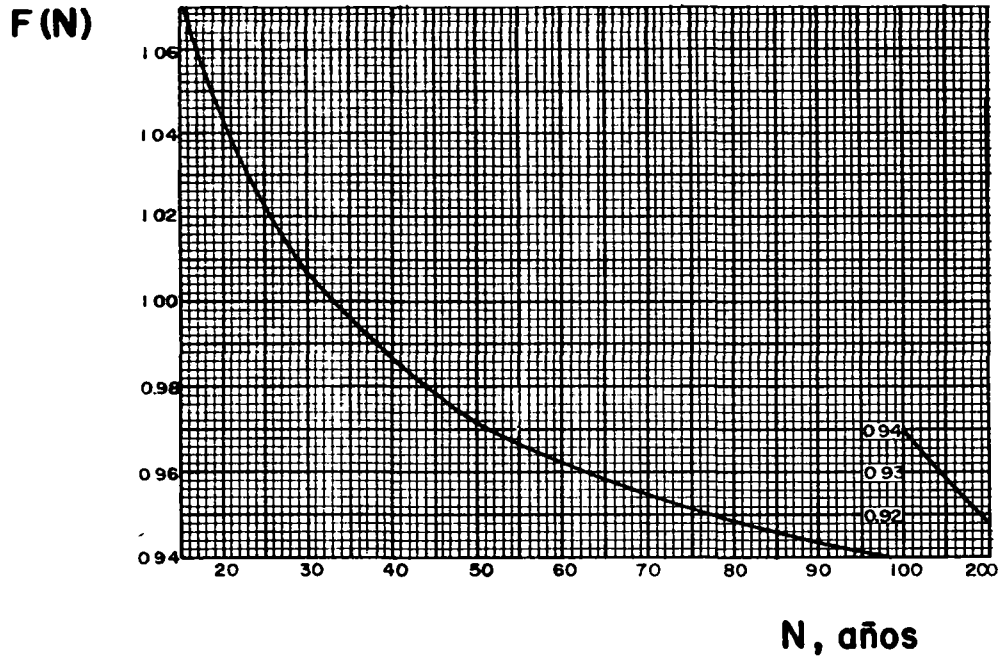


Fig.8.8a Relación entre N y F(N)

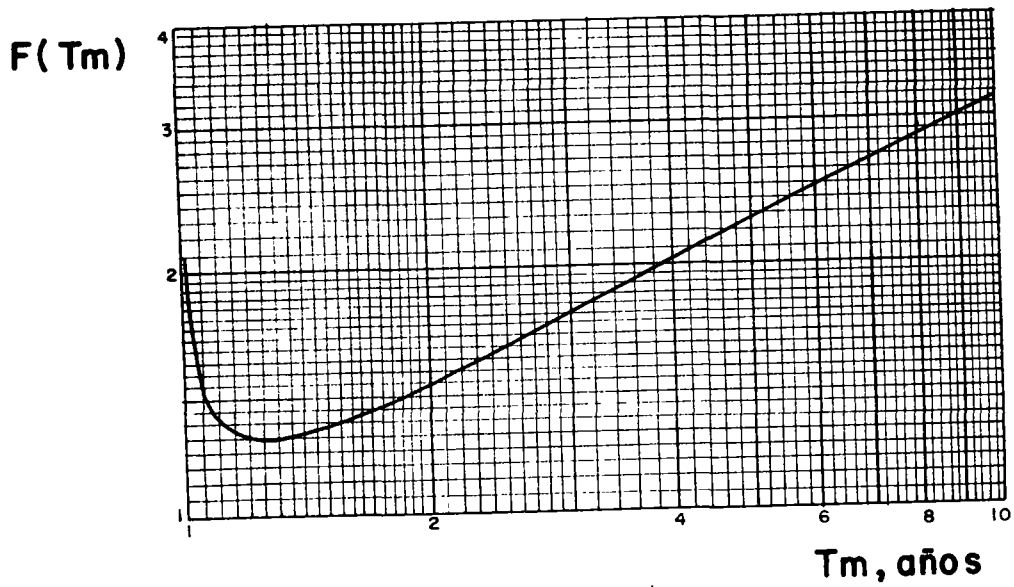


Fig.8.8b Relación entre Tm y F(Tm)



### 8.5.2 Distribuciones ajustadas por mínimos cuadrados

Si se analiza el criterio antes expuesto, se observa que para valuar la distribución de valores extremos de una muestra se utiliza solo su tamaño, su media y su desviación estándar. (ec. 8.39).

Teniendo en cuenta que en papel de probabilidades especial, la ec 8.39 es una línea recta, Nash\* propone en lugar de utilizar el criterio propuesto por Gumbel para valuar  $a$  y  $c$ , realizar un ajuste por mínimos cuadrados.

La ec 8.38 se puede transformar en

$$y - a - c \log_e \log_e \frac{T_m}{T_m - 1} = e + f x \quad (8.43)$$

en donde los parámetros  $e$  y  $f$  se determinan de acuerdo con las ec (8.15) y (8.16) y el intervalo de confianza según la ec (8.20)

De la ecuación 8.24 se ve que también es factible considerar que:

$$y = g + h \log T_e = g + hx \quad (8.44)$$

expresión análoga a la anterior, solo que ahora el ajuste es una línea recta en papel semilogarítmico.

De esta manera es posible escoger diferentes tipos de curvas de ajuste de los datos y seleccionar la mejor. En este caso, si la correlación es simple, se aceptará como mejor la que tenga el máximo coeficiente de correlación.

\* R.B. Thorn, "River Engineering and Water Conservation Works", -- Butter worths (1966)



Ejemplo 8.12 A partir de la información del ejemplo 8.11 deducir el gasto máximo que se puede presentar en la Estación Hidrométrica Las Cañas sobre el Río Fuerte, considerando un período de retorno de 100 años.

Según la ec. (8.39) y (8.42) Gumbel establece la igualdad de:

$$y = \bar{y} - \frac{S_y}{\sigma_N} \left[ \bar{y}_N + \log_e \log_e \frac{T_m}{T_m - 1} \right] = f \text{ (serie de máximos$$

anuales)

$$y = \bar{y} - \frac{S_y}{\sigma_N} \left[ \bar{y}_N - \log_e T_e \right] = f \text{ (excedentes anuales)}$$

donde

$y = Q_{\text{máx}}$  esperado para un cierto período de retorno

$T_r$

Para valuar las incógnitas de las ecuaciones anteriores, considerando una serie de máximos anuales, en la Tabla 8.21 se muestra el ordenamiento del cálculo.

Así, la media de los gastos, ec (8.6),  $\bar{y} = \frac{33376.0}{18} = 1854.22 \text{ m}^3/\text{seg.}$

su desviación estándar, ec (8.8),  $S_y = \sqrt{\frac{100084648.58}{18 - 1}} = \sqrt{5887332.26}$

$$S_y = 2426.39$$

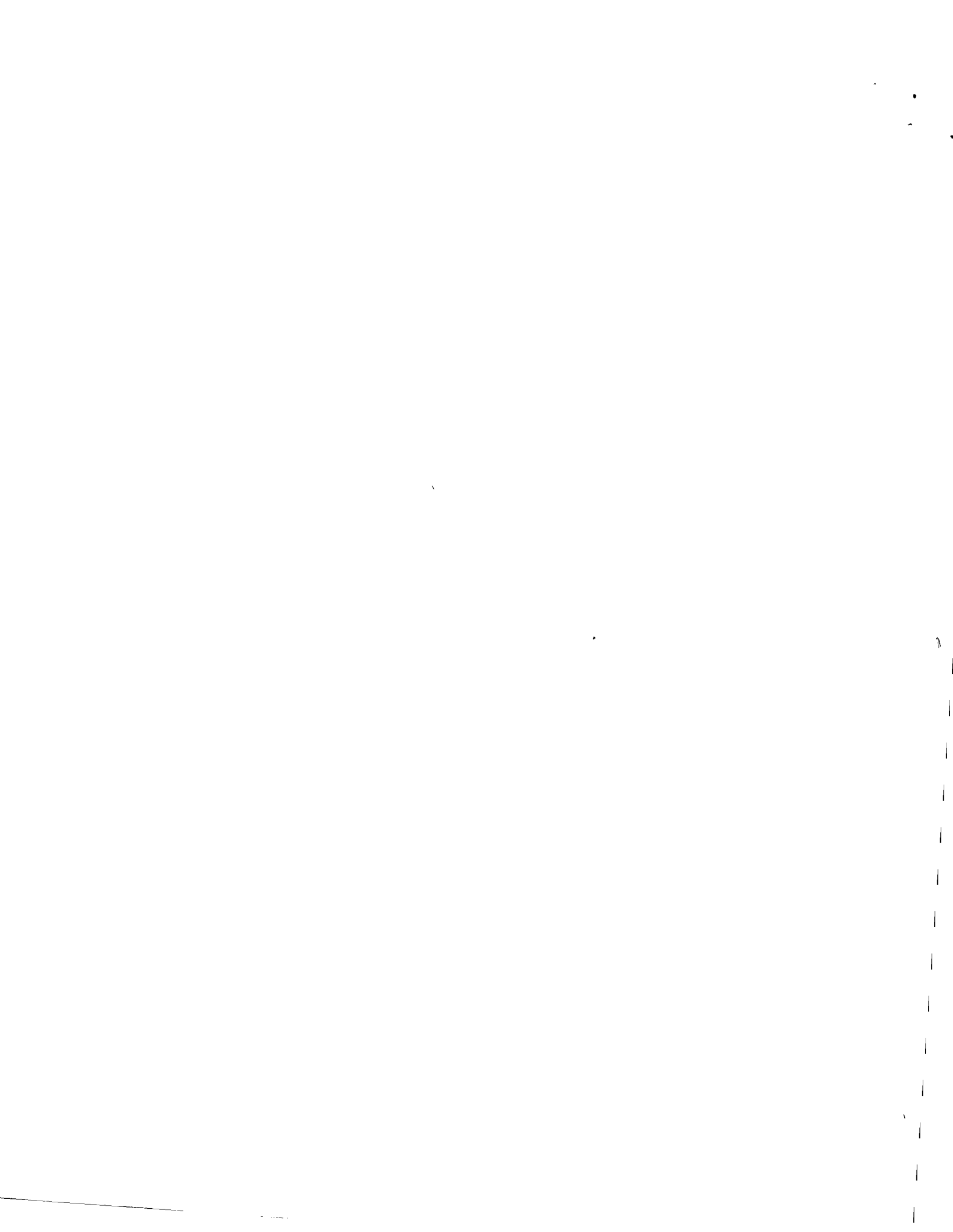
De la Tabla 8.19 se obtiene para  $N = 18$  años, los parámetros  $\bar{y}_N$  y  $\sigma_N$  siendo estos:





ORDENAMIENTO DE CALCULOS PARA LA OBTENCION DE  $\bar{y}$  (MEDIA) Y  $S_y$  (DESV. ESTANDAR DE LA MUESTRA)

Orden	Año de Observación	Gasto Máximo Anual Aforado $y_i$ (m <sup>3</sup> /s)	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	1952	2264.00	409.78	167919.64
2	1953	1210.00	-644.22	415019.40
3	1954	1619.00	-235.22	55328.44
4	1955	7477.00	5622.78	31615654.92
5	1956	659.00	-1195.22	1428550.84
6	1957	129.00	-1725.22	2976384.04
7	1958	3888.00	2033.78	4136261.08
8	1959	1624.00	-230.22	53001.24
9	1960	8562.00	6707.78	44994312.52
10	1961	697.20	-1157.02	1338695.28
11	1962	328.80	-1525.42	2326906.17
12	1963	824.00	-1030.22	1061353.24
13	1964	607.40	-1246.82	1554560.11
14	1965	171.60	-1682.62	2831210.06
15	1966	1507.00	-347.22	120561.72
16	1967	595.00	-1259.22	1585635.00
17	1968	1000.00	-854.22	729691.80
18	1969	213.00	-1641.22	2693603.08
n 18	S U M A	33376.00		100084648.58



$$\bar{y}_N = 0.5202$$

$$N = 1.0493$$

Finalmente, para  $T_m = 100$  años, se deduce que

$$\begin{aligned} y &= 1854.22 - \frac{2426.39}{1.0493} \left( 0.5202 + \log_e \log_e \frac{100}{100-1} \right) \\ &= 1854.22 - 2312.39 (0.5202 + (-4.600)) \\ &= 1854.22 + 9434.09 = 11288.31 \end{aligned}$$

De esta manera, el gasto máximo obtenido resulta

$$y = Q_{\max} = 11,288.31 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$T_m = 100$$

Para calcular el intervalo de confianza  $y$ , de la fig (8.8.b) se tiene -  
para  $N = 18$  años que  $F(N) = 1.056$

Substituyendo en la ec 8.42 a se deduce

$$y_1 = 2426.39 (1.056) = 2562.27 \text{ m}^3/\text{seg} = Q$$

De esta manera, el gasto máximo de diseño resultaría:

$$Q_{\text{diseño}} = Q_{\max} \pm Q = 11288.31 \pm 2562.27$$

lo cual, considerando la condición más desfavorable resulta de -  
13,850 m<sup>3</sup>/seg.

Aplicando el criterio de Nash, de la ec (8.43) se tiene

$$y = -a + c \log_e \log_e \frac{T_m}{T_m-1} = e + f x$$

$$y = Q_{\max}$$



$$e = -a; f' (Q_{\text{máx}}, T_m)$$

$$f = c; f'' (Q_{\text{máx}}, T_m)$$

$$x = \log_e \log_e \frac{T_m}{T_m - 1}$$

por lo que solo se necesita calcular el valor de los parámetros  $e$  y  $f$  ( $a$  y  $c$ ), tales que minimizen el error entre los puntos de la muestra y la recta de regresión, ec (8.14). De acuerdo a las ecuaciones (8.15) y (8.16)

$$f = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

$$e = \bar{y} - f \bar{x}$$

En la Tabla 8.22 se muestra el ordenamiento de los cálculos. Así, de la ec (8.17),

$$S_{xx} = 18 (24.5558)^2 - (-9.4037)^2 = 442.0044 - 88.4295 \\ = 353.5749$$

$$S_{yy} = 18 (161971169.60) - (33376.0)^2 \\ = 2915471052.8 - 1113957376 = 1801513676.80$$

y de la ec (8.18)  $S_{xy} = 18 (-56891.87) - (-9.4037) (33376.0)$

$$= -1024053.66 + 313857.8912 = -710195.7688$$

Substituyendo se deduce que

$$f = \frac{-710195.77}{353.57} = -2006.20$$



T A B L A 8.22

ORDENAMIENTO DE VALORES PARA EL CALCULO DE LOS PARAMETROS DE LA RECTA DE REGRESION Y COEFICIENTE DE CORRELACION

Orden	Qmax anual Yi-(m <sup>3</sup> /s)	Tm (años)	$\frac{Tm}{Tm-1}$	$Xi = \log_e \log_e \frac{Tm}{Tm-1}$	(Xi) <sup>2</sup>	(Yi) <sup>2</sup>	(Xi) (Yi)
1	8562.00	19.00	1.0556	- 2.9175	8.5120	73307844.00	- 24979.87
2	7477.00	9.50	1.1176	- 2.1962	4.8233	55905529.00	- 16420.95
3	3888.00	6.33	1.1876	- 1.7606	3.0996	15116544.00	- 6845.05
4	2264.00	4.75	1.2667	- 1.4423	2.0802	5125696.00	- 3625.32
5	1624.00	3.80	1.3571	- 1.1862	1.4071	2637376.00	- 1926.38
6	1619.00	3.17	1.4608	- 0.9702	0.9413	2621161.00	- 1570.77
7	1507.00	2.71	1.5848	- 0.7755	0.6015	2271049.00	- 1168.74
8	1210.00	2.38	1.7246	- 0.6069	0.3684	1464100.00	- 734.40
9	1000.00	2.11	1.9009	- 0.4427	0.1959	1000000.00	- 442.66
10	824.00	1.90	2.1111	- 0.2914	0.0849	678976.00	- 240.12
11	697.20	1.73	2.3699	- 0.1475	0.0218	486087.84	- 102.86
12	659.00	1.58	2.7241	0.0021	0.0000	434281.00	1.42
13	607.40	1.46	3.1739	0.1441	0.0208	368934.76	87.51
14	595.00	1.36	3.7778	0.2845	0.0810	354025.00	169.29
15	328.80	1.27	4.7037	0.4372	0.1911	108109.44	143.75
16	213.00	1.19	6.2632	0.6069	0.3683	45369.00	129.26
17	171.60	1.12	9.3333	0.8036	0.6458	29446.56	137.90
18	129.00	1.06	17.6667	1.0549	1.1128	16641.00	136.08
n=18	Y <sub>i</sub> =33376.00	S U M A		-9.4037	24.5558	161971169.60	- 56891.87





y como

$$\bar{x} = \frac{9.4037}{18} = -0.5224; \quad \bar{y} = \frac{33376}{18} = 1854.22$$

se determina

$$e = 1854.22 - (-2006.2) (-0.5224) = 1854.22 - 1048.04 = 806.18$$

Con esta información la ec. de la recta de regresión resultante es

$$y' = e + fx$$

$$y' = 806.18 - 2006.20 x$$

y como

$$e = -a; \quad a = -806.18$$

$$f = c; \quad c = -2006.20$$

la ecuación buscada (8.43) se expresa

$$y' = 806.18 - 2006.20 \log_e \log_e \frac{T_m}{T_m - 1}$$

con lo cual

$$Q_{\text{máx}} = 806.18 - 2006.20 \log_e \log_e \frac{T_m}{T_m - 1}$$

El coeficiente de correlación asociado a los puntos dato y recta de regresión, resulta según la ec (8.19) con un valor de

$$\begin{aligned} r &= \frac{-710195.77}{(353.57) (1801513676.80)^{1/2}} = \frac{-710195.77}{798098.48} \\ &= -0.8899 = -0.9 \end{aligned}$$

Con la ecuación anterior, para  $T_m = 100$  años se obtiene un

$$Q_{\text{máx}} = 10034.70 \text{ m}^3/\text{seg.}$$



y el intervalo de confianza asociado, si se elige un nivel, de significancia de 0.95,  $\alpha = 0.05$ ;  $\frac{\alpha}{2} = 0.025$  y grados de libertad  $\nu = n-2 = 18-2 = 16$ , de los valores tabulados para la distribución "t"

$$\alpha/2 = 0.025$$

$$\nu = 16 \quad t_{\frac{\alpha}{2}} = t_{0.025} = 2.4729$$

y la variancia del error, ec (8.19)

$$Se^2 = \frac{1801513676.8}{18 (18-2)} \left[ 1 - \frac{(-710195.77)^2}{(353.57)(1801513676.8)} \right] = 6255255.82 (0.2082) = 1302097.09$$

$$Se = \sqrt{Se^2} = 1141.095$$

Substituyendo en la ec(8.20)

$$\mathcal{E} = \pm 2.4729 (1141.095) \sqrt{1 + \frac{1}{18} + \frac{18}{353.5749} \frac{-4.6 - (-0.5224)}{18}}$$

Por lo que

$$\mathcal{E} = \pm 2821.81 \sqrt{1 + 0.0556 - 0.2076} = \pm 2821.81 \sqrt{0.8480}$$

$$= \pm 2821.81 (0.9209) = \pm 2598.45$$

y finalmente el gasto máximo de diseño más probable sería

$$Q_{\text{máx}} = 10034.70 + 2598.45 \quad Q_D = 12650 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$T_m = 100 \text{ años}$$

condición más desfavorable.

En la figura 8.9 se muestra la relación existente entre la información - disponible y los ajustes, tanto considerando la distribución de valores extremos como el propuesto por Nash por mínimos cuadrados.



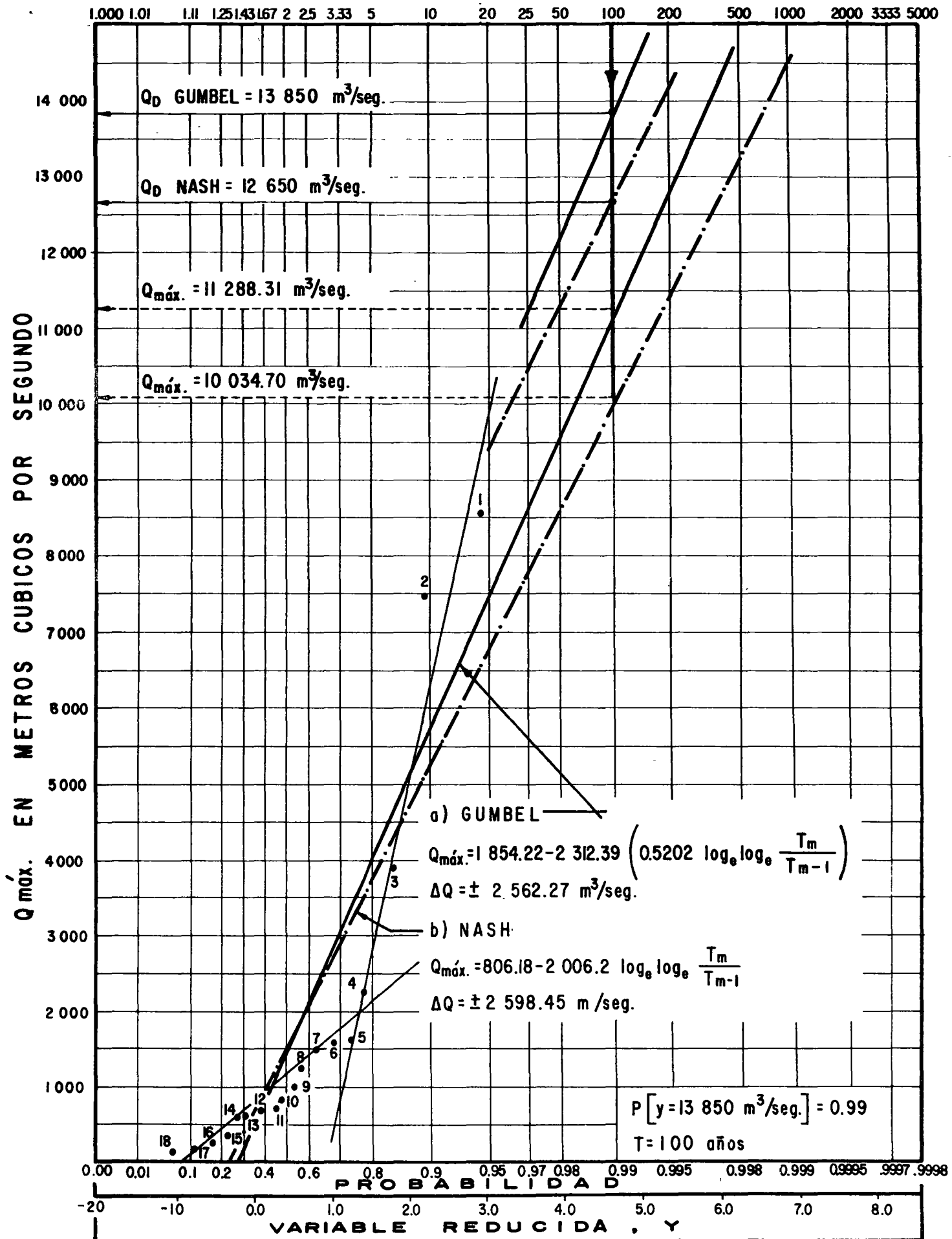


Fig. 8.9 Rectas de ajuste utilizando las distribuciones a) Gumbel , b) Nash



### 8.5.3 Distribución de frecuencias aplicada a dos poblaciones

Muchas veces, cuando se analiza una muestra de datos hidrológicos, - resulta que dicha muestra tiene dos poblaciones con características dis tintas. Por ejemplo, cuando se analizan gastos máximos anuales, en ocasiones se tiene que algunos ocurran durante la época de ciclones y otros no, lo que ocasiona lo antes indicado.

Por lo anterior, conviene antes de proceder a ajustar una cierta distribución de frecuencias a la información, conviene primero graficar los datos con respecto a sus períodos de retorno (fig 8.9). De esta manera, se puede apreciar si los datos son de una sola población o de dos.

En el caso de tener dos poblaciones, González,\* aplicando por separado la distribución propuesta por Gumbel (ec 8.35) a cada una de las poblaciones, obtiene una función de distribución de probabilidades para gastos máximos anuales, del tipo

$$P(y) = e^{-e^{-\frac{y+a_1}{c_1}}} p + (1-p) e^{-e^{-\frac{y+a_2}{c_2}}} \quad (8.45)$$

donde  $p$ ,  $a_1$ ,  $c_1$ ,  $a_2$ ,  $c_2$ , son parámetros por estimar. Para esto, utiliza el método matemático del máximo ascenso, tal que, los parámetros

---

\* Fernando J. González V. "Contribución del análisis de frecuencias de valores extremos de los gastos máximos en un río". Publicación del Instituto de Ingeniería, UNAM Diciembre de 1970. (277).





produzcan una función teórica que haga mínima la suma de los cuadrados de las desviaciones entre los valores de esta función y los valores datos, es decir que minimizan el error.

Otra forma de proceder en el análisis de frecuencia de dos poblaciones, es utilizar el criterio de mínimos cuadrados, previa división de ambas poblaciones, una vez graficados los valores de la muestra con respecto a sus períodos de retorno. Este criterio presenta el problema de los errores inherentes ocasionados al dividir ambas poblaciones, ya que muchas veces se tiene muy poca información para poder apreciar la división de las mismas.

Ejemplo 8.13 Se desea obtener el gasto máximo para el Río Fuerte, con los mismos datos del ejemplo 8.12, aplicando el criterio del ajuste de la distribución de valores extremos de dos poblaciones.

Analizando los datos disponibles fig(8.9), puede notarse a priori la existencia de las dos poblaciones definidas por este criterio; podría asegurarse evidentemente que el gasto máximo aforado de  $8562.0 \text{ m}^3/\text{seg.}$  corresponde a la población cuyos valores provienen de fenómenos ciclónicos, extraordinarios y el gasto de  $1619.0 \text{ m}^3/\text{seg.}$  pertenece a la población cuyos escurrimientos son función de las características atmosféricas meteorológicas reinantes de manera ordinaria o normal en la región;



aun más, siendo esta una zona costera podría afirmarse que la aplicación del método de las dos poblaciones resultaría el más adecuado. La ec (8.45) resulta una función implícita en "y" por lo que esta variable no es posible el despojarse y deberá de procederse para la obtención del gasto de manera indirecta, suponiendo un gasto y obteniendo su período de retorno o probabilidad correspondiente; de la misma forma dada la complejidad del aparato matemático para la correcta obtención optimizada de los parámetros propios se desarrollará solamente en este ejemplo una primera aproximación cualitativa en la determinación de los mismos considerando poblaciones infinitas para ambos casos.

Se definen de esta forma los parámetros (Sec. 8.5.1):

$p = f$  (número de casos en que los gastos máximos graficados en papel de Gumbel se consideran de población no ciclónica)

Población no ciclónica:

$$a_1 = 0.577 c_1 - \bar{x}_1$$

$$c_1 = (\sqrt{6/\pi}) S_1$$



Población ciclónica

$$a_2 = 0.577 c_2 - \bar{x}_2$$

$$c_2 = (\sqrt{6}/\pi) S_2$$

Donde  $\bar{x}_i$ ,  $S_i$ , son la media y desviación estándar de los valores propios a cada población.

Cálculo de "p"

De la fig (8.9) tentativamente podrían separarse las dos rectas de cada población. Los gastos (en orden, tabla 8.22) de la población de tipo ciclónico serían entonces

ciclónico : 1, 2, 3 y 4

no ciclónico : del 5 al 18

$$p = \frac{14}{18} = 0.7778$$

Cálculo de  $a_i$ ,  $c_i$  :

La media y desviación estándar correspondientes a cada población son

(ecs (8.6) y (8.8)):

no ciclónica

ciclónica

1

1

$$\bar{x}_1 = 798.929$$

$$\bar{x}_2 = 5547.750$$

$$S_1 = 524.737$$

$$S_2 = 2963.415$$

y los parámetros

$$c_1 = (\sqrt{6}/\pi) S_1 = 409.136$$

$$a_1 = 0.577 c_1 - \bar{x}_1 = -562.858$$



$$c_2 = (\sqrt{6/\pi}) S_2 = 2310.565$$

$$a_2 = 0.577 c_2 - \bar{x}_2 = -4214.554$$

además el período de retorno asociado a nuestro problema fue de

$$T = 100 \text{ años}$$

$$P(Y) = 0.99$$

sustituyendo los parámetros en la ec (8.45) tanteando para encontrar el período necesario-requerido de manera indirecta se tiene:

1er. tanteo: Con el gasto obtenido por Gumbel en el ejemplo 8.12,

$$y = 11288.3 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

$$\begin{aligned} P(Y) &= e^{-e^{-\left(\frac{11288.3 - 562.858}{409.136}\right)}} \left\{ 0.7778 + 0.2222 e^{-e^{-\left(\frac{11288.3 - 4214.554}{2310.565}\right)}} \right\} \\ &= e^{-e^{-26.215}} \left[ 0.7778 + (0.2222) e^{-e^{-3.0615}} \right] \\ &= e^{-0} \left[ 0.7778 + (0.2222) e^{-0.0468} \right] \\ &= 0.7778 + 0.2120 = 0.9898 \end{aligned}$$

$$\text{como } 0.99 > 0.9898$$

$$T = 100 > 98 \text{ años}$$

2 do. tanteo: Con  $y = 11,400 \text{ m}^3/\text{seg}$  análogamente

$$\text{se obtiene } P(Y) = 0.9903$$

3er. tanteo: Con  $y = 11,300 \text{ m}^3/\text{seg}$

$$\text{se obtiene } P(Y) = 0.99$$

$$\text{para } T = 100 \text{ años}$$





De esta forma, se concluye, que el gasto máximo para el Río Fuerte con un  $T = 100$  años, aplicando el criterio de las dos poblaciones en una primera aproximación sería de:

$$Q_{\text{máx}} = 11,330 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

Conviene aplicar este método para el análisis y comparación de resultados obtenidos, cuando la importancia de la obra que se desea diseñar es considerable donde en caso de presas generalmente se asignen para diseño períodos de retorno de 1 000 a 10 000 años, lo que aunado a la aplicación de la matemática necesaria a la optimización de los parámetros de la distribución nos daría diferencias más notables entre ambos métodos.

En la fig (8.10) se muestra la relación gráfica de la distribución de frecuencia aplicada a dos poblaciones y obtenida para diferentes gastos máximos y su correspondiente probabilidad o período de retorno asociado.

#### 8.6 Extrapolación de las curvas de frecuencias

Cuando la frecuencia o período de retorno de un evento hidrológico a determinar es considerablemente mayor que la longitud de registro disponible, se requiere extrapolar la distribución obtenida de los datos. Debido a la gran incertidumbre que involucra tales procedimientos, no se recomienda extrapolar para el diseño de grandes estructuras cuya falla



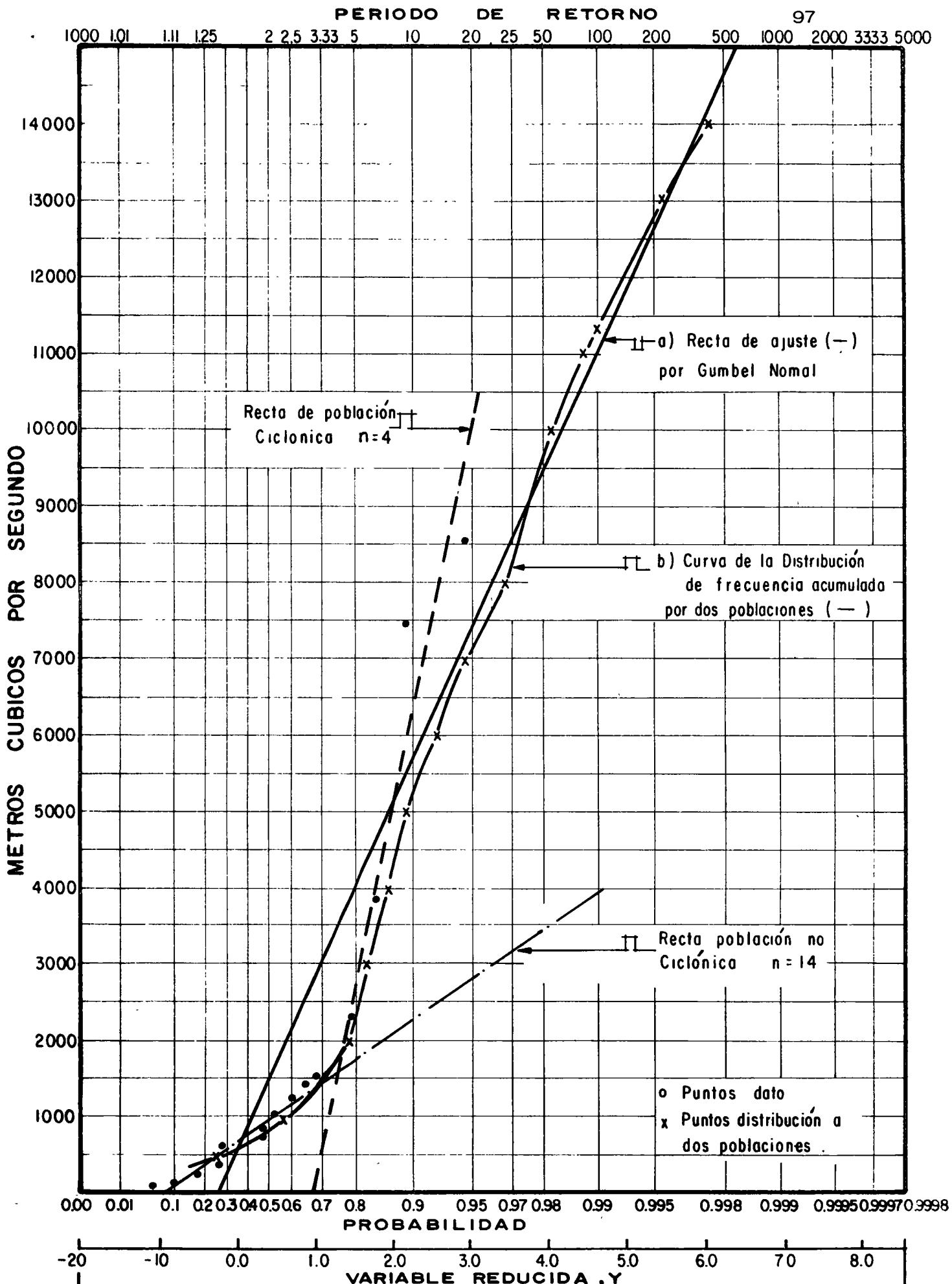


Fig.8.10 Comparación entre los valores reales y diferentes distribuciones ajustadas



implique pérdidas humanas y grandes catástrofes.

Sin embargo, si el análisis de frecuencia de datos hidrológicos se utiliza para determinar la justificación económica de algún proyecto, la extrapolación dentro de un cierto límite es aceptable hasta 3 ó 4 veces el período de registro\*.

Esta limitación en cuanto a la extrapolación, que en la generalidad de los casos es muy difícil de satisfacer, depende además de la utilización que se le vaya a dar al evento así encontrado, de la confianza que se tenga a la distribución de frecuencias determinados y a las características de la muestra que se esté analizando.

Algunas veces, con el objeto de ampliar la muestra de datos por analizar y hacer una mejor inferencia, se puede utilizar el criterio del método de la estación-año\*\* o bien correlacionarla con otras muestras mayores existentes dentro de la zona hidrológica que se esté estudiando.

#### 8.7 Análisis de gastos máximos anuales

Dentro del estudio de datos hidrológicos, uno de los más usuales es el análisis de gastos máximos anuales, pues está relacionado directamente con el diseño de vertedores de presas, capacidad de drenajes en caminos, obras de protección, encauzamiento y de defensa en ríos, etc.

---

\* Ven Te Chow "Frequency analysis of hydrologic data with special application to Rainfall Intensities". Bull. Universidad de Illinois, Vol 50, No. 81, Julio, 1958.

\*\* Katharine Clarke-Hafstad, "Reliability of Station-Year Rainfall-Frequency Determinations", Trans ASCE, pags. 633, 1942.



El análisis de gastos es costumbre realizarlo utilizando las máximas anuales, aunque en ocasiones se utilizan los excedentes anuales (véase subinciso 8.4.1).

El análisis de gastos máximos anuales consiste en la obtención de su distribución de frecuencias, para posteriormente obtener a partir de ella el gasto de diseño para un cierto período de retorno.

Primeramente se obtienen los períodos de retorno ligado al registro disponible de gastos máximos anuales. Para esto, los gastos máximos anuales se ordenan en forma decreciente asignándoles su número de orden y con la ec (8.32) se determinan sus períodos de retorno correspondientes. De esta manera, se tiene para cada gasto máximo anual registrados o excedente anual, su períodos de retorno y por ende, su probabilidad de recurrencia (Ejemplo 8.11).

Conocida esta muestra de parejas de valores, se procede a determinar su distribución de probabilidades, seleccionando diversas distribuciones teóricas y probando cual es la más representativa de la muestra en estudio (inciso 8.1). Afortunadamente, se ha visto que en general los gastos máximos anuales, siguen alguna de las distribuciones indicadas en el inciso 8.5, lo que hace el cálculo más expedito. (ejemplos 8.12 y 8.13)

Determinada la distribución de frecuencias de los gastos máximos anuales que se estén analizando, se procede a valuar el período de retorno -





asignado al diseño (subinciso 8.4.4).

Obtenido el período de retorno de diseño, a partir de la distribución de gastos conocida, se obtiene el gasto máximo de diseño. Se debe tener en cuenta la limitación que implica una extrapolación cuando el período de retorno de diseño es grande comparado con los años de registro disponibles (inciso 8.6).

#### 8.8 Análisis de lluvias

El estudio de frecuencias de lluvias es muy utilizado principalmente en hidrología en el estudio de predicción de tormentas, transporte de las mismas y su relación con escurrimientos, para el diseño de drenajes en caminos como en ciudades y aeropuertos.

El análisis de frecuencias de lluvia se aplica en forma directa a registros de pluviómetros si se estudian alturas de lluvias diarias y principalmente a pluviógrafos en donde se tiene un registro completo de todas las variables de las características fundamentales de la lluvia. Este análisis se puede hacer extensivo a áreas, utilizando algunas de las técnicas vistas en el inciso 3.4.

El proceso que se sigue en el análisis de lluvias puntuales es similar al descrito para el análisis de gastos, solo que en general se trabaja con series de datos excedentes anuales y con dos variables en lugar de una.



Estas dos variables comprenden las características que definen a una precipitación pluvial, que son su altura de lluvia  $h_p$  y su duración  $d$ . Por lo anterior, para definir una cierta distribución de probabilidades de alguna de las dos variables, se deberá considerar constantes una de ellas para definir a la otra. A partir de un análisis de este tipo, es factible correlacionar posteriormente las dos variables, involucrando sus frecuencias de incidencia.

#### 8.8.1 Distribuciones de alturas de lluvia por una duración constante

Cuando se requiere conocer la distribución de probabilidades de altura de lluvia máximas con cierta duración constante, se procede en forma similar al análisis indicado en el inciso 8.7, solo que sí se trabaja con excedentes anuales, para valuar el período de retorno se utiliza la ec. 8.33.

#### 8.8.2 Curvas de alturas de lluvia-duración-período de retorno

La obtención de las curvas de altura ó intensidad de lluvia-duración-período de retorno de un registro de lluvia permite tener un conocimiento de la variación de las características de las lluvias en relación con sus frecuencias de incidencia.

Antes de proceder a utilizar una técnica de análisis, se requiere procesar y ordenar los datos disponibles. Si se observa un registro de plu-



viógrafo (fig 3.8), como este es continuo, existen múltiples combinaciones para asociar la altura de lluvia con una cierta duración que son valores discretos.

Una manera de proceder es considerar solo las características finales de las tormentas, relacionando su altura de lluvia total con su duración total. Esto implica, perder información, pues no se valúa la variación existente entre estas variables durante el proceso de la lluvia. Conforme aumenta el número de años de registro, la pérdida de información disminuye. Con este criterio, para utilizar la información obtenida se requiere agrupar las alturas en base a duraciones constantes. Para ello, se seleccionan intervalos de duración de lluvia constante, considerando representativos de cada uno de ellos, su duración media. De esta manera, se tendrá para cada duración característica de lluvia un grupo de alturas de lluvia.

Otra forma de análisis de los registros de lluvia correspondiente, es valuando la máxima variación de la altura de lluvia respecto a un intervalo de duración constante. Para esto, se requiere conocer la curva masa de cada tormenta que se esté estudiando. Conocida la curva masa, en un papel transparente se hacen divisiones verticales de las duraciones que estén analizando, generalmente múltiplos de un cierto intervalo de -



tiempo. Así, se procede a superponer el papel transparente en la curva masa de la tormenta que se esté analizando, y desplazando el origen de las abscisas, se determina el máximo incremento de altura de lluvia teniendo en un cierto intervalo de tiempo, fig 8.11.

De esta manera, se obtienen las condiciones más críticas de alturas de lluvia-duración para cada tormenta. Observese que en este caso, terminando el proceso de análisis, se disponen de grupos de altura de lluvia para duraciones constantes.

Conocidas las características de las lluvias más desfavorables, se pueden utilizar varios criterios para obtener las curvas de altura o intensidad de lluvia-duración-período de retorno. A continuación se indican dos criterios a seguir.

#### 8.8.2.1 Criterio propuesto por Chow.

Teniendo disponible la información de las características de las tormentas, agrupadas las alturas de lluvia para diferentes duraciones, Chow\* considera que para cada duración constante, las alturas de lluvia correspondiente se les puede dar un tratamiento de series excedentes y aplicar algunos de los criterios vistos en el inciso 8.5. En este caso, el proceso es similar al empleado en el subinciso 8.7.1

De esta manera se tendrá, para cada duración constantes, una curva del

---

\*Ven Te Chow "Frequency analysis of hydrologic data with special application to Rainfall Intensities" Bull. Universidad de Illinois, Vol 50, No. 81, julio 1953.





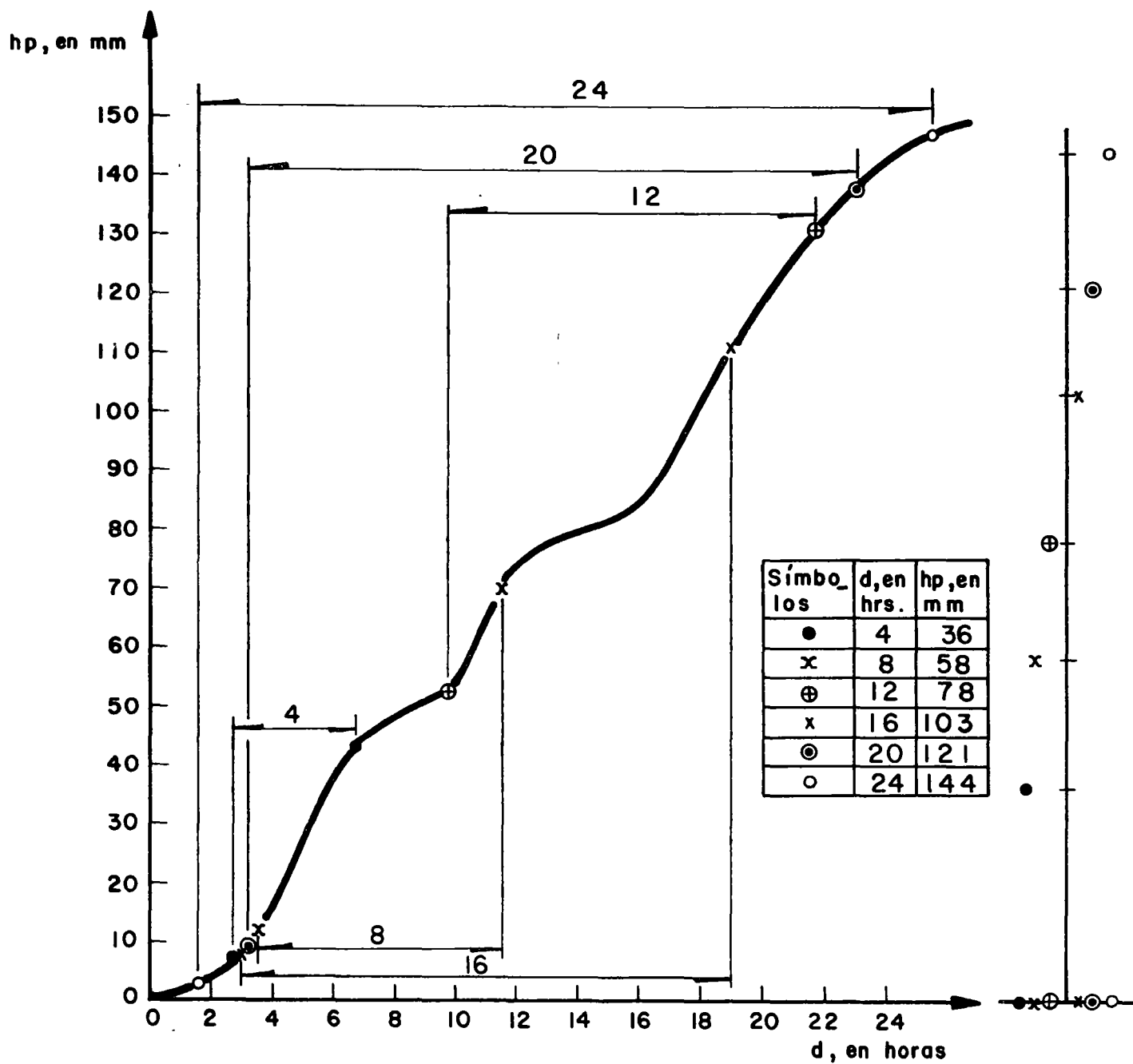


Fig.8.II Análisis de una curva masa para obtener las máximas variaciones de altura de lluvia en relación con diversos intervalos de duración de la misma



tipo de la ec (8.44) de forma similar a

$$h_p = a + b \log T_e \quad (8.46)$$

donde  $a$  y  $b$  son parámetros de ajuste,  $h_p$  la altura de lluvia, en mm y  $T_e$  el período de retorno, en años. Como esta expresión es para una duración constante, dividiéndola entre ella, se obtiene una relación entre intensidades de lluvia y períodos de retorno, que es otra forma de expresar la ecuación anterior.

#### 8.8.2.2 Ajuste por correlación lineal múltiple

Otra forma de valorar las curvas de altura de lluvia-duración-períodos de retorno, es obtener la ecuación de mejor ajuste entre los diversos grupos de valores de  $d$ ,  $h_p$  y  $t$ .

Para ello, antes de proceder a plantear el tipo de ecuación más conveniente, es necesario tener una idea de cuales son los tipos de ecuaciones que en general siguen estos valores.

Dentro de las ecuaciones más usuales, se tiene la del tipo de:

$$i = \frac{K T^h}{d^n} \quad (8.47)$$

donde  $K$ ,  $h$  y  $n$  son parámetros,  $d$  la duración de la lluvia,  $i$  su intensidad y  $T$  su período de retorno.

Tomando logaritmos a esta ecuación, se obtiene que

$$\log i = \log K + h \log T - n \log d \quad (8.48)$$



y transformando, esta ecuación puede escribirse como

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

donde  $\log i = y$ ,  $\log T = x_1$  y  $\log k = x_2$

Esta ecuación es similar a la (8.16), cuya obtención de los parámetros  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  se indican en el inciso 8.3.

De esta manera, se puede obtener para la agrupación de las características de las lluvias que se estén estudiando una ecuación del tipo de la ec (8.47).

Ejemplo 8.14 En la tabla 8.23 se proporcionan los datos de las intensidades máximas de lluvia registradas en la Estación Sta. Catarina, en el estado de Nuevo León. Se desea obtener en base a estos registros las curvas de altura de precipitación–duración–período de retorno  $(hp-d-T)$  para dicha estación aplicando:

- a) Criterio de Chow
- b) Ajuste por Correlación Lineal Múltiple

De la Tabla 8.23 primeramente como los datos se encuentran en intensidad de lluvia  $i = hp / t$ , habrá que obtener para cada valor de la intensidad su correspondiente altura de precipitación "hp" en relación con su duración; hecho esto para cada duración "d", se ordenan los valores en forma decreciente de mayor a menor, y se obtiene para cada duración –



T A B L A 8.23

INTENSIDADES MAXIMAS DE LLUVIA EN LAS CUENCAS DEL RIO SAN JUAN  
DEL BAJO BRAVO Y DE LA REGION GOLFO NORTE

PRECIPITACIONES EN MILIMETROS POR HORA

FECHAS			MINUTOS									
			5	10	15	20	30	45	60	80	100	120
SANTA CATARINA NUEVO LEON												
1938	Feb	20	120.0									
	Jul	29	120.0	114.0	97.2	87.2	80.0	63.3	52.5	41.4	33.5	28.0
1939	Abr	12	132.0	109.8	84.0	80.1	58.0	40.5	31.5	24.1	19.3	16.1
1940	Jun	24		64.2	49.2	43.2						
	Ago	9	96.0				40.0	37.6	29.6	21.9	17.5	14.6
1941	May	5	79.2	52.2	39.6	31.5	21.0	14.0	10.5	7.9		
	Jun	9									7.7	6.9
1942	Jul	4		96.0	80.0	77.7	72.0	74.0	66.0	50.1	40.3	33.9
	Jul	5	148.8		80.0							
1943	Sep	6	126.0	76.2	59.2	48.3	34.4	23.1	17.4	14.6	14.4	12.6
1944	Oct	7	92.4	63.6	56.0	48.6	40.0	34.7	30.0	24.2	23.4	23.0
1945	Ago	30	86.4	61.8	51.2	42.6	36.0	26.7	24.7	24.0	23.4	22.3
1946	Ago	30	102.0	58.2	50.4	45.0	31.4	21.1	15.8	11.9	9.5	7.5
1947	Jul	30		60.0	56.0	51.3	42.6	31.3	24.0			
	Ago	4								21.5	20.4	17.9
	Ago	25	120.0	60.0								
1948	Jul	7	76.8	57.6	44.0	35.1	25.0	24.7	20.0			
	Sep	9							20.0	16.7	15.8	13.1
1949	Sep	19	98.4	57.0	46.8	54.0	40.0	30.7	30.0	25.5	22.5	19.3
1950	Mar	3							6.8	6.5	5.6	4.7
	Jul	13			23.0	18.3	12.6	8.4				
	Ago	18	57.6	28.8								
1951	Jun	24	128.4	93.0	80.0	85.0	62.2	47.3	36.4	27.3	21.8	18.2
1952	Abr	23	66.0									
	Jun	7		46.8	34.0	27.0	18.4	12.7	10.0	7.5	6.7	5.9





T A B L A 8.23 (Continuación)

INTENSIDADES MAXIMAS DE LLUVIA EN LAS CUENCAS DEL RIO SAN JUAN  
DEL BAJO BRAVO Y DE LA REGION GOLFO NORTE

PRECIPITACIONES EN MILIMETROS POR HORA

FECHAS			MINUTOS										
			5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	
1953	Jul	14	120.0					40.0	40.0				
	Oct	3	120.0	67.8	56.0	48.6	40.0	40.0	35.0	28.5	22.8	19.0	
1954	Oct	5							14.0	12.0	9.6	8.6	7.1
	Oct	8	96.0	54.0	37.2	27.9	18.6						
1955	Jul	8	96.0	48.0									
	Nov	2		48.0	48.0	43.5	37.0	27.3	27.5	25.5	24.0	24.0	
1956	May	15	150.0	93.0	76.0	60.0	41.0	33.0	25.5	19.1	15.3	12.8	
1957	Sep	21	90.0	66.0	48.0	42.9	38.0	25.3	21.6	19.3	16.0	14.5	
						SIN DATOS							
1959	Jun	14	68.4		36.0	27.6	18.6	13.3	11.4	11.4	9.1	7.8	
	Ago	13		40.8									
1960	Ago	11	117.6	70.2	60.0	54.0	40.0	27.4	20.6	15.8	12.9	11.3	
1961	Jul	10	85.2	42.6	28.4	21.3	14.2	9.4	7.1	5.3	4.3	3.6	
1962	Sep	10	162.0	111.0	80.0	62.1	60.0	51.3	43.5	45.0	36.0	40.0	
1963	May	17	96.0	60.0	40.0	34.5					16.3	15.0	
	Jun	16					27.0	27.0	22.3	17.3	16.3		
1964	May	31	120.0	105.0	71.2	53.4	35.6	24.7	17.8	13.4	10.7	8.9	



su período de retorno asociado "Te" , que en términos de series de excentes anuales resulta  $T_e = n/m$  (ec. 8.33)  $n = 26$

ejemplos: "hp" de la tabla - dato

1.-  $d = 5 \text{ min}$  1938:  $i = 120 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$  tabla - cálculo  
 $d = 5 \text{ min}$   $hp = 120(5)/60 = 10.0 \text{ mm}$ ; con orden 7o.

2.-  $d = 80 \text{ min}$  1942:  $i = 50.1 \text{ mm/hr}$   $d = 80 \text{ min}$   
 $hp = 50.1 (80)/60 = 66.8 \text{ mm}$ ; con orden 1o. "Te"

3.- orden = 1 = m;  $n = 26$

$$T_e = \frac{n}{m} = \frac{26}{1} = 26$$

4.- orden = 17 = m

$$T_e = \frac{n}{m} = \frac{26}{17} = 1.5294 = 1.53$$

En la Tabla 8.24 se muestra la obtención y ordenación de los datos para su aplicación.

a) Criterio de Chow

1. Relación para una duración de lluvia  $d = \text{ctte} = 5 \text{ min}$

$$hp = a + b \log T_e$$

de acuerdo ec (8.13)

$$y' = a + b x_1$$

donde  $y' = hp$

$$x_1 = \log T_e$$

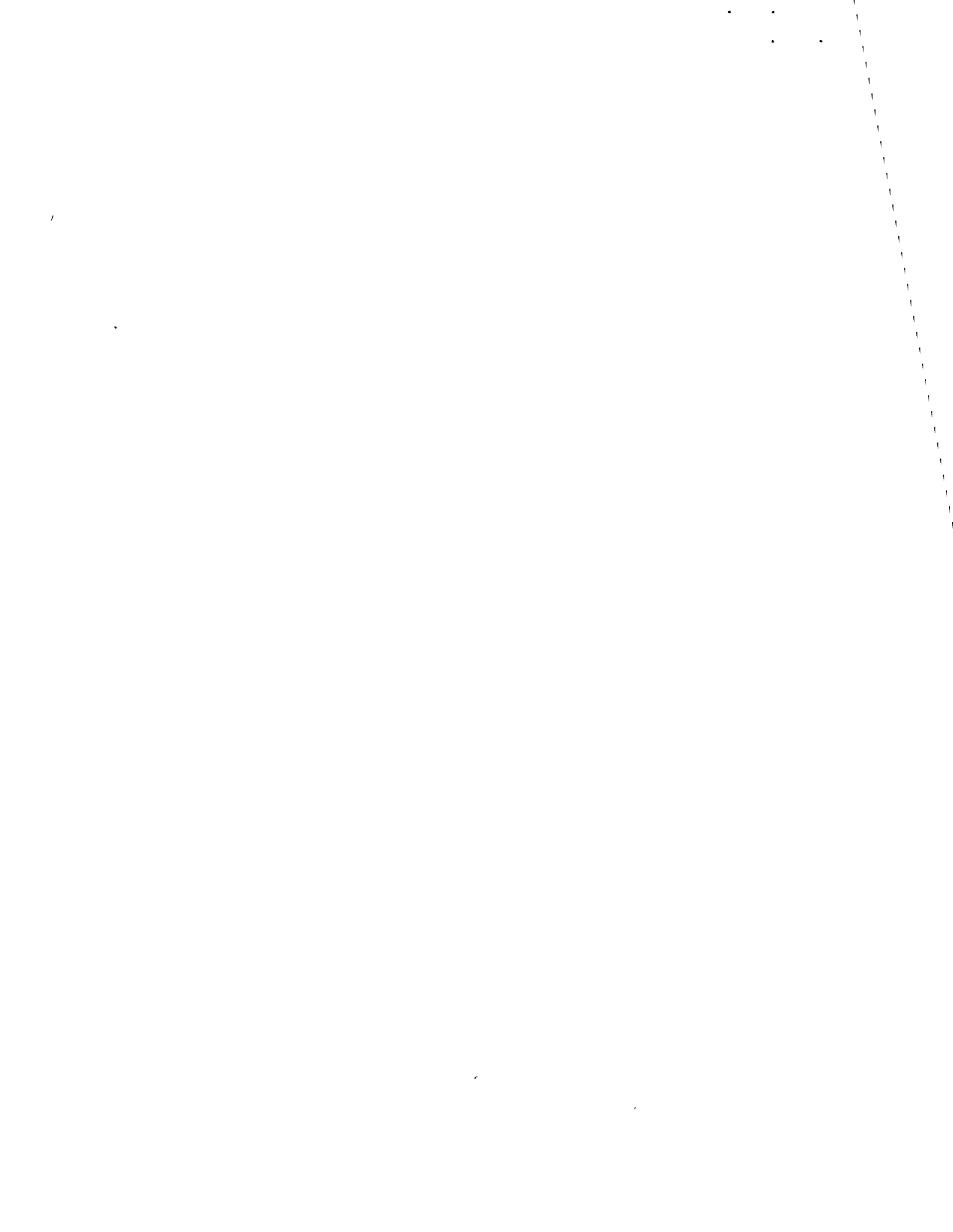


TABLA 8.24 OBTENCIÓN Y ORDENACIÓN DE VALORES

Orden ( m )	$d_{\min}$ Te años	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120
		1	26.00	13.5	19.0	24.3	29.0	40.0	55.5	66.0	66.8
2	13.00	12.5	18.5	21.0	28.5	36.0	47.5	52.5	60.0	60.0	67.8
3	8.67	12.4	18.3	20.0	26.7	31.1	38.5	43.5	55.2	55.8	56.0
4	6.50	11.0	17.5	20.0	25.9	30.0	35.5	36.4	38.0	40.0	48.0
5	5.20	10.7	16.0	20.0	20.7	29.0	30.4	35.0	36.4	39.0	46.0
6	4.33	10.5	15.5	19.0	20.0	21.3	30.0	31.5	34.0	39.0	44.6
7	3.71	10.0	15.5	17.8	18.0	20.5	28.2	30.0	34.0	38.0	38.6
8	3.25	10.0	12.7	15.0	18.0	20.0	26.0	30.0	32.3	37.5	38.0
9	2.89	10.0	11.7	14.8	17.8	20.0	24.8	29.2	32.1	36.3	36.4
10	2.60	10.0	11.3	14.0	17.1	20.0	23.5	27.5	32.0	34.0	35.8
11	2.36	9.8	11.0	14.0	16.2	20.0	23.0	25.5	29.2	32.2	32.2
12	2.17	8.5	10.7	14.0	16.2	20.0	20.6	24.7	28.7	29.2	30.0
13	2.00	8.2	10.6	12.8	16.1	19.0	20.5	24.0	25.7	27.2	29.2
14	1.86	8.0	10.3	12.6	15.0	18.5	20.3	22.3	25.5	26.7	29.0
15	1.73	8.0	10.0	12.3	14.5	18.0	20.0	21.6	23.1	26.3	26.2
16	1.63	8.0	10.0	12.0	14.4	17.8	19.0	20.6	22.3	25.5	25.6
17	1.53	8.0	9.7	12.0	14.3	17.2	18.5	20.0	21.1	24.0	25.2
18	1.44	7.7	9.6	11.7	14.2	15.7	18.5	17.8	19.5	21.5	22.6
19	1.37	7.5	9.5	11.0	11.7	13.5	17.3	17.4	17.9	17.8	17.8
20	1.30	7.2	9.0	10.0	11.5	12.5	15.8	15.8	15.9	15.8	15.8
21	1.24	7.1	8.7	9.9	10.5	10.5	10.5	12.0	15.2	15.2	15.6
22	1.18	6.6	8.0	9.3	9.3	9.3	10.5	11.4	10.8	13.8	14.2
23	1.13	6.4	7.8	9.0	9.2	9.3	10.0	10.5	10.5	12.8	13.8
24	1.08	5.7	7.1	8.5	9.0	9.2	9.5	10.0	10.0	11.2	11.8
25	1.04	5.5	6.8	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	8.7	9.3	9.4
26	1.00	4.8	4.8	5.9	6.1	6.3	6.3	6.8	7.1	7.2	7.2



y se trata de una correlación lineal simple; aplicando el criterio expuesto en la sección de la Tabla 8.25 se tiene que:

$$n \sum_{i=1}^n x_1^2 = 26 (7.2966) = 189.7116$$

$$\left( \sum_{i=1}^n x_1 \right)^2 = (10.1821)^2 = 103.6752$$

$$n \sum_{i=1}^n x_1 y' = 16 (108.5597) = 2822.5522$$

$$n \sum_{i=1}^n (y')^2 = 26 (2117.62) = 55058.12$$

$$\left( \sum_{i=1}^n y' \right)^2 = (227.6)^2 = 51801.76$$

Con lo cual substituyendo en las ecs (8.17) y (8.18) se deduce

$$S_{xx} = 189.7116 - 103.6752 = 86.0364$$

$$S_{xy} = 2800.5522 - 2317.4460 = 505.1062$$

$$S_{yy} = 55058.12 - 51801.76 = 3256.36$$

siendo de la ec (8.15)

$$b = \frac{505.1062}{86.0364} = 5.8708 = 5.87$$

$$\bar{y}' = \frac{227.60}{26} = 8.754$$





TABLA 8.25  $h_p = f(T_e)$  para  $d = 5$  min.

Orden ( m )	$Y'$	$T_e$	$X_1 = \log T_e$	$(X_1)^2$	$(Y')^2$	$X_1 Y'$
1	13.5	26.00	1.4150	2.0022	182.25	19.1025
2	12.5	13.00	1.1139	1.2407	156.25	13.9237
3	12.4	8.67	0.9380	0.8789	153.76	11.6312
4	11.0	6.60	0.8129	0.6608	121.00	8.9419
5	10.7	5.20	0.7160	0.5126	114.49	7.6612
6	10.5	4.33	0.6365	0.4051	110.25	6.6830
7	10.0	3.71	0.5694	0.3242	100.00	5.6940
8	10.0	3.25	0.5119	0.2620	100.00	5.1190
9	10.0	2.89	0.4609	0.2124	100.00	4.6090
10	10.0	2.60	0.4150	0.1722	100.00	4.1500
11	9.8	2.36	0.3729	0.1390	96.04	3.6544
12	8.5	2.17	0.3365	0.1132	72.25	2.8602
13	8.2	2.00	0.3010	0.0906	67.24	2.4682
14	8.0	1.86	0.2695	0.0726	64.00	2.1560
15	8.0	1.73	0.2380	0.0566	64.00	1.9040
16	8.0	1.63	0.2122	0.0450	64.00	1.6976
17	8.0	1.53	0.1847	0.0341	64.00	1.4776
18	7.7	1.44	0.1584	0.0250	59.29	1.2196
19	7.5	1.37	0.1367	0.0186	56.25	1.0252
20	7.2	1.30	0.1139	0.0129	51.84	0.8200
21	7.1	1.24	0.0934	0.0087	50.41	0.6631
22	6.6	1.18	0.0719	0.0051	43.56	0.4745
23	6.4	1.13	0.0531	0.0028	40.96	0.3398
24	5.7	1.08	0.0334	0.0011	32.49	0.1903
25	5.5	1.04	0.0170	0.0002	30.25	0.0935
26	4.8	1.00	0.000	0.0000	23.04	0.0000
SUMA	227.60		10.1821	7.2966	2117.621	108.5597



$$\bar{x} = \frac{10.1821}{26} = 0.392$$

y de la ec (8.16)

$$a = 8.754 - 5.8708 (0.392) = 6.455$$

la ecuación buscada para  $d = 5$  minutos = cte es:

$$y' = a + b x_1$$

$$x_1 = \log Te ; y' = hp$$

$$hp = 6.455 + 5.87 \log Te \quad (1)$$

para  $d = 5$  min

y su coeficiente de correlación

$$r_{xy} = \frac{505.1062}{(86.0364)(3256.36)^{1/2}} = 0.9543$$

analogamente para las distintas duraciones se tiene:

$d = 10$  min

$$\begin{aligned} hp_{d=10} &= 7.473 + 10.343 \log Te \\ r &= 0.9578 \end{aligned} \quad (2)$$

$d = 15$  min

$$\begin{aligned} hp_{d=15} &= 8.885 + 12.470 \log Te \\ r &= 0.9636 \end{aligned} \quad (3)$$

$d = 20$  min

$$\begin{aligned} hp_{d=20} &= 9.517 + 16.650 \log Te \\ r &= 0.9647 \end{aligned} \quad (4)$$

$d = 30$  min

$$\begin{aligned} hp_{d=30} &= 9.942 + 22.914 \log Te \\ r &= 0.9672 \end{aligned} \quad (5)$$

$d = 45$  min

$$\begin{aligned} hp_{d=45} &= 9.935 + 32.312 \log Te \\ r &= 0.9859 \end{aligned} \quad (6)$$



$$d = 60 \text{ min} \quad \begin{array}{l} hp_{d=60} = 10.217 + 37.660 \log Te \\ r = 0.9865 \end{array} \quad (7)$$

$$d = 80 \text{ min} \quad \begin{array}{l} hp_{d=80} = 11.365 + 41.101 \log Te \\ r = 0.9796 \end{array} \quad (8)$$

$$d = 100 \text{ min} \quad \begin{array}{l} hp_{d=100} = 13.103 + 41.429 \log Te \\ r = 0.9755 \end{array} \quad (9)$$

$$d = 120 \text{ min} \quad \begin{array}{l} hp_{d=120} = 12.327 + 48.744 \log Te \\ r = 0.9903 \end{array} \quad (10)$$

analizando apriori los resultados, se observa que el ajuste realizado es bueno dada la magnitud del índice de correlación o coeficiente. En función de las relaciones obtenidas  $hp = f(Te)$  para una duración de lluvia constante, podrían obtenerse en la tabla 8.23 los valores correspondiente al año de 1958, interpolando el valor del período de retorno para los años adyacentes 1957 y 1959 para su correspondiente duración; así tendríamos:

para  $d = 5 \text{ min}$

$$i_{57} = 90 \text{ mm/hr} \quad hp_{57} = 7.5 \text{ mm} \quad Te_{57} = 1.37 \text{ años}$$

$$i_{59} = 68.4 \text{ mm/hr} \quad hp_{59} = 5.7 \text{ mm} \quad Te_{59} = 1.08 \text{ años}$$

El  $Te$  probable para el año de 1958

$$\text{será } Te_{58} = (1.37 + 1.08) / 2 = 1.23 \text{ años}$$

Substituyendo en la ecuación 1:



$$\begin{aligned} hp_{58} &= 6.455 + 5.87 \log Te = 6.455 + 5.87 \log 1.23 = \\ &= 6.455 + 5.87 (0.0899) = 6.455 + 0.5277 = 6.9827 \end{aligned}$$

$$hp_{58} = 7.0 \text{ mm}$$

para  $d = 5 \text{ min}$

de forma análoga podemos obtener los restantes valores de  $hp$  para cada duración:

duración	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	minutos
Te	1.23	1.70	1.33	1.33	1.57	1.38	1.46	1.62	1.55	1.55	años
ecuación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
hp	7.0	9.9	10.4	11.6	14.4	14.5	16.4	20.0	21.0	21.6	mm

Si las ecuaciones obtenidas desean expresarse como una relación ya no de la altura de precipitación  $hp$ , sino de la intensidad de lluvia " $i$ " como función del período de retorno asociado " $Te$ ", bastará dividir la altura de precipitación entre la duración para la cual fue deducida; por ejemplo la ec 1.-)  $hp_{d=5} = 6.455 + 5.87 \log Te$  (mm)

$$\text{dividiendo } hp/5\text{min} \doteq hp/0.083 = i \text{ (mm/hora)}$$

$$i = 77.46 + 70.44 \log Te \text{ en mm/5min.}$$

b) Ajuste por Correlación Lineal Múltiple

Se trata entonces de obtener una ecuación del tipo(8.47)





$i = \frac{KT^h}{d^m}$  es intensidad o bien en relación con la altura de precipitación "hp":

$$hp = \frac{KT_e^h}{d^m} \text{ con el método de correlación lineal}$$

múltiple inciso (8.3) que ajusta una relación del tipo

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (3 \text{ variables})$$

Tomando logaritmos se tiene una ecuación de la forma (8.48).

$$\log hp = \log K + h \log T_e + n \log d$$

$$\text{siendo } y = \log hp \quad a_0 = \log K$$

$$x_1 = \log T_e \quad a_1 = h$$

$$x_2 = \log d \quad a_2 = n$$

Para la estimación de los parámetros  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  se emplea el análisis de correlación lineal de 3 variables, el que arroja de su planteamiento matricial, el sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} y &= a_0 n + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 \\ yx_1 &= a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 x_2 \\ yx_2 &= a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + a_2 \sum x_2^2 \dots \quad (I) \end{aligned}$$

Para su aplicación se deberá procesar la información disponible, en este caso la mostrada en la Tabla 8.24. A fin de simplificar y por mayor claridad, el sistema anterior se resolvió solo con 10 grupos de valores, la cual se muestra en la Tabla 8.25.



TABLA 8.26 ORDENACION Y CALCULO

Orden	hp (mm)	Te (años)	d (min)	y log hp	X <sub>1</sub> log Te	X <sub>2</sub> log d	(X <sub>1</sub> ) <sup>2</sup>	(X <sub>2</sub> ) <sup>2</sup>	(X <sub>1</sub> )(X <sub>2</sub> )	Y X <sub>1</sub>	Y X <sub>2</sub>
1	13.5	26.00	5	1.1303	1.4150	0.6990	2.0022	0.4886	0.9890	1.599	0.790
2	18.5	13.00	10	1.2672	1.1139	1.0000	1.2407	1.0000	1.1139	1.411	1.267
3	20.0	8.67	15	1.3010	0.9380	1.1761	0.8789	1.3832	1.1031	1.220	1.530
4	25.9	6.50	20	1.4133	0.8129	1.3010	0.6608	1.6926	1.0575	1.148	1.838
5	29.0	5.20	30	1.4624	0.7160	1.4771	0.5126	2.1818	1.0576	1.047	2.160
6	30.0	4.33	45	1.4771	0.6365	1.6532	0.4051	2.7330	1.0522	0.940	2.441
7	30.0	3.71	60	1.4771	0.5694	1.7782	0.3242	3.1619	1.0125	0.841	2.626
8	32.3	3.25	80	1.5092	0.5119	1.9031	0.2620	3.6217	0.9741	0.772	2.872
9	36.3	2.89	100	1.5599	0.4609	2.0000	0.2124	4.0000	0.9218	0.718	3.119
10	35.8	2.60	120	1.5539	0.4150	2.0792	0.1722	4.3230	0.8628	0.644	3.230
SUMA				14.1514	7.5895	15.0669	6.6711	24.5858	10.1445	10.340	21.873
				y	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	y X <sub>1</sub>	y X <sub>2</sub>



sustituyendo los valores en el sistema (I)

$$14.1514 = 10 a_0 + 7.5895 a_1 + 15.0669 a_2$$

$$10.3400 = 7.5895 a_0 + 6.6711 a_1 + 10.1445 a_2$$

$$21.8730 = 15.0669 a_0 + 10.1445 a_1 + 24.5858 a_2$$

resolviendo simultáneamente este sistema de ecuaciones obtenidas

$$a_0 = 2.4645 = \log k \quad K = \text{antilog } a_0$$

$$a_1 = -0.8301 \quad K = 291.4$$

$$a_2 = -0.2769$$

la ec queda:

$$y_0 = 291.4 - 0.8301x_1 - 0.276 x_2$$

$$\log hp = \log K + h \log Te + n \log d$$

$$\log K = 2.4645$$

$$h = a_1 = -0.8301$$

$$n = a_2 = -0.2769$$

$$\text{subs: } \log hp = 2.4645 - 0.8301 \log Te - 0.2769 \log d$$

tomando anti logarítmicos:

$$hp = \frac{291.40}{(Te)^{0.83} (d)^{0.28}} \quad A$$



Tomando otra serie de datos de la Tabla 8.12 a se puede construir la Tabla 8.27.

$$14.30 = 10 a_0 + 7.59 a_1 + 15.07 a_2$$

$$11.71 = 7.59 a_0 + 6.67 a_1 + 12.62 a_2$$

$$22.80 = 15.07 a_0 + 12.62 a_1 + 24.59 a_2$$

se obtiene  $a_0 = 0.513 = \log k$  ;  $k = \text{antilog } a_0 = 3.258$

$$a_1 = 0.427 = h$$

$$a_2 = 0.398 = n$$

$$y_0 = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

$$\log hp = \log k + h \log Te - n \log d$$

$$\log hp = 0.513 + 0.427 \log Te + 0.398 \log d$$

tomando antilogs:

$$hp = 3.258 (Te)^{0.43} (d)^{0.40} \dots B$$

que es la relación pedida obteniendo algunos valores de "hp" con las relaciones encontradas A y B para comparación con los valores reales

hp real (mm)	Te años	d min	hp calc.	
			A	B
44.6	4.33	120	22.94	40.95
60.0	13.00	80	10.30	55.72
24.7	2.17	60	49.30	23.14
30.0	4.33	45	30.09	27.71
10.0	1.30	20	100.00	11.99
19.0	26.00	10	10.30	32.75





TABLA 8.27 ORDENAMIENTO DEL CALCULO

Orden (h)	hp (mm)	Te (años)	d (min)	y log hp	X <sub>1</sub> log Te	X <sub>2</sub> log d	(X <sub>1</sub> ) <sup>2</sup>	(X <sub>2</sub> ) <sup>2</sup>	(X <sub>1</sub> )(X <sub>2</sub> )	Y X <sub>1</sub>	Y X <sub>2</sub>
1	80.0	26.00	120	1.9031	1.4150	2.0792	2.0022	4.3230	2.9420	2.693	3.957
2	60.0	13.00	100	1.7780	1.1139	2.0000	1.2407	4.0000	2.2278	1.981	3.556
3	55.2	8.67	80	1.7419	0.9380	1.9031	0.8789	3.6217	1.7851	1.634	3.315
4	36.4	6.50	60	1.5611	0.8129	1.7782	0.6608	3.1619	1.4454	1.269	2.776
5	30.4	5.20	45	1.4829	0.7160	1.6532	0.5126	2.7330	1.1836	1.062	2.452
6	21.3	4.33	30	1.3284	0.6365	1.4771	0.4051	2.1818	0.9401	0.846	1.962
7	18.0	3.71	20	1.2553	0.5694	1.3010	0.3242	1.6926	0.7407	0.715	1.633
8	15.0	3.25	15	1.1761	0.5119	1.1761	0.2620	1.3832	0.6020	0.602	1.383
9	11.7	2.89	10	1.0682	0.4609	1.0000	0.2124	1.0000	0.4609	0.492	1.068
10	10.0	2.60	5	1.0000	0.4150	0.6990	0.1722	0.4886	0.2900	0.415	0.699
SUMA				14.2952 $\sum y$	7.5895 $\sum X_1$	15.0669 $\sum X_2$	6.6711 $\sum (X_1)^2$	24.5858 $\sum X_2^2$	12.6176 $\sum (X_1)(X_2)$	11.709 $\sum (y)(X_1)$	22.801 $\sum (y)(X_2)$



De la comparación de los valores calculados con los reales se puede concluir que la relación B proporciona un mejor ajuste a los datos reales, - por tanto la ecuación final es

$$hp = 3.258 (Te)^{2.43} (d)^{0.40}$$

la cual se muestra en forma gráfica en la fig 8.12. Con esta ecuación se deduce para el año de 1958 la siguiente información:

DATOS FALTANTES PARA EL AÑO 1958 (deducidos)

duración	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	minutos
Te	1.23	1.70	1.33	1.33	1.57	1.38	1.38	1.60	1.55	1.55	años
hp	6.8	20.0	10.8	18.1	15.3	17.0	19.5	22.9	24.6	26.5	mm

8.8.3 Ajustes y utilización de las curvas de altura de lluvia - duración - período de retorno.

Cuando no se dispone de la información suficiente para poder obtener en una estación determinada, sus curvas de altura de lluvia - duración - período de retorno, y se requiere analizar lluvias con duraciones hasta de 120 minutos, se pueden aplicar las ecuaciones propuestas por Bell\*. Estas ecuaciones permiten obtener la altura de lluvia para una cierta duración entre 5 y 120 min. y período de retorno, entre dos y cien años, si se conoce la altura de lluvia con duración de 60 min. y período de retorno de 2 ó 10 años.

\* Frederick Charles Bell "Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships", Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the A.S.C.E. Enero 1969.



ALTURA DE PRECIPITACION

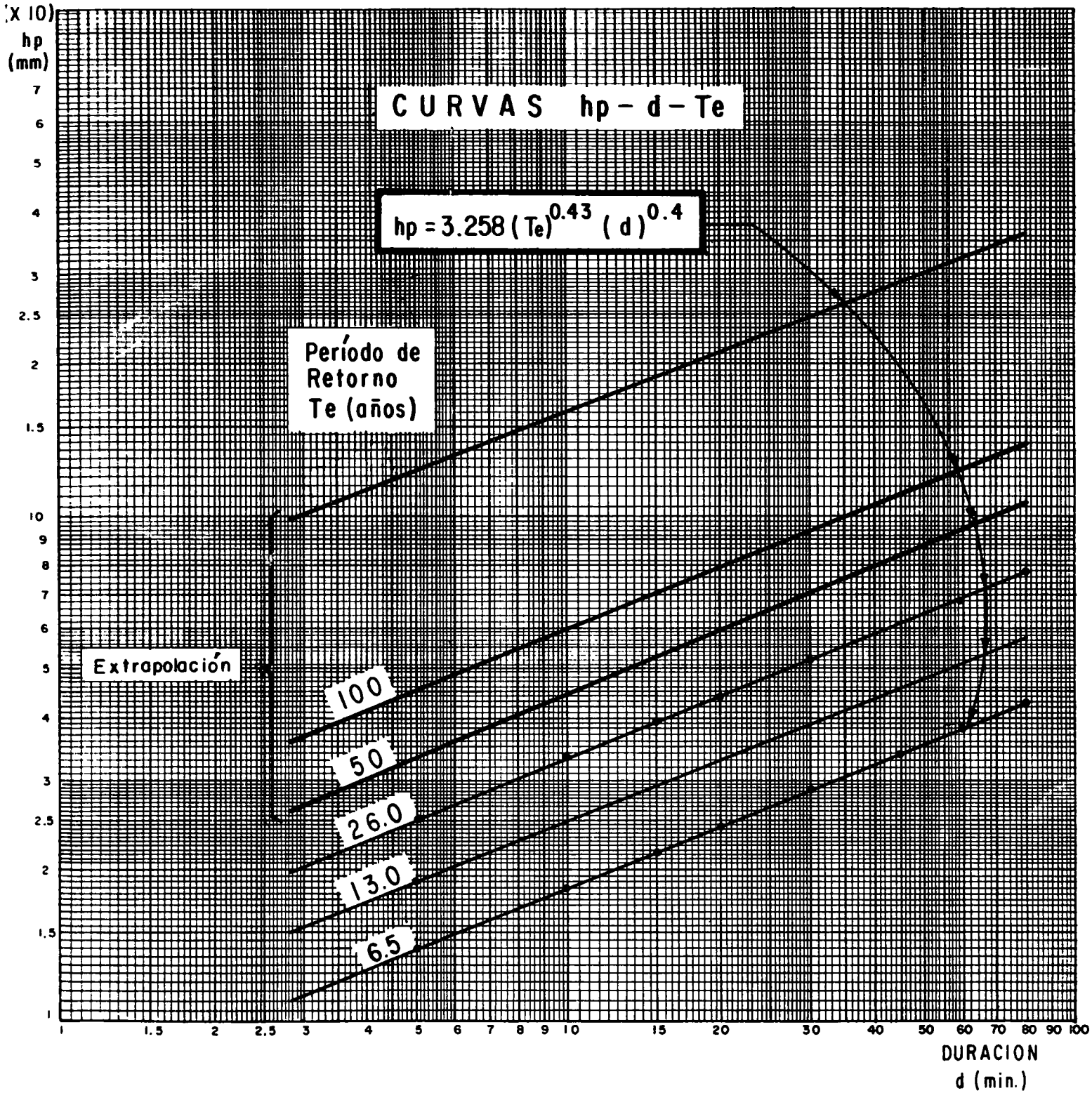


Fig. 8.12 Curvas "hp - d - Te" (mm)(min)(años) para la estación Sta. Catarina, N. L.



Las ecuaciones son:

$$hp = (0.35 \log_e T + 0.76) (0.54 d^{0.25} - 0.50) hp' \quad (8.50)$$

$$hp = (0.21 \log_e T + 0.52) (0.54 d^{0.25} - 0.50) hp'' \quad (8.51)$$

donde

- d            duración de la lluvia, entre 5 y 120 min.
- hp           altura de lluvia para una cierta duración y período de retorno, en mm.
- hp'          altura de lluvia para duración de 60 min. y período de retorno de 2 años, en mm
- hp''         altura de lluvia para una duración de 60 min. y período de retorno de 10 años, en mm

Para realizar aplicaciones de las curvas de altura de lluvia-duración-período de retorno, se requiere hacerlas extensivas a áreas. Para ello, se pueden utilizar algunos de los criterios vistos en el subinciso 3.4.1 y el subinciso 3.5.2, considerando períodos de retornos constantes.

Otra forma es en base a una relación lineal, aceptando un plano de isoyetas de determinadas características, por ejemplo, de altura de lluvia media anual fig (3.16) o bien, de alturas de lluvia para una cierta duración y período de retorno, tal que sea representativa de las lluvias en la región. De esta manera, las alturas de lluvia de las curvas de altura de lluvia-duración-período de retorno se ajustan con una relación lineal, entre la altura de lluvia media deducida en el área en la cual se quiera hacer exten





sivas las curvas y la altura correspondiente al punto donde se efectuó la obtención de dichas curvas.

Una aplicación directa de las curvas ajustadas de altura de lluvia-duración-período de retorno es la obtención de hietogramas de lluvias para una cierta cuenca, las cuales posteriormente, y en base a algún modelo de lluvia-escurrimiento, permiten la obtención de avenidas o gastos de diseño. Para poder utilizar las curvas antes mencionadas, se requiere valuar primero el período de retorno de diseño (subinciso 8.4.4).

Asignado un período de retorno, las curvas se transforman en una relación entre alturas de lluvia y duraciones, fig (8.15). Para fijar la duración de la tormenta es costumbre considerarla igual al tiempo de concentración del escurrimiento, aceptando apriori que la lluvia así deducida tiene distribución uniforme en la cuenca donde se esté aplicando y proporciona las condiciones de escurrimiento más desfavorables. En el siguiente capítulo se plantean diversas ecuaciones para valuar los tiempos antes mencionados, así como la forma de proceder para obtener estas ecuaciones.

Aceptando que se conoce la duración de la tormenta, directamente de la relación antes mencionada se puede valuar su altura de lluvia. Para obtener el hietograma correspondiente, la duración de la tormenta se sub-



divide en múltiplos de un cierto intervalo constante, obteniendo para cada múltiplo, una altura de lluvia total. La altura de lluvia de cada intervalo será la diferencia entre la altura de lluvia obtenida al inicio y final del intervalo. Debido al proceso de análisis, el hietograma así deducido tendrá una variación lineal de las alturas de lluvia siendo máxima al principio y mínima al final. Tratando de ser más congruentes con la realidad, conviene distribuir los incrementos de lluvia, sin perder su liga, de tal manera que máximo incremento esté a la mitad o un tercio de la duración total de la lluvia.

Ejemplo 8.15 Se desea obtener el hietograma de la tormenta con duración de 6 hrs. y para un período de retorno  $T_e = 100$  años, a partir de la ecuación de la curva "hp-k- $T_e$ " deducida para la estación Santa Catarina en el Edo. de Nuevo León del ejemplo 8.12. De estudios efectuados en la región de interés se conoce que la relación entre la precipitación media respecto a la precipitación registradora en la estación es de 0.76.

Del ejemplo anterior se tiene que para la Estación Santa Catarina, el comportamiento de la lluvia se puede representar como:

$$h_p = 3.258 (T_e)^{0.427} (d)^{0.40}$$

De acuerdo con la información disponible, la ecuación anterior se transforma a:

$$h_{pm} = 3.258 (0.76) (T_e)^{0.427} (d)^{0.40}$$



finalmente la ecuación de la que obtendremos el hietograma para  $T_e = 100$  años y  $d = 6$  hrs.

$$hpm = 2.476 (T_e)^{0.427} (d)^{0.40} \quad \text{o bien}$$

$$\log hpm = \log 2.476 + 0.427 \log T_e + 0.40 \log d$$

$$T_e = 100 \text{ años} \quad \log hpm = 0.394 + 0.427 \log T_e + 0.40 \log d$$

T A B L A 8.28

OBTENCION DEL CALCULO (Ejemplo 8.15)

d (hr)	d (min)	log d	log hpm (acum)	d (hr)	d (hrs)	hpm acum	hpm (mm)
6	360	2.5563	2.2705	1	5 - 6	186.1	13.5
5	300	2.4771	2.2388	1	4 - 5	172.6	14.5
4	240	2.3802	2.2000	1	3 - 4	158.1	16.9
3	180	2.2553	2.1501	1	2 - 3	141.2	21.4
2	120	2.0792	2.0796	1	1 - 2	119.8	28.9
1	60	1.7780	1.9592		0 - 1	90.9	90.9

SUMA = 186.1

Como el análisis se hace considerando duraciones totales es conveniente distribuir las variaciones de las alturas de lluvia obtenidos, teniendo en cuenta que la máxima variación generalmente se presenta a  $1/3$  ó  $1/2$  de la duración total. De acuerdo con esto, en la fig 8.13 se muestra el hietograma resultante.



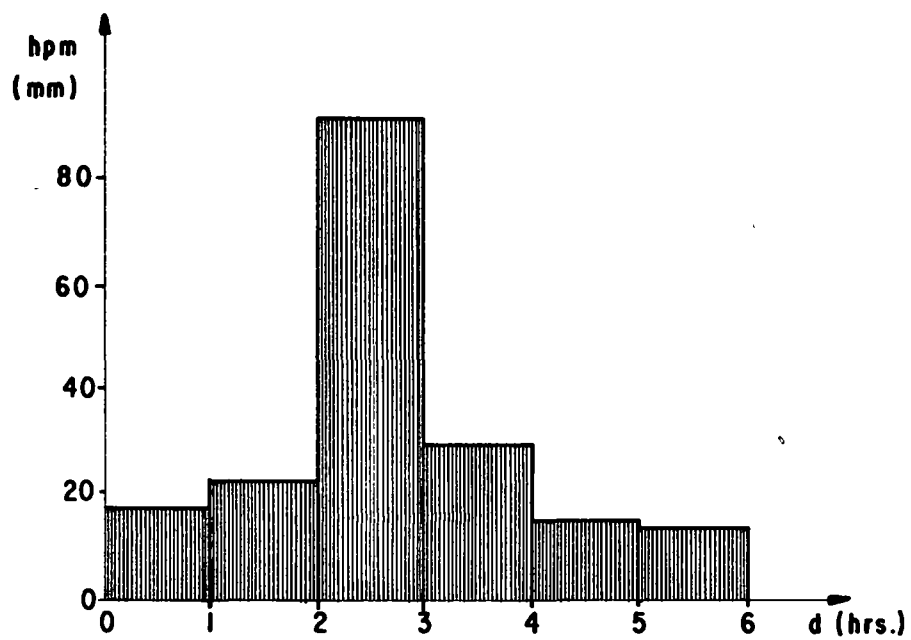


Fig. 8.13 Hietograma de la precipitación media deducida de las curvas "hp-d-Te" para  $T_e = 100$  años.





## 8.9 Generación de Información Hidrológica

Otros análisis que se aplican a los registros hidrológicos, a parte del de frecuencias visto en los incisos anteriores, es el de generación de información de un cierto registro basado en el mismo y el de incremento de información de un registro a partir de su correlación con otro registro mayor. Como

en general los registros hidrológicos son muestras muy pequeñas - de su población, se ve la importancia que tiene si se puede incrementar la información disponible.

La generación de un registro hidrológico, se aplica fundamentalmente a volúmenes de escurrimientos, con lo cual es posible realizar - funcionamientos de vasos de almacenamiento en presas, así como el dimensionamiento de éstos. Por otra parte, el poder incrementar la información de un registro a partir de otro, complementa la información disponible para un mejor análisis de frecuencias ó de generación del mismo. Estos criterios también se aplican para generar vo

lúmenes de escurrimiento a partir del comportamiento de las lluvias. Las técnicas de generación se basan en el hecho de que un registro - de datos hidrológicos, es una secuencia ordenada de valores respecto al tiempo y es factible darles un tratamiento de series cronológicas.



### 8.9.1 Series Cronológicas

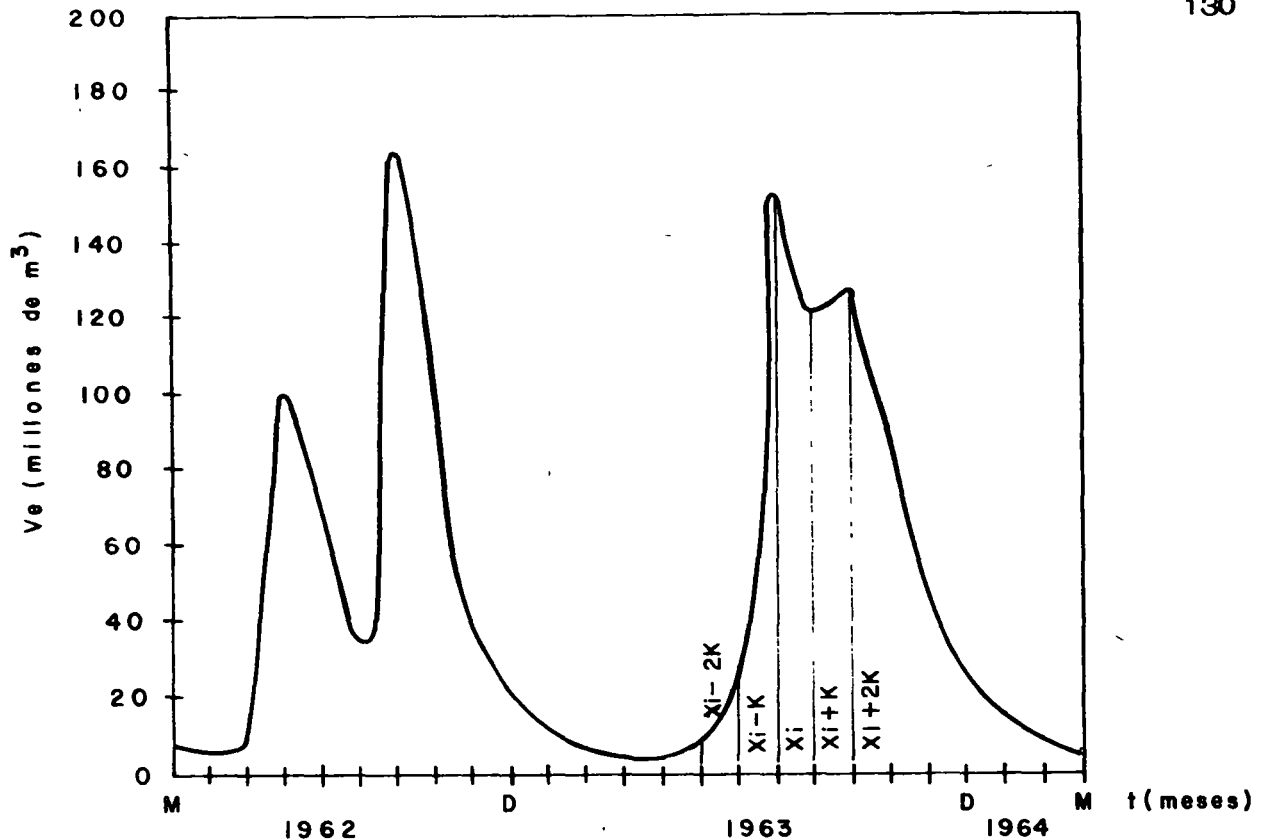
La mayoría de los métodos estadísticos usados en el análisis de series de datos hidrológicos, consideran que las series son estacionarias y que las observaciones, son distribuidas independientemente en el tiempo. Esto implica por una parte, que los parámetros estadísticos de la muestra se conserven y por otra, que la ocurrencia de un evento se considere independiente de todos los eventos previos.

Aunque el hecho de que la serie sea estacionaria en general se acepta como tal por la naturaleza de los registros, la dependencia entre las observaciones hidrológicas decrece con el incremento en su tiempo base; así, los gastos diarios no son distribuidos independientemente en el tiempo, la dependencia entre los gastos mensuales entre los gastos anuales es menor que entre los gastos mensuales.

El primer paso para analizar una serie cronológica es separar los diversos elementos de que esta compuesta, para posteriormente, si la serie sigue un cierto proceso, determinarlo y obtener el proceso generativo de la misma.

Una serie cronológica de datos hidrológicos puede considerarse compuesta por la suma de un elemento no aleatorio y un elemento aleatorio. Un elemento no aleatorio es aquél que se tiene cuando los valores separados  $K$  unidades de tiempo.

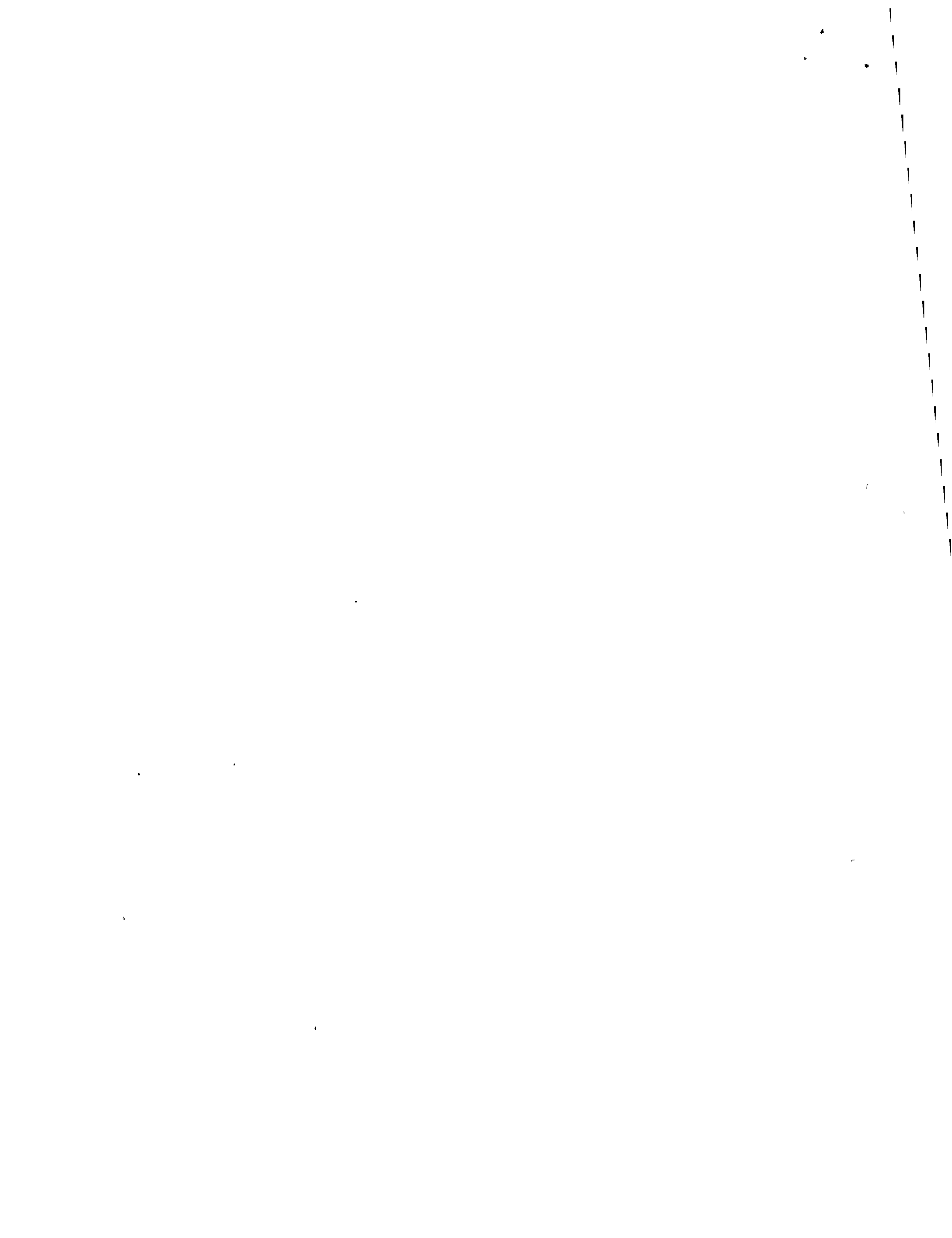




**Fig. 8.14 Registro de volúmenes de escurrimientos mensuales del Río Frío en la estación del mismo nombre .**

Si los valores de una serie cronológica se les denomina con  $x_i$ , (fig.8.14) si son linealmente dependientes de las observaciones desplazadas  $k$  unidades de tiempo, o sea de las  $x_{i+k}$ , la correlación entre  $x_i$  y  $x_{i+k}$  se puede tomar como una medida de su dependencia y se le denomina correlación seriada de orden  $k$ . Este coeficiente de correlación seriado es análogo al coeficiente de correlación para dos grupos de datos visto en el inciso 8.2, ec 8.19, solo que en este caso  $x_i$  y  $x_{i+k}$  se consideran los dos grupos de datos. En este caso para  $k=0$ ,  $r_0 = 1$  y si la serie no es aleatoria para  $k \geq 1$ ,  $-1 < r_k < 1$ . Si una serie cronológica es aleatoria  $r_k = 0$  para todos los valores de  $k \geq 1$ .

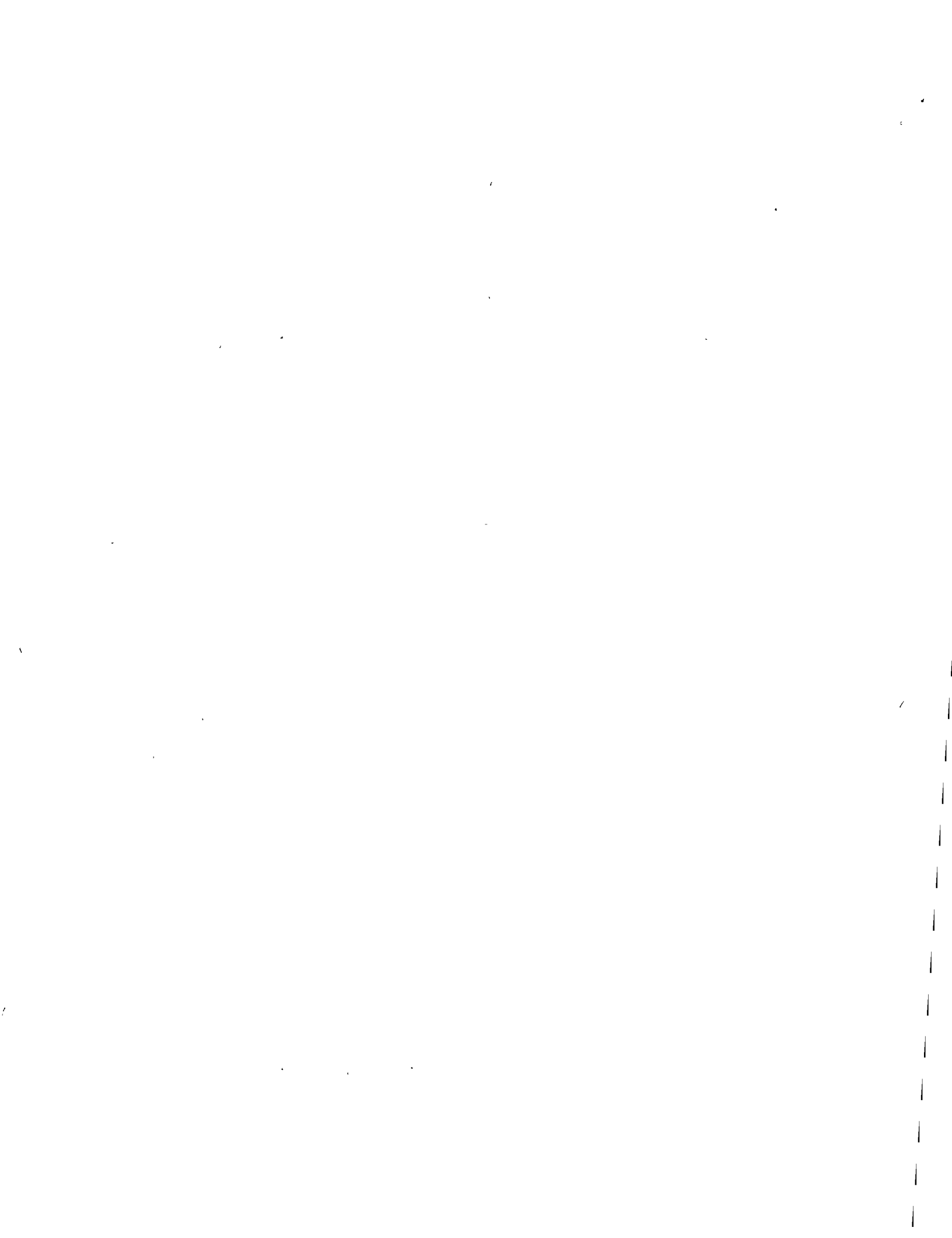
Los elementos no aleatorios de una serie pueden estar compuestos tanto por



una tendencia ó un movimiento en largos períodos y una oscilación sobre la tendencia, o solo por alguno de los dos. La tendencia es un movimiento lento de una serie en un largo período de tiempo; para definirla con precisión en una serie, se requiere tener el registro completo de ésta. En general, como lo anterior no es posible, en las series hidrológicas no se toma en cuenta, o bien se considera como la media de todos los valores por analizar, lo cual implícitamente es lo mismo.

En cuanto a movimientos oscilatorios, en una serie de datos hidrológicos ésta es muy marcada, pues usualmente por la naturaleza de los mismos los datos tienen una variación cíclica.

Para remover los elementos no aleatorios de una serie cronológica se tienen varios criterios, aunque la mayoría involucra el ajuste de un polinomio a los datos, lo cual en una serie hidrológica muchas veces no es factible usar por disponer de muestras pequeñas. Un método alternativo es el de los "Promedios móviles", el cual consiste en encontrar un polinomio que se ajusta a una parte del registro y usar diversos polinomios para las diferentes partes del registro y usar diversos polinomios para las diferentes partes del registro. En los registros hidrológicos es usual considerar, para remover los elementos no aleatorios de una serie de volúmenes de escurrimiento mensual, utilizar para cada mes, el promedio de los volúmenes registrados en dicho mes. Dependiendo del proceso usado para descomponer una serie, se tienen diver-





Los criterios de generación de los mismos, los cuales para analizar una serie pueden combinarse.

### 8.9.2 Procesos de Generación

Un proceso de generación es la manera por la cual es factible producir una serie cronológica. Algunos procesos pueden expresarse matemáticamente, con lo que es posible determinar directamente las diversas características de la serie cronológica. Si una serie cronológica se aproxima a un cierto proceso, es posible generarla.

El proceso de generación depende como ya se indicó de las características físicas de la serie que se este analizando. En estudios hidrológicos los procesos más usuales son el de los promedios móviles, la suma de armónicas y los autorregresivos.

#### 8.9.2.1 Promedios móviles.

El proceso de los promedios móviles pueden expresarse como

$$x_i = a_0 + a_1 x_{i-1} + a_2 x_{i-2} + \dots + a_m x_{i-m} \quad (8.52)$$

donde  $x_i$  es el valor de la serie en el tiempo  $t = i$ ,  $x_{i-1}$  es el valor en el tiempo  $i - 1$ , etc. (fig. 8.14) y  $m$  son los términos de los promedios móviles. Aquí el problema es determinar cuantos valores de  $x_{i-k}$  influyen en el valor  $x_i$ , para posteriormente obtener los coeficientes de peso - - -



$a_0, a_1, a_2 \dots a_m$ . Para ello, se utilizan los coeficientes de correlación seriados  $r_k$  entre los diversos valores de  $x_i$  y  $x_{i-k}$ , el cual como ya se mencionó es análogo al visto en el inciso 8.2, ec 8.19, considerando a los  $x_i$  y  $x_{i-k}$  como dos grupos de datos. En este caso

$$r_k = \frac{(\sum x_i x_{i-k})}{(\sum x_i x_i \sum x_{i-k} x_{i-k})^{1/2}} \quad (8.53)$$

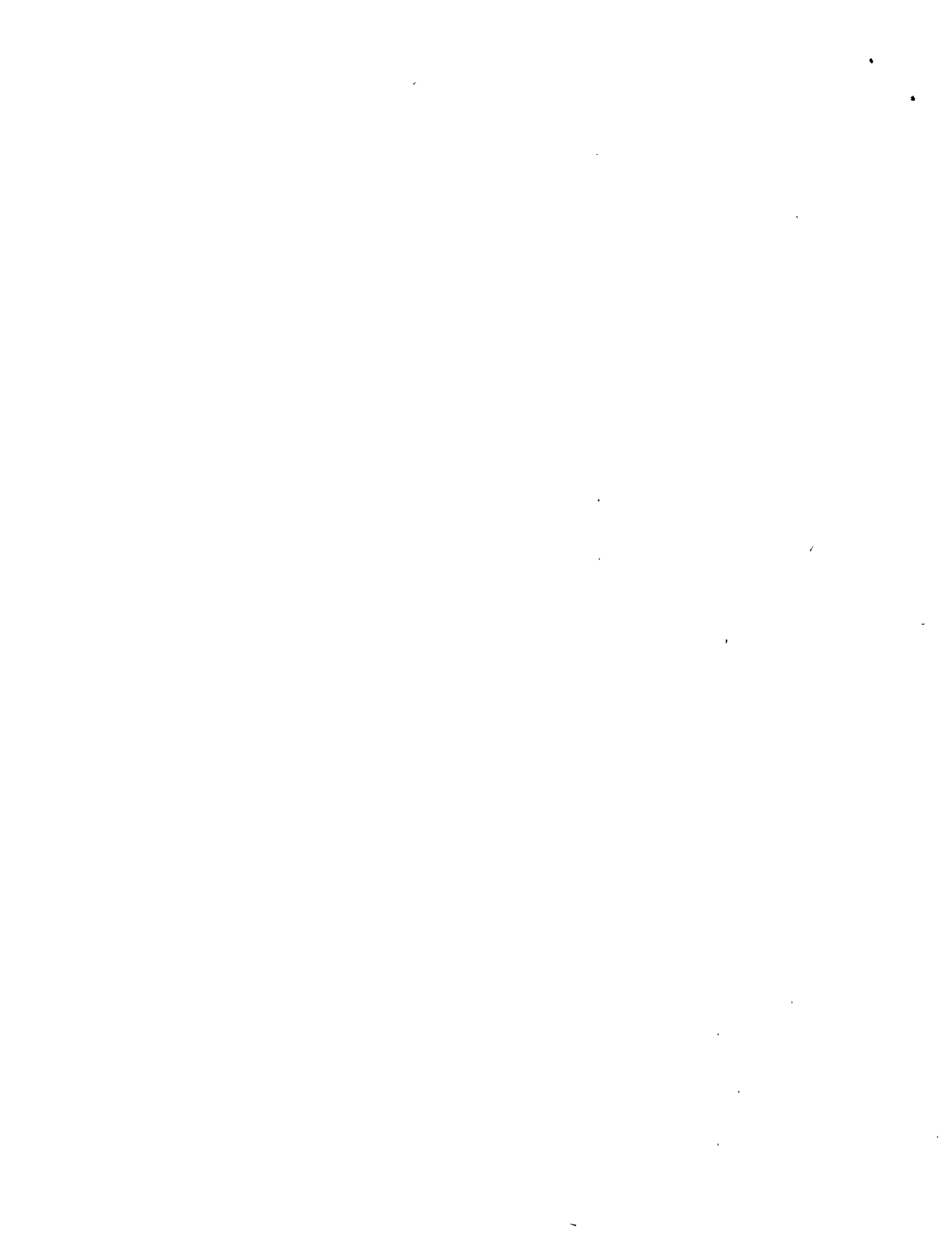
donde

$$\sum x_i x_{i-k} = (n-k) \sum_{i=1}^{n-k} x_i x_{i-k} - \sum_{i=1}^{n-k} x_i \sum_{i=1}^{n-k} x_{i-k}$$

$$\sum x_i x_i = (n-k) \sum_{i=1}^{n-k} x_i^2 - \left[ \sum_{i=1}^{n-k} x_i \right]^2$$

$$\sum x_{i-k} x_{i-k} = (n-k) \sum_{i=1}^{n-k} x_{i-k}^2 - \left[ \sum_{i=1}^{n-k} x_{i-k} \right]^2$$

Utilizando la ec 8.53 es posible calcular los coeficientes de correlación seriados  $r_k$ . Si la serie sigue un proceso de promedios móviles (ec 8.52) los coeficientes de correlación  $r_k$  deberán ser nulos para  $k > m$ . Así, calculando los  $r_k$  se puede conocer cuál es el proceso que más se apega a la -



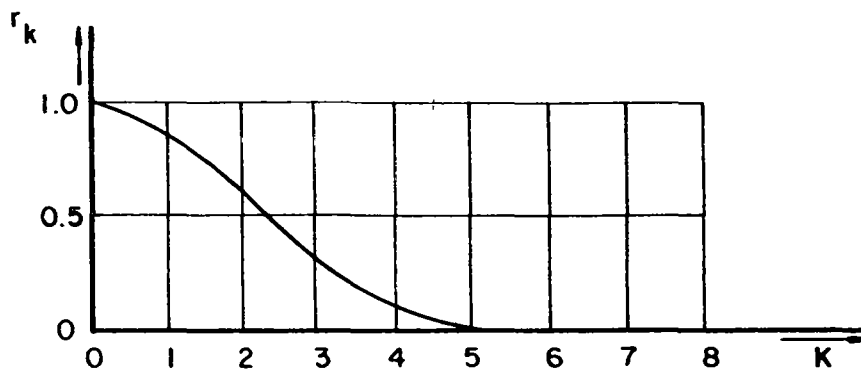
serie que se está analizando.

Conocidos los valores de  $r_k$  es posible graficar a éstos para los diferentes valores de  $k$ , obteniéndose lo que se conoce como correlograma, lo que permite visualizar cual es el proceso más adecuado a utilizar en el análisis de una serie. En la fig. 8.15 se muestran diversos correlogramas según el proceso a que correspondan. Así, en la fig. 8.15 a se tiene el correlograma de un proceso de promedios móviles, en donde se vé que el valor de  $m$  corresponde a  $k = 4$ , lo que permite acotar la ec 8.52 que define el proceso. No se debe olvidar que este tipo de modelos son teóricos, y que al analizar una serie de datos hidrológicos puede suceder que se tenga una superposición de varios procesos, o bien que debido al tamaño de la muestra, nunca se obtengan coeficientes seriados nulos. Así, al aplicar un proceso como el descrito en la ec 8.52 lo que se hace es considerar los términos de mayor peso, o sea los de coeficientes de correlación seriados altos y desprecian los valores bajos, con lo que al usar el modelo, los valores generados tendrán un cierto error.

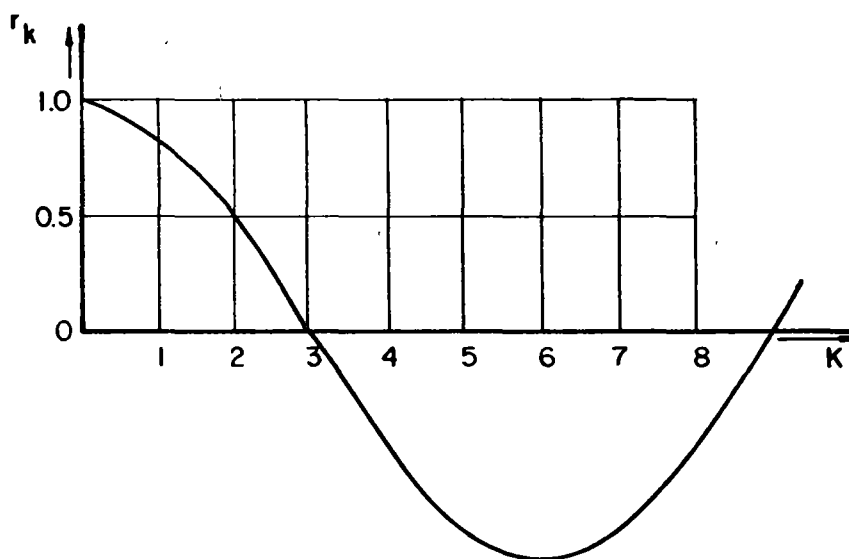
De esta manera se tendrá que el proceso de generación se puede escribir como

$$x_i = a_0 + a_1 x_{i-1} + a_2 x_{i-2} + \dots + a_m x_{i-m} - \epsilon \quad (8.54)$$

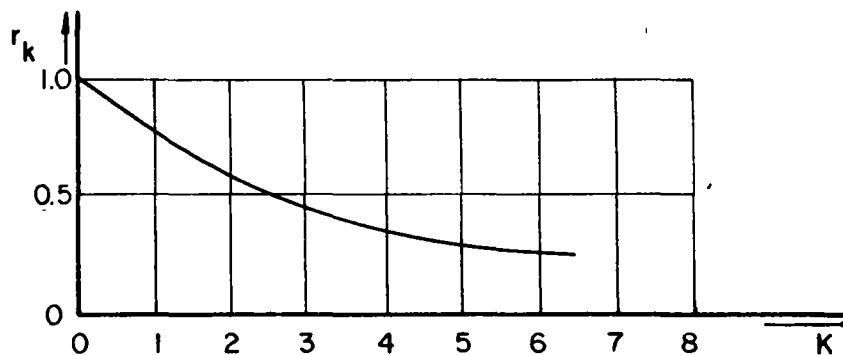




a) Proceso de promedios móviles



b) Proceso suma de armónicas



c) Proceso autorregresivo

Fig. 8.15 Correlogramas de diversos procesos





donde  $\xi$  es una variable aleatoria e implica el error que se tiene entre el valor real de la serie y el calculado por la ec 8.52.

La variancia del error se puede escribir de acuerdo con la ec 8.19 como

$$Se^2 = S^2_x (1 - r^2) \quad (8.55)$$

siendo en este caso  $Sx^2$  la variancia de los valores  $x_i$  de la serie de datos en estudio y  $r$  el coeficiente de correlación entre los valores de dicha serie y los calculados por la ec 8.52, para el mismo intervalo de tiempo.

Considerando que los errores tienen una distribución normal con media cero al utilizar la variable normalizada y su variancia de acuerdo con la ec 8.55, se tiene que

$$\xi = z Sx (1 - r^2)^{1/2} \quad (8.56)$$

donde  $z$  es una variable aleatoria con distribución normal, media cero y variancia uno (Tabla 8.1)

La ec. 8.56 permite calcular el error cuando se utiliza la ec 8.54 como un proceso de generación. Durante el proceso de generación se pueden aceptar constante los valores  $Sx$  y  $r$  obtenidos de la serie de datos, y valuar el error asignándole valores a  $z$  por medio de una tabla de distribución normal, consi-



derando la probabilidad de cada valor por medio de una tabla de números - casuales. Si en lugar de generar se desea predecir algún valor, se asigna directamente el valor de la probabilidad con que se desee obtener dicho va lor.

Ecuaciones del tipo de la 8.54 son muy usadas para correlacionar dos va- riables seriadas y en hidrología se utiliza para relacionar los escurrimien- tos con las lluvias, (capítulo 9). Así por ejemplo, si las  $x_i$  son volúmenes de escurrimiento mensual y las  $y_i$  son volúmenes de lluvia mensual, para una misma cuenca, se podría plantear un modelo del tipo

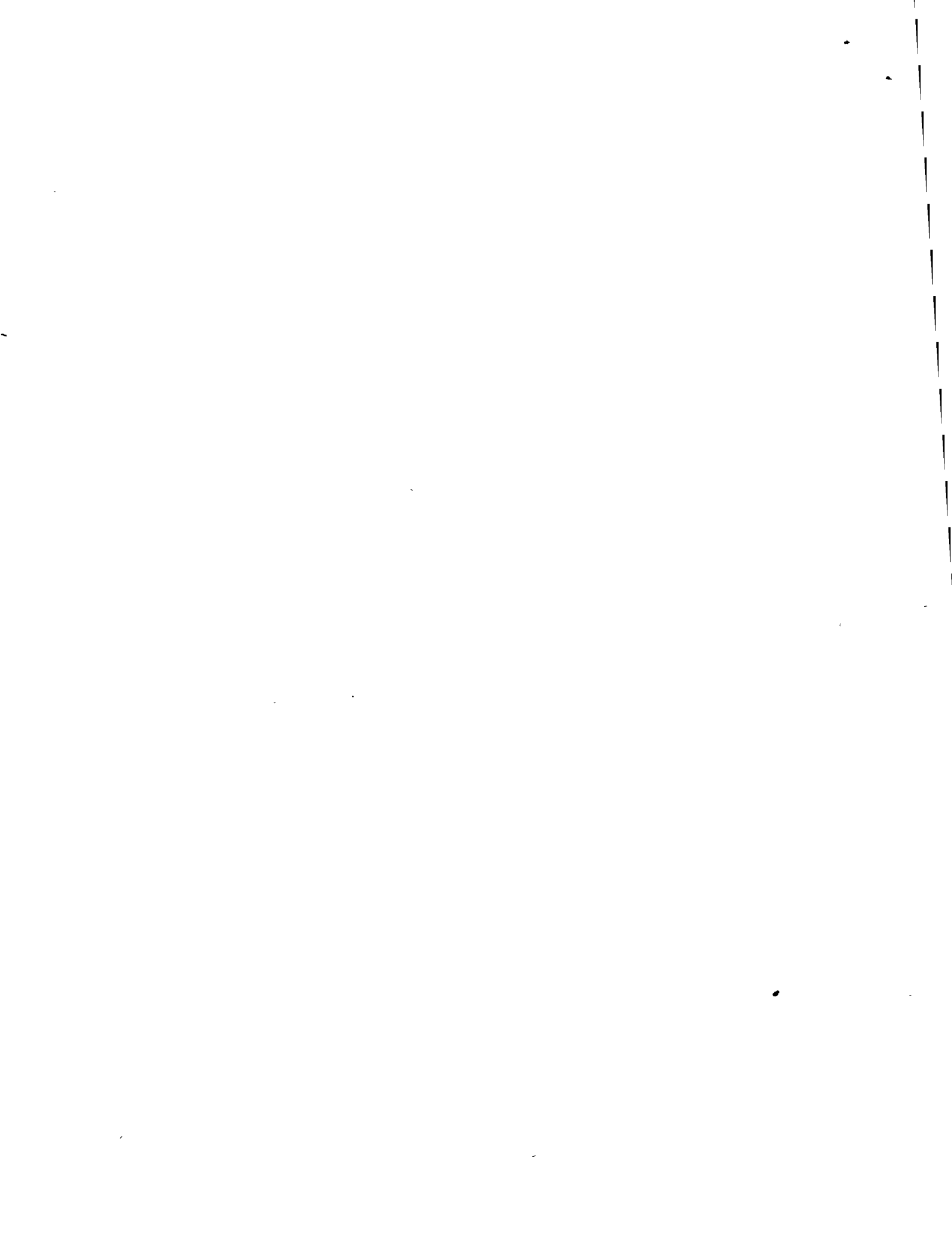
$$x_i = a_0 + a_1 y_i + a_2 y_{i-1} + \dots + a_m y_{i-m} + \epsilon \quad (8.57)$$

que implica que el volumen del mes  $i$  es función del volumen llovido el - mismo mes  $i$  y los  $i - k$  meses anteriores, cuya ecuación es similar a la ec (8.54)

Conocidos los elementos que constituyen la ec 8.52 o la ec 8.54, para obte- ner los coeficientes de peso  $a_0, a_1, a_2 \dots a_m$  se sigue un proceso simi- lar al visto en el inciso 8.3 al resolver la ec 8.22

#### 8.9.2.2 Proceso de suma de armónicas

En el caso de los coeficientes de correlación seriados  $r_k$  de una serie ten- gan un correlograma como el mostrado en la fig 8.15 b, el proceso de ge-



neración de dicha serie sigue una suma de armónicas. En este caso si se deseara generar una serie de datos hidrológicos de este tipo, se tendría - primero que quitar la ciclicidad de la misma. Un modelo simple de un proceso de generación de la suma de armónicas es

$$x_i = A \sin \theta i + z_i \quad (8.58)$$

donde  $A$  y  $\theta$  son la amplitud y el período del ciclo respectivamente y una componente aleatoria.

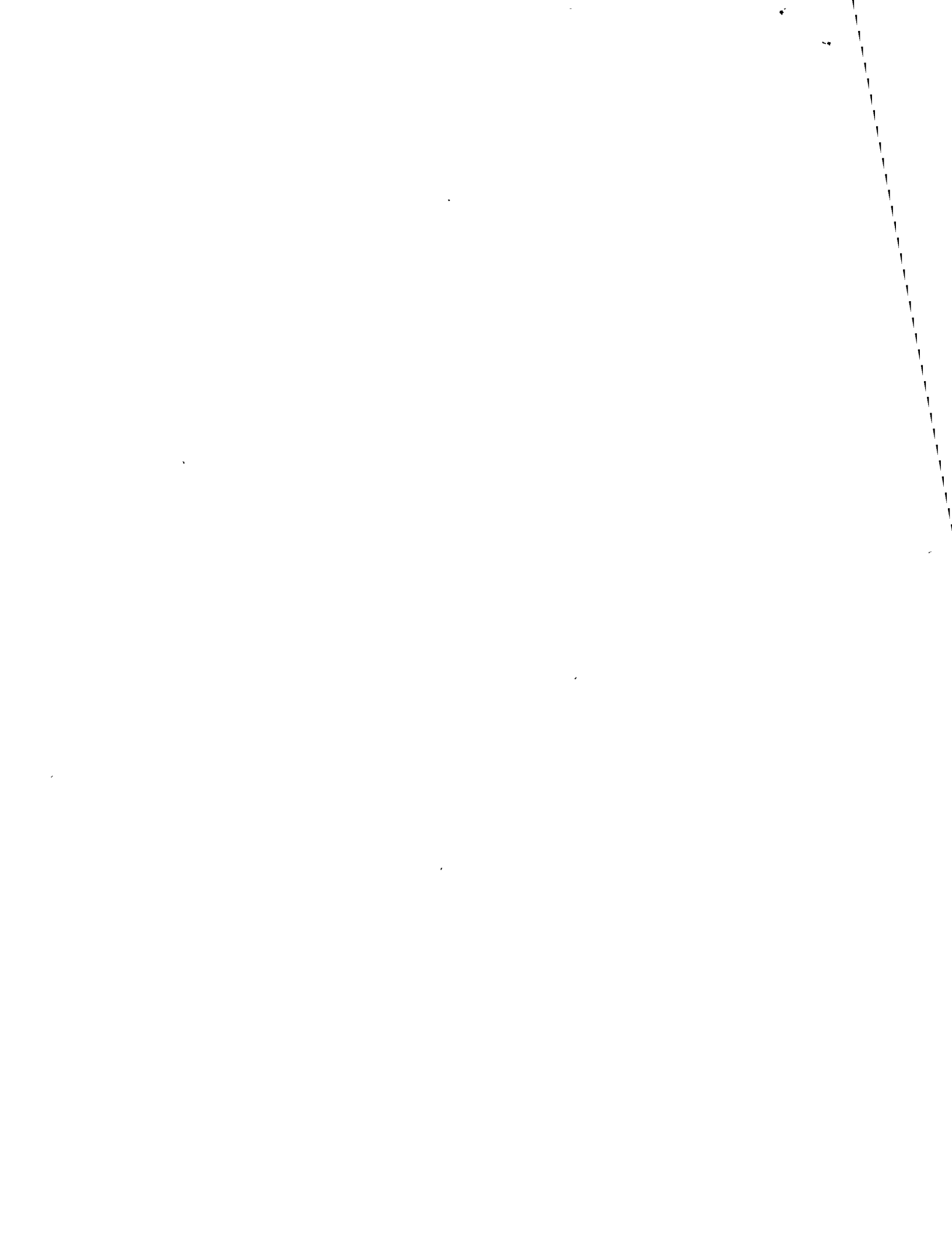
#### 8.9.2.3 Proceso autorregresivo

Procesos de este tipo son muy usados en hidrología pues, con ellos es posible representar los efectos de almacenaje que se tienen en las cuencas.

Dentro de los procesos autorregresivos, el más usual es el proceso Markoviano de primer orden, el cual se define como

$$x_i = r_1 x_{i-1} + \epsilon_i \quad (8.59)$$

donde  $r_1$  es el coeficiente seriado de primer orden de las  $x$  y  $\epsilon$  es una componente aleatoria, e implica que el valor de  $x_i$  solo depende del valor en su estado anterior o sea  $x_{i-1}$ .



Para un proceso de este tipo, el coeficiente de correlación seriado se puede expresar como  $r_k = r_1^k$ , cuyo correlograma se muestra en la fig.8.13c.

Thomas y Fiering\* aplicando un proceso markoviano (ec 8.56), generaron - escurrimientos mensuales, considerando correlaciones seriadas de éstos.

La ecuación de recurrencia utilizada se puede escribir como

$$Q_{i+1} = \bar{Q}_j + 1 + B_j (Q_i - \bar{Q}_j) + S_{j+1} (1 - r_j^2)^{1/2} e_i \quad (8.60)$$

donde  $Q_{i+1}$  son los escurrimientos durante el mes  $i$  y el mes  $(i+1)$  respectivamente, contados a partir del inciso de la secuencia de generación;  $\bar{Q}_j$  y  $\bar{Q}_{j+1}$  son los escurrimientos medios mensuales durante los meses  $j$  y  $(j+1)$  respectivamente, dentro de un ciclo anual respectivo de 12 meses;  $B_j$  es el coeficiente de correlación para estimar el escurrimiento del mes  $(j+1)$ , del escurrimiento del mes  $j$ ;  $S_{j+1}$  es la desviación estandar de los escurrimientos en el mes  $(j+1)$ ;  $r_j$  es el coeficiente de correlación entre los flujos de los meses  $j$  y  $(j+1)$ ; y  $e_i$  es una variable aleatoria normal independiente en media cero y variancia uno.

Este tipo de ecuaciones también se pueden utilizar para correlacionar por ejemplo los volúmenes de escurrimientos de dos estaciones de aforo,  $X$  y  $Y$  la ec 8.60 se expresa como

---

\* Fiering, M.B.: "Queuing theory and simulation in reservoir design", Trans. Am. Soc. Civil Engrs., vol. 127, pt I, pp. 1114-1144, (1962)





$$Q_{iy} = \bar{Q}_{jy} + B_j (Q_{ix} - \bar{Q}_{jx}) + S_{jy} (1 - r_j^2)^{1/2} e_i \quad (8.61)$$

cuyos valores tienen una interpretación similar a la indicada en la ec. -

8.60

