

**Determinación de niveles económicos óptimos  
de uso de agua en la producción de maíz (*Zea  
mays L.*) usando el simulador de rendimientos  
desarrollado por la FAO AquaCrop Model**

**Jaime Guillermo López Cifuentes**

**Zamorano, Honduras**

Diciembre, 2010

ZAMORANO  
CARRERA DE ADMINISTRACIÓN DE AGRONEGOCIOS

**Determinación de niveles económicos óptimos  
de uso de agua en la producción de maíz (*Zea  
mays L.*) usando el simulador de rendimientos  
desarrollado por la FAO AquaCrop Model**

Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar  
al título de Ingeniero en Administración de Agronegocios en el Grado  
Académico de Licenciatura

Presentado por

**Jaime Guillermo López Cifuentes**

**Zamorano, Honduras**  
Diciembre, 2010

# **Determinación de niveles económicos óptimos de uso de agua en la producción de maíz (*Zea mays L.*) usando el simulador de rendimientos desarrollado por la FAO AquaCrop Model**

Presentado por:

Jaime Guillermo López Cifuentes

Aprobado:

---

Fredi Arias, Ph.D.  
Asesor principal

---

Ernesto Gallo, M.B.A.  
Director  
Carrera de Administración de  
Agronegocios

---

Francisco Álvarez, M.A.E.  
Asesor

---

Raúl Espinal, Ph.D.  
Decano Académico

---

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.  
Rector

## RESUMEN

López J. 2010. Determinación de niveles económicos óptimos de uso de agua en la producción de maíz (*Zea mays L*), usando el simulador de rendimientos desarrollado por la FAO “AquaCrop Model”. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería en Administración de Agronegocios, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 49 p.

Existe una creciente demanda de alimentos y una reducción en la disponibilidad de agua para producirlos; como consecuencia, se debe buscar alternativas que incrementen la productividad del agua. El objetivo general de la investigación fue determinar los niveles económicos óptimos de uso del agua en la producción de maíz, específicamente en la Escuela Agrícola Panamericana (Zamorano), Honduras, por medio de la determinación, a través de la modelación y análisis estadístico del modelo que mejor representa la función de producción y la determinación de la función de ganancias al utilizar como único insumo el recurso agua. La investigación se desarrolló en cinco fases: La primera consistió en calibrar “AquaCrop Model” a condiciones de producción de Zamorano; la segunda fase, consistió en la simulación de rendimientos bajo diferentes niveles de agua disponible; en la tercera fase, se determinaron los niveles de uso de agua que generan el máximo físico y económico. La cuarta fase, consistió en determinar las fechas de siembra óptimas en Zamorano y finalmente, la quinta fase identificó las zonas óptimas para la producción de maíz en Guatemala. Los resultados con mayor relevancia en la investigación indican que, para maximizar la producción física por hectárea se debe utilizar 6,347.62 m<sup>3</sup> de agua y para alcanzar el máximo económico 1,585.71 m<sup>3</sup>. Zamorano debería sembrar en dos temporadas, la primera de abril a mayo y la segunda de agosto a septiembre. Finalmente, en Guatemala la producción debería orientarse a la costa sur en los departamentos de Retalhuleu, Suchitepéquez y Escuintla preferiblemente.

**Palabras clave:** Análisis estadístico, función de producción, máximo económico, máximo físico, modelo matemático, simulación.

## CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas .....	ii
Resumen .....	iii
Contenido .....	iv
Índice de cuadros, figuras y anexos.....	v
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>12</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>20</b>
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>30</b>
<b>5. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>31</b>
<b>6. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>32</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>34</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadro	Página
1. Contribución a la producción nacional de maíz por departamentos y zona productora.....	11
2. Análisis de regresión para el modelo cuadrático.....	23
3. Análisis de varianza para el modelo seleccionado.....	24
4. Determinación de épocas de siembra para la Escuela Agrícola Panamericana.....	28
5. Rendimiento potenciales en diferentes departamentos de Guatemala.....	29
Figura	Página
1. Agua disponible y aprovechable por la planta en el suelo.....	7
2. Precio promedio mensual del maíz blanco en el mercado hondureño en Lempiras/quintal.....	18
3. Rendimiento de maíz bajo cuatro niveles de agotamiento permisible.....	20
4. Función de producción de maíz bajo diferentes niveles de agua aplicada.....	22
5. Análisis de residuos del modelo seleccionado para la función de producción.....	25
Anexo	Página
1. Evapotranspiración promedio en mm/día, para cada mes en Zamorano.....	34
2. Ubicación geográfica de la estación experimental de Zamorano.....	34
3. Comportamiento promedio mensual de temperatura máxima y mínima en Zamorano.....	35
4. Comportamiento promedio mensual de humedad relativa (%) en Zamorano.....	35
5. Comportamiento promedio mensual de velocidad del viento (m/s) en Zamorano ....	36
6. Comportamiento promedio mensual de radiación solar en calorías/cm <sup>2</sup> en Zamorano.....	36
7. Precipitación promedio mensual mm/mes en Zamorano .....	37
8. Descripción de propiedades físicas de tres calicatas en los suelos de la Finca San Nicolás (pivote central) en Zamorano .....	37

9. Descripción del comportamiento del cultivo de maíz bajo condiciones de Zamorano utilizada para la simulación.....	38
10. Resultados de la simulación utilizando 0 % de agotamiento permisible.....	39
11. Resultados de la simulación utilizando 20 % de agotamiento permisible.....	40
12. Resultados de la simulación utilizando un 40 % de agotamiento permisible.....	41
13. Resultados de la simulación utilizando un 60 % de agotamiento permisible.....	42
14. Análisis de regresión y de varianza para el modelo 1 (lineal).....	43
15. Análisis de regresión de varianza para el modelo 3 (modelo cúbico).....	44
16. Análisis de regresión y varianza para el modelo 4.....	45
17. Distribución de estaciones climatológicas propiedad del INSIVUMEH en Guatemala.....	46
18. Distribución de estaciones experimentales por departamento y zona de vida .....	47
19. Precipitación promedio mensual (mm) por departamentos del trópico guatemalteco.....	49

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

La demanda mundial de alimentos aumenta año tras año debido principalmente al rápido crecimiento de la población humana. Sin embargo, la disponibilidad de agua para regar cultivos y satisfacer esta creciente demanda presenta una reducción en su disponibilidad. Esta tendencia inversa obliga a la búsqueda de alternativas sostenibles y eficientes de sistemas de riego que utilicen menor cantidad de agua y que al mismo tiempo resulten en los mismos o mejores rendimientos en la producción.

Según García et al. (2009) aproximadamente el 70 por ciento del agua fresca total es consumida por la actividad agrícola, sector donde el riego particularmente representa el mayor uso, sin embargo, existe un constante incremento en la demanda de agua para consumo humano principalmente. Por lo tanto, reducir la cantidad de agua destinada para riego y al mismo tiempo satisfacer la creciente demanda de alimentos es crucial en la producción de cultivos.

Si bien es cierto que los sistemas de riego difieren en el nivel de eficiencia en el uso del agua, cada sistema tiene niveles óptimos al cual deberían operar dependiendo de las condiciones de clima, cultivo, suelo, manejo, etc. Dada la reducción de agua para la producción agrícola, la agricultura bajo riego necesita incrementar la productividad por unidad de agua consumida. Por esta razón, los esfuerzos deben dirigirse a encontrar el nivel óptimo de lámina de riego, independientemente del sistema que se utilice que maximice la productividad del agua y no la productividad del cultivo como se ha realizado convencionalmente.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

Dado que a nivel mundial existe una fuerte presión por reducir el consumo de agua para riego y la creciente demanda mundial de alimentos, la producción agrícola bajo riego debe orientar sus esfuerzos de investigación a ser cada día más productivo en términos de rendimiento (kg) obtenido por unidad ( $m^3$ ) de agua utilizada en el proceso.

Honduras como país Centroamericano forma parte de los países latinoamericanos en donde el maíz es parte fundamental de la dieta de sus habitantes. Varios esfuerzos se han enfocado en determinar los niveles óptimos de nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) que maximicen los rendimientos de grano. Sin embargo el recurso agua utilizado en la

mayoría de plantaciones comerciales para la producción bajo condiciones de riego, no ha sido valorada como insumo en la producción.

El estudio en la primera parte busca determinar la cantidad de riego aplicada en el cultivo de maíz que resulte en el máximo económico para la producción, es decir, determinar la cantidad de agua que deberían aplicar los productores para obtener bajo condiciones prevalecientes de mercado (precio promedio por tonelada de maíz y costo por metro cúbico de agua para riego) la ganancia máxima por concepto de uso del recurso agua. Al determinar dicho nivel, los productores estarían contribuyendo al uso sostenible del recurso agua, que día tras día es más escaso.

### **1.3 LÍMITES DEL ESTUDIO**

- Los resultados obtenidos en el estudio son válidos únicamente bajo condiciones de simulación de rendimientos, con “AquaCrop Model”.
- La función de producción y de ganancias son validas únicamente para las condiciones de producción de Zamorano.
- Para la simulación de rendimientos se asumen condiciones de fertilidad de suelo casi óptimas.
- El simulador “AquaCrop Model” solamente permite ingresar un porcentaje de agotamiento permisible de agua disponible fijo y no según la fase de desarrollo fenológico de la planta.
- Para la identificación de zonas óptimas para la producción de maíz en Guatemala, se asumió únicamente variaciones de precipitación pluvial quedando todo lo demás constante.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 General**

- Determinar los niveles económicos óptimos de uso de agua en la producción de maíz (*Zea mays L*) usando el simulador de rendimientos AquaCrop Model.

#### **1.4.2 Específicos**

- Desarrollar una función de producción de maíz, bajo distintos niveles de agua disponible.
- Desarrollar una función de ganancias en la producción de maíz ante distintos niveles de agua disponible.
- Identificar las fechas de siembra óptimas del cultivo de maíz en Zamorano.
- Identificar zonas aptas para la producción de maíz en Guatemala.

## **1.5 REVISIÓN DE LITERATURA**

### **1.5.1 Antecedentes**

Predecir los efectos causados en la producción y productividad de cultivos como consecuencia de la disponibilidad de agua ha resultado una herramienta útil en la agricultura, sin embargo, los modelos utilizados para este propósito son difíciles de utilizar debido a su alto grado de sofisticación.

AcuaCrop es un modelo de productividad del agua en cultivos desarrollado por la división de suelos y agua de la Organización para la Agricultura y Alimentación (FAO). El modelo se basa en el conocimiento de la respuesta fisiológica de cultivos al suministro de agua.

El modelo fue diseñado con un equilibrio entre simplicidad (fácil uso) y precisión ya que requiere relativamente pocos parámetros para simular la respuesta de los cultivos a diferentes condiciones de riego. Para su utilización el programa debe ser calibrado a las condiciones agroclimáticas de la zona de cultivo en donde va ser utilizado. Específicamente, es necesario obtener e introducir información de cuatro factores: clima, cultivo, suelo y manejo.

AquaCrop ha sido utilizado como herramienta de planeación y apoyo en la toma de decisiones y ha sido calibrado y utilizado para simular la respuesta de diferentes cultivos (algodón, maíz, arroz, papa, soya, trigo tomate, entre otros) a diferentes niveles de disponibilidad de agua. El modelo se ha usado en África y Asia principalmente, así también en Europa, Estados Unidos y Sur América (cultivo de quínoa, Bolivia), sin embargo, el modelo no ha sido usado en Centro América.

El programa tiene diversidad de usos, entre los cuales se señalan los siguientes ejemplos, AquaCrop inicialmente fue calibrado para su uso en el cultivo de maíz principalmente por la Universidad de California-Davis Estados Unidos, además se utilizó para comparar rendimientos alcanzables bajo condiciones de bajo, medio y alto estrés hídrico en el cultivo de maíz en Zaragoza España. Otro uso importante del modelo ha sido la optimización económica de riego deficitario en el cultivo de algodón bajo condiciones del sur de España. En Sur América se utilizó para determinar criterios de uso de riego de forma sostenible en el cultivo de quínoa en el altiplano boliviano.

### **1.5.2 Generalidades de “AquaCrop Model”**

AquaCrop Model es un programa desarrollado para simular el rendimiento de diferentes cultivos bajo diferentes niveles de agua. AquaCrop fue desarrollado como resultado de la revisión por parte de la división de riego y drenaje de la FAO de los estudios realizados por Doorenbos y Kassam en 1979, estudio que resultó en una verdadera herramienta para conocer la respuesta del rendimiento de plantas al agua. Los resultados obtenidos por Doorenbos y Kassam en 1979 expresaron la relación agua-rendimiento a través de la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = Ky \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad [1]$$

Donde:

$Y_x$ = máximo rendimiento alcanzado

$Y_a$ = rendimiento actual

$ET_x$ = evapotranspiración máxima

$ET_a$ = evapotranspiración actual

$Ky$ = factor de proporcionalidad entre la pérdida relativa en el rendimiento y la reducción relativa de la evapotranspiración.

Después de la revisión el equipo de la FAO decidió considerar para AquaCrop Model lo siguiente:

Primero, separar la evapotranspiración en sus componentes, evaporación y transpiración. Esta separación permitió entender y evitar la confusión del uso consuntivo no productivo del agua, muy importante en las primeras etapas del cultivo cuando la cobertura del suelo es incompleta. En segundo lugar consideró separar el rendimiento final de cualquier cultivo en biomasa producida y el índice de cosecha del cultivo; esta separación permitió distinguir la relación fundamental entre las condiciones ambientales y la producción de biomasa y el índice de cosecha.

El modelo final se fundamentó en la relación fundamental entre biomasa y transpiración y no en el rendimiento y evapotranspiración. De esta manera el modelo de crecimiento y simulación tomó en cuenta la transpiración en milímetros y al mismo tiempo la productividad del agua para determinar la producción de biomasa, que multiplicado por el índice de cosecha definido para cada cultivo resulta en el rendimiento cosechado (toneladas de grano por ejemplo).

Manteniendo la productividad del agua para producir biomasa como el principio fundamental del modelo, AquaCrop posteriormente desarrolló para el modelo de crecimiento de cultivos una estructura de sub-modelos que incluyen: El balance hídrico del suelo, el desarrollo, crecimiento y formación del rendimiento, factores climáticos como: temperatura, precipitación, evapotranspiración y concentración de dióxido de carbono en la atmósfera principalmente. Adicionalmente consideró condiciones de manejo de suelo y riego, ya que estos factores influyen directamente en balance hídrico del suelo, el desarrollo del cultivo y el rendimiento final. AquaCrop no toma en consideración plagas, enfermedades y malezas". (Steduto et al., 2009).

El rango de aplicación del programa incluye desde la simulación bajo condiciones de producción sin riego (tomando la precipitación pluvial como agua disponible) hasta condiciones de producción bajo riego como única fuente de agua. Además, permite simular bajo ambas condiciones, es decir toma en cuenta la precipitación pluvial y al mismo tiempo aplicaciones de agua con sistemas de riego.

La FAO (2010), recomienda la aplicación del modelo para los siguientes usos:

- Evaluación de cosechas alcanzables en diferentes ubicaciones geográficas
- Como herramienta de benchmarking, comparando los rendimientos alcanzables en un determinado lugar o en varios, para identificar las diferencias de rendimiento y las restricciones que limitan la producción.
- Evaluar la producción de cultivos de secano en el largo plazo.
- Desarrollo de programas de riego para la producción bajo diferentes escenarios climáticos.
- Simulación de secuencias de cultivos.
- Análisis bajo escenarios climáticos futuros.
- **Optimización del agua disponible (económica).**
- Evaluación de la productividad real del agua (biológica y / o económico)
- Apoyo en la toma de decisiones sobre políticas de asignación de uso de agua (por parte de gobiernos principalmente).

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (2010), AquaCrop es particularmente útil para estudiar la respuesta de diferentes cultivos bajo condiciones de alta concentración de dióxido de carbono y calentamiento global.

### 1.5.3 Generalidades de la producción de maíz

El cultivo de maíz (*Zea mays L.*) pertenece a la familia de las Poáceas (conocidas generalmente como gramíneas), tribu Maydeas, siendo esta especie la única cultivada y además la única de las Maydeas de gran importancia económica.

El maíz es una de las especies cultivadas más productivas dado que tiene el más alto potencial para la producción de carbohidratos por unidad de superficie por día. Es una planta C4 con una alta tasa de actividad fotosintética. Hoy día el maíz es el segundo cultivo del mundo por su producción después del trigo, mientras que el arroz ocupa el tercer lugar. Es el primer cereal en rendimiento de grano por hectárea y es el segundo después del trigo, en producción total. (Paliwal, 2001).

El maíz es de gran importancia económica a nivel mundial ya sea como alimento humano, como alimento para el ganado o como fuente de un gran número de productos industriales. La diversidad de los ambientes bajo los cuales es cultivado el maíz es mucho mayor que la de cualquier otro cultivo. Habiéndose originado y evolucionado en la zona tropical como una planta de excelentes rendimientos, hoy día se cultiva hasta los 58° de latitud norte en Canadá y en Rusia y hasta los 40° de latitud sur en Argentina y Chile. La mayor parte del maíz es cultivado a altitudes medias, pero se cultiva también por debajo del nivel del mar en las planicies del Caspio y hasta los 3,800 msnm en la cordillera de los Andes. Más aún, el cultivo continúa a expandirse a nuevas áreas y a nuevos ambientes. (Paliwal, 2001).

Globalmente, el maíz se cultiva en más de 158 millones de hectáreas (USDA, 2009) con una producción anual de más de 772 millones de toneladas métricas (FMI, 2009). El maíz tropical se cultiva en 66 países y es de importancia económica en 61 de ellos, cada uno de los cuales siembra más de 50 mil hectáreas con un total de cerca de 61.5 millones de hectáreas y una producción anual de 111 millones de toneladas métricas. El rendimiento medio de maíz en los trópicos es de 1,800 kg/ha comparado con una media mundial de más de 4,000 kg/ha. El rendimiento medio del maíz en las zonas templadas es de 7,000 kg/ha (Corado, 2009).

#### **1.5.4 Requerimiento hídrico**

Un cultivo de maíz bien regado transpira cerca de 350 gramos de agua por cada gramo de materia seca producida sobre la tierra (Hay y Walker, 1989). En el campo hay pérdidas adicionales de agua por la evaporación. Solo una fracción de la materia seca producida forma el grano, lo que significa que un cultivo con buena disponibilidad de agua usa alrededor de 800 a 1,000 gramos de agua por cada gramo de grano producido (Lafitte, 2001).

Debido a que el dióxido de carbono ingresa en la hoja a través de las mismas aberturas - estomas- que usa el agua para salir, existe una buena relación entre la cantidad de agua transpirada y la materia seca producida por el cultivo. Los factores ambientales afectan el grado de apertura de los estomas y pueden restringir la pérdida de agua por el cultivo. Un cultivo de maíz que transpire libremente, transpira alrededor del 80 al 90% de la evaporación potencial, la que ocurre a causa de la radiación ambiental, la temperatura y la humedad relativa. (Lafitte, 2001).

El contenido de agua en el suelo varía según las características físicas del mismo; así los suelos presentan diferentes volúmenes de agua según este se encuentre en el punto de saturación, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP). Este contenido de agua se mueve a través del suelo según sea el coeficiente de conductividad hidráulica.

El punto de saturación se da cuando el volumen total ocupado por los poros está lleno de agua, este punto solo se presenta de forma natural cuando el nivel freático esta cerca de la zona de raíces; capacidad de campo por su parte es la cantidad de agua que un suelo puede retener contra la fuerza gravitacional después de un drenaje adecuado, este es la máxima cantidad de agua extraíble por la planta. El punto de marchitez se da cuando la planta deja de extraer agua y se marchita permanentemente, por lo tanto es el punto inferior de la cantidad de agua extraíble por la planta ya que una vez alcanzado es un proceso irreversible. La tensión a que está sometida el agua a capacidad de campo, es equivalente a 330 Pa. La tensión del agua en condiciones de punto de marchitez permanente es equivalente a 1,500 KPa. En el punto de saturación la tensión es 0 (SIAR, 2010).

La cantidad de agua total disponible para las plantas en el suelo es la cantidad de agua retenida entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Algunos tipos

de plantas pueden extraer toda el agua disponible o aprovechable, sin afectar su rendimiento; sin embargo, otras afectan su rendimiento cuando han extraído un 50 por ciento o menos del agua disponible. En función de lo anterior, se considera que, en la generalidad de los casos, se mide el 50 por ciento de la Humedad Aprovechable como Humedad Fácilmente Aprovechable (SIAR, 2010).

El porcentaje de agotamiento permisible ideal del total de agua disponible en el suelo sería cero por ciento, sin embargo, esto requiere riegos frecuentes; por otro lado, no es recomendable agotar el agua disponible arriba del 60 por ciento ya que el desarrollo y rendimiento de la planta se ven afectados negativamente. Además se recomienda variar este porcentaje de acuerdo a la etapa fenológica de la planta ya que ciertas etapas del desarrollo son más susceptibles al daño por bajos niveles de agua aprovechable como es el caso de la floración. Dada esta situación es recomendable utilizar un porcentaje de agotamiento entre 30 y 40 por ciento (Álvarez, 2010. Comunicación personal).

La Figura 1 refleja gráficamente este concepto.

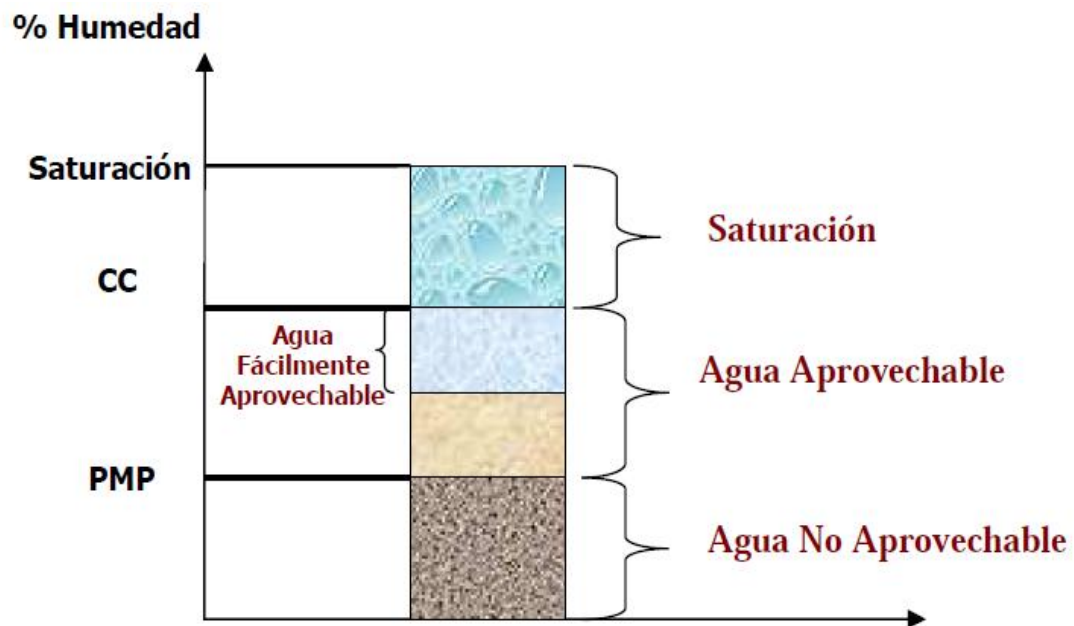


Figura 1. Agua disponible y aprovechable por la planta en el suelo.  
Fuente: SIAR (2010).

### 1.5.5 La producción de maíz en Honduras

El maíz es el grano básico que ocupa la mayor superficie sembrada y el mayor volumen en cuanto a producción en Honduras. En este país se produce mayor cantidad de maíz blanco que amarillo. El maíz blanco se utiliza principalmente para consumo humano como tortillas y otros, mientras que el maíz amarillo se destina primordialmente para la fabricación de concentrados. (Herrarte, 2005).

De acuerdo con la Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG, 2007), aproximadamente el 50 por ciento del maíz que consume Honduras es importado, lo cual incide en el costo de la canasta básica. “En el 2007 la producción nacional superó los 15 millones de quintales, pero aun así no fue suficiente para suplir la demanda de 23 millones de quintales de maíz al año, tanto para la agroindustria, como para el consumo humano y animal”. (Ramírez, 2008).

Existen en Honduras alrededor de quinientas mil familias de pequeños agricultores, que cultivan maíz. Los grandes volúmenes de producción en la región obedecen, en principio, a la lógica de priorizar su autoabastecimiento, sobre todo con maíz blanco, grano en que se basa la dieta. Los pequeños productores se encuentran dispersos, lo que limita su integración productiva y comercial; además trabajan explotaciones de subsistencia, con tecnología predominantemente manual. Sus rendimientos se mantienen muy bajos con respecto a los grandes países productores, debido, especialmente, a que cultivan sobre laderas, y casi siempre sin usar semillas mejoradas. (Ramírez, 2008).

En Honduras hay dos épocas de siembra para el maíz las cuales están determinadas por el régimen de lluvia de cada región. Las **siembras de primera** comienzan en mayo, extendiéndose hasta el 15 de junio y en algunas regiones, como la costa norte hasta el 15 de julio. Sin embargo, para esta fecha se corre riesgo de hacer siembras tardías con la consecuencia de que el cultivo se vea expuesto a la incidencia de plagas y enfermedades, especialmente virosis que causa achaparramiento. Para la zona sur el período de siembra se reduce, ya que las lluvias caen en un período relativamente corto. La época de **siembras de postrera** se determina por las lluvias, las siembras en los departamentos de la zona sur se realiza del 15 de agosto al 15 de septiembre. Para el departamento de Olancho y región de occidente se hace en los meses de octubre y noviembre; en la costa norte el período se puede prolongar hasta la primera quincena de enero. (SAG, 2010).

En el cultivo de maíz, el 79.7 por ciento de la superficie total sembrada corresponde al ciclo de primera y genera el 82.6 por ciento de la producción total obtenida. Asimismo, el 20.3 por ciento corresponde al ciclo de postrera y genera un 17.4 por ciento de la producción total obtenida. (Herrarte et al., 2005).

Según el Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria (SENASA, 2003), los departamentos de mayor producción de maíz en Honduras son Olancho, Yoro, Santa Bárbara y El Paraíso, en orden descendente. (Herrarte et al., 2005).

Existen dos variedades de maíz que se cultivan en Honduras, estas son variedades de polinización libre y de polinización controlada o híbridos. Los híbridos dan mejores rendimientos pero son más difíciles de manejar, además tienen un costo alto por lo que se requiere de condiciones adecuadas para su producción, tales como precipitación y fertilidad del suelo. “Las variedades públicas que se comercializan en el país son Tuxpeño, Guayape y HB-104, teniendo mejores rendimientos el Tuxpeño; sin embargo, en zonas semiáridas como Choluteca, algunos productores prefieren el HB-104 por considerarlo más rústico a la sequía”. (Corado, 2009).

### **1.5.6 La producción de maíz en Guatemala**

En Guatemala el maíz es el cereal con mayor área cultivada, lo cual demuestra la importancia de este grano en la seguridad alimentaria del país principalmente para la población pobre. “En Guatemala, el maíz no es simplemente un producto agrícola más. Arraigado en la cultura nacional, provee mucho más que recursos monetarios. Muchos de los servicios que ofrece son difíciles de reemplazar, tales como seguridad alimentaria, productos industriales y artesanales para consumo humano y animal, otros productos como forraje, materiales de empaque (la tusa) y construcción (la caña), empleo, biodiversidad agrícola, valor cultural, soporte y microclima para cultivos intercalados” (FAO, 2005).

La producción de maíz en Guatemala no es suficiente para cubrir la demanda interna, esto genera un problema debido a la dependencia de importaciones de grano para uso en alimentación animal desde Estados Unidos principalmente. Este problema colabora al desequilibrio de la balanza comercial lo cual trae como consecuencia menor crecimiento económico. Aún más debido a la insuficiente oferta nacional y a la alta demanda provocan aumentos en el precio del maíz. “Los altos precios, en combinación con la crisis económica que vive un amplio sector de guatemaltecos pobres a raíz de la problemática del café, vienen causando un aumento de los niveles de inseguridad alimentaria” (FAO, 2005).

Según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala (MAGA, 1998) el maíz genera 37 millones de jornales por año, cantidad que representa el 73.4 por ciento del total de jornales generados en el sector agrícola.

En Guatemala la producción de maíz se divide en dos grandes grupos de productores: productores de subsistencia y productores comerciales. Ambos productores tienen problemas durante la etapa productiva y comercialización (bajos precios debido a importaciones) de la cadena de valor principalmente. Los rendimientos alcanzados dependen de la cantidad de insumo utilizado, cantidad que depende básicamente del precio y la disponibilidad de recursos económicos, recursos que para los productores principalmente de subsistencia es casi nulo debido a la falta de créditos agrícolas. En el caso de productores comerciales obtienen créditos con altas tasas de interés lo cual resulta en un incremento en sus costos operativos y consecuentemente la reducción de competitividad en el mercado nacional. Dada estas limitantes financieras el uso de tecnología como por ejemplo semillas mejoradas, riego y utilización de pesticidas se restringe para productores comerciales. “Los altos costos de producción que resultan de la ineficiencia técnica se traducen a altos precios al consumidor, con graves consecuencias para la seguridad alimentaria. Esta es también la principal causa de la escasa competitividad del producto nacional para entrar al procesamiento industrial, y de las elevadas importaciones de maíz a Guatemala” (FAO, 2005).

Por otro lado el bajo rendimiento por hectárea alcanzado por los productores en Guatemala se debe también a los pocos programas de transferencia de tecnología, asistencia técnica, el arraigamiento cultural de los productores que se niegan a la adopción de nuevas tecnologías y finalmente la incoherencia de la capacidad de uso de las tierras

destinadas para la producción, ya que en su mayor parte estas son tierras de vocación forestal principalmente.

Según Fuentes R. et al., (2005), las zonas de producción de maíz, de grano blanco y amarillo en Guatemala se ubican en diferentes ambientes agroecológicos, ubicados entre 0 y 3,100 msnm. Cada uno de los ambientes dispone de diferentes condiciones climáticas, relacionadas con altitud, temperatura, humedad relativa y precipitación, entre otros, que caracterizan su condición agroclimática. En Guatemala existen principalmente dos grandes zonas: el Trópico Bajo (0-1,400 msnm) y la zona del Altiplano (1,500-3,100 msnm). El Trópico Bajo se subdivide en áreas con condiciones de humedad favorecida, con mejor distribución de la precipitación pluvial, que ocupa el 45 por ciento del área de maíz. El área con condiciones de humedad limitada, que presenta problemas de distribución de la precipitación y períodos prolongados de sequía (canícula), ocupa el 25 por ciento del área maicera.

Por su parte, el Altiplano, que se subdivide en un área de transición (1,500-1,800 msnm) y las tierras altas (más de 1,800 msnm), ocupa el 30 por ciento del área total de maíz (Fuentes, 2005).

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2004), el rendimiento promedio nacional en 2003 fue 1,617 kg /ha, siendo los departamentos de Retalhuleu, Escuintla, Quetzaltenango y Suchitepéquez los que reportaron los mayores rendimientos (más de 2,385 kg /ha), en contraste con los bajos rendimientos de El Progreso, Baja Verapaz, Alta Verapaz y Chiquimula (menos de 1,254 kg /ha). (Fuentes, 2005).

La contribución a la producción nacional por departamentos ubicados en diferentes zonas productivas (trópico y altiplano) puede observarse en el cuadro 1.

Cuadro 1. Contribución a la producción nacional de maíz por departamentos y zona productora.

Departamento	Zona Productora	Contribución al total nacional (%)
Petén	Trópico	18.1
Alta Verapaz	Trópico	10.5
Quiché	Trópico	7.5
Jutiapa	Trópico	7.1
Huehuetenango	Altiplano	5.9
San Marcos	Altiplano	5.0
Retalhuleu	Trópico	5.0
Santa Rosa	Trópico	4.8
Chimaltenango	Altiplano	4.1
Escuintla	Trópico	3.8
Quetzaltenango	Altiplano	3.7
Suchitepéquez	Trópico	3.4
Izabal	Trópico	3.4
Jalapa	Trópico	3.0
Chiquimula	Trópico	2.9
Baja Verapaz	Trópico	2.7
Totonicapán	Altiplano	2.0
Guatemala	Altiplano	2.0
Zacapa	Trópico	1.7
Sololá	Altiplano	1.5
El Progreso	Trópico	1.1
Sacatepéquez	Altiplano	0.8
Total	Altiplano	25.0
	Trópico	75.0

Fuente: Fuentes et al. (2005), adaptado por el autor.

El cuadro 1 demuestra que el 75 por ciento de la producción de maíz en Guatemala se realiza en la zona productiva tropical. Los departamentos se encuentran ordenados en forma descendente según el porcentaje de contribución a la producción nacional, de esta forma se observa que en los departamentos de Peten y Alta Verapaz se produce la mayor cantidad de maíz.

## **2. MATERIALES Y METODOS**

El proyecto de investigación se realizó en cinco fases. La primera consistió en la calibración del simulador de rendimientos “Aqua Crop Model” a condiciones de producción de la Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano. Una vez calibrado el programa, inició la segunda fase, la cual consistió en simular los rendimientos del cultivo de maíz bajo diferentes niveles de agua disponible según condiciones de producción, edáficas y climáticas. En la fase tres se realizó el análisis estadístico para generar la función de producción que mejor explique la relación nivel de agua disponible-rendimiento. Así también se estableció la función de ganancias para determinar el nivel de agua disponible que genere la máxima ganancia. En la fase cuatro se determinaron las fechas de siembra óptimas para la Escuela Agrícola Panamericana, según los niveles de agua que maximizan la producción física y económica. Finalmente en la fase cinco se identificaron las zonas óptimas para la producción de maíz en el trópico de Guatemala.

### **2.1 FASE I**

La primera fase se desarrolló mediante la recopilación de datos climatológicos (período 1989-2010), edáficos, criterios de aplicación de riego y manejo de cultivo de maíz variedad Tuxpeño en Zamorano para la creación de archivos utilizados por el simulador en el siguiente orden.

#### **2.1.1 Condiciones climatológicas**

##### **Evapotranspiración**

Utilizando el programa “ETO Calculator”, el cuál es complemento de “AquaCrop Model” se calculó el archivo de evapotranspiración mensual en milímetros por día (mm/día) en el valle (Anexo 1), el cual fue posteriormente importado al simulador. Para el cálculo se utilizó la siguiente información recolectada por la estación climatológica de Zamorano.

- Ubicación geográfica de la estación experimental (latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar) (Anexo 2)
- Comportamiento promedio mensual de temperatura máxima y mínima en °C (Anexo 3)
- Comportamiento promedio mensual de humedad relativa en porcentaje (Anexo 4).

- Comportamiento promedio mensual de velocidad del viento en metros/segundo (Anexo 5).
- Comportamiento promedio mensual de radiación solar en calorías/cm<sup>2</sup> (Anexo 6).

### **Precipitación pluvial**

Utilizando la información recolectada por la estación climatológica de Zamorano, se creó en el simulador el archivo de precipitación promedio mensual en milímetros. Esta información se presenta en el Anexo 7.

#### **2.1.2 Condiciones de suelo**

Utilizando los resultados del análisis de las propiedades físicas de los suelos de Zamorano disponibles en la unidad de Maquinaria y Riego, se crearon tres archivos sobre las propiedades físicas de los suelos de San Nicolás (pivote central), por ser el lugar destinado para la producción de maíz. La razón por la cual se crearon tres archivos fue porque el estudio de propiedades físicas utilizado reporta tres diferentes perfiles de suelo en el pivote central. Para crear cada archivo se utilizó la siguiente información, la cual se especifica en el Anexo 8.

- Número de horizontes en el perfil
- Grosor (metros)
- Textura
- Existencia o no de pie de arado (profundidad en metros a la que se encuentra)
- Contenido de humedad a punto de marchitez permanente (%)
- Contenido de humedad a capacidad de campo (%)
- Contenido de humedad a punto de saturación (%)

#### **2.1.3 Condiciones de desarrollo del cultivo de maíz**

Utilizando información proporcionada por la empresa universitaria de producción de granos y semillas sobre la descripción de la variedad de maíz Tuxpeño, revisión bibliográfica, y entrevistas personales con profesores de Zamorano se generó el archivo que describe las etapas de desarrollo de la planta de maíz. Para esto se introdujo la siguiente información y se especifica en el Anexo 9.

- Tipo de cultivo
- Clasificación según eficiencia para fijar CO<sub>2</sub>
- Método de siembra
- Duración del ciclo de crecimiento (días desde siembra hasta madurez fisiológica)
- Densidad de siembra (plantas/hectárea)

- Días para emergencia
- Días para alcanzar la máxima cobertura foliar
- Días para el inicio de senescencia
- Días a madurez fisiológica
- Días a floración
- Duración de la floración (días)
- Días para que el sistema radicular alcance la máxima profundidad
- Índice de cosecha de referencia ( % de la biomasa producida)

#### **2.1.4 Condiciones de manejo**

##### **Manejo del cultivo de maíz**

Utilizando información proporcionada por la empresa universitaria de producción de granos y semillas y revisión bibliográfica se generó el archivo que describe las prácticas culturales en el cultivo de maíz. Para esto se introdujo la siguiente información según la situación real en la finca San Nicolás de la Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano.

- Condición de fertilidad del suelo durante el cultivo (cerca de óptima)
- Porcentaje del suelo cubierto por cobertura natural o plástica (0%)
- Ocurrencia o no de escorrentía superficial (si)
- Existencia o no de muro de contención de agua (no)

##### **Aplicación de riego**

Utilizando la información proporcionada por la unidad de maquinaria y riego de Zamorano y entrevista personal con el encargado de la misma, se generaron cuatro archivos con los mismos criterios de aplicación de riego como parte del manejo del cultivo, variando únicamente el porcentaje de agotamiento permitido (0, 20, 40 y 60 por ciento). La información imputada fue:

- Modo de riego (generar un calendario de aplicación de riego)
- Método de riego (aspersión)
- Criterio de tiempo (según porcentaje de agotamiento permitido)
- Criterio de cantidad a aplicar (regresar a capacidad de campo).

## 2.2 FASE II

### 2.2.1 Simulación

Para realizar la simulación se inició el programa y se seleccionaron los archivos generados en la fase I. Al seleccionar el archivo de interés, automáticamente el programa utiliza estas condiciones durante la simulación. Con el fin de observar el cambio en el rendimiento causado por la variación de la fecha de siembra a lo largo del año, se realizaron dos simulaciones por mes, la primera sembrando en la primera quincena del mes (día 1) y la segunda sembrando a partir de la segunda quincena (día 15). Debido a que se crearon tres archivos diferentes sobre propiedades físicas de suelo, inicialmente se corrió el programa bajo estas tres condiciones y asumiendo un porcentaje de agotamiento permisible del 40 por ciento. Al observar que la simulación no reportó diferencias en el rendimiento según tipo de suelo, las siguientes simulaciones se realizaron utilizando solamente el archivo de suelo tomado de la calicata número 10.

Las siguientes simulaciones correspondieron a variar el porcentaje de agotamiento permisible desde cero hasta 60 por ciento, para lo cual se utilizaron los cuatro archivos sobre aplicación de riego generados en la fase I. Los resultados generados bajo los cuatro porcentajes de agotamiento permisible se tomaron como observaciones para determinar la función de producción.

## 2.3 FASE III

### 2.3.1 Selección de la función de producción

Para seleccionar la función que mejor expresara la relación insumo producto se usó estadística inferencial, específicamente utilizando el análisis de regresión múltiple entre variaciones (lineal, cuadrática, etc.) propuestas de la variable independiente ( $m^3$  /ha de agua aplicada o precipitada) y la variable dependiente (rendimiento en Kg/ha), para finalmente seleccionar las variables que formen el modelo que mejor representó la relación insumo producto.

Los modelos planteados de regresión múltiple con p variables predictivas se expresaron en la forma:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} + e_i \quad [2]$$

Para  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Para el análisis estadístico se usó el programa “Microsoft Office Excel” para generar el análisis de regresión y varianza. Los parámetros evaluados en el análisis de regresión de cada modelo fueron: el coeficiente de correlación múltiple, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y su consecuente  $R^2$  ajustado y el error típico (también conocido como error estándar). Para el análisis de varianza se evaluaron los siguientes parámetros: valor

F, valor crítico F, estadístico T, valor P y finalmente se hizo el análisis de residuales (residuos estándares).

### **2.3.2 Determinación de la función de ganancias**

Después de seleccionar el modelo que mejor describe la función de producción, se procedió a determinar la función de ingresos (I), asignando un precio promedio ( $P_y$ ) por kg de maíz producido y vendido (Y). Al mismo tiempo se determinó la función de costos variables (C), multiplicando el nivel de insumo utilizado (X) por el precio del mismo ( $P_x$ ). Una vez determinadas las funciones anteriores, la función de ganancias simplemente se obtuvo al sustraer de la función de ingresos (I) la función de costos variables (C).

### **2.3.3 Maximización física y económica**

Para determinar el nivel de insumo que maximiza la producción se determinó la primera derivada de la función de producción, fisiológicamente esta derivada representa el producto físico marginal. Para alcanzar la máxima producción el producto físico marginal debe ser igual a cero. Para la maximización económica, simplemente se utilizó el siguiente principio económico:

$$\text{Ingreso marginal} = \text{Costo marginal} \quad [3]$$

Del principio anterior el ingreso marginal es igual al producto físico marginal por el precio del producto ( $IM = PFM \cdot P_y$ ) y el costo marginal es el costo del insumo ( $P_x$ ); la cantidad de insumo que maximiza la función de ganancias se determinó igualando el producto físico marginal a la relación precio del insumo, precio del producto ( $PFM = P_x / P_y$ ).

### **2.3.4 Determinación de precio del insumo y producto**

El precio del maíz se determinó según los precios promedios alcanzados (Lempiras/quintal) en el mercado hondureño en los últimos años (2007-2010). En el caso del precio del recurso agua, se utilizó la aproximación realizada en 2004 por Daniel Rivas en su proyecto especial de graduación para el agua proveniente del Cerro Uyuca ya que no existe un costo para el agua proveniente del Cerro Santa Inés, que es la que realmente se utilizar para riego. Esta aproximación sugiere que la tarifa por metro cúbico de agua para Zamorano debe ser \$ 0.19.

El agua proveniente del Cerro Santa Inés por su calidad podría fácilmente ser utilizada para consumo humano y agroindustrial por lo que el valor del agua proveniente del Cerro Uyuca es un buen aproximado del costo por metro cúbico (Granadino, 2010. Comunicación personal).

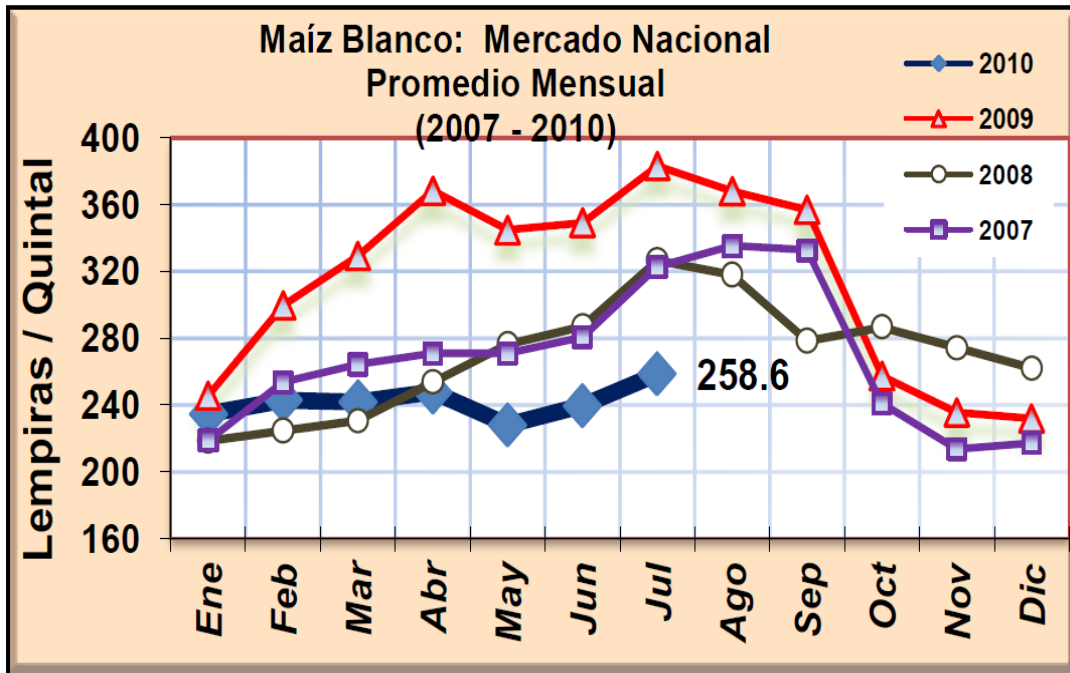


Figura 2. Precio promedio mensual del maíz blanco en el mercado hondureño en Lempiras/quintal.

Fuente. Secretaria de Agricultura y Ganadería con datos tomados de SIMPAH.

La Figura 2 muestra la tendencia del precio del maíz blanco en los últimos años. Se puede observar que en términos generales los precios altos (mayor a L. 300.00 /quintal) se alcanzan en los meses de julio a septiembre, mientras los precios bajos se alcanzan en los últimos meses del año llegando a precios alrededor de L. 220.00/quintal. Para el presente estudio se utilizó un precio promedio alcanzado durante los años 2007 y 2008, los precios del año 2009 no se tomaron en cuenta ya que en este año los precios se incrementaron, principalmente por los problemas políticos debido a los acontecimientos políticos ocurridos en junio en Honduras. El precio promedio para los años 2007 y 2008 es de L. 269.58 /quintal, este precio más un bono de L. 60.00 /quintal pagado por la Escuela Agrícola Panamericana a los productores de semilla, resulta en un total de L. 329.58/quintal (US \$ 17.44/quintal). Según el Banco Central de Honduras (BCH), 2010, la tasa de cambio de referencia al 8 de septiembre de 2010 es de L.18.8951/\$1.00

#### 2.4 FASE IV

La fase cuatro consistió en determinar por medio del costo en el que se incurre por concepto de uso del recurso agua en la producción de maíz (tomando en cuenta que el agua de lluvia no representa un costo), las fechas de siembra óptimas para el cultivo en la Escuela Agrícola Panamericana. Para realizar esta etapa fue necesario conocer los niveles de uso de agua que maximicen la producción física y económica.

## 2.5 FASE V

La fase final del proyecto de investigación consistió en identificar los departamentos de Guatemala con mayor aptitud para la producción de maíz. Aptitud basada únicamente en la precipitación pluvial ya que se asumió que los demás factores que AquaCrop Model toma en cuenta serían constantes, para esto se siguió la siguiente metodología:

- Se recolectó información sobre precipitación pluvial histórica colectada por estaciones climatológicas distribuidas a lo largo de todo el territorio nacional proporcionada por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). El Anexo 17 muestra la distribución de estaciones climatológicas en Guatemala y el Anexo 18 muestra la distribución de estaciones por departamento y zona de vida.
- Una vez digitalizada la información por la estación climatológica y el departamento donde se encuentra ubicada, se procedió a crear archivos de precipitación pluvial para cada uno de los departamentos ubicados en el trópico de Guatemala, ya que en esta zona se concentra el 75 por ciento de la producción nacional y la variedad de maíz Tuxpeño es recomendada para ser cultivada en el trópico. El Anexo 19 muestra la información imputada en cada uno de los archivos utilizados durante la simulación.
- Al tener los archivos se procedió nuevamente al proceso de simulación, variando únicamente la precipitación pluvial, ya que no se consideró el uso de riego. Al terminar la simulación para cada departamento ubicado en el trópico guatemalteco se identificaron los departamentos con mayor aptitud para la producción de maíz y finalmente las fechas de siembra sugeridas en cada uno de ellos.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 FASE I

Se recopiló información sobre condiciones climáticas, edáficas, criterios de aplicación de riego y condiciones generales del manejo que se le da al cultivo de maíz en la Escuela Agrícola Panamericana. Así también se describió las principales características del desarrollo fenológico de la planta de maíz variedad Tuxpeño bajo las condiciones de clima y suelo anteriormente recolectada. Finalmente, con la información recolectada y tabulada se crearon archivos para su utilización en el proceso de simulación. Los archivos creados pueden verse en los Anexos del 1 al 9.

#### 3.2 FASE II

Se corrió el simulador variando el porcentaje de agotamiento permisible desde cero hasta 60 por ciento en cambios ascendentes de 20 puntos porcentuales. Los resultados obtenidos bajo los diferentes escenarios se presentan de forma resumida en la siguiente gráfica. Los Anexos 10, 11, 12 y 13 contienen los resultados de forma explícita según porcentaje de agotamiento permisible.

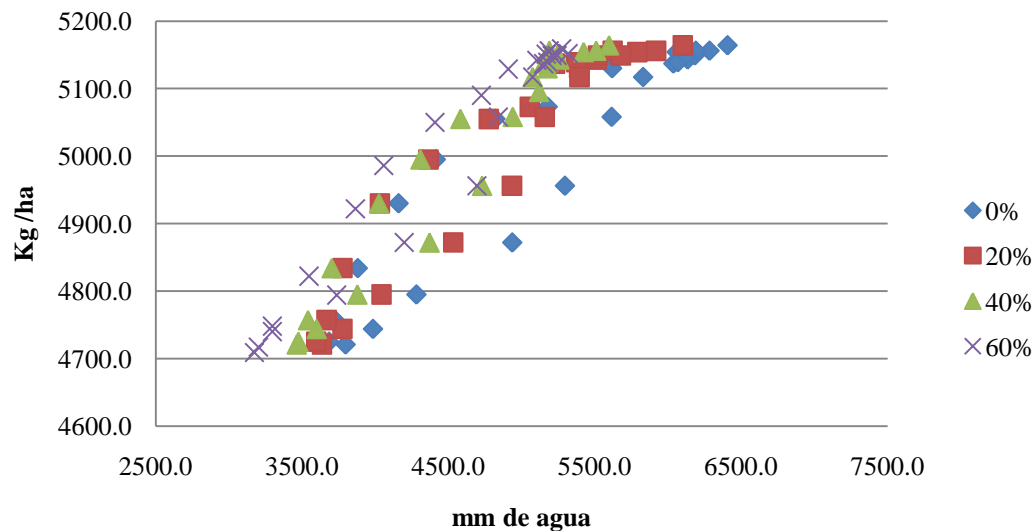


Figura 3. Rendimiento de maíz bajo cuatro niveles de agotamiento permisible.

En la Figura 3 se presentan los resultados en kilogramos/hectárea generados por el simulador “AquaCrop Model” bajo cuatro diferentes porcentajes de agotamiento de agua disponible. Se observa que al utilizar un mayor porcentaje de agotamiento se presenta una reducción en la cantidad de agua utilizada pero no en los rendimientos alcanzados. La reducción de la cantidad total de agua se debe al menor uso de riego ya que la precipitación es la misma. Todos los valores mostrados en la gráfica anterior fueron utilizados como observaciones en el análisis de regresión para determinar la función de producción en la siguiente fase. Es necesario recalcar que no es posible controlar el porcentaje de agotamiento permisible durante los meses de mayor precipitación ya que la intensidad de lluvia aumenta, llegando incluso a anegar los suelos de la finca. Además como se indicó en la revisión bibliográfica el porcentaje de agotamiento permisible debe variar según la fase de desarrollo fenológico de la planta.

### 3.3 FASE III

#### 3.3.1 Selección de la función de producción (modelando la función de producción)

Con los resultados obtenidos en la fase II y mediante análisis de regresión entre la cantidad de agua en metros cúbicos por hectárea y el rendimiento en kilogramos de maíz por hectárea se escogió el modelo que mejor representa la relación insumo-producto (agua-rendimiento). A continuación el análisis para determinar el mejor modelo.

##### Modelo 1 (función lineal)

$$f(x) = 4,180.20 + 0.1715x \quad [4]$$

(104.8)      (20.8)

Este modelo asume que la función de producción respondería de forma constante (en línea recta) a medida que aumentemos el nivel de agua utilizada. El modelo 1 cumple con los criterios estadísticos para calificarlo como aceptable, sin embargo, en la producción agrícola se presentan rendimientos marginales decrecientes por el uso de cualquier insumo, en este caso el recurso agua. Por esta razón el modelo uno no es el mejor modelo. En el Anexo 14 se encuentra el análisis de regresión y de varianza para el modelo 1.

##### Modelo 2 (modelo cuadrático)

$$f(x) = 3,047.3 + 0.6665x - 0.00005x^2 \quad [5]$$

(16.5)      (8.4)      (6.3)

El modelo 2 cumple con los criterios estadísticos para calificarlo como aceptable. Además el modelo cuadrático refleja en su comportamiento rendimientos marginales decrecientes, por esta razón el modelo puede ser utilizado para representar la función de producción.

**Modelo 3 (modelo cúbico)**

$$f(x) = 6,234.98 - 1.4086x + 0.0004x^2 - 0.00000003x^3 \quad [6]$$

(6.2)            (2.2)            (2.8)            (3.2)

El modelo 3 cumple con los criterios estadísticos para calificarlo como aceptable, sin embargo al analizar los signos de los coeficientes y el comportamiento de la función de producción esta no se ajusta a la respuesta que las plantas tienen a medida que se incrementa la cantidad de agua utilizada. En el Anexo 15 se encuentra el análisis de regresión y de varianza para el modelo 3.

**Modelo 4 (modelo de grado 4)**

$$f(x) = 1,4747.95 - 8.9558x + 0.0029x^2 - 0.0000004x^3 + 1.85E - 11x^4 \quad [7]$$

(2.7)            (1.9)            (1.8)            (1.7)            (1.6)

El modelo 4 no cumple con los criterios estadísticos para calificar como aceptable el modelo, ya que para todos los coeficientes la significancia estadística es muy baja, debido a que la probabilidad de que los coeficientes sean iguales a 0 es mayor al 5 por ciento. Dado que a partir del modelo de grado 4 se encontró insignificancia estadística, hasta aquí se terminó el análisis de modelos. En el Anexo 16 se encuentra el análisis de regresión y de varianza para el modelo 4.

Después de analizar diferentes modelos (lineal, cuadrático y cúbico y grado cuatro) se determinó que el modelo cuadrático es el que cumple los criterios de significancia estadística y además su comportamiento se asemeja al observado en la mayoría de funciones de producción agrícola.

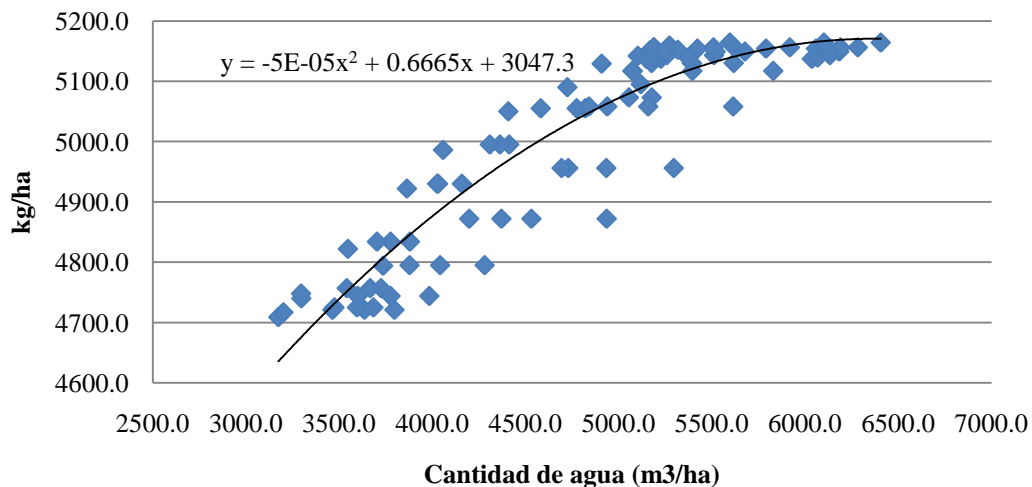


Figura 4. Función de producción de maíz bajo diferentes niveles de agua aplicada.

La figura 4 representa los resultados obtenidos del total de simulaciones realizadas, al mismo tiempo muestra el modelo matemático que mejor describe los resultados obtenidos. En este caso el modelo explica el comportamiento de la variable dependiente (kg de maíz/ha) por medio de la variable independiente ( $m^3$  de agua/ha). El modelo matemático obtenido es el siguiente:

$$f(x) = 3,047.3 + 0.6665x - 0.00005x^2 \quad [8]$$

### **Interpretación del análisis de regresión y varianza para el modelo seleccionado**

Cuadro 2. Análisis de regresión para el modelo cuadrático.

Estadística de Regresión	
R Múltiple	0.9352
R <sup>2</sup>	0.8746
R <sup>2</sup> Ajustado	0.8719
Error Estándar	57.8988
Observaciones	96

El análisis de regresión para el modelo seleccionado presentado en el cuadro anterior, indica que existe una correlación de 93.51 por ciento entre los resultados observados (generados por el simulador) y los resultados predichos por la función de producción seleccionada. Además indica que el 87.46 por ciento de la variación en la variable dependiente y (kg/ha) es explicada por el cambio en la variable independiente x ( $m^3$  de agua), porcentaje que se reduce al 87.19 por ciento al incluir la variable  $x^2$ . Finalmente el error estándar indica que la desviación de los residuos (diferencia entre el valor observado y el valor predicho) es de 57.9 kg.

Cuadro 3. Análisis de varianza para el modelo seleccionado.

ANOVA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Significante F
Regresión	2	2,173,619.1812	1,086,809.5906	324.2012	1.19384E-42
Residual	93	311,760.9750	3,352.2685		
Total	95	2,485,380.1563			

	Coefficientes	Error Estándar	t test	Valor P	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepto	3,047.2742	184.2293	16.5407	1.89849E-29	2,681.4312	3,413.1171
X	0.6665	0.0794	8.3922	5.10722E-13	0.5088	0.8242
X2	-0.00005	8.36087E-06	-6.2564	1.19259E-08	-6.89118E-05	-3.57057E-05

Los resultados de mayor relevancia encontrados en el análisis de varianza son: para el modelo en general el valor F es aceptable (F significativo es menor a 0.05), tanto los coeficientes como el intercepto tienen significancia estadística en el modelo, ya que la prueba t para estos resultados es aceptable a un nivel de confianza del 95 por ciento (mayor de 1.96) lo cual se ve reflejado con el valor P (probabilidad de que el valor de los coeficientes e intercepto sean igual a 0 es menor al 0.05). Finalmente los resultados del análisis de residuales se presentan en la siguiente figura.

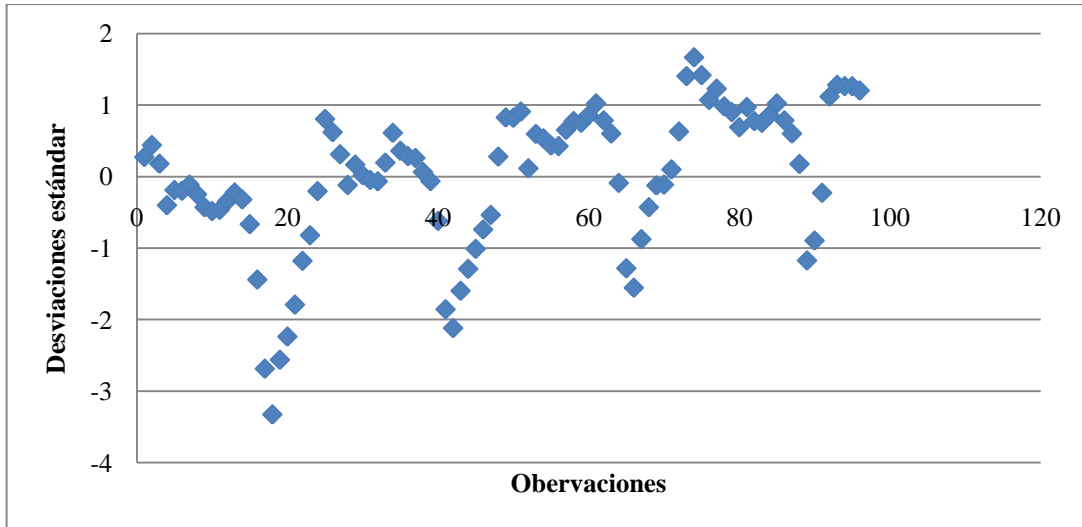


Figura 5. Análisis de residuos del modelo seleccionado para la función de producción.

En la figura 5 se observa que la mayoría de las observaciones se encuentran entre 3 desviaciones estándar (positiva y negativa), además la sumatoria de los residuos resultó igual a 0 y una desviación estándar del error (residuos) igual a 1, estos parámetros verifican que los residuos están distribuidos aleatoriamente, sin embargo, existe cierto grado de colinealidad entre las variables independientes lo cuál era de esperar ya que se trata de la misma variable elevada al cuadrado.

### Determinación de la función de ganancias

La función de ganancias se determinó utilizando un precio de venta del maíz de \$ 0.38/kg (\$ 17.44/quintal) y un precio de por metro cúbico de agua de \$ 0.19. La función resultante es la siguiente:

$$\pi = 0.38f(x) - 0.19x \quad [9]$$

### Maximización física y económica

$$f'(x) = 0.6665 - 0.000105x = 0 \quad [10]$$

$$x = 6347.62$$

$$f(6,347.52) = 5,170.51$$

El resultado de la maximización de la producción física indica que la función de producción alcanza su máximo (5,170.51 kilogramos de maíz por hectárea) a un nivel de insumo de 6,347.52 metros cúbicos de agua (635 milímetros) aplicados según el requerimiento de la planta, situación que durante la época de lluvias bajo condiciones de campo no se puede controlar, al producir en los meses de mayor precipitación el desarrollo fenológico de la planta se ve afectado por exceso de humedad en el suelo como consecuencia de la alta intensidad de la lluvia.

Para probar que se trata de un máximo y no un mínimo se utilizó la prueba de la segunda derivada, para esto:

$$f''(x) = -0.000105 \quad [11]$$

Dado que  $f''(x)$  es menor que 0, entonces  $f(x)$  tiene un valor máximo.

Una vez determinada la función de ganancias, la maximización económica se realizó determinando el nivel de uso de insumo en el cual el producto físico marginal sea igual a la relación de precios ( $P_x/P_y$ ).

$$\begin{aligned} f'(x) &= 0.19/0.38 \quad [12] \\ f'(x) &= 0.6665 - 0.000105x = 0.19/0.38 \\ 0.1665 - 1.05E - 4x &= 0 \\ x &= 1,585.71 \end{aligned}$$

El resultado anterior indica que el máximo económico se alcanza al utilizar un nivel de 1,585.71 metros cúbicos de agua por hectárea (159 mm). Al utilizar este nivel de insumo aplicado mediante riego, la ganancia a obtener sería de:

$$\begin{aligned} f(1585.71) &= 3,047.3 + 0.6665(1,585.71) - 0.00005(1,585.71)^2 \\ f(x) &= 3,978.45 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pi &= 0.38(3,978.45) - 0.19(1,585.71) \\ \pi &= 1,210.53 \end{aligned}$$

El resultado anterior indica que la ganancia máxima a obtener por concepto de la producción y venta del maíz sería de \$ 1,210.53/hectárea asumiendo que el total de agua es aplicada como riego. Sin embargo, la precipitación pluvial no se contabiliza como costo, por esta razón a medida que menos cantidad de agua se necesite regar, mayor serán las ganancias. Hay que tener en cuenta que en la producción de maíz no solo se incurre en costo de agua, por lo tanto la ganancias reales serán menores.

Para determinar que se trata del máximo económico global y no parcial se varió el nivel de insumo positiva y negativamente (+-) y evaluó en la función de producción y posteriormente en la función de ganancias los resultados obtenidos de la siguiente manera:

$$f'(1,400) = 3,980.34$$

$$\begin{aligned} \pi &= 0.38(3,980.34) - 0.19(1,400) \\ \pi &= \mathbf{1,246.53} \end{aligned}$$

$$f'(1,800) = 4,246.93$$

$$\begin{aligned} \pi &= 0.38(4,246.93) - 0.19(1,800) \\ \pi &= \mathbf{1,271.83} \end{aligned}$$

Los resultados anteriores muestran que el máximo económico global se alcanzan efectivamente al utilizar un nivel de insumo de 1,585.71 metros cúbicos de agua (159 mm).

### **3.4 FASE IV**

#### **3.4.1 Determinación de la época de siembra para Zamorano basada en el costo del recurso agua**

Por medio de los resultados de la optimización física y económica de la función de producción y ganancias respectivamente, se procedió a evaluar la variación en el costo por concepto de agua a lo largo del año en Zamorano. Se sabe que para optimizar la producción se debe utilizar un total de 635 mm, pero para alcanzar el máximo beneficio económico bajo las condiciones establecidas se debe aplicar un máximo de 159 mm. Además se debe considerar que el agua de lluvia no se costea.

Los resultados pueden verse en el cuadro 4, los cuales muestran que para maximizar la producción, sin descuidar el máximo económico, Zamorano debería sembrar en dos temporadas, la primera empezando desde la primera quincena de abril hasta la primera quincena de mayo, la segunda empezando desde la segunda quincena de agosto hasta la segunda quincena de septiembre. Para el resto de temporadas, la cantidad de agua a aplicar mediante riego para alcanzar el nivel óptimo que maximice la producción es superior al nivel para alcanzar el nivel económico óptimo, por otro lado para los meses de mayor precipitación no se considera el análisis ya que en esta temporada (mayo a agosto) la intensidad de lluvia no se puede controlar.

Cuadro 4. Determinación de épocas de siembra para la Escuela Agrícola Panamericana.

Mes	Día	mm de riego acumulados	mm de lluvia acumulados	Nivel óptimo	Costo del agua de riego
1	1	366.8	35.7	635.0	NA
1	15	385.7	45.1	635.0	NA
2	1	367.7	90.4	635.0	NA
2	15	355.3	156.5	635.0	NA
3	1	284.5	233.1	635.0	NA
3	15	221.6	320.6	635.0	NA
4	1	147.8	411.8	635.0	28.1
4	15	82.1	468.7	635.0	15.6
5	1	15.5	510.2	635.0	2.9
5	15	0.0	515.0	635.0	NA
6	1	0.0	517.7	635.0	NA
6	15	0.0	520.8	635.0	NA
7	1	0.0	518.8	635.0	NA
7	15	0.0	524.3	635.0	NA
8	1	0.0	507.4	635.0	NA
8	15	25.7	468.1	635.0	4.9
9	1	70.1	402.8	635.0	13.3
9	15	118.6	318.4	635.0	22.5
10	1	169.7	218.0	635.0	NA
10	15	215.0	144.9	635.0	NA
11	1	268.3	78.0	635.0	NA
11	15	295.4	52.0	635.0	NA
12	1	314.7	39.3	635.0	NA
12	15	335.3	34.9	635.0	NA

NA: No aplica

### 3.5 FASE V

#### 3.5.1 Identificación de zonas con aptitud para el cultivo de maíz en Guatemala.

Los resultados generados por “AquaCrop Model” en la identificación de zonas óptimas son los siguientes:

Cuadro 5. Rendimientos potenciales de maíz en diferentes departamentos de Guatemala.

Departamento	Rendimiento potencial (kg/ha)	Época de siembra recomendada
Retalhuleu	4,285	abr-01
Escuintla	4,285	abr-01
Suchitepéquez	4,285	abr-01
Jalapa	4,278	jul-01
Chiquimula	4,278	jul-01
El Progreso	4,278	jul-01
Petén	4,278	jul-01
Santa Rosa	4,277	jul-01
Izabal	4,277	jul-01
Baja Verapaz	4,277	jul-01
Zacapa	4,277	jul-01
Jutiapa	4,176	jul-01
Quiché	4,175	jun-02
Alta Verapaz	4,171	jun-02

Fuente: AquaCrop Model

El cuadro 5 muestra el rendimiento potencial del cultivo de maíz en los departamentos ubicados en el trópico guatemalteco, los departamentos se encuentran ordenados del más al menos óptimo según el rendimiento. Para cada uno de los departamentos se indica además la época de siembra recomendada para alcanzar el máximo rendimiento.

Los resultados indican que la producción de maíz en Guatemala debería orientarse principalmente a la zona sur del país, específicamente a los departamentos de Retalhuleu, Suchitepéquez y Escuintla donde se dan los mayores rendimientos. Lograr que todo el maíz se produzca en esta zona resultaría muy difícil ya que la mayoría de productores son agricultores de subsistencia y cultivan en el lugar donde viven sin embargo productores comerciales deberían orientar sus plantaciones a esta zona.

Con respecto a la fecha de siembra, se observa que para los departamentos que reportaron los tres mayores rendimientos, la época de siembra recomendada es la primera quincena de abril, los demás departamentos deberían iniciar sus siembras en términos generales entre junio y julio.

## 4. CONCLUSIONES

- El modelo que mejor representa la respuesta del cultivo de maíz en términos de rendimiento ante distintos niveles de agua disponible es el cuadrático.
- El máximo económico en la producción de maíz se alcanza al utilizar un volumen de  $1,586 \text{ m}^3$  de agua por hectárea, lo que genera una ganancia de \$ 1,210.53 por hectárea.
- Si en Zamorano se necesita sembrar en época seca, existen dos temporadas óptimas, una que inicia en la primera quincena de abril hasta la primera quincena de mayo y otra que va desde la segunda quincena de agosto hasta la segunda quincena de septiembre.
- Los departamentos de Guatemala donde se alcanza los mayores rendimientos de maíz son Retalhuleu, Suchitepéquez y Escuintla, los tres ubicados en la zona sur.

## **5. RECOMENDACIONES**

- Continuar con la validación en campo de los resultados de simulación obtenidos con el modelo “AquaCrop Model”.
- Determinar el costo del agua utilizada con fines de riego en Zamorano y evaluar la factibilidad de cobrar una tarifa por su uso.
- Realizar el estudio para otros cultivos de interés comercial ya sea para Zamorano o regional.
- Usar “AquaCrop Model” para tomar decisiones del uso de insumos en la producción agrícola.

## 6. LITERATURA CITADA

Brito J. y Corado E. 2009. Desarrollo de un instrumento de diagnóstico visual para la optimización del uso de nitrógeno en maíz (*Zea mays*): Principios basados en el medidor de clorofila SPAD y la intensidad de verde. Tesis Ing. Agrónomo. Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano. Honduras. 60 p.

FAO, 2010. FAO crop model to simulate yield response to water homepage (on line). Roma, IT. Consultado 8 may. 2010. Disponible en <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>

Fuentes, M. 2005. Maíz para Guatemala: propuesta para la reactivación de la cadena agroalimentaria del maíz blanco y amarillo (en línea). FAO Guatemala, GT. Consultado 7 sep. 2010. Disponible en [http://www.pesacentroamerica.org/biblioteca/02\\_Maiz\\_para\\_%20Guatemala.pdf](http://www.pesacentroamerica.org/biblioteca/02_Maiz_para_%20Guatemala.pdf)

García M. et al. 2009. Deficit irrigation of cotton with AquaCrop (on line). Agronomy Journal no. 101:477–487. Wisconsin, US. American Society of Agronomy. Consultado 3 may. 2009. Disponible en <https://www.agronomy.org/publications/aj>

Herrarte et al. 2005. Desarrollo de estrategias para exportación de semilla certificada de maíz (*Zea mays* L.) de Guatemala hacia honduras (en línea). Tierra Tropical no. 1 (1): 45-50 Costa Rica. Universidad EARTH. Consultado 13 ago. 2010. Disponible en [usi.earth.ac.cr/tierratropical/...de.../7\\_v1-06\\_Herrarte.pdf](http://usi.earth.ac.cr/tierratropical/...de.../7_v1-06_Herrarte.pdf)

Lafitte H. 2001. El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción; fisiología del maíz tropical (en línea). Roma IT. FAO. Consultado 18 ago. 2010. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s00.htm>

Paliwal R. 2001. El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción; morfología del maíz tropical (en línea). Roma IT. FAO. Consultado 18 ago. 2010. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s00.htm>

Ramírez J. 2009. Análisis del impacto económico de la introducción de maíz transgénico con resistencia a insectos en Honduras. Tesis Ing. Agrónomo. Escuela Agrícola Panamericana, El Zamorano. Honduras. 52 p.

SAG, 2010. El cultivo de maíz en Honduras (en línea). Tegucigalpa, HN. Consultado 5 sep. 2009. Disponible en [www.sag.gob.hn/files/Infoagro/.../OtraInfo/Boletin\\_Cultivo\\_Maiz.pdf](http://www.sag.gob.hn/files/Infoagro/.../OtraInfo/Boletin_Cultivo_Maiz.pdf)

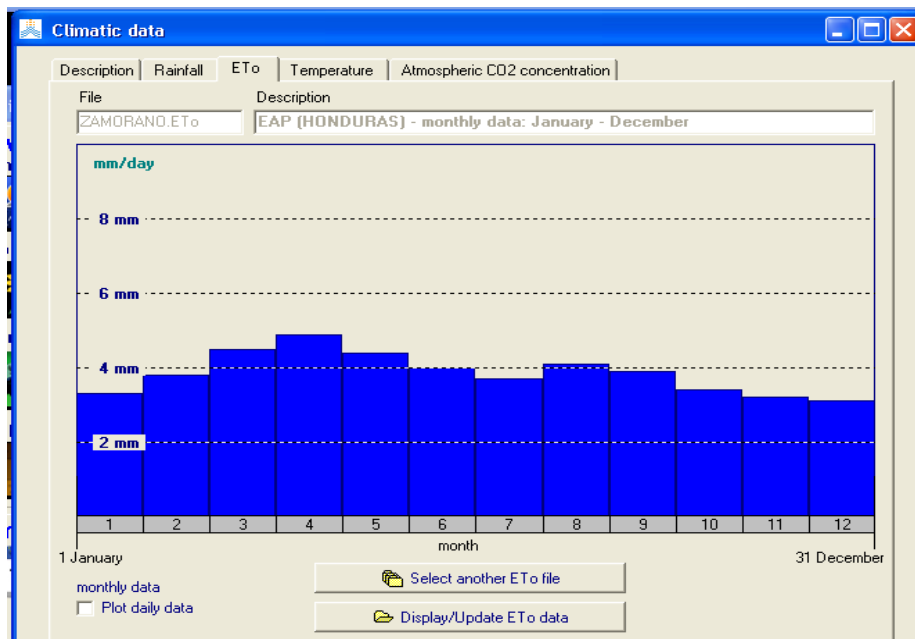
SIAR (Sistema Interactivo de Apoyo al Riego CL). 2010. Interpretación de constates hídricas del suelo (en línea). Chile. Consultado 28 jun. 2010. Disponible en <http://www.siar.cl/docs/resultados/glosario.pdf>

Steduto P. et al. 2009. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions (on line). Roma IT. FAO. Consultado 5 may. 2009. Disponible en: <http://www.fao.org/nr/water/docs/Stedutoetal2008.pdf>

UNFCCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). 2010. Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change (on line). Germany. Consultado 19 jul. 2010. Disponible en [http://unfccc.int/adaptation/nairobi\\_work\\_programme/knowledge\\_resources\\_and\\_publications/items/5403.php](http://unfccc.int/adaptation/nairobi_work_programme/knowledge_resources_and_publications/items/5403.php)

## 7. ANEXOS

Anexo 1. Evapotranspiración promedio en mm/día, para cada mes en Zamorano



Fuente: ETO Calculator.

Anexo 2. Ubicación geográfica de la estación experimental de Zamorano

File: ZAMORANO

**Station description**

Station: EAP  
Country: HONDURAS  
Latitude: 14.00 North (14 degrees 0 minutes)  
Longitude: -87.00 West (87 degrees 0 minutes)  
Altitude: 800 meter above sea level

**Meteorological Data**

Type: monthly meteorological data

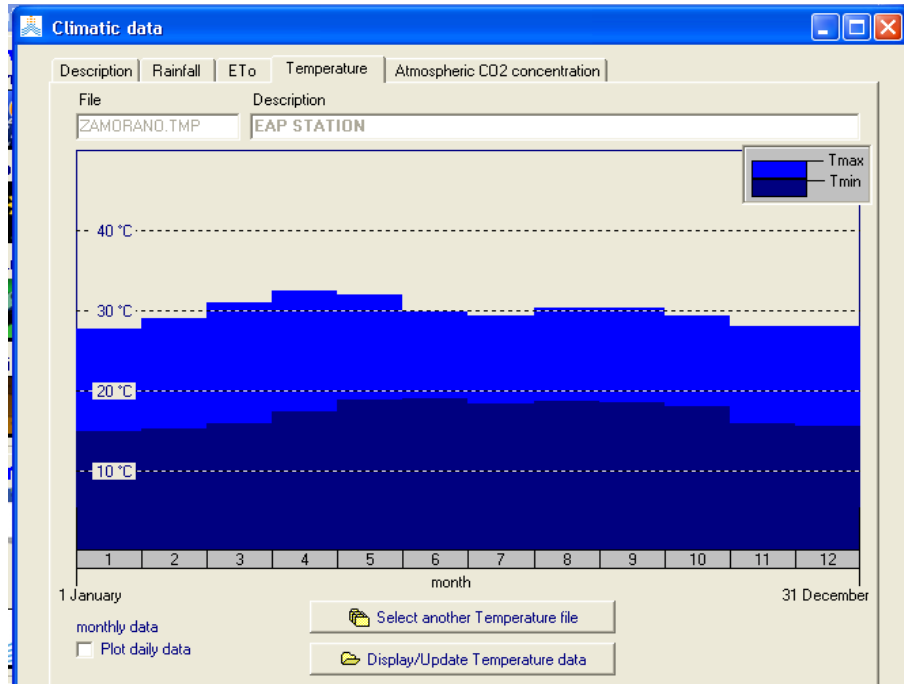
Time range  
Not linked to a specific year

First Month: January      Last Month: December

OK

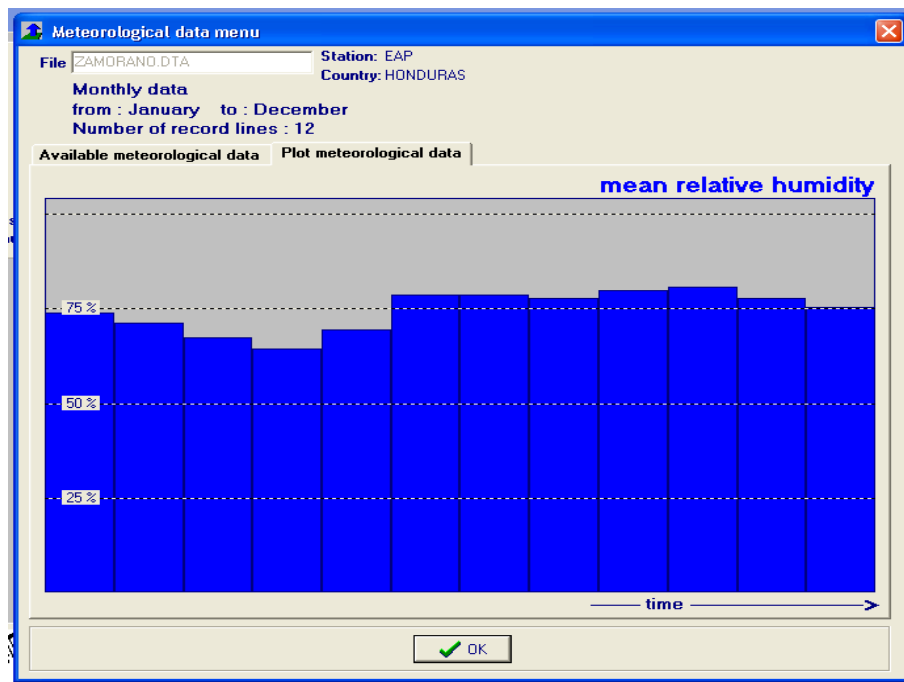
Fuente: Estación climatológica de Zamorano.

Anexo 3. Comportamiento promedio mensual de temperatura máxima y mínima en Zamorano.



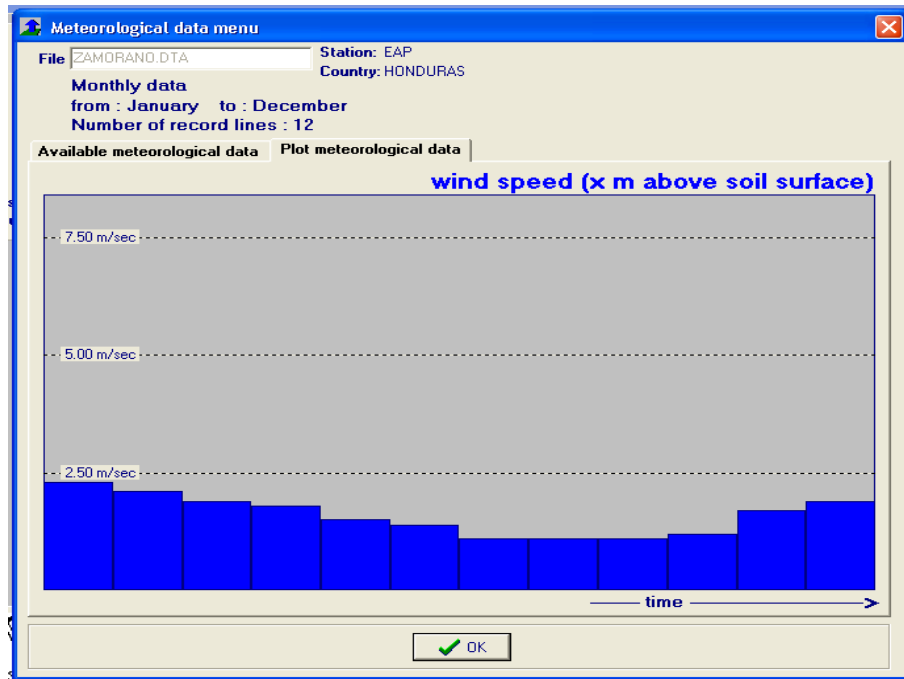
Fuente: Estación climatológica de Zamorano.

Anexo 4. Comportamiento promedio mensual de humedad relativa (%) en Zamorano

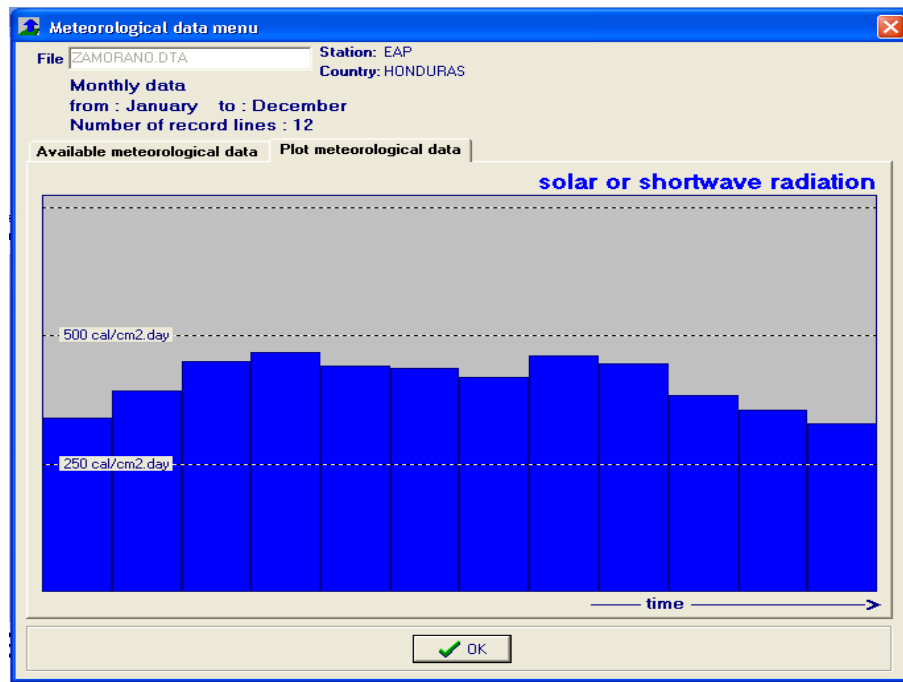


Fuente: Estación climatológica de Zamorano.

## Anexo 5. Comportamiento promedio mensual de velocidad del viento (m/s) en Zamorano

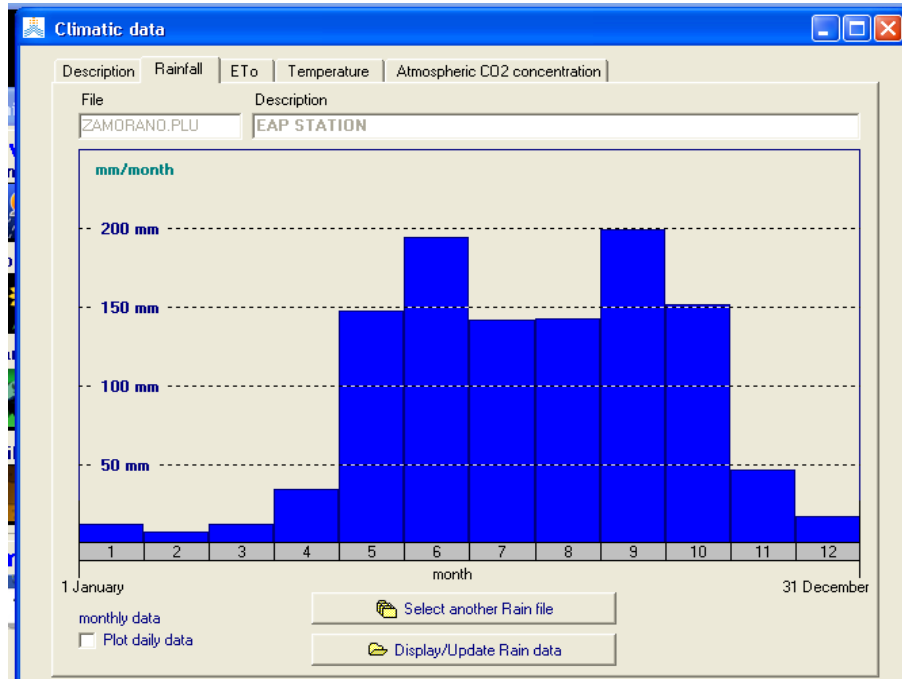


Fuente: Estación climatológica de Zamorano.

Anexo 6. Comportamiento promedio mensual de radiación solar en calorías/cm<sup>2</sup> en Zamorano

Fuente: Estación climatológica de Zamorano.

## Anexo 7. Precipitación promedio mensual mm/mes en Zamorano



Fuente: Estación climatológica de Zamorano.

## Anexo 8. Descripción de propiedades físicas de tres calicatas en los suelos de la Finca San Nicolás (pivote central) en Zamorano

Calicata	Horizonte	Grosor (m)	Textura	PMP %	CC %	SAT %	Prof. Pie de arado (m)
9	1	0.35	Franco arcilloso	23.1	35.0	39.6	0.30
	2	0.40	Arcilloso	29.3	36.7	40.6	
10	1	0.40	Franco arenoso	19.3	30.3	34.6	0.30
	2	0.18	Franco arcillo arenoso	20.0	32.0	47.0	
11	3	0.27	Arcilloso	39.0	54.0	55.0	0.30
	1	0.25	Franco arenoso	10.0	22.0	41.0	
	2	0.40	Arcilloso	44.5	52.6	56.9	

Fuente: Descripción de propiedades físicas de los suelos de Zamorano.

Anexo 9. Descripción del comportamiento del cultivo de maíz bajo condiciones de Zamorano utilizada para la simulación

<b>Desarrollo del cultivo de maíz variedad Tuxpeño</b>	
Tipo de cultivo	Producción de grano
Clasificación según eficiencia para fijar CO <sub>2</sub>	C4
Método de siembra	Siembra directa
Duración del ciclo de crecimiento (días desde siembra hasta madurez fisiológica)	100
Densidad de siembra (platas/hectárea)	55,000
Días para emergencia	7
Días para alcanzar la máxima cobertura foliar	50
Días para el inicio de senescencia	88
Días a madurez fisiológica	98
Días a floración	55
Duración de la floración (días)	12
Días para que el sistema radicular alcance la máxima profundidad	88
Índice de cosecha de referencia ( % de la biomasa producida)	30

Fuente: Información recopilada por el autor desde varias fuentes.

## Anexo 10. Resultados de la simulación utilizando 0 % de agotamiento permisible

	Mes	Día	mm de riego acumulados	mm de lluvia acumulados	Total m <sup>3</sup> /ha	kg/ha
<b>0 % DE AGOTAMIENTO</b>	1	1	380.1	35.7	4,158.0	4,930.0
	1	15	396.1	45.1	4,412.0	4,995.0
	2	1	391.6	90.4	4,820.0	5,055.0
	2	15	361.2	156.5	5,177.0	5,073.0
	3	1	328.6	233.1	5,617.0	5,130.0
	3	15	285.2	320.6	6,058.0	5,154.0
	4	1	228.8	411.8	6,406.0	5,164.0
	4	15	159.6	468.7	6,283.0	5,156.0
	5	1	103.1	510.2	6,133.0	5,143.0
	5	15	88.6	515.0	6,036.0	5,137.0
	6	1	89.0	517.7	6,067.0	5,139.0
	6	15	97.5	520.8	6,183.0	5,149.0
	7	1	100.1	518.8	6,189.0	5,156.0
	7	15	88.0	524.3	6,123.0	5,149.0
	8	1	75.5	507.4	5,829.0	5,117.0
	8	15	93.3	468.1	5,614.0	5,058.0
	9	1	126.7	402.8	5,295.0	4,956.0
	9	15	175.1	318.4	4,935.0	4,872.0
	10	1	210.0	218.0	4,280.0	4,795.0
	10	15	253.4	144.9	3,983.0	4,744.0
	11	1	301.6	78.0	3,796.0	4,721.0
	11	15	316.3	52.0	3,683.0	4,725.0
	12	1	333.1	39.3	3,724.0	4,757.0
	12	15	353.0	34.9	3,879.0	4,834.0

Fuente: AquaCrop Model

Anexo 11. Resultados de la simulación utilizando 20 % de agotamiento permisible

	Mes	Día	mm de riego acumulados	mm de lluvia acumulados	Total m <sup>3</sup> /ha	kg/ha
<b>20 % AGOTAMIENTO</b>	1	1	367.3	35.7	4,030.0	4,930.0
	1	15	391.1	45.1	4,362.0	4,995.0
	2	1	387.0	90.4	4,774.0	5,055.0
	2	15	348.9	156.5	5,054.0	5,073.0
	3	1	306.1	233.1	5,392.0	5,130.0
	3	15	258.4	320.6	5,790.0	5,154.0
	4	1	198.3	411.8	6,101.0	5,164.0
	4	15	123.1	468.7	5,918.0	5,156.0
	5	1	40.9	510.2	5,511.0	5,143.0
	5	15	7.6	515.0	5,226.0	5,137.0
	6	1	19.5	517.7	5,372.0	5,139.0
	6	15	31.2	520.8	5,520.0	5,149.0
	7	1	43.3	518.8	5,621.0	5,156.0
	7	15	43.4	524.3	5,677.0	5,149.0
	8	1	32.1	507.4	5,395.0	5,117.0
	8	15	47.7	468.1	5,158.0	5,058.0
	9	1	90.5	402.8	4,933.0	4,956.0
	9	15	134.7	318.4	4,531.0	4,872.0
	10	1	186.1	218.0	4,041.0	4,795.0
	10	15	232.6	144.9	3,775.0	4,744.0
	11	1	285.5	78.0	3,635.0	4,721.0
	11	15	307.5	52.0	3,595.0	4,725.0
	12	1	327.3	39.3	3,666.0	4,757.0
	12	15	342.6	34.9	3,775.0	4,834.0

Fuente: AquaCrop Model

## Anexo 12. Resultados de la simulación utilizando un 40 % de agotamiento permisible

	Mes	Día	mm de riego acumulados	mm de lluvia acumulados	Total m <sup>3</sup> /ha	kg/ha
<b>40 % DE AGOTAMIENTO</b>	1	1	366.8	35.7	4,025.0	4,930.0
	1	15	385.7	45.1	4,308.0	4,995.0
	2	1	367.7	90.4	4,581.0	5,055.0
	2	15	355.3	156.5	5,118.0	5,095.0
	3	1	284.5	233.1	5,176.0	5,130.0
	3	15	221.6	320.6	5,422.0	5,154.0
	4	1	147.8	411.8	5,596.0	5,164.0
	4	15	82.1	468.7	5,508.0	5,156.0
	5	1	15.5	510.2	5,257.0	5,143.0
	5	15	0.0	515.0	5,150.0	5,137.0
	6	1	0.0	517.7	5,177.0	5,139.0
	6	15	0.0	520.8	5,208.0	5,149.0
	7	1	0.0	518.8	5,188.0	5,156.0
	7	15	0.0	524.3	5,243.0	5,149.0
	8	1	0.0	507.4	5,074.0	5,117.0
	8	15	25.7	468.1	4,938.0	5,058.0
	9	1	70.1	402.8	4,729.0	4,956.0
	9	15	118.6	318.4	4,370.0	4,872.0
	10	1	169.7	218.0	3,877.0	4,795.0
	10	15	215.0	144.9	3,599.0	4,744.0
	11	1	268.3	78.0	3,463.0	4,721.0
	11	15	295.4	52.0	3,474.0	4,725.0
	12	1	314.7	39.3	3,540.0	4,757.0
	12	15	335.3	34.9	3,702.0	4,834.0

Fuente: AquaCrop Model

Anexo 13. Resultados de la simulación utilizando un 60 % de agotamiento permisible

	Mes	Día	mm de riego acumulados	mm de lluvia acumulados	Total m <sup>3</sup> /ha	kg/ha
<b>60 % AGOTAMIENTO</b>	1	1	350.6	35.7	3,863.0	4,922.0
	1	15	360.6	45.1	4,057.0	4,986.0
	2	1	350.3	90.4	4,407.0	5,050.0
	2	15	315.9	156.5	4,724.0	5,090.0
	3	1	257.7	233.1	4,908.0	5,129.0
	3	15	196.1	320.6	5,167.0	5,151.0
	4	1	115.4	411.8	5,272.0	5,159.0
	4	15	63.0	468.7	5,317.0	5,152.0
	5	1	0.0	510.2	5,102.0	5,142.0
	5	15	0.0	515.0	5,150.0	5,137.0
	6	1	0.0	517.7	5,177.0	5,139.0
	6	15	0.0	520.8	5,208.0	5,149.0
	7	1	0.0	518.8	5,188.0	5,156.0
	7	15	0.0	524.3	5,243.0	5,149.0
	8	1	0.0	507.4	5,074.0	5,117.0
	8	15	15.9	468.1	4,840.0	5,058.0
	9	1	66.5	402.8	4,693.0	4,956.0
	9	15	101.3	318.4	4,197.0	4,872.0
	10	1	155.5	218.0	3,735.0	4,794.0
	10	15	184.7	144.9	3,296.0	4,740.0
	11	1	239.3	78.0	3,173.0	4,709.0
	11	15	268.0	52.0	3,200.0	4,717.0
	12	1	290.2	39.3	3,295.0	4,748.0
	12	15	319.7	34.9	3,546.0	4,822.0

Fuente: AquaCrop Model

Anexo 14. Análisis de regresión y de varianza para el modelo 1 (lineal)

Estadística de Regresión	
R Múltiple	0.9065
R <sup>2</sup>	0.8218
R <sup>2</sup> Ajustado	0.8199
Error Estándar	68.6477
Observaciones	96

ANOVA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Significante F
Regresión	1	2,042,404.0933	2,042,404.0933	433.4004	5.65302E-37
Residual	94	442,976.0629	4,712.5113		
Total	95	2,485,380.1563			

	Coefficientes	Error Estándar	t test	Valor P	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepto	4,180.2026	40.1908	104.0089	7.4443E-99	4,100.4028	4,260.0023
X	0.1715	0.0082	20.8183	5.65302E-37	0.1552	0.1879

Anexo 15. Análisis de regresión de varianza para el modelo 3 (modelo cúbico)

Estadística de Regresión	
R Múltiple	0.9419
R <sup>2</sup>	0.8871
R <sup>2</sup> Ajustado	0.8834
Error Estándar	55.2197
Observaciones	96

ANOVA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Significante F
Regresión	3	2,204,852.7799	734,950.9266	241.0299	1.90862E-43
Residual	92	280,527.3764	3,049.2106		
Total	95	2,485,380.1563			

	Coefficientes	Error Estándar	t test	Valor P	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepto	6,234.9779	1,011.3823	6.1648	1.85127E-08	4,226.2855	8,243.6704
X	-1.4086	0.6528	-2.1578	0.0335	-2.7051	-0.1121
X2	0.0004	0.0001	2.8152	0.0060	0.0001	0.0007
X3	0.0000	0.0000	-3.2005	0.0019	-4.93313E-08	-1.15507E-08

Anexo 16. Análisis de regresión y varianza para el modelo 4

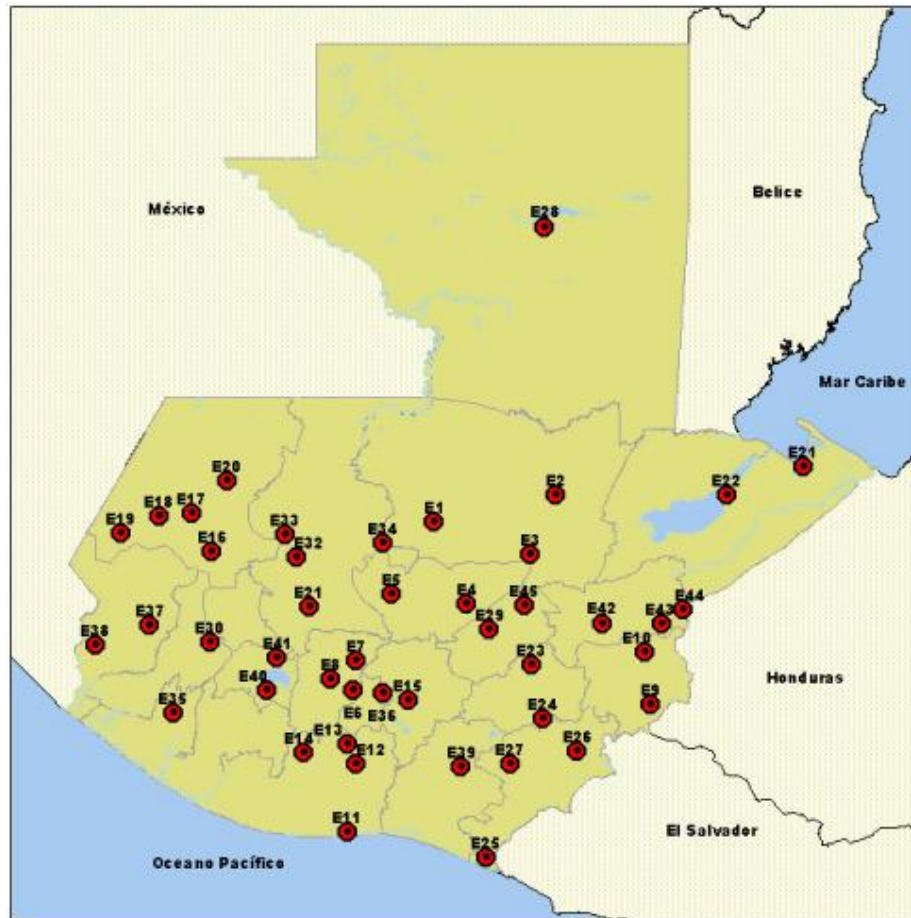
Estadística de Regresión	
R Múltiple	0.9435
R <sup>2</sup>	0.8902
R <sup>2</sup> Ajustado	0.8854
Error Estándar	54.7648
Observaciones	96

ANOVA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Significante F
Regresión	4	2,212,454.7062	553,113.6766	184.4216	9.28357E-43
Residual	91	272,925.4500	2,999.1808		
Total	95	2,485,380.1563			

	Coefficientes	Error Estándar	t test	Valor P	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepto	14,747.9488	5,440.3949	2.7108	0.0080	3,941.2729	25,554.6247
X	-8.9558	4.7845	-1.8718	0.0644	-18.4596	0.5480
X2	0.0029	0.0016	1.8351	0.0698	-0.0002	0.0059
X3	-3.82815E-07	2.21533E-07	-1.7280	0.0874	-8.22862E-07	5.72321E-08
X4	1.85716E-11	1.16651E-11	1.5921	0.1148	-4.59972E-12	4.1743E-11

Anexo 17. Distribución de estaciones climatológicas propiedad del INSIVUMEH en Guatemala



Fuente: INSIVUMEH

## Anexo 18. Distribución de estaciones experimentales por departamento y zona de vida

Departamento	Zona Productora	Estación
Petén	Trópico	Flores (E28)
Alta Verapaz	Trópico	Coban (E1)
Alta Verapaz	Trópico	Cahabon (E2)
Quiché	Trópico	Chixoy Quiché (E34)
Quiché	Trópico	Chinique (E21)
Quiché	Trópico	Chuitinamit (E32)
Quiché	Trópico	Nebaj (E33)
Jutiapa	Trópico	Asunción Mita (E26)
Jutiapa	Trópico	Quesada (E27)
Huehuetenango	Altiplano	Huehuetenango (E16)
Huehuetenango	Altiplano	Todos Santos (E17)
Huehuetenango	Altiplano	Cuilco (E19)
San Marcos	Altiplano	San Marcos (E37)
San Marcos	Altiplano	Catarina (E38)
Retalhuleu	Trópico	Retalhuleu (E35)
Santa Rosa	Trópico	Los Esclavos (E39)
Chimaltenango	Altiplano	Alameda ICTA(E6)
Chimaltenango	Altiplano	San Martin J. (E7)
Chimaltenango	Altiplano	Balanyá (E8)
Escuintla	Trópico	Puerto de San José (E11)
Escuintla	Trópico	Escuintla (E12)
Escuintla	Trópico	Sabana Grande (E13)
Escuintla	Trópico	Camantulul (E14)
Quetzaltenango	Altiplano	Labor Valle (E30)
Suchitepéquez	Trópico	Promedio (Reu y Escuintla)
Izabal	Trópico	Puerto Barrios (E21)
Izabal	Trópico	Las Vegas (E22)
Jalapa	Trópico	Potrero Carrillo (E23)
Jalapa	Trópico	Ceibita (E24)
Chiquimula	Trópico	Esquipulas (E9)
Chiquimula	Trópico	Camotán (E10)
Baja Verapaz	Trópico	San Jeronimo (E4)
Baja Verapaz	Trópico	Cubulco (E5)

## Continuación Anexo 18.

Totonicapán	Altiplano	Promedio (Quet y Sololá)
Guatemala	Altiplano	INSIVUMEH (E15)
Zacapa	Trópico	La Fragua (E42)
Zacapa	Trópico	La Unión (E43)
Zacapa	Trópico	Pasabien (E449)
Sololá	Altiplano	Santiago Atitlán (E40)
Sololá	Altiplano	El Tablon (E41)
El Progreso	Trópico	Morazán (E29)
El Progreso	Trópico	Albores (E45)
Sacatepéquez	Altiplano	Zuiza Contenta (E36)

Fuente: INSIVUMEH

Anexo 19. Precipitación promedio mensual (mm) por departamentos del trópico guatemalteco

Departamento	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Alta Verapaz	118.0	82.2	98.7	160.7	99.3	283.9	291.0	263.6	289.2	267.2	207.1	125.9
Baja Verapaz	8.7	2.8	9.6	114.5	45.4	207.7	146.4	174.5	193.3	100.8	34.6	15.2
Chiquimula	6.8	4.1	12.1	132.4	42.9	286.1	229.7	225.9	301.1	150.9	35.0	12.9
El Progreso	13.0	13.5	13.3	124.7	43.6	229.7	175.1	215.2	302.9	186.3	85.9	27.9
Escuintla	7.2	11.0	36.6	342.2	132.7	488.2	338.5	374.9	500.9	457.9	148.7	18.5
Izabal	215.7	128.6	109.3	147.3	119.3	229.2	331.9	288.7	277.8	296.6	332.2	259.3
Jalapa	7.9	3.1	11.2	114.1	29.3	225.2	171.8	169.1	228.5	130.0	61.3	11.3
Jutiapa	1.2	1.7	4.0	125.9	29.4	258.6	176.8	195.8	260.2	147.7	24.5	3.7
Petén	68.0	28.4	32.2	144.3	74.5	211.4	213.4	205.7	281.2	252.9	162.5	110.0
Quiché	17.1	13.2	23.7	115.8	52.9	261.7	203.9	221.7	258.8	170.1	74.1	28.2
Retalhuleu	10.3	10.0	45.9	366.5	156.2	484.1	369.7	375.0	545.8	477.3	146.3	28.2
Santa Rosa	0.6	3.8	9.9	206.0	44.7	319.0	209.4	266.2	340.7	236.3	59.5	9.6
Suchitepéquez	8.8	10.5	41.2	354.3	144.5	486.1	354.1	374.9	523.3	467.6	147.5	23.4
Zacapa	18.9	11.9	14.4	104.0	32.7	220.9	150.0	163.3	197.4	118.4	45.9	26.6

Fuente: INSIVUMEH, adaptado por el autor.