

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

DIVISIÓN DE AGRONOMIA



**RELACIONES DE RENDIMIENTO CON VARIABLES
HÍDRICAS EN VARIEDADES DE FRIJOL**

Por:

MANUEL DE JESÚS BARRERAS SALAZAR

TESIS

**Presentada como requisito parcial
Para obtener el título de:**

INGENIERO AGRÓNOMO FITOTECNISTA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre del 2002

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE AGRONOMIA
ESPECIALIDAD DE FITOTECNIA**

**RELACIONES DE RENDIMIENTO CON VARIABLES HÍDRICAS EN
VARIEDADES DE FRIJOL**

Por:

MANUEL DE JESÚS BARRERAS SALAZAR

**Que somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito
parcial para obtener el título de:**

Ingeniero Agrónomo en Fitotecnia

APROBADA

Presidente del Jurado Calificador

MC. Francisco Javier Valdés Oyervidez

Sinodal

MC. Oscar Ulises Martínez Burciaga

Sinodal

MC. Reynaldo Alonso Velasco

Sinodal

MC. Alfonso Rojas Duarte

El Coordinador de la División de Agronomía

MC. Leopoldo Arce González

Buenavista, Saltillo, Coahuila, Diciembre del 2002

DEDICATORIAS

A MIS PADRES

**EVA ANGELINA SALAZAR ALMADA
MANUEL BARRERAS MILLAN**

LOS QUE ESTUVIERON SIEMPRE A MI
LADO DESDE EL INICIO DE MI CARRERA,
BRINDANDOME APOYO, CONFIANZA,
COMPRENCION Y SU MAS SINCERA AMISTAD
A QUIENES LES DEBO LA VIDA Y LA PERSONA
QUE SOY.

A MI ESPOSA NORA ELIA

QUE ME DIO SU APOYO INCONDICIONAL,
SINCERO Y TRASPARENTE, EN ESTE Y EN
TODOS LOS PROYECTOS EMPRENDIDOS
Y CON QUIEN HE COMPARTIDO LA MITAD
DE MI VIDA

A MIS HIJOS

ELMER MANUEL Y NORA NEIDY

QUIENES CON UNA SONRISA
LLENAN DE LUZ MI HOGAR Y MI VIDA

A MIS HERMANOS

**ELMER, REMBERTO, HAYDEE, ADRIANA, JORGE
FRANCISCO, ROLANDO, ALMA Y RODOLFO**

QUIENES CON UNA PALMADA, UNA
PALABRA DE ANIMO, ME AYUDARON
A CULMINAR MI CARRERA

A MI MAESTRO Y GUIA

DR. JORGE GALO MEDINA TORRES

QUIEN ME DIO LA CONFIANZA Y FE
EN MI MISMO, LOGRANDO ALCANZAR
EL COMPROMISO CONTRAIDO CON
NUESTRA ALMA MATER Y CON MI PERSONA.

A EL

PERO MAS QUE NADIE
A ALGUIEN A QUIEN
MI FE ESTARA DEPOSITADA
HOY Y SIEMPRE

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Al MC. Oscar Ulises Martínez Burciaga

Al MC. Francisco Javier Valdés Oyervidez

Al MC. Reynaldo Alonso Velasco

Al MC. Alfonso Rojas Duarte

Al MVZ Enrique Sánchez Cruz

Al LIC. José Manuel Díaz Medina

Cap.	INDICE DE CONTENIDO	Pag.
	INDICE DE CUADROS.....	
	INDICE DE FIGURAS.....	
I	INTRODUCCIÓN.....	1
II	REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
II.1	Generalidades.....	5
II.2	Parámetros Hídricos del Sistema Suelo-Planta-Atmósfera.....	6
II.3	Balance Hídrico.....	6
II.4	Evapotranspiración Real o Potencial.....	7
II.5	Humedad Disponible en el Suelo.....	9
II.6	Tensión Hídrica en el Sistema Suelo-Planta.....	11
II.7	El Estrés Hídrico en Etapas Fenológicas.....	12
II.8	El Estrés Hídrico en el Frijol.....	14
II.9	Funciones de Producción al Insumo Hídrico.....	18
III	MATERIALES Y METODOS.....	26
III.1	Localización del Sitio Experimental.....	26
III.2	Características del Suelo.....	26
III.3	Características del Clima.....	26
III.4	Factores de Estudio.....	26
III.5	Diseño Experimental.....	27
III.6	Características de las Variedades.....	27
III.7	Fecha de Siembra.....	28
III.8	Densidad de Población.....	28
III.9	Fertilización.....	28
III.10	Riego.....	28
III.11	Fenología del Cultivo.....	28
III.12	Rendimiento de la Cosecha.....	28
III.13	Variables Hídricas Medidas.....	28
III.13.1	Humedad del Suelo.....	28
III.13.2	Curva de Retención de Humedad.....	29
III.14	Variables Hídricas Calculadas.....	29
III.14.1	Lámina de agua almacenada (LA).....	29
III.14.2	Abatimiento Promedio de la Humedad Disponible (APHD).....	29
III.14.3	Evapotranspiración Real por Etapa Fenológica (ETR).....	30
IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
IV.1	Láminas de Agua Almacenadas en el Suelo en las Diferentes	
IV.2	Etapas Fenológicas.....	31
IV.3	Abatimiento de la Humedad Disponible.....	34
IV.4	Tensión Hídrica en el Suelo.....	36
IV.5	Evapotranspiración Real.....	39
IV.6	Rendimiento de la Cosecha.....	43
IV.7	Relaciones entre Variables Hídricas.....	46
IV.8	Relaciones de Rendimiento con Variables Hídricas por Etapa Fenológica.....	48

IV.9	Relaciones Rendimiento-Evapotranspiración Real Global.....	53
	Funciones de Producción.....	56
V	CONCLUSIONES.....	59
VI	LITERATURA CITADA.....	60

Num.	INDICE DE CUADROS	Pag.
4.1	Lámina promedio de agua almacenada (mm.) por etapa fenológica de la variedad Mex-241.....	32
4.2	Lámina promedio de agua almacenada (mm.) por etapa fenológica de la variedad 83 VEF MXA 238.....	33
4.3	Abatimiento promedio de la humedad disponible por etapa fenológica de la variedad Méx-241 en tratamientos de disponibilidad hídrica.....	35
4.4	Abatimiento promedio de la humedad disponible por etapa fenológica de la variedad 83 VEFMXA-238 en tratamientos de disponibilidad hídrica.....	36
4.5	Tensión hídrica (bars) promedio por etapa fenológica de la variedad MEX-241 en tratamientos de disponibilidad hídrica.....	37
4.6	Tensión hídrica por etapa fenológica de la variedad 83 VEFMXA-238 en tratamientos de disponibilidad hídrica.....	38
4.7	Evapotranspiración real (mm) por etapa fenológica en la variedad Mex-241 en tratamientos de disponibilidad hídrica.....	40
4.8	Evapotranspiración real (mm) por etapa fenológica de la variedad 83 VEFMXA-238 en tratamientos de disponibilidad hídrica.....	42
4.9	Rendimiento de grano (kg/ha) de la variedad MEX-241 en tratamientos de disponibilidad hídrica.....	43
4.10	Rendimiento de grano (kg/ha) de la variedad 83 VEFMXA-238 en tratamientos de disponibilidad hídrica.....	45
4.11	Valores de correlación entre variables hídricas en la variedad MEX-241.....	47
4.12	Valores de correlación entre variables hídricas en la variedad 83 VEFMXA-238.....	47
4.13	Valores de correlación entre variables hídricas y rendimiento de la variedad MEX-241.....	48
4.14	Valores de correlación entre variables hídricas y rendimiento de la variedad 83 VEF MXA-238.....	48

INDICE DE FIGURAS

Núm.		Pag.
4.1	Relación entre el rendimiento y la evapotranspiración real en la etapa de floración en dos variedades de frijol.....	50
4.2	Relación entre el rendimiento y la evapotranspiración real en la etapa de formación de grano en dos variedades de frijol.....	52
4.3	Relación entre el rendimiento y la evapotranspiración real durante el ciclo de desarrollo, en dos variedades de frijol.....	55

I. INTRODUCCIÓN

Los conceptos que generalmente se utilizan en aspectos relacionados con el agua en cuanto a su disponibilidad en el suelo y a su utilización por los cultivos, pueden ser considerados como variables diferentes, dadas las diferentes formas como se presentan en el sistema suelo-planta-atmósfera.

Conceptos simples como contenido de humedad en el suelo o lámina de riego, pueden ser indicadores de disponibilidad en cuanto a cantidad, sin embargo, no manifiestan la forma de disponibilidad para las plantas. Otros conceptos como abatimiento de la humedad disponible o tensión hídrica en el suelo o planta, se relacionan más con la forma en que el agua se encuentra disponible.

La consideración de uno u otro concepto en estudios en donde se involucra el agua, depende de la información que se tenga o pudiera tener en un momento dado. La más simple pudiera ser, el conocimiento de las láminas de riego, o un poco más complicado, el conocimiento del contenido almacenado en el suelo a cierta profundidad.

Las formas más complicadas de consideración de la humedad quizá, sean las que reflejen con mayor aproximación el estado de disponibilidad, sin embargo, las implicaciones de su obtención, generalmente limitan su utilización.

El conocimiento de las relaciones de variables hídricas con el rendimiento, resulta de principal importancia, dado que nos dará los elementos para determinar la mejor utilización del agua, sobre una base de producción óptima económica.

Al considerar los diferentes conceptos de disponibilidad hídrica en el sistema suelo-planta-atmósfera, se pueden establecer la cercanía que cada concepto tiene al rendimiento y a su vez, se puede determinar cuando y con que magnitud actúan.

Lógicamente, las mejores relaciones con el rendimiento, deben darse con las variables hídricas cuyas características se ajusten mejor a la condición real de disponibilidad, sin embargo, pudieran establecerse relaciones con variables más simples o de mayor facilidad en su medición.

Estas relaciones, generalmente expresadas en forma de modelos matemáticos nos sirven como una herramienta de planeación ya que nos permiten predecir el comportamiento del cultivo bajo diferentes condiciones de humedad, según la variable, y en base a esto, administrar la aplicación del agua en función de los rendimientos deseados.

I.1. JUSTIFICACIÓN

Sobre cualquier condición de explotación agrícola, el manejo eficiente del agua, debe ser una de las acciones más importantes que deban implementarse. Sin embargo, cuando la explotación se hace bajo condiciones de escasa disponibilidad de este recurso, resulta de vital importancia y quizá de mayores efectos, su buena o mala utilización.

En Durango, se dan comúnmente las condiciones de escasa disponibilidad hídrica que caracterizan a las regiones áridas y semiáridas de México. Estas condiciones, generalmente determinan baja producción de cosechas y en muchos de los años, hasta pérdida total de ellas. Como limitante principal, sobre la eficiencia en el uso del agua se establecen muchas de las acciones de investigación del Campo Experimental Valle del Guadiana. Las más comunes, están enfocadas a determinar especies o variedades con mayor adaptabilidad a las condiciones hídricas existentes, otras, buscan estudiar los mecanismos de adaptación de manera de poder ajustar las condiciones de la planta, a las condiciones del medio, y otras más, indirectamente buscan la relación óptima de los factores de la producción con el rendimiento.

Sin embargo, estudios directos sobre el manejo del agua, con propósitos de irrigación son limitados, y generalmente las recomendaciones que surgen de ellos, no se adaptan a las condiciones de operación de las obras de riego impuestas en muchos de los casos, por las condiciones de disponibilidad de agua en las fuentes de almacenamiento.

Metodologías para determinar recomendaciones sobre el manejo del agua, deben sustentarse en un conocimiento más profundo de las relaciones hídricas en el sistema suelo-planta-atmósfera. Al entender éstas relaciones, tendremos criterios más amplios para definir las acciones más viables que resulten en una mayor productividad al utilizar dicho recurso.

Sobre la magnitud y las características de los conceptos hídricos que se considerarán en este estudio, conviene evaluar sobre un amplio margen, las respuestas de especies de cultivos o variedades, dado que para cada condición se esperaría un valor diferente el cual estaría determinado por cuestiones genéticas o fisiológicas de la planta.

De ésta manera, podremos establecer sobre rangos más amplios, medidas más precisas para manejar el agua, de acuerdo con la condición de suelo, clima y tipo de planta o variedad específica. Asimismo, podremos caracterizar a las diferentes variedades en respuesta al factor hídrico y a sus relaciones con otros factores de la producción.

I.2. OBJETIVOS

- Identificar las variables hídricas del sistema suelo-planta-atmósfera que se relacionan de manera significativa con el rendimiento de dos variedades de frijol bajo condiciones de riego.
- Determinar en que etapa fenológica del cultivo, la respuesta a la condición de humedad es más importante en cuanto a rendimiento.

- Comparar la respuesta de las variedades de frijol a las diferentes condiciones de humedad, dadas en las diferentes etapas fenológicas.
- Construir modelos de predicción del rendimiento basados en las condiciones de humedad que se presentan en las etapas fenológicas del cultivo.

I.3. HIPÓTESIS

- Existen variables hídricas que están directamente relacionadas con el rendimiento del cultivo del frijol.
- La condición de humedad que se presente en determinada etapa fenológica del cultivo, se refleja mayormente en el rendimiento del cultivo.
- Para una misma condición de humedad dada, la respuesta de dos variedades de frijol será diferente.
- La relación que existe entre el rendimiento y las variables de humedad, se pueden representar en modelos de predicción cuyos componentes involucren el efecto de la variable en las etapas fenológicas del cultivo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

II.1. Generalidades.

En México, el frijol ocupa el tercer lugar en importancia como cultivo debido a la cantidad de hectáreas (2.2 millones) que se siembran y al volumen de consumo por persona (22 Kg./año). La producción de frijol en México básicamente se obtiene bajo condiciones de temporal; sin embargo, en condiciones de riego se obtienen los más altos rendimientos (Pérez et al, 1989).

En la región semiárida de altura de la Sierra Madre Occidental de México, se siembran con frijol aproximadamente un millón doscientas mil hectáreas bajo condiciones de temporal. Esta región comprende parte de los Estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, el Altiplano de San Luis Potosí y el norte de Guanajuato que equivalen aproximadamente al 60 % de la superficie sembrada con frijol en México.

El rendimiento promedio es de 530 Kg./ha., con un potencial tres veces mayor. Los problemas tecnológicos que reducen la producción han sido la precipitación escasa y errática con sequías antes, durante y después de la floración; el uso de variedades susceptibles a enfermedades y siembra en suelos no agrícolas. (Valdés, 1989).

Ibarra (1988), considera que los bajos rendimientos y en consecuencia los bajos ingresos obtenidos por los agricultores dedicados al cultivo del frijol de temporal en la zona semiárida de altura de México, podrían incrementarse en parte, con la formación de variedades tolerantes a la sequía. También es necesario identificar las características fenológicas, morfofisiológicas y bioquímicas de las plantas tolerantes a la sequía.

II.2. Parámetros Hídricos del Sistema Suelo-Planta-Atmósfera

II.2.1. Balance Hídrico

Norero (1982), considera que el balance hídrico es la formulación matemática de la ley de la conservación de la materia aplicada al agua en un sistema dado que puede ser de cualquier tamaño y se le a empleado para planificar el aprovechamiento de los recursos hidráulicos, identificar períodos de déficit y suficiencias de agua de un cultivo, etc.

Jasso (1993), señala que el balance hídrico es la técnica más empleada para calcular el consumo de agua por los cultivos. Considera que los esfuerzos para cuantificar este proceso se pueden agrupar en técnicas de campo y técnicas de simulación.

Israelsen (1975), citado por Rivera (1988), menciona que el objetivo principal del uso del balance hídrico es determinar el contenido de humedad de un suelo. Esta información es necesaria para calcular el agua que se necesita para restaurar la humedad del suelo a la capacidad de campo.

El balance de humedad para un cultivo dado, con referencia al estrato del terreno explorado por el sistema radical, se expresa de la siguiente manera (Bertolacci 1895).

$$ETR = I + P - p - r + AU$$

donde :

ETR = Evapotranspiración real del cultivo (mm.).

I = Aporte de agua por irrigación (mm.).

P = Aporte de agua por precipitación (mm.).

p = Pérdida de agua por percolación profunda (mm.).

r = Pérdida de agua por escurrimiento superficial (mm.).

AU = Variaciones (positiva o negativa) de la humedad inicial y final de un periodo (mm.).

II.2.2. Evapotranspiración Real o Potencial

Ortiz (1984), define a la evapotranspiración real o actual como la cantidad de agua perdida por el sistema suelo planta en las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes

Penman, (1956), sugirió que la definición original se modificara para incluir la especificación que la superficie estuviera cubierta totalmente por vegetación verde, pues se ha encontrado que la evapotranspiración depende de la densidad de cubierta vegetal sobre el suelo y de la edad de la planta. Puede observarse que existe diferencia entre la evapotranspiración real ET_r y la potencial ET_p , debido a que los cultivos normales en pocas ocasiones se encuentran en circunstancias óptimas.

Palacios (1982) citado por Fernández (1986), diferencia tres variantes de evapotranspiración:

- Evapotranspiración potencial. Se refiere a la demanda evaporativa de los efectos atmosféricos, y su valor es muy cercano al agua que consume un cultivo tipo gramínea, que cubre totalmente la superficie del suelo, de 8 a 15 cm., de altura, en crecimiento activo, y sin restricción de humedad.
- Evapotranspiración máxima. Es la cantidad de agua que consume un cultivo en condiciones óptimas de riego, en un momento determinado de su desarrollo vegetativo.
- Evapotranspiración real. Es el volumen de agua que consume un cultivo bajo las condiciones prevalecientes en un momento dado de su desarrollo vegetativo.

Aguilera (1980) señala que en general, la evapotranspiración depende de factores hídricos, edáficos, vegetales y alimenticios.

Etherington (1975), establece que las características de las plantas que afectan la evapotranspiración son: sistema radicular, arreglo foliar, localización y comportamiento de los estomas, así como la altura de la planta.

Bowman et al (1991), realizaron un estudio en el que compararon tasas de evapotranspiración (ET) en 20 cultivos de tallo alto (*Festuca arundinacea* Schreb), midiéndola durante siete días en invernadero. Existió una pequeña pero significativa diferencia en las tasas de ET entre el crecimiento del cultivo sin déficit de humedad. Las mayores diferencias se desarrollaron después de siete días del crecimiento, con los rangos bajos de la ET de 10.0 mm/día (corto) y alto 13.5 mm/día (largo). La ET en el séptimo día fue correlacionado positivamente ($r = 0.82$) con corte de peso seco.

Abdul-Jabbar et al (1983), en estudios de campo para determinar la relación entre la evapotranspiración relativa y el contenido de humedad del suelo en varios cultivos, utilizaron el método del balance de humedad para medir el consumo de agua de cada cultivo.

Jasso (1993), concluye con respecto a la bondad de ajuste de los modelos de Palacios y Reddy, que los dos presentan capacidad de predicción tanto del contenido de humedad del suelo como de la evapotranspiración real aunque, considera que el más práctico es el de Reddy porque requiere de datos más accesibles.

Rivera (1988), señala que la estimación de la evapotranspiración es muy importante para la calendarización de los riegos; ya que de esta manera se aplicará el agua estrictamente necesaria al cultivo, habiendo por lo tanto un ahorro

de agua importante principalmente en zonas áridas y semiáridas donde su disponibilidad es muy limitante.

Israelsen (1975), menciona que mediante el conocimiento de los datos de CC, PMP y DA, es posible determinar la cantidad de evapotranspiración que ocurre en un período determinado, utilizando los datos de muestreo de la humedad del suelo.

González (1991), señala que el método más confiable para medir la evapotranspiración, es el “método de campo” que consiste en hacer mediciones de la humedad del suelo por el método gravimétrico, sin embargo, este método es muy laborioso para llevarse a cabo a nivel regional.

Abdul-Jabbar et al (1983), determinaron diferentes relaciones entre la evapotranspiración relativa y la humedad disponible en el suelo para diferentes tipos de textura y diferentes cultivos.

II.2.3. Humedad Disponible en el Suelo

La capacidad de almacenamiento y movimiento de agua en el suelo son factores importantes que deben tomarse en cuenta en las acciones de optimización del uso del agua por los cultivos, ya que de éstos dependen tanto la cantidad de agua como reserva para abastecer la demanda, así como la velocidad en que esto puede ocurrir (Jasso, 1992).

Ortíz y Ortíz (1980), consideran que el agua es uno de los componentes más variables del suelo. Señalan que los diferentes suelos tienen distintas capacidades para la retención del agua y que no toda es aprovechable por la planta, ya que las partículas la retienen en diferente grado.

Kramer (1969), señala que los límites de la capacidad de almacenamiento están definidos por el contenido de humedad a tensiones de 0.033 y 1.5 Mpa y Denmead y Shaw (1962) indican que existen algunas desviaciones para casos particulares de cultivos.

Gavande (1976), menciona que la capacidad de campo y el porcentaje de marchitamiento permanente se consideraron durante muchos años como el límite superior e inferior de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y que sin embargo, hoy en día se sabe que las plantas pueden absorber agua fuera de éstos límites.

Ortíz (1977), considera que en cuanto a la capacidad de almacenamiento de agua, los suelos arenosos son capaces de retener una lámina alrededor de 2.5 cm. de agua por cada 30 cm. de profundidad de suelo, mientras que los suelos pesados almacenan alrededor de 10 cm. por cada 30 cm. de espesor.

Martínez (1992), menciona que la disponibilidad de agua en el suelo esta dada principalmente por la cantidad aplicada en forma de riego o precipitación, por la capacidad de almacenamiento del suelo y por el volumen del mismo que la parte radical de los cultivos explora. Sin embargo, para una misma condición de cantidad y profundidad radicular, la disponibilidad difiere grandemente por cada tipo y condición de suelo. Por lo tanto, es importante tener conocimiento preciso de las condiciones hídricas que se dan en cada tipo de suelo bajo las diferentes situaciones de riego, tipo de cultivo y etapas donde el agua es más importante para los cultivos.

Erie et al (1981), consideran que los requerimientos netos de agua de riego representan el volumen necesario para el uso consuntivo de un cultivo específico. Parte del agua es tomada de la humedad almacenada en el suelo, otra parte proviene de la lluvia y el resto, debe proporcionarse artificialmente por medio del riego.

Watherly y Dane (1979), mencionan que la ocurrencia de períodos de sequía durante la época de desarrollo, limita muchas veces la cantidad de agua del suelo aprovechable para las plantas. Este aprovechamiento puede ser limitado además, por la existencia de una capa dura en el subsuelo

Jasso (1990), menciona que la magnitud del déficit hídrico del cultivo se establece en términos de la diferencia entre la evapotranspiración real (actual) y la máxima, o entre el contenido de humedad del suelo actual y el abatimiento máximo permisible.

II.2.4. Tensión Hídrica en el Sistema Suelo-Planta

Quizenberry (1987), señala que la respuesta de las plantas a la tensión de humedad del suelo depende hasta cierto punto del tipo y la profundidad del suelo. Considera que en las arenas de grano grueso, la mayor parte de la humedad del suelo está fácilmente disponible y las plantas pueden crecer con rapidez, mientras la evapotranspiración no disminuya.

Kramer (1974), menciona algunas causas, efectos y etapas en las plantas cuando se produce tensión hídrica: La causa de la tensión hídrica en las plantas se debe a una pérdida excesiva de agua o a una inadecuada absorción o a ambas cosas a la vez. En cuanto a los factores que controlan la absorción están: (1) el coeficiente de la pérdida de agua, (2) la extensión y eficacia de los sistemas de raíces (3) el potencial hídrico y la conductividad hidráulica del suelo. Señala además que el período crítico se suele producir en el momento en que forman los órganos reproductores y se produce la polinización (fecundación) y es en este cuando la tensión hídrica causa mayores daños.

Flinn (1970), señala que la tensión de humedad de las plantas es una consecuencia directa de los procesos de transpiración. Una condición de tensión

ocurre cuando el contenido hídrico de la planta es apreciablemente reducido abajo de los valores de turgidez completa.

Taylor (1952), consideró que la variable hídrica que influye más en el crecimiento de las plantas es la tensión de humedad de la planta como opuesta al riego o precipitación. Él sugirió el uso de un índice de tensión de humedad que reflejara el grado de disponibilidad de humedad del suelo para las plantas el cual denominó tensión de humedad integrada, y mostró que a medida que la tensión de humedad integrada se incrementa, el rendimiento de la cosecha decrece en una forma lineal.

II.3. El Estrés Hídrico en Etapas Fenológicas

Lawn (1988), menciona que una de las herramientas más poderosas que tiene el fitomejorador para la adaptación de variedades al ambiente es la manipulación de la fenología. La fenología apropiada en relación con el período de tiempo disponible para el crecimiento de los cultivos es importante para incrementar la productividad en ambientes donde el déficit de humedad y las temperaturas extremas son problema común. (Summerfield, et al., 1989). En frijol, un medio efectivo para reducir los efectos de la sequía, es evitar períodos de baja humedad mediante la manipulación de la madurez fisiológica (escape) y de la fecha de siembra.

Zermeño (1984), realizó un estudio para determinar los déficit hídricos en las diferentes etapas fenológicas del cultivo de la cebada, encontrando que el déficit de humedad crítico es en la etapa de floración, siguiendo en la maduración del grano y finalmente en la etapa vegetativa.

Hsiao (1973) citado por Nuñez (1984), menciona que una de las respuestas más sensitivas de la planta a los déficit de agua es el alargamiento celular, esto ha sido demostrado ampliamente en el cultivo de maíz. Bajo

condiciones controladas, el crecimiento de la hoja se redujo rápidamente con potenciales hídricos de 0.2 MPa y cesó a potenciales por debajo de - 0.7 y - 0.9 MPa (Boyer, 1970 y Acevedo et al., 1971); no obstante, bajo condiciones de campo, Watts (1974), encontró que no hubo reducción en el alargamiento foliar hasta que los potenciales hídricos estuvieron por debajo de - 0.8 ó - 0.9 MPa.

Harold (1986), citado por Rodas (1989) realizó un experimento en maíz donde determinó el efecto del déficit de agua en los componentes del rendimiento, observó que el déficit después de 41 días de plantación afecta el tamaño de las hojas, tallos y rendimiento en mazorca, 55 días después de la plantación únicamente reduce el tamaño del tallo y rendimiento en grano. El déficit dentro del crecimiento vegetativo reduce el número de granos y peso de grano, reduciendo el rendimiento. El déficit durante el llenado de grano se encontró que el rendimiento en grano fue proporcional a reducción en peso en grano.

Núñez(1984), indica que el desarrollo radical cumple también una función importante en la productividad de la planta en condiciones de tensión hídrica, ya que su crecimiento y distribución esta íntimamente ligado a la cantidad de agua que se pueda suministrar a la parte aérea. Sin embargo, el tipo de raíz más adecuado tiene que definirse en términos de factores de suelo como son: retención y distribución de humedad, profundidad, capacidad de almacenamiento, conductividad hidráulica, etc., y de clima como: patrones de lluvia, demanda atmosférica, etc.

Palacios (1978), considera que la humedad del suelo tiene diferentes efectos según la etapa de desarrollo del cultivo. Señala que según resultados de experimentos, la mayoría de los cultivos anuales son sensibles en forma diferencial a las tensiones hídricas presentes en dichas etapas.

II.4. El Estrés Hídrico en el Frijol.

Pajarito et al (1987), mencionan que el déficit hídrico es el principal factor que afecta la fisiología de la planta de frijol cuando ésta llega a niveles superiores de tolerancia. Cuando esto sucede, la respuesta de cada organismo puede ser similar o diferente de acuerdo a las condiciones ambientales presentes y a las características intrínsecas de la planta.

La floración es sin duda la etapa de desarrollo más susceptible a las deficiencias hídricas del frijol (Dampney y Asinell, 1970, Acosta et al., 1983); sin embargo, en la etapa vegetativa se pueden observar disminuciones en la tasa de incremento foliar que reduce a su vez la interceptación de energía solar y la producción de fotosíntesis y materia seca.

Ibarra (1987), efectuó un estudio para determinar cuantitativamente los efectos de la sequía (inducida) en floración sobre características fenológicas y morfofisiológicas en genotipos de frijol. Los resultados mostraron que la sequía redujo el ciclo del cultivo hasta en 8 días. En floración, el testigo redujo en un 11 % su producción de materia seca en comparación con los tratamientos estudiados que fue de 49 %. En madurez fisiológica el efecto de sequía fue mas evidente en el peso de paja de vainas y peso de grano, no así para el peso de tallos. La tasa de crecimiento del cultivo fue en promedio menos afectada (16 %) que la tasa de crecimiento del fruto (20 %). El componente de rendimiento mas afectado fue el número de vainas (24 %) y la reducción del grano (33 %).

Bascur y Fritsch (1975), estudiaron el efecto de cuatro métodos y dos frecuencias de riego sobre el comportamiento de componentes de rendimiento en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), incluyendo el efecto de dichos factores sobre la salinidad del suelo, la cual puede ser modificada por medio del riego. Los métodos de riego correspondieron al riego por surco, riego por surco alternado, riego por surco en banda y riego por surco cada dos hileras. Las frecuencias de riego fueron

0.4 y 0.75 atm. Los componentes de rendimiento fueron número de vainas/planta, número de semillas/vaina y peso de la semilla. Estos se relacionaron mediante coeficientes de correlación y ecuaciones de regresión con la materia seca, período vegetativo, rendimiento y conductividad eléctrica del suelo. El número de vainas por planta y el número de semillas por vaina no se vieron afectados en forma significativa por los métodos, frecuencias de riego y su combinación. Sin embargo, el peso de la semilla aumentó en forma significativa con la frecuencia de riego 0.4 atm. Todos los componentes de rendimiento fueron afectados en forma significativa pero en diferentes magnitudes por el período vegetativo. Solo el número de vainas por planta fue afectado por la salinidad del suelo. Únicamente el número de vainas por planta y el peso de la semilla por planta presentaron correlación con el rendimiento.

Pajarito et al (1987), realizaron un experimento para determinar los mecanismos básicos de tolerancia al déficit de humedad en frijol, así como determinar sus efectos en características fenológicas y morfofisiológicas que confieren dicha tolerancia. Los resultados obtenidos demostraron que el rendimiento de grano fue afectado por sequía en un 63 % con respecto a riego. La producción de materia seca fue más afectada en madurez fisiológica (47 %) que en período de llenado de grano (33 %).

Acosta y Kohashi (1988), realizaron un experimento para determinar los efectos del déficit de agua en dos estados fenológicos del frijol. Las variedades estudiadas fueron, Pinto Nacional, Bayo Calera y Ojo de Cabra. La reducción en crecimiento y producción de semillas fueron mas altos cuando la tensión hídrica se presentó durante la fase reproductiva que durante la etapa vegetativa mientras que el tratamiento de la fase reproductiva redujo su producción del 37% y 39% . En 1982 el tratamiento de la fase reproductiva redujo la producción de semilla en 34, 39, y 35% para pinto nacional, bayo calera y ojo de cabra, respectivamente. La reducción de la producción en los tratamientos con déficit de humedad fue debido también a la disminución del índice del área de la hoja. El número de vainas por

planta fue el componente de la producción más adversamente afectados por los tratamientos bajo tensión. El uso visual de la entalladura del vigor general y la reducción del envejecimiento de la hoja, combinado con un número estimado de vainas por planta maduras, es sugerido para la identificación de variedades prometedoras resistentes a la tensión de humedad.

Salter y Goode (1967), señalan que la alta sensibilidad de las plantas al déficit hídrico durante el período de floración, se debe a que las leguminosas dejan de producir raíces durante esta etapa, pero adicionalmente se observa una reducción en la masa radicular, debido a la muerte de raíces viejas. En estas condiciones, la absorción se hace más difícil, lo cual se agrava cuando aumenta la tensión del suelo. Así mismo, mencionan que las leguminosas son muy sensibles al exceso de humedad en el suelo.

Nuñez (1992), señala que el efecto de déficit hídrico sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas ha sido largamente revisado por varios autores. Estas revisiones indican que sí el efecto de sequía es severo, puede afectar casi cualquier proceso fisiológico y morfológico asociado con el rendimiento y producción de materia seca.

Ibarra et al (1987), consideran que el efecto de la sequía sobre el rendimiento de grano de frijol, aunque anualmente es evidente, también es variable dependiendo de la etapa fenológica del cultivo.

Pajarito et al (1988) citados por Acosta (1988), mencionan que el efecto de un período de sequía durante la fase de llenado de grano acelera la madurez fisiológica. Sin embargo, hay evidencias que indican la existencia de diferencias genotípicas en cuanto al grado de aceleración.

Palacios (1976) encontró que la soya puede ser castigada antes de la floración hasta que la humedad aprovechable en el suelo se acerque al porcentaje

de marchitamiento permanente, y si durante la etapa de floración, la humedad se mantiene hasta un 40 %, el rendimiento tiende a la máxima producción.

Maurer et al (1977), realizaron un estudio en el que se cultivaron plantas de frijol en lisímetros para determinar su respuesta a cinco regímenes del agua del suelo. Las plantas que crecieron bajo condiciones en que el riego se aplicó cuando el suelo bajo a un nivel de 88 % de humedad disponible, fueron mas altas y pesadas y produjeron mayor número de plantas, que las plantas regadas cuando el agua del suelo alcanzo un 60 %. Las plantas regadas cuando el agua del suelo alcanzó un 32 % de disponibilidad, fueron pequeñas y rindieron pobremente. Las plantas que tuvieron un amplio régimen de agua antes de la floración y que luego se sometieron a una fuerte tensión hídrica presentaron bajos rendimiento.

Miranda y Belmar (1979), citan dos experimentos de campo sobre un suelo andosol en la estación experimental de Quilampa en Chillan, Chile, durante los períodos de floración de 1974-1976, con el fin de evaluar el efecto de la inducción de déficit hídrico (30-70 % de humedad disponible) en el desarrollo del frijol. La frecuencia de riego tuvo un efecto significativo sobre el rendimiento en ambas temporadas y sobre el número de vainas/planta y el peso de 1000 semillas en una de las temporadas. Los rendimientos de la semillas se redujeron significativamente por causa del déficit de humedad del suelo durante los estudios del crecimiento, floración y formación de semillas. La intensidad de déficit hídrico fue mayor a 30 % de humedad aprovechable, pero varió de una temporada a otra, debido principalmente a lluvias acontecidas durante el periodo de déficit.

Ramírez (1977), probó tres niveles de humedad aprovechable para determinar el rendimiento en cultivo de frijol. Los niveles probados fueron 30, 45, y 50 % de humedad aprovechable. Encontró que el mejor tratamiento que produjo un óptimo rendimiento fue con un 45 % de humedad aprovechable y también determinó que al aumentar el contenido de humedad en el suelo mayor a 45 % el rendimiento decrece.

Bernardo et al (1970), observaron decrementos substanciales en la producción de semillas por planta de frijol, al incrementar la tensión del suelo de 0.5 a 0.75 atm.

Acosta et al. (1982), estudiaron el efecto de tensión hídrica en diferentes etapas fenológicas de dos variedades de frijol, encontraron que durante un período de sequía de 15 días antes de floración causó un decremento del 50 % en los rendimientos.

En el Centro de Investigaciones Agrícolas del Bajío (1976), mencionan que generalmente, se requieren en la región de 5 a 6 riegos, siendo conveniente regar cuando se presenten los primeros síntomas de marchités, especialmente poco antes de la floración.

Godoy (1990), menciona que la interacción entre el rendimiento del cultivo y la evapotranspiración, permite definir el impacto del estrés en la producción. Considera que a través de funciones de producción, el estrés puede ser definido sin la necesidad de identificar cuantitativamente todos los demás estrés a que son sometidos las plantas.

II.5. Funciones de Producción al Insumo Hídrico.

De León (1981), menciona que el concepto de función de producción se basa en la teoría sustentada por muchos autores que señala que el rendimientos de los cultivos resulta de los procesos fisiológicos de la planta integrados en tiempo y espacio, como una función del medio ambiente y genotipo.

Mapp y Aidman (1976) y Biswas (1981), analizaron el uso de modelos de simulación, análisis de sistemas y técnicas de computación desde el enfoque del manejo de agua, considerando esencial el uso de estas técnicas para determinar rendimientos en las zonas áridas con riego que pueden estar en función de la humedad del suelo y del déficit atmosférico durante los períodos

críticos del desarrollo de las plantas, y para determinar estrategias apropiadas y las alternativas que pueden ser propiamente analizadas.

Godoy (1990), señala que las funciones de producción de los cultivos al agua, relacionan condiciones climatológicas, de suelo, de planta, y de riego y proporcionan además datos básicos para la construcción de modelos reales de producción de los cultivos, los cuales pueden ser usados para encausar muchas preguntas vitales en la planeación y manejo del agua y probablemente con buena previsión proporcionen información extrapolable a varias localidades.

Jasso (1990), indica que los modelos de producción normalmente se expresan a través de ecuaciones empíricas que se obtienen mediante técnicas de regresión lineal entre el rendimiento de materia seca y el consumo de agua. Las relaciones que se han obtenido entre dicha variable y el consumo de agua tienen estructura diferente a la ecuación lineal, generalmente tienen tipo de polinomios de grado múltiple univariadas o multivariadas donde las variables independientes expresan efectos aditivos o multiplicativos.

Farsi et al (1987), señala que se pueden encontrar relaciones lineales entre la evapotranspiración y el rendimiento de materia seca y Grimes et al (1969), consideran que esta linearidad se pierde al tratarse de producción comercial. Hiler et al (1974), explican que la causa de no linearidad se puede deber a la sensibilidad específica por etapa ontogénica de los cultivos a la condición de humedad del suelo y se pueden establecer efectos aditivos o multiplicativos.

Muñoz (1986), considera que para evaluar resistencia a la sequía, se hace necesario contar cuando menos con dos condiciones de humedad; una favorable y otra desfavorable, a sabiendas de que al incluir tres o más niveles, además del efecto lineal, se puede valorar el efecto cuadrático, que en la mayoría de los casos es de menor importancia que el lineal, por lo que, en una primera aproximación dos niveles pueden ser aceptables.

Palacios y Martínez (1978), citados por Romero (1987), proponen un método empírico de relacionar, mediante simples polinomios cuadráticos los rendimientos observados de los cultivos, con diferentes niveles mínimos o tensiones máximas a las que están sujetas las plantas durante varias etapas de su desarrollo utilizando una metodología experimental similar a la que se usa para encontrar funciones de respuesta a niveles de fertilización. Con base a esta metodología y cuando se consideran tres etapas fenológicas, se encuentran de acuerdo a estos autores funciones de respuesta cuya forma general es del tipo:

$$E(Y) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \beta_6 X_3^2 + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3 + \epsilon$$

Donde:

$E(Y)$ = Valor esperado del producto

X_1 = Nivel de humedad residual o tensión en la etapa i-ésima

β_i = Es el j-ésimo coeficiente de la función estimada mediante regresión lineal múltiple

ϵ = Error aleatorio

Hernández (1980), obtuvo dos modelos polinomiales (de primer orden y el tipo Doorenbos, respectivamente) que expresan el rendimiento de materia seca (Y), en función del consumo de agua (ET), descritos como:

$$Y = -4.30333 + 0.19675 ET$$

$$1 - YV/YM = 1.30107 (1 - ETV/ETM)$$

donde:

$1 - YV/YM$ = Disminución del rendimiento relativo

YV = Rendimiento obtenido para el tratamiento ETV

YM = Rendimiento potencial de acuerdo al método de la zona agroecológica.

ETM = Evapotranspiración máxima.

Rao et al (1988), mencionan algunas funciones de producción-suministro de agua que han sido desarrolladas : Hall-Butcher, 1968 (Índice de tensión de humedad), Jensen 1968 (Evapotranspiración relativa), Hanks 1974, (Transpiración relativa) Hiler-Clark 1971 (Déficit de evapotranspiración relativa), Hanks 1974 (Transpiración relativa), Minhas et al 1974 (Déficit de ET relativa), Polank 1975 (ET relativa), Stewart et al (Déficit de ET relativa), Sudar et al 1981 (Déficit de ET relativa), Díaz 1983 (Diferencias de temperatura).

Hiler y Clark (1971), proponen una función de producción a la que denominaron “ Índice-Deficiencia-Día (IDD)”, la cual relaciona el rendimiento con déficit de agua en más de un período de crecimiento. Esta función asume relaciones lineales entre el rendimiento y el IDD y considera que los efectos de tensión de humedad en un período del crecimiento del cultivo son independientes de los efectos de deficiencias hídricas en otros estados de crecimiento.

Jensen (1968), presenta una función de tipo lineal con efectos multiplicativos entre el rendimiento relativo y el producto de los valores ajustados para el relativo uso del agua en varios períodos de crecimiento. Esta función es conocida como “Modelo de Rendimiento de Jensen”.

Ramírez (1989), exploró en cuatro niveles de tensión de humedad del suelo definidos a intervalos iguales, integrando la función de la curva característica de humedad del suelo, a los cuales se sometió el cultivo en tres etapas de su desarrollo: vegetativa, floración y madurez. Para el establecimiento de la función de respuesta comparó la bondad de ajuste de las ecuaciones de Palacios (1981) y Reddy (1983) en la simulación del balance de humedad. El modelo que mejor ajuste tuvo fue el de Reddy con el cual se obtuvo los valores de evapotranspiración en cada tratamiento.

Siqueira et al (1982), realizaron un experimento para determinar funciones de respuesta del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y su uso para mejorar la eficiencia del agua de riego. Reporta la obtención de una función de respuesta que ha permitido verificar que los máximos rendimientos en el cultivo de frijol se obtienen cuando no se deja bajar la humedad de un 50% de la aprovechable, ni se mantiene a niveles mayores de un 70%. Mediante el uso de esta función, es posible definir los niveles óptimos de humedad a los que debe regarse el cultivo cuando solo se dispone de una cantidad restringida de agua por predio. También se mostró la utilidad de la función para estimar rendimientos en zonas de agricultura de temporal, mediante el auxilio de un modelo de simulación de sistema suelo - planta-atmósfera.

Rojas et al (1981), consideran que el frijol es uno de los cultivos básicos de mayor importancia en México. Este cultivo es muy sensible a déficit o excesos de humedad, por lo cual es de mucha utilidad disponer de una función que relacione el rendimiento en grano con las variaciones de la humedad aprovechable del suelo en tres etapas de su desarrollo (floración, formación de vainas y llenado de grano). Este autor observó en los resultados obtenidos por Siqueira (1981) que las estimaciones de rendimiento como función de los contenidos mínimos de humedad aprovechable del suelo considerado dentro del rango estudiado originalmente, son estadísticamente iguales a los obtenidos en este trabajo; sin embargo, se observan diferencias estadísticamente significativas en las extrapolaciones, por lo que concluyó que la función de Siqueira no permite hacer estimaciones confiables de rendimiento si se trabaja fuera del rango de 20 a 80% de humedad aprovechable en cualquiera de las etapas.

Catalán (1993), indujo al cultivo de frijol a distintos déficit hídricos mediante la aplicación de diferentes números de riegos con el objetivo de obtener una función de producción. Obtuvo una función de tipo cuadrático mediante la cual señala que es posible obtener un rendimiento de grano de 2.76 ton/ha, con un consumo de agua de 50.5 cm. y una tensión de humedad del suelo de 5.5 atm.

González (1982), realizó un experimento con el objeto de evaluar el efecto de las variaciones del régimen de la humedad del suelo, en diferentes etapas del desarrollo vegetativo, en el rendimiento del frijol. Adicionalmente, se trato de obtener una función que permitiera predecir el efecto en la tasa evapotranspirativa, de reducir los contenidos de humedad del suelo. Como resultado de la experimentación se obtuvieron funciones de respuesta del rendimiento del frijol, en dos condiciones diferentes: en experimentos de campo y en experimentos en recipientes, encontrándose una relación no lineal entre los resultados, aunque sus diseños fueron idénticos. Encontró que el máximo rendimiento se logra cuando se riega el cultivo del frijol, al consumirse aproximadamente un 50 % de la humedad aprovechable en cada una de las etapas del desarrollo a que se ha hecho referencia. También puede expresarse este resultado, en función del potencial del agua en el suelo, con el objeto de hacer extrapolaciones; en este caso el rendimiento máximo se obtiene si se evita que el potencial de humedad en el suelo sea mayor de 1.5 atmósferas.

Catalán (1993), menciona las siguientes funciones de producción reportadas anteriormente:

$$Y = -0.7245 + 0.1135 ET - 0.0010 ET^2 \quad (\text{Catalán, 1983})$$

$$Y = -0.3710 + 0.1097 ET - 0.0011 ET^2 \quad (\text{Godoy, 1990})$$

Donde:

Y = Rendimiento de grano en ton/ha.

ET = Evapotranspiración real del cultivo en cm.

Inzunza (1993), realizó un trabajo para obtener una función de respuesta para rendimiento de maíz en función del déficit evapotranspirativo. Determinó funciones de respuesta para tres diferentes modelos que utilizan déficit evapotranspirativos y evapotranspiración relativa. También obtuvo el ajuste al

modelo polinomial cuadrático de segundo orden el cual relaciona el rendimiento de grano y el régimen de humedad del suelo expresado en unidades de tensión (atm) en tres subperíodos fenológicos del cultivo.

Inzunza (1993), obtuvo una función de producción que relaciona el rendimiento y el contenido de humedad del suelo. Concluye que es posible obtener un rendimiento de grano de maíz de 8.1 ton/ha, cuando el maíz se desarrolla a 6.5 atm de tensión de humedad del suelo en la etapa vegetativa y 2.3 atm en la etapa reproductiva, con un consumo de 79.4 cm. durante el ciclo vegetativo total.

De León (1981), evaluó diferentes modelos matemáticos con respecto a su eficiencia en la predicción de rendimientos en el cultivo de maíz, en función del régimen hídrico en diferentes etapas fenológicas, los modelos evaluados fueron: (1) modelo de Índice-Deficiencia-Día, (2) modelo de Rendimientos de Jensen y (3) modelo del Índice de Días Secos. Los resultados indican que el modelo de días secos arrojó la mejor correlación entre el rendimiento observado y rendimiento estimado (0.9643), para la consideración de cinco etapas de crecimiento.

Jasso y Luna (1993), evaluaron rendimiento de trigo en un lote comercial y los compararon con los resultados de cuatro funciones de producción seleccionadas en base a la significancia de los coeficientes de regresión y determinación de estudios recientes del mismo lugar. Determinaron que la función de producción basada en la tensión de humedad del suelo antes del riego por etapa de desarrollo, así como aquella basada en la evapotranspiración total en un modelo polinomial cuadrático, son las que permiten predecir con mayor precisión el rendimiento. Señalan que de las variables hídricas utilizadas, es más fácil estimar la evapotranspiración que la tensión de humedad del suelo.

Ramírez (1977), considera que los modelos de producción más sencillos son cuando se relacionan únicamente el rendimiento con una variable

independiente que sería la cantidad de humedad aprovechable consumida antes del riego.

Godoy (1990), menciona que las funciones de producción que sean desarrolladas deberán ser útiles para encausar los siguientes tópicos. (a) posibilidades para la conservación del agua en la agricultura, (b) simulación de diferentes programas de riego en la producción de los cultivos, © planear estrategias para un uso óptimo de agua que incluya selección de tipos de cultivo y variedades, (d) distribución de agua para la agricultura. (e) criterios de diseño para almacenamiento, conducción, distribución y sistemas de aplicación del agua, (f) asignar prioridades de proyectos de irrigación, y (g) planeación de sistema de cultivo.

III. MATERIALES Y METODOS

III.1. Localización del Sitio Experimental.

El experimento se realizó en terrenos del Campo Agrícola Experimental "Valle del Guadiana" (INIFAP), localizado en el Km. 4.5 de la carretera Durango-Mezquital. La ubicación geográfica es: 24° 04' de latitud norte y a los 104° 44' de longitud oeste, con una altitud de 1889 msnm.

III.2. Características del Suelo.

El tipo de suelo es castañozem de textura migajón arcilloso. Las constantes de humedad del suelo en base a peso son: capacidad de campo (CC) 31.1 %, porcentaje de marchites permanente (PMP) 9.3 %, humedad aprovechable (ha) 22.6 %. La densidad aparente 1.1 gr. /cm³, pH 7.8, conductividad eléctrica < 4 mmhos/cm., y el porcentaje de sodio intercambiable menor de 15.

III.3. Características del Clima.

El clima, según clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García es del tipo BS1 Kw. (w) que corresponde a un clima templado semiárido con lluvias en verano, temperatura media 16.4° C, la temperatura del mes más frío es de 10.7° C, y del mes más caliente es de 21.2° C, y la precipitación pluvial media es de 435.8 Mm.

III.4. Factores de Estudio

Se diseñaron ocho programas de riego considerando la probable aparición de las principales etapas fenológicas del cultivo. En cada caso, se obtuvo el valor de diferentes variables hídricas sobre las cuales se hizo la evaluación de los tratamientos. Los programas establecidos fueron:

- A: Riego semanal durante todo el ciclo del cultivo.
- B: Riego semanal hasta siete días antes de la floración, posteriormente riegos cada quince días hasta el término del ciclo.
- C: Riego cada quince días hasta siete días antes de la floración, posteriormente riego cada semana hasta siete días después de la floración, el resto del período con riegos quincenales.
- D: Riego cada quince días durante todo el ciclo.
- E: Riegos cada 21 días, asegurando un riego al inicio del período de floración.
- F: Riegos cada 21 días suspendiéndolo 15 días antes de la floración y reiniciándolos inmediatamente después de la floración.
- G: Riegos cada 28 días, asegurando uno al inicio de la floración.
- H: Riegos cada 28 días durante todo el ciclo del cultivo.

III.5. Diseño Experimental.

El estudio de los tratamientos se realizó en parcelas independientes para cada variedad de frijol, bajo un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones. La combinación de ocho tratamientos con tres repeticiones resultó en un total de 24 parcelas para cada variedad. Las dimensiones por parcela experimental fueron de 16.2 m² de área total y de 4.86 m² de parcela útil.

III.6. Características de las Variedades.

Las variedades utilizadas fueron la México-241 y la 83VEFMXA-238 las cuales fueron escogidas de acuerdo a sus características contrastantes de susceptibilidad a condiciones de deficiencia hídrica. Según Pajarito (1986), la variedad México-241 reduce en mayor proporción su rendimiento, en relación a la variedad 83VEFMXA-238 cuando ambas están sometidas en los mismos períodos a un estrés hídrico elevado. Sin embargo, para condiciones de buena disponibilidad de agua, ambas variedades responden en forma similar en cuanto rendimiento.

III.7. Fecha de Siembra.

La siembra de dichas variedades se realizó el día 7 de mayo.

III.8. Densidad de Población.

Se ajustó la densidad de población a aproximadamente 80,000 plantas por hectárea.

III.9. Fertilización.

Se utilizó la fórmula 60-60-00 de nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente y aplicada toda al momento de la siembra.

III.10. Riego

Se aplicó de acuerdo a cada tratamiento con una lámina promedio la cual fue determinada mediante mediciones del gasto y el tiempo de riego.

III.11. Fenología del Cultivo.- Se registraron las fechas de aparición de las principales etapas fenológicas del cultivo. Las etapas fenológicas consideradas fueron la vegetativa, floración, formación de grano y maduración.

III.12. Rendimiento de la Cosecha (Kg. /ha).- Se obtuvo el peso de grano solamente.

III.13. Variables Hídricas Medidas.

III.13.1. Humedad del Suelo.- Se obtuvo el porcentaje de humedad almacenado en el suelo en los primeros 30 centímetros de profundidad en frecuencias semanales. La determinación de la humedad se estimó mediante el método gravimétrico y esta

información fue utilizada para hacer balances hídricos del cual resultaron los valores de consumo de agua o evapotranspiración.

III.13.2. Curva de Retención de Humedad.- Para el tipo de suelo donde se estableció los experimentos se determinó la curva característica de humedad con métodos de laboratorio. El modelo determinado fue:

$$Y = 46290.7 X^{-3.571}$$

Donde: Y = Tensión Hídrica (bares).

X = Porcentaje de humedad en base a peso (%).

III. 14. Variables Hídricas Calculadas.

III. 14.1. Lámina de agua almacenada (LA). Esta variable representa la humedad almacenada en promedio por etapa fenológica. Se determinó mediante la siguiente expresión:

$$LA = \frac{Psh - Pss}{Pss} \times 100 \times Da \times Pr$$

Donde:

Psh = Peso del suelo húmedo (grs.).

Pss = Peso de suelo seco (grs.).

Da = Densidad aparente (grs. /cm³).

Pr = Profundidad de suelo (m.).

III.14.2. Abatimiento Promedio de la Humedad Disponible (APHD). Se determinó mediante la siguiente expresión:

$$APHD = LA - LAcc - LAD \times 100$$

Donde:

APHD = Abatimiento promedio de la humedad disponible por etapa (%).

LA = Lámina de agua promedio determinada en los muestreos por etapa (Mm.).

LAD = Lámina de agua disponible entre los límites de capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente (Mm.).

III.14.3. Evapotranspiración Real por Etapa Fenológica (ETR): Se determinó mediante el balance hídrico entre períodos de muestreo utilizando la siguiente expresión:

$$ETR = Lr + Lp + (Lai - Laf)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real (Mm.).

Lr = Lámina de agua regada (Mm.).

Lp = Lámina de agua precipitada (Mm.).

Lai = Lámina de agua almacenada al inicio del período (Mm.).

Laf = Lámina de agua almacenada al final del período (Mm.).

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

Para el desarrollo de la discusión, se realizará primeramente una evaluación de las condiciones hídricas que se presentaron en cada uno de los tratamientos con el propósito de establecer de una manera objetiva, las diferencias entre estos. Esta evaluación se hará comparando las magnitudes de cada una de las variables hídricas en cada etapa fenológica la cual se sustentará en análisis estadísticos. Posteriormente, se realizarán análisis de correlación de todas las variables con el rendimiento del cual se escogerán las variables correlacionadas para construir las funciones de producción.

IV.1. Láminas de Agua Almacenadas en el Suelo en las Diferentes Etapas Fenológicas.

Los valores de esta variable se presentan en promedio por etapa fenológica para la variedad México 241 en el cuadro 4.1. Para cada etapa fenológica, se determinó la variabilidad de los tratamientos mediante el análisis de varianza y posteriormente se identificaron los tratamientos iguales y diferentes mediante pruebas de separación de medias (DMS) cuyos resultados se muestran con letras minúsculas a un lado de cada valor.

Los resultados que se presentan en el cuadro 4.1, observan diferencias altamente significativas entre tratamientos en cada una de las etapas fenológicas. La mayor variación entre tratamientos se dio en la etapa reproductiva en donde se

presentaron, siete condiciones diferentes de lámina de agua almacenada. La variación entre el tratamiento que mostró mayor valor (tratamiento F) con respecto al de menor valor (tratamiento C) fue de 24.2 mm lo que en términos a como se consideró esta variable, representa una gran diferencia. Entre etapas, la que obtuvo los mayores valores, fue la de formación de grano cuya máxima cantidad almacenada (tratamiento F) mantuvo niveles de hasta un 71 % aproximadamente de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

Cuadro 4.1.- Lámina promedio de agua almacenada (mm.) por etapa fenológica de la variedad Mex-241.

Tratamiento	Etapas vegetativa	Etapas reproductiva	Etapas de grano f.	Etapas de maduración
A	65.7 b	66.6 b	75.1 b	67.8 b
B	73.2 a	65.1 bc	77.0 b	70.0 ab
C	62.2 c	48.5 f	79.9 ab	75.2 a
D	68.0 b	72.1 a	62.9 c	56.9 cd
E	65.3 bc	55.3 e	75.3 b	59.3 c
F	68.4 b	72.7 a	84.2 a	72.7 ab
G	62.3 c	60.6 d	78.6 b	56.0 cd
H	65.6 b	62.8 cd	75.0 b	52.8 d
Media	66.3	62.9	76.0	63.8
C.V. (%)	2.8	3.4	3.8	4.9
DMS (mm.)	3.23	3.8	5.0	5.5

Para cada etapa fenológica, se determinó la variabilidad de los tratamientos mediante el análisis de varianza y posteriormente se identificaron los tratamientos iguales y diferentes mediante pruebas de separación de medias (DMS) cuyos resultados se muestran con letras minúsculas a un lado de cada valor.

En forma general, podemos observar que todos los tratamientos tuvieron diferente condición de lámina de agua almacenada al considerar la totalidad de las etapas fenológicas. Esto, nos define una amplia diversidad de condiciones de lámina almacenada a la que estuvo sometida esta variedad.

Aunque se dieron las mismas condiciones de riego, precipitación y las determinaciones de humedad del suelo fueron las mismas para ambas variedades, se obtuvieron resultados diferentes en láminas de agua almacenada, dados principalmente por la diferencia en cuanto a la duración de las etapas fenológicas de cada variedad. En el cuadro 4.2, se presentan los valores de lámina de agua almacenada en el suelo para la variedad 83 VEF MXA 238 por tratamiento y por etapa fenológica.

Cuadro 4.2.- Lámina promedio de agua almacenada (mm.) por etapa fenológica de la variedad 83 VEF MXA 238.

Tratamiento	Etapa Vegetativa	Etapa de Floración	Etapa de F.de grano	Etapa de Maduración
A	69.6 ab	65.1 a	65.5 c	73.9 b
B	72.3 a	62.6 ab	74.2 b	79.0 ab
C	61.9 de	50.8 c	79.7 a	81.7 a
D	64.6 cd	45.1 d	55.7 d	61.4 cd
E	68.4 abc	59.8 ab	76.0 ab	63.7 c
F	68.6 abc	59.7 ab	73.8 b	76.3 ab
G	61.5 e	53.6 c	68.3 c	54.3 e
H	65.8 bcd	59.3 b	68.5 c	56.5 de
Prom.	66.6	57.0	70.2	68.4
C.V (%)	3.5	5.5	4.0	5.5
DMS. (mm)	4.02	5.52	4.92	6.63

De acuerdo al análisis de varianza, los valores de lámina de agua almacenada fueron diferentes con un grado altamente significativo de probabilidad en todas las etapas fenológicas de esta variedad. Las pruebas de separación de medias, nos definieron una amplia diversidad en valores de esta variable, sobresaliendo los presentados en las dos primeras etapas fenológicas.

La combinación de valores de láminas de agua almacenadas en el suelo en cada tratamiento y etapa fenológica, nos produjo ocho condiciones diferentes. Los máximos valores se observan en la etapa de formación y llenado de grano y los mínimos en la etapa de reproducción. También se observan valores de lámina

almacenada cercanos a la capacidad de campo y al punto de marchitamiento permanente como las producidas en las diferentes etapas del tratamiento C.

Estas características están manifiestas en los demás tratamientos lo que nos permitirá valorar una amplia gama de relaciones de esta variable con el rendimiento final.

De acuerdo al procedimiento para establecer una amplia variabilidad en condiciones de humedad, considerando las etapas fenológicas, podemos tener la seguridad que, los tratamientos utilizados reunieron las condiciones requeridas para lograr los objetivos principales del estudio. Esto, de acuerdo a los resultados para esta variable la cual se considera base para definir el valor de otras variables hídricas.

IV.2. Abatimiento de la Humedad Disponible.

La consideración de esta variable fue hecha dado a que representa una aproximación más cercana al estado de disponibilidad hídrica al que estuvo sujeto el cultivo durante el desarrollo de sus etapas fenológicas.

Sobre los valores de lámina de agua almacenada por etapa fenológica (Cuadros 4.1 y 4.2) se determinó el valor de esta variable, considerando los límites de capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente. Para la variedad México 241 se presentan los resultados en el cuadro 4.3.

Los mayores abatimientos de la humedad disponible para esta variedad, se presentaron en la etapa reproductiva donde a su vez, se observa en el cuadro 4.3, la mayor variabilidad entre tratamientos, la cual fue determinada estadísticamente mediante el análisis de varianza y su diferenciación mediante pruebas de separación de medias.

Para los fines del estudio, se considera muy adecuada esta variabilidad dado que esta etapa fenológica es considerada como una de las más susceptibles a condiciones de deficiencia hídrica. (Kramer, 1974., Dampney y Asinell, 1970., Acosta et al, 1983., etc.).

El conjunto de condiciones que produjeron los abatimientos de la humedad disponible, determinaron ocho tratamientos diferentes. En algunos tratamientos, como el caso del tratamiento A, se produjeron valores muy similares de abatimiento en cada una de sus etapas fenológicas, mientras que en otros, como el tratamiento C, se definieron condiciones de abatimiento moderadas en la primera etapa, de muy alto abatimiento en la etapa siguiente y de bajo abatimiento en las posteriores.

CUADRO 4.3. Abatimiento promedio de la humedad disponible por etapa fenológica de la variedad Méx-241 en tratamientos de disponibilidad hídrica.

Tratamiento	Etapa Vegetativa	Etapa de Floración	Etapa de F.de grano	Etapa de Maduración
A	51.5 ab	49.9 d	38.2 b	48.3 c
B	40.7 c	52.1 d	35.7 b	45.3 c
C	56.0 a	75.2 a	31.6 bc	38.0 d
D	48.1 b	42.4 e	55.1 a	61.8 b
E	51.8 ab	65.7 b	37.9 b	60.1 b
F	47.5 b	41.5 e	25.6 c	41.5 cd
G	56.0 a	58.3 c	33.4 b	64.8 ab
H	51.4 b	62.8 bc	38.4 b	69.1 a
Prom.	50.4	56.0	37.0	53.6
C.V. (%)	5.2	4.8	10.7	7.8
DMS (mm)	4.6	4.7	7.0	7.3

En la variedad 83 VEFMXA-238, se dieron condiciones de abatimiento de la humedad disponible muy diferentes a la variedad MEX-241. Los resultados para esta variedad se presentan en el cuadro 4.4 en valores promedio por etapa fenológica para cada uno de los tratamientos.

De acuerdo a estos valores y comparándolos con los valores de la variedad MEX-241, se observa un abatimiento mayor (8 % aproximadamente) en la etapa reproductiva de ésta variedad (83 VEFMXA-238) y un 9 % más también, en la etapa de formación y llenado de grano. Así mismo, podemos observar, cantidades cercanas al 80 % de abatimiento en la etapa reproductiva y valores altos también en la etapa vegetativa como el caso del tratamiento C.

CUADRO 4.4. Abatimiento promedio de la humedad disponible por etapa fenológica de la variedad 83 VEFMXA-238 en tratamientos de disponibilidad hídrica.

Tratamiento	Etapa Vegetativa	Etapa de Floración	Etapa de f. de grano	Etapa de Maduración
A	45.8 bc	52.1 d	51.5 b	40.3 c
B	42.1 c	55.6 cd	39.4 c	33.4 cd
C	63.4 a	78.9 a	38.8 c	29.6 d
D	52.8 b	79.8 a	65.2 a	57.7 b
E	47.4 bc	59.4 cd	36.9 c	54.6 b
F	47.3 bc	59.6 cd	40.0 c	37.0 c
G	51.1 b	68.0 b	47.6 b	67.6 a
H	51.1 b	60.1 c	47.3 b	57.9 b
Prom.	50.1	64.2	45.8	47.3
C.V. (%)	8.1	6.8	8.5	8.9
DMS (mm)	9.4	7.7	6.8	7.4

En las etapas de formación de grano y maduración, se nota también mayor variabilidad en los valores de abatimiento de la humedad con respecto a la variedad MEX-241 (Cuadro 4.3). Valores extremos en estas etapas podemos

hacerlo notar en los tratamientos D y E en la formación de grano y C y G en la maduración.

IV.3. Tensión Hídrica en el Suelo.

La respuesta de la planta, determinada por la condición de humedad del suelo obedece en gran parte a la magnitud de la tensión hídrica. Esta variable está relacionada con los esfuerzos que realiza la planta para obtener la humedad del suelo. Lógicamente, entre mayores esfuerzos, la cantidad de energía necesaria para desarrollar biomasa se reduce, limitándose por consecuencia su producción.

En base a esto, se seleccionó esta variable considerando la gran ingerencia que sobre el rendimiento pudiera tener los valores dados en las diferentes etapas fenológicas. A partir de los datos de abatimiento de la humedad disponible, se obtuvieron los valores promedio por etapa fenológica, utilizando el modelo exponencial determinado en el laboratorio para el tipo de suelo en que se estableció el experimento. Los resultados para la variedad MEX-241 se presentan en el cuadro 4.5.

CUADRO 4.5. Tensión hídrica (bars) promedio por etapa fenológica de la variedad MEX-241 en tratamientos de disponibilidad hídrica.

Tratamiento	Etapa Vegetativa	Etapa de Floración	Etapa de f. de grano	Etapa de Maduración
A	2.9 b	2.5 e	1.2 b	2.3 c
B	1.4 c	3.0 de	1.0 b	1.9 c
C	4.2 a	10.6 a	0.8 b	1.2 c
D	2.3 bc	1.5 e	3.8 a	6.8 b
E	3.0 ab	9.9 b	1.2 b	6.1 b
F	2.1 bc	1.5 e	0.6 b	1.5 c
G	4.1 a	5.1 d	0.9 b	9.3 ab
H	2.8 b	7.5 c	1.2 b	11.6 a
Prom.	2.8	6.0	1.3	5.1
C.V. (%)	24.2	20.4	26.4	42.6
DMS (mm)	1.2	2.13	0.62	3.8

Sobre los valores de 1.4 y 4.2 bars de tensión hídrica que correspondieron a los más bajos y altos respectivamente en la etapa vegetativa, se abatió entre el 40.7 y el 56 % de la humedad disponible en el suelo. Sobre este rango, se puede considerar que los tratamientos estuvieron bajo condiciones no muy diferentes de humedad, sin embargo, el análisis de varianza definió cuatro condiciones diferentes de tensión hídrica en el suelo, las cuales fueron diferenciadas por las pruebas de DMS. El número de promedios diferentes, corresponde en cierta medida a las diferentes condiciones que se mostraron en esta etapa en las demás variables hídricas consideradas.

En la etapa reproductiva de la variedad MEX-241, se observa en el cuadro 4.5, un amplio rango de variación, con valores desde cercanos a la capacidad de campo (CC) y a los límites del punto de marchitamiento permanente (PMP). Nótese que considerando las dos primeras etapas, algunos tratamientos presentan los valores mas altos de tensión hídrica.

Condiciones muy similares entre tratamientos se dieron en la etapa de formación de grano en donde solo se observan dos valores estadísticamente diferentes. Dichos valores reflejan buena disponibilidad de humedad dado que en su mayoría están cercanos al valor de tensión hídrica a capacidad de campo (CC).

Se puede notar que en la etapa final (maduración) se dieron cuatro condiciones de buena disponibilidad hídrica y cuatro condiciones en donde la planta estuvo sujeta a deficiencias marcadas. Sin embargo, para este período, quizá las diferencias no afecten en forma significativa el rendimiento, de acuerdo a estudios de muchos autores (Palacios, 1978., Núñez, 1992., Ibarra et al, 1988., etc.)

Los resultados para la variedad 83 VEFMXA-238 se presentan en el cuadro 4.6 en forma de promedios por tratamiento en cada etapa fenológica.

No obstante que en la etapa vegetativa de ésta variedad sobresale un valor muy alto de tensión hídrica, solamente se pueden apreciar dos condiciones estadísticamente diferentes, las cuales, precisamente determinan este valor (tratamiento C), en comparación con los demás valores de los tratamientos.

CUADRO 4.6. Tensión hídrica por etapa fenológica de la variedad 83 VEFMXA-238 en tratamientos de disponibilidad hídrica.

Tratamiento	Etapa Vegetativa	Etapa de Floración	Etapa de f. de grano	Etapa de Maduración
A	2.0 b	3.2 b	2.9 b	1.4 cd
B	1.5 b	4.0 b	1.3 b	0.9 d
C	8.2 a	8.6 a	1.3 b	0.8 d
D	3.4 b	6.8 a	10.3 a	5.4 b
E	2.2 b	6.0 b	1.2 b	4.0 bcd
F	2.1 b	5.7 b	1.3 b	1.2 d
G	3.2 b	5.8 b	2.2 b	12.4 a
H	2.8 b	6.4 b	2.4 b	4.7 bc
Prom.	3.2	20.4	2.8	3.8
C.V. (%)	43.7	67.9	66.2	51.0
DMS (mm)	2.41	24.3	3.3	3.41

Sobre los límites de marchitamiento permanente, se observan dos valores de tensión hídrica en la etapa reproductiva. En esta etapa, se dan valores altos en la mayoría de los tratamientos cuyas cantidades de humedad fluctuaron entre el 50 y el 80 % del abatimiento de la humedad disponible aproximadamente.

En etapas fenológicas posteriores, sobresalen también valores muy contrastantes de tensión hídrica, notándose además, poca variabilidad entre los tratamientos, sobre todo en la etapa de formación de grano. En la etapa de maduración, los valores de los tratamientos exploraron casi todo el rango de la humedad disponible.

A diferencia de las demás variables hídricas consideradas en este estudio, los valores de tensión hídrica presentan, en general, menor número de tratamientos diferentes. Sin embargo, se puede considerar que las cantidades determinadas para esta variable al combinarse en las diferentes etapas fenológicas seguramente determinaron, respuestas diferentes en el cultivo.

Dada la forma exponencial en que se incrementan los valores de la tensión hídrica con respecto a los valores del porcentaje de humedad, las diferencias en los valores del porcentaje de la humedad entre repeticiones, dieron valores muy altos en los coeficientes de variación, tal como se puede observar al pie de los cuadros 4.5 y 4.6 en cada etapa fenológica.

IV.4. Evapotranspiración Real

Esta variable representa, el consumo de agua que cada variedad realizó durante sus etapas fenológicas. Los valores fueron obtenidos mediante un balance hídrico semanal el cual consideró las láminas almacenadas al inicio y al final de este período, y las aportaciones por riego y precipitación que se dieron en el mismo.

Con respecto a las aportaciones por riego, solo se consideró la lámina de agua necesaria para llevar al suelo a la capacidad de campo en la profundidad de 0 a 30 cm. De todas las variables anteriormente descritas, quizá, el comportamiento de la evapotranspiración sea la variable que mejor explique el rendimiento final del cultivo, ya que conjunta aspectos de disponibilidad hídrica en el suelo, aspectos fisiológicos de la planta relacionados con la absorción y transpiración del agua, y la demanda atmosférica por factores climáticos. En un análisis posterior, se definirá la posible ingerencia de esta variable sobre el desarrollo y rendimiento del cultivo.

El consumo de agua o evapotranspiración real de la variedad MEX-241 se presenta en cantidades totales por etapa fenológica para cada uno de los tratamientos en el cuadro 4.7.

CUADRO 4.7. Evapotranspiración real (mm) por etapa fenológica en la variedad Mex-241 en tratamientos de disponibilidad hídrica.

Tratamiento	Etapa Vegetativa	Etapa de Floración	Etapa de f. de grano	Etapa de Maduración
A	212.6 a	73.7 a	121.0 a	94.7 a
B	150.3 c	31.2 c	74.6 cd	70.9 cd
C	199.9 b	10.4 d	89.2 b	80.0 b
D	105.4 f	54.9 b	70.5 d	76.3 bc
E	131.6 d	34.0 c	31.6 f	47.3 e
F	100.9 f	55.8 b	118.6 a	79.4 b
G	115.1 e	78.1 a	79.2 c	73.5 bc
H	100.5 f	34.1 c	53.7 e	65.4 d
Prom.	139.5	46.5	79.8	73.4
C.V. (%)	2.95	7.55	5.9	6.5
DMS (mm)	7.2	6.2	8.2	6.6

Dado que los valores de esta variable fueron determinados a partir de disponibilidades de agua en el suelo y de aportaciones de riego y precipitación, el comportamiento fue en cierta forma similar a las variables hídricas anteriores. Esta similitud radica en la gran variabilidad que se dio en los resultados la cual fue avalada estadísticamente mediante el análisis de varianza realizado para cada etapa fenológica.

Las pruebas de diferenciación de medias definieron seis condiciones de evapotranspiración real en la etapa vegetativa en la cual, se dio una diferencia de hasta 112 mm aproximadamente entre los tratamientos de mayor y menor evapotranspiración, los cuales correspondieron al A y H respectivamente. El tratamiento C, no obstante a que estuvo bajo buenas condiciones de evapotranspiración real durante la primera etapa de su desarrollo, en la etapa siguiente, ó sea, en la reproductiva, estuvo sometido a condiciones de deficiencia hídrica que limitó considerablemente su proceso de evapotranspiración.

En la etapa reproductiva se dieron cuatro condiciones de evapotranspiración real. En esta etapa, es muy notorio (Cuadro 4.7) también, el margen de diferencia entre el tratamiento de mayor y menor valor. En etapas posteriores, esta misma característica se refleja a simple vista. Obviamente, entre etapas, los valores se dieron muy diferentes dado que en gran parte, estuvieron determinados por el período de duración de cada etapa fenológica. Sin embargo, al considerarse por día, los valores de evapotranspiración dieron una tendencia normal con fluctuaciones de 2.0 a 4.2 mm/día en la etapa vegetativa, de 0.7 a 4.9 en la etapa reproductiva, de 1.8 a 6.6 en la etapa de formación de grano y de 2.1 a 4.1 en la etapa de maduración. Estos datos resultaron de la división entre la evapotranspiración y el número de días que duró cada etapa fenológica.

Resultados estadísticamente diferentes, se pueden observar en cada una de las etapas fenológicas consideradas. Condiciones similares a las de la variedad México-241, se dieron para esta variedad en la etapa vegetativa. En esta etapa, se observan en el cuadro 4.8, cinco valores diferentes, de acuerdo al resultado de las pruebas de separación de medias. Nótese también valores hasta de 109.5 mm de diferencia entre el tratamiento A y el tratamiento E los cuales representan los valores extremos encontrados.

Para la variedad 83 VEFMXA-238, los resultados de la variable evapotranspiración real se presentan en el cuadro 4.8.

En la etapa vegetativa, se observan en el cuadro, mayores valores de evapotranspiración en casi todos los tratamientos, con respecto a la variedad México 241. Sin embargo, se dio un mayor margen de variación entre los valores extremos. En las etapas de formación de grano y maduración, las condiciones de disponibilidad hídrica que se dieron, limitaron la evapotranspiración real de esta variedad en mayor proporción que para las mismas etapas de la variedad México 241.

CUADRO 4.8. Evapotranspiración real (mm) por etapa fenológica de la variedad 83 VEFMXA-238 en tratamientos de disponibilidad hídrica.

Tratamiento	Etapa Vegetativa	Etapa de Floración	Etapa de f. de grano	Etapa de Maduración
A	205.8 a	78.8 b	75.7 b	54.7 b
B	152.6 b	27.8 e	54.3 c	45.6 c
C	197.8 a	54.8 cd	87.7 a	42.5 cd
D	127.5 c	63.4 c	26.8 ef	46.4 c
E	96.3 e	46.5 d	22.3 f	39.3 cd
F	101.6 e	81.4 b	73.9 b	34.6 d
G	116.9 d	111.1 a	35.7 de	73.0 a
H	136.2 c	61.5 c	45.0 cd	59.8 b
Prom.	141.8	65.7	52.7	49.5
C.V. (%)	4.1	10.1	12.3	9.3
DMS (mm)	10.2	11.6	11.3	8.1

Los valores que se dieron en cada etapa fenológica, muestran, al juntarse en valores por ciclo de desarrollo, ocho condiciones diferentes de evapotranspiración. Sobre estas condiciones, seguramente el cultivo dio respuesta con la misma variabilidad en rendimiento; posteriormente se analizará esta suposición.

En base a los resultados obtenidos para cada una de las variables hídricas que se consideran en este estudio, se puede decir que se logró establecer condiciones diferentes de disponibilidad de humedad. Estas condiciones nos permitirán estudiar sobre un amplio margen, diferentes respuestas del cultivo basadas en estados hídricos dados en diferentes etapas fenológicas.

IV.5. Rendimiento de la Cosecha.

La acción conjunta o individual de un gran número de factores del sistema suelo-planta-atmósfera, determina el rendimiento del cultivo. Algunos factores actúan en mayor proporción con respecto a otros, como es el caso de factor hídrico. Sobre este factor, podemos esperar fluctuaciones en el rendimiento con

un amplio margen, de acuerdo con la condición de disponibilidad en el suelo principalmente.

En el cuadro 4.9, se presenta el efecto sobre el rendimiento de la variedad MEX-241 de las diferentes condiciones hídricas que se dieron en los tratamientos estudiados.

CUADRO 4.9. Rendimiento de grano (kg/ha) de la variedad MEX-241 en tratamientos de disponibilidad hídrica.

Tratamiento	Kg/ha.
A	2,564 a
B	2,330 c
C	2,298 c
D	1,988 d
E	1,743 e
F	2,709 a
G	2,752 a
H	1,879 d
Prom.	2,283
C.V.(%)	2.8
DMS (kg/ha)	112

Las diferencias entre tratamientos fueron determinadas estadísticamente mediante el análisis de varianza y la definición de los promedios iguales y diferentes, fue realizada mediante pruebas de diferenciación de medias (DMS), cuyos resultados se presentan con letras minúsculas a un lado de cada valor.

Difícilmente se podrán establecer con precisión en este punto, las posibles influencias hídricas que se dieron sobre el rendimiento, dada la gran diversidad de condiciones que se presentaron en las diferentes etapas fenológicas del cultivo, sin embargo, algunos valores de variables hídricas se pueden relacionar a simple vista, como el caso de la evapotranspiración real en la etapa reproductiva del cultivo.

De acuerdo a los valores de rendimiento obtenidos en cada tratamiento, podemos observar diferencias hasta de 1009 kg/ha entre el valor máximo y mínimo que correspondieron a los tratamientos G y E respectivamente.

Bajo las condiciones en que se desarrolló el experimento, se lograron rendimientos hasta de 252 kg/ha superiores al promedio de la región (2,500 kg/ha) bajo riego, sin embargo, se dieron condiciones adversas de manejo lo cual no permitió que el cultivo mostrara su máxima potencialidad de producción misma que por condiciones de humedad hubiera manifestado, ya que algunos tratamientos propiciaron condiciones óptimas en todas las etapas fenológicas del cultivo.

Similares resultados estadísticamente diferenciados se dieron para la variedad 83 VEFMXA- 238, cuyos valores se presentan en el cuadro 4.10.

Los rendimientos en esta variedad, también reflejaron la gran variabilidad observada en cada parámetro hídrico. Las diferencias entre el mayor y menor lograron superar a los 1000 kg/ha. Al observar los diferentes valores de las variables hídricas que se dieron en las diferentes etapas fenológicas y durante la totalidad del ciclo de cultivo, podemos notar que estos rendimientos fueron determinados mas bien por una condición de humedad dada en cierta etapa, que por la condición total.

Aunque el promedio de rendimientos en ambas variedades fue inferior al mínimo de la región, los valores más altos corresponden a los reportados por Catalán (1993) en trabajos realizados en la Región Lagunera.

A la amplia superficie de respuesta dada por la diversidad de condiciones de disponibilidad hídrica que se propiciaron al distribuir los riegos, de acuerdo a la

aparición de las etapas fenológicas, correspondieron los rendimientos obtenidos de ambas variedades.

CUADRO 4.10. Rendimiento de grano (kg/ha) de la variedad 83 VEFMXA-238 en tratamientos de disponibilidad hídrica.

Tratamiento	Rend. (kg/ha)
A	2,627 a
B	1,492 d
C	2,571 ab
D	1,515 d
E	1,468 d
F	2,491 b
G	2,698 a
H	1,905 c
Prom.	2,096
C.V. (%)	3.59
DMS (kg/ha.)	132

Esta situación fue la requerida para poder establecer, sobre un amplio margen de disponibilidad de humedad, todas las respuestas del cultivo y así poder contar con mayores elementos para buscar relaciones más confiables y a la vez poder construir modelos de predicción del rendimiento cuyas respuestas se ajustaran a condiciones hídricas más variables.

A continuación, mediante análisis de regresión simple o regresión múltiple, se buscarán las posibles relaciones del rendimiento con las variables hídricas consideradas, ajustando las que tengan validez estadística, a modelos o funciones de producción que nos permitan contar con herramientas para hacer mas eficiente el uso del agua

IV.6. Relaciones entre Variables Hídricas.

De todos los factores involucrados en el proceso de la producción, el factor hídrico es el que generalmente tiene mayor ingerencia o participación en la mayoría de los procesos fisiológicos de las plantas. Por lo tanto, dado que el

rendimiento de grano o producción de materia seca total, es producto final de dichos procesos, alguna forma de representación del estado hídrico en el sistema suelo-planta-atmósfera debe de estar íntimamente relacionados con ellos.

Las formas de expresar o medir el estado hídrico difieren en principios y procedimientos de medición. En principios, tenemos que el estado hídrico puede ser considerado como, la cantidad de agua que está almacenada en el suelo a cierta profundidad; como la cantidad disponible dentro de los límites de capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente (PMP); como la cantidad de agua sujeta a tensiones ejercidas por la matriz del suelo; o como producto del balance de humedad en el que intervienen factores del suelo, planta y clima. En procedimientos para su medición, algunos se limitan a determinaciones simples mediante muestreos y otros requieren equipos sofisticados para su determinación.

Algunas de estas formas del estado hídrico han sido utilizadas para representar modelos de predicción del rendimiento. Estas representaciones han sido en forma directa, es decir, del valor medido en el suelo, planta o clima, o en forma indirecta a través de factores o índices que reflejan un estado hídrico determinado.

De las variables hídricas consideradas en este estudio, los valores de lámina de agua almacenada (LA), abatimiento de la humedad disponible (AHD), y tensión hídrica (TH), se obtuvieron de los valores del porcentaje de humedad (PW) por lo que lógicamente, deberá existir una correlación muy estrecha entre ellos.

La evapotranspiración real (ETR), al resultar del balance hídrico en donde se involucran variables hídricas cuantificadas en el suelo y variables cuantificadas antes de ingresar al suelo, pudiera también ser considerada con características propias que pudieran o no relacionarse con las demás variables.

En los cuadros 4.11 y 4.12 se presentan los valores de correlación entre las variables hídricas para las variedades de frijol MEX-241 y 83 VEFMXA-238 respectivamente.

Cuadro 4.11. Valores de correlación entre variables hídricas en la variedad MEX-241.

Variable Hídrica	AHD	TH	ETR
LA	-0.962**	-0.612**	-0.032
AHD		0.668**	0.059
TH			0.069

*Significativo **Altamente significativo

Cuadro 4.12. Valores de correlación entre variables hídricas en la variedad 83 VEFMXA-238.

Variable Hídrica	AHD	TH	ETR
LA	-0.990**	-0.703**	0.190
AHD		0.704**	-0.209
TH			-0.322

* Significativo ** Altamente significativo

De acuerdo a los resultados de ambos cuadros, se pueden distinguir a los dos tipos de variables anteriormente descritas. Las que obtienen su valor de la medición directa en el suelo (LA, AHD y TH) y la que considera solo las aportaciones por riego y precipitación (ETR).

IV.6. Relaciones de Rendimiento con Variables Hídricas por Etapa Fenológica.

Los valores que obtuvieron cada una de las variables en las etapas fenológicas de cada variedad, se sometieron a un análisis de correlación con el rendimiento con el propósito de determinar la posible ingerencia y los períodos en los cuales la respuesta a cambios en las condiciones de humedad se manifestara en forma significativa. En los cuadros 4.13 y 4.14 se presentan los resultados de éste análisis para las variedades MEX-241 y 83 VEFMXA-238 respectivamente.

Cuadro 4.13. Valores de correlación entre variables hídricas y rendimiento de la variedad MEX-241.

Variable Hídrica	Etapa Fenológica			
	Vegetativa	Floración	F. Grano	Maduración
LA	-0.045	0.233	0.502*	0.442*
AHD	0.051	-0.314	-0.503*	-0.434*
TH	0.115	-0.133	-0.400	-0.322
ETR	0.196	0.557**	0.794**	0.673**

* Significativo ** Altamente significativo

Cuadro 4.14. Valores de correlación entre variables hídricas y rendimiento de la variedad 83 VEF MXA-238.

Variable Hídrica	Etapa Fenológica			
	Vegetativa	Floración	F. Grano	Maduración
LA	-0.365	0.065	0.148	0.151
AHD	0.277	-0.009	-0.080	-0.137
TH	0.307	0.076	0.268	0.135
ETR	0.372	0.720**	0.631**	

* Significativo ** Altamente significativo

Las variables derivadas de la medición directa del agua del suelo, no se ajustaron en la mayoría de los casos, a los valores de rendimiento en las dos variedades. En cambio, en casi todas las etapas fenológicas, se dieron correlaciones significativas con la variable derivada del balance de humedad como fue, la evapotranspiración real.

La consideración como promedio por etapa fenológica de las variables derivadas de la medición directa del agua del suelo, es quizá la razón por la cual, éstas variables no mostraron relación alguna con el rendimiento. En el desarrollo de cada etapa, se dieron variaciones muy altas en los valores los que al considerarlos en términos de promedios, seguramente no manifestaron el estado hídrico real que se produjo, en cambio, la evapotranspiración real (ETR) al representar valores totales, mostró en mejor forma, el estado hídrico real.

En términos generales, la ingerencia de la humedad sobre el rendimiento estuvo representada por la evapotranspiración real y se manifestó con mayor consistencia, en las etapas reproductiva y de formación y llenado de grano. Las ecuaciones 1 y 2 representan el comportamiento del rendimiento en función de la evapotranspiración real en la etapa reproductiva de las variedades MEX-241 y 83 VEFMXA-238 respectivamente.

$$Y = 1852.14 + 9.272 X_i \dots\dots\dots (4.1)$$

$$Y = 1071.42 + 15.597 X_i \dots\dots\dots (4.2)$$

Donde:

Y = Rendimiento en kg/ha.

X_i = Evapotranspiración real en la etapa de floración en mm.

Al expresar el comportamiento de las funciones en forma gráfica, podremos diferenciar con mayor claridad, la respuesta de cada variedad sobre la superficie de respuesta dada por los valores de evapotranspiración real. En la figura 4.1, se presenta en forma gráfica, las funciones descritas en las ecuaciones 4.1 y 4.2.

El rango de valores mas bajos de evapotranspiración presentados en esta etapa, se dio en la variedad MEX-241 el cual fluctuó entre 10 y 78.1 mm. Sobre este rango, el incremento del rendimiento fue de aproximadamente 630 kg/ha, correspondiendo a un incremento de 9.3 kg/ha por cada milímetro de agua consumido.

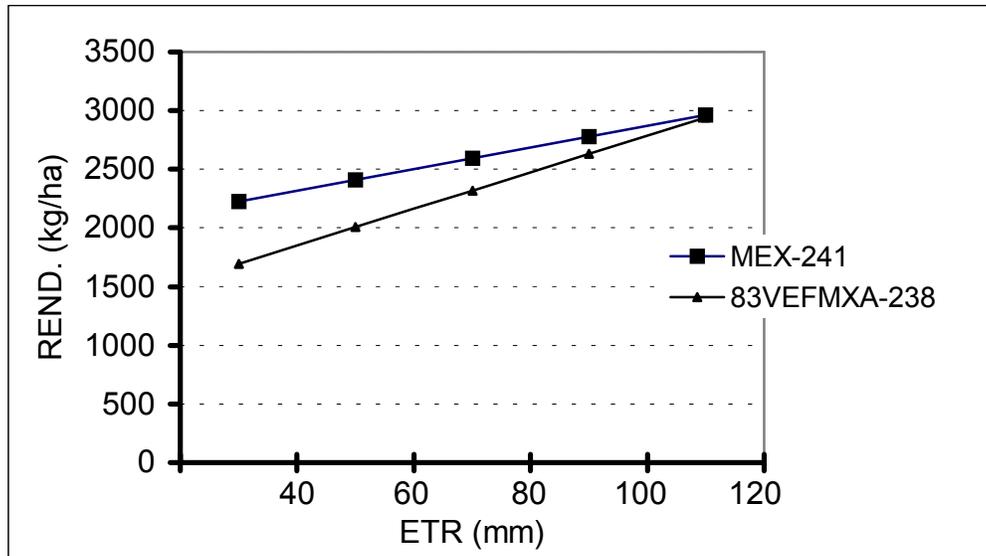


Fig. 4.1. Relación entre el rendimiento y la evapotranspiración real en la etapa de floración en dos variedades de frijol.

En la variedad 83 VEFMXA-238, el valor mínimo de evapotranspiración fue de 27.8 mm y el máximo de 111.1, la diferencia en rendimiento en base a estos valores fue de 1299 kg/ha. Sin embargo, para los valores mínimos de evapotranspiración de ambas variedades, aún cuando en la variedad MEX-241 fue menor, el rendimiento de ésta, fue superior en 440 kg/ha al de la variedad 83 VEFMXA-238, la cual demostró a su vez, una mayor respuesta en rendimiento a cambios en los valores de evapotranspiración.

Los valores de correlación que obtuvieron las relaciones mostradas en la figura 4.1, aunque se dieron en forma significativa, mostraron una gran diferencia en el grado de ajuste, sin embargo, las funciones que representan dichas relaciones se pueden considerar de buena confiabilidad, dada la validez estadística determinada. Estos valores a su vez, demuestran la alta ingerencia de la condición de humedad en esta etapa, misma que determina, de acuerdo a la pendiente de las líneas de ajuste, la alta variabilidad de la respuesta en rendimiento, la cual, bajo condiciones de baja disponibilidad hídrica, puede reducirse hasta cero. Estos resultados concuerdan con los de muchos autores que

señalan la importancia que tiene el factor hídrico en la etapa reproductiva (Kramer, 1974., Acosta et al, 1983., Zermeño, 1984., Salter y Goode, 1967., etc.).

Las funciones de respuesta a las condiciones de evapotranspiración dadas en la etapa de formación de grano se presentan para la variedad MEX-241 en la ecuación 4.3 y para la variedad 83 VEFMXA-238 en la ecuación 4.4.

$$Y = 1477.71 + 10.091 X_i \dots\dots\dots(4.3)$$

$$Y = 1350.99 + 14.138 X_i \dots\dots\dots(4.4)$$

Donde:

Y = Rendimiento en kg/ha.

X_i = Evapotranspiración real en la etapa de formación de grano en mm.

La representación gráfica de las ecuaciones 4.3 y 4.4 se presenta en la figura 4.2.

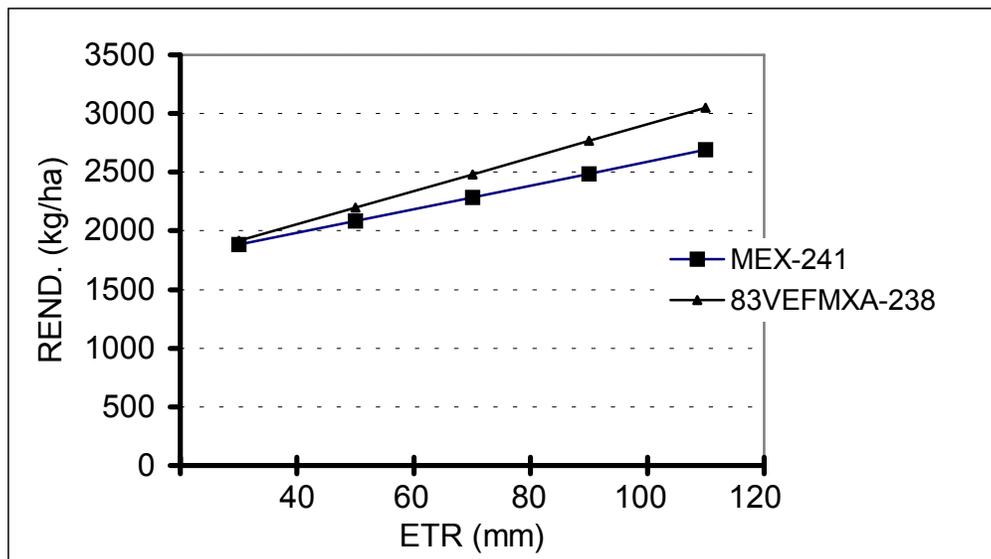


Fig. 4.2. Relación entre el rendimiento y la evapotranspiración real en la etapa de formación de grano en dos variedades de frijol.

La tendencia y los valores de las pendientes de las líneas de respuesta, muestran un comportamiento similar al de la etapa anterior, sin embargo, se diferencia grandemente por la respuesta a una condición de valores bajos de evapotranspiración. En esta etapa, los valores de las intersecciones con el eje de las ordenadas, los cuales representan el valor mínimo de rendimiento, apenas se diferencian en aproximadamente 120 kg/ha. Esto quiere decir que la condición hídrica dada en esta etapa, no fue determinante para establecer diferencias de rendimiento entre las dos variedades. Sin embargo, al resultar correlacionado el rendimiento de ambas variedades con los valores de evapotranspiración, se determina también, una alta ingerencia de la humedad en esta etapa del desarrollo. Muchos autores señalan también a esta etapa como de gran importancia en cuanto a la necesidad de mantener buena condición de humedad (Zermeño, 1984., Ibarra, 1987., Harold, 1986., Pajarito et al, 1988., etc.).

Similares resultados de ingerencia de la variable evapotranspiración real durante las etapas de floración y de formación y llenado de grano, fueron obtenidos por Martínez (1992), en el cultivo de trigo en el Valle del Guadiana, Durango.

Los análisis anteriores, en donde se involucraron solamente valores parciales de variables hídricas, con valores globales de rendimiento, lógicamente, no determinan la ingerencia real o total de la condición hídrica sobre el rendimiento. Quizá, si se consideraran relaciones de algún componente parcial del rendimiento como producción de materia seca acumulada por período correspondiente a cada valor de la variable hídrica, pudieran definirse de mejor manera, la magnitud de los efectos de la variación de la condición de humedad. Sin embargo, con propósitos de caracterización de variedades, este tipo de análisis se considera importante dado que no casualmente los resultados significativos coinciden en las etapas que muchos autores reconocen como las de mayor importancia por el efecto que produce el factor hídrico sobre el rendimiento.

Análisis de correlación entre el rendimiento y valores globales de variables hídricas, constituyen además de métodos para caracterizar cultivos o variedades, una herramienta de planeación para el manejo del riego. El resultado de este análisis se puede representar mediante modelos de predicción del rendimiento mismos que pueden ser utilizados con muchos fines.

Los valores globales de cada una de las variables hídricas que se consideraron en este estudio, se sometieron al análisis de correlación con el rendimiento. El resultado de este análisis determinó que solo la variable evapotranspiración real (ETR) se correlacionó en forma significativa con el rendimiento. A continuación, se definirán los tipos de relaciones encontradas entre estas variables.

IV.7. Relaciones Rendimiento-Evapotranspiración Real Global.

Las funciones que describen las relaciones entre el rendimiento y la evapotranspiración real ocurrida durante todo el ciclo de cultivo, se presentan en las ecuaciones 8 y 9 para las variedades MEX-241 y 83 VEFMXA-238 respectivamente.

$$Y = -2091.3 + 21.8(X_i) - 0.026(X_i)^2 \dots\dots\dots (4.5) \qquad R^2 = 0.703^{***}$$

$$Y = -981.4 + 13.4(X_i) - 0.011(X_i)^2 \dots\dots\dots (4.6) \qquad R^2 = 0.850^{***}$$

Donde:

Y = Rendimiento en kg/ha.

X_i = Evapotranspiración real durante el ciclo en mm.

El tipo de función descrita por éstas ecuaciones corresponde a la forma cuadrática en la cual se expresa en el primer término, los incrementos en el rendimiento por incrementos en la evapotranspiración real y en el segundo término, el valor de evapotranspiración sobre el cual el rendimiento decrece o

cambia su tendencia lineal. Estos modelos son similares a los obtenidos por Catalán (1993), aunque los efectos de las condiciones de deficiencia y exceso de humedad fueron diferentes.

En la figura 4.3, se presentan en forma gráfica las funciones descritas en las ecuaciones 4.5 y 4.6.

El rango de valores de evapotranspiración real sobre el cual se presenta el comportamiento del rendimiento, abarca casi en su totalidad, a el rango de valores reales que se dieron en ambas variedades. Sin embargo, la mayoría de los valores obtenidos en los tratamientos, se distribuyeron entre los 200 a 400 mm. Sobre este rango, el comportamiento del rendimiento fue muy similar notándose diferencias de apenas 60 kg/ha aproximadamente, en el valor de máxima variación el cual correspondió a 300 mm. de evapotranspiración aproximadamente.

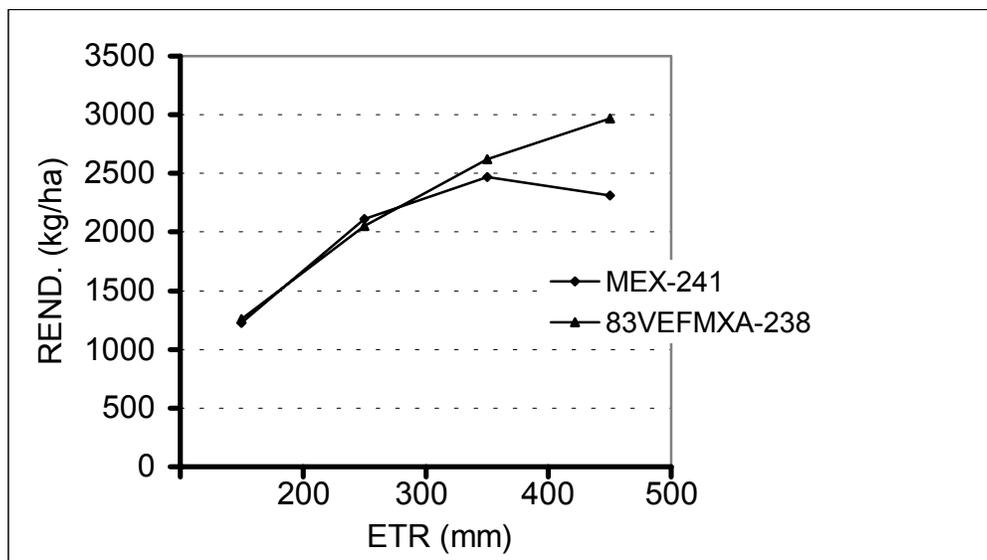


Fig. 4.3. Relación entre el rendimiento y la evapotranspiración real durante el ciclo de desarrollo, en dos variedades de frijol.

En valores inferiores y superiores al rango de 200 a 400 mm de evapotranspiración, se establecieron las diferencias entre las dos variedades. En el primer caso, o sea con valores por debajo de los 200 mm., la respuesta en

rendimiento de la variedad MEX-241 se manifiesta en la figura 4.3, inferior al de la variedad 83VEFMXA-238. Esta diferencia alcanza valores hasta de 360 kg/ha aproximadamente, en el valor de evapotranspiración en el cual la variedad MEX-241 manifiesta su valor mas bajo de rendimiento. Estos resultados concuerdan con lo expresado por Pajarito (1986).

En el segundo caso, o sea, con valores de evapotranspiración superiores a los 400 mm., el comportamiento de los rendimientos de las variedades, expresan tendencias diferentes, así tenemos que, mientras la variedad MEX-241 manifiesta decrementos en su rendimiento, la variedad 83VEFMXA-238 aunque también cambia sobre este valor su tendencia lineal, manifiesta todavía hasta los 500 mm aproximadamente, incrementos en su rendimiento.

En términos generales, podemos diferenciar a las dos variedades en base a su comportamiento sobre una superficie de respuesta dada por valores de evapotranspiración, mediante los siguientes aspectos: la variedad MEX-241 manifestó mayor susceptibilidad a condiciones de deficiencia o exceso de humedad que la variedad 83VEFMXA-238, sin embargo, presentó una mayor capacidad de respuesta sobre cambios en los valores de evapotranspiración; la variedad 83VEFMXA-238 presentó una mayor estabilidad en la producción al responder favorablemente tanto en condición de deficiencia como exceso de evapotranspiración. Sin embargo, bajo las condiciones hídricas que normalmente se producen, la respuesta de ambas variedades fue similar.

IV.8. Funciones de Producción.

Las ecuaciones 4.5 y 4.6 constituyen las funciones de producción de la variedades de frijol las cuales en esta forma, pueden ya utilizarse con su respectiva validación, como herramienta de planeación del manejo del riego, sin embargo, el tipo de información que nos resulte al emplearlas, no considerará los períodos en los cuales la ingerencia hídrica sea de mayor importancia. Con el tipo

de información que se obtuvo de este estudio, es posible crear funciones de producción que contemplen dichos períodos.

Para la variedad de frijol MEX-241, la función que predice el rendimiento en base a evapotranspiración real por etapas fenológicas se manifiesta en la expresión siguiente:

$$R = -623.78 + 51.6(ETR1) - 20.4(ETR2) - 0.21(ETR1)^2 + 0.27(ETR2)^2 - 0.18(ETR1 \times ETR2) + 0.16(ETR1 \times ETR3) + 0.29(ETR2 \times ETR3)$$

$$R^2 = 0.929^{***}$$

Donde:

R = Rendimiento en kg/ha.

ETR = Evapotranspiración real en mm.

1, 2, y 3 = Etapas vegetativa, floración y formación de grano respectivamente.

Esta expresión considera solamente las tres primeras etapas fenológicas del cultivo las cuales se consideran de mayor importancia en cuanto al efecto del factor hídrico sobre el rendimiento.

Cada uno de los coeficientes de regresión de esta función, resultaron ser altamente significativos de acuerdo al análisis de varianza de la regresión, por lo que se puede considerar que las variables independientes bajo estudio explican satisfactoriamente el rendimiento del cultivo. En el modelo se puede notar que no se incluyen los términos $(ETR3)$ y $(ETR3)^2$, los cuales no contribuyeron al modelo en la explicación del fenómeno estudiado.

La función encontrada para la variedad 83VEFMXA-238 en base a evapotranspiración real, es la siguiente:

$$R = 1842.4 - 23.8(ETR1) + 8.1(ETR2) + 37.1(ETR3) - 0.16(ETR3)^2 + 0.16(ETR1 * ETR2) + 0.014(ETR1 * ETR3) + 0.32(ETR2 * ETR3)$$

$$R^2 = 0.975$$

Donde:

R = Rendimiento en kg/ha

ETR = Evapotranspiración real en mm.

1, 2 y 3 = Etapas vegetativa, floración y formación de grano respectivamente.

En este modelo, el efecto de reducción del rendimiento por exceso de evapotranspiración no se manifiesta significativamente en las dos primeras etapas fenológicas lo que en cierta manera coincide con la respuesta encontrada en el modelo que incluye la evapotranspiración global, el cual, sobre los valores reales de esta variable independiente, no manifiesta dicha reducción.

De acuerdo a los términos que incluyen cada función, podemos notar diferencias en los modelos por lo que con respecto al factor hídrico podemos afirmar que el comportamiento de las variedades es diferente.

El tipo de funciones determinadas con ambas variables, corresponden al modelo polinomial propuesto por Palacios y Martínez (1978), el cual ha sido utilizado por diferentes autores para expresar el rendimiento en función del efecto de las variables hídricas en las diferentes etapas fenológicas del cultivo.

V. CONCLUSIONES

- De acuerdo a como se consideraron los valores de las variables hídricas en este estudio, solamente la evapotranspiración real tuvo una relación significativa con el rendimiento de ambas variedades de frijol. Esta relación se explica en una función de tipo cuadrática que manifiesta incrementos de rendimiento con mayores tasas de evapotranspiración, hasta un límite en el cual, el rendimiento tiende a estabilizarse, e inclusive a decrecer. Esto se justifica porque los valores de evapotranspiración real están dados principalmente por cantidades de agua aplicadas, las cuales al alcanzar niveles altos, se crea un exceso lo cual es perjudicial para la planta.
- Al comparar la variedades de frijol en cuanto a su respuesta a la condición hídrica (evapotranspiración real), se encontró que hasta cierto nivel (350 mm), el comportamiento fue mas o menos similar, pero arriba de este, el comportamiento fue completamente diferente.

- Considerando la evapotranspiración real por etapas fenológicas, se puede construir un modelo o función de producción que permite predecir el rendimiento con muy altos niveles de probabilidad. El tipo de función es polinomial y considera las etapas en las cuales la ingerencia hídrica sobre el rendimiento es significativa estadísticamente.

VI. LITERATURA CITADA

Abdul-Jabbar, A. S., T. W. Sammis., D. G. Lugg., C. E. Kallsen and D. Smeal. 1983. Water use by alfalfa, maize and barley as influenced by available soil water. *Agricultural Water Management*. 6(1983) 351-363.

Acosta, G. J. 1988. Selection of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes with enhanced drought tolerance and biological nitrogen fixation. Ph. D. Thesis, Michigan State University E. Lansing. 196 p.

Acosta, G. J. y Kohashi, B. J. 1989. Effect of water stress on growth and yield of indeterminate dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Field crops Res.* 20: 81-93.

Acosta, G. J. , Núñez, B. A. , Ibarra, P. F. J. 1983. Antecedentes y estrategias del estudio genético-fisiológico de frijol bajo condiciones de sequía. Informe de Investigación. INIFAP.-SARH. Durango, Dgo. 145 p.

Acosta, G. J. , Ochoa, M. R. , Aguilera, CH. D. M. y Rosales, S. R. 1990. Mecanismo fenológico de escape en frijol en relación a la adaptación a temporal. congreso nacional de la Sociedad Mexicana de Fitogenética. Cd. Juárez Chihuahua. 68 p.

Aguilera, C. M. y Martínez, E. R. 1980. Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. 2ª Edición. UACH. Chapingo, México. 321 p.

Aguilera, CH. D. M. y Acosta, G. J. 1990. Caracteres Morfofisiológicos asociados con la adaptación a temporal en frijol. Resultados de investigación sobre frijol 1990. Proyecto colaborativo INIFAP-MSU. SARH-INIFAP. Durango, Dgo. México. 81 p.

Bascur, B. Y Fritsch, F. N. 1975. Efectos de métodos y frecuencias de riego sobre componentes de rendimiento en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Resúmenes analíticos. 35(3): 147-152.

Bernardo, S. J. , Gurini, G. H. y J. B. Carbalho. 1970. Effects of soil moisture level on the yield of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Universidad Federal de Viscosa. Minas Gerais, Brasil. 30 (71) p. 7-13.

Bertolacci. 1992. Schemi per la determinazione dei fabbiosoqui idirici e difinizioni relative ai parametri idrologici alla Técnica Irrigua. Instituto di Hidráulica Agraria. Università di Pisa. 23 p.

Campo Agrícola Experimental Pabellón. 1976. Cultivo de frijol de riego. Desplegable # 44. CIAB. 45 p.

Catalán, V. E. 1993. Función de producción de uso de agua del cultivo de frijol. Informes de Investigación 1990. CENID-RASPA-INIFAP- Gómez Palacio, Durango. P.125-138.

Denmead, D. T. y R. H. Shaw. 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. Agron. J. 45: pp. 385-390.

De León, C. I. 1981. Evaluación de modelos de producción para el cultivo de maíz en función del régimen hídrico en diferentes etapas fenológicas. Tesis M.C. Colegio de Graduados. UAAAN. Saltillo, Coah. México. 125 p.

Erie, L. J. et al. 1981. Consumptive use of water by mayor crops in the Southwestern United States. United States Department of Agriculture, Conservation Research. Report No. 29. 1 p.

Etherington, J. R. 1975. Environment and plant ecology. Jhon Wiley and Sons. Ltd. pp. 144-146.

Farsi, A. A. , J. Feyen, C. Belmans and K. de Wijnngaert.1987. Modelling of yield of yield of winter wheat as a function of soil water availability. Agric. Water Management. Vol. 12. pp. 323-339.

Fernández, R. M. 1986. Evaluación de seis patrones de cultivo y seis balances de agua bajo condiciones de secano. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, UACH. Chapingo, México.

Flinn, J. C. 1970. The simulation of crop "Irigations Systems" from Systems analysis in agricultural management. Edited by Jhon Wiley Siydney.

Gavande, S. A. 1976. Física de Suelos, Principios y Aplicaciones. 2ª Edición. Editorial Limusa, México. 351 p.

Godoy, A. C. 1990. Funciones de producción del agua y sus usos en la agricultura. Metodología de Investigación y Diagnóstico en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. SARH-INIFAP. 226 p.

González, C. A. 1982. Tasas evapotranspirativas y efecto de variar los niveles de humedad del suelo en el rendimiento del frijol. Avances en la Enseñanza y la Investigación. Centro de Hidrociencias. Chapingo, México. 3: 345 p.

González, J. A. 1991. Efecto de tres regímenes de humedad en tres sistemas de cultivo en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). Tesis Profesional. UAAAN. Saltillo, Coah. México.

Hernández, Y. C. 1980. Función de producción para maíz forrajero. Informe de Investigación. CENAMAR-SARH.

Hiler, E. A. , and R. N. Clark. 1971. Strees day index to characterize effects of water strees on crop yields. Transactions of the ASAE. Vol. 14. pp 110-114.

Hasio, T. C. 1973. Plant response to water strees. Ann Rev. Plant Phisiol. 24: pp 519-570.

Ibarra, P. F. J. 1988. Efectos de sequía sobre características morfofisiológicas en 12 genotipos de frijol en Durango. Informe de Investigación. INIFAP-SARH. Durango, Dgo. México. 71 p.

Ibarra, P. F. J. , Ochoa, M. R. , Núñez, G. S. y Pajarito, R. A. 1987. Vivero de frijol para sequía en la zona semiárida de altura de México. Informe de Investigación. INIFAP-SARH, Durango, Dgo. México.

Ibarra, P. F. J. y Pajarito, R. A. 1987. Efectos de la sequía sobre características morfofisiológicas en genotipos de frijol. Informe de Investigación INIFAP-SARH. Durango, Dgo. México.

Inzunza, I. M. A. 1993. Función de respuesta del maíz en base a déficits evapotranspirativos. Informes de Investigación 1990. CENID-RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México. pp. 35-64.

Inzunza, I. M. A. 1993. Función de producción del maíz a diferentes condiciones de humedad del suelo. Informes de Investigación 1990. CENID-RASPA. Gómez Palacio, Dgo. pp. 65-86.

Jasso, I. R. 1992. Estimación de las características de retención de agua en el suelo. Sequía. Seminarios Técnicos. INIFAP-CENID-RASPA. Vol. 8, 9, y 10 1992. pp. 155-166.

Jasso, I. R. 1993. Simulación del balance de humedad del suelo bajo condiciones de cultivo comercial. Informes de investigación 1990. CENID-RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México. pp. 271-287.

Jasso, I. R. , y Luna, D. E. 1993. Parcela de validación para predicción del rendimiento de trigo mediante funciones de producción. Informes de Investigación 1990. CENID-RASPA. Gómez Palacio, Dgo. México. pp. 255-270.

Jasso, I. R. y Ramírez, C. C. E. 1990. Algoritmos para estimar la evapotranspiración real. Metodología de Investigación y Diagnóstico en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. CENID-RASPA. SARH-INIFAP. Gómez Palacio, Dgo.

Jasso, I. R. y Ramírez, C. C. E. 1990. Funciones de producción y balance de humedad del suelo. Metodología de Investigación y Diagnóstico en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. CENID-RASPA. SARH-INIFAP. Gómez Palacio, Dgo.

Jensen, M. E. y C. E. Franza. 1970. Sheduling irrigations using climate crop soils data. Journal of the Irrigation and Drainaje. Vol. 96. IRI: 25 p.

Kramer, P. J. 1974. Relaciones hídricas de suelos y plantas. EDUTEX. México. pp. 82-114.

Kramer, P. J. 1969. Plant and soil water relationship. A modern synthesis. Mc Graw Hill Book Company. 482 p.

Lawn, R. J. 1988. Breeding for improved plant performance in drought-prone environments. In: F. Bidinger and C. Johansen (Eds). Drought research priorities for the dry land tropics. ICRISAT. Patancheru, India. pp. 213-219.

Mapp, J. P. and Aidman, V. R. 1976. A bioeconomic simulation analysis of regulating ground water irrigation. Amer. J. Agr. Econ. pp. 391-402.

Martínez, B. O. U. 1992. Estudio del balance hídrico in-situ en cultivos bajo riego y temporal en Durango. Informe de Investigación. SARH-INIFAP. Durango, Dgo. México.

Maurer, A. R. , Oymrod, D. P. y Scoot N. J. 1977. Efecto de cinco regímenes de agua del suelo en el crecimiento y composición de plantas de frijol. In: Centro de Información sobre frijol. CIAT. 146 p.

Miranda, O. y Belmar, N. C. 1979. Déficit hídrico y frecuencia de riego en frijol. In: Centro de Información sobre frijol. CIAT. 141 p.

Muñoz, O. A. 1986. Estimaciones de la resistencia a sequía. El agua en las plantas. Simposio realizado en el Colegio de Postgraduados. Centro de Botánica. Chapingo, México. pp. 15-18.

Norero, A. S. 1982. Modelos agronómicos. Apuntes mimeografiados del curso didáctico del 8 de marzo al 2 de abril de 1982. SIDITA. Mérida, Venezuela.

Núñez, B. A. 1984. Estudio de raíz y potenciales hídricos de frijol bajo sequía. INIA. CIANE. SARH. Durango, Dgo. México.

Núñez, B. A. y Rumayor, R. A. 1992. Relación entre potenciales hídricos y resistencia estomatal de frijol bajo sequía. La investigación en México 1991-1992. Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Acapulco, Gro. México. 183 p.

Ortiz, S. C. 1984. Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana. UACH. Chapingo, México.

Ortiz, V. B. 1977. Edafología. Ed. Patena, A. C. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México. 143 p.

Ortiz, V. B. y Ortiz, S. C. A. 1980. Edafología. 3ª Edición. Universidad Autónoma de Chapingo. Rama de suelos. Chapingo, México. pp. 54-57.

Pajarito, R. A. e Ibarra, P. F. J. 1987. Caracterización del sistema radical de genotipos de frijol con diferente mecanismo de adaptación a sequía. Informe de Investigación. INIFAP-SARH. Durango, Dgo. México.

Pajarito, R. A. 1987. Respuestas morfofisiológicas de genotipos de frijol a sequía en la zona semiárida de altura de México. INIFAP-SARH. Durango, Dgo. México.

Pajarito, R. A. 1987. Caracterización del sistema radical de genotipos de frijol con diferente mecanismo de adaptación a la sequía. INIFAP-SARH. Durango, Dgo. México.

Pajarito, R. A. y Ochoa, M. R. 1986. Estudio de genotipos de frijol en dos condiciones de humedad en la zona semiárida de México.. XXXIV Reunión Anual del PCCMCA. San José de Costa Rica. C.A.

Palacios, V. E. y Martínez, H. 1978. Respuesta de los cultivos a diferentes niveles de humedad del suelo, un enfoque metodológico de investigación. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. pp. 43-45.

Quizenberry, J. E. 1987. Mejoramiento de la planta para resistencia a sequía y el aprovechamiento del agua. Ed. Limusa. México, D.F. pp. 233-257.

Ramírez, C. C. E. 1989. Respuesta del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) a la sequía inducida. Tesis M.C. Colegio de Graduados. UAAAN. Saltillo, Coah. México. 64 p.

Ramírez, E. E. 1977. Determinación de los niveles óptimos de humedad y fertilización en el frijol en Zacatepec, Morelos. Tesis Profesional. UACH. Chapingo, México.

Rao, P. B. , Sarma S. Y Chander, S. 1988. a Simole dated water production function for use in irrigated agriculture agriculture. *Agric. Water Management*. 13: 23-32.

Rivera, Z. R. 1988. Uso y comparación de modelos para simular el balance de humedad del suelo en el cultivo de frijol. Tesis Profesional. UAAAN. Saltillo, Coah. México.

Rodas, A. J. M. 1989. Estudio del rendimiento y sus componentes en variedades de trigo, evaluado bajo régimen de humedad variable. Tesis Profesional. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coah. México.

Rojas, B. J. R. y Palacios V. E. 1983. Validación de un modelo de predicción para rendimiento del frijol en recipientes. *Avances de Investigación*. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

Romero, V. M. 1987. Respuesta de la cebada (*Hordeum vulgare*) a variaciones de la humedad en el suelo en diferentes etapas de crecimiento. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

Salter, P. J. and Goode, J. E. 1967. Crop response to water at different stages of growth. *Common Wealth Bureau of Horticulture and Plantation Crop*. East Malling, Maidstone, Kent. pp. 51-52.

Siqueira, P. R. y Palacios, V. E. 1982. Funciones de respuesta del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y su uso para mejorar la eficiencia del agua de riego. Tesis M.C. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México

Summrfield, R. J. , Roberts, E. H. and R. H. Ellis. 1989. Adaptation of chick peas to agroclimatic costraints. Presented at the Second International Workshop on Chick pea Improvement. Dex. 1989. ICRISAT, Patancheru, India.

Taylor, S. A. 1952. Use of mean soil moisture tension to evaluate the effect of soil moisture on crop yields. *Soil Sci*. Vol. 74. pp. 217-226.

Valdez, G. M. J. 1989. Resultados de investigación sobre frijol 1989. INIFAP-SARH. Durango, Dgo. México.

Weatherly, A. B. and J. H. Danep. 1979. Effect of tillage on soil-water movement during corn growth. *Soil Sci. J.* 43(6); 1222-1225.

Wright, J. L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *Proceedings of American Society of Civil Engineers. Journal of Irrigation and Drainage.* 108 (JRL): pp 57-74.

Zermeño, G. A. 1989. Respuesta de la cebada (*Hordeum vulgare* L.) a diferentes niveles de humedad aprovechable residual en el suelo en tres etapas fenológicas de su desarrollo. Tesis M.C. UACH. Chapingo, México.