



PA - ARB - 139
1981 00001

**INTERNATIONAL
IRRIGATION
CENTER**

**MANUAL PARA PRODUCCION DE CULTIVOS
EN SECANO Y BAJO RIEGO**

GEORGE H. HARGREAVES

1989

MANUAL PARA PRODUCCION DE CULTIVOS EN SECANO Y BAJO RIEGO

Por George H. Hargreaves

Incluyendo:

- **Tablas de datos climatológicos requeridos**
- **Agrometereología**
- **Funciones de producción de cultivos**
- **Simulación y planeación de recursos hidráulicos**

INDICE

Resumen ejecutivo	1
Introducción	2
Agrometeorología y manejo de aguas	3
Transferencia de agrotecnología varietal	9
Aplicaciones de datos climatológicos para la planeación agrícola	10
Selección de cultivos	11
Evaluación de la precipitación adecuada	14
Otros datos y sistemas de apoyo de decisiones	15
Funciones de producción de cultivos	17
El agua y la producción de cultivos	17
Energía y crecimiento de cultivos	18
Fertilidad y producción de cultivos	20
Aireación o drenaje	21
Otras consideraciones	22
Suelos	22
Modelo de simulación de clima WMAKER	25
Modelos de cultivos	27
Aplicaciones de la base de datos	28
Tablas de datos climatológicos	30
Apéndice I	Tablas de datos climatológicos mensuales para Africa
Apéndice II	Tablas de datos climatológicos mensuales para Latinoamérica
Apéndice III	Tablas de datos climatológicos mensuales para países seleccionados de Asia
Apéndice IV	Guias seleccionadas y diagrama de flujos

MANUAL PARA PRODUCCION DE CULTIVOS EN SECANO Y BAJO RIEGO

Resumen Ejecutivo

Este manual resume varios años de investigación e incluye muchos aspectos del desarrollo agrícola y de recursos hídricos. Las aplicaciones principales son en agrometeorología para planeación e investigación agrícola. El manejo de la precipitación y del agua de riego son factores claves para aumentar la producción agrícola.

Los temas siguientes están incluidos en el manual:

1. Agrometeorología y manejo de agua para la agricultura;
2. Aplicaciones de las tablas climatológicas para el planeamiento agrícola;
3. Funciones de producción de cultivos;
4. Prediciendo la variabilidad del clima;
5. Modelos de crecimiento y desarrollo del cultivo.
6. Selección de cultivos y transferencia agrotecnológica;
7. Diseño de un sistema de riego suplementario;
8. Desarrollo de recursos hídricos.

Desarrollos recientes en simulación en nuevos métodos para calcular los requisitos de agua del cultivo, y en logros de la investigación de varias interacciones climatológicas hacen ahora posible que mejoremos altamente la planeación y el desarrollo agrícola. Para complementar estos desarrollos, se ha preparado un grupo de tablas climatológicas. Las tablas de datos climatológicos proveen:

- una definición más segura de la variabilidad del clima;
- información adecuada para el desarrollo de datos climatológicos diarios sintéticos
- la información básica relativa a los requisitos de agua de los cultivos;
- los datos requeridos para modelación de cuencas y para calcular los extremos de precipitación probable en un tiempo dado.

Seis de los factores principales que influyen en la producción de cultivos se describen detalladamente para proveer a los investigadores, agricultores y administradores con suficientes aportes para mejorar las prácticas de manejo.

Algunas de las interacciones entre estos factores están descritas y se muestran gráficamente.

Se presentan criterios para la transferencia agrotecnológica y los cultivos están divididos en cinco grupos con respecto a sus requisitos óptimos de temperatura.

Se describen varias relaciones que hacen posible una evaluación completa del clima y su variabilidad en base a datos de temperatura mensual y datos de precipitación y de sus desviaciones standard. Los datos climatológicos requeridos para el planeamiento y desarrollo agrícola para una región o un continente se pueden almacenar en uno o dos discos de computador.

El uso de las tablas climatológicas, conceptos y modelos descritos aquí requieren entrenamiento de computadora y de software. Se ha sugerido que grandes beneficios se pueden obtener de la participación en los programas de investigación y de los esfuerzos cooperativos de un gran número de agencias de investigación.

INTRODUCCION

Los valores climatológicos promedios mensuales son de alto significado cuando se publican con sus desviaciones estándar. Los valores mensuales de temperatura y los requisitos de agua de riego varían solo un poco de año a año durante la época de crecimiento del cultivo. Sin embargo, la desviación estándar de las cantidades de precipitación frecuentemente excede los promedios.

Se presentan métodos para hacer evaluaciones seguras de radiación solar, humedad relativa, y requisito de agua del cultivo dependiendo de la temperatura. Los valores diarios de temperatura máximas y mínimas (TMX y TMI), precipitación y latitud proveen los datos requeridos para aplicar la agrometeorología para el manejo de agua para la agricultura y para varios estudios hidrológicos y de manejo de cuencas.

Se describen los varios factores que determinan el crecimiento y desarrollo del cultivo. Se presentan tablas de base de datos climatológicos mensuales y se recomiendan para usar con modelos para generar valores sintéticos diarios. Estos valores sintéticos proveen información climatológica para modelos de crecimiento y desarrollo de cultivos después que se han reorganizado.

Se recomiendan los modelos de producción de cultivos usados con los datos sintéticos para la evaluación de los beneficios derivados del riego suplementario, de la economía de riego deficitario, las fechas de siembra promedio más deseadas, el efecto probable de cantidades diferentes y la frecuencia de aplicación de nitrógeno, y para usar con coeficientes genéticos de cultivos que sumarizan como una variedad en particular responde a un rango de factores ambientales tales como duración del día, temperaturas máximas y mínimas, agua disponible en el suelo y el nitrógeno asimilado.

Los datos climatológicos requeridos para sintetizar datos diarios para usar con modelos de producción de cultivos se proveen como apéndices presentando datos de Africa, Latinoamérica, y de países seleccionados de Asia.

AGROMETEREOLOGIA Y MANEJO DE AGUA

La colección de datos climatológicos para propósitos agrícolas debe enfatizar confiabilidad, representatividad y debe ser adecuada. Para poder evaluar el significado de la producción de cultivo como resultado de la investigación agrícola uno debe considerar las interacciones de los factores claves: energía, agua, fertilidad, condiciones del suelo y otros factores. El efecto del clima o su

variabilidad se puede determinar con la precipitación y las temperaturas máximas y mínimas.

Los diferentes modelos de producción de cultivos se pueden operar con valores diarios de temperaturas máximas (TMX), temperaturas mínimas (TMI) y precipitación. Las tres medidas son adecuadas para generar la tabla mensual de base de datos requerida por otros modelos para generar otras variables requeridas para los modelos de producción.

El rango o diferencia de temperaturas (TD) o TMX menos TMI es un valor que por lo general no se toma en cuenta, pero es uno de los más significantes e importantes de los valores de los datos climáticos. TD y latitud se pueden usar para estimar con seguridad radiación solar en la superficie (RS), humedad relativa promedio mínima (RH y RHMI) y la evapotranspiración potencial (ETP).

RS se puede calcular de la ecuación siguiente:

$$RS = KT \times RA \times TD^{0.50} \dots \dots \dots (1)$$

De donde KT es un coeficiente calibrado y RA es la radiación extraterrestre en las mismas unidades que RS. Ya RA está dada en las tablas de Doorenbos y Pruitt (1977), y Doorenbos y Kassam (1979) y de programas de computadora simples. Hargreaves, et al. (1985) encontró un valor promedio de KT de 0.16. Samani y Pessarakli (1986) evaluaron KT en 56 lugares de los Estados Unidos y obtuvieron un valor promedio de 0.154. Los coeficientes de determinación (r^2) variaron de 0.88 a 1.00.

La variación del coeficiente KT fue de 12% que probablemente no es más de lo que se le puede atribuir al error de medición del RS.

La humedad relativa (RH) como se toma frecuentemente tiene un valor limitado dado a la falta de estandarización de las horas de las lecturas y los cambios del sol a través del año. Cuando se toman las lecturas en una manera bien estandarizada, RH se correlaciona linealmente con TD.

El déficit de presión de vapor (VPD) influye en la eficiencia del uso de agua, la demanda evaporativa del cultivo, fotosíntesis y crecimiento de la planta. VPD se puede calcular de TMX y TMI. Richardson (1980, 1988) generó regresiones los valores promedios mínimos mensuales de humedad relativa (RHMI) como una función de TD en 500 estaciones de primer orden en los Estados Unidos. La ecuación entonces se puede escribir como:

$$RHMI = 110.3 - 4.68 \times TD \dots \dots \dots (2)$$

Límites de 100 y 5% se requieren para mantener los valores de humedad relativa mínima dentro de los límites. El valor de r^2 era 0.88.

El potencial evapotranspirativo o la evapotranspiración potencial (ETP) es un término que no ha sido bien standarizado. Un término más preciso es evapotranspiración de cultivo de referencia con el cultivo de referencia especificado. ETP como se usa aquí está basado en la evapotranspiración (ET) de pastos de temporada fría tal como Alta fescue, ryegrass perenne y Kentucky bluegrass bajo condiciones bien estandarizadas de disponibilidad de agua y de altura de corte como lo han especificado Doorenbos y Pruitt (1977). Hay varios métodos satisfactorios para calcular ETP y todavía hay mucha discusión de cual es el mejor. Sin embargo, los errores causados por valores climáticos y de cultivos de referencia que no son estandard o representativos, probablemente crean más errores que los creados por malas decisiones en la selección de las ecuaciones.

Una de las ecuaciones más simples y confiables para calcular ETP se puede escribir de la siguiente manera:

$$ETP = 0.0023 \times RA \times (T^{\circ}C + 17.8) \times TD^{0.50} \dots\dots\dots(3)$$

En la cual ETP y RA están en las mismas unidades de equivalente de evapotranspiración de agua (usualmente mm).

Hargreaves (1975) propuso el uso de una ecuación para ETP como una función del producto de la temperatura por RS. Esta ecuación se evaluó usando un lisímetro de evapotranspiración de pastos de temporada fría de varios lugares. Una limitación de esta ecuación es la frecuente falta de datos confiables de RS en muchos de los países del tercer mundo. Sin embargo, con el desarrollo de la fórmula 1 parece lógico sustituir $RA \times TD^{0.50}$ en lugar de RS y cambiar los coeficientes empíricos. Ya que TD se correlaciona bien con humedad relativa y por lo menos compensa parcialmente por energía advectiva, la ecuación 3 se considera superior en precisión a la ecuación anterior. También requiere menos datos y es simple y fácil de usar.

Valores mensuales de ETP de la ecuación 3 se han comparado con los de las tres ecuaciones de la FAO dadas por Doorenbos y Pruitt (1977) para diferentes lugares en California y con los valores dados por Snyder, et. al (1987) de cuatro lisímetros en diferentes lugares en California. Estas comparaciones llevaron a la conclusión que la ecuación 3 es superior que otros métodos para uso en cualquier lugar del mundo en diseño, programación y manejo de riegos. Los datos del lisímetro de una mezcla de pastos de Damien, Haiti se usaron juntos con datos más o menos completos de clima para comparar la ecuación 3 con las tres

ecuaciones dadas por Doorenbos y Pruitt (1977), con la ecuación de temperatura y radiación de Hargreaves (1975) y con la ecuación Blancy-Criddle del Servicio de Conservación de Suelos. La proporción promedio de los valores ET medidos del lisímetro de la ecuación 3 fue de 0.95. La proporción promedio de las medidas de las tres ecuaciones de la FAO fue de 0.94. La ecuación 3 produjo la desviación standard más baja de las proporciones de todas las ecuaciones evaluadas indicando un índice superior del potencial evaporativo.

Las condiciones del lugar deben ser reportadas para el uso de los datos climatológicos para calcular ETP. La temperatura media medida en un lugar árido durante los meses cálidos secos puede variar de 4 a 5°C sobre la medida hecha en un área bajo riego. El uso de datos de temperatura del área de tierra árida puede resultar en valores de ETP, para esos meses cálidos secos de más o menos 12% sobre esos resultando de medidas de temperatura en una área bajo riego más o menos grande.

Para la agricultura de secano (sin riego) el potencial para la producción de cultivos de un año al próximo y de lugar a lugar depende principalmente de la cantidad, intensidad y variabilidad de la precipitación. Variaciones en temperatura y radiación solar en un lugar dado no son por lo general lo suficientemente grandes para tener mucha influencia en la producción potencial de cultivos. Para condiciones dadas de demanda evaporativa y fertilidad, el crecimiento y desarrollo de cultivos depende principalmente de la disponibilidad de agua y aireación del suelo. Lluvias de alta intensidad pueden causar escorrentías excesivas o falta de aireación en los suelos.

El manejo de agua para la agricultura requiere buenos cálculos de los requisitos de agua del cultivo, un conocimiento de las condiciones del suelo e información de las cantidades e intensidades de precipitación. En los países del tercer mundo, la profundidad-duración o los extremos de intensidad de la precipitación raramente se miden por períodos de menos de un día. Sin embargo, como lo indico Bell (1969) y Hargreaves (1988) parece que las proporciones de profundidad-duración son uniformes a través del mundo. Los valores diarios de precipitación se pueden utilizar para conseguir la cantidad probable de profundidad-duración diaria para cualquier periodo o frecuencia de ocurrencia y ser convertida en cantidades para otros periodos. Las cantidades de precipitación de un día se pueden convertir en promedios probables de profundidades de precipitación para varios periodos (t) en horas para valores de t desde 0.5 hasta el equivalente de varios días. La profundidad probable de precipitación (D) estimada de una precipitación probable diaria (PDD) está dada por la ecuación:

$$D = t^{1/4} \times PDD/2 \dots \dots \dots (4)$$

En muchos países del tercer mundo es difícil obtener records de precipitación diaria o de cantidades de precipitación extrema diaria. Cuando los valores diarios no son disponibles, estos pueden generarse de tablas de datos mensuales y el PDD se puede determinar de un periodo dado en años (T) para T en el rango de 0.5 a 200 años. Dentro de este rango y para t en el rango de 0.5 horas al equivalente de varios días, y probablemente hasta una semana, el valor de una hora (PDD/2) se puede convertir a otras duraciones y periodos de retorno usando esta ecuación:

$$D1/D2 = [(t1 \times T1)/(t2 \times T2)]^{0.25} \dots\dots\dots(5)$$

En la que D1 y D2 son cantidades de precipitación correspondientes a duraciones de t1 a t2 y períodos de retorno T1 y T2 respectivamente.

Comparaciones lugares de precipitación con datos sintéticos y con valores actuales en diferentes lugares han indicado relativamente pequeñas diferencias en porcentaje. En un campo de tanta inseguridad los resultados obtenidos de valores sintéticos usando las ecuaciones 4 y 5 pueden ser tan buenos como los obtenidos por cualquier otro procedimiento.

La influencia del clima en la producción de cultivos es un tanto compleja. El agrometeorólogo debe tener algún conocimiento de los rangos de TD o de RH que influyen en la esterilidad del arroz y aquellos que resultan en la baja producción de soya. El rompimiento de vainas y pérdida subsecuente de semillas es una función de TD. Valores bajos de TD son requeridos para la producción de flores en algunas plantas y para otras un TD bajo indica un aumento de problemas con respecto a hongos.

Los datos requeridos para un buen programa agrometeorológico son simples y requieren de valores diarios confiables de temperatura máxima y mínima y de precipitación. Los usos potenciales de estos datos son muchos y requieren un conocimiento de las condiciones óptimas para la producción de diferentes cultivos y variedades también como las innumerables interacciones entre los varios valores climáticos y entre el clima y los otros factores que influyen el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Es esencial que el agrometeorólogo tenga disponibles los valores de radiación extraterrestre (RA). Tablas de RA en mm equivalente de evaporación de agua son dados por Doorenbos y Pruitt (FAO 24, 1977) y Doorenbos y Kassam (FAO 33, 1979). Samani y Pessarakli (1986) simplificaron la ecuación para calcular RA. Su ecuación está dada más abajo.

El valor promedio de radiación extraterrestre (RA) para un mes dado se puede determinar de la siguiente manera:

$$RA = 916.732 \times (OM \times \sin(LAT) \times \sin(DEC) + \cos(LAT) \times \cos(DEC) \times \sin(OM)) / (ES \times 10) / (596 - 0.55TC) \dots \dots \dots (6)$$

En la cual,

RA = Radiación extraterrestre en mm/día

TC = Temperatura promedio en grados Centígrados

LAT¹ = Latitud de la estación en radianes

$$DEC = - 0.00117 - 0.040117 \times \cos(\pi \times J/6) - 0.042185 \times \sin(\pi \times J/6) + 0.00163 \times \cos(\pi \times J/3) + 0.00208 \times \sin(\pi \times J/3) \dots \dots \dots (7)$$

J = Número del mes, Enero = 1

$$ES = 1.00016 - 0.032126 \times \cos(\pi \times J/6) - 0.003354 \times \sin(\pi \times J/6) \dots \dots \dots (8)$$

$$OM = \text{Arc. COS}\{-\text{TAN}(LAT) \times \text{TAN}(DEC)\} \dots \dots \dots (9)$$

$\pi = 3.14$

1 La latitud debe ser positiva para el Hemisferio Norte y negativa para el Hemisferio Sur. Un radian = 57.3 grados.

Se le debe dar un énfasis especial a la importancia de tener disponibles valores confiables de TD. Evaluaciones mensuales de ETP calculados con la Ec. 3, por lo general son más confiables que los calculados usando la ecuación Penman. A causa de la necesidad de la calibración local de la función del viento de Penman y la falta de datos uniformes y confiables para determinar el deficit de presión de vapor.

El resultado de las comparaciones del RS medido (RSM) con RS calculado de la Ec. 1 con un valor de KT de 0.16 (RSC) son dados como proporciones de RSM/RSC por cada mes de la forma siguiente:

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Fresno	0.79	0.90	1.00	1.04	1.06	1.08	1.06	1.03	1.01	0.95	0.87	0.88
Ely	0.89	0.96	1.01	0.98	0.95	0.94	0.92	0.93	0.96	0.94	0.91	0.89
Damien	1.04	1.04	1.06	1.05	1.01	1.05	1.02	1.08	1.06	0.99	1.02	1.01

Fresno y Ely son estaciones solmet de las que los datos se consideran confiables y se han revisado y arreglado donde ha sido necesario. Los datos de Damien, Haiti fueron recolectados por FAO y se consideran confiables. El coeficiente de $KT = 0.16$ es un promedio razonable para la mayoría de los lugares. Un valor un poco más alto se indica para áreas enfriadas por vientos provenientes del océano. Sin embargo, después de la calibración local parece posible que el uso de la Ec. 1 va a dar resultados de RS de aproximadamente la misma precisión que la de los datos medidos, especialmente la de los meses no fríos cuando se requieren datos para el planeamiento y desarrollo agrícola.

TRANSFERENCIA AGROTECNOLOGICA VARIETAL

Los modelos de producción de cultivos y los coeficientes genéticos del cultivo se pueden usar para reemplazar ampliamente las pruebas de tanteo en muchos lugares y años con pruebas varietales, mediante simulación de funcionamiento de cultivos de funcionamiento de años múltiples. Este método va a reducir ampliamente los requisitos de datos climáticos, reducir costos y acelerar el proceso de prueba varietal. Los usuarios potenciales podrían evaluar la adaptabilidad de cada uno de los cultivares (variedad particular de cultivo) en cualquier lugar por cualquier período, rápido y barato.

Se ha propuesto que se usen datos climáticos simulados con los coeficientes genéticos del cultivo que sumarizan como un cultivar (variedad particular de cultivo) en particular responde a un rango de factores ambientales tal como duración del día, temperaturas máximas y mínimas, agua disponible en el suelo y nitrógeno asimilado. Los modelos aquí descritos y los coeficientes genéticos hacen posibles las predicciones de funcionamiento potencial de diferentes cultivares (variedades particulares de cultivos) en una escala global, independientemente del lugar y del manejo.

Keller (1982, 1987), Richardson y Wright (1984) y Richardson (1985) propusieron el uso de modelos para generar variables climáticas diarias. El modelo de Keller, el modelo WMAKER requiere promedios mensuales de ETP, temperatura, número de días de lluvia, cantidad de precipitación y la desviación estandard de estos valores. Las tablas de Apéndices I, II y III de este manual proveen lo necesario para obtener estos valores. Además estas tablas proveen la

función gamma que define la forma de la distribución probable de cantidades de precipitación.

ETP y la temperatura son más bajos durante días lluviosos. Samani y Hargreaves (1986) demostraron que se puede determinar el rango completo de probabilidades de precipitación segura del promedio de lluvia y la función gamma. Los promedios y las desviaciones estándar también definen la forma de la distribución probable. Tres puntos en la curva de distribución probable aproximadamente definen la distribución. Los promedios más o menos una desviación estándar se pueden usar para generar tres años de variables climáticas diarias para usar con modelos de producción de cultivos que contienen coeficientes genéticos de cultivos para estimar el potencial productivo de diversos cultivares (variedades particulares de cultivos) en una escala global.

APLICACIONES DE DATOS CLIMATICOS PARA LA PLANIFICACION AGRICOLA

Los datos climáticos tienen muchos usos relativos a la agricultura, ingeniería, industria, desarrollo urbano y otros. Para la mayoría de los casos la necesidad de datos se logra en gran parte a la información relativa de temperaturas máximas y mínimas diarias, latitud y precipitación. En esta sección el énfasis es en el uso de datos climáticos para mejorar la producción agrícola bajo riego y en SECANO.

La planificación de desarrollo agrícola debe tomar en cuenta varios objetivos, entre ellos:

- proveer para la conservación de suelos y agua;
- reducir el riesgo de eventos no usuales o extremos;
- asegurar una aireación adecuada a través de un drenaje adecuado;
- seleccionar los cultivos apropiados para el clima;
- asegurar la disponibilidad adecuada de agua para una producción económica de cultivos; y
- optimizar las interacciones de clima-fertilidad en la producción.

Selección de cultivos

En los países del tercer mundo se producen cultivos para satisfacer las necesidades alimenticias y de fibra locales y/o demandas del mercado externo. Para la selección del cultivo que se va a sembrar, se debe tomar en cuenta el más apropiado para los suelos y el clima. FAO (1978) dividió los cultivos agrícolas en 5 grupos con respecto a sus temperaturas óptimas y de operación. Hargreaves y Samani (1987) agregaron más grupos a la lista de la FAO. Los grupos de cultivo son los siguientes:

- Grupo 1 - temperatura óptima: 15 - 20°C; rango operativo: 5 - 30°C - café Arábica, alcachofas, espárragos, claveles, zanahorias, apio (celery), crisantemos, crucíferas, gladiolos, uvas, cebollinas, lentejas, lechuga, papas y tomates.
- Grupo 2 - temperatura óptima: 20 - 30°C; rango operativo: 10 - 35°C - aguacates, cítricos, algodón, uvas, cacahuete o maní, mangos, arroz, café , soya, camote o boniatos, tomates.
- Grupo 3 - temperatura óptima: 30-35°C; rango operativo: 15-45°C - maíz, millo, sorgo, caña de azúcar.
- Grupo 4 - temperatura óptima: 20-30°C; rango operativo: 10-35°C - maíz, millo, sorgo.
- Grupo 5 - temperatura óptima: 25-35°C; rango operativo: 10-45°C - sisal (henequén), piñas.

No se debe asumir, Sin embargo, que los climas son similares si el promedio de temperaturas es similar. El rango de temperatura (TD) también es muy importante de considerar.

Por lo general no es económico producir cuando el agua disponible para los cultivos para un mes o más es menos de un tercio de la cantidad completa del agua adecuada y preferiblemente no menos del 45%. Sin embargo, los cultivos varían mucho en su tolerancia a sequía. La cantidad completamente adecuada del agua (ETM) para la mayoría de los cultivos se puede calcular de la siguiente ecuación:

$$ETM = ETP \times KC \dots\dots\dots(10)$$

donde KC es un coeficiente del cultivo.

Los coeficientes del cultivo están dados por Doorenbos y Pruitt (1977) y por Doorenbos y Kassam (1978). Para estos valores, Hargreaves y Samani (1987) prepararon el siguiente resumen para la mayoría de los cultivos anuales.

<u>Etapas de crecimiento del cultivo</u>	<u>KC</u>
Inicial (de la siembra al brote)	0.3-0.4
Desarrollo (vegetativo)	0.7
Mediados de temporada	1.10
A fines de temporada	0.90
En la cosecha	0.6-0.9

La selección de cultivos y la transferencia agrotecnológica deben asignar alta prioridad a la evaluación del agua adecuada para la producción del cultivo. Otras consideraciones climáticas pueden ser ampliamente definidas dadas las temperaturas máximas y mínimas (TMX y TMI). La temperatura media, la diferencia entre TMX y TMI (TD), duración del día y la disponibilidad del agua determinan el clima apropiado para la producción del cultivo en la mayoría de los casos. Muchos cultivos requieren climas secos y cálidos cuando maduran y para la cosecha. La duración y la suficiencia de la temporada de lluvia limita la selección de cultivos de secano. Otras consideraciones incluyen intensidades extremas de precipitación, daños por granizadas, velocidades destructivas del viento y otras. Sin embargo, en la mayoría de los casos información en cuanto a la temperatura media, TD, y de la disponibilidad de agua en áreas donde la producción es alta para un cultivo determinado, va a ser adecuado para permitir la selección de otras áreas de clima similar donde sea posible la misma producción.

Se debe notar que diferentes variedades del mismo cultivo se pueden clasificar en grupos diferentes. La selección de cultivos no debe considerar solo el cultivo sino también la variedad apropiada.

La selección de la mezcla de cultivo o cultivos que se van a plantar debe considerar cuidadosamente los suelos y el clima. En muchos países las áreas de suelos adecuados para agricultura bajo riego exceden aquellas a las que se les puede suplir sistemas de riego. Parecería lógico adoptar una política de deficiencia de riego y de aumentar el uso de riegos suplementarios a la lluvia para beneficiar el máximo número de familias rurales.

Esta estrategia puede ser válida para granos, incluyendo frijoles y lentejas. Sin embargo, la producción de granos es más o menos adecuada en el mundo entero, pero la disponibilidad en todas las áreas y los medios para comprar alimentos necesitan mejorar en muchos de los países del tercer mundo. Actualmente parece haber una necesidad urgente de aumentar los ingresos de los productores y las oportunidades de empleo.

Para poder evaluar aproximadamente beneficios comparativos para diferentes tipos de cultivos se ha hecho un resumen de la información de Adams (1953). Promedio por hectárea de las horas de trabajo de un hombre, valor bruto del cultivo, e ingresos netos se resumieron para 15 cultivos de vegetales, 16 frutas, 9 granos, y 4 cultivos agro industriales. Los granos incluyen los granos principales para la alimentación y diferentes variedades de frijoles de campo. Los cultivos agro industriales son: alfalfa, algodón, papas y remolacha azucarera. Los resultados son los siguientes:

Tipo de cultivo	Hrs/Ha	Valor Bruto \$/Ha	Ganancias Netas \$/Ha
Vegetales	524	1.669	435
Frutas	424	1.556	678
Granos	45	321	109
Cultivos agro-industriales	132	1.056	581

La tabulación está basada en los precios y rendimientos de 1951 que se consideraron ser buenos. Aunque los precios y tecnologías pueden variar significativamente en los países del tercer mundo, es obvio que la producción de frutas y vegetales requerirá más o menos 10 veces más trabajo por la misma área como aquella requerida en la producción de granos. Las ganancias netas de los agricultores indican ser 5 veces más para las frutas y vegetales que para los granos. Los beneficios secundarios de procesamiento, envasado, mercadeo, etc. para frutas y vegetales se estima ser suficiente para aumentar los beneficios de la economía en general 10 veces más que la de los granos.

Los beneficios que se derivan de la producción de cultivos de alto valor y del riego suplementario o de las varias mezclas de cultivo se pueden simular en las computadoras como una ayuda en las decisiones relativas a la selección de cultivos y para las prioridades que se van a asignar por las decisiones de las políticas nacionales.

Evaluando la precipitación adecuada

La precipitación es cíclica. Períodos que están por encima o por debajo de la precipitación normal han durado una década o más. Por lo tanto, el uso de registros a corto plazo para determinar la suficiencia probable de humedad pueden ser muy engañosos. Cantidades adecuadas de precipitación mensuales no siempre aseguran agua suficiente para una buena producción de cultivos, ya que una mala distribución puede resultar si hay excesiva precipitación en un corto período y si durante períodos sin lluvia los requisitos de agua del cultivo exceden la capacidad del suelo para almacenar el agua disponible.

Hargreaves y Samani (1986) prepararon tablas climáticas mensuales para el mundo entero presentando las probabilidades del 95, 75, 50 y 5 por ciento de precipitación segura, precipitación media, temperatura media, ETP, y MAI (el 75% de probabilidad dividido por el ETP). El MAI es un índice útil del agua adecuada y se ha usado en varios estudios de zonas climáticas. Un índice de 10 días podría, sin embargo, ser significativamente superior.

La suficiencia de agua también es influenciada por escorrentías de tormentas. Comparaciones de cantidades de profundidad-duración de precipitación para varios períodos de tiempo con tasas de infiltración usuales del suelo proveen información acerca de la necesidad de prácticas de manejo que influyen en el tiempo para que el agua entre y se almacene en el suelo.

Una cantidad considerable de información indica que la probabilidad de precipitación y distribución de cantidades de profundidad-duración son muy similares en el mundo entero. Los promedios mensuales de días de lluvia, cantidades de precipitación y su desviación standard se pueden utilizar para generar cantidades sintéticas de precipitación diaria que a la vez proveen los medios para calcular intensidades de corta duración. Sin embargo, la confiabilidad de estos cálculos debe ser verificada mediante pruebas y evaluaciones subsiguientes. Donde este procedimiento ha sido evaluado, ha producido estimados muy satisfactorios.

La precipitación es muy variable en muchos lugares. La desviación standard puede exceder el promedio para muchos de los records mensuales. Los eventos de precipitación pueden ser localizados o pueden resultar de un amplio sistema de frentes sobre grandes áreas. En algunas regiones la fecha de inicio de la época de lluvia y la cantidad de precipitación en el primer mes proveen una indicación de la suficiencia de lluvia para la temporada. Una predicción de la cantidad adecuada se puede entonces utilizar como una guía para la aplicación de fertilizantes y otras prácticas administrativas.

OTROS DATOS Y SISTEMAS DE APOYO DE DECISIONES

Jones (1984) describió los requisitos mínimos para los datos relativos al clima, suelos, etapas de crecimiento del cultivo, prácticas de manejo, etc. Procedimientos uniformes y reportes de una red de investigaciones del mundo entero pueden proveer información muy útil para el uso en sistemas de información geográficos (GIS) y en sistemas de apoyo de decisiones para transferencia agrotecnológica (DSSAT). Un GIS es un medio de almacenar, analizar y usar datos espaciales por medio de programas de computadoras.

El desarrollo y validación de modelos de crecimiento y desarrollo de cultivos requieren un mínimo de datos de suelos, clima, cultivo y manejo o un mínimo de datos específicos de cultivos (MDS). Los modelos de cultivo se pueden aplicar universalmente solamente si hay un sistema uniforme en la colección de MDS y que los modelos incluyan coeficientes genéticos específicos de cada cultivar (variedad particular de cultivo) e incluyan coeficientes o factores para considerar la fertilidad del suelo y la asimilación del nitrógeno.

Sin embargo, donde no hay datos completos los modelos se pueden utilizar para evaluar la influencia de un factor (tal como la disponibilidad del agua en el suelo y su absorción) en la producción de cultivos.

La simulación de clima y los modelos de cultivo son herramientas poderosas para mejorar el manejo y planeación agrícola. Las tablas de datos climáticos presentadas como apéndices I, II y III son también herramientas poderosas cuando se usan sin los modelos para la evaluación de selección de cultivos y producciones potenciales, tasas de aplicación de fertilizantes, evaluación de la precipitación adecuada y para comparar un clima con otro.

Se hizo una comparación de precipitación media (PM) durante el primer mes de la época de lluvia en el Sahel de Africa con el 50% de probabilidad de lluvia segura (P50). El promedio PM $0.23 \times$ una desviación standard (SD) mas que P50 con un rango de valores usuales de 0.14 SD a 0.31 SD mas que P50.

Stewart (1988) describió un sistema de predicción de lluvias como una guía para decisiones agrícolas. La cantidad de lluvia en la estación venidera así como su duración e intensidad están todas correlacionadas con la fecha en que comienzan las lluvias. La fecha de comienzo se define como la fecha cuando una cantidad predeterminada (digamos 30 mm) de humedad es almacenada en el suelo. La preparación de la tierra, la tasa de aplicación de fertilizantes, área plantada, y las decisiones relacionadas pueden ser influenciadas por la fecha de comienzos de lluvia y por la cantidad de precipitación durante las primeras semanas o los primeros 30 días de la época de lluvias.

Comparadas con los registros, la temporadas que empiezan a una fecha mas adelantada usualmente son de más duración y producen cantidades de lluvia en el rango superior de los registros históricos. Para un lugar dado los records históricos se pueden usar para mostrar geográficamente las interacciones de las fechas de comienzo de lluvias, duración de la época de lluvias y las cantidades de lluvia durante la estación. Estas representaciones gráficas proveen una guía muy útil en relación a las decisiones agrícolas.

Las tablas de datos climáticos mensuales, apéndices I, II y III, proveen valores de PM. Si las lluvias comienzan antes de lo usual y si el primer mes de lluvia excede el valor de PM en la tabla entonces va a haber una gran probabilidad de un mejor promedio de lluvias para el año.

Decisiones agrícolas y administrativas se pueden tomar como resultado de la predicción de lluvia favorable. Este procedimiento es útil en muchos lugares pero en algunos climas las cantidades de precipitación no se correlacionan bien con la fecha de comienzo y con las cantidades a principio de estación.

FUNCIONES DE PRODUCCION DE CULTIVOS

Los diferentes factores de la producción de cultivos son muy interactivos. En la mayor parte de las investigaciones experimentales se tratará de variar uno o dos factores mientras se mantienen los otros tan constantes o uniformes como sea posible. Algunos de los efectos de cambios de uno de los factores serán descritos y se tratará de indicar como algunos de los factores más importantes interactúan.

El Agua y la Producción de Cultivos

El agua es esencial para el crecimiento de cultivos. La producción se muestra frecuentemente como una función lineal de la transpiración del cultivo o de evapotranspiración (ET). El uso efectivo del agua por lo general baja a medida que se acerca la producción máxima. Por lo tanto la producción varía exponencialmente con la cantidad de agua aplicada o disponible.

Hargreaves (1975) obtuvo datos de producción de varios experimentos de cultivos con diferentes cantidades de aplicación de riego. La Y se usó para expresar la proporción de producción a la producción máxima y X la proporción del agua total disponible a la requerida para la producción máxima. La precipitación y riegos se midieron y se evaluó la humedad inicial almacenada en el suelo. La mayoría de los datos analizados estaban aproximados a la línea dada por la ecuación siguiente:

$$Y = 0.8X + 1.3X^2 - 1.1X^3 \dots\dots\dots(11)$$

La ecuación no es válida más allá de los límites de los datos usados. Hargreaves y Samani (1984) usaron la Ec. 11 en un modelo económico para evaluar la influencia sobre las ganancias de varios niveles de riegos deficientes.

Doorenbos y Kassam (1979) usaron una versión de la ecuación de Stewart para calcular la producción en relación al agua para un gran número de cultivos. La ecuación es:

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = KY \left[1 - \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right) \right]$$

o $1 - Y_a/Y_m = KY [1 - (E_{Ta}/E_{Tm})]$ (12)

En la cual Y_a = producción de cosecha actual
 Y_m = producción máxima de cosecha
 KY = un factor de respuesta de producción
 E_{Ta} = evapotranspiración actual del cultivo
 E_{Tm} = evapotranspiración potencial máxima

Valores diferentes de KY son dados para cada cultivo y para cada periodo vegetativo. Valores de KY del período total de crecimiento varían de 0.7 a 1.25 con un promedio general de más o menos 1.00.

Las ecuaciones 11 y 12 no compensan lo suficiente para las interacciones que resultan de la tensión por la falta de agua durante una etapa en particular del crecimiento. La tensión del agua durante la etapa vegetativa o inicial puede hacer la planta más resistente a la sequía en las etapas de crecimiento subsiguientes.

Energía y Crecimiento del Cultivo

La FAO (1978) divide los cultivos en 5 grupos con respecto a la relación de la temperatura con la proporción de la fotosíntesis. Para cada grupo hay límites altos y bajos de temperatura para la fotosíntesis. La fotosíntesis toma lugar en las hojas de la planta durante el día. Los productos de la fotosíntesis se convierten en los componentes estructurales o de producción. La energía para la conversión se deriva de la respiración que toma lugar en toda la planta durante el día y la noche. La proporción de respiración es exponencial con la temperatura. El crecimiento de la planta depende de la diferencia entre la fotosíntesis y la respiración que a la vez depende de la temperatura, radiación, características de la planta y la proporción de la hojas con respecto al resto de la planta. La ilustración 1 muestra relaciones típicas entre la temperatura media del aire y crecimiento de la planta para cuatro cultivos diferentes. La influencia de un mal drenaje sobre la producción del maíz también se ilustra.

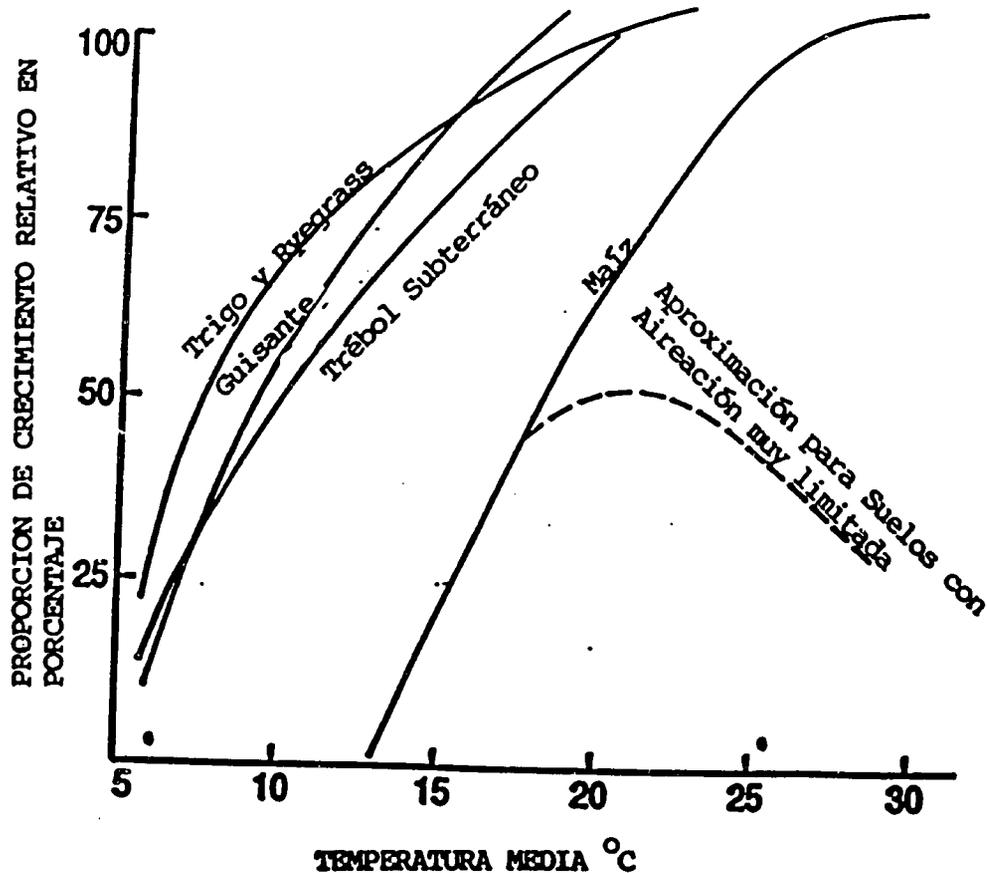


Figura 1.- El Efecto de la Temperatura en el Crecimiento de las Plantas

El rango de temperatura (TD) provee un criterio valioso para los modelos de crecimiento y desarrollo de plantas. TMX y TMI definen la temperatura media e indican la temperatura aproximada del día y la noche. TD también indica la cantidad de radiación disponible y el uso potencial de agua de las plantas.

La densidad de siembra óptima o el índice de área de las hojas (LAI) es una función de radiación y temperatura también como del cultivo y de la variedad, agua y fertilidad. La producción de muchos cultivos está fuertemente influenciada por las interacciones de LAI y de radiación solar en Langley por día (RS) o Cal/cm²/día. Para un pasto donde la producción de materia seca se graficó como isocuantas con respecto a LAI y RS la producción óptima se indicó que estaba determinada por la ecuación:

$$LAI = 2.6 + 0.0007RS \dots \dots \dots (13)$$

Fertilidad y Producción de Cultivos

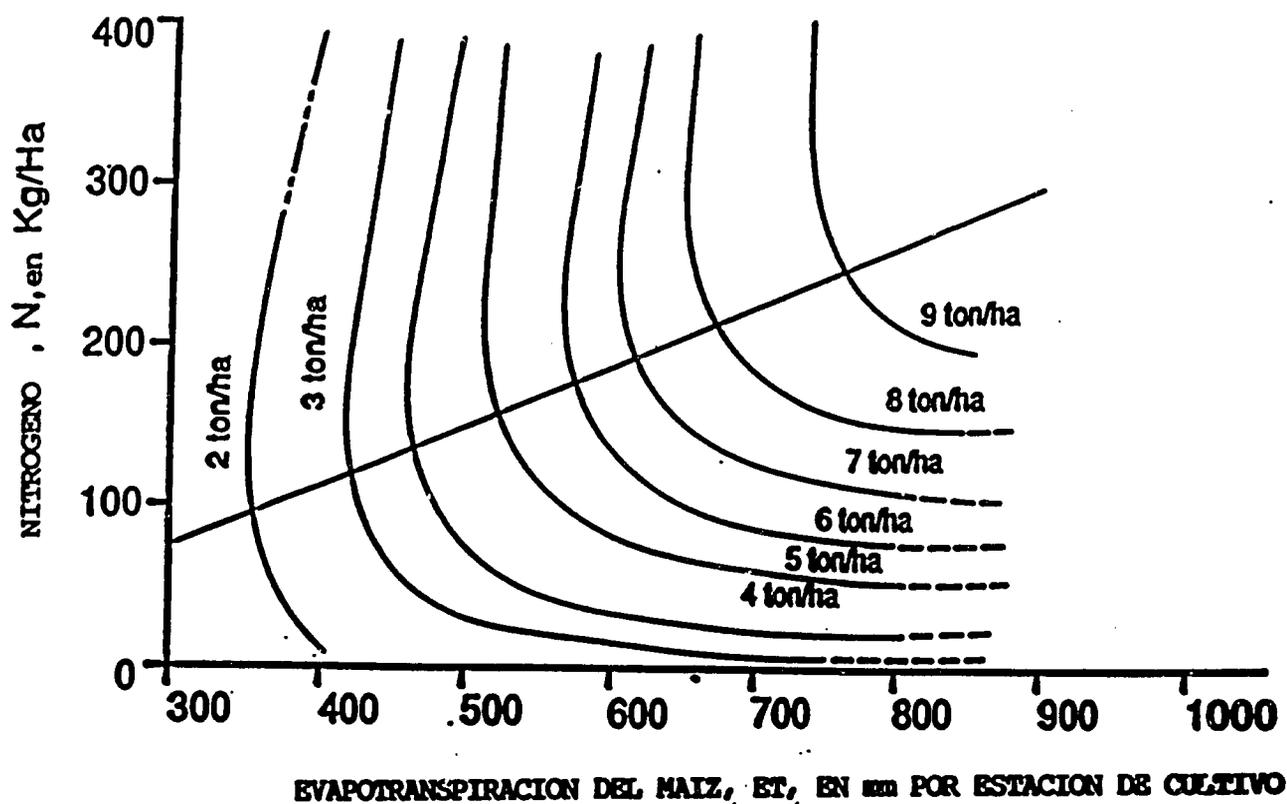
Más o menos 11 elementos importantes y varios elementos menores se requieren para el crecimiento y desarrollo de la planta. El elemento más importante que generalmente es deficiente es el nitrógeno (N). Cuando el agua es más o menos adecuada, esencialmente todos los cultivos deben recibir una aplicación de nitrógeno. Las plantas leguminosas requieren mucho menos aplicación dado a su habilidad de fijar el N. Sin embargo, algo de fertilización con nitrógeno se requiere para desarrollar un crecimiento inicial vigoroso. Doorenbos y Kassam (1979) recomiendan 20 - 40 Kg/Ha de nitrógeno por temporada para la mayoría de las plantas leguminosas. Para la mayoría de los otros cultivos 100 o más Kg/Ha de nitrógeno se recomiendan.

La producción Y al N aplicado en Kg/Ha se puede expresar frecuentemente por la ecuación:

$$Y = a + bN - cN^2 \dots \dots \dots (14)$$

En la que a, b, y c son coeficientes que se derivan de los datos de producción. La respuesta al agua se puede expresar por una ecuación similar y las dos ecuaciones combinadas. Hargreaves y Samani (1988) propusieron un método más simple. Las isocuantas de producción se pueden graficar como funciones de cantidades variables de la ET de temporada de crecimiento de cultivo en mm y el N aplicado en Kg/Ha. La cantidad óptima de N para una ET estacional dada se puede leer de la gráfica. Las cantidades óptimas de N son aproximadamente lineales para un número considerable de cultivos. Los datos producidos de varias investigaciones para el maíz, algodón y remolachas se evaluaron. La cantidad óptima de N para estos cultivos fue 0.32, 0.12, 0.10 y 0.15 por ET respectivamente. Dado que las funciones producidas de la forma del agua-nitrógeno son similares para varios cultivos y probablemente para la mayoría de los cultivos, debe ser posible desarrollar una función de forma general que se pueda calibrar para diferentes cultivos y variedades.

La ilustración 2 da la forma y magnitud de la función producida del agua-nitrógeno basada en los datos de diferentes lugares.



**Figura 2.- Isocuantas de Producción de Maiz.
Hargreaves (1983)**

Aireación o Drenaje

La temperatura óptima para el crecimiento del cultivo es significativamente más alta cuando el suelo está bien aireado que cuando la disponibilidad de oxígeno en la zona radicular se reduce. La tasa de crecimiento máximo para una planta en un suelo mal aireado puede ser solo la mitad de la tasa potencial de crecimiento. La respiración es esencial para el crecimiento de la planta. La tasa es exponencial con la temperatura pero cuando hay poco oxígeno disponible las altas temperaturas llegan a causar bastante daño a la planta. Durante climas fríos las plantas son más tolerantes a un mal drenaje.

Otras Consideraciones

La variedad de un cultivo dado puede tener mucha influencia en el efecto de los factores de producción. Una variedad de granos puede tener el doble de reacción a un fertilizante dado que otra variedad. Alfalfas tolerantes a bajas temperaturas tienen requisitos diferentes de agua que las tolerantes a las temperaturas altas.

Todos los factores que influyen en el crecimiento y producción incluyendo: agua, energía, fertilidad, aireación, la densidad de siembra o LAI de la planta, variedad, manejo, ect. son interactivos. Si un factor está seriamente limitado, esa limitación puede determinar la producción máxima posible. Un error común en los proyectos de desarrollo agrícola, incluyendo los proyectos de riego, es el de concentrarse en un factor, frecuentemente agua, y no prestar suficiente atención a los otros factores de producción.

SUELOS

Las tablas de datos mensuales proveen un aporte esencial para modelar el manejo de aguas de los canales principales y laterales de los sistemas de riego. Los modelos de manejo de agua y del crecimiento y desarrollo de la planta requieren el conocimiento de las condiciones del suelo. El uso óptimo del modelo requiere el conocimiento del almacenamiento del agua en el suelo y el movimiento en el suelo así como también la profundidad de la raíz del cultivo y la disponibilidad de agua para la planta. Cuando los datos de campo no están disponibles, es necesario por lo general hacer aproximaciones lógicas relativo a la profundidad, textura y permeabilidad. Algunas generalizaciones están presentadas para facilitar el uso de los modelos.

La capacidad de campo (FC) es la cantidad de agua que el suelo puede retener contra el drenaje por gravedad. Si un suelo saturado se cubre para prevenir evaporación drenará al FC. El tiempo requerido será de más o menos un día para suelos de textura gruesa, dos días para suelos de textura media y de tres a cuatro días para suelos de textura fina. Las capacidades de almacenamiento de agua disponible (AW o FC menos el porcentaje de marchitamiento permanente, PWP) hacen un promedio de más o menos la mitad de la FC para suelos de textura gruesa y media, 45% de la FC para suelos francos y 40% de la FC para arcillas.

La disponibilidad de agua para el cultivo se determina por agua disponible (AW) en el suelo, la evapotranspiración del cultivo y la profundidad de la raíz. La profundidad de la raíz para un cultivo determinado, puede variar significativamente dependiendo de la variedad, condiciones del suelo, profundidad del agua subterránea y etapa de crecimiento. Para cultivos

maduros, la profundidad de raíz promedio de los cultivos agrícolas principales son aproximadamente de la siguiente manera:

PROFUNDIDAD DE RAIZ DE VARIOS CULTIVOS

Profundidad de raíz (m)

0.3 - 0.5	Repollo, apio, lechuga, cebolla, piña, papas, sisal, espinaca, vegetales.
0.5 - 1.0	Bananas, frijoles, remolachas, zanahorias, trébol, nueces, guisantes, pimentones, soya, remolachas azucareras.
1.0 - 1.5	Cebada, citricos, pepinos, lino, granos pequeños, maiz, melones, girasoles, batata, trigo.
1.5 - 2.0	Alfalfa, algodón, huertos efímeros, uvas, girasoles, sorgo, caña de azúcar.

El promedio de los valores de la fracción de agotamiento de agua recomendado (P) o la fracción de AW que el cultivo puede usar antes de que el crecimiento disminuya significativamente son de 0.30 para cultivos de raíz no profunda y de 0.60 para aquellos de raíz más profunda. La profundidad efectiva de la raíz aumenta a medida que la planta crece. En general la zona efectiva de extracción de humedad frecuentemente excede el tamaño de la planta.

Algunas características promedio de los suelos se presentan de la siguiente manera:

<u>Textura del suelo</u>	<u>Infiltración mm/hr.</u>	<u>Agua disponible (AW)mm/m</u>
Arenas	25 a 250	40 a 70
Arenas francas	20 a 150	70 a 100
Franco arenoso	15 a 75	120 a 160
Franco	8 a 20	180 a 220
Franco limoso	5 a 10	230 a 270
Franco arcilloso	2.5 a 15	160 a 200
Arcillas	1 a 15	160 a 200

En algunos lugares la cantidad de precipitación es extremadamente variable. Para los meses de precipitación baja la desviación standard puede exceder el promedio. En muchos climas tropicales la precipitación por hora puede exceder 100 mm. Los datos de campo relativos a la tasa de absorción, capacidad de

almacenamiento de humedad del suelo, profundidad del suelo y las intensidades de precipitación son más útiles cuando se modela la producción de cultivos y el manejo de aguas. Cuando los datos relacionados con la condición del suelo no están disponibles puede ser necesario asumir un promedio de valores para entrar en el proceso de modelaje.

También es necesario tomar en cuenta las prácticas de manejo actuales o potenciales. El uso de bancos anchos y surcos con pendientes prácticamente planas ha demostrado incrementar la producción de cultivos sustancialmente para la agricultura de secano. Los bancos proveen una superficie de drenaje mejorada y mejor aireación. Los surcos proveen drenaje pero la pendiente plana le da al agua más oportunidad para penetrar el perfil del suelo.

Los modelos de producción de cultivo y de manejo de agua se deben calibrar localmente para las interacciones del suelo, clima, cultivo y variedad y las prácticas de manejo en uso o lo recomendado por las investigaciones de campo.

EL MODELO DE SIMULACION DE CLIMA, WMAKER

El modelo WMAKER fue desarrollado por Keller (1982, 1987) con el propósito de generar valores climáticos diarios de tablas mensuales de base de datos. Las tablas mensuales consisten de valores promedios de ETP, temperatura, número de días lluviosos y la desviación standard de estos valores. El promedio y la desviación standard deben ser de registros largos.

Las tablas de datos mensuales usadas en este estudio no proveen la desviación standard (SD) del ETP. Los records de TMX y TMI se obtuvieron de varios lugares para poder usar la Ec. 3 para calcular la desviación standard del ETP (SDETP). Para latitudes de 10°N a 10°S, valores promedio de SDETP fueron de 4.7% de ETP para el mes (0.047 x ETP). Para otras latitudes la ecuación siguiente es recomendada:

$$SDETP = ETP \times (0.047 + 0.0012 \times LD) \dots \dots \dots (15)$$

De donde LD = latitud a partir de 10°N o 10°S.

Una descripción detallada del modelo WMAKER es dada por Samani, et al. (1987).

El modelo WMAKER comienza generando el promedio de ETP para cada día del año. Luego los valores de ETP se organizan aleatoriamente para simular la variación indicada arriba. Las temperaturas diarias y RS se calculan con el ETP.

Luego se generan eventos de lluvia aleatorios que coincidan con días de baja radiación solar.

El procedimiento es el siguiente:

1. Valores de ETP de largo plazo se calculan para cada día del año. Los valores promedio diarios de ETP de cada mes se convierten por integración a los valores esperados para los principios de cada mes. El ETP promedio para cada día se calcula con una aproximación lagrangiana de cuarto orden y los valores esperados para principios de cada mes. Desviaciones aleatorias se generan asumiendo una distribución normal.
2. La temperatura promedio diaria se genera con un procedimiento similar, a excepción de que se usó una función langrangiana de tercer orden. Temperaturas aleatorias promedio diarias se generan basadas en la proporción de los valores generados aleatoriamente de ETP al promedio diario de ETP elevado a la potencia de Z donde Z está dada por la ecuación:

$$Z = \ln(1-CVT)/\ln(1-CVETP).....(16)$$

en la que CVT = coeficiente de variación de temperatura y CVETP = 0.047 para latitudes de 10°N a 10°S y es $0.047 + 0.0012LD$ para latitudes mayores.

La radiación solar diaria (RS) se calcula de la temperatura y ETP. La ecuación es:

$$RS = ETP/0.0135 (T^{\circ}C + 17.8)(17)$$

La radiación extraterrestre diaria (RA) se calcula usando la ecuación 5 y la diferencia de temperatura (TD) se da por la ecuación 1. Las temperaturas diarias máximas y mínimas se calculan de las temperaturas diarias y de TD. El RS simulado se chequea con los límites de 25% de RA para días totalmente nublados y 75% de RA para días despejados y se ajusta si es necesario.

3. El número de días lluviosos de cada mes se determinan de una distribución normal como desviaciones aleatorias del promedio y de la desviación estandar. Los días lluviosos se predicen como los de más baja proporción de RS/RA (días nublados).
4. La profundidad de la precipitación para cada día de lluvia se genera usando una distribución log-normal de los promedios mensuales y de la desviación standard y ajustado por el número simulado de días de lluvia.

MODELOS DE CULTIVOS

El modelo PLANTGRO de Hanks (1974) se ha usado ampliamente, particularmente para calcular la producción de maíz. El modelo PLANTGRO es una herramienta muy útil para planear cuando el objetivo principal es evaluar la influencia de la tensión por falta de agua en la producción. Retta y Hanks (1980) han proveído un diagrama simplificado de flujo del modelo PLANTGRO.

El proyecto The International Benchmark Sites Network for Agrotechnology transfer (IBSNAT), auspiciado por la Oficina de Ciencia y Tecnología (S&T) de la Agencia para el Desarrollo Internacional (AID), tiene como uno de sus objetivos completar, documentar y distribuir modelos de producción y desarrollo de cultivos. Cuatro modelos se encuentran a la disposición ahora. Estos son los modelos CERES para el trigo, soya, arroz y maíz. La documentación se ha terminado para los modelos de maíz y trigo. Otros modelos que están a punto de ser completados son los de sorgo, mijo, papas, cebada, maní y frijoles. Jones y Kiniry (1986) han publicado documentación y software del modelo CERES-Maíz.

Los modelos PLANTGRO y CERES-Maíz se han utilizado para comparar un rango de probabilidades de producción relativa de maíz regado por lluvia. Los modelos indican la influencia en la producción de las fechas de siembra, duración de la temporada de crecimiento requerida por la variedad del cultivo y profundidad del suelo y la capacidad de almacenamiento de agua. Cuando la falta del agua llega a ser una limitación importante en la producción de cultivos de secano, varios riegos suplementarios pueden ser asumidos y el cambio probable de producción ser simulado.

El modelo CERES-Maíz sintetiza la absorción de nitrógeno y se puede usar para indicar la influencia de la disponibilidad de agua en la producción, así como también el horario, frecuencia y cantidad de fertilización de nitrógeno. Con una calibración adecuada, la producción actual se puede predecir o los valores de datos de investigaciones existentes se pueden duplicar con un buen grado de precisión.

APLICACIONES DE BASE DE DATOS

Los registros diarios climáticos actuales se obtuvieron de varios lugares en Brasil y El Salvador. Estos datos se usaron con el modelo PLANTGRO y el modelo CERES-Maíz para comparar la producción relativa con diferentes fechas de siembra y para varios riegos suplementarios a las lluvias. El modelo CERES-Maíz se usó también para indicar la producción actual y relativa con variación de números y cantidades de fertilización de nitrógeno.

Una base de datos mensual y el modelo WMAKER se usó en cada uno de estos lugares en Brasil y El Salvador para simular datos diarios y los modelos de PLANTGRO y CERES-Maiz operaron para comparar la predicción de producción con esas obtenidas cuando se usaron los datos diarios actuales. Los valores de producciones estimadas fueron muy similares.

Este manual de base de datos mensual se propone como una herramienta de planeamiento para ser usada con los modelos de WMAKER y de crecimiento y desarrollo de cultivos para comparar la producción probable en las diferentes fechas de sembrado, diferentes prácticas de riego y para condiciones selectas de aplicación de nitrógeno. Los usos principales se resumen de la siguiente manera:

- modelar la producción potencial de cultivos;
- aumentar la producción de cultivos;
- transferencia agrotecnológica;
- selección de las fechas óptimas de sembrado;
- evaluar las deficiencias de riego;
- modelar el uso conjunto de lluvia y riegos;
- evaluar los beneficios de los riegos suplementarios.

Una discusión adicional de las aplicaciones prácticas la provee Samani y Hargreaves (1988).

TABLAS DE DATOS CLIMATICOS

La base de datos climáticos está representada alfabéticamente por países y lugares. Los datos mensuales incluyen:

- TMAX - promedios máximos mensuales de temperaturas medidas en °C.
- TMIN - promedio mínimo mensual de temperatura medido en °C.
- ETP - evapotranspiración potencial de la EC. 3.
- TEMC - $(TMAX - TMIN)/2$ en °C.
- SDT - desviación standard mensual de temperaturas de los datos disponibles en °C.
- PM - promedio de lluvias mensuales en mm.
- RPAR - el factor de distribución gamma para las cantidades probables de lluvia.
- SDPM - la desviación estandard en mm de cantidades de lluvia.
- RDAY - el promedio de números de días lluviosos por mes.
- SDRD - la desviación standard de los números de días lluviosos.

Una ilustración de las tablas de datos mensuales se presentan en la página siguiente.

GUIAS DE LOS USUARIOS

Las guías de los usuarios describen la operación de algunos de los modelos más útiles y "diagramas de flujo" se presentan en el apéndice IV.

ARGENTINA

STATION AZUL/AERO LAT 36 42 S LONG 59 48 W ELEV 132.0 M 13 YEARS

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
TMAX	30.	28.	26.	20.	16.	13.	13.	15.	17.	20.	24.	27.
TMIN	14.	13.	12.	7.	5.	2.	3.	2.	4.	7.	10.	11.
ETP	205.	154.	132.	77.	49.	35.	38.	59.	83.	121.	157.	194.
TEMC	21.	20.	18.	14.	10.	7.	8.	8.	11.	14.	17.	20.
SDT	1.0	1.2	1.4	1.2	1.0	1.2	1.4	0.9	1.1	0.8	1.5	1.1
PM	110.	89.	130.	115.	61.	48.	52.	41.	63.	95.	77.	105.
RPAR	5.8	3.1	5.1	1.4	1.9	3.6	1.5	0.4	2.2	3.1	5.3	6.2
SDPH	51.	46.	56.	164.	39.	24.	31.	41.	42.	55.	33.	46.
RDAY	7.5	5.8	7.0	6.0	5.3	4.2	5.2	4.0	5.2	8.4	6.8	8.3
SDRD	3.3	1.9	2.5	4.3	2.0	2.0	2.4	3.2	2.3	3.0	2.5	2.4

STATION BAHIA BLANCA/AERO LAT 38 42 S LONG 62 18 W ELEV 72.0 M 120 YEARS

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
TMAX	31.	30.	27.	21.	17.	12.	13.	16.	18.	21.	26.	29.
TMIN	16.	15.	13.	8.	6.	4.	3.	4.	5.	8.	11.	14.
ETP	206.	161.	132.	77.	48.	28.	36.	57.	84.	123.	169.	201.
TEMC	23.	22.	19.	15.	11.	8.	8.	9.	12.	15.	18.	21.
SDT	1.2	1.4	1.3	1.3	1.3	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.3	1.3
PM	48.	59.	75.	53.	33.	24.	27.	22.	41.	59.	53.	55.
RPAR	1.0	1.2	1.4	0.6	0.7	0.6	0.5	0.7	1.1	1.8	2.0	1.0
SDPH	41.	56.	57.	53.	31.	25.	32.	23.	36.	39.	37.	38.
RDAY	5.8	5.3	5.7	4.2	4.5	3.9	3.9	3.1	4.1	6.7	6.7	6.3
SDRD	2.4	2.5	2.7	2.2	2.5	2.4	2.4	1.8	2.2	2.9	2.8	2.9

STATION BARILOCHE/AERO LAT 41 12 S LONG 71 12 W ELEV 836.0 M 29 YEARS

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
TMAX	22.	22.	19.	15.	10.	7.	6.	8.	10.	14.	18.	21.
TMIN	7.	7.	5.	2.	1.	-1.	-1.	-2.	-1.	2.	5.	7.
ETP	159.	127.	100.	59.	31.	20.	21.	36.	55.	92.	126.	156.
TEMC	14.	14.	11.	8.	5.	3.	2.	3.	5.	8.	11.	13.
SDT	1.6	1.5	1.2	1.3	1.0	1.1	1.0	0.7	0.9	1.2	1.2	1.8
PM	27.	24.	29.	57.	139.	124.	139.	121.	57.	35.	22.	35.
RPAR	0.7	1.6	1.4	1.2	3.5	2.1	8.0	3.4	2.8	0.8	2.0	0.5
SDPH	31.	20.	29.	43.	73.	83.	47.	65.	33.	32.	18.	44.
RDAY	3.2	3.1	3.1	6.7	12.7	12.2	12.9	10.6	7.5	5.7	4.3	4.5
SDRD	1.9	2.4	1.9	3.7	4.2	4.4	3.7	4.5	3.6	3.5	1.7	3.2

REFERENCES

- Adams, R.L. 1953. "Farm management crop manual", University of California Press, Berkeley, California, 175 p.
- Bell, F.C. 1969. "Generalized rainfall-duration-frequency relationships." J. Hydr. Div. ASCE, 95 (HYI), 311-327.
- Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1979. "Yield response to water," FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) Irrigation and Drainage Paper No. 33, 193 p.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977 "Crop water requirements," FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24. (Rev) 156 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 1978. "Report on the agro-ecological zones project". Vol. 1, Methodology and Results for Africa, Rome, 158 p.
- Hanks, R. J., 1974. "Model for predicting yields as influenced by water use," Agronomy Journal, 660-664.
- Hargreaves G.H. 1975. "Moisture availability and crop production". Transactions of the ASAE, Vol. 18, No. 5, 980-984.
- Hargreaves G.H. 1988. "Extreme rainfall for africa and other developing areas". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 114, No. 2, ASCE Paper No. 22459, 324-333.
- Hargreaves G.L., Hargreaves G. H., and Riley J.P. 1985. "Irrigation water requirements for Senegal River Basin". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 3, Paper No. 19995, 265-275.
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1984. "Economic considerations of deficit irrigation." Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 4. Paper No. 19367, 343-358.
- Hargreaves, G.H., and Z.A. Samani, 1986. "World water for agriculture-precipitation management". International Irrigation Center. Utah State University, 617 p.
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1987. "Simplified irrigation scheduling and crop selection for El Salvador". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. Vol. 113, No. 2, Paper No. 21511. 224-232.
- Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1988. "Crop Yield: Economic considerations of deficit irrigation". P.453-474. In: Cheremisinof, P.N., N.P. Cheremisinof and S.L. Cheng (eds.) Civil Engineering Practice, Vol. 5, Water Resources, Environmental. Lancaster, Pennsylvania. Techomic Publishing Company, Inc.

Jones, C.A. ed. 1984. "Experimental design and data collection procedures for IBSNAT - The Minimum Data Set for Systems Analysis and Crop Simulation", IBSNAT Technical Report 01, Univ. of Hawaii, 94 p.

Jones, C.A., and J.R. Kiniry. 1986. "CERES-Maize a simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press, College Station, 194 p.

Keller, A.A. 1982. "Development and analysis of an irrigation scheduling program with emphasis on forecasting consumptive use," Thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, Agricultural and Irrigation Department, Utah State University, 152 p.

Keller A.A. 1987. "Modeling command area demand and response to water delivered by the main system". Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah State University, Ph.D. dissertation, 224 p.

Knapp, C.L., T.L. Stoffel and S.D. Whitaker. 1980. "Insulation data manual," Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado, 281 p.

Retta, A. and R.J. Hanks. 1980. "Manual of using model PLANTGRO". Utah Ag. Exp. Sta., Research Report 48.

Richardson, C.W., and D.A. Wright. 1984. WGEN: "A Model for generation daily weather variables." U.S. Department of Agriculture, Agricultural Res. Service, ARS-8 80 p.

Richardson, C.W. 1985. "Weather simulation for crop management models." ASAE Paper No. 84-4541, ASAE, St. Joseph, MI 49085.

Richardson, E.A. 1980 personal communication.

Richardson, E.A. 1988. "Final report to bureau of land management" from State Climatologist Emeritus, State Climatology Office, in press.

Samani, Z.A. and G.H. Hargreaves. 1986. "Estimating rainfall probabilities from average values," Applied Engineering in Agriculture, Vol. 2, No. 2, ASAE, pp. 141-143, 147.

Samani, A.Z., G.H. Hargreaves, E. Zuniga M., and A.A. Keller. 1987. "Estimating crop yields from simulated daily weather data". Applied Engineering in Agriculture, Vol. 3, No. 2, 290-294.

Samani, Z.A. and G.H. Hargreaves. 1988. "Modeling yields from rainfall and supplemental irrigation," Journal of Irrigation and Drainage Engineering, in press.

Snyder, R.L., Pruitt, W.O., and Shaw, D.A. 1987. "Determining daily reference evapotranspiration", Cooperative Extension, University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, Leaflet 21426, 12 p.

Stewart, J.I. 1980. "Response Farming in Rainfed Agriculture" WHARF Foundation Press, Davis, California, 103 p.

Zuniga, E.M. 1987. "Crop model evaluation of precipitation, planting date, and nitrogen application interaction effects on corn yields in Central America". Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah State University, Ph.D. dissertation, 185 p.