



**FUNDACION
PRODUCE**
Sinaloa A.C.
ENLACE, INNOVACIÓN Y PROGRESO

SAGARPA

SECRETARÍA DE AGRICULTURA,
GANADERÍA, DESARROLLO RURAL,
PESCA Y ALIMENTACIÓN



GOBIERNO
DEL ESTADO
DE SINALOA

PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN TIEMPO REAL, VÍA INTERNET, PARA MAÍZ Y FRIJOL

Responsable:

Ernesto Sifuentes Ibarra

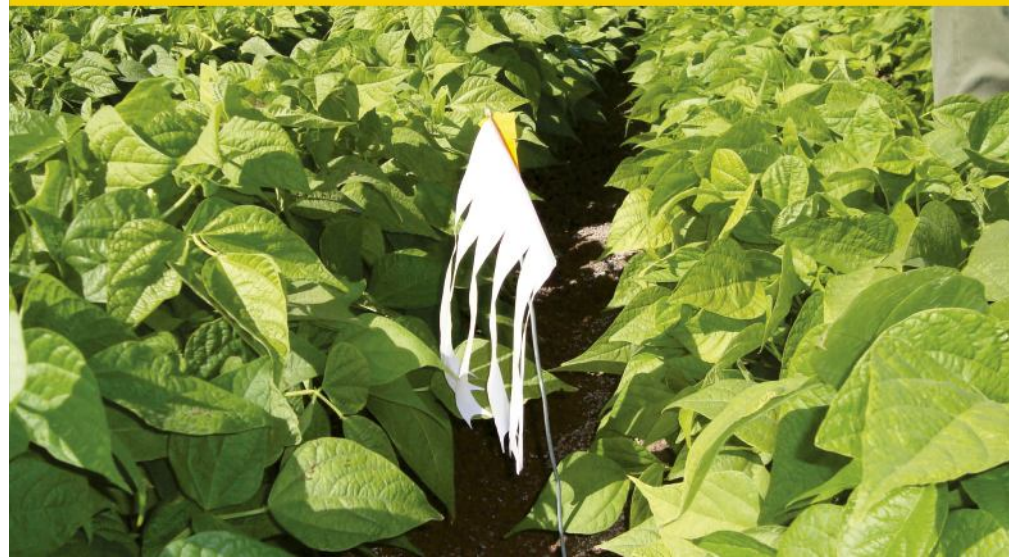
Institución Ejecutora:

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias

Colección



Tecnologías
para el
productor



Programación de riego en tiempo real, vía Internet, para maíz y frijol

Ernesto Sifuentes Ibarra*

* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

ÍNDICE

Introducción	7
Objetivos	8
Metodología	9
MODELO DE PROGRAMACIÓN INTEGRAL DEL RIEGO CALIBRADO Y VALIDADO PARA APLICARSE VÍA INTERNET	9
LÁMINAS Y FRECUENCIAS DE RIEGO PARA DIFERENTES FECHAS DE SIEMBRA PARA DIFERENTES FECHAS DE SIEMBRA PARA MAÍZ	9
MODELO-BASE DE PROGRAMACIÓN INTEGRAL DEL RIEGO PARA FRIJOL.....	10
SISTEMA COMPUTACIONAL CON LOS MODELOS DE PROGRAMACIÓN INTEGRAL DEL RIEGO PARA MAÍZ Y FRIJOL	10
Resultados obtenidos	11
Productos obtenidos	15
Conclusiones	16

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la cultura del agua en la agricultura de Sinaloa ha sido muy lento, ya que la eficiencia de riego en maíz es de tan solo 45 %, es decir, por cada 100 litros (L) de agua que entran a la parcela, solo 45 litros se quedan en la zona de raíces, el resto se pierde en el drenaje y por percolación¹ profunda, arrastrando fertilizantes móviles y suelo, provocando estrés en los cultivos y que cada vez se requiera mayor cantidad de fertilizantes, sin incrementos significativos en el rendimiento. Aunado a lo anterior, estas zonas se hacen cada vez más vulnerables a periodos de baja disponibilidad de agua como el que se presentó en 2003-2004 cuando solamente se tuvo 38 % de escurrimientos en el sistema de presas.

El frijol desde el punto de vista hídrico es de alta sensibilidad al manejo del agua; se puede decir que este limita mucho su producción, ya que se desconocen con precisión sus requerimientos hídricos y la oportunidad de aplicación. Aunque este cultivo es de baja demanda hídrica, el principal problema es que no se conoce cuánto ni cuándo deben aplicarse los riegos.

Es por esto que el presente proyecto pretende contribuir a mejorar sustancialmente el manejo de estos cultivos a través de la precisión en el riego, aplicando modelos de programación integral a través de Internet, y optimizado la calidad y cantidad del rendimiento, así como la eficiencia en el uso del agua.

En el Valle del Fuerte ya existen las condiciones para lograr tal objetivo, ya que se cuenta con la infraestructura y la experiencia suficientes. Durante el ciclo agrícola otoño-invierno (O-I) 2008-2009, con financiamiento de Fundación Produce Sinaloa, A.C., el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) a través del Departamento de Uso y Manejo del Agua, desarrolló un sistema computacional (IrriModel V.1.0) para programación integral y gestión del riego en tiempo real operado a través de Internet para papa.

¹ Percolar. Movimiento del agua en el suelo fuera de la zona de raíces.



Figura 1. Aspectos del desarrollo del tratamiento 2 que consiste en la evaluación de un coeficiente de consumo medio (1.05) un abatimiento de la humedad del suelo de 30 %.

Dicho sistema cuenta con las siguientes capacidades:

1. Elabora planes de riego bajo diferentes escenarios climáticos, de disponibilidad de agua y manejo.
2. Pronostica el riego con alto nivel de precisión de acuerdo al desarrollo del cultivo determinado por la acumulación de grados día crecimiento.
3. Genera y envía solicitudes de riego al módulo que le presta el servicio de riego, entre otras.

La ventaja de esta herramienta con respecto al método tradicional es que el productor, de una manera sencilla, aplica modelos de programación integral y gestión del riego en tiempo real que le permite en forma anticipada programar sus riegos. Otra ventaja es que la eficiencia de los riegos y fertilizantes se incrementa, ya que es posible mantener niveles óptimos de humedad y existe la posibilidad de reducir las cantidades de fertilizantes nitrogenados. Estas condiciones también reducen el riesgo de enfermedades.

OBJETIVOS

1. Generar un modelo base de programación integral del riego con aplicaciones vía Internet, para una variedad típica de frijol en el norte de Sinaloa.
2. Validar un modelo de programación integral del riego para aplicarse vía Internet en las variedades más importantes de maíz del norte de Sinaloa.
3. Determinar las láminas y frecuencias de riego para diferentes fechas

de siembra, para las variedades más importantes de maíz del norte de Sinaloa.

METODOLOGÍA

Modelo de programación integral del riego calibrado y validado para aplicarse vía Internet para el cultivo de maíz en el norte de Sinaloa

1. Selección de tres parcelas de validación de maíz (riego rodado) con una superficie total de 42 hectáreas y una parcela de 0.15 hectáreas de maíz (goteo) para validación del modelo.

2. Integración del modelo base de programación integral del riego de maíz y bases de datos (suelo, cultivos, sistemas de riego, etcétera) al sistema computacional IrriModel.

3. Preparación del modelo en el sistema IrriModel 1.0 (pruebas previas), para aplicarlo en parcelas de validación de maíz.

4. Caracterización física, química e hidráulica de las parcelas de validación de maíz.

5. Establecimiento de parcelas de validación de maíz en campo.

6. Monitoreo de las parcelas de maíz, monitoreo de la humedad del suelo, programación de riegos con el sistema IrriModel y evaluación de riegos.

7. Resiembra de las cuatro parcelas de validación de maíz después de la helada, que incluyó una parcela adicional de maíz de 0.15 hectáreas en el Campo Experimental Valle del Fuerte bajo riego por goteo.

8. En las cuatro parcelas de maíz la principal actividad fue la aplicación y evaluación de riegos. En la parcela de maíz bajo riego por gravedad (2 hectáreas) establecida en el Campo Experimental Valle del Fuerte, se aplicaron y evaluaron tres riegos de auxilio el 31 de marzo, el 19 de abril y el 16 de mayo. En la parcela bajo goteo hasta el 19 de junio se aplicaron 27 riegos. En la parcela del 1 de mayo se aplicaron tres riegos de auxilio (22 de abril de 2011, 17 mayo de 2011 y 28 de mayo de 2011). En la parcela de El Carrizo la aplicación de los riegos fue similar a los del 1 de mayo.

Láminas y frecuencias de riego para diferentes fechas de siembra

1. Pruebas previas de modelo con el sistema IrriModel, usando datos climáticos históricos.

2. Análisis e interpretación de la información de campo recabada en las parcelas de validación.

3. Captura de parcelas de maíz resembradas después de la helada del 4 de febrero de 2011.

4. Generación de calendarios de riego guía para diferentes fechas de siembra y suelos con el sistema IrriModel.

Modelo-base de programación integral del riego con aplicaciones vía Internet, para el cultivo de frijol en el norte de Sinaloa

1. Selección de tres hectáreas experimentales de frijol bajo riego por goteo.



Figura 2. Toma de datos de humedad y de desarrollo del cultivo.

2. Caracterización física, química e hidráulica de la parcela experimental.
3. Acondicionamiento del sistema de riego por goteo.
4. Establecimiento del cultivo y siete tratamientos.
5. Generación de modelos empíricos (uno por tratamiento) e integración de los mismos al sistema computacional IrriModel 1.0 con sus respectivas bases de datos.
6. Monitoreo del cultivo y humedad del suelo por tratamiento.
7. Análisis y evaluación de resultados.

Sistema computacional (software) con los modelos de programación integral del riego para maíz y frijol generados, con bases de datos requeridas (suelo, cultivos, sistemas de riego, etc.) y enlazado en tiempo real vía Internet a una red de estaciones climáticas, para calendarizar y pronosticar el riego

1. Integración al sistema IrriModel de los modelos de programación integral del riego de maíz y frijol.
2. Revisión y depuración de bases de datos de suelos, variedades, cultivos, sistemas de riego, etc.
3. Actualización de riegos y cosechas.

RESULTADOS OBTENIDOS

1. Un modelo integral validado en maíz, para calendarizar y pronosticar riegos en tiempo real por Internet (con 7 o más días de anticipación), dinámico y autoajutable a variabilidad climática y fechas de siembra. Para esto, el modelo calcula los valores diarios de:

a. Coeficiente de consumo de agua (K_c) que multiplicado por la evapotranspiración de referencia (E_{To}) estimada con una estación climática, determina el consumo de agua diario del cultivo.

b. Profundidad de la raíz (Pr) que representa el espacio donde se va a suministrar el agua.

c. Máximo déficit permitido (MDP) que indica el nivel de estrés de humedad del suelo permitido y que depende del cultivo, etapa y sistema de riego. El cálculo de estos valores es automático a través de fórmulas matemáticas (regresiones no lineales) utilizando los grados día crecimiento (GD), calculados con la temperatura del aire (T_a) medida con estaciones climáticas automatizadas.

En las cuatro parcelas de validación se obtuvieron eficiencias de riego de 60 al 80 % en riego por gravedad y 95 % en goteo. Comparándolas con la eficiencia de riego promedio en la zona donde se llevó a cabo el estudio, que es de 45 % [de los 10 mil metros cúbicos por hectárea (m^3/ha) que se aplican a una parcela, solo aprovecha 4 mil 500], significa un ahorro de agua de 1500 a 3 mil 500 m^3/ha en riego por gravedad, mientras que en goteo el ahorro fue de 4 mil 500 m^3/ha .

En las parcelas con riego por gravedad ubicadas en el Campo Experimental Valle del Fuerte (2 hectáreas) y ejido 1 de Mayo (20 hectáreas), los rendimientos fueron de 10.6 y 10.2 toneladas por hectárea (t/ha), respectivamente, aplicándose una lámina total de 52.66 y 62.09 centímetros (cm). En la parcela manejada con goteo, también ubicada en el Campo Experimental Valle del Fuerte, con fecha de siembra del 26 de febrero, el rendimiento fue de 12.6 t/ha con una lámina de 63.59 cm. El rendimiento medio de la zona de estudio fue de 7 t/ha.

Los resultados indican que el uso adecuado de esta tecnología contribuye a obtener buenos rendimientos de maíz en el ciclo primavera-verano (P-V).

Por otro lado, su aplicabilidad es muy alta, ya que se puede usar tanto en una parcela como en un grupo de parcelas (zonas de riego), así como en otras zonas del estado y del país, donde se cuente con estaciones climáticas automatizadas.

2. Calendarios de riego generados con el modelo, validado para cinco fechas de siembra (octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero), un suelo típico de la zona (barrial) y dos sistemas de riego (gravedad o rodado y goteo), como componente del paquete tecnológico actual del cultivo de maíz.

Riego por gravedad

Para siembras de octubre se recomiendan un riego inicial (lámina de 24 cm) y tres de auxilio (láminas de 15 cm), aplicando el primer auxilio a los 48



Figura 3. Desarrollo de la raíz de maíz en el lote demostrativo.

días después de siembra (dds) o 740 GD (antes de la floración), el segundo auxilio a los 80 dds en grano acuoso y el tercero a los 106 dds o 1192 GD en grano lechoso.

Para siembras de noviembre se recomienda un riego inicial (lámina de 23 cm) y cuatro de auxilio (láminas de 15 cm), aplicando el primer auxilio a los 56 días después de siembra (dds) o 577 GD (12 hojas), el segundo auxilio a los 81 dds en floración, el tercero a los 112 dds en jilote y el cuarto a los 137 dds o 1168 GD en grano lechoso (elote).

En siembras de diciembre se recomiendan un riego inicial (lámina de 23 cm) y cuatro de auxilio (láminas de 13 a 16 cm), aplicando el primer auxilio 75 días después de siembra (dds) o 528 GD (8 hojas), el segundo auxilio a los 104 dds a inicios de floración, el tercero a los 123 días en jiloteo y el cuarto a los 142 dds o 1189 GD en grano lechoso.

En siembras de enero se recomiendan: un riego inicial (lámina de 23 cm) y cuatro auxilios (láminas de 13 a 16 cm), aplicando el primer auxilio a los 71 días después de siembra (dds) o 526 GD (8 hojas), el segundo auxilio a los 93 dds a inicios de floración, el tercero a los 111 dds o 973 GD en jiloteo y el cuarto a los 129 dds en grano lechoso-masoso.

En siembras de febrero se recomiendan un riego inicial (lámina de 23 cm) y tres auxilios (láminas de 13 a 16 cm), aplicando el primer auxilio a los 61 días después de siembra (dds) o 527 GD (8 hojas), el segundo auxilio a los 82 dds a inicios de floración, el tercero a los 100 dds o 1020 GD en

grano acuoso-lechoso. Para la lámina recomendada en los riegos iniciales en todos los casos se considera suelo completamente seco.

Riego por goteo

Para siembras de octubre se debe aplicar un riego de germinación de 16 cm inmediatamente después de la siembra en seco, para llevar el suelo a capacidad de campo; después, aplicar 17 riegos de auxilio, el primero a los 22 dds con una lámina de 2 cm. De los 22 a los 120 dds, aplicar los riegos entre los 5 y 10 días, con láminas de 2.5 a 3.5 cm. Después de la etapa grano masoso, aplicar dos riegos cada 15 días con una lámina de 3.5 a 4 cm.

En siembras de noviembre se deben aplicar 19 riegos, el de germinación inmediatamente después de la siembra con una lámina de 16 cm. El primer auxilio a los 27 dds con una lámina de 2.5 cm. El segundo auxilio a los 43 dds con una lámina de 2.5 cm. Los riegos siguientes se aplicarán cada 6-9 días con láminas de 3-4 cm.

Para siembras de diciembre se recomiendan 20 riegos de auxilio, con un riego de germinación. Los seis primeros riegos de auxilio aplicarlos cada 12-15 días con láminas de 1 a 2.5 cm. Los siguientes auxilios aplicarlos cada 5-8 días con láminas de 3-4 cm.

En siembras de enero se puede manejar en forma similar a las siembras de diciembre.

Para las siembras de febrero se deben aplicar 18 riegos de auxilio y el riego de germinación. Los primeros cinco auxilios aplicarlos cada 10-15 días con láminas de 1 a 2 cm, los demás riegos aplicarlos de 4 a 7 días hasta antes de la madurez fisiológica, con láminas de 2.5 a 3.5 cm. Es importante mencionar que estas recomendaciones aplican para la zona de estudio y que para otras condiciones se deben generar recomendaciones específicas con el programa IrriModel 1.0.

3. Un modelo integral nuevo para frijol, que calendariza y pronostica riegos en tiempo real por Internet (con 7 o más días de anticipación), dinámico y autoajutable a variabilidad climática y fechas de siembra, cuya base son los parámetros de calendarización:

a. Coeficiente de consumo de agua (K_c) que multiplicado por la evapotranspiración de referencia (E_{To}) estimada con una estación climática, determina el consumo de agua diario del cultivo.

b. Profundidad de la raíz (Pr) que representa el espacio donde se va a suministrar el agua.

c. Máximo déficit permitido (MDP) que indica el nivel de estrés de humedad del suelo permitido y que depende del cultivo, etapa y sistema de riego. El cálculo de estos valores es automático a través de fórmulas matemáticas (regresiones no lineales) utilizando los grados día crecimiento (GD) o unidades calor, calculados con la temperatura del aire (T_a) medida con estaciones climáticas automatizadas.

El K_c se representa de la siguiente manera:

• $K_c = K_{máx} * \text{erf} [(X - x_{K_{máx}})/\alpha]^2$; si $K_c < K_{co}$ entonces $K_c = 0.2$

Los valores obtenidos de las variables de la ecuación fueron:

- $K_{m\acute{a}x} = 1.05$
- $xK_{m\acute{a}x} = 0.48$
- $\alpha_1 = 0.45$
- $K_{co} = 0.2$

Donde K_{co} es el coeficiente de cultivo para la primera etapa fenológica, la cual depende esencialmente de la evaporación del suelo; $K_{m\acute{a}x}$ es el máximo valor de K_c durante su desarrollo; $xK_{m\acute{a}x}$ corresponde a una variable auxiliar definida por los GDA, cuando el cultivo tiene su máximo coeficiente de cultivo, α_1 es un parámetro de regresión obtenido mediante ajuste de datos experimentales, $erfc$ es la función complementaria del error, y x es una variable auxiliar calculada con la siguiente expresión:

- $x = GDA/\alpha_0$; el α_0 obtenida fue: 1300 GD

Donde GDA son los grados día acumulados desde la siembra o emergencia hasta un tiempo determinado y α_0 son los GDA requeridos hasta alcanzar la muerte fisiológica de la planta.

La expresión del crecimiento radical se representa:

- $Pr = Pro + (Pr_{m\acute{a}x} - Pro) \{1 - \exp[-(GDA/\alpha_2)^2]\}$

Los valores de las variables obtenidas fueron:

- $Pro = 0.07$ m
- $Pr_{m\acute{a}x} = 0.8$ m
- $\alpha_2 = 250$

Pro y $Pr_{m\acute{a}x}$ representan la profundidad de siembra y profundidad máxima de la raíz respectivamente, el valor α_2 del modelo fue ajustado empíricamente de un valor aproximado a 2/3 del valor de GDA donde el frijol alcanza la profundidad radical máxima.

El máximo déficit permitido se representa:

- $MDP = \alpha_3 - [(\alpha_4)(K_c)]$

Los valores de los parámetros α_3 y α_4 , se calibran experimentalmente considerando la sensibilidad del cultivo al estrés hídrico y las prácticas del manejo del riego. Para riego por gravedad $\alpha_3 = 0.8$ y para goteo $\alpha_3 = 0.2$. El valor de α_4 es constante y es de 0.1.

En el tratamiento donde se generó el modelo anterior en goteo, se le aplicaron 22 riegos incluyendo el riego de germinación, su requerimiento hídrico fue de 25.62 cm hasta 85 % de desarrollo mientras que la lámina aplicada fue de 29.4 cm, con una eficiencia promedio de 91.1 %. Los riegos de auxilio se aplicaron cada 3 a 7 días con láminas de riego de 0.8 a 1.6 cm. El rendimiento estimado fue de 3 a 3.5 t/ha.

En el tratamiento donde se calibró el modelo para riego por gravedad se aplicaron tres riegos incluyendo el riego de presiembra. El riego de presiembra se aplicó el 13 de octubre del 2010 con una lámina de 13 cm, el primer auxilio se dio el 1 de diciembre de 2010 con una lámina de 8.6 cm en etapa de desarrollo vegetativo y el segundo auxilio se dio el 28 de



Figura 4. Sistema de riego por goteo que abastece de agua al cultivo de frijol en el CEVAF.

diciembre de 2010 aplicando una lámina de 9 cm en etapa de formación y llenado de vainas. La eficiencia promedio fue de 80 %, con un rendimiento estimado de 2 a 2.5 t/ha.

PRODUCTOS OBTENIDOS

1. Sistema Irrimodel (*software*) con el modelo validado de programación integral del riego para maíz (gravedad y goteo) y el modelo base generado para frijol (goteo y gravedad). Dicho sistema cuenta con todas las bases de datos requeridas (suelo, clima, cultivos, sistemas de riego, etc.) y se enlaza en tiempo real vía Internet a la red de estaciones climáticas de Sinaloa, para calendarizar y pronosticar el riego en tiempo real por Internet. El sistema no tiene ningún costo y se accede mediante un usuario y contraseña asignado por el administrador (CEVAF). Se encuentra listo para usarse a nivel estado en los cultivos estudiados, sin embargo, con una calibración rápida, se puede aplicar en otras zonas de México.

2. Manual del sistema IrriModel donde se presenta en forma clara y sencilla: las capacidades del sistema, los requerimientos de equipo e instalación, la estructura, la operación, ejemplos de aplicación y un glosario de términos para su mejor comprensión. Además del manual, se compiló un documento con formato de informe con introducción, objetivos, metas, metodología, resultados y productos, conclusiones y anexos, donde se presentan los detalles del proyecto.



Figura 5. Muestreo de humedad en parcela de frijol.

CONCLUSIONES

1. Se cuenta con un modelo de programación integral de riego para maíz validado tanto para riego por gravedad como para goteo, capaz de adaptarse en forma automática a diferentes fechas de siembra y condiciones climáticas, como lo indicaron los rendimientos promedio estimados de más de 10 t/ha en riego por gravedad y mayores de 12 t/ha en goteo, los cuales se consideran altos debido a que las fechas de siembra no fueron las óptimas por las heladas.

2. Además de ayudar a mejorar la calidad y cantidad de rendimiento, se obtuvieron eficiencias de riego en maíz, de 60 a 80 % en riego por gravedad; y de 90 a 95 % en goteo lo cual representan ahorros de agua de 2 mil a 4 mil m³/ha, y la posibilidad de reducir la dosis nitrógeno hasta en 45 kg/ha.

3. Se generaron calendarios de riego para maíz para diferentes fechas de siembra y dos sistemas de riego (gravedad y goteo) los cuales servirán de base para una mejor planeación de las siembras.

4. La tecnología generada ayuda a incrementar la relación beneficio/costo de 1.15 a 1.33 en maíz bajo riego por gravedad y de 1.19 a 1.55 en frijol debido a la posibilidad de incrementar rendimiento en al menos 10 % en maíz y 30 % en frijol, así como en reducir las dosis de nitrógeno.

5. En riego por goteo en ambos cultivos se observó un mejor desarrollo de la planta e incrementos en rendimiento con respecto al riego por gravedad tradicional de hasta 70 %, lo cual debe considerarse para seguir

promoviendo este sistema de riego en granos y analizar la posibilidad de manejar cultivos doble, por ejemplo: frijol (octubre) y maíz (febrero).

6. Se generaron experimentalmente los dos parámetros más importantes del modelo de programación integral del riego para frijol, coeficiente de cultivo máximo (K_{máx}) y factor de abatimiento máximo (F), tanto para riego por gravedad como por goteo, con los cuales se integró el modelo.

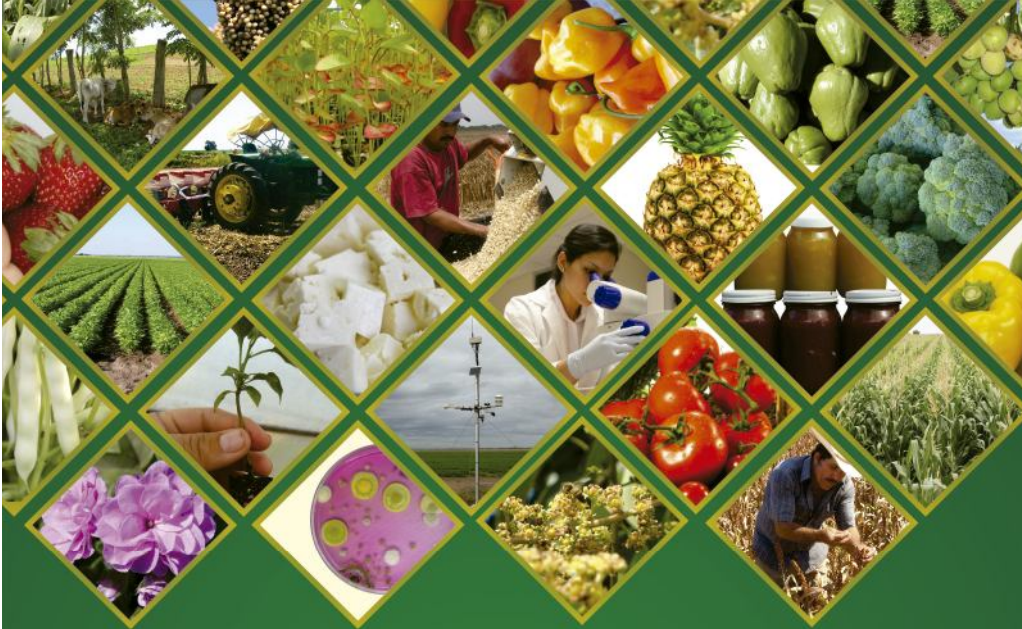
7. Se generaron los documentos:

a. Programación integral y gestión del riego vía Internet (manual del usuario).

b. Informe final del proyecto: *Generación de modelos para programación integral y gestión del riego en tiempo real vía Internet, para maíz y frijol en el norte de Sinaloa*, como apoyo en la validación y transferencia de la tecnología generada.

Nombre del proyecto

Generación de modelos para programación integral y gestión del riego en tiempo real vía Internet, para maíz y frijol en el norte de Sinaloa.



CONSEJO CONSULTIVO ZONA NORTE

Carretera México-Nogales, km 1609
Juan José Ríos, Guasave
Sinaloa, México
Tel. (687) 896-16-70

OFICINAS CENTRALES

Gral. Juan Carrasco Núm. 787 norte
Culiacán, Sinaloa, México
Tels./Fax (667) 712-02-16 y 46
Correos electrónicos:
direcciongeneral@fps.org.mx
divulgacion@fps.org.mx

**FUNDACIÓN
PRODUCE**
Sinaloa A.C.
ENLACE, INNOVACIÓN Y PROGRESO

www.fps.org.mx

inifap

Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias