

# UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

---

ESCUELA DE AGRICULTURA  
Las Agujas, Zapopan, México



Precipitación Efectiva y Coeficientes de Reducción de  
Evapotranspiración Máxima en Caña de Azúcar.

## TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRONOMO

Orientación Fitotecnia

P R E S E N T A :

José Sandoval Ocegüera

GUADALAJARA, JAL. 1980

Las Agujas, Mpio. de Zapopan, Jal, 17 de Octubre 1979

C. ING. ANTONIO ALVAREZ GONZALEZ  
DIRECTOR DE LA ESCUELA DE AGRICULTURA  
DE LA UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA  
P R E S E N T E .

Habiendo revisado la Tesis del PASANTE \_\_\_\_\_

JOSE SANDOVAL OCEGUERA Titulada:

" ESTUDIO DE PRECIPITACION EFECTIVA Y COEFICIENTES DE REDUCCION DE VAPOTRANSPIRACION MAXIMA. "

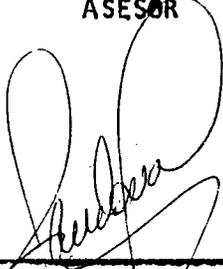
Damos nuestra aprobación para la Impresión de la misma.

DIRECTOR DE TESIS



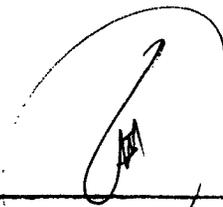
\_\_\_\_\_  
ING. J. JESUS SEPULVEDA M.

ASESOR



\_\_\_\_\_  
ING. JOSE ANTONIO SANDOVAL MADRIGAL

ASESOR



\_\_\_\_\_  
ING. SERGIO HUANACO ALVAREZ

MI QUERIDA ESCUELA RURAL "MIGUEL HIDALGO".

A MIS PADRES.

A MIS HERMANOS.

A MI ESPOSA.

A MI HIJA.

#### AGRADECIMIENTOS.

El Autor expresa su agradecimiento al M.C. David Riestra Díaz, por su inestimable asesoramiento y ayuda en la realización del presente trabajo.

Al Ingeniero Ignacio Miranda Salgado, por las facilidades prestadas al Autor, para desarrollar este trabajo.

Al Ingeniero J. Jesús Sepulveda M., por la revisión final de este trabajo, y al M.C. A. Exebio García, por su valiosa ayuda en el análisis estadístico.

A la Universidad de Guadalajara, que a través de la Escuela de Agricultura, hizo posible mis estudios profesionales.

A todos los Profesores, Investigadores y Empleados de la Escuela de Agricultura de la Universidad de Guadalajara, que de cerca o de lejos han contribuído a mi formación.

A los Investigadores, Trabajadores y Empleados de CRECIDATH y del Distrito de Riego No. 35, que en una forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo.

A Berthita Utrera y Raúl Martínez, quienes realizaron los trabajos de mecanografía y dibujo, respectivamente.

CONTENIDO.

	Pag.
INDICE DE CUADROS.....	i
INDICE DE FIGURAS.....	ii
I. INTRODUCCION.....	1
II. REVISION DE LITERATURA.....	3
2.1. La Evapotranspiración de la Caña de Azúcar.....	3
2.1.1. Coeficientes de Reducción de Evapotranspi- ración Máxima.....	7
2.1.1.1. Coeficientes $Kc_i$ de Cultivo.....	7
2.1.1.2. Coeficiente $Ks_i$ .....	12
2.2. Funciones de Producción en Caña de Azúcar.....	14
2.3. La Precipitación Efectiva.....	18
2.3.1. Métodos para la Estimación de la Precipita- ción Efectiva.....	20
III.- MATERIALES Y METODOS.....	26
3.1. Ubicación del Sitio Experimental.....	26
3.2. Características Climatológicas.....	26

	Pag.
3.3. Características del Suelo en el Area Experimental.....	28
3.3.1. Análisis Físicos.....	28
3.3.1.1. Textura.....	28
3.3.1.2. Densidad Aparente.....	29
3.3.1.3. Constantes de Humedad.....	29
3.3.1.4. Curvas de Tensión de Humedad del Suelo.....	29
3.4. Medición de Parámetros.....	29
3.5. Medición del Consumo de Agua por el Cultivo.....	32
3.6. Características de los Lisímetros de Balance Hídrico y Técnica de Llenado.....	34
3.7. Siembra.....	34
3.8. Fertilización.....	36
3.9. Riegos.....	36
3.10. Labores Culturales.....	36
3.10.1. Control de Malas Hierbas.....	37
3.10.2. Control de Plagas y Enfermedades.....	37
3.11. Datos Climatológicos.....	37

	Pag.
3.12. Cosecha.....	37
IV. RESULTADOS Y DISCUSION.....	38
4.1. Evapotranspiración Total de la Caña de Azúcar.....	38
4.2. Evapotranspiración Mensual de la Caña de Azúcar....	38
4.3. Evapotranspiración para Décimos de Desarrollo de la Caña de Azúcar.....	40
4.4. Evapotranspiración Promedio Diario Mensual de la Caña de Azúcar.....	45
4.5. Coeficientes $Kc_i$ de Cultivo.....	45
4.5.1. Coeficientes $Kc_i$ Mensuales.....	45
4.5.2. Coeficientes $Kc_i$ para Décimos de Desarrollo.	52
4.5.3. Coeficientes $Kc_i$ Promedio Diario Mensual....	56
4.6. Coeficientes $Ks_i$ .....	56
4.7. Rendimiento en Caña.....	60
4.8. Rendimiento en Azúcar.....	70
4.9. Respuesta de Algunos Parámetros Fisiológicos de la Planta.....	74
4.10. Precipitación Efectiva en Caña de Azúcar.....	77

	Pag.
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
5.1. Conclusiones.....	80
5.2. Recomendaciones.....	82
VI. RESUMEN.....	84
VII. BIBLIOGRAFIA.....	86
VIII. APENDICE.....	90

INDICE DE CUADROS.

Cuadro No.	Pag.
2.1.1. Evapotranspiración real de la caña de azúcar.....	5
2.1.2. Evapotranspiración de la caña de azúcar en diferentes contenidos de humedad del suelo.....	6
2.3.1.1. Coeficiente de aprovechamiento de acuerdo a la lluvia total registrada (Blaney y Criddle).....	21
3.3.1.1.1. Textura del suelo en los lisímetros de balance hídrico.....	31
3.3.1.3.1. Constantes de humedad del suelo de los lisímetros de balance hídrico.....	33
4.1.1. Evapotranspiración total de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico....	39
4.2.1. Evapotranspiración mensual de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico....	41
4.2.2. Evapotranspiración mensual acumulada de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico y evaporación mensual acumulada, registrada en un tanque evaporómetro tipo "A".....	43
4.3.1. Evapotranspiración para décimos de desarrollo de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	44

Cuadro No.	Pag.
4.4.1. Evapotranspiración promedio diario mensual de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	46
4.5.1.1. Coeficientes $Kc_i$ mensuales de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico...	48
4.5.1.2. Valores estimados de los coeficientes $Kc_i$ mensuales de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	49
4.5.1.3. Constantes ( $b_0, b_1, b_2$ ) y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de variación (C.V.), de las ecuaciones que estiman los coeficientes $Kc_i$ mensuales en la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	51
4.5.2.1. Coeficientes $Kc_i$ para décimos de desarrollo de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	53
4.5.2.2. Valores estimados de los coeficientes $Kc_i$ para décimos de desarrollo de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	54
4.5.2.3. Constantes ( $b_0, b_1, b_2$ ) y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de variación (C.V.), de las ecuaciones que estiman los coeficientes $Kc_i$ para décimos de desarrollo de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	57
4.5.3.1. Coeficientes $Kc_i$ promedio diario mensual en la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	58

Cuadro No.	Pag.
4.6.1. Coeficientes $Ks_i$ para tres etapas fenológicas de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	59
4.6.2. Constantes ( $b_0, b_1, b_2$ ) y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de variación (C.V.), de las ecuaciones que estiman los coeficientes $Ks_i$ para tres etapas fenológicas de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico...	62
4.7.1. Rendimiento en caña y eficiencia del uso del agua por la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	64
4.8.1. Rendimiento en azúcar y eficiencia del uso del agua por la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	71
4.9.1. Respuesta de algunos parámetros fisiológicos de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	75
4.9.2. Valores observados de grados Brix, sacarosa, pureza y humedad en la sección 8-10 del tallo, al momento del corte.....	76
4.10.1. Programa SAS793 para la estimación de la precipitación efectiva en la caña de azúcar.....	78
8.1. Temperatura, humedad relativa, evaporación y precipitación promedio diario mensual, registradas en la estación Tepetates, durante el desarrollo de la caña de azúcar.....	95

## INDICÉ DE FIGURAS.

Figura No.	Pag.
2.1.1.1.1. Variación estacional de la relación Etx en tres cultivos de diferente densidad foliar y altura..	9
2.1.1.1.2. Relación entre $Kc_i$ y el desarrollo vegetativo de la caña de azúcar.....	10
2.1.1.2.1. Relación entre la evapotranspiración relativa Et/Etp y la succión del suelo S.....	15
2.2.1. Relación agua-rendimiento usando precipitación efectiva estimada.....	19
2.3.1.2. Variación de la precipitación efectiva ( $Pe_i$ ) en función de diferentes valores de $Etx_i$ y $Nd_i$ para una lluvia observada ( $Pr_i$ ) de 320 mm.....	24
3.1.1. Plano de localización del Centro Regional de Enseñanza, Capacitación e Investigación para el Desarrollo Agropecuario del Trópico Húmedo (CRECIDATH), en el Distrito de Riego No. 35, La Antigua, Veracruz.....	27
3.3.1. Perfil típico de la Variante San Rafael, Serie San Rafael.....	30
3.6.1. Forma en que quedaron instalados los lisímetros de balance hídrico.....	35

Figura No.	Pag.
4.2.1. Curvas acumuladas de evapotranspiración de la caña de azúcar, obtenidas en lisímetros de balance hídrico.....	42
4.5.1.1. Representación gráfica de los coeficientes $Kc_i$ mensuales de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	50
4.5.2.1. Representación gráfica de los coeficientes $Kc_i$ para décimos de desarrollo de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico...	55
4.6.1. Coeficientes $Ks_i$ para tres etapas fenológicas de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	61
4.7.1. Rendimiento en caña y eficiencia del uso del agua por la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	65
4.7.2. Rendimiento de la caña de azúcar en toneladas de caña por hectárea, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	67
4.8.1. Rendimiento en azúcar y eficiencia del uso del agua por la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.....	72
8.1. Curvas de tensión de humedad del suelo del lisímetro 1.....	91
8.2. Curvas de tensión de humedad del suelo del lisímetro 2.....	92

Figura No.

Pag.

8.3. Curvas de tensión de humedad del suelo del <u>lisis</u> metro 3.....	93
8.4. Curvas de tensión de humedad del suelo del <u>lisis</u> metro 4.....	94

Cuadro No.	Pag.
8.2. Temperaturas medias máximas y medias mínimas en el período 1970-1979, Estación Cardel.....	96
8.3. Resumen general de temperaturas registradas, período 1951-1979, Estación Cardel.....	97
8.4. Análisis de la precipitación pluvial, período 1970-1979, Estación Cardel.....	98
8.5. Días de precipitación y aspecto del cielo.....	99
8.6. Resumen de precipitaciones registradas en el período 1951-1979, Estación Cardel.....	100
8.7. Resumen general de evaporación mensual registrada en mm, período 1951-1979, Estación Cardel...	101
8.8. Sistema de Análisis Estadístico.....	102
8.8. Continuación Sistema de Análisis Estadístico...	103
8.8. Continuación Sistema de Análisis Estadístico...	104
8.9. Modelo de tarjetas usadas en la codificación de los resultados para la estimación de la precipitación efectiva.....	105
8.10. STEPWISE regresion procedure for dependet variable Y.....	106
8.10. Continuación STEPWISE regresion procedure for dependet variable Y.....	107
8.10. Continuación STEPWISE regresion procedure for dependet variable Y.....	108

## 1.- INTRODUCCION.

Al hablar de la importancia del agua, es obligado observar que para el hombre, al igual que para todos los seres vivos, significa su propia existencia, al encontrarse presente en todos sus procesos vitales; sin embargo, es con la adopción de la agricultura cuando el agua adquiere aún mayor importancia, pues representa a partir de entonces el factor más importante en la producción de alimentos indispensables para el hombre.

Por otro lado, el cultivo de la caña de azúcar genera un producto básico en la dieta alimenticia de muchos pueblos, así como las materias primas para diversas industrias. En nuestro país, da vida a la más importante agroindustria, la que a través del producto que genera, el azúcar, repercute en la economía con gran impacto. En el aspecto socioeconómico, la caña de azúcar genera ocupación, con lo que contribuye a subsanar el problema del desempleo en nuestro país. Se estima que aproximadamente 2.0 millones de personas derivan sus ingresos directa o indirectamente de la actividad azucarera nacional (12). En la captación de divisas significó para nuestro país, un renglón importante, hasta que, de exportador de azúcar, cambió a país importador.

Varias investigaciones han establecido que en la producción de la caña de azúcar, su rendimiento es una función del régimen evapotranspirativo de la planta. Esto es, con una cantidad de agua consumida se obtiene una cierta respuesta en el rendimiento final; sin embargo, un máximo consumo de agua no siempre está relacionado con el máximo rendimiento.

Lo anterior explica por sí sólo la importancia que tiene el conocimiento de la aportación de la lluvia a la demanda evapotranspirativa de la caña de azúcar, pues ésto nos permitirá su adecuada satisfacción a través del riego en las zonas donde se cuente con esta alter

nativa. En la agricultura cañera de temporal, en donde la producción depende necesariamente de la precipitación pluvial, nos permitiera adecuar este cultivo a los ciclos pluviométricos, de tal manera que afecten positivamente su rendimiento.

Por todo lo anterior, en el presente trabajo se plantearon los objetivos siguientes:

- 1.- Determinar los coeficientes de reducción de evapotranspiración máxima en el cultivo de la caña de azúcar.
- 2.- Obtener una función de respuesta que relacione el rendimiento de caña y azúcar por hectárea con la cantidad de agua consumida como única variable controlable en el proceso productivo de este cultivo.
- 3.- Correlacionar los consumos de agua con algunos parámetros fisiológicos de la planta.
- 4.- Estimar la lluvia efectiva en la caña de azúcar considerando la lluvia observada, las láminas de riego aplicadas al cultivo, su evapotranspiración, así como el número de días en los que ocurrieron lluvias.

## II.- REVISION DE LITERATURA.

### 2.1.- La Evapotranspiración de la Caña de Azúcar.

La evapotranspiración se define como la cantidad de agua transpirada por las plantas, más el agua evaporada que se encuentra contenida en el suelo donde éstas se desarrollan. Este proceso depende de la interacción del suelo, la planta y la atmósfera, los cuales integran un sistema continuo en el transporte del agua en estado líquido al estado de vapor (25).

Palacios y González (20), engloban a los factores que intervienen en la evapotranspiración de los cultivos en dos grupos: factores de demanda, relacionados con el clima; y factores de oferta, relacionados con el suelo y la planta. De esta forma, indican que la evapotranspiración de un cultivo es una función directa de factores climáticos, tales como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento, y a su vez, la oferta de agua es una función del contenido de humedad del suelo en donde crece la planta y de las características propias del vegetal, como son su sistema radical y el área foliar.

Campbell (2), señala que en la caña de azúcar, la evapotranspiración está íntimamente relacionada con la producción, como lo demuestran los estudios realizados en lisímetros por varios investigadores, entre los que destacan Chang (1961) y Thompson et al (1963) sobre necesidades de agua de la caña de azúcar.

Este mismo autor (2), menciona que en un estudio realizado en Hawai, sobre transpiración y producción de materia seca en caña de azúcar, se observó que 135 gramos de agua produjeron 1 gramo de materia seca. El tallo de la caña cosechada de este estudio, contenía 78.2 % de agua que contribuyó en 59 % del total de materia seca. Observó además,

en este y otros estudios, que la evaporación del suelo constituyó un 28 % de la evapotranspiración de la caña de azúcar para un período de 12 meses.

Chang et al (3), encontraron en Hawai, que la proporción entre la evapotranspiración potencial de la caña de azúcar y la evaporación en tanque tipo "A" es de 0.4 para las siembras nuevas y alrededor de 1.0 para una caña mayor de cinco meses con un cubrimiento total de campo. De igual forma encontró, que los rendimientos máximos son obtenidos con consumos de agua semejantes al valor de la evapotranspiración potencial.

En el Distrito de Riego No. 35 (4), se comparó la estimación de la evapotranspiración real de la caña de azúcar mediante gravimetría en parcelas comerciales y el uso de lisímetros de balance hídrico, obteniéndose los valores que aparecen en el cuadro 2.1.1.

En otro estudio realizado en el mismo Distrito de Riego (4), se estimó el consumo de agua por la caña de azúcar bajo cuatro diferentes tensiones de humedad en el suelo al momento del riego. Los resultados se observan en el cuadro 2.1.2.

Riestra (25), en un trabajo sobre evapotranspiración máxima en caña de azúcar, mediante el uso del lisímetro de balance hídrico, encontró un valor de 326.5 cm correspondiendo aproximadamente a dos veces el requerimiento de riego de la caña de azúcar bajo condiciones reales de cultivo (evapotranspiración real), en la región cañera de la parte central del Estado de Veracruz. Este mismo investigador encontró que la evapotranspiración máxima del cultivo, supera considerablemente a la evaporación registrada en un evaporómetro tipo "A" a partir de Julio, cuando las lluvias ya están establecidas en la región, llegando a excederla hasta en un 68 % durante todo el ciclo del cultivo.

Maldonado (14), encontró para la Cuenca del Papaloapan, Veracruz, un valor de evapotranspiración potencial en la caña de azúcar de 5.4 mm/día, mientras que los valores extremos en las épocas de máxima

Cuadro.2.1.1. Evapotranspiración real de la caña de azúcar.

M E S	E V A P O T R A N S P I R A C I O N	
	GRAVIMETRIA ( cm )	LISIMETRO DE BALANCE ( cm )
ENERO	7.00	-
FEBRERO	15.00	-
MARZO	13.00	-
ABRIL	13.00	11.10
MAYO	13.00	11.26
JUNIO	16.00	22.25
JULIO	18.50	15.87
AGOSTO	19.00	11.51
SEPTIEMBRE	17.50	21.90
OCTUBRE	15.50	30.86
NOVIEMBRE	12.50	26.78
DICIEMBRE	7.50	28.23
ENERO	5.00	28.39
FEBRERO	1.15	26.81
MARZO	-	4.05
<b>T O T A L</b>	<b>174.15</b>	<b>239.01</b>

( Fuente : Distrito de Riego No. 35, " Estudio Preliminar sobre Evapotranspiración Máxima en Caña de Azúcar ", S.A.R.H., México ).

**Cuadro.2.1.2 .Evapotranspiración de la caña de azúcar en diferentes contenidos de humedad del suelo.**

T R A T A M I E N T O	L A M I N A T O T A L L L O V I D A ( c m )	L A M I N A T O T A L A P L I C A D A ( c m )	L A M I N A T O T A L C O N S U M I D A ( c m )
0.8 B A R S	1 0 0 . 4 3	1 7 4 . 5 3	2 3 7 . 2 8
1.5 B A R S	1 0 0 . 4 3	1 7 5 . 2 9	2 3 9 . 0 3
3.0 B A R S	1 0 0 . 4 3	1 7 2 . 3 7	2 2 6 . 8 6
C / 2 5 D I A S	1 0 0 . 4 3	1 2 9 . 5 7	2 0 6 . 0 5

(Fuente : Distrito de Riego No. 35, " Estudio Preliminar sobre Evapotranspiración Máxima en Caña de - Azúcar ", S. A. R. H., México ).

y mínima demanda, fueron respectivamente de 7.2 y 3.4 mm/día.

#### 2.1.1. Coeficientes de Reducción de Evapotranspiración Máxima.

Según Norero (18), un cultivo acusa su máxima intensidad de transpiración cuando el suministro de agua del suelo es adecuado. En estas condiciones, los tejidos vegetales mantienen un alto grado de hidratación y los estomas permanecen completamente abiertos, la intensidad de transpiración estará regida por las condiciones meteorológicas, y su magnitud está relacionada directamente con la evaporatividad de la atmósfera. La evapotranspiración máxima depende entonces esencialmente de factores climáticos y morfológicos del cultivo que afectan el flujo de agua al estado de vapor, y es independiente de factores edáficos.

Este mismo Autor (18), señala que tarde o temprano el suministro de agua del suelo se hace insuficiente para mantener un alto grado de hidratación en los tejidos vegetales; entonces sobreviene una pérdida de turgencia, y los estomas comienzan a cerrarse. En estas condiciones la transpiración es inferior a la máxima y su intensidad depende de los factores edáficos y del cultivo que determinan el flujo del agua al estado líquido.

Palacios (20), menciona que para hacer una estimación del efecto restrictivo de los factores de oferta a la demanda de agua por los cultivos, se han desarrollado algunos métodos que consisten en calcular unos factores de ajuste a la demanda evapotranspirativa en función del contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetativo de éstos.

##### 2.1.1.1. Coeficiente $Kc_i$ de Cultivo.

Riestra (25), define el coeficiente de ajuste a la demanda evapotranspirativa, debido al desarrollo vegetativo del cultivo, como la relación existente entre la evapotranspiración del cultivo y la eva

poración medida en un tanque evaporómetro tipo "A".

Norero (19), menciona que las mismas causas y factores que promueven la evaporación de agua libre, actúan en los suelos húmedos y en los cultivos produciendo la evapotranspiración. Estos fenómenos son cualitativamente semejantes. Por eso, se encuentra a menudo una estrecha proporcionalidad entre evaporación, medida en un evaporímetro estándar, y la evapotranspiración de un cultivo. Pero, los efectos del clima en la vegetación son cuantitativamente diferentes que en un evaporímetro, y el factor de proporcionalidad varía al cambiar el tipo de evaporímetro o las características ecofisiológicas de la vegetación. En cultivos anuales, la evolución del follaje y los cambios en la cobertura del terreno, producen una típica variación en la proporcionalidad evapotranspiración/evaporación (Figura 2.1.1.1.1.).

En relación a los trabajos realizados para el ajuste de la demanda evapotranspirativa en función del desarrollo de la planta, Palacios (20), menciona a Doorembos y Pruitt, los cuales hacen una amplia revisión de la información existente a nivel mundial, presentando tablas sobre estos factores para una gran cantidad de cultivos.

Riestra (25), trabajando en caña de azúcar, obtuvo los coeficientes  $Kc_i$  mensuales, relacionando la evapotranspiración máxima del cultivo con la evaporación medida en un tanque evaporómetro tipo "A". Determinó además, los coeficientes  $Kc_i$  para cada décimo de desarrollo del cultivo. La figura 2.1.1.1.2. muestra el diagrama de dispersión de los  $Kc_i$  observados, ajustándose a la siguiente ecuación:

$$Kc_i = 0.22 + 7.27 \left(\frac{t_i}{t_c}\right) - 6.37 \left(\frac{t_i}{t_c}\right)^2 \quad (2.1.1.1.1.)$$

Donde:

$Kc_i$  = Coeficiente de ajuste a la demanda evapotranspirativa en función del desarrollo de la planta.

$t_i$  = Duración del cultivo en días, desde la siembra hasta el período i.

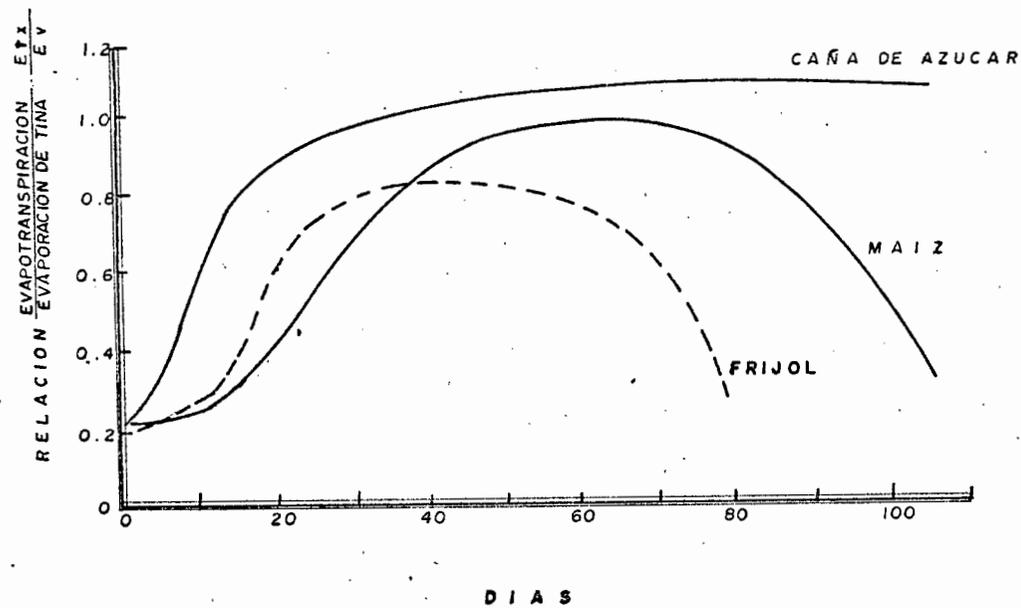


Fig. 2.1.1.1.1. Variación estacional de la relación  $E_t x$  en tres cultivos de diferente densidad foliar y altura. (Tomado de Norero, Sch. A, "Evaporación y Transpiración", Cursos de Conservación de Aguas y Tierras, CIDIAT, Mérida, Venezuela).

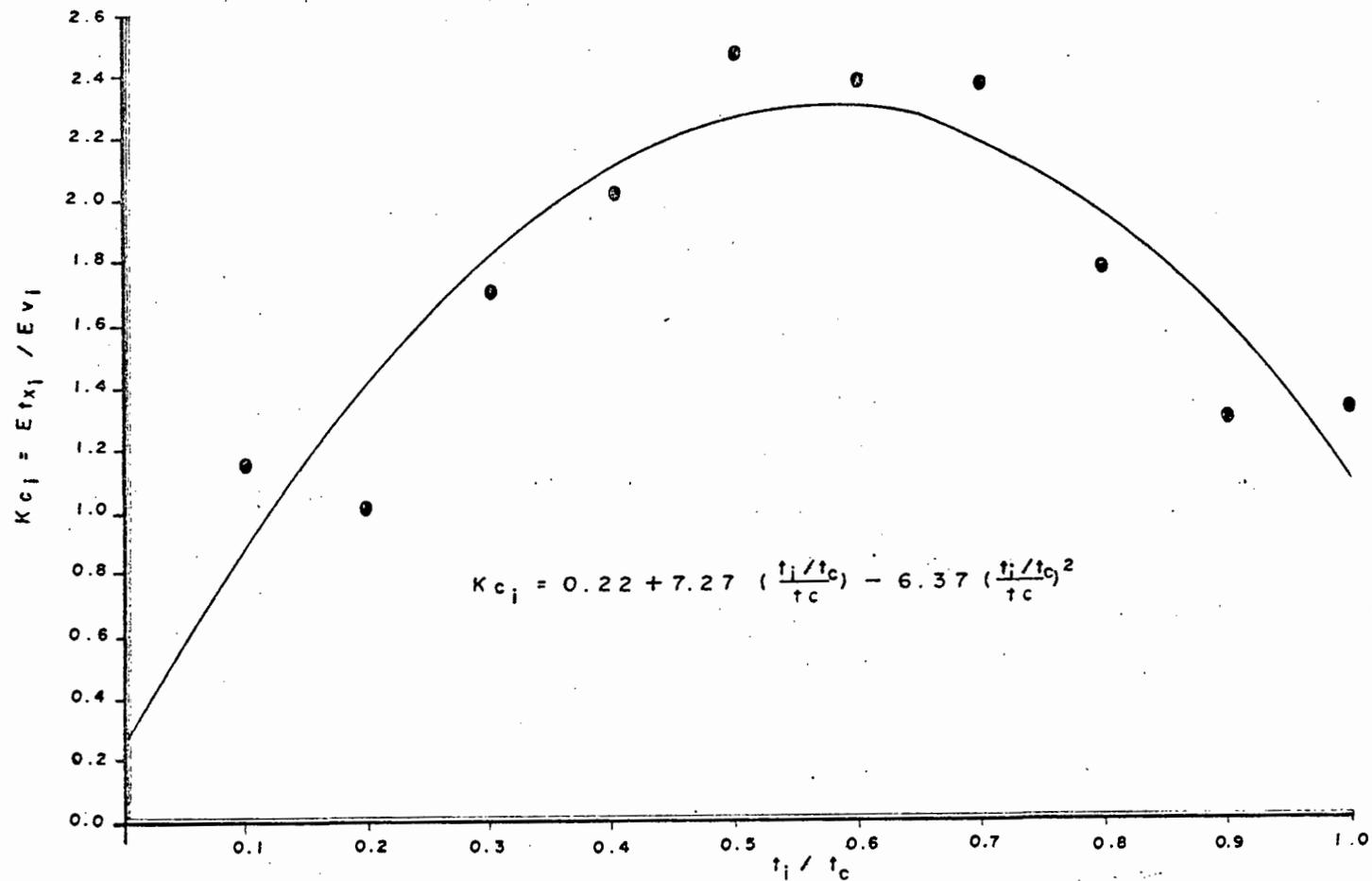


Fig. 2.1.1.1.2. Relación entre  $Kc_i$  y el desarrollo vegetativo de la Caña de azúcar. (Tomado de Riestra, D. D., "Respuesta del Rendimiento de la Caña de Azúcar al Regimen de Evapotranspiración Máxima", Colegio de Postgraduados, Chapingo, México).

$t_c$  = Duración total del ciclo vegetativo en días.

En el mismo trabajo, Riestra reporta que para cada décimo de desarrollo, los valores de  $Kc_i$  siempre fueron mayores a la unidad, es decir, que la tasa evapotranspirativa máxima observada por el cultivo, fue superior a la evaporación de una superficie de agua libre, llegando hasta duplicarla entre el 40 y el 70 % durante el ciclo vegetativo. Al respecto, Thompson (28), reporta que los  $Kc_i$  obtenidos en caña de azúcar, considerando la evapotranspiración potencial durante la época en que el cultivo cubrió totalmente la superficie del terreno, no exceden a 1.76 como se aprecia a continuación:

P A I S	$Kc_i$
PUERTO RICO.	0.95
JAMAICA.	0.57
HAWAI.	1.30
SUDAFRICA.	1.06
AUSTRALIA.	1.71

Norero (19), para calcular los factores de ajuste en función del desarrollo vegetativo del cultivo, propone una ecuación cúbica incompleta, la cual relaciona el índice de área foliar medio del cultivo con el coeficiente  $Kc_i$ ; dicha ecuación es:

$$Kc_i = k + F \left( \frac{t_i}{t_c} \right)^2 \left( 1 - \frac{t_i}{t_c} \right)^3 \quad (2.1.1.1.2.)$$

Donde:

$k$  = Parámetro de la función que depende de la proporción de evaporación del suelo desnudo.

$F$  = Índice de área foliar medio, es decir, relación media entre el área de las hojas (por un lado) y la superficie del suelo cubierta por el cultivo.

Palacios (20), para calcular los factores de ajuste en función del desarrollo vegetativo del cultivo de maíz, relacionó los valores de la evapotranspiración máxima del cultivo con la evaporación medida en un evaporímetro tipo "A"; probando con éxito la ecuación propuesta por Norero.

#### 2.1.1.2. Coeficiente $Ks_i$ .

De acuerdo con Palacios (20), el coeficiente de ajuste a la demanda evapotranspirativa debido a una restricción de la humedad del suelo, es la relación que existe entre la tasa de evapotranspiración real o actual y la tasa de evapotranspiración máxima:

$$Ks_i = \frac{Et_i}{Etx_i} \quad (2.1.1.2.1.)$$

Donde:

$Ks_i$  = Coeficiente de ajuste por el contenido de humedad en el suelo en el período  $i$  (adimensional).

$Et_i$  = Tasa de evapotranspiración real del cultivo, durante el período  $i$  (lámina/tiempo).

$Etx_i$  = Tasa de evapotranspiración máxima durante el período  $i$  (lámina/tiempo).

Hanson (8), menciona que la relación entre el coeficiente  $Ks_i$ , el contenido de humedad en el suelo y la demanda evapotranspirativa de los cultivos, es de tipo exponencial:

$$\frac{Et_i}{Etp_i} = \left( \frac{Q - q}{Sw - q} \right)^{Ks_i Etp_i} \quad (2.1.1.2.2.)$$

Donde:

$Etp_i$  = Tasa de evapotranspiración potencial durante el período  $i$ .

$Q$  = Cantidad de agua en el suelo en un momento dado.

$q$  = Cantidad de agua en el suelo en el punto de marchitamiento permanente.

$Sw$  = Cantidad de agua en el suelo a capacidad de campo.

Marinato (15), indica que en la ecuación (2.1.1.2.2.) en realidad  $Q - q$  es la cantidad de agua aprovechable en el suelo y que en un momento dado se puede representar por  $HAa$  y  $Sw - q$  es la cantidad de agua aprovechable máxima, contenida entre la capacidad de campo y punto de marchitamiento, pudiéndose representar por  $HAm$ .

Resulta entonces:

$$\frac{Et_i}{Etp_i} = \left(\frac{HAa}{HAm}\right) Ks_i Etp_i \quad (2.1.1.2.3.)$$

Palacios (20), trabajando con los datos de varios experimentos realizados en Chapingo, México, encontró que la relación entre el coeficiente  $Ks_i$  y la humedad aprovechable, es una función lineal de dicha humedad:

$$Ks_i = \frac{1}{-1 + K \left(\frac{1}{HA_i}\right) - 1} \quad (2.1.1.2.4.)$$

Donde:

$K$  = Coeficiente que aparentemente es una función de la tasa de evaporación.

$HA_i$  = Contenido de humedad del suelo en el período  $i$  (adimensional).

Norero (18), propone una ecuación de tipo exponencial que relaciona la evapotranspiración de los cultivos y la humedad del suelo, la cual ha probado ajustarse bien a una amplia gama de situaciones climáticas, edafológicas y de cultivos:

$$\frac{Et}{Et_x} = \frac{1}{1 + \left(\frac{T}{C}\right)^K} \quad (2.1.1.2.5.)$$

Donde:

$E_{tx}$  = Tasa de evapotranspiración máxima.

$T$  = Potencial hídrico total del suelo (expresado como succión).

$C$  = Constante de integración.

$k$  = Factor de proporcionalidad.

Este mismo autor (18), muestra en la figura 2.1.1.2.1., curvas típicas de suelo, cultivos y climas dados por esta expresión 2.1.1.2.5., donde se indica que no existe una relación directa entre la humedad del suelo y el uso del agua por las plantas.

Marinato (15), calibró la ecuación de Norero, para el cultivo de trigo en Chapingo, México, resultando la siguiente expresión:

$$\frac{E_t}{E_v} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{9.7087}\right)^{0.9348}} \quad (2.1.1.2.6.)$$

Donde:

$E_t$  = Tasa de evapotranspiración real del cultivo.

$E_v$  = Evaporación de tanque tipo "A".

Salter y Goode, mencionados por Palacios (21), después de analizar múltiples experimentos de riego en el cultivo de la caña de azúcar, concluyen que pueden diferenciarse claramente tres etapas en el desarrollo de este cultivo: (1) la fase formativa o de amacollamiento, que dura de la siembra hasta el cuarto mes, (2) la etapa de crecimiento intensivo (de 150 a 270 días de duración dependiendo de la variedad) y (3) la etapa de maduración. Según sus observaciones, este cultivo es especialmente sensitivo al déficit hídrico del suelo durante la primera etapa y en la primera mitad de la segunda.

## \*2.2. Funciones de Producción en Caña de Azúcar.

Palacios (21), define a las funciones de producción como un modelo que representa un sistema de producción, que está dado a través de

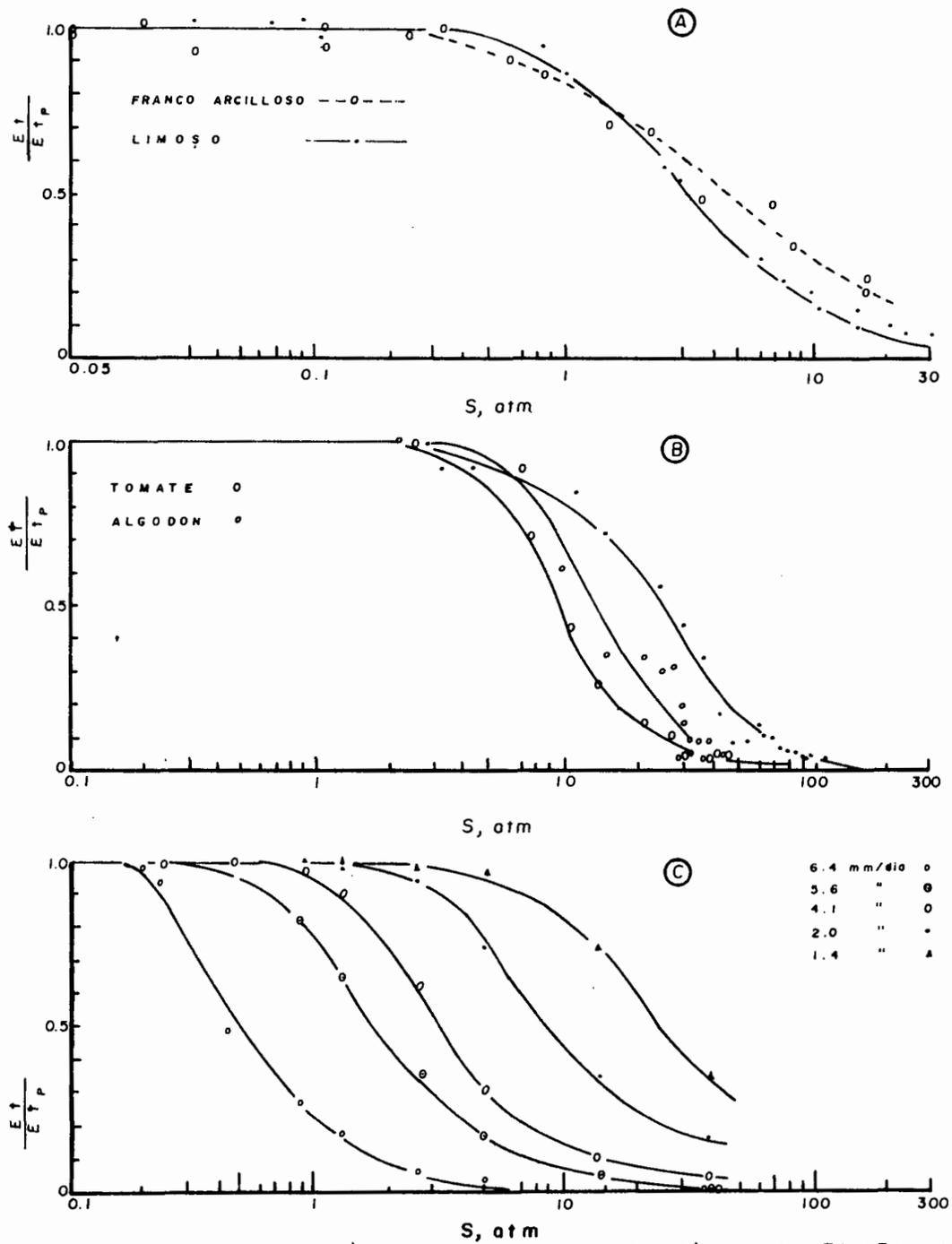


Fig. 2.1.1. 2.1. Relación entre la evapotranspiración relativa  $E_t / E_{tp}$  y la succión del suelo,  $S$ . **(A)** influencia del tipo de suelo (clima y cultivo trigo) constantes; Norero, 1969). **(B)** influencia del cultivo (clima y suelo, constantes; Slatyer, 1957). **(C)** influencia del clima - (suelo y cultivo maíz) constantes. (Tomados de Norero, Sch. A., Concepto Dinámico de Humedad Disponible y su Estimación para fines Técnicos", V Jornadas Venezolanas de Riego, Caracas, CIDIAT, Merida, Venezuela).

relaciones empíricas que generalmente se obtienen mediante análisis de regresión entre una variable dependiente y varias variables independientes.

Por su parte, Boumol (1), define a las funciones de producción como la información tecnológica que establece la relación funcional entre la cantidad máxima de producto obtenido y el empleo de cantidades conocidas de varios insumos.

Heady y Dillon, citados por Enrly (6), hacen una revisión de la historia de las funciones de producción en la agricultura, que datan desde la "Ley del Mínimo" de Von Liebig en 1855. Para establecer estas funciones se han empleado diversas formas algebraicas, incluyendo la logarítmica, exponencial, hiperbólica y cuadrática.

Enrly (6), establece que la ecuación que permite obtener la productividad marginal (producto obtenido por un incremento de insumo) es la polinomial general y la forma cuadrática en particular. Señala además, que la disminución del rendimiento debido a una aplicación excesiva de agua, se ha observado en muchos cultivos agrícolas y ha permitido adoptar la ecuación cuadrática como el modelo de insumo-producto para la respuesta del rendimiento de la caña de azúcar al consumo de agua.

Sanderson (27), menciona que desde las investigaciones preliminares hasta el presente, el agua se ha estudiado ampliamente como un insumo en la producción de la caña de azúcar. Cita varios estudios pioneros de las relaciones agua-rendimiento en la producción de la caña de azúcar. En un primer trabajo, se condujo una comparación gráfica del rendimiento y series de clima; como resultado se obtuvo una ecuación de producción de tipo lineal que relacionó el rendimiento de azúcar como una función de la precipitación. El segundo fué un estudio del trabajo de Walter, en Mauritius, reportado en 1910, en el cual los resultados de precipitación efectiva y temperatura, se determinaron mediante análisis de regresión. Un tercer trabajo fué el de Koerig, en Mauritius, reportado en 1929; se ajustó una función aritmética logarítmica que relacionó la altura de planta con el déficit de humedad del suelo.

Recientes investigaciones son citadas y discutidas por Enrly (6), entre las que sobresalen las realizadas en Hawai por Chang et al, quienes revisaron las funciones de respuesta en la caña de azúcar, relacionando el déficit de agua y evapotranspiración potencial. Estos Autores mencionan también los trabajos realizados en la Extación Experimental de la Asociación de Cultivadores de Caña de Hawai (HSPA), sobre el efecto diferencial de las deficiencias de humedad en el suelo, en un estado inicial de crecimiento y sus efectos tardíos sobre el crecimiento de la caña de azúcar. Por último, mencionan los trabajos realizados en la Estación Experimental de la Asociación Azucarera de Sudafrica (SASA), en donde se obtuvieron ecuaciones de regresión lineal para el rendimiento de la caña de azúcar como una función lineal del agua total aplicada; obteniéndose relaciones que proporcionaron un incremento en el rendimiento marginal de 0.79 toneladas de caña por 101.17 m<sup>3</sup> de agua y 0.12 toneladas de sacarosa.

Este mismo Investigador (6), hace un análisis y revisión amplia de la literatura publicado sobre las funciones de respuesta en la caña de azúcar, presentando una tabla con la siguiente información: El Investigador, la fecha de publicación, el lugar de la investigación, descripción de la variable dependiente e independiente y el coeficiente para cada una de las regresiones lineales o cuadráticas de los datos publicados.

Igualmente, este Autor (6), reporta los resultados obtenidos en varios experimentos y ensayos, en los que se controló la aplicación del agua de riego en el cultivo de la caña de azúcar en Filipinas. En estos trabajos, los datos obtenidos se analizaron mediante técnicas de regresión por mínimos cuadrados, para generar la ecuación cuadrática que estima la superficie de respuesta del rendimiento de la caña de azúcar al recurso agua como insumo:

$$Y = a_0 + a_1X + a_2X^2$$

Donde:

Y = Rendimiento final.

X = Cantidad efectiva de agua.

La figura 2.2.1. resume los resultados experimentales promedios para los tres componentes del rendimiento de la caña de azúcar, como una función de la precipitación efectiva estimada.

Chang et al (3), encontró que los rendimientos máximos en caña de azúcar, son obtenidos con consumos de agua semejantes al valor de la evapotranspiración potencial. De esta manera, establece que si el rendimiento potencial puede ser expresado como una función de la evapotranspiración potencial, entonces el rendimiento actual puede expresarse como una función de la evapotranspiración real o actual, expresado en la siguiente ecuación:

$$Y_a/W = F (0.13 + 2.83A - 1.82A^2) \quad (2.2.2.)$$

Donde:

Y<sub>a</sub> = Rendimiento actual.

W = Evapotranspiración actual.

F = Factor empírico.

A = Evapotranspiración actual/evapotranspiración potencial.

### 2.3. La Precipitación Efectiva.

Para Hershfield (11), la lluvia efectiva es la porción de la lluvia total ocurrida durante el ciclo vegetativo del cultivo, que es utilizada para satisfacer sus necesidades hídricas. Esta definición difiere de la dada por Blaney y Criddle (1950), Heermann y Gardner (1970), Pierce (1960) y Thompson (1964), citados por Heermann y Shull (10), quienes definen a la lluvia efectiva como la lluvia total ocurrida, menos las pérdidas por escurrimiento superficial y percolación profunda.

Shanron et al, citado por Palacios (22), define a la lluvia

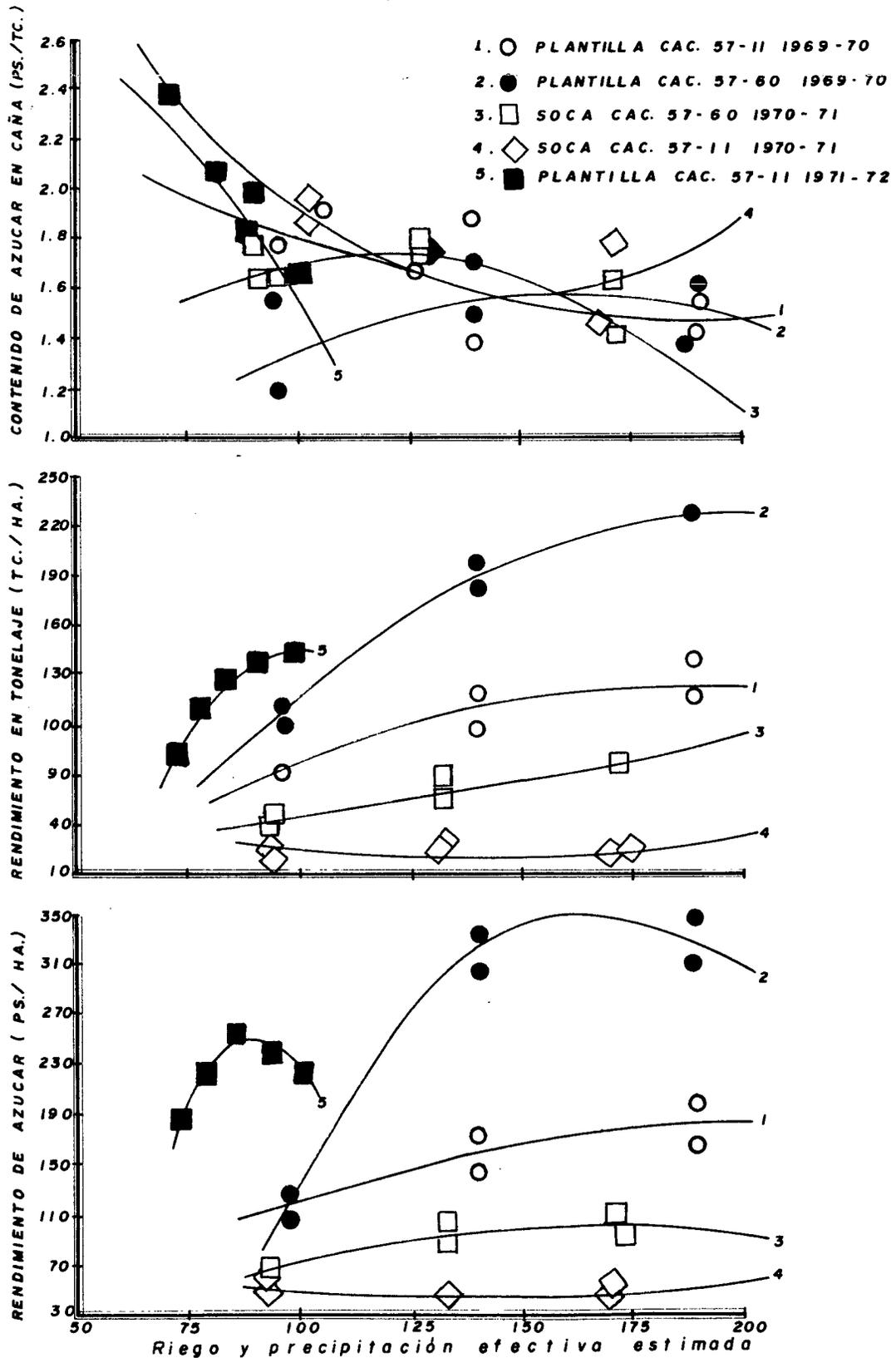


Fig. 2. 2. 1. Relaciones agua- rendimiento usando precipitación efectiva estimado. (Tomado de Enrly, A.C. "The Yield Response of Sugarcane to Irrigation in the Philippines, Proc. ISSCT).

efectiva como aquella proporción de la precipitación total, que es almacenada al nivel del sistema radical del cultivo y tiene una estrecha relación con el tipo de cultivo y el tipo de suelo, así como la distribución, cantidad e intensidad de la misma.

### 2.3.1. Métodos para la Estimación de la Lluvia Efectiva.

Para la estimación de la lluvia efectiva, se han propuesto diferentes métodos, pero en la mayoría de ellos, los factores que intervienen presentan gran complejidad, por lo que, es conveniente adoptar el más práctico, ya sea, en cultivos de temporal o bajo riego (7).

Blaney y Criddle, citados por González (7), propusieron un método práctico y fácil de aplicar, que estiman la precipitación efectiva y el cual consiste en aplicar un coeficiente de aprovechamiento diferente a cada pulgada de lluvia observada, según el cuadro 2.3.1.1.

Zierol (29), han presentado un método para calcular la lluvia efectiva, que consiste básicamente en restarle a la precipitación observada, la lluvia que se pierde por escurrimiento superficial, así como la lluvia perdida por infiltración profunda.

Morán (16), comparó los resultados obtenidos en tres regiones del país, con el método del Servicio de Conservación del Suelo de EE. UU., presentado por Hargreaves, el método de Zierol y el método de Prescott. La conclusión fué, que el método de Prescott, estima valores bajos de lluvia efectiva, y en cambio, los dos primeros métodos son igualmente aceptables.

Palacios (22), aplicando el método de Zierol, obtuvo fórmulas para la estimación de la lluvia efectiva:

Para lluvias menores de 25 mm.

$$La = Lp - 0.05 Lp^2 \quad (2.3.1.)$$

**Cuadro 2.3.1.1. Coeficiente de aprovechamiento de acuerdo a la lluvia total registrado (Blaney y Criddle).**

LLUVIA TOTAL OBSERVADA		COEFICIENTE	LLUVIA EFECTIVA ACUM.	
PULGADAS	mm		PULGADAS	mm
1	25	0.95	0.95	24
2	50	0.90	1.85	46
3	75	0.82	2.67	66
4	100	0.65	3.32	82
5	125	0.45	3.77	93
6	150	0.25	4.02	99
6	150	0.25		

(Fuente: Palacios, V.E., "Manual de Operación de Distritos de Riego," Departamento de Irrigación, E.N.A., Chapingo, México).

Para lluvias mayores de 25 mm.

$$La = 1.27 Lp^{0.75} - 0.0806 Lp^{1.5} \quad (2.3.2.)$$

Donde:

La = Precipitación efectiva en cm.

Lp = Precipitación total en cm.

Este mismo Autor (22), señala que este método puede aplicarse a períodos cortos máximos de diez días, por lo que se requieren estimaciones de lluvia probable para diez días; permitiendo el cálculo de la lluvia efectiva con probabilidades de ocurrencia.

Prescott y Anderson, citados por Palacios (23), señalan que puede considerarse como lluvia efectiva, el 80 % de los valores mensuales de precipitación probable, siempre y cuando estas precipitaciones sean superiores al valor obtenido por la siguiente ecuación:

$$P = 0.9 E^{0.75} \quad (2.3.3.)$$

Donde:

P = Precipitación.

E = Evaporación.

Hargreaves (9), indica que el promedio mensual de lluvia efectiva, no puede exceder el promedio total de la lluvia mensual, ni el uso consuntivo mensual; cuando la lluvia efectiva excede a cualquiera de estos valores, se debe reducir al menor de ellos.

Nava (17), usó el método de balance como medio de evaluación de la lluvia efectiva, contabilizando las aplicaciones del agua al suelo por riego y/o lluvia y la absorción de agua por los cultivos, considerando dos casos, que pueden ocurrir de acuerdo a las condiciones de humedad del suelo en el momento de ocurrencia de la lluvia:

1). Cuando  $Ld - UC + Pt - LA$ ; en este caso la (2.3.4.)

$$Pe = Pt \quad (2.3.5.)$$

2). Cuando  $Ld - UC + Pt - LA$ ; en este caso la (2.3.6.)

$$Pe = LA - Ld + UC \quad (2.3.7.)$$

Donde:

$Pe$  = Precipitación efectiva.

$Pt$  = Precipitación total.

$Ld$  = Lámina disponible.

$LA$  = Lámina fácilmente aprovechable.

$UC$  = Uso Consuntivo.

Este Autor (17), encontró que no es conveniente evaluar la lluvia efectiva en base a un porcentaje de la lluvia total, ya que existen variaciones en la distribución de las lluvias y en el contenido de humedad en el suelo al momento de la ocurrencia de las precipitaciones.

Riestra (25), trabajando en el cultivo de caña de azúcar, obtuvo una fórmula empírica que estima la precipitación efectiva mensual, tomando en consideración la precipitación observada, la lámina de riego aplicada, la evapotranspiración máxima del cultivo, así como el número de días en que ocurrieron lluvias. Para la estimación de la precipitación efectiva, usó análisis de regresión lineal y la función que arrojó un mayor coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.99$ ) únicamente consideró a la evapotranspiración máxima del cultivo, la precipitación observada y el número de días en que ocurrieron lluvias:

$$Pe_i = \frac{Etx_i}{10.96/Nd_i + 0.945 (Etx_i/Pr_i)} \quad (2.3.8.)$$

Donde:

$Pe_i$  = Precipitación efectiva en el mes  $i$ , (mm).

$Etx_i$  = Evapotranspiración máxima de la caña de azúcar en el mes  $i$ , (mm).

$Nd_i$  = Número de días en que ocurrieron lluvias durante el mes  $i$ .

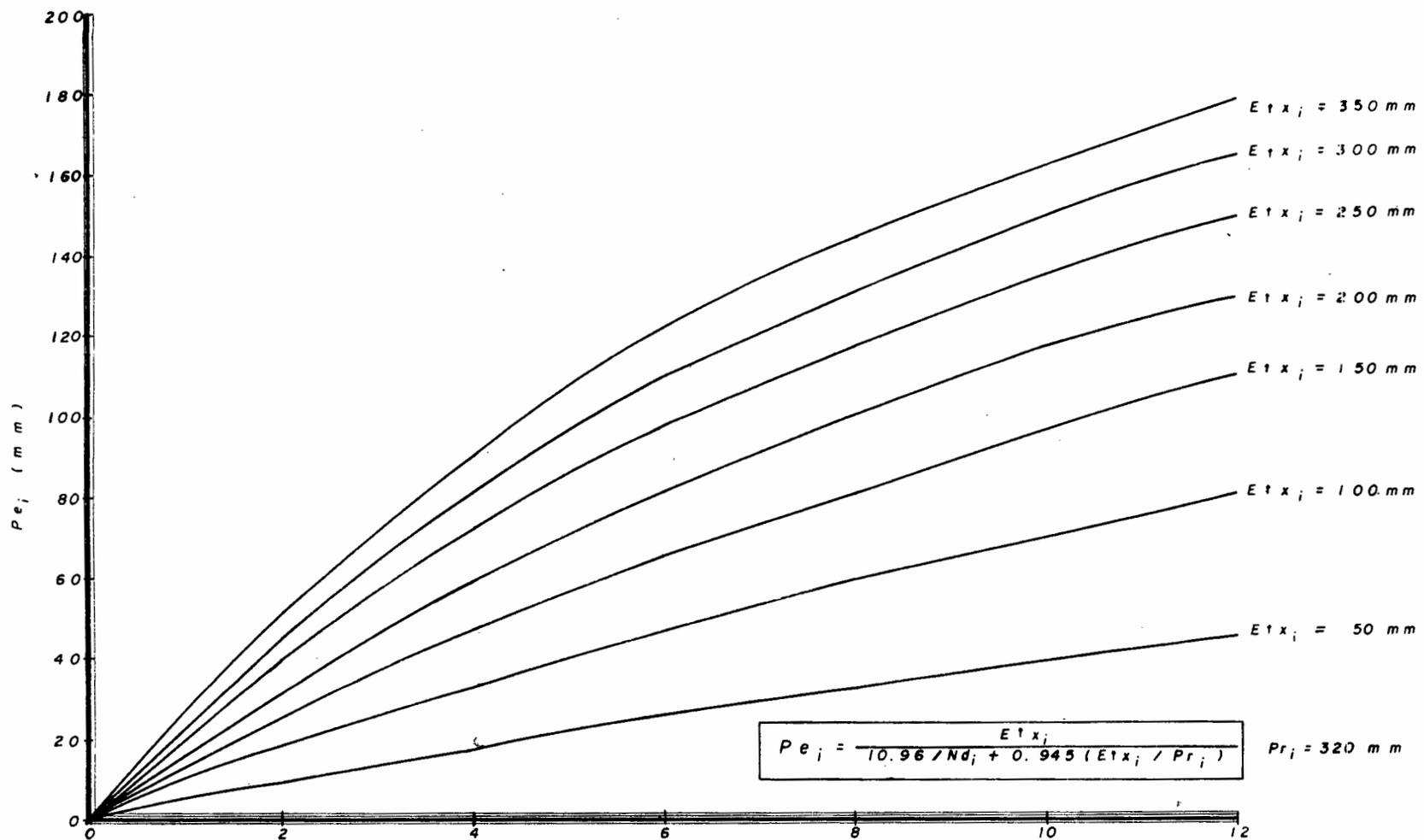


Fig. 2.3.1.2. Variación de la precipitación efectiva ( $P_{e_i}$ ) en función de diferentes valores de  $E_t x_i$  y  $N d_i$  para una lluvia observada ( $P r_i$ ) de 320 mm. (Tomado de Riestra, D. D. "Respuesta del Rendimiento de la Caña de Azúcar al Régimen de Evapotranspiración Máxima", C. P., Chapingo, México).

$Pr_i$  = Precipitación observada en el mes  $i$ , (mm).

En la ecuación (2.3.8.) y en la figura (2.3.1.2.), este Autor establece que para una lluvia observada mensual de 320 mm., la precipitación efectiva aumentará a medida que aumenten el número de días en que ocurran lluvias, al igual que la evapotranspiración máxima de la caña de azúcar.

### III.- MATERIALES Y METODOS.

#### 3.1. Ubicación del Sitio Experimental.

El presente trabajo se realizó en los terrenos del Centro Regional de Enseñanza, Capacitación e Investigación para el Desarrollo Agropecuario del Trópico Húmedo (CRECIDATH) del Colegio de Postgraduados, Chapingo, México; el cual se localiza en la costa central del Estado de Veracruz, a los 19° 10' de latitud Norte y 96° 16' de longitud al Este del meridiano de Greenwich, con una elevación de 12 metros sobre el nivel del mar. (Figura 3.1.1.).

#### 3.2. Características Climatológicas.

De acuerdo al sistema de clasificación de Köeppen, el clima de esta zona, es representado por Awg: tropical lluvioso de pradera, lluvia periódica, invierno seco con temperatura máxima anterior al solsticio de verano (12).

De acuerdo a Thornthwaite, se clasifica como CAW'S: provincia de humedad C, sub-humedad, vegetación bosques. Humedad deficiente en Invierno y Primavera. Provincia de temperatura A tropical. Sub-provincia de temperatura a, concentración en el verano entre 25 y 35 % (13).

La época de lluvias se presenta en los meses de Junio a Octubre, siendo el mes más lluvioso Julio, con un promedio de 17.9 días con lluvia y precipitación total media de 268.8 mm. Las máximas precipitaciones horarias registradas son hasta de 70.0 mm.

A continuación se dan los promedios anuales de temperatura, precipitación, evaporación y humedad relativa:

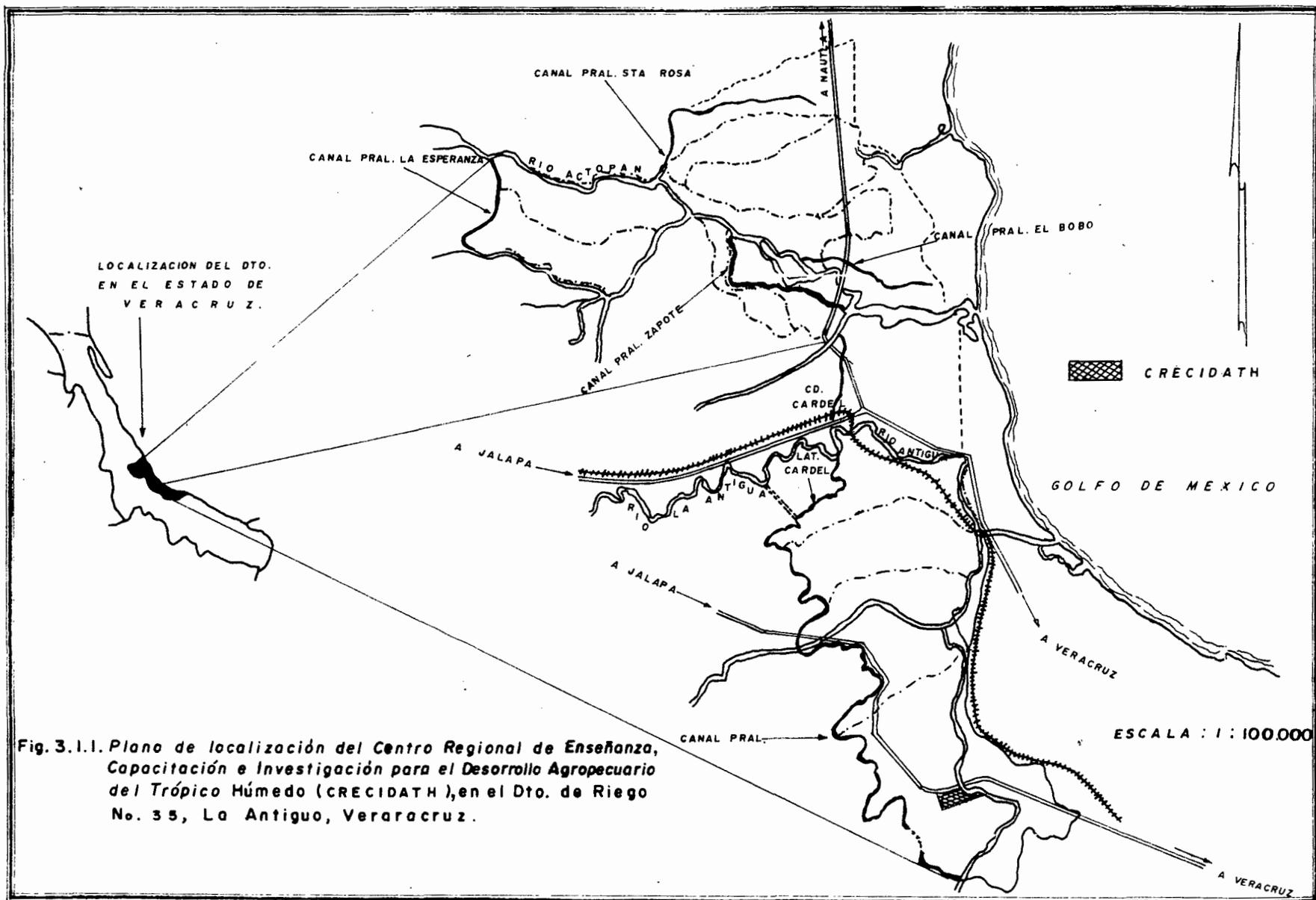


Fig. 3.1.1. Plano de localización del Centro Regional de Enseñanza, Capacitación e Investigación para el Desarrollo Agropecuario del Trópico Húmedo (CRECIDATH), en el Dto. de Riego No. 35, La Antigua, Veracruz.

Temperatura media anual. - - - - -	25.4°C
Temperatura media del mes más frío.- - - -	21.4°C
Temperatura media del mes más caliente.- -	28.2°C
Precipitación media anual. - - - - -	1,285.8 mm
Evaporación media anual. - - - - -	1,544.0 mm
Humedad relativa media. - - - - -	81.3 %

Entre los meses de Noviembre a Marzo, se presentan masas de aire continental frío, cargadas con humedad recogida en el Golfo, conocidas como "Nortes", que provocan gran nebulosidad y descenso de temperatura, llegando a alcanzar velocidades hasta de 120 Km/hora, provocando el acame de los cultivos y desgarramiento de la lámina foliar, desprendimiento de la flor y el fruto de las especies frutícolas que prosperan en la región, especialmente del mango, cuya floración y maduración coinciden con su presencia.

### 3.3. Características del Suelo en el Area Experimental.

Según Kourouma (13), los suelos del área experimental pertenecen a la Serie San Rafael, Variante San Rafael. Estos suelos son profundos o moderadamente profundos, de color café terroso, textura migajón arenoso en la superficie, cambiando paulatinamente a arcilla arenosa en el subsuelo y arena migajosa en la parte inferior del perfil, consistencia firme a friable en la superficie y firme en el subsuelo.

Son suelos sobre lomas de dunas antiguas, tienen una topografía de lomerío con pendientes suaves y buen drenaje del perfil. Estos suelos se han formado a partir de la intemperización de la arenas depositadas por la acción conjunta de corrientes y vientos marinos. En la figura 3.3.1. se aprecia el perfil típico de la variante San Rafael, de la Serie San Rafael.

#### 3.3.1. Análisis Físicos.

##### 3.3.1.1. Textura.

Se determinó para los espesores 0 - 20, 20 - 40, 40 - 60, 60 - 80, 80 - 100, 100 - 120 y 120 - 140 cm. por medio del Hidrómetro de Boyoucos; los resultados se presentan en el cuadro 3.3.1.1.1.

#### 3.3.1.2. Densidad Aparente.

Al hacer las excavaciones en los lugares donde quedarían instalados los tanques lisimétricos, se encontró un perfil sumamente densificado, por lo que al rellenado de éstos, se trató de darle un valor "natural" a la densidad aparente en todo el perfil.

#### 3.3.1.3. Constantes de Humedad.

La capacidad de campo (C.C.) y el punto de marchitamiento permanente (P.M.P.) se determinaron por la olla y membrana de presión, a 0.3 y 15 atmósferas, respectivamente. Los resultados se registran en el cuadro 3.3.1.3.1.

#### 3.3.1.4. Curvas de Tensión de Humedad del Suelo.

Las curvas de tensión de humedad del suelo, se obtuvieron por el procedimiento propuesto por Palacios y Jaspeado (24). Estas curvas se presentan en las figuras 8.1., 8.2., 8.3. y 8.4. del apéndice.

#### 3.4. Medición de Parámetros.

Una vez que el cultivo hubo cubierto por completo el suelo (cubrió campo), se hicieron mediciones de los Parámetros siguientes:

- a). Altura final de la planta (cm )
- b). Grozor de tallos, desde el inicio de formación de canutos, desde cierre de campo hasta la cosecha, con mediciones semanales.
- c). Número de entrenudos por tallo, con mediciones semanales.
- d). Longitud de canuto, con observaciones semanales.
- e). Número de tallos por  $m^2$ , con observaciones semanales.

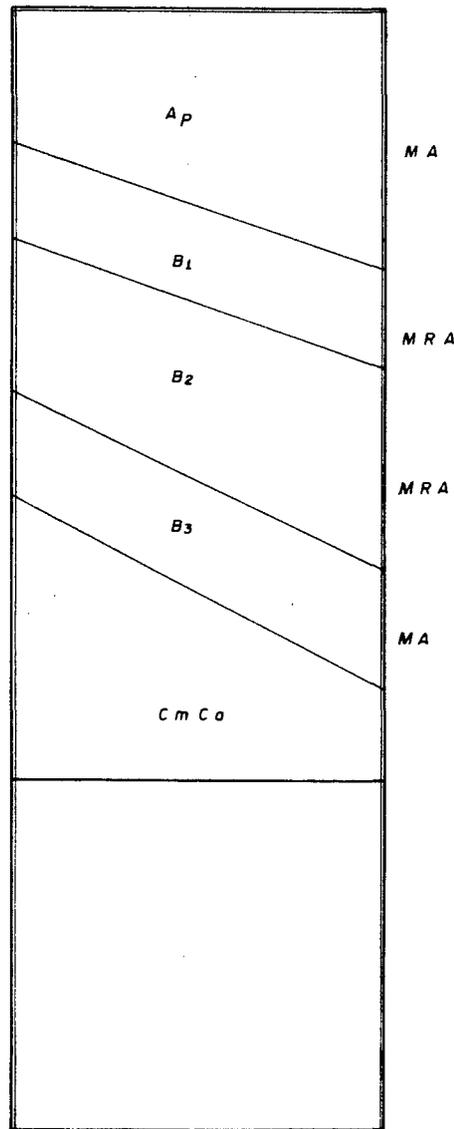


Fig.3.3.1. Perfil típico de la variante San Rafael, serie-San Rafael.

Cuadro.3.3.1.1.1. Textura del suelo en los lisímetros de balance hídrico.

ESPESOR (cm)	ARENA (%)				ARCILLA (%)				LIMO (%)				CLASIFICACION TEXTURAL			
	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4
0-20	44.60	46.60	45.32	47.32	35.40	35.40	31.96	30.68	20.00	18.00	22.72	22.00	MIGAJON ARCILLOSO	MIGAJON ARCILLO ARENOSO	MIGAJON ARCILLOSO	MIGAJON ARCILLO ARENOSO
20-40	48.68	40.60	49.32	41.32	41.40	41.40	33.96	38.68	14.00	18.00	16.72	20.00	MIGAJON ARCILLO ARENOSO	ARCILLA	MIGAJON ARCILLO ARENOSO	MIGAJON ARCILLOSO
40-60	40.60	34.60	41.32	41.32	47.40	47.40	39.96	42.68	16.00	18.00	18.72	16.00	MIGAJON ARCILLOSO	ARCILLA	MIGAJON ARCILLOSO	ARCILLA
60-80	34.60	28.60	37.32	37.32	53.40	53.40	44.68	46.68	16.00	18.00	18.00	16.00	ARCILLA	ARCILLA	ARCILLA	ARCILLA
80-100	32.60	36.60	37.32	37.32	41.40	41.40	50.68	48.68	20.00	22.00	12.00	14.00	ARCILLA	ARCILLA	ARCILLA	ARCILLA
100-120	44.60	44.60	43.32	43.32	35.40	35.40	36.68	44.68	22.00	20.00	20.00	12.00	MIGAJON ARCILLOSO	MIGAJON ARCILLOSO	ARCILLA	ARCILLA
120-140	40.60	46.60	45.32	45.32	35.40	35.40	38.68	38.68	24.00	18.00	16.00	16.00	MIGAJON ARCILLOSO	MIGAJON ARCILLOSO	MIGAJON ARCILLOSO	MIGAJON ARCILLOSO

- f). Número de tallos muertos por  $m^2$ , con observaciones semanales.
- g). Número de hojas por planta, con mediciones semanales.
- h). Número de hojas por  $m^2$ , con observaciones semanales.
- i). Índice de área foliar (el área total de las hojas sustentada sobre una unidad de área del terreno), con mediciones semanales.
- j). Observaciones de grados brix, sacarosa, pureza y humedad en la sección 8 - 10 del tallo, a partir de los diez meses de edad del cultivo.
- k). Rendimiento de caña en toneladas por hectárea.
- l). Rendimiento en toneladas de azúcar por hectárea.

### 3.5. Medición del Consumo de Agua por el Cultivo.

Para la medición del consumo de agua por el cultivo, se utilizaron los lisímetros de balance hídrico, contabilizando los volúmenes aplicados por riego y las aportaciones de lluvias y restando a éstos, los volúmenes de escurrimiento superficial (por lluvias) y los volúmenes excedentes por percolación profunda (por riego y/o lluvias). Los consumos de agua por el cultivo, se determinaron por simple diferencia entre las entradas y salidas de humedad, en dos procesos de drenado, según la ecuación de balance:

$$Et_i = R_i + P_i - ES_i - PP_i \quad (3.5.1.)$$

Donde:

$Et_i$  = Evapotranspiración o volumen de agua consumido por el cultivo en el período  $i$ , (lámina/tiempo).

$R_i$  = Volumen aplicado por riego en el período  $i$ , (lámina/tiempo).

$P_i$  = Volumen aportado por las lluvias en el período  $i$ , (lámina/tiempo).

$ES_i$  = Volumen perdido por escurrimiento superficial en el período  $i$ , (lámina/tiempo).

- Cuadro.3.3.1.3.1. Constantes de humedad del suelo de los lisímetros de balance hídrico.

ESPESOR ( cm )	P <sub>s</sub> ( % )				C. C. ( % )				P. M. P. ( % )				H. A. ( % )			
	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4
0 - 20	43.48	42.49	47.62	48.64	25.84	25.48	26.79	25.57	13.60	13.41	14.10	13.46	12.24	12.07	12.69	12.11
20 - 40	41.42	64.84	42.02	45.11	26.49	26.27	22.50	26.12	13.94	13.82	11.84	13.75	12.55	12.45	10.66	12.37
40 - 60	54.29	49.54	53.11	57.61	29.19	32.32	27.12	31.01	15.36	17.01	14.27	16.32	13.85	15.31	12.85	14.69
60 - 80	73.84	86.61	64.18	72.19	35.11	37.28	30.55	35.18	18.48	19.62	16.07	18.51	16.63	17.66	14.48	16.67
80 - 100	72.98	70.33	82.25	87.03	36.44	34.04	41.17	41.64	19.17	17.92	21.66	21.91	17.27	16.12	19.51	19.73
100 - 120	60.80	65.46	68.12	72.40	32.28	33.24	32.06	36.98	16.99	17.49	16.87	19.46	15.29	15.75	15.19	17.52
120 - 140	58.25	64.25	61.94	60.74	32.02	33.50	32.20	32.27	16.85	17.63	16.95	16.98	15.17	15.87	15.95	15.29

$PP_i$  = Volumen perdido por percolación profunda en el período  $i$ , (lámina/tiempo).

### 3.6. Características de los Lisímetros de Balance Hídrico y Técnica de Llenado.

Los lisímetros de balance hídrico empleados, consisten de un tanque de fierro de un cuarto de pulgada de espesor, de 2.50 metros de largo, por 2.00 metros de ancho y 1.70 metros de profundidad, para almacenar un volumen de suelo de  $9.0 \text{ m}^3$ . Disponen de un sistema de riego a base de tubería galvanizada, un depósito para cuantificar las entradas de agua por riego y lluvia y otros dos depósitos para recoger y cuantificar los volúmenes excedentes por percolación profunda y escurrimiento superficial.

Previamente a la instalación de los lisímetros, se realizó la excavación del terreno, separando el suelo extraído por espesores de 20 cm. Posteriormente los tanques lisimétricos fueron depositados en la excavación con su superficie abierta a ras del terreno, depositando en el fondo de cada uno de ellos, una capa de gravilla y arena de río de 10 cm. de espesor; seguidamente se procedió a rellenar los tanques por capas de 20 cm., guardando éstas la misma distribución original. La forma en que quedaron instalados los lisímetros, se muestra en la figura 3.6.1.

### 3.7. Siembra.

Se sembró cuando el suelo de los lisímetros se encontraba a capacidad de campo, cubriendo la "semilla" con una capa de suelo de 5 a 7 cm. en forma manual, el día 4 de Abril de 1979, se utilizó la variedad de caña de azúcar B.4362 de buena capacidad de rendimiento; su madurez industrial la obtiene aproximadamente a los 12 - 13 meses; esta variedad proviene de la cruce de dos variedades: la B.37161 y la POJ.2878 y su origen es Barbados (26).

En cada lisímetro se sembraron 2 surcos a cordón doble con

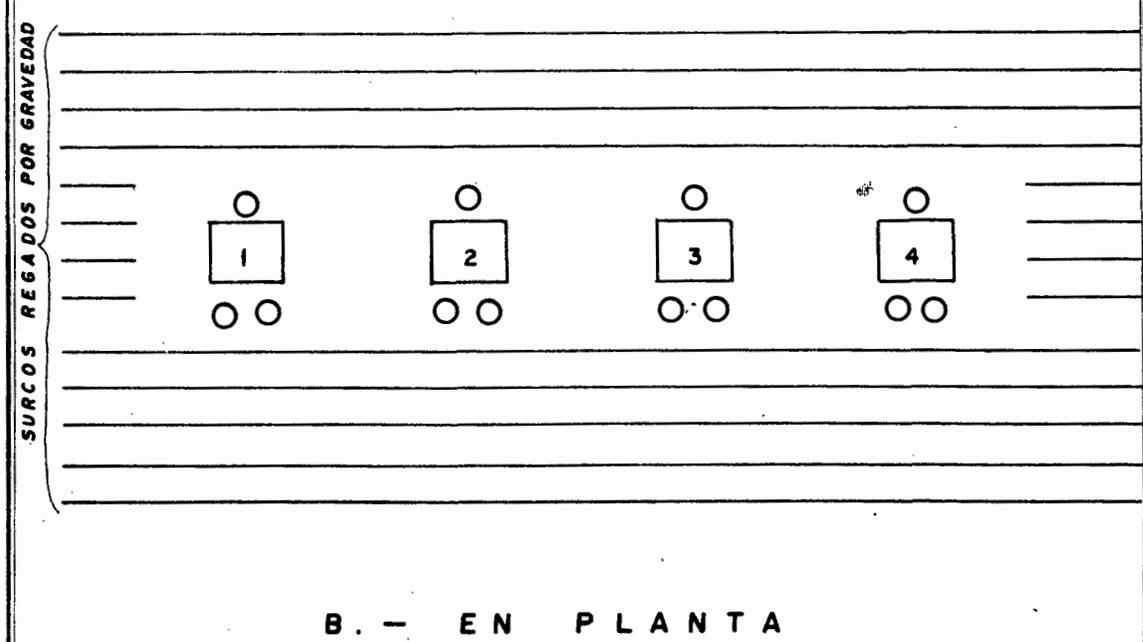
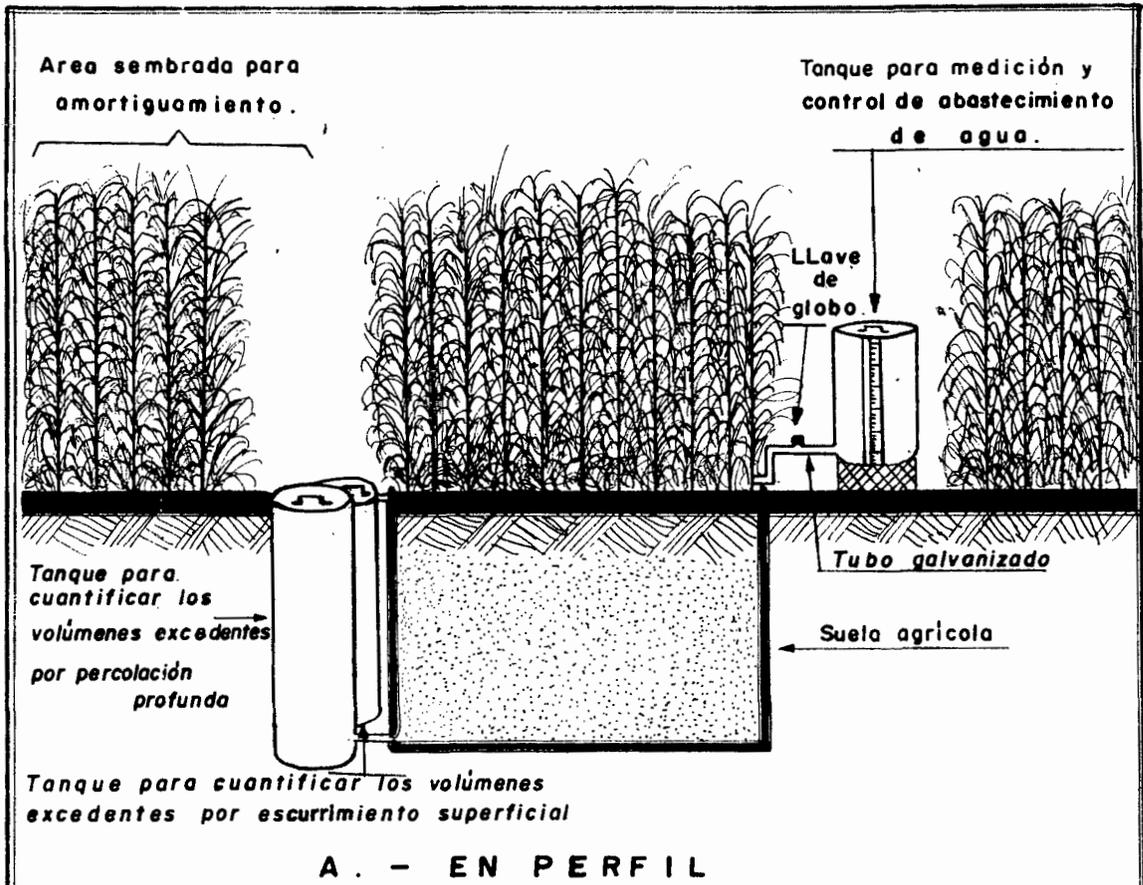


Fig. 3.6.1. Forma en que quedarón instalados los lisímetros de balance hídrico.

trozos de caña de 20 - 30 cm de longitud, asegurando de esa manera que hubiera buena población de tallos molederos.

### 3.8. Fertilización.

Se fertilizó manualmente con la dosis de 170-70-70; la mitad del nitrógeno, todo el fósforo y todo el potasio se aplicaron en la siembra y la otra mitad del nitrógeno se aplicó en el aporque.

### 3.9. Riegos.

Los riegos se aplicaron cuando en los lisímetros 1, 2, 3 y 4 se tenía el 20, 40, 60 y 80 % de la humedad aprovechable, respectivamente, lo que nos permitió obtener cuatro diferentes regímenes de evapotranspiración en la caña de azúcar. El control de los riegos en los lisímetros, se efectuó por método gravimétrico.

El momento del riego se determinó de acuerdo a la siguiente expresión:

$$MR = \frac{\sum_{i=1}^n Lc}{\sum_{i=1}^n Lm_a} \times 100 = \% HA \quad (3.9.1.)$$

Donde:

MR = Momento de Riego.

$\sum_{i=1}^n Lc$  = Sumatoria de las láminas consumidas por el cultivo en las capas del perfil del suelo de los lisímetros.

$\sum_{i=1}^n Lm$  = Sumatoria de las láminas máximas almacenadas en las capas del perfil del suelo de los lisímetros.

% HA = Tratamiento de humedad aprovechable correspondiente a cada lisímetro.

### 3.10. Labores Culturales.

### 3.10.1. Control de Malas Hierbas..

Las malas hierbas se controlaron manualmente cada 30 días, evititando de esta manera que causaran problemas por competencia de agua, de luz y de nutrientes, permitiendo que las plantas se desarrollaran normalmente.

### 3.10.2. Control de Plagas y Enfermedades.

El control fitosanitario empezó antes de la siembra, cuando fue tratada la "semilla" a base de Malatión 50 % y Captán, 250 cm<sup>3</sup> y 1.0 Kg , respectivamente, en 100 litros de agua, dejando la semilla en la solución por un espacio de 15 minutos.

El 10 de Julio durante el período de lluvias se observó la aparición de la enfermedad conocida como "mancha café" (Cercospora longipes Butler) sobre las hojas, por lo cual se aplicó azufre, notándose un rápido control de esta enfermedad.

### 3.11. Datos Climatológicos.

Durante el desarrollo del experimento se tomaron datos diarios de temperatura, humedad relativa y evaporación en tanque tipo "A", estos datos se encuentran ubicados en el cuadro 8.1. del apéndice.

### 3.12. Cosecha.

La cosecha se realizó manualmente cuando la sección 8-10 del tallo presentó una humedad del 72 al 73 %, realizándose el pesado de los tallos molederos en una báscula de piso en el propio terreno.

#### IV.- RESULTADOS Y DISCUSION.

El análisis de los resultados de los datos de evapotranspiración y rendimiento en caña de azúcar, obtenidos en este cultivo, nos permite observar el efecto que tiene la humedad disponible en el suelo en la evapotranspiración del cultivo, y al mismo tiempo nos permite corroborar que la evapotranspiración está íntimamente relacionada con el rendimiento del cultivo.

A continuación presentamos los resultados acompañados de una breve discusión para cada uno de los conceptos en observación.

##### 4.1. Evapotranspiración Total en la Caña de Azúcar.

Los resultados finales de evapotranspiración obtenidos en la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico, en los que se probaron cuatro regímenes de humedad en el suelo (riego cuando se tenía el 20, 40, 60 y 80 % de humedad aprovechable en el lisímetro 1, 2, 3 y 4 respectivamente), se presentan en el cuadro 4.1.1. El análisis de estos resultados nos permite observar que la evapotranspiración registrada por la caña de azúcar durante todo su ciclo vegetativo, varió de acuerdo al contenido de humedad aprovechable en el suelo. En el mismo cuadro se incluye la evapotranspiración máxima de este cultivo, obtenida en un estudio lisimétrico realizado en los años 1977-1978 (25). De la comparación de los valores observados en ambos estudios, se desprende que la caña de azúcar desarrollada en suelos donde el contenido de humedad aprovechable se mantuvo en 20, 40, 60 y 80 % registró un 58, 64, 75 y 83 %, respectivamente, de la evapotranspiración desarrollada por este cultivo cuando en el suelo no se tuvo limitación de agua (evapotranspiración máxima).

##### 4.2. Evapotranspiración Mensual de la Caña de Azúcar.

Cuadro.4.1.1.Evapotranspiración total de la caña de  
azúcar, desarrollada en lisímetros -  
de balance hídrico.

TRATAMIENTO (% DE HUM. APROV.)	EVAPOTRANSPIRACION ( cm )
2 0	1 8 7 . 9 0 6
4 0	2 0 9 . 0 9 7
6 0	2 4 4 . 1 0 2
8 0	2 6 9 . 5 0 4
* Et x <sub>i</sub>	3 2 6 . 5 0 0

Et x<sub>i</sub> = Evapotranspiración máxima (25)

En el cuadro 4.2.1. se presentan los valores de la evapotranspiración mensual registrada por la caña de azúcar en los cuatro regímenes de humedad en el suelo en que constó el estudio. En este cuadro se observa que la evapotranspiración mensual varió de 10.0 cm en los dos primeros meses de su ciclo vegetativo, a 27.0 cm en los meses de máxima demanda (Octubre y Noviembre). Se compara también con la evapotranspiración máxima mensual (25), pudiéndose observar que en este último estudio, la máxima demanda evapotranspirativa se presentó en los meses de Julio y Agosto con valores de 35.23 y 38.12 cm respectivamente; aunque en general, los valores presentan una tendencia similar.

Con el objeto de apreciar más claramente la diferencia en la evapotranspiración de la caña de azúcar sujeta a diferentes regímenes de humedad en el suelo, se construyó la figura 4.2.1. con la evapotranspiración mensual acumulada para cada tratamiento, así como la evaporación mensual registrada en un tanque evaporómetro tipo "A", presentadas en el cuadro 4.2.2. En la figura se observa que a partir del mes de Julio, cuando el cultivo logra el cubrimiento total del suelo (cierra campo), y las lluvias se han establecido, la evapotranspiración de la caña de azúcar bajo los cuatro regímenes de humedad en el suelo, es superior a la tasa evaporativa de una superficie de agua libre, medida en tanque evaporómetro tipo "A".

#### 4.3. Evapotranspiración para Décimos de Desarrollo de la Caña de Azúcar.

Los valores de la evapotranspiración registrada para décimos de desarrollo por la caña de azúcar en los cuatro regímenes de humedad en el suelo, se presentan en el cuadro 4.3.1., en el que se observa que la tasa evapotranspirativa de este cultivo para décimos de desarrollo, varió de un mínimo de 13.0 cm a un máximo de 37.0 cm, valores registrados en los lisímetros 1 y 4 respectivamente (riegos cuando se tenía el 20 y 80 % de humedad aprovechable).

En los cuadros 4.2.2. y 4.3.1. y en la figura 4.2.1. se incluyen además los valores de la evapotranspiración máxima de la caña de azúcar (25), observándose que el consumo de agua varió de acuerdo a la disponibilidad de agua en el suelo

Cuadro.4.2.1. Evapotranspiración mensual de la caña de azúcar, desarrollada en -  
lisímetros de balance hídrico.

M E S	E V A P O T R A N S P I R A C I O N ( c m )				
	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	Et x <sub>1</sub> (77-78)
A B R I L	9.625	10.131	11.299	12.741	15.690
M A Y O	7.932	8.626	9.290	10.645	16.580
J U N I O	13.470	13.601	14.250	20.154	19.440
J U L I O	24.003	26.584	31.751	25.591	35.230
A G O S T O	12.095	12.816	19.568	17.741	38.120
S E P T I E B R E	11.590	11.610	13.160	16.150	33.970
O C T U B R E	20.106	21.654	24.279	27.678	33.440
N O V I E M B R E	17.514	18.963	26.632	25.455	13.630
D I C I E M B R E	17.493	18.769	17.349	23.182	29.570
E N E R O	13.671	14.167	17.096	19.357	21.500
F E B R E R O	14.293	18.273	18.716	19.171	13.720
M A R Z O	13.751	20.994	21.238	26.104	16.080
A B R I L	9.510	9.930	12.750	19.210	18.000
M A Y O	2.853	2.979	6.800	6.325	21.520
S U M A S	187.906	209.097	244.178	269.504	326.500

Et x<sub>1</sub>: Evapotranspiración máxima (25)

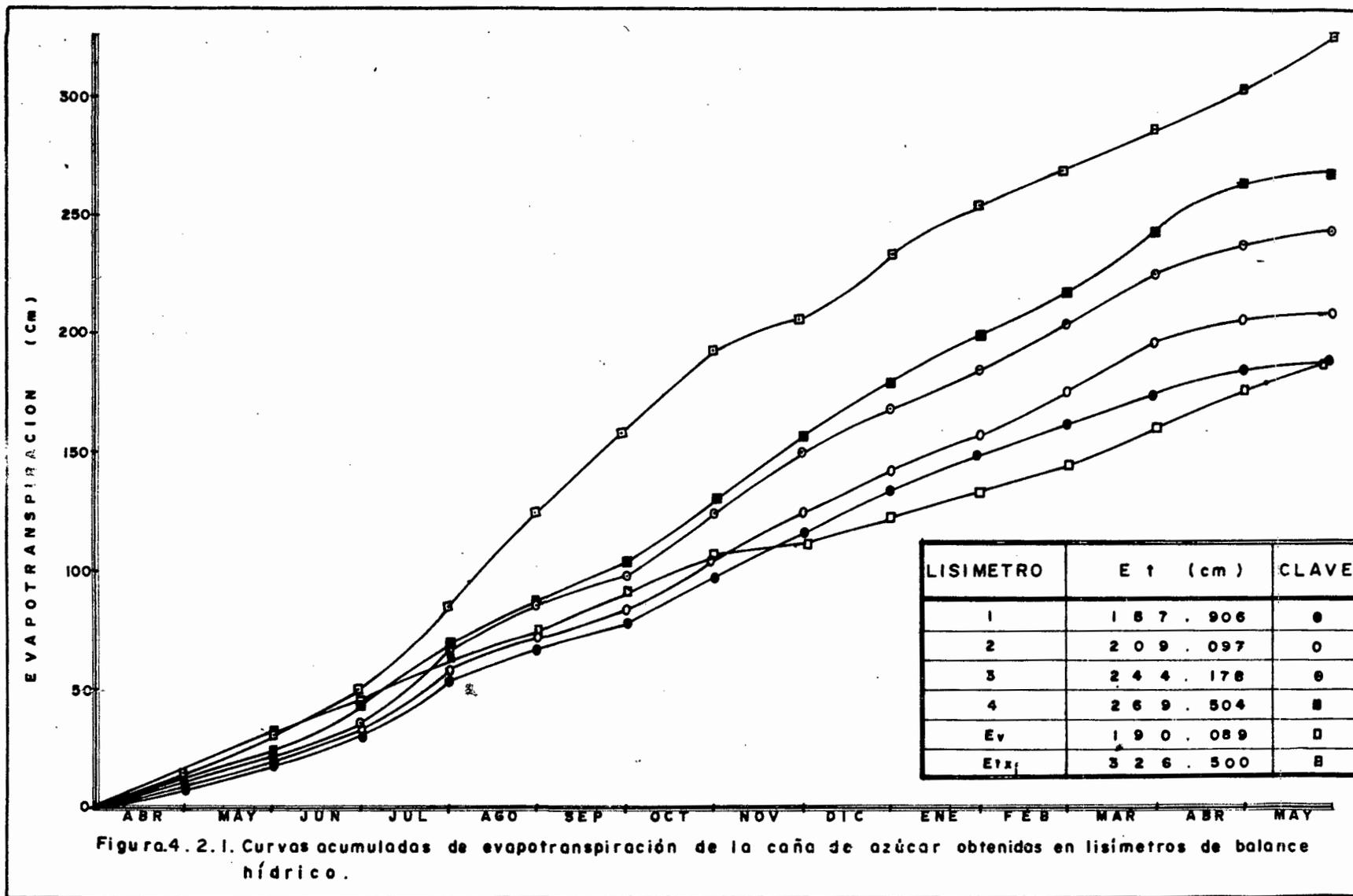


Figura.4.2.1. Curvas acumuladas de evapotranspiración de la caña de azúcar obtenidas en lisímetros de balance hídrico.

**Cuadro.4.2.2. Evapotranspiración mensual acumulada de la caña de azúcar desarrollada en lisímetros de balance hídrico y evaporación acumulada mensual registrada en un tanque evap. rómetro tipo "A".**

M E S	E V A P O T R A N S P I R A C I O N ( C m )					E V A P O R A C I O N ( C m )
	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	Et x <sub>i</sub> (77-78)	
ABRIL	9.625	10.131	11.299	12.741	15.690	15.833
MAYO	17.557	18.757	20.589	23.386	32.270	31.169
JUNIO	31.027	32.358	34.839	43.540	51.710	44.381
JULIO	55.030	58.942	66.590	69.131	86.940	61.265
AGOSTO	67.195	71.758	86.158	86.872	125.060	75.775
SEPTIEMBRE	78.715	83.368	99.318	103.022	159.030	90.650
OCTUBRE	98.821	105.022	123.597	130.700	192.470	104.735
NOVIEMBRE	116.335	123.985	150.229	156.115	206.110	114.445
DICIEMBRE	133.828	142.754	167.578	179.337	235.680	122.955
ENERO	147.499	156.921	184.674	198.694	254.180	132.667
FEBRERO	161.792	175.194	203.390	217.865	270.900	145.293
MARZO	175.543	196.188	224.628	243.969	286.980	160.828
ABRIL	185.053	206.118	237.378	263.179	304.980	177.168
MAYO	187.906	209.097	244.178	269.504	326.500	190.089
<b>T O T A L</b>	<b>187.906</b>	<b>209.097</b>	<b>244.178</b>	<b>269.504</b>	<b>326.500</b>	<b>190.089</b>

Et x<sub>i</sub> = Evapotranspiración máxima (25)

Cuadro.4.3.1. Evapotranspiración para décimos de desarrollo de la caña de azúcar ,  
desarrollada en lisímetros de balance hídrico.

$f_i / f_c$	EVAPOTRANSPIRACION ( Cm )				
	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	$E_{t x_i}$ (77-78)
0.1	12.865	13.781	15.764	18.338	26.210
0.2	14.115	14.419	15.180	23.090	24.230
0.3	28.646	31.190	39.144	33.989	41.160
0.4	13.892	15.148	21.640	20.979	48.550
0.5	23.834	22.936	28.898	34.304	43.380
0.6	23.334	26.391	33.856	35.929	33.380
0.7	21.462	22.882	22.766	27.281	31.870
0.8	18.110	20.539	24.476	27.600	20.600
0.9	19.002	28.120	26.493	37.819	22.800
1.0	12.646	13.691	15.951	10.175	35.640
<b>S U M A S</b>	<b>187.906</b>	<b>209.097</b>	<b>244.178</b>	<b>269.504</b>	<b>326.500</b>

$E_{t x_i}$  = Evapotranspiración máxima (25)

#### 4.4. Evapotranspiración Promedio Diario Mensual de la Caña de Azúcar.

La evapotranspiración promedio diario mensual registrada por la caña de azúcar, observó valores mayores de 3 mm en todo el ciclo vegetativo del cultivo y para los cuatro tratamientos. Los valores máximos correspondieron al tratamiento 4 (riegos cuando se tenía el 80 % de humedad aprovechable en el suelo), alcanzando valores de casi 9 mm en los meses de Octubre y Noviembre. Esta variación de la evapotranspiración promedio diaria mensual, se observa más claramente en el cuadro 4.4.1., en el que se incluye también la evapotranspiración máxima de este mismo cultivo (25), y la que presenta valores más elevados, como era de esperarse.

#### 4.5. Coeficientes $Kc_i$ de Cultivo.

Para conocer los coeficientes de ajuste a la demanda evapotranspirativa debido al desarrollo vegetativo de la caña de azúcar, se relaciona la evapotranspiración del cultivo en el período  $i$ , y la evaporación registrada en el mismo período en un tanque evaporómetro tipo "A". Expresado en fórmula nos queda:

$$Kc_i = \frac{Et_i}{Ev_i} \quad (4.5.1.)$$

Donde:

$Kc_i$  = Coeficiente de ajuste a la demanda evapotranspirativa debido al desarrollo vegetativo del cultivo.

$Et_i$  = Evapotranspiración registrada por el cultivo en el período  $i$ .

$Ev_i$  = Evaporación registrada en un tanque evaporómetro tipo "A" en el período  $i$ .

##### 4.5.1. Coeficientes $Kc_i$ Mensuales.

Cuadro. 4.4.1. Evapotranspiración promedio diario mensual de la caña de azúcar.  
desarrollado en lisímetros de balance hídrico.

M E S	E V A P O T R A N S P I R A C I O N ( C m )				
	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	$E t x_i$ (77-78)
A B R I L	3.70	3.90	4.35	4.90	5.23
M A Y O	2.56	2.78	3.00	3.43	5.35
J U N I O	4.49	4.53	4.75	6.72	6.48
J U L I O	4.74	8.58	10.24	8.26	11.36
A G O S T O	3.90	4.13	6.31	5.72	10.36
S E P T I E M B R E	3.86	3.87	4.38	5.20	11.31
O C T U B R E	6.49	6.99	7.83	8.93	10.79
N O V I E M B R E	5.84	6.32	8.88	8.48	4.55
D I C I E M B R E	5.64	6.05	5.60	7.48	9.53
E N E R O	4.41	4.57	5.51	6.24	6.94
F E B R E R O	4.93	6.30	6.45	6.61	4.90
M A R Z O	4.44	6.77	6.85	8.42	5.19
A B R I L	3.17	3.31	4.25	6.40	6.00
M A Y O	3.17	3.31	4.25	2.75	6.94

$E t x_i$  = Evopotranspiración máxima (25)

La evapotranspiración mensual del cultivo y la evaporación mensual se relacionan para obtener los  $Kc_i$  mensuales, presentados en el cuadro 4.5.1.1., donde se observa que sus valores variaron de 0.50 a 2.70, registrándose los valores más bajos al inicio del ciclo e incrementándose éstos, a medida que el cultivo presenta un desarrollo foliar intensivo, para alcanzar sus máximos valores en los meses de Noviembre y Diciembre, coincidiendo con la época del año en que en la zona se presentan vientos fuertes (nortes) que incrementan la demanda; para después decrecer paulatinamente. En el mismo cuadro 4.5.1.1. se presentan los valores de la evapotranspiración máxima de este cultivo y sus respectivos coeficientes  $Kc_i$ , en los que se observan valores más altos como consecuencia de una mayor oferta de agua para la planta.

Para cada tratamiento se estimó el valor mensual de  $Kc_i$ , correlacionándolo con la evapotranspiración mensual del cultivo, mediante la técnica de regresión lineal, resultando las funciones siguientes:

$$Kc_{i1} = 0.027 + 0.41X_i - 0.027X_i^2 \quad (4.5.1.1.)$$

$$Kc_{i2} = 0.084 + 0.45X_i - 0.029X_i^2 \quad (4.5.1.2.)$$

$$Kc_{i3} = 0.032 + 0.50X_i - 0.032X_i^2 \quad (4.5.1.3.)$$

$$Kc_{i4} = 0.012 + 0.52X_i - 0.033X_i^2 \quad (4.5.1.4.)$$

Donde:

$Kc_i$  = Coeficiente de ajuste a la demanda evapotranspirativa debido al desarrollo vegetativo del cultivo.

$X_i$  = Mes  $i$  del desarrollo vegetativo del cultivo.

En el cuadro 4.5.1.2. se presentan los valores estimados de los coeficientes  $Kc_i$  mensuales, con los que se construyeron las curvas de la figura 4.5.1.1.; en esta figura se muestra el diagrama de dispersión de las ecuaciones obtenidas para los cuatro tratamientos. Las constantes de estas ecuaciones, así como los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de variación (C.V.), se muestran en el cuadro 4.5.1.3.

Cuadro.4.5.1.1. Coeficientes  $K_c$ ; mensuales de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrica.

M E S	EVAPOTRANSPIRACION ( Cm )					EVA PORACION ( Cm )	C O E F I E N T E S $K_c$				
	LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	$E_t x_i$		LISIMETRO 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	$K_c x_i$
ABRIL	9.625	10.131	11.299	12.741	15.690	15.833	0.61	0.64	0.71	0.80	0.98
MAYO	7.932	8.626	9.290	10.645	16.580	15.336	0.52	0.56	0.61	0.69	0.87
JUNIO	13.470	13.601	14.250	20.154	19.440	13.212	1.02	1.03	1.08	1.53	1.30
JULIO	24.003	26.584	31.751	25.591	35.230	16.884	1.42	1.57	1.88	1.52	1.91
AGOSTO	12.095	12.816	19.568	17.741	38.120	14.510	0.83	0.88	1.35	1.22	2.14
SEPTIEMBRE	11.590	11.610	13.160	16.150	33.970	14.875	0.78	0.78	0.88	1.08	2.20
OCTUBRE	20.106	21.654	24.279	27.678	33.440	14.085	1.43	1.54	1.72	1.97	2.56
NOVIEMBRE	17.514	18.963	26.632	25.455	13.630	9.710	1.80	1.95	2.74	2.62	1.41
DICIEMBRE	17.493	18.769	17.349	23.182	29.570	8.510	2.05	2.21	2.04	2.72	3.00
ENERO	13.671	14.167	17.096	19.357	21.500	9.712	1.40	1.46	1.76	1.99	2.35
FEBRERO	14.293	18.273	18.716	19.171	13.720	12.626	1.13	1.44	1.48	1.52	1.61
MARZO	13.751	20.994	21.238	26.104	16.080	15.535	0.88	1.35	1.37	1.68	1.16
ABRIL	9.510	9.930	12.750	19.210	18.000	16.340	0.58	0.61	0.78	1.18	1.13
MAYO	2.853	2.979	6.800	6.325	21.520	12.921	0.22	0.23	0.53	0.49	1.81
<b>SUMAS</b>	<b>187.906</b>	<b>209.097</b>	<b>244.178</b>	<b>269.504</b>	<b>326.500</b>	<b>190.089</b>	—	—	—	—	—

$E_{tx_i}$  = Evapotranspiración máxima (25)

Cuadro 4.5.1.2. Valores estimados de los coeficientes  $Kc_i$  mensuales de la caña de azúcar, desarrollada en listados de metros de balance hídrico.

TRATAMIENTO (% DE HUM. AP)	C O E F I C I N T E S $Kc_i$ M E N S U A L														E C U A C I O N
	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	
2 0	0.35	0.68	0.95	1.16	1.33	1.43	1.49	1.48	1.43	1.32	1.15	0.93	0.66	0.33	$Kc_i = -0.027 + 0.41 x_i - 0.027 x_i^2$
4 0	0.33	0.69	1.00	1.23	1.44	1.55	1.62	1.63	1.58	1.48	1.31	1.09	0.81	0.47	$Kc_i = -0.084 + 0.45 x_i - 0.029 x_i^2$
6 0	0.43	0.83	1.16	1.44	1.64	1.78	1.86	1.87	1.82	1.70	1.52	1.28	0.97	0.59	$Kc_i = -0.032 + 0.50 x_i - 0.032 x_i^2$
8 0	0.47	0.89	1.25	1.54	1.72	1.92	2.01	2.04	2.00	1.89	1.72	1.49	1.19	0.82	$Kc_i = -0.012 + 0.52 x_i - 0.033 x_i^2$

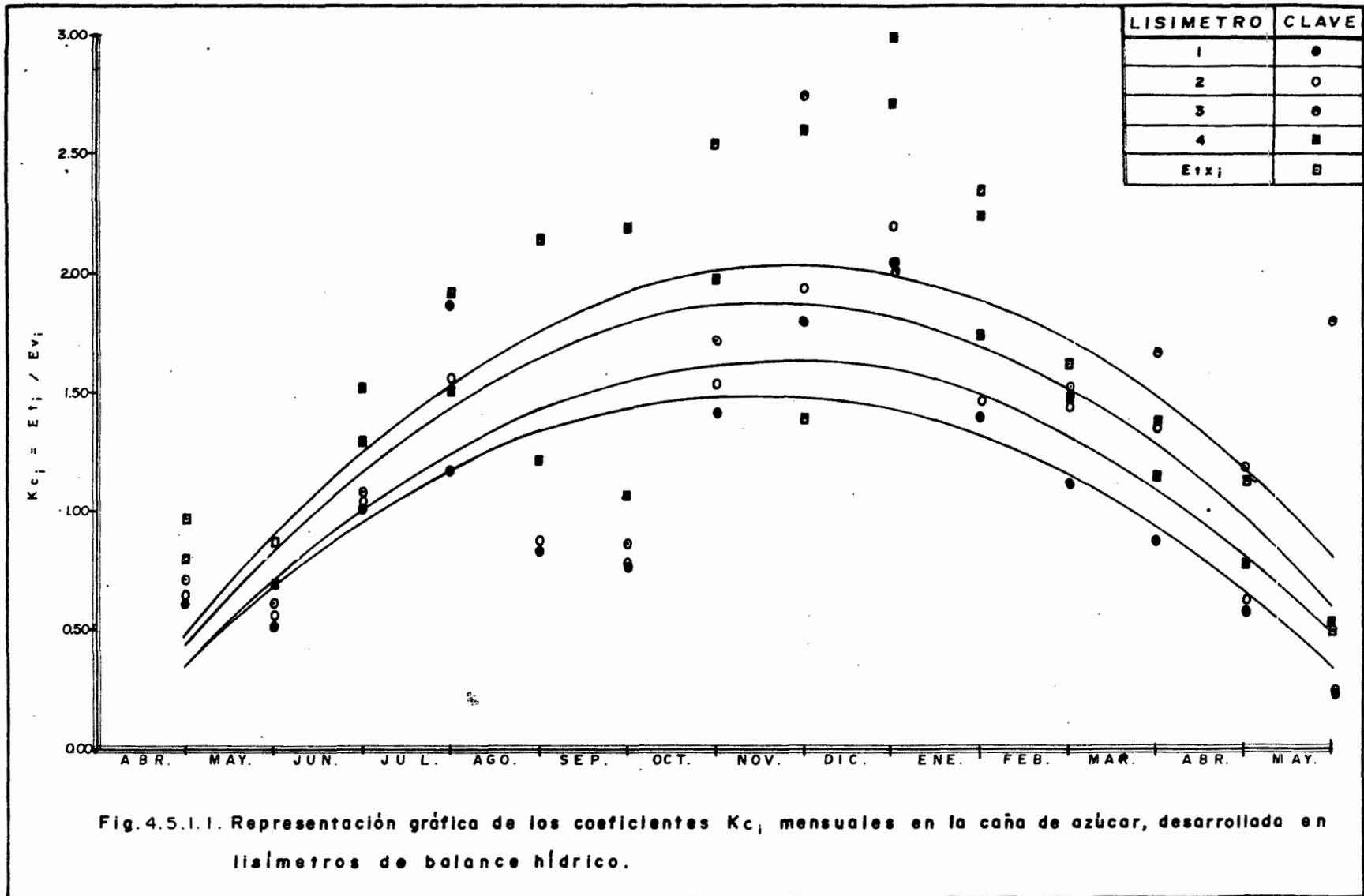


Fig.4.5.1.1. Representación gráfica de los coeficientes  $Kc_i$  mensuales en la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.

Cuadro.4.5.1.3. Constantes ( $b_0, b_1, b_2$ ) y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de variación (C.V.), de las ecuaciones que estiman los coeficientes  $Kc_i$  mensuales en la caña de azúcar, desarrollada en listados de balance hídrico.

TRATAMIENTO (% DE HUM. APROV.)	C O N S T A N T E S			C O E F I C I E N T E S	
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$R^2$	C.V.
2 0	- 0 . 0 2 6 8	0 . 4 0 6 5	- 0 . 0 2 7 2	0 . 6 2 7	2 . 0 9 6
4 0	- 0 . 0 8 3 7	0 . 4 4 7 0	- 0 . 0 2 9 1	0 . 6 5 9	2 . 0 9 8
6 0	- 0 . 0 3 1 8	0 . 4 9 5 5	- 0 . 0 3 2 2	0 . 6 7 0	2 . 1 9 8
8 0	- 0 . 0 1 2 3	0 . 5 1 8 7	- 0 . 0 3 2 8	0 . 7 0 8	2 . 3 4 0

#### 4.5.2. Coeficientes $Kc_i$ para Décimos de Desarrollo.

De igual forma que para los coeficientes  $Kc_i$  mensuales, se relacionó la evapotranspiración registrada por el cultivo en los décimos de desarrollo, con la evaporación medida en tanque evaporómetro tipo "A", para obtener los coeficientes  $Kc_i$  para décimos de desarrollo del cultivo, cuyos valores se presentan en el cuadro 4.5.2.1. En éste se incluyen además los  $Kcx_i$  para décimos de desarrollo obtenidos en los años 1977-1978 (25). Los valores observados fueron ajustados a ecuaciones cuadráticas, resultando las funciones siguientes:

$$Kc_{i1} = 0.074 + 5.29(t_i/t_c) - 4.62(t_i/t_c)^2 \quad (4.5.2.1.)$$

$$Kc_{i2} = 0.094 + 5.61(t_i/t_c) - 4.73(t_i/t_c)^2 \quad (4.5.2.2.)$$

$$Kc_{i3} = 0.172 + 7.19(t_i/t_c) - 6.27(t_i/t_c)^2 \quad (4.5.2.3.)$$

$$Kc_{i4} = 0.205 + 8.09(t_i/t_c) - 7.09(t_i/t_c)^2 \quad (4.5.2.4.)$$

Donde:

$Kc_i$  = Coeficiente de ajuste a la demanda evapotranspirativa debido al desarrollo vegetativo del cultivo.

$t_i$  = Duración del cultivo en días, desde la siembra hasta el período  $i$ .

$t_c$  = Duración total del ciclo vegetativo en días.

En el cuadro 4.5.2.2. se presentan los valores ajustados de los  $Kc_i$  para décimos de desarrollo con los que se construyeron las curvas de la figura 4.5.2.1., en la que se muestra el diagrama de dispersión de las ecuaciones obtenidas. En esta figura se observa también, que para cada décimo de desarrollo, los valores de  $Kc_i$  solo fueron inferiores a la unidad en los primeros 80 días del cultivo, para posteriormente rebasar este valor en el resto de su ciclo vegetativo; es decir, la tasa evapotranspirativa observada por el cultivo, superó a la evaporación registrada en un tanque evaporómetro tipo "A" en un 80 %

Cuadro.4.5.2.1. Coeficientes  $K_{c_i}$  para décimos de desarrollo de la caña de azúcar, determinados en lisímetros de balance hídrico.

$t_i / t_c$	EVAPOTRANSPIRACION (Cm.)					EVAPORACION (Cm.)	COEFICIENTES $K_{c_i}$				
	LISIMETR. 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	$E_{rx_i}$		LISIMETR. 1	LISIMETRO 2	LISIMETRO 3	LISIMETRO 4	$K_{c_{x_i}}$
0.1	12.865	13.781	15.764	18.338	26.210	23.318	0.55	0.59	0.68	0.79	1.141
0.2	14.115	14.419	15.180	23.090	24.230	19.689	0.72	0.73	0.77	1.17	1.077
0.3	28.646	31.190	39.144	33.989	41.160	22.357	1.28	1.40	1.75	1.52	1.712
0.4	13.892	15.148	21.650	20.979	48.550	19.868	0.70	0.76	1.08	1.06	2.820
0.5	23.834	22.936	28.898	34.304	43.380	18.127	1.31	1.27	1.59	1.89	2.478
0.6	23.334	26.391	33.856	35.929	33.380	12.133	1.92	2.18	2.79	2.96	2.889
0.7	21.462	22.882	22.766	27.281	31.870	13.289	1.62	1.72	1.71	2.05	2.380
0.8	18.110	20.539	24.476	27.600	20.600	16.857	1.07	1.22	1.45	1.64	1.788
0.9	19.002	28.120	26.493	37.819	22.800	24.171	0.79	1.16	1.10	1.56	1.293
1.0	12.646	13.691	15.951	10.175	35.640	20.280	0.62	0.68	0.79	0.50	1.324
<b>SUMAS</b>	187.906	209.097	244.178	269.504	326.500	190.089	-	-	-	-	-

Cuadro.4.5.2.2. Valores estimados de los coeficientes  $Kc_i$  para decimos de desarrollo de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.

TRATAMIENTO (% DE HUM. APROV.)	COEFICIENTES $Kc_i$ PARA DECIMOS DE DESARROLLO										E C U A C I O N
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
20	0.41	0.80	1.10	1.30	1.42	1.44	1.37	1.20	0.95	0.60	$Kc_i = -0.074 + 5.29(t_i/t_c) - 4.62(t_i/t_c)^2$
40	0.42	0.84	1.16	1.39	1.53	1.57	1.52	1.37	1.12	0.79	$Kc_i = -0.094 + 5.61(t_i/t_c) - 4.73(t_i/t_c)^2$
60	0.49	1.02	1.42	1.70	1.86	1.89	1.79	1.57	1.22	0.75	$Kc_i = -0.172 + 7.19(t_i/t_c) - 6.27(t_i/t_c)^2$
80	0.53	1.13	1.58	1.90	2.07	2.10	1.98	1.73	1.33	0.79	$Kc_i = -0.205 + 8.09(t_i/t_c) - 7.09(t_i/t_c)^2$

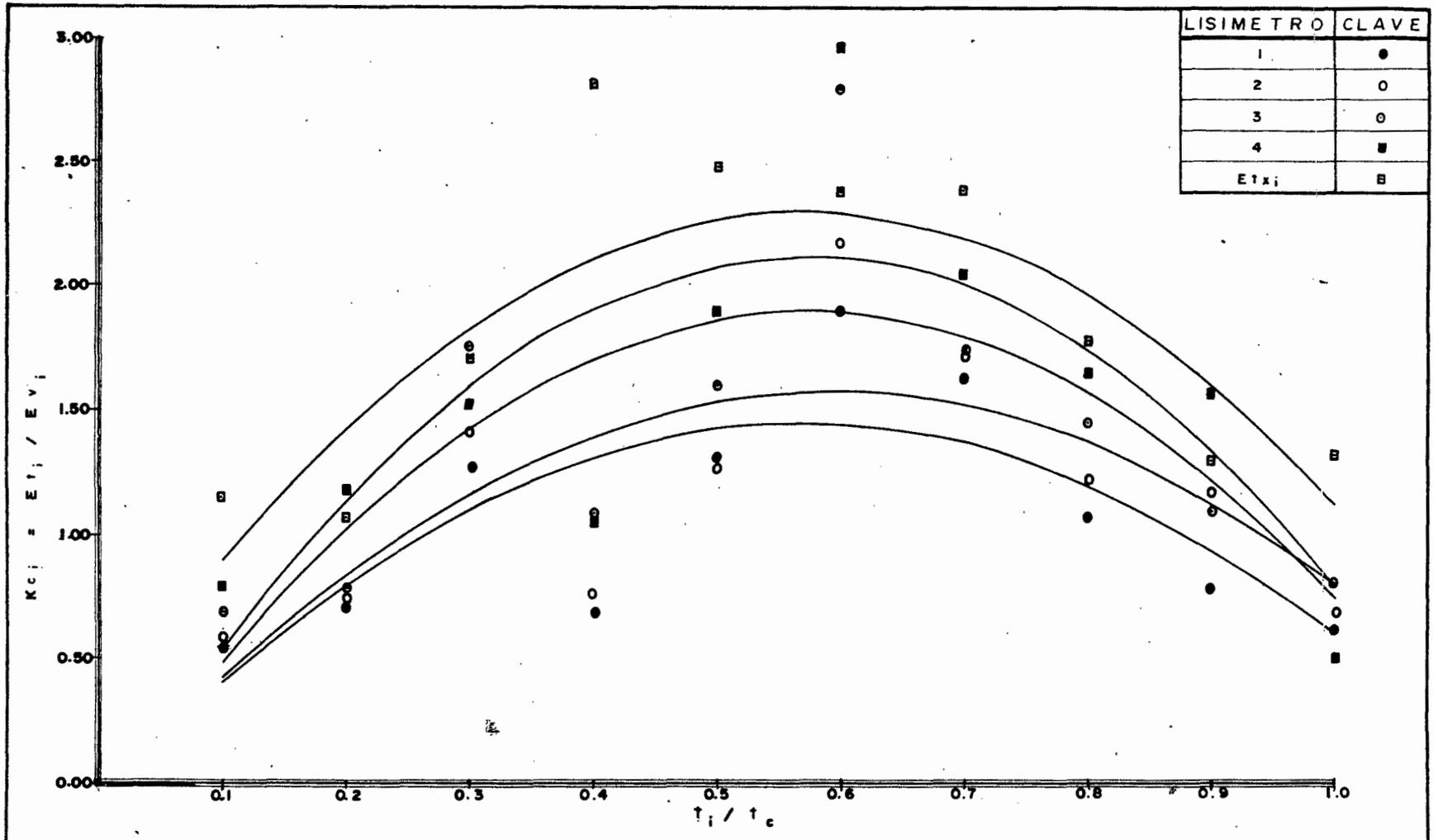


Fig.4.5.2.1. Representación gráfica de los coeficientes  $Kc_i$  para décimos de desarrollo de la caña de azúcar, - desarrollada en lisímetros de balance hídrico.

del ciclo vegetativo de la caña de azúcar, en los cuatro tratamientos de humedad en que constó el estudio. Las constantes de estas ecuaciones, así como los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de variación (C.V.), se presentan en el cuadro 4.5.2.3.

#### 4.5.3. Coeficientes $Kc_i$ Promedio Diario Mensual.

La evapotranspiración promedio diario mensual de la caña de azúcar y la evaporación promedio diario mensual medida en un tanque evaporómetro tipo "A", se relacionaron para obtener los coeficientes  $Kc_i$  promedio diario mensual, cuyos valores se presentan en el cuadro 4.5.3.1., donde se incluyen además los  $Kcx_i$  (25). En este cuadro se puede apreciar más claramente como la evapotranspiración registrada por la caña de azúcar, en los cuatro tratamientos de humedad, supera a la evaporación registrada en un tanque evaporómetro tipo "A".

#### 4.6. Coeficientes $Ks_i$ .

Para conocer los coeficientes de ajuste a la demanda evapotranspirativa de la caña de azúcar, debido a una restricción de la humedad del suelo, se relacionó la tasa evapotranspirativa registrada por el cultivo en cada una de las tres etapas fenológicas en que se dividió su ciclo vegetativo, con la evapotranspiración máxima obtenida en un estudio lisimétrico realizado en los años 1977-1978 (25), cuyos valores se presentan en el cuadro 4.6.1.

Expresado en fórmula, el coeficiente de ajuste a la demanda evapotranspirativa por restricción en la humedad del suelo es:

$$Ks_i = \frac{Ks_i}{Etx_i} \quad (4.6.1.)$$

Donde:

$Ks_i$  = Coeficiente de ajuste por restricción en la humedad del suelo en el período  $i$  (adimensional).

Cuadro.4.5.2.3. Constantes ( $b_0, b_1, b_2$ ) y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de variación (C.V.), de las ecuaciones que estiman los coeficientes  $K_c$ ; para décimos de desarrollo en la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.

TRATAMIENTO (% DE HUM. APROV.)	C O N S T A N T E S			C O E F I C I E N T E S	
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$R^2$	C. V.
2 0	- 0 . 0 7 3 7	5 . 2 9 3 8	- 4 . 6 2 3 0	0 . 7 1 0	2 . 4 0 5
4 0	- 0 . 0 9 4 0	5 . 6 0 8 2	- 4 . 7 2 8 7	0 . 7 4 4	2 . 4 2 2
6 0	- 0 . 1 7 1 6	7 . 1 9 4 8	- 6 . 2 7 1 3	0 . 7 0 1	2 . 2 2 6
8 0	- 0 . 2 0 4 5	8 . 0 8 7 2	- 7 . 0 8 9 7	0 . 6 9 7	2 . 2 8 0

Cuadro.4.5.3.1. Coeficientes  $K_c$  promedio diario mensual en la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.

M E S	EVAPOTRANSPIRACION (Cm.)					EVAPORACION (Cm.)	COEFICIENTES $K_c$				$K_c \times$
	LISIMETRO	LISIMETRO	LISIMETRO	LISIMETRO	LISIMETRO		LISIMETRO	LISIMETRO	LISIMETRO	LISIMETRO	
	1	2	3	4	$E_{tx}$		1	2	3	4	
ABRIL	3.70	3.90	4.35	4.90	5.23	5.28	0.70	0.74	0.82	0.93	0.98
MAYO	2.56	2.78	3.00	3.43	5.35	4.95	0.52	0.56	0.61	0.69	0.87
JUNIO	4.49	4.53	4.75	6.72	6.48	4.40	1.02	1.03	1.08	1.53	1.30
JULIO	4.74	8.58	10.24	8.26	11.36	5.45	0.87	1.57	1.88	1.52	1.91
AGOSTO	3.90	4.13	6.31	5.72	10.36	4.68	0.83	0.88	1.35	1.22	2.14
SEPTIEMBRE	3.86	3.87	4.38	5.20	11.31	4.96	0.78	0.78	0.88	1.05	2.20
OCTUBRE	6.49	6.99	7.83	8.93	10.79	4.54	1.43	1.54	1.72	1.97	2.55
NOVIEMBRE	5.84	6.32	8.88	8.48	4.55	3.24	1.80	1.95	2.74	2.62	1.41
DICIEMBRE	5.64	6.05	5.60	7.48	9.53	2.75	2.05	2.20	2.04	2.72	3.00
ENERO	4.41	4.57	5.51	6.24	6.94	3.13	1.41	1.46	1.76	1.99	2.34
FEBRERO	4.93	6.30	6.45	6.61	4.90	4.35	1.13	1.45	1.48	1.52	1.61
MARZO	4.44	6.77	6.85	8.42	5.19	5.05	0.88	1.34	1.36	1.67	1.16
ABRIL	3.17	3.31	4.25	6.40	6.00	5.45	0.58	0.61	0.78	1.17	1.13
MAYO	3.17	3.31	4.25	2.75	6.94	4.17	0.76	0.79	1.02	0.66	1.81

$E_{tx}$  = Evapotranspiración máxima diaria promedio mensual (25)

Cuadro.4.6.1. Coeficientes  $Ks_i$  para tres etapas fenológicas de la caña de azúcar, desarrollado en lisímetros de balance hídrico.

ETAPA DE DESARROLLO VEGETATIVO	EVAPOTRANSPIRACION ( Cm )					$Ks_i$			
	LISIMETRO	LISIMETRO	LISIMETRO	LISIMETRO	$Etx_i$	LISIMETRO	LISIMETRO	LISIMETRO	LISIMETRO
	1	2	3	4	(77-78)	1	2	3	4
AMACOLLAMIEYO	55.030	56.942	66.590	69.135	86.950	0.63	0.68	0.77	0.80
CRECIMIENTO INTENSIVO	113.513	126.252	146.600	161.734	191.950	0.59	0.66	0.76	0.84
MADURACION	19.363	23.903	30.788	38.635	47.600	0.41	0.50	0.65	0.81
SUMAS	187.906	209.097	244.178	269.504	326.500	—	—	—	—

$Etx_i$  = Evapotranspiración máxima (25)

$Et_i$  = Tasa de evapotranspiración actual del cultivo durante el período  $i$  (lámina/tiempo).

$Et_{x_i}$  = Tasa de evapotranspiración máxima durante el período  $i$  (lámina/tiempo).

Se estimó el valor de  $Ks_i$  para cada tratamiento, correlacionándolo con el contenido de humedad del suelo mediante la técnica de la regresión lineal, resultando las funciones siguientes:

$$Ks_{i1} = 0.544 + 0.0043(H.A_i) - 0.000013(H.A_i)^2 \quad (4.6.1.)$$

$$Ks_{i2} = 0.509 + 0.0037(H.A_i) - 0.000006(H.A_i)^2 \quad (4.6.2.)$$

$$Ks_{i3} = 0.347 + 0.0021(H.A_i) - 0.000047(H.A_i)^2 \quad (4.6.3.)$$

Donde:

$Ks_i$  = Coeficiente de ajuste por restricción en la humedad del suelo en el período  $i$ .

$H.A_i$  = Contenido de humedad aprovechable en el suelo en el período  $i$ .

Para comparar en forma más objetiva los valores estimados, se hicieron las gráficas de la figura 4.6.1., en la que se muestra el diagrama de dispersión de los puntos que relacionan los coeficientes  $Ks_i$  con el contenido de humedad del suelo en las tres etapas fenológicas en que se dividió el ciclo vegetativo del cultivo.

Los resultados de estas correlaciones muestran coeficientes de determinación que varían de 0.896 a 0.987. Las constantes de las ecuaciones obtenidas, así como los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de variación (C.V.), se muestran en el cuadro 4.6.2.

#### 4.7. Rendimiento en Caña.

El rendimiento final del cultivo en toneladas de caña de azúcar por hectárea, como una función de su evapotranspiración, se repor-

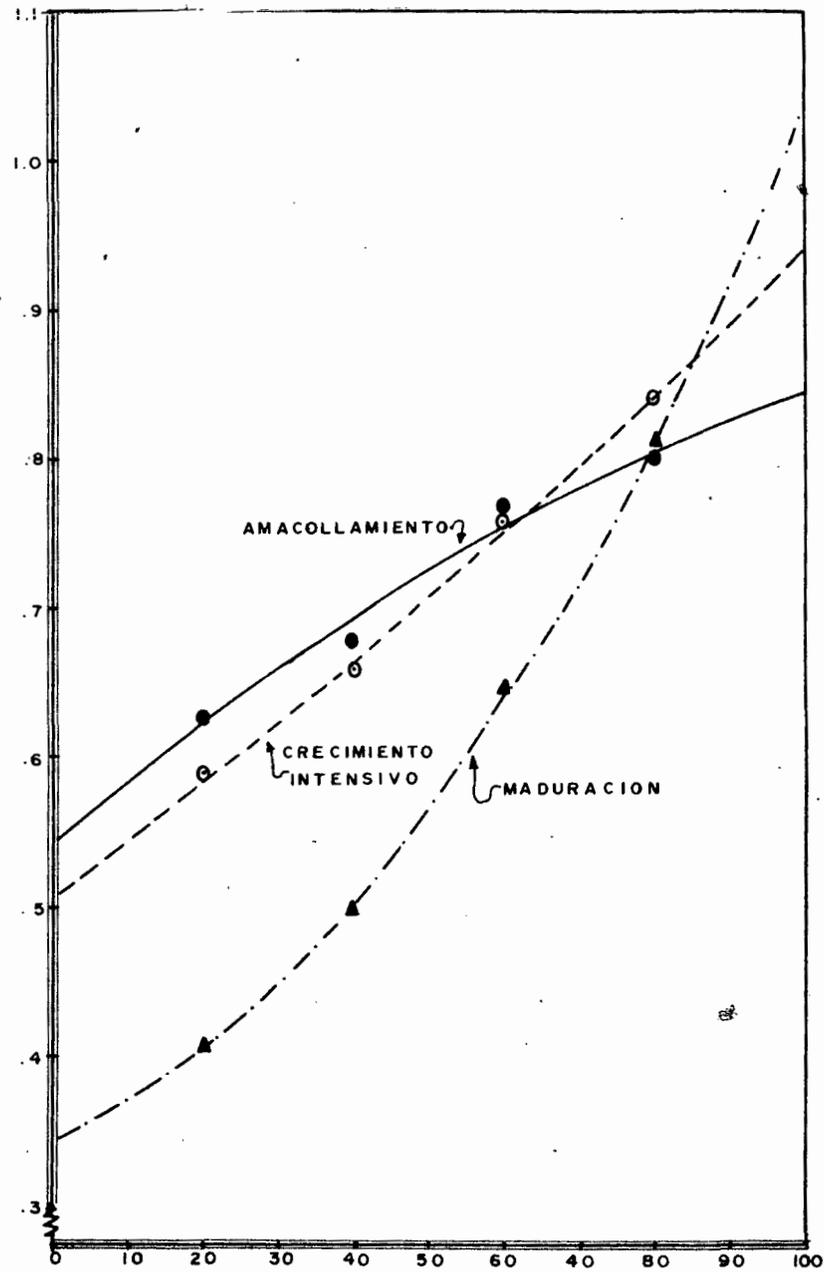


Fig. 4.6.1. Coeficientes  $K_s$  para tres etapas fenológicas de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.

Cuadro. 4.6.2. Constantes ( $b_0, b_1, b_2$ ) y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y de variación (C.V.), de las ecuaciones que estiman los coeficientes  $K_s$  para tres etapas fenológicas de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.

ETAPA DE DESARROLLO VEGETATIVO	CONSTANTES			COEFICIENTES	
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$R^2$	C.V.
AMACOLLAMIENTO	0.544	0.0043	- 0.000013	0.896	10.286
CRECIMIENTO INTENSIVO	0.509	0.0037	- 0.000006	0.987	7.474
MADURACION	0.347	0.0021	- 0.000047	0.970	5.000

ta en el cuadro 4.7.1. Asimismo se presentan los índices de eficiencia obtenidos del uso del agua por la planta para cada uno de los tratamientos. Del análisis de este cuadro, se desprende claramente que el más bajo rendimiento se obtuvo con la menor cantidad de agua consumida por la planta (lisímetro 1); por otra parte, puede observarse como el rendimiento del cultivo tendió a estabilizarse cuando la cantidad de agua consumida rebasó los 244 centímetros de lámina. Estos resultados corroboran la relación existente entre el consumo de agua por la caña de azúcar y su rendimiento; esto es, para un menor volumen de agua consumido, corresponde un menor rendimiento, incrementándose éste a medida que la lámina consumida es mayor; aunque, según numerosa bibliografía, no siempre al máximo consumo corresponde el máximo rendimiento.

En el mismo cuadro 4.7.1. puede observarse que el índice de eficiencia de uso de agua por la planta, expresado en kilogramos por m<sup>3</sup> de agua consumida, observa un comportamiento inverso, en el que a menor consumo de agua por la planta corresponde la mayor eficiencia en el uso de ésta, lo que puede apreciarse mas claramente en la figura 4.7.1.

Con los resultados obtenidos de rendimiento en caña y la evapotranspiración de la planta, se procedió a un análisis de regresión, en el cual se tiene como variable dependiente al rendimiento en caña y como variable independiente, los consumos de agua por la planta, obteniéndose un modelo de tipo lineal propuesto de la siguiente forma:

$$R = b_0 + b_1L + b_2L^2 \quad (4.7.1.)$$

Donde:

R = Rendimiento en Ton./Ha.

b<sub>0</sub> = Ordenada al origen.

b<sub>1</sub> = Efecto lineal del consumo de agua.

b<sub>2</sub> = Efecto cuadrático del consumo del agua.

L = Lámina de agua consumida en centímetros.

**Cuadro.4.7.1. Rendimiento en caña y eficiencia del uso del agua por la caña de azúcar desarrollada en lisímetros de balance hídrico.**

TRATAMIENTO (% DE HUMEDAD APROV.)	L A M I N A EVAPOTRANSPIRADA (Cm)	RENDIMIENTO DE CAÑA (Ton. / Ha.)	EFICIENCIA DE USO DE AGUA POR LA PLANTA (Kg/m <sup>3</sup> )
2 0	1 8 7 . 9 0 6	2 1 7 . 7 0 0	1 1 . 6 0
4 0	2 0 9 . 0 9 7	2 3 6 . 3 6 3	1 1 . 3 0
6 0	2 4 4 . 1 7 8	2 5 2 . 8 5 0	1 0 . 4 0
8 0	2 6 9 . 5 0 4	2 5 3 . 6 9 8	9 . 4 0

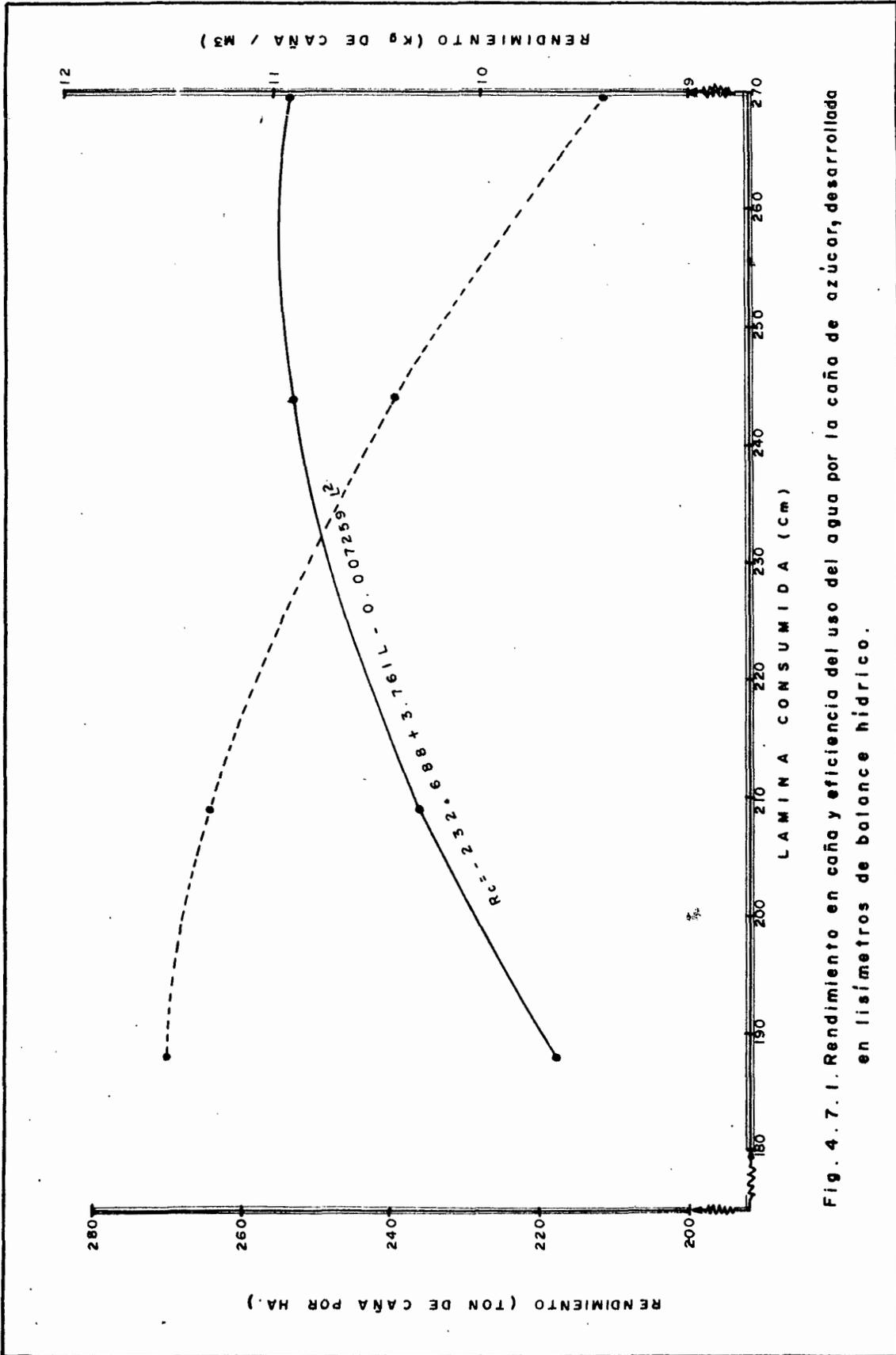


Fig. 4. 7. 1. Rendimiento en caña y eficiencia del uso del agua por la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.

La función obtenida fué:

$$R_c = -232.688 + 3.761L - 0.007259L^2 \quad (4.7.2.)$$

Donde:

$R_c$  = Rendimiento en caña (Ton./Ha.)

$L$  = Lámina de agua consumida en centímetros.

Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.993$  y un coeficiente de variación C.V. = 16.348 %.

En la figura 4.7.2. se presenta la gráfica de esta ecuación.

De acuerdo con Palacios (21), de la función (4.7.2.) es posible optimizar y obtener su maximización, que en nuestro caso se logra cuando la lámina consumida alcanza un valor de  $L^* = 269.504$  centímetros.

Llevando  $L^*$  a la ecuación (4.7.2.) el rendimiento máximo esperado es  $R^* = 253.678$  toneladas de caña por hectárea.

Con la ecuación (4.7.2.) es posible calcular también el rendimiento medio máximo:

$$\frac{dR}{dL} = -232.688 + 0.014518L \quad (4.7.3.)$$

La anterior derivada representa la productividad marginal del agua; mientras que la productividad media está dada por:

$$\frac{R}{L} = \frac{-232.688 + 3.761L - 0.007259L^2}{L} \quad (4.7.4.)$$

Igualando la ecuación (4.7.3.) con la ecuación (4.7.4.), se tiene la productividad media máxima del agua; por lo tanto:

$$3.761 - 0.014518L = \frac{-232.688 + 3.761L - 0.007259L^2}{L} \quad (4.7.5.)$$

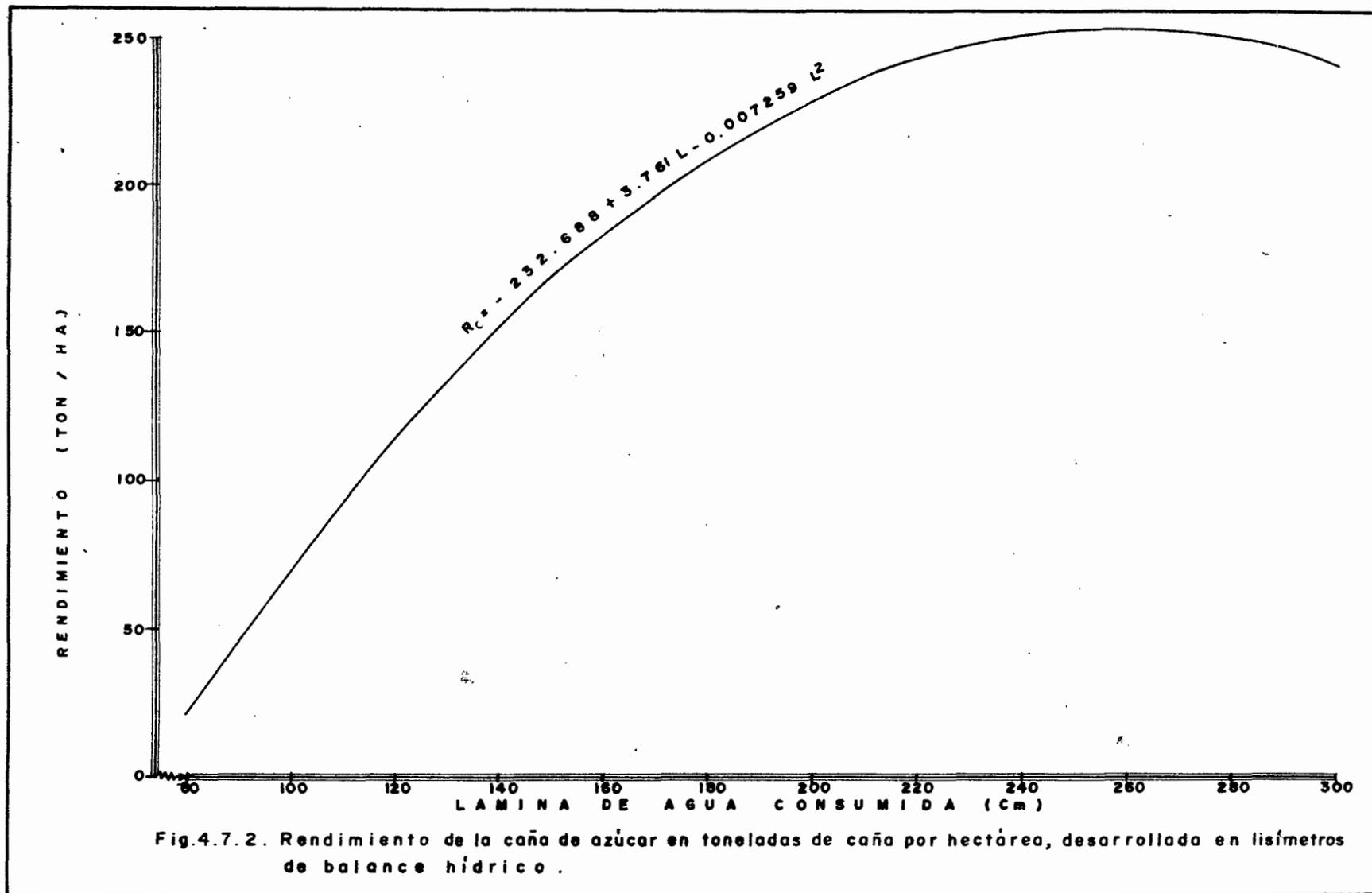


Fig.4.7.2. Rendimiento de la caña de azúcar en toneladas de caña por hectárea, desarrollada en lisímetros de balance hídrico .

De donde:  $L^2 = \frac{-232.688}{-0.00725}$  ; finalmente  $L = 179.15$  centímetros.

Con este resultado se puede concluir que la mejor relación de rendimiento por lámina consumida, se obtiene cuando ésta es de 179.15 centímetros. Esta lámina es semejante a la consumida por el cultivo en el tratamiento en el que los riegos se aplicaron cuando se tenía el 20 % de humedad aprovechable en el suelo (lisímetro 1).

Para obtener la maximización económica del rendimiento en caña, para el área del Distrito de Riego No. 35, se requiere derivar el rendimiento con respecto a la lámina consumida, en la ecuación (4.7.2.) e igualarla a la relación del precio del agua entre el precio del producto. En fórmula nos queda:

$$\frac{dR}{dL} = 3.761 - 0.014518L = \frac{P_a}{P_p} \quad (4.7.6.)$$

Donde:

$\frac{dR}{dL}$  = Derivada del rendimiento con respecto a la lámina consumida.

L = Lámina consumida en centímetros.

$P_a$  = Precio del agua.

$P_p$  = Precio del producto.

Para conocer el valor del agua de riego, según Palacios (21), es necesario obtener el costo de oportunidad de ésta, que en la mayoría de los Distritos de Riego del País, donde el agua es un elemento escaso, puede estimarse en función de su productividad marginal.

Para definir la productividad marginal del agua de un Distrito de Riego, debe considerarse primero la relación que existe sobre el beneficio neto total que produce el Distrito y el volumen de agua utilizado. Suponiendo que la precipitación pluvial tiene una mínima importancia en el proceso productivo en un Distrito de Riego, los beneficios ob

tenidos por el Distrito, serán una función del agua para riego disponible. Sin embargo, el valor del agua usado para estos fines en este estudio, fué obtenido de un estudio interno del Distrito de Riego No. 35, llamado: "Análisis de las Cuotas de Riego para hacer Autosuficiente el Distrito de Riego en Cinco Años" (5); siendo el sistema de cobro por hectárea-cultivo-ciclo agrícola.

Para el Ciclo Agrícola 1980-1981, el mencionado estudio preveé una cuota por servicio de riego para el cultivo de la caña de azúcar de \$ 920.00. Con este valor y considerando el promedio de riegos y láminas netas por riego, que actualmente se aplican a la caña en el Distrito de Riego No. 35 (3.0 y 32.0 centímetros, respectivamente), se obtiene el costo de un millar de m<sup>3</sup> de agua servida en la parcela, resultando un valor de Pa = \$ 95.84.

Por otro lado, el precio considerado del producto, es el precio que el productor cañero obtuvo por una tonelada de caña en la zafra 1979-1980, siendo P<sub>p</sub> = \$ 427.00; quedándonos:

$$3.761 - 0.014518L = \frac{95.84}{427.00} \quad (4.7.7.)$$

Haciendo operaciones nos queda L = 243.60 centímetros, de donde se deduce que es la lámina de agua consumida por el cultivo que produce el máximo rendimiento económico de caña, para el área del Distrito de Riego No. 35.

Sustituyendo el valor de L = 243.60 centímetros en la ecuación (4.7.2.), se obtiene el rendimiento máximo económico esperado para la zona del Distrito de Riego No. 35, siendo éste de 252.735 toneladas de caña por hectárea; resultando muy similar al obtenido por el tratamiento en el que los riegos se aplicaron cuando en el suelo se tenía el 60 % de humedad aprovechable (lisímetro 3).

El rendimiento de caña también se correlacionó con el número de riegos aplicados, y mediante la técnica de la regresión se ajustó a una ecuación del tipo (4.7.1.). La función obtenida fué:

$$R_c = 150.577 + 10.3016Nr - 0.2498(Nr)^2 \quad (4.7.9.)$$

Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.899$  y un coeficiente de variación C.V. = 16.348 %.

#### 4.8. Rendimiento en Azúcar.

Los rendimientos en azúcar por hectárea obtenidos, se comportaron en una forma notablemente parecida a los rendimientos en caña. En el cuadro (4.8.1.) se aprecia más claramente esta misma tendencia, tanto en el rendimiento como en la eficiencia en el uso del agua por la planta, expresada en kilogramos por  $m^3$  de agua consumida (figura 4.8.1.).

También se obtuvo un modelo similar al del rendimiento en caña, que relacionó al rendimiento en azúcar como el producto final y al agua consumida por el cultivo como el insumo; el modelo propuesto es del tipo lineal:

$$R = b_0 + b_1L + b_2L^2 \quad (4.8.1.)$$

Donde:

$R$  = Rendimiento en Ton./Ha.

$b_0$  = Ordenada al origen.

$b_1$  = Efecto lineal del consumo de agua.

$b_2$  = Efecto cuadrático del consumo de agua.

$L$  = Lámina consumida en centímetros.

El ajuste mediante regresión nos dió:

$$R_a = - 15.671 + 0.392866L - 0.000749412L^2 \quad (4.8.2.)$$

Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.98$  y un coeficiente de variación C.V. = 20.658 %.

Cuadro.4.8.1. Rendimiento en azúcar y eficiencia del uso del agua por la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.

TRATAMIENTO (% DE HUM. APROV.)	LAMINA EVAPOTRANSPIRADA (Cm)	RENDIMIENTO (TON./HA.)		EFICIENCIA DEL USO DE AGUA POR LA PLANTA (Kg/M <sup>2</sup> )	
		CAÑA	AZUCAR	CAÑA	AZUCAR
20	187.906	217.700	31.720	11.6	1.7
40	209.097	236.363	33.587	11.3	1.6
60	244.178	252.850	35.652	10.4	1.5
80	269.504	253.698	35.720	9.4	1.3

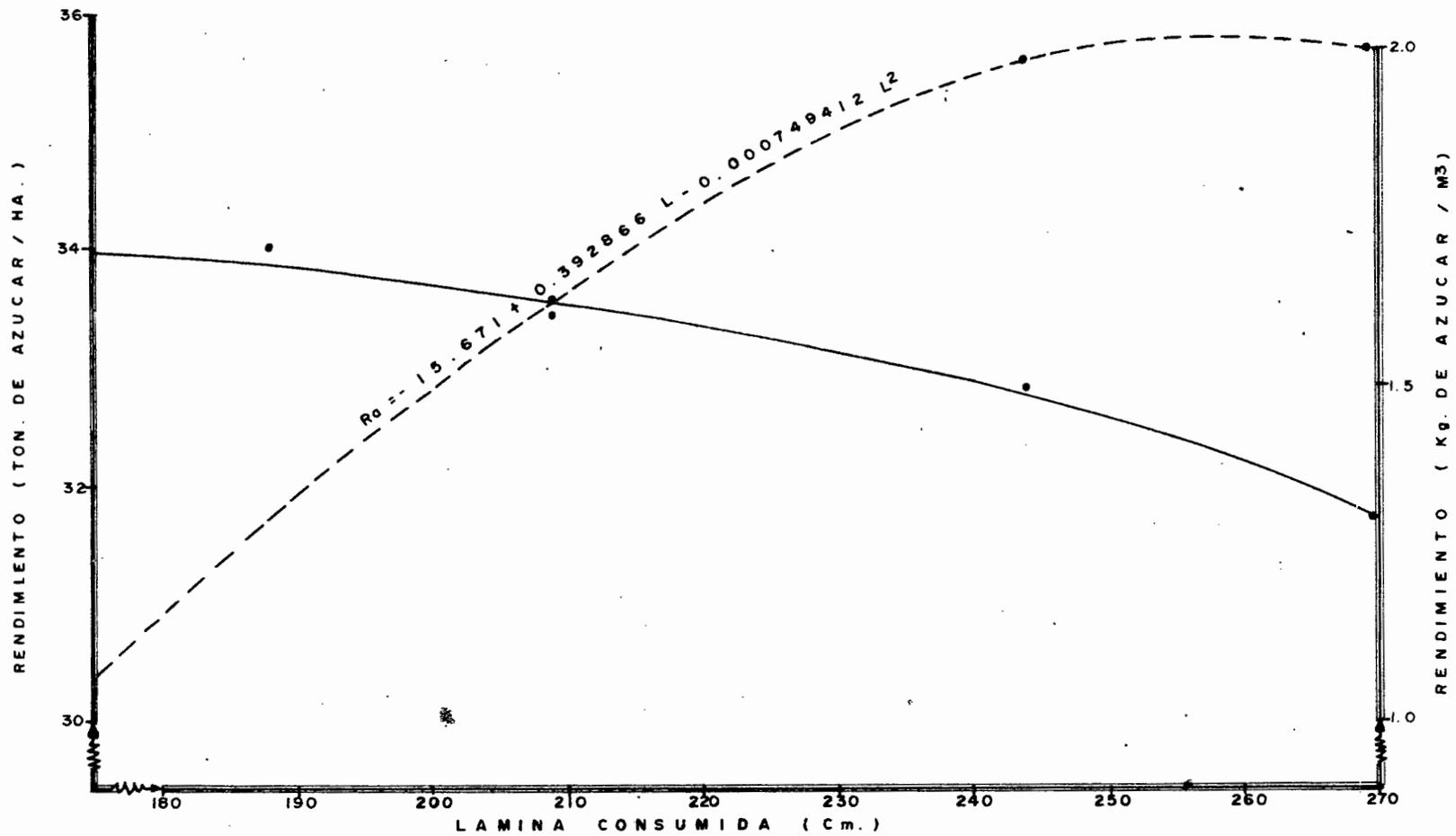


Fig. 4.8.1. Rendimiento en azúcar y eficiencia del uso del agua por la caña de azúcar, desarrollado en listímetros de balance hídrico.

Con esta ecuación calculamos el rendimiento medio máximo de similar manera que en el rendimiento de caña.

$$\frac{dRa}{dL} = \frac{R}{L} \quad (4.8.3.)$$

Al hacer las operaciones nos queda  $L = 144.60$  centímetros.

Con esta lámina encontramos la mejor relación del rendimiento en azúcar por lámina consumida.

Para obtener la maximización económica del rendimiento en azúcar, se procedió en similar forma que para el rendimiento de caña. El precio del producto, usado en este caso, fué el precio promedio del azúcar en el mercado doméstico, siendo  $P_p = \$ 1,300.00$ .

$$\frac{dR}{dL} = 0.392866 - 0.001498824L = \frac{95.84}{1300.0} \quad (4.8.4.)$$

Al hacer operaciones  $L = 212.94$  centímetros, donde se deduce que es la lámina consumida por el cultivo que produce el máximo rendimiento económico de azúcar por unidad de superficie. Al sustituir este valor en la función (4.8.2.), el rendimiento máximo económico esperado es de 34.000 toneladas de azúcar por hectárea. Resultado similar al obtenido en el lisímetro 2 (riegos cuando en el suelo se tenía el 40 % de la humedad aprovechable).

También fué correlacionado el rendimiento de azúcar con el número de riegos aplicados. Ajustando a través de regresión se obtuvo la siguiente ecuación:

$$Ra = 24.3478 + 1.1207Nr - 0.02688(Nr)^2 \quad (4.8.5.)$$

Con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.89$  y un coeficiente de variación C.V. = 20.659 %.

Utilizando similar procedimiento que en el rendimiento de caña, se obtuvo la maximización económica del rendimiento en azúcar con relación al número de riegos aplicados, encontrándose un valor de  $Nr = 19.5$ , que al ser sustituido en la ecuación (4.8.5.), nos permite estimar el rendimiento máximo económico de azúcar.

#### 4.9. Respuesta de algunos Parámetros Fisiológicos de la Planta.

Uno de los objetivos de este trabajo es correlacionar los consumos de agua por la planta con algunos parámetros fisiológicos de ésta, los resultados obtenidos en los cuatro tratamientos en que consistió el estudio, para la altura de la planta, grosor del tallo, número de entrenudos por tallo, longitud de canuto, número de tallos por  $m^2$ , número de tallos muertos por  $m^2$ , número de hojas por planta, número de hojas por  $m^2$  e índice de área foliar (I.A.F.), se presentan en el cuadro 4.9.1.

El análisis de este cuadro nos permite observar, para la altura de la planta, grosor del tallo, número de entrenudos por tallo, longitud de canuto e índice de área foliar (I.A.F.), un comportamiento similar al registrado por el rendimiento de caña y azúcar; ésto es, los resultados parecen mostrar una estrecha correlación entre el consumo de agua y estos parámetros. Sin embargo, los valores correspondientes a número de tallos por  $m^2$ , número de tallos muertos por  $m^2$ , número de hojas por planta y número de hojas por  $m^2$ , parecen no mostrar la misma tendencia con relación a la lámina consumida.

De igual forma, en el cuadro 4.9.2. se muestran los contenidos de grados Brix, porcentaje de sacarosa, pureza y contenido de humedad de la sección 8-10 del tallo, antes de la cosecha de los lisímetros. En este cuadro y para la columna de % de grados Brix y de % de sacarosa, observamos valores que se comportan inversamente al consumo de agua, esto es, a mayor consumo de agua correspondieron los valores más bajos de estos parámetros. En las columnas de pureza y humedad, se tienen valores que presentan un fiel reflejo del consumo de agua, esto es, a consumos mayores de agua, correspondieron valores máximos de estos parámetros.

Cuadro.4.9.1. Respuesta de algunos parámetros fisiológicos de la caña de azúcar, desarrollada en lisímetros de balance hídrico.

TRATAMIENTO (% DE HUM. APROV.)	P A R A M E T R O S								
	ALTURA DE LA PLANTA (Cm.)	GROSOR DEL TALLO (Cm.)	NUMERO DE ENTRENUDOS POR TALLO	LONGITUD DE CANUTO (Cm.)	NUMERO DE TALLOS POR M <sup>2</sup>	NUMERO DE TALLOS MUERTOS POR M <sup>2</sup>	NUMERO DE HOJAS POR PLANTA	NUMERO DE HOJAS POR M <sup>2</sup>	I. A. F.
2 0	229.41	2.97	20.44	9.76	11.80	1.83	8.63	109.01	7.16
4 0	245.86	3.14	21.27	10.31	12.31	0.93	8.34	107.96	7.48
6 0	239.77	2.96	19.37	10.46	15.07	1.23	8.18	137.13	8.89
8 0	252.55	3.23	21.54	10.27	10.20	1.71	9.11	100.22	7.73

Cuadro.4.9.2. Valores observados de grados brix, sacarosa, pureza y humedad en la -  
sección 8-10 del tallo al momento del corte .

TRATAMIENTO (% DE HUMEDAD APROV.)	B R I X (%)	SACAROSA (%)	PUREZA (%)	HUMEDAD (%)
2 0	17.68	14.57	83.34	72.4
4 0	16.07	14.21	82.24	72.6
6 0	16.87	14.10	83.68	73.6
8 0	16.13	14.08	87.02	73.9

#### 4.10. Precipitación Efectiva en Caña de Azúcar.

Otro de los objetivos del presente trabajo fué obtener una fórmula empírica para estimar la precipitación efectiva en la caña de azúcar durante el mes  $i$ , considerando las siguientes variables: precipitación observada, láminas de riego aplicadas, evapotranspiración del cultivo, así como el número de días en que ocurrieron lluvias, esto es:

$$Pe_i = f(Pr_i, Lr_i, Et_i, Nd_i) \quad (4.10.1.)$$

Donde:

$Pe_i$  = Precipitación efectiva en el mes  $i$  (mm).

$Pr_i$  = Precipitación observada en el mes  $i$  (mm).

$Lr_i$  = Lámina de riego aplicada durante el mes  $i$  (mm).

$Et_i$  = Evapotranspiración de la caña de azúcar en el mes  $i$  (mm).

$Nd_i$  = Número de días en que ocurrieron lluvias durante el mes  $i$ .

El cuadro 8.8. del anexo, contiene los resultados de cada una de estas variables. La precipitación efectiva fué estimada por el método de Blaney y Criddle, para correlacionarla por el método de regresión lineal con estas variables. Las regresiones fueron corridas en la computadora del Centro de Estadística y Cálculo del Colegio de Postgraduados y el modelo usado fué:

$$Y = X_1 - X_{25}/\text{STEPWISE MAXR}; \quad (4.10.2.)$$

El programa\* SAS793 (cuadro 4.10.1), realiza las regresiones con extrema facilidad, estimando directamente las constantes que multi

---

\* Los programas se codifican sobre formas especiales en máquinas perforadoras (cuadro 8.9. del apéndice).

Cuadro 4.10.1. Programa SAS793 para la estimación de la precipitación efectiva en caña de azúcar.

```
// VERACRUZ JOB CP119, FUNCION, CLASS = A, TIME = 1
// EXEC SAS793
// SYSIN DD *
DATA VERACRUZ;
INPUT X1 X2 X3 X4 Y;
X5 = X1**0.5;
X6 = X1**2;
X7 = X1**3;
X8 = X2**0.5;
X9 = X2**2;
X10 = X2**3;
X11 = X3**0.5;
X12 = X3**2;
X13 = X3**3;
X14 = X4**0.5;
X15 = X4**2;
X16 = X4**3;
X17 = (X1**0.5) * (X2**0.5);
X18 = (X1**2) * (X2**2);
X19 = (X1**3) * (X2**3);
X20 = (X2**0.5) * (X3**0.5);
X21 = (X2**2) * (X3**2);
X22 = (X2**3) * (X3**3);
X23 = (X3**0.5) * (X4**0.5);
X24 = (X3**2) * (X4**2);
X25 = (X3**3) * (X4**3);
CARDS;
PROC PRINT;
PROC STEPWISE;
MODEL Y = X1 - X25/STEPWISE MAXR;
/*
//
```

plican a las variables consideradas en cada modelo, y produce en un solo paso de máquina, los resultados del cuadro 8.10. del apéndice. Se obtienen de este cuadro, estimaciones de los coeficientes de regresión y otras estadísticas de interés. El examen de los resultados, nos permite obtener la ecuación que explica la precipitación efectiva como una función de la precipitación observada, láminas de riego aplicadas, evapotranspiración del cultivo y el número de días en que ocurrieron lluvias, quedándonos:

$$Pe_i = 0.43 + 1.02 Pr_i - 0.002 (Pr_i)^2 + 0.003 (Lr_i)^{0.5} (Et_i) - 0.000003 (Pr_i)(Nd_i) \quad (4.10.3.)$$

La ecuación (4.10.3.) arrojó una coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9997$  y puede proporcionar una estimación aceptable en la obtención de los requerimientos de riego netos potenciales en este cultivo y en la programación de los riegos en áreas cañeras bajo riego.

## V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### 5.1. Conclusiones.

- 5.1.1. La evapotranspiración de la caña de azúcar está íntimamente relacionada con la disponibilidad de agua en el suelo. El tratamiento en el que el consumo de agua fué el más elevado, correspondió al de mayor oferta de ésta (lisímetro 4; en el que los riegos se aplicaron cuando en el suelo se tenía el 80 % de humedad aprovechable).
- 5.1.2. Se relacionó la evapotranspiración de la caña de azúcar con la evaporación registrada en un tanque evaporómetro tipo "A", para obtener los coeficientes  $Kc_i$ , en los que se observa un efecto notable del desarrollo vegetativo del cultivo y del régimen de humedad del suelo.
- 5.1.3. Se obtuvieron cuatro funciones para la estimación de los coeficientes  $Kc_i$ , las que nos permiten conocer estos coeficientes con relación al desarrollo vegetativo del cultivo.
- 5.1.4. Se relacionó la tasa evapotranspirativa real (obtenida en los cuatro lisímetros), con la evapotranspiración máxima, obtenida también por lisimetría en un estudio realizado en los años 1977-1978, para obtener los coeficientes  $Ks_i$  para cada una de las etapas fenológicas consideradas. Sin embargo, estos resultados no son concluyentes debido a que no existió una etapa de restricción de la humedad del suelo, sino que la oferta de agua en cada uno de los tratamientos, fué constante para todo el ciclo vegetativo del cultivo.

- 5.1.5. Se obtuvieron tres funciones para estimar los coeficientes  $Ks_i$  para cada una de las etapas fenológicas en que se dividió el ciclo vegetativo del cultivo, correlacionando los  $Ks_i$  con el contenido de humedad aprovechable en el suelo.
- 5.1.6. Se obtuvo la función de producción para la variable rendimiento de caña, relacionado con los diferentes consumos de agua por la planta. En base a dicha función, fué posible calcular los valores óptimos de lámina consumida para que se produzca el máximo rendimiento (para las condiciones del estudio), siendo este valor de  $L = 269.504$  centímetros. Con esta función se estimó también el valor óptimo económico de lámina consumida y rendimiento en caña, para el área cañera del Distrito de Riego No. 35, encontrándose los valores de 243.60 centímetros y de 252.735 toneladas, respectivamente, siendo este último, muy similar al obtenido en el lisímetro 3 (riegos cuando en el suelo se tenía el 60 % de humedad aprovechable).
- 5.1.7. Se obtuvo una función que correlaciona el rendimiento de caña con el número de riegos aplicados y en base a dicha función se encontró el número de riegos óptimo para la producción de caña, siendo éste de 20.6; con este número de riegos se encuentra la máxima cantidad de caña por unidad de superficie. Esta función nos permitió obtener el valor óptimo económico para número de riegos aplicados, encontrándose que cuando  $Nr = 20.2$  el rendimiento óptimo económico esperado para el área de influencia del estudio es de 256.742 toneladas de caña por hectárea.
- 5.1.8. También se encontró una función que explica el rendimiento de azúcar por lámina de agua consumida y con esa función se obtuvo la lámina óptima para la producción de azúcar, siendo de 269.504 centímetros. De similar manera que para el rendimiento en caña, se obtuvieron los óptimos económicos para el rendimiento en azúcar, resultando los valores de 212.94 centímetros y 34.000 toneladas para la lámina óptima y el rendimiento óptimo económico de azúcar, respectivamente.

- 5.1.9. Se encontró una función que expresa la relación existente entre el número de riegos aplicados y el rendimiento de azúcar, y en base a esta ecuación se obtuvo el número de riegos óptimo para obtener el rendimiento máximo de azúcar, siendo de 20.8 para el primero y 36.030 toneladas el segundo. Se realizó también la maximización económica del número de riegos aplicados para obtener el rendimiento económico de azúcar, resultando éstos de 19.5 y 35.981 toneladas, respectivamente.
- 5.1.10. Se pudo corroborar que la producción de azúcar está íntimamente relacionada con la producción de tallos molederos (caña) y con el contenido de sacarosa de éstos.
- 5.1.11. Se encontró que la respuesta de otros parámetros de la planta, como son: altura de la planta, grosor del tallo, número de entrenudos por tallo, longitud de canuto y el índice de área foliar, se comporta notablemente similar al rendimiento tanto en caña y azúcar; mientras que el número de hojas por planta, número de hojas por  $m^2$ , número de tallos por  $m^2$  y número de tallos muertos por  $m^2$ , no guardaron la misma relación con los contenidos de humedad aprovechable en el suelo.
- 5.1.12. Se obtuvo un modelo matemático para estimar la precipitación efectiva en la caña de azúcar la que considera la precipitación observada, la lámina de riego aplicada, la evapotranspiración del cultivo y el número de días en que ocurrieron lluvias.
- 5.2. Recomendaciones.
- 5.2.1. Es recomendable repetir este estudio, incluyendo en el mismo, observaciones en condiciones de temporal (sin riego) y en condiciones de máxima oferta de agua, con el fin de explorar más la curva de rendimiento en función de la evapotranspiración del cultivo y poder establecer láminas óptimas de riego para un mejor aprovechamiento de los recursos agua y suelo.

- 5.2.2. Realizar un experimento en el que se pruebe el efecto de una restricción de la humedad en el suelo en diferentes etapas fenológicas del cultivo de la caña de azúcar, con el fin de detectar etapas críticas y tratar de encontrar el tipo de relación que existe entre el coeficiente  $Ks_i$  y la tasa evaporativa.
  
- 5.2.3. Realizar un estudio en el que se determine el costo de oportunidad del agua en el Distrito de Riego No. 35, con el fin de darle a este insumo el valor que le corresponde; el que se hace necesario considerar en la implementación de políticas tendientes a la autosuficiencia de estas unidades de producción.

## VI.- RESUMEN.

Con el fin de determinar los coeficientes de reducción de evapotranspiración máxima en el cultivo de la caña de azúcar, obtener las funciones de producción que relacionen el rendimiento de caña y azúcar con el agua consumida por el cultivo, correlacionar los consumos de agua con algunos parámetros fisiológicos de la planta y estimar la precipitación efectiva en la caña de azúcar; se llevó a cabo un estudio en el área cañera del Distrito de Riego No. 35, en terrenos pertenecientes al Centro Regional de Enseñanza, Capacitación e Investigación para el Desarrollo Agropecuario del Trópico Húmedo (CRECIDATH) del Colegio de Postgraduados en Tepetates, Veracruz, México.

El clima de la región es tropical lluvioso de pradera, con lluvias periódicas, invierno seco, con temperatura media anual de 25.4°C, con una precipitación media anual de 1285.8 mm.

Los suelos del área del estudio son de textura ligera sin problemas de sales ni de sodio y con un pH en su mayoría ligeramente ácido, ricos en materia orgánica y con buena velocidad de infiltración.

Se emplearon cuatro lisímetros de balance hídrico, en los que los tratamientos consistían en niveles de humedad aprovechable en el suelo, como criterio de aplicación de los riegos en el cultivo de la caña de azúcar; los que se aplicaron cuando en el suelo se tenía el 20, 40, 60 y 80 % de humedad aprovechable (lisímetro 1, 2, 3 y 4, respectivamente).

Durante el desarrollo de la caña de azúcar, se calcularon los consumos diarios de agua y a partir del cierre de campo, se hicieron observaciones semanales de altura de la planta, grosor del tallo, número de entrenudos por tallo, longitud de canuto, número de tallos por m<sup>2</sup>, número de tallos muertos por m<sup>2</sup>, número de hojas por planta y número de

hojas por  $m^2$ ; así como el cálculo semanal del índice de área foliar (I.A.F.). Al final se midieron las variables rendimiento de caña y rendimiento de azúcar.

Los resultados indicaron que la evapotranspiración de la caña de azúcar es una función del clima, como factor de demanda y del contenido de humedad disponible en el suelo como factor de oferta, así como que el rendimiento de caña está en función de la tasa evapotranspirativa del cultivo y a su vez el rendimiento de azúcar es una función del rendimiento de caña y el contenido de sacarosa.

También se observó que algunos otros parámetros responden a la evapotranspiración de la planta, en forma similar a la variable rendimiento y éstos a su vez influyen sobre el rendimiento.

La lámina consumida para un máximo rendimiento de caña y azúcar, fué de 269.504 centímetros y fué registrada por el cultivo en el lisímetro 4 (riegos cuando en el suelo se tenía el 80 % de humedad aprovechable).

El modelo propuesto para estimar la precipitación efectiva, considera la precipitación observada, la lámina de riego aplicada, la evapotranspiración del cultivo y el número de días en que ocurrieron lluvias y puede ser de gran utilidad para el establecimiento de los requerimientos de riego en la caña de azúcar.

VII.- BIBLIOGRAFIA.

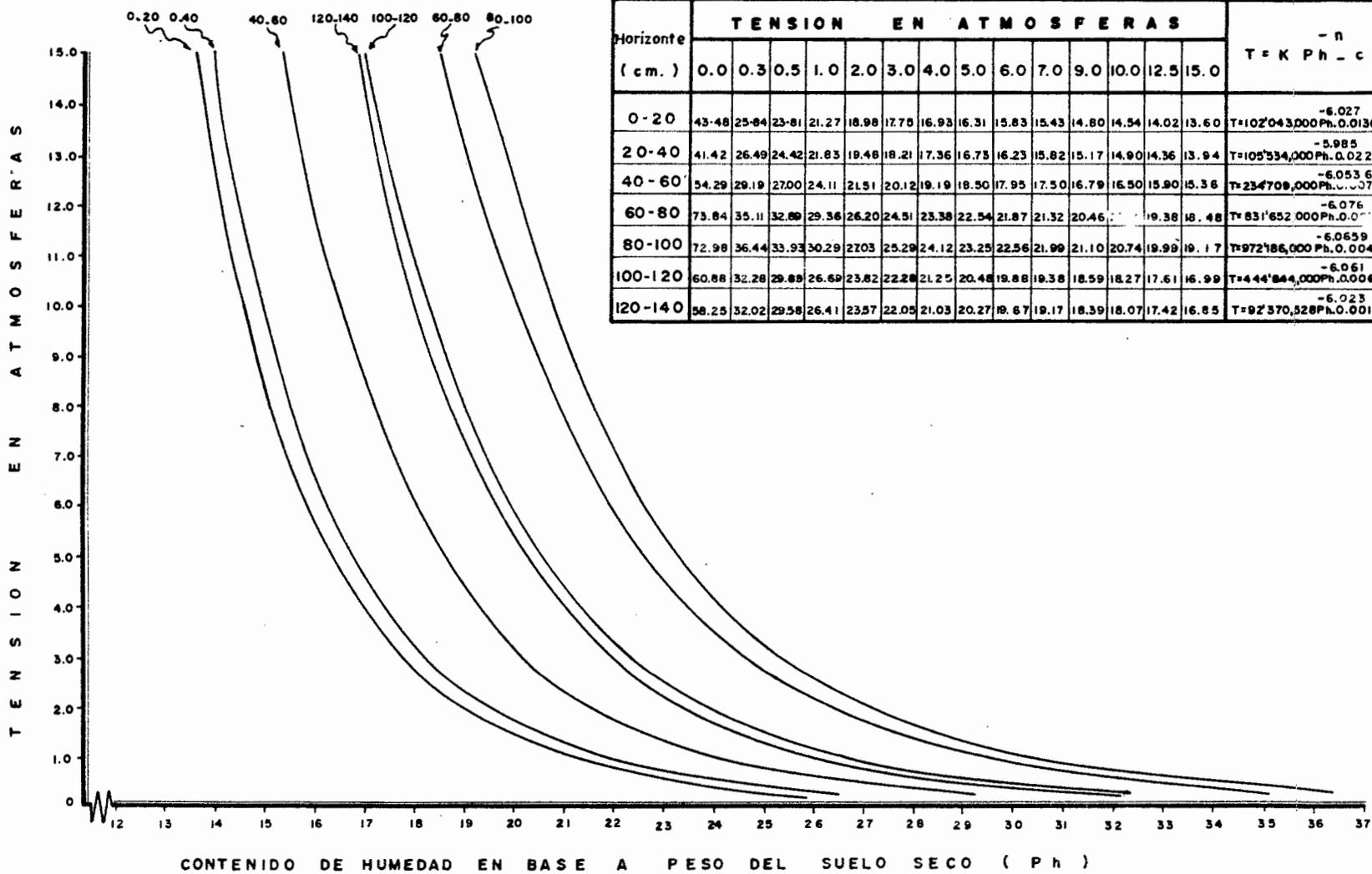
1. BOUMOL, W. J. 1965.  
Economic Theory and Operations Analysis (2 ed.). Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J.
2. CAMPBELL, B. R. 1969.  
Part II - Sugarcane. Irrigation of Agricultural Lands. Agronomy No. 11 - 33.
3. CHANG, J. H., B. R. CAMPBELL, and F. E. ROBINSON. 1963.  
On the Relationship Between Water and Sugarcane Yield in Hawaii. Agronomy Journal.
4. DISTRITO DE RIEGO No. 35. 1978.  
Estudio Preliminar sobre Evapotranspiración Máxima en Caña de Azúcar. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
5. DISTRITO DE RIEGO No. 35. 1977.  
Análisis de las Cuotas de Riego para hacer Autosuficiente el Distrito de Riego en Cinco Años. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México.
6. ENRLY, A. C. 1970.  
The Yield Response of Sugarcane to Irrigation in the Philippines. Proc. ISSCT.
7. GONZALEZ, H. O. 1974.  
Estimación de Requerimientos de Riego en Guatemala. Tesis M. C., C. P., E. N. A., Chapingo, México.

8. HANSON, C. 1976.  
Model for Prediction Evapotranspiration from Native Rangeland in Northern Great Plains. Transaction of the ASAE 19, 4.
9. HARGREAVES, G. H. 1968.  
Consumptive use Derived from Evaporation Pan Data. J. Irrigation and Drainage Division. Proc. of the ASCE, Vol. 94.
10. HEERMANN, D. F. and H. H. SHULL. 1976.  
Effective Precipitation of Various Application Depths. Transactions of the ASAE.
11. HERSHFELD, D. M. 1964.  
Effective Rainfall and Irrigation Water Requirements. Journal of the Irrigation and Drainage Division. Proc. of the ASCE, Vol. 90, No. IR 2.
12. KALDMAN, J. F. y M. F. SANCHEZ. 1977.  
Metodología para el Análisis Económico de la Parcela Cañera. Centro Nacional de Productividad, México.
13. KOUROUMA, L. 1979.  
Suelos, Agrohabitats y Función de Producción de la Caña de Azúcar en el Distrito de Actopan, Veracruz. Tesis M. C. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
14. MALDONADO, O. A. 1959.  
Consumo de humedad por la Caña de Azúcar en el Campo de Papaloapan, Veracruz. Tesis Profesional, Chapingo, México.
15. MARINATO, R. 1978.  
Respuesta del Cultivo de Trigo a Variaciones de la Humedad en el Suelo en Diferentes Etapas de Crecimiento. Tesis M. C., Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

16. MORAN, G. E. 1971.  
Estudio Comparativo de la Precipitación Efectiva Mediante Tres Procedimientos. Informe presentado a la Dirección General de Distritos de Riego, S. R. H., México.
17. NAVA, S. S. 1972.  
Concepto de Lluvia Efectiva y su Aplicación en la Programación de Riegos. Memorandum Técnico No. 307, S. R. H., México.
18. NORERO, SCH. A. 1974.  
Concepto Dinámico de Humedad Disponible y su Estimación para Fines Técnicos. V Jornadas Venezolanas de Riego. Caracas, CIDIAT, Mérida, Venezuela.
19. NORERO, SCH. A. 1976.  
Evaporación y Transpiración. Curso de Conservación de Aguas y Tierras. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
20. PALACIOS, V. E. y A. C. GONZALEZ. 1979.  
Estimación de los Factores de Ajuste de la Demanda Evapotranspirativa debido al Desarrollo Vegetativo de los Cultivos y al Contenido de Humedad del Suelo. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
21. PALACIOS, V. E. y A. G. MARTINEZ. 1978.  
Respuesta de los Cultivos a Diferentes Niveles de Humedad del Suelo. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
22. PALACIOS, V. E. 1971.  
Requerimientos de Riego de las Areas Bajo Riego en la República Mexicana. ICATEC Consultores, México.
23. PALACIOS, V. E. 1971.  
Manual de Operación de Distritos de Riego. Depto. de Irrigación, E. N. A., Chapingo, México.

24. PALACIOS, V. E. y J. L. JASPEADO. 1977.  
Método para Estimar la Tensión del Suelo en Función de su Contenido de Humedad. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
25. RUESTRA, D. D. 1979.  
Respuesta del Rendimiento de la Caña de Azúcar al Régimen de Evapotranspiración Máxima. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
26. SANCHEZ, N. F. 1972.  
Materia Prima: Caña de Azúcar. Librería de Porrúa, Hnos. y Cía. S. A., México.
27. SANDERSON, F. H. 1954.  
Methods of Crop Forecasting (1 ed.). Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass.
28. THOMPSON, G. D. 1965.  
The Relationship of Potential Evapotranspiration of Sugarcane to Environmental Factors. Proc. of the Twelfth Cong. of ISSCT.
29. ZIEROLD, R. L. 1969.  
Determinación de la Capacidad de los Canales de Riego. Revista Ingeniería Hidráulica No. 1, Vol. XXIII, México.

VIII.- A P E N D I C E.



Horizonte ( cm. )	TENSION EN ATMOSFERAS														- n T = K Ph - c		
	0.0	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	9.0	10.0	12.5	15.0			
0-20	43.48	25.84	23.81	21.27	18.98	17.75	16.93	16.31	15.83	15.43	14.80	14.54	14.02	13.60	T=102'043,000	Ph.0.01364	-6.027
20-40	41.42	26.49	24.42	21.83	19.48	18.21	17.36	16.73	16.23	15.82	15.17	14.90	14.36	13.94	T=105'334,000	Ph.0.0221	-5.985
40-60	54.29	29.19	27.00	24.11	21.51	20.12	19.19	18.50	17.95	17.50	16.79	16.50	15.90	15.36	T=234'709,000	Ph.0.0074	-6.0536
60-80	73.84	35.11	32.89	29.36	26.20	24.51	23.38	22.54	21.87	21.32	20.46	19.38	18.48		T=831'652,000	Ph.0.0000	-6.076
80-100	72.98	36.44	33.93	30.29	27.03	25.29	24.12	23.25	22.56	21.99	21.10	20.74	19.99	19.17	T=972'186,000	Ph.0.00485	-6.0559
100-120	60.88	32.28	29.89	26.69	23.82	22.28	21.25	20.48	19.88	19.38	18.59	18.27	17.61	16.99	T=444'844,000	Ph.0.00468	-6.061
120-140	58.25	32.02	29.58	26.41	23.57	22.05	21.03	20.27	19.67	19.17	18.39	18.07	17.42	16.85	T=92'370,528	Ph.0.00144	-6.023

FIG.. 8. 1. CURVAS DE TENSION DE HUMEDAD DEL SUELO DEL LISIMETRO 1

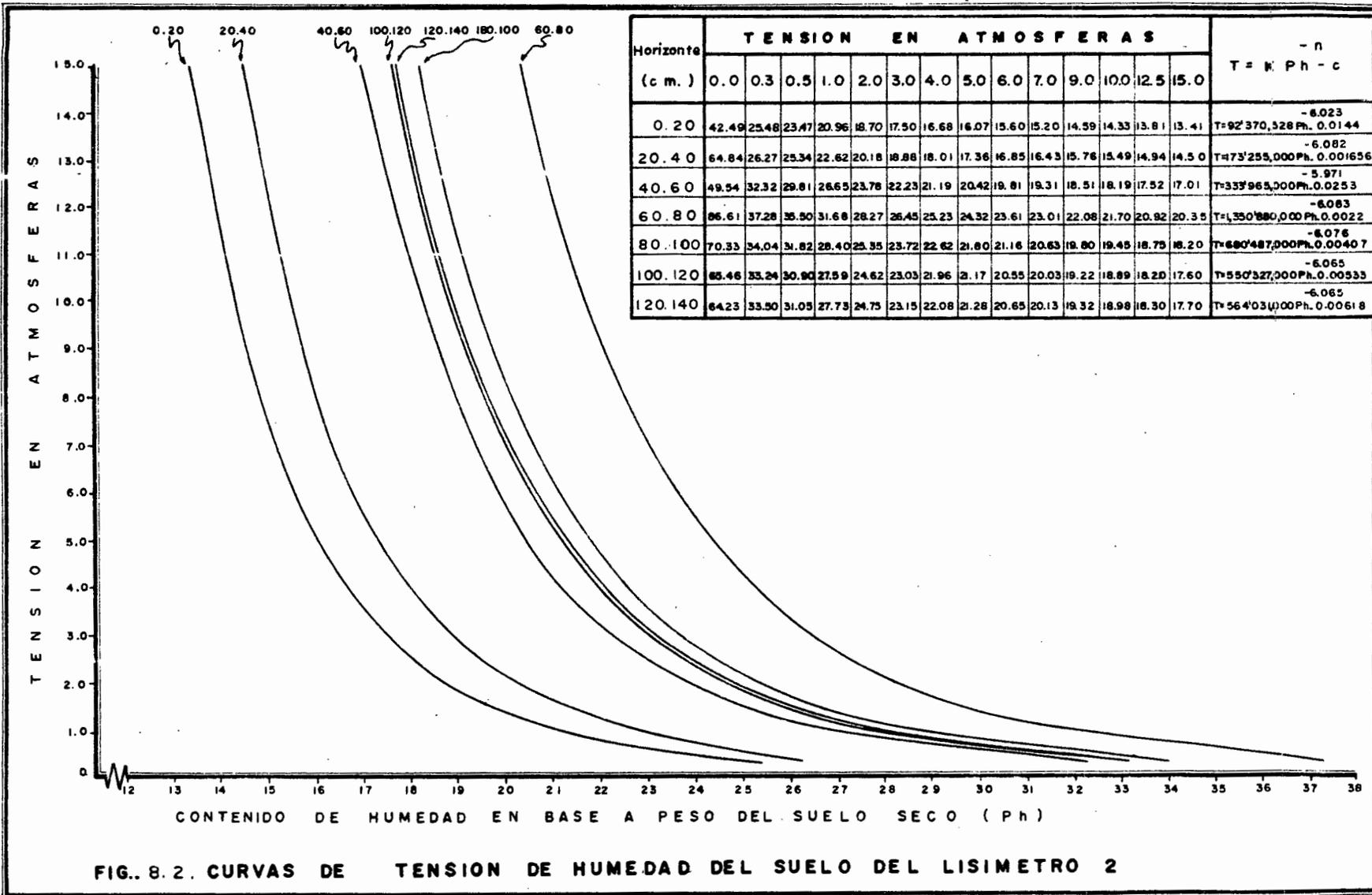


FIG.. 8.2. CURVAS DE TENSION DE HUMEDAD DEL SUELO DEL LISIMETRO 2

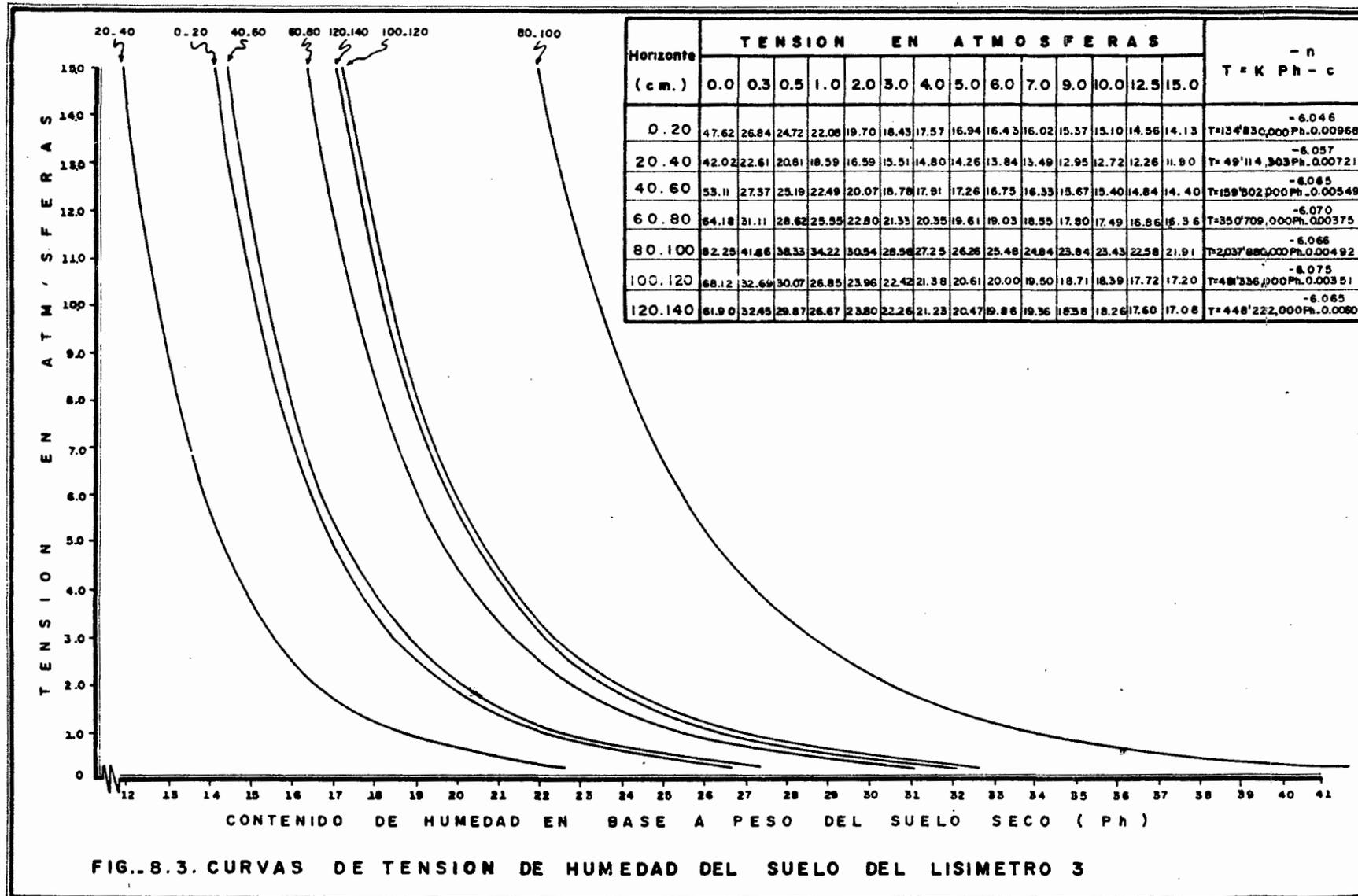


FIG.-B.3. CURVAS DE TENSION DE HUMEDAD DEL SUELO DEL LISIMETRO 3

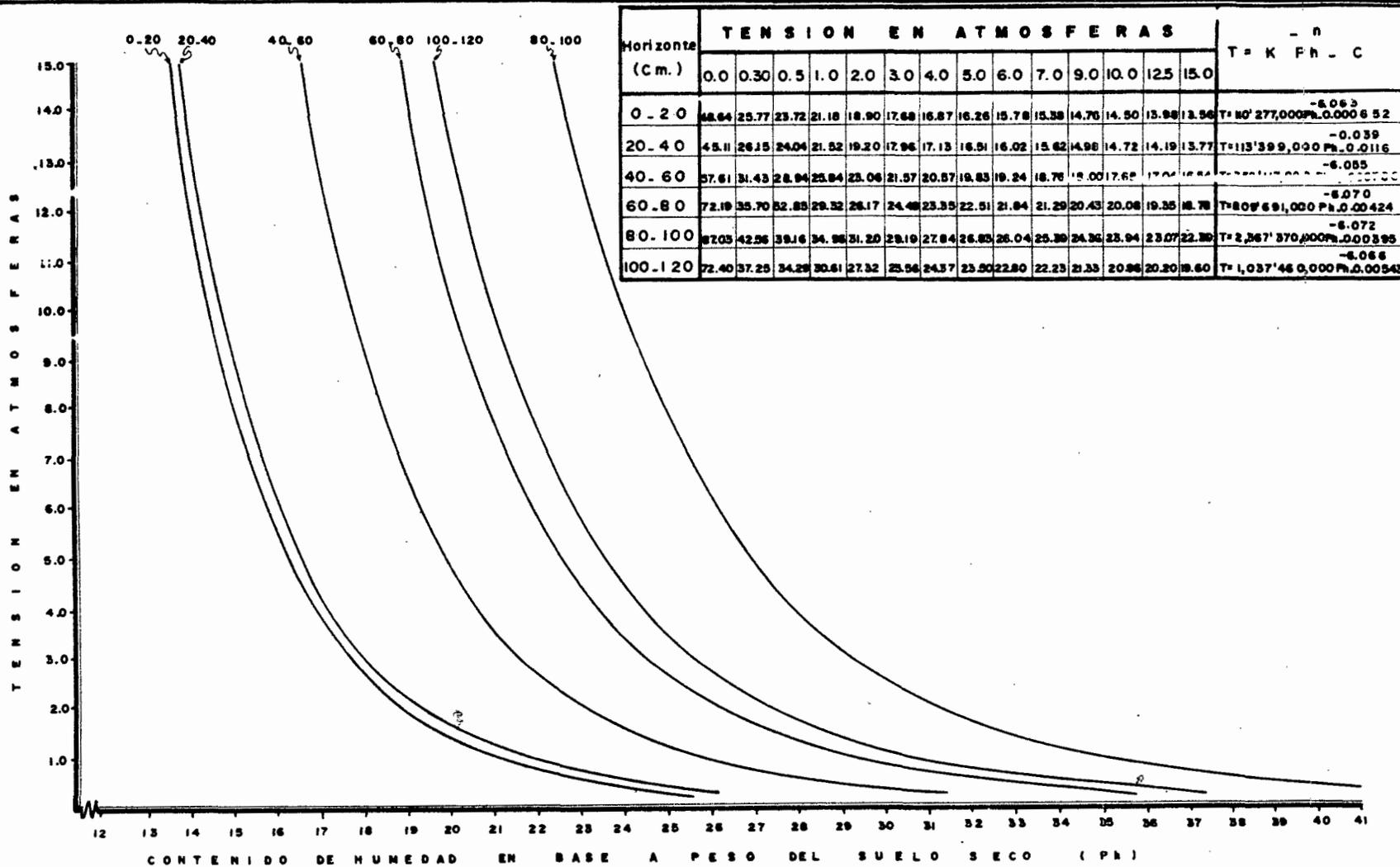


FIG. 8.4. CURVAS DE TENSION DE HUMEDAD DEL SUELO DEL LISIMETRO 4

Cuadro 8.1. Temperatura , humedad relativa, evaporación y precipitación promedio diario - mensual registradas en la estación Tepetates durante el desarrollo de la caña de azúcar.

M E	T E M P E R A T U R A ° C			HUMEDAD RELATIVA (%)	EVAPORACION (m m)	PRECIPITACION (m m)
	MAXIMA	MEDIA	MINIMA			
A B R	37.18	26.31	17.02	78.22	5.86	1.75
M A Y	35.81	26.50	17.19	78.45	5.04	3.37
J U N	36.13	27.10	18.08	77.31	4.40	4.53
J U L	38.56	28.51	18.48	79.26	5.45	3.72
A G O	35.24	26.14	18.21	85.09	4.68	14.59
S E P	34.08	24.98	17.53	79.90	4.96	10.58
O C T	34.91	25.49	16.03	79.70	4.54	1.60
N O V	31.42	23.24	15.07	80.40	3.24	0.38
D I C	29.02	21.27	13.52	84.76	2.75	1.12
E N E	30.92	21.95	12.98	82.57	3.13	0.72
F E B	31.21	21.91	12.60	76.51	4.35	0.03
M A R	34.55	25.17	15.79	77.64	5.01	0.00
A B R	35.57	26.52	17.47	77.93	5.45	0.17
M A Y	39.06	24.94	22.44	78.97	5.38	0.00
<b>S U M A S</b>	<b>483.66</b>	<b>350.03</b>	<b>232.41</b>	<b>1,116.71</b>	<b>64.24</b>	<b>42.56</b>
<b>P R O M E D I O</b>	<b>34.55</b>	<b>25.00</b>	<b>16.60</b>	<b>79.77</b>	<b>4.59</b>	<b>3.04</b>

SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS  
 DISTRITO DE RIEGO N.º 35.-RIOS LA ANTIGUA Y ACTOPAN.  
 RESIDENCIA DE FORMULACION Y CONTROL DE PROGRAMAS

TEMPERATURAS MEDIAS MAXIMAS Y MEDIAS MINIMAS MENSUALES 1970 - 1979.  
MAXIMAS Y MINIMAS ABSOLUTAS DIARIAS

ESTACION CARDEL.

Cuadro B 2

AÑO	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE	
	MAX. REL.	MIN. REL.	MAX. REL.	MIN. REL.	MAX. REL.	MIN. REL.	MAX. REL.	MIN. REL.	MAX. REL.	MIN. REL.														
1970	26.2	15.8	25.11	15.4	28.0	18.4	32.2	21.7	31.2	21.7	30.9	23.3	31.3	22.2	32.2	17.0	30.6	22.2	31.7	21.3	27.7	16.1	29.1	17.0
	29.0	11.0	32.3	9.0	35.0	13.5	37.0	16.5	35.0	16.5	35.0	18.5	34.0	18.8	34.1	20.5	35.0	20.6	34.5	12.0	30.0	9.0	31.5	14.5
1971	27.1	16.6	28.7	16.8	30.2	18.7	31.7	20.1	33.1	23.5	32.6	23.3	31.3	21.8	31.5	21.7	32.8	22.6	31.8	21.5	25.5	19.2	29.5	18.6
	31.0	14.3	38.5	12.5	34.5	12.5	40.5	15.5	37.0	21.0	39.0	21.8	34.0	20.0	34.0	20.0	35.0	21.0	34.5	17.5	33.0	12.5	33.0	15.0
1972	28.7	17.8	28.7	16.8	31.4	20.8	33.6	23.7	33.7	24.2	33.0	23.8	31.4	22.2	31.9	21.7	32.7	22.3	32.2	22.0	30.5	21.0	27.8	18.0
	32.0	14.0	32.0	13.5	37.0	17.0	36.5	19.0	38.0	20.0	36.0	22.0	35.5	21.0	34.0	19.5	34.0	21.0	34.0	20.0	35.0	17.0	32.5	11.0
1973	28.6	16.6	26.5	17.2	32.2	21.0	31.5	22.0	34.3	23.7	35.6	23.5	32.9	23.1	33.0	22.3	34.2	23.0	32.9	21.5	33.6	20.5	29.7	16.8
	33.0	9.0	32.5	10.5	35.5	16.5	34.0	17.5	42.0	21.0	38.5	21.5	36.0	20.3	34.5	20.0	36.0	20.5	34.5	19.5	37.5	16.5	33.5	10.0
1974	28.6	18.6	27.4	17.0	30.6	19.9	33.6	22.3	36.6	24.5	31.8	22.9	31.3	21.6	32.8	22.1	32.4	22.3	29.6	20.2	29.0	18.6	27.6	17.4
	32.5	16.0	33.5	10.5	35.0	13.5	40.0	16.0	43.5	22.0	39.0	19.5	33.0	20.0	34.5	20.5	35.0	18.0	32.5	17.0	34.0	12.5	31.0	11.0
1975	27.1	16.3	27.7	17.9	32.2	20.3	34.2	22.4	34.5	24.3	32.7	23.5	32.2	22.2	32.1	22.1	31.0	21.5	31.6	21.1	25.5	18.8	27.2	17.6
	32.5	10.0	32.5	12.0	37.0	16.0	37.5	20.0	39.0	22.0	37.0	21.5	36.0	20.0	34.0	21.0	34.0	16.5	34.0	17.0	33.0	13.0	32.0	14.0
1976	26.2	15.7	27.9	16.8	31.0	20.4	32.2	21.6	33.6	23.6	32.1	23.4	31.4	22.7	32.1	22.1	32.6	22.5	30.0	20.9	25.9	18.5	25.1	16.0
	30.0	13.5	31.0	9.0	35.0	15.5	36.0	17.5	38.0	20.0	36.0	19.5	34.9	20.9	34.5	20.0	35.0	21.0	33.5	17.0	31.0	13.5	30.5	12.5
1977	28.0	15.6	26.7	17.1	29.8	19.0	31.4	21.0	33.4	23.9	32.7	25.0	32.3	22.4	33.3	22.8	32.7	22.9	31.4	22.0	25.4	19.7	28.5	18.1
	34.5	10.0	38.0	14.0	36.0	13.0	37.0	16.0	36.5	19.5	35.5	21.5	33.5	21.0	35.0	21.0	36.0	21.0	35.5	17.5	33.5	16.5	32.5	11.0
1978	26.4	16.9	25.9	16.2	27.7	18.0	31.9	21.1	34.7	24.3	32.5	23.1	32.5	22.8	33.0	22.4	32.8	22.4	30.6	20.7	30.7	20.2	29.1	17.9
	30.0	14.0	32.0	13.0	33.0	13.0	37.5	16.5	39.0	21.0	34.0	21.5	35.0	21.5	35.0	21.0	37.0	21.0	33.5	17.0	33.0	18.0	34.0	12.5
1979	23.6	13.4	27.2	16.4	29.6	29.8	35.1	22.6	33.6	23.0	33.0	23.4	34.0	23.3	31.8	22.2	31.7	21.8	31.9	20.1	28.1	18.8	26.2	16.5
	35.5	10.5	32.5	12.0	35.0	15.5	41.0	20.0	39.0	20.0	37.5	21.0	36.0	22.0	34.0	21.0	34.0	18.0	35.0	18.0	32.5	14.0	31.0	12.5

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS  
 DISTRITO DE RIEGO N.º 35.-RÍOS LA ANTIGUA Y ACTOPAN, VER.  
 ESTACIÓN 1 CARDEL  
 DEPARTAMENTO DE FORMACIÓN Y ENTRENAMIENTO TÉCNICO  
 RESUMEN GENERAL DE TEMPERATURAS REGISTRADAS PERIODO 1951 - 1979.

Cuadro 8.3.

AÑOS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
1951	20.9	21.3	22.7	22.0	27.2	27.3	25.8	26.3	26.7	26.1	24.5	23.5	24.8
1952	23.3	22.8	25.7	26.1	27.4	26.8	26.4	26.9	26.4	23.3	24.0	21.9	25.1
1953	20.8	22.3	25.9	26.1	28.3	28.2	27.0	27.5	27.1	25.0	23.3	21.6	25.5
1954	22.5	22.3	24.5	27.1	27.7	27.5	26.3	27.2	26.7	24.9	22.8	20.9	25.0
1955	21.8	21.8	24.2	27.5	28.6	28.6	25.9	27.4	26.5	24.9	24.3	21.8	25.3
1956	21.2	23.2	24.1	26.5	27.4	26.0	26.2	27.1	26.6	25.2	22.8	22.3	25.1
1957	22.4	23.7	24.2	27.2	26.7	25.1	27.0	27.1	27.1	25.2	24.5	21.5	25.6
1958	19.6	21.6	24.3	25.9	27.5	25.3	27.2	27.9	27.2	26.3	24.3	21.4	25.2
1959	23.8	23.2	23.4	25.6	28.0	28.1	27.1	27.3	27.4	23.8	22.7	21.7	25.2
1960	22.1	20.3	23.1	25.5	27.5	23.4	27.0	27.5	26.7	27.4	25.0	21.9	25.2
1961	20.3	21.8	25.0	26.5	26.3	27.7	26.6	26.8	27.3	25.5	24.5	23.2	25.4
1962	20.7	24.4	24.3	25.3	27.2	28.1	27.3	27.7	27.3	26.6	24.5	22.8	25.5
1963	21.1	21.3	25.0	27.1	27.2	28.4	27.2	27.3	27.4	25.8	23.4	20.6	25.3
1964	20.8	21.8	24.6	23.1	26.4	27.2	25.8	27.8	27.1	25.2	23.6	20.6	25.4
1965	21.6	22.1	23.6	27.2	25.6	28.2	26.7	26.5	27.1	25.3	24.4	22.3	25.4
1966	20.4	20.9	22.6	27.2	27.7	27.5	27.7	27.4	26.9	25.8	23.6	20.8	24.8
1967	20.3	21.1	23.7	26.5	27.7	28.2	27.0	27.1	28.5	25.7	23.3	23.3	25.0
1968	21.1	21.1	21.2	26.0	25.4	27.6	26.6	26.8	27.1	25.2	22.8	22.0	24.8
1969	21.4	23.0	22.0	26.7	27.9	23.4	25.5	27.2	26.9	24.6	23.6	22.4	25.6
1970	21.0	20.3	25.2	27.0	26.5	27.1	26.8	24.6	26.5	26.5	21.9	23.5	24.6
1971	21.9	22.0	24.5	25.9	28.3	28.1	26.7	26.6	27.7	26.7	24.9	24.1	25.7
1972	23.3	22.8	26.1	28.4	25.0	28.4	26.8	26.8	27.5	27.1	25.8	22.8	26.2
1973	22.6	21.9	26.6	26.8	25.0	28.6	28.0	27.7	28.5	27.2	27.1	23.3	26.4
1974	23.6	22.2	25.3	28.0	30.6	27.4	26.5	27.5	27.4	24.9	23.8	22.5	25.8
1975	21.8	22.8	26.3	28.3	29.4	28.1	27.2	27.1	26.3	26.4	24.7	22.4	25.9
1976	21.0	22.4	23.7	26.9	28.6	27.8	27.1	27.1	27.6	25.8	22.2	20.4	25.2
1977	20.6	21.9	24.4	26.2	28.7	27.9	27.4	28.1	27.8	26.7	24.6	23.3	25.7
1978	21.7	21.3	22.8	26.5	29.5	27.8	27.7	27.7	27.6	25.7	25.5	23.5	25.6
1979	20.3	21.8	24.7	28.9	28.3	26.2	28.6	27.0	26.7	26.0	23.4	21.4	25.5
PROMEDIO 1951 - 79	21.4	22.1	24.3	26.9	28.2	28.0	27.0	27.1	27.1	25.9	24.0	22.3	25.4
PROMEDIO 1970 - 79	21.8	22.0	25.0	27.3	28.8	27.9	27.3	27.0	27.4	26.3	24.4	22.7	25.7

SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS  
 DIRECCION GENERAL DE DISTRITOS Y UNIDADES DE RIEGO  
 DISTRITO DE RIEGO No. 33.-RIOS LA ANTIGUA Y ACTOAN, VER.  
 DEPARTAMENTO DE FORMULACION Y CONTROL DE PROGRAMAS

MUNICIPIO. LA ANTIGUA, VER.

Cuadro B 4  
 ANALISIS DE LA PRECIPITACION FLUVIAL PERIODO 1970-1979

ESTACION: CARDEL

LATITUD 19°22' LONGITUD 96°22' ALTITUD 29.0 m.s.n.m.

- D A T O S -	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOV.	DIC.	ANUAL
PRECIPITACION MEDIA MENSUAL	10.2	6.6	3.8	4.6	31.6	261.6	268.6	237.2	274.6	56.0	45.0	15.9	1,256.0
PRECIPITACION MAXIMA MENSUAL	30.1	18.5	12.8	16.0	89.3	582.3	774.1	442.8	478.9	254.4	204.5	57.5	RECORD 774.1
AÑO	1974	1970	1978	1976	1978	1975	1972	1976	1970	1971	1977	1973	JULIO 1972
PRECIPITACION MINIMA MENSUAL	0.2	0.3	0.0	0.0	6.9	98.4	83.1	51.5	51.7	9.7	0.3	0.0	RECORD 0.0
AÑO	1977	1977	1973-75-77	1970	1970	1975	1976	1976	1973	1970	1970	1970	70-73-75-77
PRECIPITACION MAXIMA DIARIA	22.3	10.6	6.6	6.5	53.5	107.0	131.0	170.0	138.0	152.0	127.5	49.5	RECORD 187.5
DIA	16	7	15	6	29	29	22	22	21	5	23	11	23
AÑO	1971	1975	1972	1976-79	1978	1976	1972	1979	1974	1971	1977	1973	1977
DIAS DE LLUVIA MAYOR DE 0.1 mm.	24	27	15	29	43	127	176	140	135	74	68	33	673
PROMEDIOS DE DIAS DE LLUVIA	2.4	2.7	1.5	2.9	4.3	12.7	17.6	14.0	13.5	7.4	4.6	3.5	67.3
ALTURA MEDIA EN DIAS DE LLUVIA	4.3	2.4	2.5	1.6	7.4	20.6	15.3	16.9	20.3	13.0	9.4	4.9	
ALTURA MEDIA DIARIA	0.33	0.24	0.13	0.15	1.1	8.44	9.0	7.7	9.2	3.1	1.5	0.51	
MES CON MAYOR NUMERO DE DIAS DE LLUVIAS	4	6	5	8	9	19	25	22	16	10	8	8	107
AÑO	1973-76	1970	1970	1977	1978	1976	1972	1979	1970	1977-78	1972	1979	1972
MES CON MENOR NUMERO DE DIAS DE LLUVIAS	1	1	0	0	2	9	13	6	10	2	1	0	74
AÑO	1977-79	1976-77-78	1973-75-77	1970-78	1970-77	1979	1979	1971	1971-79	1979	1970	1970	1971
MES CON MEJOR NUMERO DE DIAS LLUVIAS INCL.	6	12	10	4	5	11	6	5	8	8	9	10	RECORD 12
AÑO	1971	1978	1978	1971-74-78	1970-71-71-75	1970	1971	71-74-75-76-78-79	1970	1972	1970-76	1979	1978
MES CON MENOR NUMERO DE DIAS LLUVIA INCL.	2	1	1	1	0	2	2	2	0	1	1	1	RECORD 0
AÑO	1977	1973	1974	1975	1978	1974-76-79	1973-78	1970-73-77	1977	1973	1973	1978	1977-78

SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS  
 DISTRITO DE RIEGO N.º 35.- RÍOS LA ANTIGUA Y ACTOPAN, VER.  
 ESTACIÓN : CARDEL.  
 DEPARTAMENTO DE FORMULACIÓN Y CONTROL DE PROGRAMAS.

LATITUD 19° 24'      LONGITUD 96° 20'      ALTITUD 29.0 m. s. n. m.

DIAS DE PRECIPITACION Y ASPECTO DEL CIELO

Cuadro B.5.

D A T O S	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
DIAS DE LLUVIA MAYOR LE 0.1 m.m.	1	2	1	5	6	9	13	22	10	2	6	6	83
% DE DIAS DE LLUVIA MAYOR DE 0.1 m.m.	3.2	7.1	3.2	16.7	19.3	30	41.5	70.9	33.3	6.4	20.0	23.8	23.2
DIAS DE PRECIPITACION INAP.	4	4	6	4	3	2	3	5	3	3	5	10	52
% DE DIAS DE PRECIPITACION INAP.	13.0	14.3	19.3	13.3	9.7	6.7	9.7	16.1	10.0	9.7	16.7	32.2	24.2
DIAS DESPEJADOS	7	5	10	26	4	18	13	4	2	10	13	3	119
% DE DIAS DESPEJADOS	21.6	17.8	32.2	86.7	12.9	60	41.9	12.9	6.7	32.2	43.3	9.6	31.5
DIAS MEDIOS NUBLADOS	8	7	7	1	20	2	13	15	19	13	9	10	124
% DE DIAS MEDIOS NUBLADOS	25.8	25	22.6	3.3	64.5	6.7	41.9	48.4	63.3	41.9	30.0	32.2	33.9
DIAS NUBLADOS	16	16	14	3	7	10	5	12	9	8	8	18	126
% DE DIAS NUBLADOS	51.6	57.1	45.2	10	22.6	33.3	16.1	38.7	30.0	25.8	26.7	58.0	34.5
PRECIPITACION TOTAL m.m.	4.9	2.0	3.0	11.5	61.5	122.4	84.7	448.8	251.2	94.3	6.6	38.7	1,129.2

SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS  
 DISTRITO DE RIEGO No. 35.- RIOS LA ANTIGUA Y ACTOPAN, VER.  
 ESTACION CAROEL  
 DEPARTAMENTO DE FORMULACION Y CONTROL DE PROGRAMAS  
 RESUMEN DE PRECIPITACIONES REGISTRADAS EN EL PERIODO 1951 - 1979.

Cuadro B. 6.

AÑOS	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE		ANUAL			
	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS	m.m.	DÍAS
1951	INAP.		9.2		4.5		4.9		31.0		156.9		200.5		288.8		239.7		85.1		INAP.		11.7		INAP.		1,032.8	
1952	6.7		INAP.		40.6		44.6		125.1		758.5		519.1		341.8		206.9		14.9		40.5		3.3		INAP.		1,902.0	
1953	1.6		10.0		INAP.		40.5		18.5		136.3		254.2		231.0		106.0		230.7		5.1		0.8		INAP.		895.2	
1954	1.8		1.4		0.6		6.9		104.6		366.4		369.6		100.6		264.5		36.4		213.5		22.2		INAP.		1,824.1	
1955	3.7		1.0		0.3		2.5		2.5		110.4		592.5		258.5		247.2		33.0		47.5		42.0		INAP.		1,223.3	
1956	13.6		15.8		2.0		8.7		55.5		477.8		253.4		135.1		114.0		77.1		0.0		6.6		INAP.		1,037.2	
1957	2.1		173.9		5.2		1.1		37.2		182.7		229.0		211.2		115.5		213.6		11.0		7.9		INAP.		1,515.3	
1958	23.7	10	12.4	5	1.4	4	2.1	3	63.5	6	222.4	17	525.0	27	195.8	10	305.5	15	112.3	11	16.7	7	5.9	5	INAP.		1,535.4	
1959	18.0	4	8.1	3	2.4	3	22.0	5	73.5	10	150.1	20	173.3	19	115.0	12	157.7	11	110.5	12	27.6	12	5.3	5	INAP.		1,033.1	
1960	6.2	3	5.7	2	1.0	1	15.2	3	25.1	4	117.3	12	536.0	22	435.0	19	154.9	11	20.2	10	34.2	10	5.4	3	INAP.		1,045.9	
1961	12.3	4	2.2	2	1.1	2	1.1	1	13.0	2	210.5	16	525.4	20	162.1	13	76.3	15	114.1	5	50.5	14	15.1	4	INAP.		1,415.5	
1962	0.1	1	0.0	0	1.5	1	42.2	7	131.5	6	181.9	13	523.6	20	191.2	11	220.2	15	5.9	4	3.6	3	15.0	4	INAP.		1,117.3	
1963	6.5	3	0.0	0	0.5	2	5.5	4	127.4	7	124.6	13	377.1	16	201.3	10	155.9	14	18.1	7	53.1	8	5.4	6	INAP.		1,055.1	
1964	4.0	2	5.5	2	10.4	2	1.5	1	92.8	7	210.4	16	142.8	15	232.5	11	197.2	18	29.9	10	35.7	6	10.5	6	INAP.		1,467.7	
1965	17.5	4	10.0	5	5.0	3	1.3	3	12.9	3	354.7	15	228.4	17	406.4	24	273.4	15	78.6	7	5.8	3	3.5	2	INAP.		1,254.3	
1966	3.9	3	24.8	4	13.6	5	11.4	7	31.2	6	977.1	18	156.6	17	174.5	13	233.0	14	83.7	8	78.9	7	4.0	5	INAP.		1,184.7	
1967	0.6	2	68.7	3	46.7	3	5.0	4	1.5	1	246.4	14	144.3	12	335.8	20	152.1	12	91.7	15	115.7	6	36.5	8	INAP.		1,111.2	
1968	21.6	9	8.4	5	9.3	2	0.0	-	14.8	6	227.6	12	188.2	18	210.5	15	165.9	14	46.9	6	8.0	5	4.5	2	INAP.		1,578.4	
1969	32.6	6	12.0	4	87.9	5	0.5	1	8.1	5	56.4	5	283.3	16	540.3	25	457.9	17	9.7	3	0.3	1	0	0	INAP.		1,179.0	
1970	3.7	2	18.5	6	1.7	3	0.0	0	6.9	2	272.6	10	157.3	20	239.4	16	478.9	19	254.4	9	41.9	6	18.7	4	INAP.		1,256.3	
1971	24.9	2	4.2	2	0.3	1	3.0	2	30.7	3	145.4	13	316.6	16	270.6	6	117.4	10	54.5	9	103.0	8	1.7	2	INAP.		1,649.3	
1972	2.5	2	2.6	3	11.9	2	2.2	4	28.8	4	169.8	12	774.1	25	277.1	19	221.9	17	167.4	9	8.2	3	57.5	4	INAP.		1,235.9	
1973	2.9	4	14.4	5	0	0	1.1	1	12.0	4	261.1	13	341.1	17	416.5	18	51.7	12	25.2	6	62.3	4	5.5	1	INAP.		1,694.0	
1974	30.1	3	10.0	3	8.0	1	2.3	3	23.1	3	518.1	13	431.6	17	116.2	11	442.4	16	12.7	9	7.7	4	8.9	7	INAP.		1,081.0	
1975	12.5	3	12.3	3	0	0	1.8	2	26.0	5	88.4	11	177.8	14	281.6	16	441.3	11	81.7	7	2.4	4	2.2	2	INAP.		1,043.6	
1976	8.0	4	1.0	1	8.4	2	16.0	4	18.8	5	582.3	19	85.1	15	51.5	8	195.2	15	91.0	10	204.3	7	24.6	6	INAP.		906.8	
1977	0.2	1	0.3	1	0	0	8.4	8	13.6	2	214.7	12	110.9	16	84.0	11	154.4	12	135.2	10	12.6	5	1.0	1	INAP.		1,376.7	
1978	12.8	2	0.7	1	12.8	3	-	0	89.3	9	231.6	15	291.1	23	194.3	13	391.3	15	94.3	2	6.6	6	38.7	8	INAP.		1,129.2	
1979	4.5	1	2.0	2	3.0	1	11.5	5	61.5	8	122.4	9	84.7	13	448.8	22	251.2	10										
SUMA TOTAL 1951-79	278.6		436.1		281.1		267.5		1,313.7		7,555.8		9,109.9		7,135.8		6,771.5		2,476.9		1,230.2		377.9		INAP.		37,268.9	
PROMEDIO 29 AÑOS	9.6		15.0		9.7		9.2		45.3		260.5		314.1		247.4		233.5		85.4		42.4		13.0		INAP.		1,285.8	
SUMA TOTAL 1970-79	102.1	24	66.0	27	38.3	15	46.3	29	316.1	43	2,616.4	127	4,623.3	176	2,372.0	140	2,745.7	135	860.1	74	449.7	43	158.8	35	INAP.		12,559.6	
PROMEDIO 10 AÑOS	10.2	24	6.6	27	3.8	15	4.6	29	31.6	43	261.6	127	268.8	176	237.2	140	274.6	135	56.0	74	45.0	43	15.8	35	INAP.		1,256.0	

SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRAULICOS  
 DISTRITO DE RIEGO N. 33, RIOS LA ANTIGUA Y ACTOVAL VER.  
 ESTACION: CARTEL  
 DEPARTAMENTO: CONTROL DE PROGRAMAS  
 RESUMEN GENERAL DE EMPOZACIONES SEASONALES REGISTRADAS EN M. M. DE 1951-1979

Cuadro B. 7.

AÑOS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
1951	113.6	126.2	150.0	147.4	160.4	163.1	143.3	161.8	122.1	123.2	112.3	96.4	1,407.8
1952	111.9	122.6	140.7	140.9	175.6	145.5	153.4	176.5	122.5	143.3	56.4	103.8	1,440.1
1953	115.4	125.8	143.4	176.2	175.1	179.4	159.1	156.5	143.4	117.6	95.9	98.2	1,518.2
1954	117.3	113.1	128.1	187.7	169.7	178.1	169.7	151.0	121.0	111.2	76.7	93.1	1,513.7
1955	120.3	122.5	154.3	151.6	191.6	173.6	143.1	175.0	131.0	151.8	87.7	103.0	1,611.0
1956	115.0	122.2	152.7	157.0	178.7	172.4	143.9	150.0	120.2	153.6	127.7	110.5	1,654.3
1957	115.1	127.2	152.2	172.5	171.7	171.3	137.6	154.8	117.3	123.1	52.7	66.3	1,602.6
1958	107.2	124.2	144.2	129.8	122.1	123.6	141.3	149.5	122.8	102.0	52.9	52.7	1,531.4
1959	102.7	109.6	125.1	125.6	125.4	125.9	112.4	101.5	131.6	123.1	57.3	67.9	1,428.0
1960	105.7	109.6	125.1	125.6	125.4	125.9	112.4	101.5	131.6	123.1	57.3	67.9	1,428.0
1961	108.5	117.0	140.0	140.2	151.6	151.6	133.7	147.1	109.9	114.5	66.1	75.8	1,442.7
1962	116.7	116.7	140.0	140.2	151.6	151.6	133.7	147.1	109.9	114.5	66.1	75.8	1,442.7
1963	93.7	116.7	140.0	140.2	151.6	151.6	133.7	147.1	109.9	114.5	66.1	75.8	1,442.7
1964	96.2	107.1	147.5	174.5	171.3	155.2	145.6	148.8	150.7	145.3	112.6	83.1	1,629.1
1965	103.7	97.2	136.1	153.6	153.7	153.7	134.1	123.6	115.1	117.2	82.3	76.8	1,483.5
1966	82.0	64.3	124.0	144.0	164.0	172.0	128.0	146.0	122.0	170.0	103.0	83.0	1,265.4
1967	88.7	111.1	129.2	148.6	168.6	171.1	111.7	137.1	111.1	113.1	83.1	75.1	1,335.4
1968	74.1	85.5	105.0	135.0	151.9	181.2	162.0	110.2	123.3	122.0	96.2	79.3	1,435.2
1969	80.2	96.3	107.8	149.1	162.8	192.0	129.7	147.6	122.0	135.0	97.5	87.0	1,460.4
1970	131.0	112.3	124.8	133.3	135.1	144.1	134.2	133.8	120.2	121.3	101.6	122.8	1,560.0
1971	102.0	102.0	120.0	140.0	160.0	180.0	130.0	140.0	120.0	130.0	100.0	120.0	1,400.0
1972	88.0	102.0	120.0	140.0	160.0	180.0	130.0	140.0	120.0	130.0	100.0	120.0	1,400.0
1973	89.0	96.7	120.0	140.0	160.0	180.0	130.0	140.0	120.0	130.0	100.0	120.0	1,400.0
1974	89.0	96.7	120.0	140.0	160.0	180.0	130.0	140.0	120.0	130.0	100.0	120.0	1,400.0
1975	87.5	103.7	120.0	140.0	160.0	180.0	130.0	140.0	120.0	130.0	100.0	120.0	1,400.0
1976	101.2	121.5	149.3	132.8	167.3	167.3	124.4	140.2	140.2	122.8	85.3	76.3	1,531.1
1977	81.7	99.7	142.0	162.5	163.0	171.5	121.7	146.3	121.7	131.7	102.0	77.9	1,463.1
1978	85.0	102.0	120.0	140.0	160.0	180.0	130.0	140.0	120.0	130.0	100.0	120.0	1,400.0
1979	84.1	48.0	62.0	130.0	136.0	143.0	159.0	118.5	114.3	112.1	86.3	81.4	1,254.1
PROMEDIO 1951 - 79	96.74	103.39	137.52	158.05	166.81	159.64	139.86	145.26	128.47	123.08	99.19	89.0	1,544.1
PROMEDIO 1970 - 79	91.58	96.44	123.29	158.73	161.91	153.95	141.44	142.15	135.08	124.31	100.73	91.72	1,438.9

CUADRO B.8 S. A. T. I. S. T. I. C. A. I. S. Y. S. T. E. M. S. S. A. T. I. O. N. E. S. S. A. T. I. O. N. E. S. S. A. T. I. O. N. E. S.

TR	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27	X28	X29	X30	X31	X32	X33	X34	X35	X36	X37	X38	X39	X40	X41	X42	X43	X44	X45	X46	X47	X48	X49	X50	X51	X52	X53	X54	X55	X56	X57	X58	X59	X60	X61	X62	X63	X64	X65	X66	X67	X68	X69	X70	X71	X72	X73	X74	X75	X76	X77	X78	X79	X80	X81	X82	X83	X84	X85	X86	X87	X88	X89	X90	X91	X92	X93	X94	X95	X96	X97	X98	X99	X100
1	418.2	56.2	12.8	15.8	17.8	18.8	19.8	20.8	21.8	22.8	23.8	24.8	25.8	26.8	27.8	28.8	29.8	30.8	31.8	32.8	33.8	34.8	35.8	36.8	37.8	38.8	39.8	40.8	41.8	42.8	43.8	44.8	45.8	46.8	47.8	48.8	49.8	50.8	51.8	52.8	53.8	54.8	55.8	56.8	57.8	58.8	59.8	60.8	61.8	62.8	63.8	64.8	65.8	66.8	67.8	68.8	69.8	70.8	71.8	72.8	73.8	74.8	75.8	76.8	77.8	78.8	79.8	80.8	81.8	82.8	83.8	84.8	85.8	86.8	87.8	88.8	89.8	90.8	91.8	92.8	93.8	94.8	95.8	96.8	97.8	98.8	99.8	100.8												



Continuación Cuadro B.8. ESTADÍSTICAS ANALÍTICAS SISTEMA 1963-1964

OPS	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X0	X1	X2
53	121.8	121.71	1	1	11.485	12.76	12.957	12.850	12.850	12.850	12.850	12.850
54	121.8	121.71	1	1	11.485	12.76	12.957	12.850	12.850	12.850	12.850	12.850
55	121.8	121.71	1	1	11.485	12.76	12.957	12.850	12.850	12.850	12.850	12.850
56	1.41421	1.41421	1	1	159.455	159.455	159.455	159.455	159.455	159.455	159.455	159.455





Cuadro 8.10.

STATISTICS I.C.I. ANALYSIS - J.Y.S.T. - 4

STEP 1 VARIABLE X1: INTERCPT

REGRESSION	1	1255.75130402	584.11	F	0.0000
TOTAL	55	687145.720871			

B VALUE					
INTERCPT	1	1255.75130402	584.11	F	0.0000
X1	55	687145.720871			

STEP 2 VARIABLE X2: ENTERFC

REGRESSION	2	1255.75130402	584.11	F	0.0000
TOTAL	55	687145.720871			

B VALUE					
INTERCPT	1	1255.75130402	584.11	F	0.0000
X1	55	687145.720871			
X2	55	687145.720871			

STEP 3 VARIABLE X3: ENTERFC

REGRESSION	3	1255.75130402	584.11	F	0.0000
TOTAL	55	687145.720871			

B VALUE					
INTERCPT	1	1255.75130402	584.11	F	0.0000
X1	55	687145.720871			
X2	55	687145.720871			
X3	55	687145.720871			

Continuación Cuadro B.10. STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM

STEP	VARIABLE	INTERCEPT	DF	SUM OF SQUARES	C(P)	TYPE II SS	DF	MEAN SQUARE	F	PROB>F
STEP 4 VARIABLE X25 INTEREC										
	INTERCEPT	14200000	1	11460000	0.0001	11460000	1	11460000	477.19	0.0001
	X25	10000000	1	10000000	0.0001	10000000	1	10000000	400.00	0.0001
	TOTAL		2	21460000		21460000	2			
STEP 5 VARIABLE X24 INTEREC										
	INTERCEPT	14200000	1	11460000	0.0001	11460000	1	11460000	477.19	0.0001
	X24	10000000	1	10000000	0.0001	10000000	1	10000000	400.00	0.0001
	TOTAL		2	21460000		21460000	2			
STEP 6 VARIABLE X24 INTEREC										
	INTERCEPT	14200000	1	11460000	0.0001	11460000	1	11460000	477.19	0.0001
	X24	10000000	1	10000000	0.0001	10000000	1	10000000	400.00	0.0001
	TOTAL		2	21460000		21460000	2			

Continuación Cuadro B.10.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM 4

STEP 7 VARIABLE Y12 ENTERED

REGRESSION F 64444.65

TOTAL SS 64444.65

STEP 8 VARIABLE X13 ENTERED

REGRESSION F 30759.66

TOTAL SS 30759.66

STEP 9 VARIABLE X17 ENTERED

REGRESSION F 18466.45

TOTAL SS 18466.45

STEP 10 VARIABLE X24 ENTERED

REGRESSION F 18466.45

TOTAL SS 18466.45

STEP 11 VARIABLE X25 ENTERED

REGRESSION F 65.57

TOTAL SS 65.57

STEP 12 VARIABLE X24 ENTERED

REGRESSION F 65.57

TOTAL SS 65.57

STEP 13 VARIABLE X25 ENTERED

REGRESSION F 65.57

TOTAL SS 65.57

STEP 14 VARIABLE X24 ENTERED

REGRESSION F 65.57

TOTAL SS 65.57

STEP 15 VARIABLE X25 ENTERED

REGRESSION F 65.57

TOTAL SS 65.57

STEP 16 VARIABLE X24 ENTERED

REGRESSION F 65.57

TOTAL SS 65.57

STEP 17 VARIABLE X25 ENTERED

REGRESSION F 65.57

TOTAL SS 65.57

STEP 18 VARIABLE X24 ENTERED

REGRESSION F 65.57

TOTAL SS 65.57

STEP 19 VARIABLE X25 ENTERED

REGRESSION F 65.57

TOTAL SS 65.57

NO OTHER VARIABLES MET THE 0.05 SIGNIFICANCE LEVEL FOR ENTRY INTO THE MODEL.