



INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES  
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA  
EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

**CENID-RASPA**

# **EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO:**

## **PROGRAMA DE CÓMPUTO PARA PIVOTE CENTRAL**

**M. C. Abel Román López**  
**Dr. Marco A. Inzunza Ibarra**  
**Ing. S. Felipe Mendoza Moreno**  
**Dr. Ernesto A. Catalan Valencia**  
**Dr. Ignacio Sánchez Cohen**  
**Dr. José A. Montemayor Trejo**

ISBN: 978-970-43-0165-1  
978-970-43-0150-7

**Folleto Científico 21**

**Gómez Palacio, Durango**

**Julio del 2007**

**EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE  
RIEGO PRESURIZADO:  
PROGRAMA DE CÓMPUTO  
PARA PIVOTE CENTRAL**

**M.C. Abel Román López  
Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra  
Ing. Felipe Segundo Mendoza Moreno  
Dr. Ernesto A. Catalán Valencia  
Dr. Ignacio Sánchez Cohen  
Dr. José Alfredo Montemayor Trejo**

**CENID-RASPA**

**2007**

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria  
en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.

Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento  
Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.

Apdo. Postal 41

35150 Cd. Lerdo, Dgo.

Teléfonos y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: [inifap.gomez@internetual.com.mx](mailto:inifap.gomez@internetual.com.mx)

© Copy right

El contenido de esta publicación podrá reproducirse total o parcialmente con fines específicos de divulgación, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a los autores, al CENID-RASPA y al INIFAP.

ISBN: 978-970-43-0165-1  
978-970-43-0150-7

## Contenido

INTRODUCCION	1
Indicadores de Eficiencia Resultante de Evaluaciones Pluviométricas	3
Uniformidad de la distribución del riego	3
Uniformidad en riego por goteo	3
Uniformidad de riego por aspersión	5
Eficiencia de aplicación relativa ( $E_a$ )	7
Eficiencia de aplicación absoluta / $E_{aa}$ )	7
Eficiencia de almacenamiento o requerimiento ( $E_r$ )	8
Percolación (P)	9
Déficit (D)	9
Relaciones entre $E_a$ y $E_r$ con uniformidad de riego o distribución	9
Indicador de Eficiencia Dependiente del Volumen Bombeado	10
Eficiencia de captación ( $E_c$ )	10
Procedimiento de Campo para la Evaluación	11
Sistemas de riego fijos (goteo, microaspersión y aspersión)	11
Riego por Goteo	12
Riego por Microaspersión	12
Riego por Aspersión Fijo	13
Sistemas de riego por aspersión portátil, manual y mecanizado	15
Sistemas de riego por aspersión de movimiento continuo	17
Ejemplos de Evaluación de Sistemas de Riego Presurizados	18
Sistema de goteo-cintilla	18
Sistema de microaspersión	19
Sistema de riego por aspersión fijo	20
Sistema de riego por aspersión portátil o mecanizado	21
Evaluación de un sistema de riego por aspersión de cañón portátil	23
Evaluación de un sistema de riego por aspersión de cañón viajero	24
Evaluación y Mejoramiento del Riego por Aspersión Pivote Central Utilizando un Modelo Computacional	26
Resultados y Conclusiones del Ejemplo de la Evaluación del Pivote Central Aplicando el Programa Computacional EMPIC 2007	33
Indicadores de eficiencia resultantes de la evaluación pluviométrica	33
Indicador de eficiencia dependiente del caudal bombeado	34
RESULTADOS IMPRESOS POR EL PROGRAMA EMPIC 2007	35
LITERATURA CITADA	44



## Presentación

México y el resto de los países utilizan tecnología de riegos presurizados en distinta escala. En 1989 en los Estados Unidos de América se estimó que de 23.8 millones de hectáreas bajo riego, el 40 por ciento se irrigaba con presurizados, de los cuales el riego por aspersión constituía el 38 por ciento. De este porcentaje, los sistemas de riego de pivote central y de lateral con ruedas fueron los más importantes con un 20 por ciento. Para 1982 en México se irrigaban sólo 150 mil ha de 5 millones de ha bajo riego; en el 2006 se regaron hasta 1.3 millones de ha con riegos tecnificados de un total de 6.3 millones de ha irrigadas.

Al iniciarse en México el uso de los sistemas de riego por aspersión se presentaron múltiples problemas operativos y de diseño. El diagnóstico de los equipos se realizaba en forma manual. En este documento se propone realizarlas de manera integral utilizando programas de cómputo -para el caso del pivote central- que sistematicen la información minimizando errores. Para esto se determinan las eficiencias en el uso y manejo del agua en forma precisa y rápida, y además se estiman parámetros adicionales que permiten mejorar el funcionamiento de los equipos al operar con eficiencias de riego más altas.

Este tipo de tecnología se justifica plenamente ya que el tecnificar el riego no implica, de manera directa, que se alcancen altas eficiencias si estos sistemas no son operados adecuadamente, por tal razón, la evaluación de los sistemas de riego se recomienda que sea un procedimiento rutinario con la finalidad de detectar posibles problemas de operación y diseño para proceder a su oportuna corrección.

En esta evolución y tecnificación en el CENID-RASPA, se realizó una publicación que se tituló «Evaluación de Riegos Presurizados», en la cual se tuvo como objetivo principal el aportar los conocimientos básicos necesarios a productores, técnicos, investigadores y prestadores de servicios para llevar a cabo la evaluación de sistemas de riego presurizado y a la vez detallar los procedimientos de evaluación en campo de dichos sistemas.

En este documento se propone un programa de cómputo para hacer las evaluaciones de sistemas de riego presurizado pivote central de una manera integral.

Dr. José A. Cueto Wong  
Director del CENID RASPA

## *Introducción*

El método de riego más utilizado en México para la producción agrícola es el superficial. Para el 2005 se estimó la existencia de 6.3 millones de hectáreas en los distritos de riego del país, de las cuales 1.3 millones disponían de riego tecnificado (López, 2005). Los sistemas de riego por superficie funcionan con eficiencias de riego significativamente más bajas que los presurizados. En ellos se estima una eficiencia global del 40 al 45 por ciento, esto significa que el 55 a 60 por ciento del volumen de agua total utilizado se pierde durante su conducción y distribución (Huerta, 1987; Flores, 1989; Sebastián, 2006).

A diferencia de los sistemas de riego por superficie, donde el agua fluye sobre el terreno produciendo patrones de humedecimiento que están determinados por el tiempo que una lámina de agua está sobre un punto del predio, en los sistemas presurizados el patrón de mojado depende de la cantidad de agua aplicada y ella a su vez obedece al gasto del emisor, a la presión de operación del mismo y al tiempo de aplicación del riego (Merriam *et al.*, 2007).

El flujo superficial indeseable en estos sistemas presurizados se produce cuando la tasa de aplicación es superior a la tasa de infiltración del agua en el suelo. La variabilidad del patrón de mojado se puede cuantificar de diferentes maneras, generando índices de calidad del proceso del riego o eficiencia del mismo. Esto permite tomar decisiones para mejorar la operación del sistema incrementando su rentabilidad, ya sea por mayores rendimientos, mejor calidad de cosecha, ahorro de volúmenes de agua o cualquier combinación de lo anterior. Se estima que con sistemas de riego presurizado se puede



llegar a una eficiencia global de 65 a 95 por ciento, dependiendo del tipo de sistema de riego a presión (Lazarovitch *et al.*, 2007)

Una vez que se instala un sistema de riego presurizado se deben evaluar sus características hidráulicas importantes de acuerdo a lo proyectado en el diseño. Como la presión de operación ( $H_o$ ) que contempla que las pérdidas de carga hidráulica permisibles no sean mayores a un 20 por ciento; esto corresponde a una disminución del gasto en los emisores no mayor al 10 por ciento. Las condiciones de operación de un sistema de riego aseguran una uniformidad de aplicación del agua arriba del 90 por ciento de las unidades de riego que conforman un proyecto de riego (Merriam y Keller, 1978). Esto es válido para todo sistema de riego presurizado (goteo, micro aspersion y aspersion).

Con respecto al diseño adecuado y operación eficiente del sistema de riego en la productividad del recurso agua, los parámetros indicadores del desempeño del riego son: la uniformidad o distribución, la eficiencia de aplicación relativa ( $E_a$ ) y absoluta ( $E_{aa}$ ), la eficiencia de almacenamiento o requerimiento ( $E_r$ ), la eficiencia de captación ( $E_c$ ), la cantidad de agua perdida por percolación ( $P$ ) y el déficit de aportación de riego ( $D$ ).

El objetivo del presente documento es proporcionar herramientas técnicas de evaluación de la operación de un sistema de riego presurizado para su diagnóstico y mejoramiento, con el fin de incrementar la productividad del agua y la calidad de las cosechas, además contiene un programa de cómputo eficaz y fácil de usar para la evaluación de sistemas de riego de pivote central que realiza diagnósticos y recomendaciones para incrementar sus eficiencias.

## Indicadores de Eficiencia Resultante de Evaluaciones Pluviométricas

### Uniformidad de la distribución del riego

Todo sistema de riego a presión se proyecta para que la diferencia de volumen o lámina de riego en dos puntos extremos sobre una línea de aplicación tengan una diferencia menor al 10 por ciento, para una diferencia de presiones no mayores al 20 por ciento. En términos prácticos, esto garantiza que el agua suministrada tenga al menos un 90 por ciento de uniformidad.

De acuerdo al tipo de sistema se aplica distinta metodología de evaluación en campo, por tal razón cambia de nombre. Por ejemplo, en riego por goteo se denomina uniformidad de emisión y se evalúan los volúmenes de agua suministrados gota a gota directamente al suelo; mientras que en aspersión, donde el agua se aplica en forma de lluvia que pasa por el medio ambiente y la cubierta vegetal antes de llegar al suelo, se conoce como coeficiente de uniformidad; dentro de los sistemas de riego por aspersión existen sistemas con movimiento, que es otro factor que puede afectar la eficiencia y se conoce como uniformidad de distribución. A continuación se expone la forma de evaluación para cada caso.

### Uniformidad en riego por goteo

Es el porcentaje de variación en la lámina o volumen de agua aplicado a la superficie del suelo de una unidad de riego. Se obtiene mediante el aforo de 50 goteros igualmente espaciados en una unidad de riego. Para el cálculo se utiliza la Ecuación 1 (Karmelli y Keller , 1975; Burt y Styles, 1994):

$$UR = 100 \left( 1 - 1.27 CV \right) \frac{Y}{X} \quad 1$$

Donde UR es la uniformidad de riego o emisión en por ciento; CV es el coeficiente de variación, que es el cociente entre la desviación estándar y la media (X): cuando la emisión del caudal a un cultivo se conforma por un conjunto de goteros, que es lo más común en árboles, el coeficiente se expresa por  $V_s = CV/np$ , sustituyendo dicho valor por CV en la Ecuación 1, np es el número de emisores por planta; Y es la descarga media del 25 por ciento de valores con menor aforo (12 goteros) en  $L h^{-1}$  y X es la descarga media del sistema (50 goteros).

El valor resultante del coeficiente de variación se utiliza para clasificar los emisores como excelente, bueno, marginal, pobre e inaceptable según la forma de emisión (Merriam y Keller, 1987). El Cuadro 1 indica los valores para establecer el nivel de desempeño del sistema de acuerdo a este criterio. Por otro lado, algunos fabricantes proporcionan el CV de su emisor certificado expresamente por un laboratorio, el cual da una idea de la confiabilidad del gotero.

**Cuadro 1. Clasificación de emisores de acuerdo al coeficiente de variación (CV) (Merriam y Keller, 1978; Burt y Styles, 1994; Peña, 1997).**

<b>Clasificación (calidad)</b>	<b>Goteo y Micro aspersion</b>	<b>Cintas Goteadoras</b>
Excelente	$CV < 0.04$	$CV < 0.1$
Bueno	$0.04 < CV < 0.07$	$0.1 < CV < 0.2$
Marginal	$0.07 < CV < 0.11$	
Pobre	$0.11 < CV < 0.15$	$0.2 < CV < 0.3$
Inaceptable	$0.15 < CV$	$0.3 < CV$

Algunos factores topográficos locales limitan el funcionamiento de los emisores que se refleja en valores relativamente bajos de uniformidad de emisión. Dichos factores no se pueden modificar o resulta muy costoso hacerlo; por lo tanto, la uniformidad de riego (UR) que se recomienda bajo determinadas condiciones locales se muestra en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Rangos recomendados de la uniformidad de emisión (UR) para propósitos de diseño, considerando características topográficas del lote (Merriam y Keller, 1978).**

<b>Para emisores con espaciamientos amplios y cultivos permanentes con</b>	
Topografía uniforme	90 < UR. < 94%
Topografía ondulante o excesiva	88 < UR. < 92%
<b>Para emisores de espaciamientos cerrados &lt; 1.8 m en cultivos permanentes y no permanentes</b>	
Topografía uniforme	86 < UR. < 90%
Topografía ondulante o excesiva	84 < UR. < 90%
<b>Para cintas goteadoras con cultivos anuales</b>	
Topografía uniforme	80 < UR. < 90%
Topografía ondulante o excesiva	70 < UR. < 85%

**Uniformidad de riego por aspersión**

El coeficiente de uniformidad de distribución en los sistemas de riego presurizados: fijo, portátil manual, lateral con ruedas y microaspersión, según Chen y Wallender (1984), se puede estimar por varios procedimientos. La técnica de Christiansen (1942) es la más aceptada mundialmente para evaluar la eficiencia en patrones traslapados de aspersores. La Ecuación 2 ilustra este procedimiento.

$$UCC = \left[ 1 - \left( \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{\sum X_i} \right) \right] * 100 \quad 2$$

Donde: UCC es el coeficiente de uniformidad de Christiansen en por ciento,  $X_i$  son las lecturas u observaciones del volumen de agua captado en un recipiente (ml),  $\sum |X_i - \bar{X}|$  es la suma de las desviaciones absolutas de las lecturas con respecto al promedio de las mismas,  $\bar{X}$  es el promedio de todas las lecturas. En forma práctica, el valor mínimo aceptable de UCC es de 80 por ciento (Rodríguez *et al.*, 1982; Chávez, 1978).

En el sistema de cañón portátil manual la uniformidad de distribución ( $UD_{cp}$ ) se determina en forma práctica con la Ecuación 3 (Rodríguez y Mendoza, 1990):

$$UD_{cp} = \frac{R_{25}}{R_{\bar{x}}} * 100\% \quad 3$$

Donde  $R_{25}$  es el volumen medio del 25 por ciento de valores con menor aforo y  $R_{\bar{x}}$  representa la recolección media del sistema. Las muestras se obtienen de tres hileras de colectores distribuidos transversalmente en el riego del cañón portátil entre traslapes. Los datos se pueden expresar en lámina, volumen o en intensidad de lluvia, siendo más práctico utilizar volumen, ya que por lo general es el parámetro más común medido en campo. Es recomendable que en estos sistemas el coeficiente de uniformidad sea mayor del 67 por ciento (Pair *et al.*, 1977; Rodríguez *et al.*, 1982).

En los sistemas de cañón viajero y lateral móvil se evalúa la uniformidad de distribución bajo el mismo concepto que en el cañón portátil. Sólo que como estos ya tienen movimiento o avance frontal se utiliza una hilera de colectores que capten el volumen proporcionado por la máquina en su recorrido; por lo tanto, la Ecuación 3 se aplica en estos sistemas.

Cuando se evalúa un sistema de pivote central, la medición se realiza a lo largo de la línea regante, dado que ésta va montada en torres de hasta 4 m de altura y un extremo queda sujeto. El riego se aplica en una superficie circular, lo que significa que a mayor distancia de la torre fija los emisores hacen mayor recorrido. Por consiguiente, se requiere mayor volumen de agua por unidad de tiempo, aunque el diseño contemple cantidades iguales de agua en cualquier punto. Basándose en lo anterior, la uniformidad de distribución ( $UD_{pc}$ ) considera datos ponderados de acuerdo a la posición con respecto a su radio de ubicación. La  $UD_{cp}$  se obtiene con base en los parámetros de la Ecuación 4.

$$UD_{PC} = \frac{M_{25}}{M_{pp}} * 100\% \quad 4$$

Donde  $M_{25}$  es la media ponderada del 25 por ciento de los valores con menor aforo y  $M_{pp}$  representa la media ponderada de la prueba.

En el caso de los sistemas lateral móvil y pivote central es necesario elaborar una gráfica de los volúmenes colectados contra la distancia de los colectores en toda la línea regante; esta gráfica es útil para localizar áreas problema (escurrimientos) y boquillas o aspersores con mal funcionamiento.

### **Eficiencia de aplicación relativa (Ea)**

Este parámetro cuantifica la cantidad de agua aplicada en el riego que se almacena en la profundidad radicular deseada. Para cuantificarla, el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos utiliza la Ecuación 5 (Hansen, 1960).

$$Ea = \frac{Za}{Z} * 100\% \quad 5$$

Donde:  $Za$  es la lámina de agua almacenada en la zona de raíces por efecto del riego en mm y  $Z$  la lámina total de agua aplicada en el riego (mm).

### **Eficiencia de aplicación absoluta (Eaa)**

Indica la eficiencia real de uso del agua, para su cálculo se utiliza la Ecuación 6 propuesta por Merriam y Keller (1978).

$$Eaa = Ea * UD \quad 6$$

Donde: UD (uniformidad de distribución) puede obtenerse por las Ecuaciones 1, 2, 3 ó 4 según el caso

Este parámetro de eficiencia es similar a la eficiencia de aplicación global que se proporciona en los sistemas de riego por superficie a nivel parcelario. Resulta del producto de las eficiencias en conducción, distribución y aplicación conforme lo señala Flores (1989). En el caso de sistemas de riego presurizados, la eficiencia de conducción se asume que es el 100 por ciento o el valor unitario por conducirse en tuberías. Solomon (1990) reporta los valores de eficiencia absoluta, global o real que se pueden tener en los distintos sistemas de riego presurizado(Cuadro 3).

**Cuadro 3. Eficiencia de riego real o global en diferentes sistemasde riego presurizados. Solomon, 1990.**

Tipo de sistema	Eficiencia (%)
Portátil	65-75
Lateral con ruedas "power roll"	65-75
Cañón viajero	60-70
Pivote central	75-90
Avance frontal	75-90
Fijo	70-80
Lateral móvil de bajo volumen "LEPA"	80-95
Goteo	90-95
Microaspersión	90-95

### **Eficiencia de almacenamiento o requerimiento (Er)**

Hansen (1960) indica que esta eficiencia cuantifica los excesos (percolación) o deficiencias (déficit) del agua aplicada en el riego con relación a la cantidad de agua requerida por la profundidad de raíces; para su evaluación dicho parámetro se calcula con la siguiente ecuación:

$$Er = \frac{Za}{Zr} * 100\% \quad 7$$

Donde Za ya fue definida en la ecuación 5, Zr es la lámina de agua requerida en la zona de raíces también en mm.

## Percolación (P)

Este término se define como la cantidad de lámina infiltrada más allá de la profundidad de raíces y que no puede ser usada por los cultivos; esto no sólo se considera como pérdidas de agua, sino también como un peligro de contaminación del acuífero. Lo anterior se expresa como un porcentaje de la cantidad total del agua aplicada por el riego sobre el campo. Anyoji y Wu (1994), proponen la siguiente ecuación:

$$P = (100 - E_a) \quad 8$$

Donde  $E_a$  es la eficiencia de aplicación como se definió anteriormente.

## Déficit (D)

Se denomina déficit cuando la profundidad de raíces no es irrigada por completo, y corresponde al porcentaje de déficit (por ciento) con respecto a la cantidad total requerida. Para su estimación se usa la siguiente ecuación (Anyoji y Wu, 1994):

$$D = (100 - E_r) \quad 9$$

Donde  $E_r$  es la eficiencia de requerimientos

## Relaciones entre $E_a$ y $E_r$ con uniformidad de riego o distribución

La Figura 1 ilustra los índices de eficiencia  $E_a$ ,  $E_r$  y UCC, nótese que en el esquema (C) el índice de percolación (P) es excesivo, y corresponde al área ubicada por debajo de la línea horizontal punteada, que es el límite de la profundidad de raíces; caso contrario se muestra en (A) el déficit (D) por encima de dicha línea. En cambio el esquema B se considera que los índices de eficiencia son aceptables.



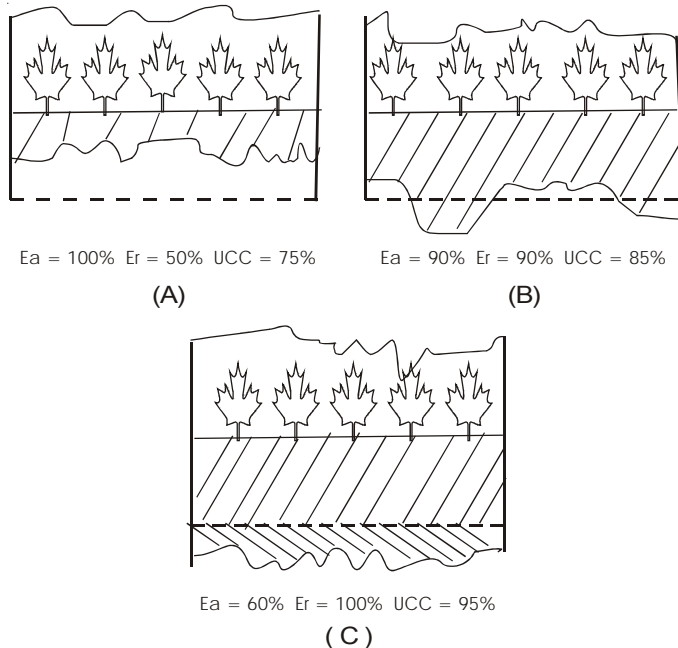


Figura 1. Indices de eficiencia de aplicación y requerimientos relacionados con la uniformidad de riego (Hansen, 1960; Luna, 1988).

## Indicador de Eficiencia Dependiente del Volumen Bombeado

### Eficiencia de captación ( $E_c$ )

Este parámetro es un indicador de la cantidad real del agua que se aplica sobre la superficie del suelo con un sistema de riego presurizado con relación a la bombeada, y se calcula como (Allen, 1991):

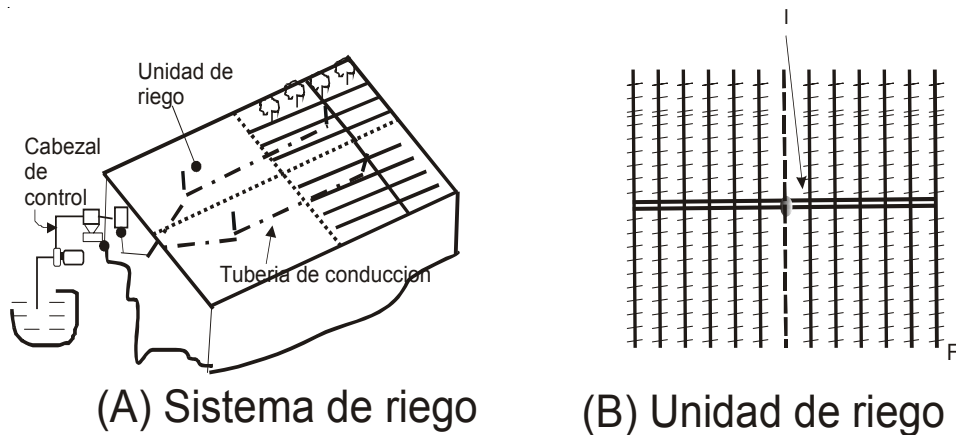
$$E_c = \frac{V_i}{V_s} * 100\% \quad 10$$

Donde  $V_i$  es el volumen captado en el área irrigada en  $m^3$  y  $V_s$  el volumen descargado por el sistema también en  $m^3$ .

## Procedimiento de Campo para la Evaluación

### *Sistemas de riego fijos (goteo, microaspersión y aspersión)*

Los componentes fundamentales de un sistema de riego presurizado fijo son: 1. Unidades de riego, 2. Tuberías de conducción y 3. Cabezal de control (Figura 2). El proceso de evaluación hace necesario que primeramente se verifique la presión de operación ( $H_o$ ) al centro de la unidad (Figura 2B) y el diferencial de presión entre el gotero o micro aspersor cercano a dicho punto (I) y el más alejado (F). Posteriormente, en dicha subunidad se procede a recolectar el volumen de 50 goteros como se muestra en la parte superior izquierda de la Figura 3 usando una probeta de  $100\text{ cm}^3$  y un cronómetro. El volumen ( $\text{cm}^3$ ) captado en un tiempo de 36 seg, se divide entre 10 para obtener el gasto ( $\text{L h}^{-1}$ ). Con estos datos se obtiene el índice de la Ecuación 1 anteriormente presentada.



**Figura 2. Sistema fijo de riego presurizado y su unidad de riego.**

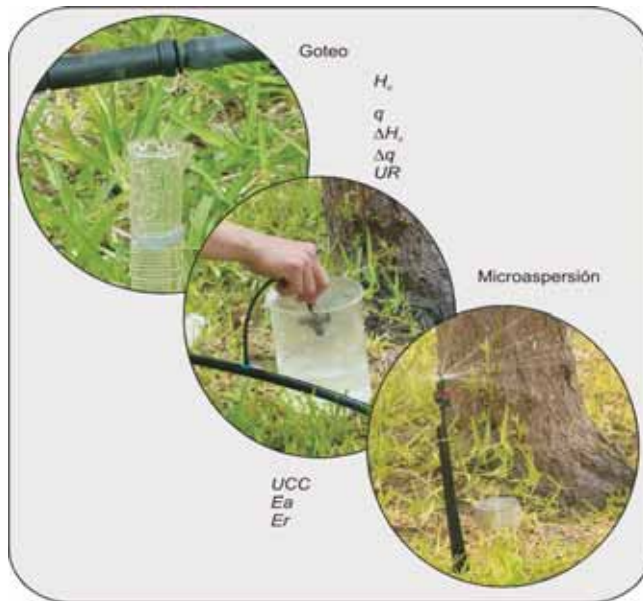
### **Riego por Goteo**

Para realizar la evaluación de un sistema de riego por goteo, se procede de la siguiente manera:

- a. En la subunidad se selecciona la primera y última línea de riego. Se aforan el primer y último gotero. Posteriormente se aforan 11 goteros adicionales igualmente espaciados entre ellos en cada línea regante, para hacer un total de 26 goteros en las dos líneas.
- b. Con el mismo procedimiento se seleccionan otras dos líneas intermedias para aforar 12 goteros en cada línea regante, para un total de 24 goteros.
- c. Con el total de la muestra de 50 goteros se procede a realizar la estimación de la eficiencia para concluir con la evaluación.

### **Riego por Microaspersión**

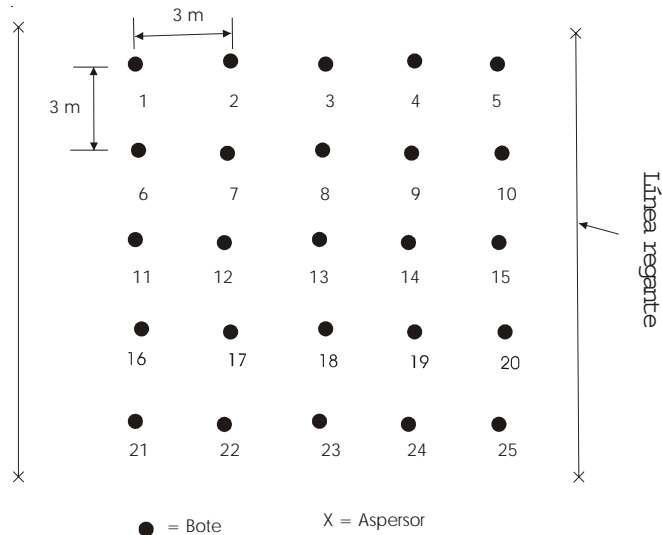
Para la evaluación de los sistemas de micro aspersion, el aforo del emisor se realiza directamente en un recipiente de volumen conocido midiendo el tiempo de llenado con cronómetro (Figura 3), y así obtener el gasto. Este aforo se realiza en cuatro emisores por línea de riego (primera, última y dos líneas intermedias) para muestrear un total de 16. Con los datos obtenidos se procede a determinar su uniformidad de riego o emision y CV usando la Ecuación 1. Posteriormente se evalúa el coeficiente de uniformidad mediante la Ecuación 2. El resultado se coteja con los valores reportados en el Cuadro 1 para establecer un diagnóstico sobre la uniformidad de aplicación del agua de riego.



**Figura 3. Índices de eficiencia a evaluar en goteo y micro aspersión dentro de sistemas de riego presurizado fijo.**

### Riego por Aspersión Fijo

En la evaluación de un sistema de riego por aspersión fijo formado generalmente por partes similares a un sistema de riego por goteo (Figura 2), se escogen dos líneas de riego, de preferencia las del centro de la subunidad de riego. Posteriormente se ubican de 16 a 25 recipientes de un litro de capacidad y nivelados. Se opera el sistema para una lámina planeada y se recolecta el agua en forma de lluvia en el área delimitada por cuatro aspersores contiguos (Figura 4). Durante la evaluación se determina el coeficiente de uniformidad de Christiansen con la Ecuación 2, luego se mide la velocidad y dirección del viento para constatar que esté operando en los límites de diseño.



**Figura 4. Distribución de 25 recipientes para evaluar un sistema de riego por aspersión fijo (Rodríguez y Mendoza, 1990).**

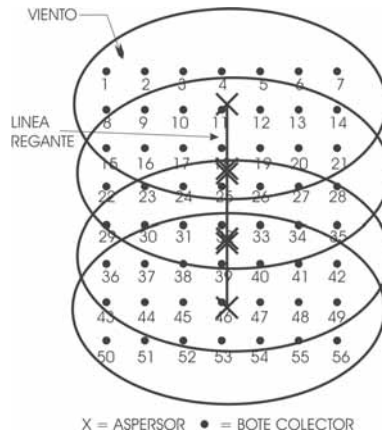
Tanto para el sistema de microaspersión como para el de aspersión fijo, se obtienen las especificaciones técnicas de presión de operación y diferencia de presiones. El gasto promedio de los aspersores del sistema se obtiene al aforar cuatro aspersores; esto se realiza al conectar mangueras de conexión rápida en las boquillas y al cronometrar el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido, o mediante un manómetro de Bourdon con tubo de pitot.

En los tres casos mencionados anteriormente se procede a determinar el contenido de humedad antes y después del riego para establecer los valores de  $E_a$  y  $E_r$  de las Ecuaciones 5 y 7. Con los datos de capacidad de campo, densidad aparente y humedad residual se obtiene la lámina de agua a aplicar por el sistema, la lámina almacenada en el perfil de interés del suelo después del riego y la que requiere el cultivo. Una vez que se obtienen las eficiencias  $E_a$  y  $E_r$ , de

ellas se derivan Eaa, percolación (P) y déficit (D) del riego. Finalmente, la eficiencia de captación ( $E_c$ ) puede obtenerse con datos de los análisis anteriores previa auscultación minuciosa de las mediciones hechas, como se explicará más adelante.

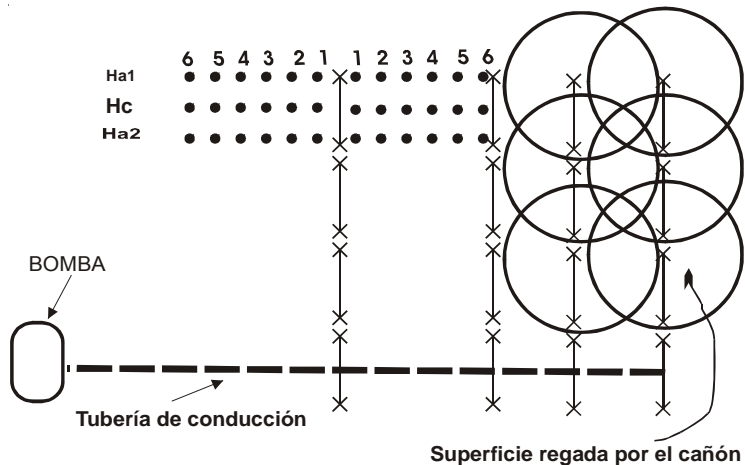
## Sistemas de riego por aspersión portátil, manual y mecanizado

Estos sistemas comprenden los sistemas de riego por aspersión de línea lateral portátil manual, la línea lateral de aspersión movidas por ruedas metálicas, un carro motriz al centro, y el sistema de cañón con desplazamiento manual recto (Rodríguez y Mendoza, 1990). En la Figura 5 se ilustra el perímetro de aspersión en una línea de riego que es común para los dos primeros sistemas referidos. El muestreo se realiza al centro de la línea regante del sistema de irrigación, se da un tiempo de funcionamiento registrando la velocidad y la dirección del viento dominante con un anemómetro portátil. Para utilizar la expresión de Christiansen se suman los datos de la parte izquierda con los de la parte derecha en su misma posición a fin de obtener los valores de los volúmenes recolectados por traslape. Por ejemplo,  $1+4$ ,  $2+5$ ,  $3+6$ , ..., etc., (Figura 5).



**Figura 5. Distribución de recipientes (●) para evaluación de una línea lateral con ruedas o portátil manual. Los puntos indican la posición de los recipientes para coleccionar el agua durante la aplicación.**

En la Figura 6 se ilustra el procedimiento para evaluar un sistema de riego de cañón portátil. En dicha figura se observa cómo se colocan tres hileras de recipientes perpendiculares a la línea de desplazamiento del emisor, separados a cada tres metros. El diámetro de cobertura puede oscilar de 30 a 80 m, por lo que la separación entre hileras se hace de la siguiente manera: en la hilera central se colocan recipientes alineados perpendicularmente a uno y otro lado de la línea de riego, las otras dos hileras (Ha1, Ha2) al 50 por ciento del radio de aplicación. Se recomienda registrar la velocidad y dirección del viento durante la prueba, así como la presión de operación inicial y final; en este caso, es preferible que la duración de la prueba sea igual a la duración de la aplicación del riego para posteriormente proceder a tomar los datos del volumen colectado y estimar su uniformidad de distribución conforme a la Ecuación 3. Para evaluar las eficiencias de aplicación y de riego se sugiere determinar el contenido de humedad en el suelo a lo largo de la hilera central de los recipientes y de otra adyacente en los siguientes puntos: cerca de la lateral, a una cuarta parte y a la mitad de la separación de la posición de la lateral.

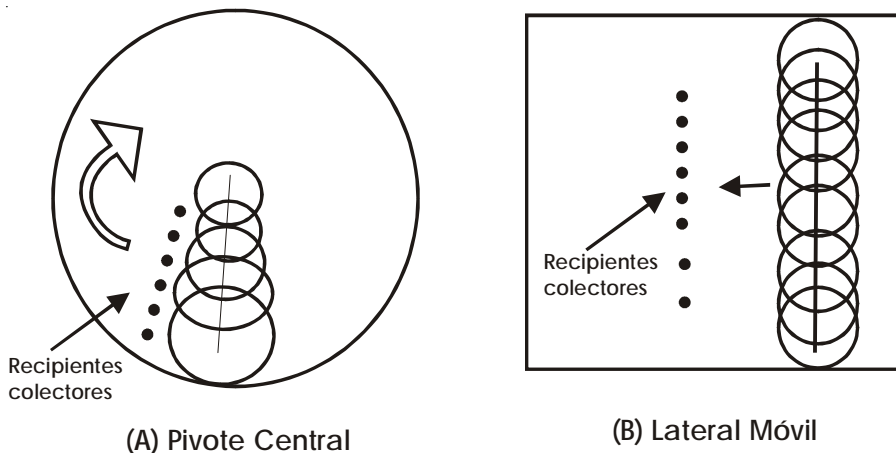


**Figura 6. Sistema de riego por aspersión con cañones portátiles presentando la localización de las hileras de recipientes para una evaluación de la uniformidad de distribución (Rodríguez y Mendoza, 1990).**

## Sistemas de riego por aspersión de movimiento continuo

Este grupo incluye los sistemas de cañón viajero, la línea lateral móvil sobre torres y el pivote central. La evaluación de la uniformidad del primer sistema se realiza con un procedimiento similar al del cañón portátil, con la diferencia de que se utiliza una sola hilera de recipientes colectores, y el tiempo de la prueba está definido por el tiempo de residencia o lo que dura en pasar el patrón de aplicación sobre un punto determinado. La Ecuación 3 se usa para determinar el coeficiente de uniformidad.

En los sistemas de pivote central y lateral móvil, que constan de una línea regante montada en torres, se coloca una hilera de recipientes a lo largo de toda la línea separados a tres metros, para coleccionar el volumen de agua aplicado. La evaluación de la uniformidad se realiza en el primer caso aplicando la Ecuación 4, y en el segundo la 3. En el sistema de pivote central los volúmenes colectados deben ponderarse por el área que representan, ya que esta superficie se incrementa con la distancia desde el centro. En la Figura 7 se muestra un esquema de instalación de estos recipientes.



**Figura 7. Procedimiento de muestreo para sistemas de riego por aspersión de movimiento continuo.**



## Ejemplos de Evaluación de Sistemas de Riego Presurizados

### Sistema de goteo-cintilla.

El Cuadro 4 muestra valores de aforo (Q, en litros por hora,  $L h^{-1}$ ) en 50 puntos de emisión en un sistema de riego instalado en el CENID RASPA en un módulo demostrativo con el cultivo de chile jalapeño. El método de recolección de muestras se explica en el tema Procedimiento de Campo para la Evaluación. De esta información se obtiene que el gasto medio del 25 por ciento de valores con menor aforo es  $0.52 L h^{-1}$ , el gasto medio del muestreo es  $0.59 L h^{-1}$ , la desviación estándar  $0.06 L h^{-1}$ . El coeficiente de variación que resulta es de 10 por ciento y la uniformidad de emisión 76.95 por ciento (Ecuación 1). De acuerdo al valor del coeficiente de variación, el funcionamiento del sistema se clasifica como BUENO (Cuadro 1). Sin embargo, la uniformidad de riego es ligeramente inferior a lo deseable. Estos resultados se debieron a fugas que se observaron en la conexión de las líneas regantes, por lo que se debe realizar otra evaluación una vez corregido este problema.

**Cuadro 4. Valores de aforo (Q,  $L h^{-1}$ ) de 50 emisores en un sistema de riego por goteo-cintilla. Burt y Styles, 1994.**

Emisor	Q	Emisor	Q	Emisor	Q	Emisor	Q	Emisor	Q
1	0.6	11	0.74	21	0.52	31	0.58	41	0.6
2	0.6	12	0.65	22	0.55	32	0.65	42	0.52
3	0.56	13	0.75	23	0.5	33	0.58	43	0.6
4	0.55	14	0.55	24	0.5	34	0.6	44	0.7
5	0.65	15	0.58	25	0.6	35	0.6	45	0.5
6	0.65	16	0.6	26	0.6	36	0.6	46	0.55
7	0.5	17	0.55	27	0.6	37	0.58	47	0.58
8	0.74	18	0.58	28	0.55	38	0.53	48	0.55
9	0.65	19	0.57	29	0.6	39	0.56	49	0.5
10	0.75	20	0.6	30	0.58	40	0.64	50	0.55

### Sistema de microaspersión.

En este caso se trata de evaluar la aplicación del agua de riego con un microaspersor por medio del coeficiente de uniformidad de Christiansen (Ecuación 2). Las características hidráulicas de funcionamiento son las siguientes: presión hidráulica 0.21 MPa, caudal 129 L h<sup>-1</sup>, lámina proyectada promedio a aplicar 4.8 mm, velocidad y dirección del viento al momento de la prueba 7.2 km h<sup>-1</sup> NE (la dirección es NE-SE). La Figura 8 muestra los valores de volumen de agua colectada en 144 recipientes de 5.2 cm de diámetro (21.2372 cm<sup>2</sup>) distribuidos en cuatro cuadrantes alrededor del emisor (al centro, representado con una X), separados 0.5 m entre hileras verticales y horizontales. De acuerdo a estos datos, la media es de 4.6 cm<sup>3</sup> (2.166 mm); las lecturas totalizan 662.4 cm<sup>3</sup> y la suma de las desviaciones absolutas es 386.2 cm<sup>3</sup>. Con estos datos, al aplicar la Ecuación 2 se obtiene un valor del coeficiente de uniformidad de Christiansen de 41.7 por ciento (Valor aceptable para un solo microaspersor, según estudios de Román, 2002 y Hills *et al.*, 1986). Cabe mencionar que este valor relativamente bajo obedece a que se evalúa sólo un emisor. Al evaluar un sistema donde se presenta traslape, las láminas aplicadas muestran una uniformidad mayor entre sí que se refleja en un valor del coeficiente de uniformidad de Christiansen considerablemente mayor del 80 por ciento.

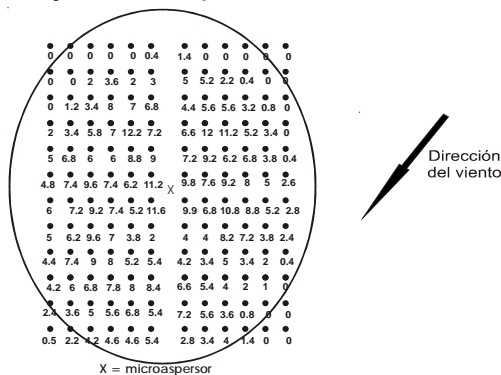


Figura 8. Volumen de agua (cm<sup>3</sup>) captado en recipientes en torno a un microaspersor.

Para la estimación de la eficiencia de captación ( $E_c$ ) con la ecuación 8, es necesario determinar el volumen captado mediante:

$$V_c = \frac{\sum X_i}{A_p} * A_{dp} \quad 11$$

Donde:  $\sum X_i$  es el total del volumen captado en los recipientes 662.4 cm<sup>3</sup>,  $A_p$  es el área del recipiente 21.2372 cm<sup>2</sup> y  $A_{dp}$  el área de influencia del pluviómetro, 2,500 cm<sup>2</sup>.

Al sustituir estos valores en la expresión previa, el volumen captado en la superficie es de 77.98 litros. De acuerdo al aforo que se realiza en el microaspersor directamente, su descarga durante una hora fue de 129 litros, por lo que el cociente entre ambos valores es 0.6045 ó 60.45 por ciento de eficiencia de captación.

Es necesario señalar que este valor relativamente bajo obedece al hecho de que el muestreo de aplicación se realiza sobre una superficie cuadrada, cuyos lados miden un 80 por ciento del diámetro de cobertura del dispositivo. Además, bajo las condiciones de viento el patrón de aplicación está ligeramente distorsionado en el sentido de la dirección del viento. Se puede apreciar fácilmente que los valores del extremo superior derecho son cero, mientras que en el extremo opuesto se observan valores aproximados a la media. Estos factores hacen que no se colecte agua en toda el área de dominio, por lo que el valor de eficiencia de captación se afecta considerablemente.

### **Sistemas de riego por aspersión fijo.**

Considerando un muestreo de 16 puntos como se describe en una sección precedente, el volumen captado (cm<sup>3</sup>) por recipiente que se muestra en el Cuadro 5 (Rodríguez y Mendoza, 1990).

**Cuadro 5. Volúmenes de agua captados en recipientes durante una prueba de evaluación en un sistema de riego por aspersión fijo.**

N° de recipiente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Vol (cm <sup>3</sup> )	70	65	65	75	40	80	75	55	50	65	70	75	75	70	65	80

$$\bar{X} = 67 \text{ cm}^3$$

Utilizando la Ecuación 2 para determinar el coeficiente de uniformidad se tiene:

$$UCC = \left[ 1 - \left( \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{\sum X_i} \right) \right] * 100 = \left| 1 - \frac{136}{1075} \right| * 100 = 87.3\%$$

El valor que se alcanza es aceptable y refleja el efecto combinado del viento, la variabilidad propia de emisión y el traslape entre aspersores. Mientras los dos primeros factores reducen la uniformidad, el traslape la mejora pero sin lograr alcanzar el valor potencial.

### **Sistema de riego por aspersión portátil o mecanizado**

Se evalúa la uniformidad del riego de una lateral con ruedas (power roll) en un cultivo de alfalfa (Rodríguez, 1988). Los datos de volumen de agua colectado en mililitros o cm<sup>3</sup> se muestran en el Cuadro 6, con los cuales el usuario puede hacer uso de la ecuación de Christiansen para determinar el coeficiente de uniformidad. En este sistema se estiman también los parámetros de Ea y Er; con los datos de las láminas aplicadas con dichos volúmenes y las medidas en la profundidad del suelo. Rodríguez (1988) reporta en su trabajo los valores ya totalizados.

**Cuadro 6. Datos de volúmenes de agua recolectados en la evaluación de una lateral con ruedas de riego por aspersión (Rodríguez, 1988).**

N	Vol	N	Vol
1	978.7	8	679.7
2	897.1	9	679.7
3	652.5	10	1495.2
4	706.8	11	1549.6
5	1141.8	12	1604.0
6	761.2	13	1114.6
7	679.7		

Según los datos del Cuadro 6 transformados a lámina de agua y con los de lámina de agua medidos a la profundidad del suelo requerida, el coeficiente de uniformidad de Christiansen fue de 77.6, la eficiencia de aplicación de 84 y la eficiencia de requerimientos de 48.5, todo expresado en por ciento. La eficiencia de aplicación potencial de 65.2 por ciento, conforme a la Ecuación 6, sugiere que se está desperdiciando casi un 35 por ciento del agua de riego debido al diseño inadecuado del sistema. Lo anterior se debe a que los traslapes ocurridos y/o a las boquillas de los aspersores no son los correctos para el tipo de suelo y la influencia del viento. Aún cuando la Eaa está dentro de valores permisibles según Cuadro 3, existen deficiencias de humedad en el 50 por ciento de la profundidad radicular, como lo indica la Er. Se sugieren algunas acciones para mejorar dicho sistema como son:

- Modificación de traslapes de aspersión y/o boquillas de aspersores.
- Modificación del tiempo de riego.

Lo anterior se inicia con el estudio del patrón simple de un solo aspersor (PSA) bajo las condiciones operativas del sitio (tipo de suelo y viento). Posteriormente, se infieren los patrones generales traslapados de aspersión (PTGA) que operen con los mejores índices de eficiencia. Esto se logra utilizando modelos de simulación. Como por ejemplo el modelo de Allen (1991), el cual genera el UCC y la Ec

partiendo de un aspersor o micro aspersor, su patrón de distribución de agua (PSA) en tres dimensiones mediante una gráfica de su pluviometría proporcionada en su entorno y afectada por la velocidad y dirección del viento. A partir de esta información se infieren los patrones de traslapes de aspersión (PTGA) que proporcionen las mejores eficiencias y, por supuesto, se obtiene el mejor traslape de aspersión (separación entre aspersores y líneas de riego).

### **Evaluación de un sistema de riego por aspersión de cañón portátil.**

Esta evaluación se hizo de acuerdo al procedimiento correspondiente para este sistema de riego, el cual fue descrito anteriormente. La información obtenida se muestra en el Cuadro 7. Los valores para las hileras  $HA_1$  y  $HA_2$  tanto del lado izquierdo como del derecho totalizan un dato ( $HA_1 + HA_2$ ), mientras que los de las columnas HC de ambos lados totalizan otro igual a  $\sum HC$ . La resultante de los 36 puntos de muestreo generan doce números, los cuales se utilizan en la evaluación del sistema y se encuentran dentro de «traslape de datos» del cuadro mencionado. La media de los tres valores más bajos (25%) y los marcados con asterisco es igual a  $108.33 \text{ cm}^3$ , mientras que la media del volumen captado en los 12 valores compuestos es de  $117.16 \text{ cm}^3$ . La eficiencia de distribución es el resultado del cociente de estos dos valores. y fue de 92.46 por ciento.

**Evaluación de un sistema de riego por aspersión de cañón viajero.** El procedimiento de evaluación es similar al del cañón portátil manual. Se utiliza una hilera de recipientes colectores perpendicular al desplazamiento del sistema. En el Cuadro 8 se proporciona información de una evaluación para este sistema el cual irriga una franja de 100 m de ancho y toma como referencia el centro del sistema. A partir de ese punto, se ubican los recipientes de un lado y otro (derecho e izquierdo) espaciados a 3 m. En esta situación, los primeros están más próximos al emisor lo que hace que capturen un volumen mayor de agua. La media de los ocho valores compuestos más bajos (25 %) es de 321.9 cm<sup>3</sup>, mientras que la media del volumen captado en los 33 valores compuestos es de 454.8 cm<sup>3</sup>. La eficiencia de distribución es el cociente de estos dos valores expresado en por ciento y es de 70.8.

**Cuadro 7. Volumen de agua captado (cm<sup>3</sup>) durante la evaluación de un sistema de riego por aspersión de cañón portátil (Rodríguez y Mendoza, 1990).**

Distancia desde la lateral (m)	Recip. N°	Volumen Captado (cm <sup>3</sup> )*			Distancia desde la lateral (m)	Recip. N°	Volumen Captado **			Traslape de datos		HA <sub>1</sub> + HA <sub>2</sub> + HC
		HA <sub>1</sub>	HA <sub>2</sub>	HC			HA <sub>1</sub>	HA <sub>2</sub>	HC	HA <sub>1</sub> + HA <sub>2</sub> +	∑HC	
5	1	30	30	60	30	6	25	25	55	110*	115	225
10	2	33	35	65	25	5	28	30	65	126	130	256
15	3	30	35	70	20	4	32	30	60	127	110*	237
20	4	35	30	60	15	3	28	25	55	118	115	233
25	5	25	30	55	10	2	35	30	60	120	115	235
30	6	20	25	50	5	1	25	35	65	105*	115	220
<b>Suma del total de los valores obtenidos</b>											1406	
<b>Suma de la cuarta parte de los valores más bajos (*)</b>										325		

\* Lado izquierdo de la lateral

\*\* Lado derecho de la lateral

**Cuadro 8. Volumen de agua captado durante una evaluación de un sistema de riego por aspersión de cañón viajero (Rodríguez y Mendoza, 1990).**

Espaciamiento entre recipientes (m)	Volumen colectado en los recipientes				Vol. Total
	Lado izquierdo del camino		Lado derecho del camino		
	Recip. N°	Volumen	Recip. N°	Volumen	
99	1	560	33		560
96	2	540	32		540
93	3	510	31		510
90	4	490	30		490
87	5	505	29		505
84	6	475	28		475
81	7	480	27		480
78	8	460	26		460
75	9	430	25		430
72	10	410	24		410
69	11	370	23		370
66	12	325	22		325*
63	13	305	21		305*
60	14	345	20		345*
57	15	335	19		335*
54	16	310	18		310*
51	17	305	17		305*
48	18	290	16	35	325*
45	19	250	15	75	325*
42	20	230	14	120	350
39	21	215	13	215	430
36	22	165	12	365	530
33	23	95	11	410	505
30	24	65	10	515	580
27	25		9	540	565
24	26		8	525	525
21	27		7	500	500
18	28		6	490	490
15	29		5	470	470
12	30		4	490	490
9	31		3	540	540
6	32		2	605	605
3	33		1	625	625
		<b>Suma del total de los valores</b>			<b>15010</b>
		<b>Suma del cuarto bajo (*)</b>			<b>2575</b>



## **Evaluación y Mejoramiento del Riego por Aspersión Pivote Central Utilizando un Modelo Computacional**

Se desarrolló el paquete computacional EMPIC 2007 (Evaluación y Mejoramiento de Pivotes Centrales) que permite realizar de manera integral y sencilla los cálculos necesarios para evaluar la eficiencia de los sistemas de riego por aspersión, modalidad pivote central. Con este paquete se reducen también los errores en los cálculos de los indicadores de la eficiencia y se pueden tomar decisiones para mejorar el funcionamiento del sistema de riego. Esta primera versión trabaja bajo ambiente Windows y se programó utilizando lenguaje Borland Delphi 7. El programa requiere los datos de entrada del número de recipientes ( $N^{\circ}$ ) y su volumen de agua captado o muestreado en  $\text{cm}^3$  (ml). También es necesario conocer el diámetro de los colectores ( $D_p$ ) en cm, el espaciamiento sin cultivo (SSC) o distancia desde el centro del pivote hasta donde inicia el cultivo en m, la lámina de riego requerida (DPH) en cm, la distancia del punto pivote o parte central del sistema hacia la línea de riego sin aspersores. La información con más detalle acerca de este programa se cita en el manual del usuario, archivo que se adjunta en el disco de instalación.

La metodología utilizada en EMPIC 2007 se basa en el modelo de distribución lineal propuesta por Karmeli *et al.* (1978) y Shearer (1989), adecuado por Moreno (1992) y Román (1993) para sistemas de aspersión con movimiento intermitente, y por Luna (1988 y 1989) para riego superficial. Dicha metodología fue propuesta para los sistemas de aspersión fijo para facilitar la caracterización e integración de los parámetros de eficiencia  $E_a$  y  $E_r$  de las Ecuaciones 5 y 7 que se relacionan con la uniformidad de distribución del riego (Ecuación 2). Una relación de estos tres parámetros se mostró anteriormente en la Figura 1. La metodología consiste en obtener una regresión lineal entre la lámina de agua captada en los botes colectores o pluviómetros y el área de influencia de los mismos.

El modelo de regresión realiza una analogía de la distribución del agua infiltrada en las áreas muestreadas. La relación se expresa por la Ecuación 12.

$$Y_0 = a_0 + B X_0 \quad 12$$

Donde,  $Y_0$  representa a la lámina de agua disponible a infiltrarse dividida entre su media (adimensional),  $X_0$  es el dato de área adimensional (0 a 1) y  $a_0$  y  $B$  son los parámetros obtenidos por regresión y corresponden a la ordenada de la recta ajustada y la pendiente de la misma, respectivamente.

Una vez obtenida la ecuación de ajuste, ésta se interpreta por medio de la Figura 9 la cual es una representación del caso idóneo o más eficiente, que sería cuando la pendiente del modelo obtenido es 0.5. En este caso, la lámina media aplicada es igual a la lámina requerida (DPH), y significa que el 50 por ciento del área total es eficientemente irrigada por los aspersores. En dicha figura el área triangular K representa la fracción de agua percolada, que es la indicada por el área del polígono JFGJ de la Figura 10. Esta gráfica es una representación física hipotética del agua infiltrada durante la irrigación, y se representa por el polígono total representado por ABCDFGJA.

El triángulo M en la Figura 9 representa el déficit de agua en la profundidad del riego indicado por el área FDEF de la Figura 10. De acuerdo a los conceptos de eficiencia mencionados y partiendo de las ecuaciones 5 y 6 referentes al concepto original de la eficiencia de aplicación y de requerimiento, éstas se ajustan en función de los parámetros del modelo lineal y se originan las expresiones 13 y 14.

$$Ea = \left[ \frac{DPHa - \frac{(DPHa - a_0)^2}{2B}}{a_0 + \frac{B}{2}} \right] * 100 \quad 13$$

$$Er = \left[ \frac{DPHa - \frac{(DPHa - a_0)^2}{2B}}{DPHa} \right] * 100 \quad 14$$

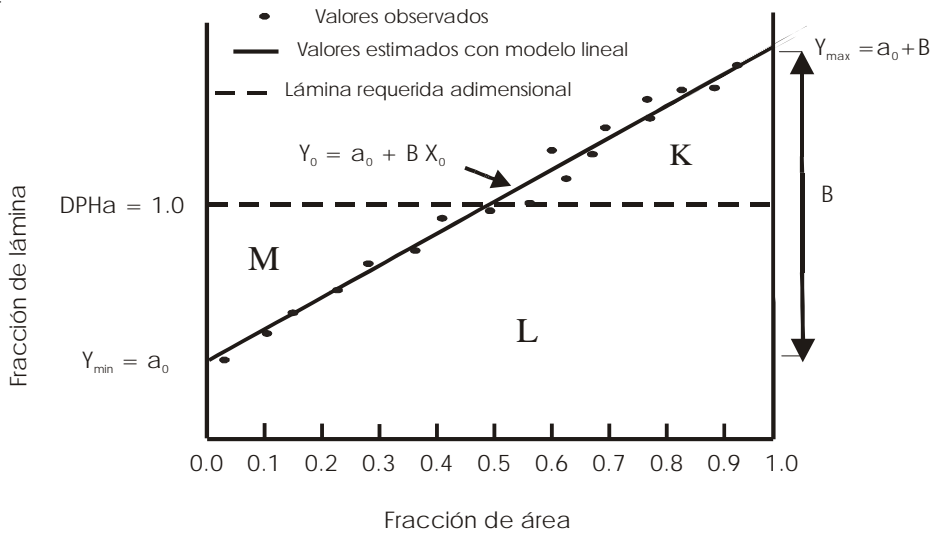


Figura 9. Ajuste de valores observados al modelo lineal para riego por aspersión (Shearer, 1989).

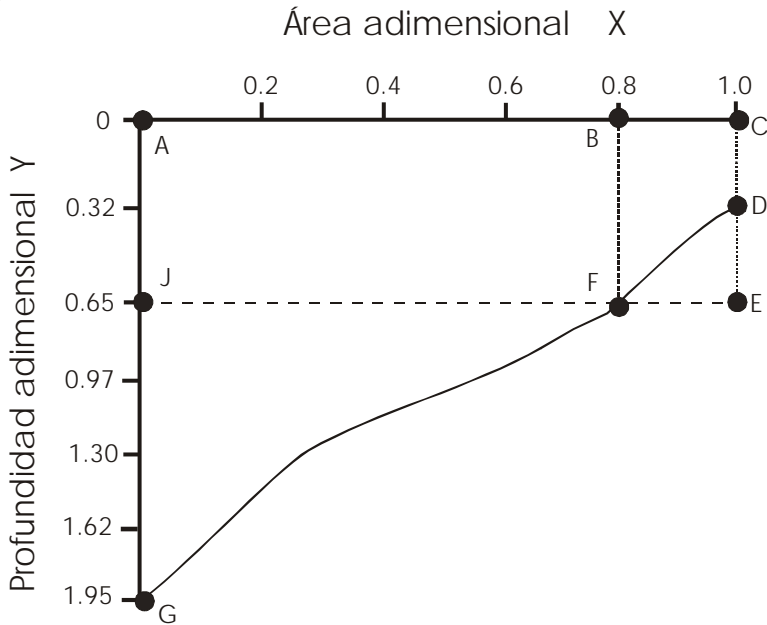


Figura 10. Curva de la distribución del agua de riego adimensional que se obtuvo de las subáreas y del área total (Shearer, 1989).

Donde  $E_a$  y  $E_r$  son las eficiencias de aplicación y requerimiento o almacenamiento basadas en los volúmenes captados de los pluviómetros (%),  $DPH_a$  representa la lámina de riego requerida dividida por la lámina de riego promedio (adimensional), el resto de las variables ya fueron definidas.

En áreas con riego deficiente se aplica un mayor tiempo de riego con lo cual el modelo lineal cambia su ordenada en el origen, mejorando las  $E_a$  y  $E_r$ . En el modelo computacional EMPIC 2007 se consideraron los conceptos anteriores y se agregaron las determinaciones de los parámetros de eficiencia global del riego, percolación y déficit del agua aplicada, citadas en las ecuaciones 6, 9 y 10.

Uno de los inconvenientes para la aplicación del modelo de distribución lineal es la asignación de subáreas para los pluviómetros, debido a que las superficies representativas de cada pluviómetro son coronas circulares crecientes conforme se van alejando del centro o punto pivote. Para encontrar las subáreas de las coronas circulares, se propuso la expresión geométrica 15.

$$A_i = \sum_{j=1}^n \left[ \pi(nS + S_{sc})^2 - \pi((n-1)S - S_{sc})^2 \right] \quad 15$$

Donde:  $A_i$  es el área de influencia del pluviómetro  $n_i$  ( $m^2$ ),  $n$  es el número de pluviómetros colocados en el transecto muestreado,  $S$  es el espaciamiento entre pluviómetros (m),  $S_{sc}$  es el espaciamiento sin cultivo (m).

Mediante el algoritmo (15) se realiza el cómputo del modelo de distribución lineal así como la obtención de la uniformidad de distribución del pivote central usando la Ecuación 4. El EMPIC 2007 también proporciona un resultado gráfico o variograma de la lámina aplicada por la línea de riego mostrada en la Figura 16.

Con el modelo lineal se obtiene el área eficientemente regada por el pivote central al resolver la expresión 16.

$$AER = \left[ 1 - \frac{DPHa - a_0}{B} \right] * 100 \quad 16$$

Donde: AER es el área eficientemente regada por el pivote central (%); los otros términos ya fueron definidos.

EL programa de cómputo EMPIC utiliza las anteriores expresiones para llevar a cabo la simulación de diferentes áreas eficientemente regadas (AER), obteniéndose los parámetros de eficiencia de  $E_a$ ,  $E_r$ ,  $E_{aa}$ ,  $P$  y  $D$  correspondientes a cada AER

simulada. Esto se realiza alimentando al programa con los valores de la pluviometría captada en las evaluaciones.

Para el mejoramiento del sistema de riego pivote central, y para el caso de que el área eficientemente regada se quiera incrementar, se hace necesario aumentar la lámina de riego, para lo cual se utiliza la ecuación 17 donde está en función de la lámina promedio determinada en la evaluación del pivote y de los parámetros del modelo ajustado con los datos del estudio.

$$L_r (\text{nueva}) = \bar{L}(a_n - B) + \bar{L} \quad 17$$

Donde:  $\bar{L}$  representa a la lámina promedio encontrada en la evaluación (cm),  $B$  es la pendiente de la recta o modelo ajustado,  $a_n$  el valor de la ordenada al origen del modelo, y  $a$  adquiere valores de  $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ .

La obtención del volumen de agua perdido por percolación generó la expresión 18, cuyos términos ya fueron definidos anteriormente ( $V_p$ ). Para encontrar este parámetro con diferentes valores de porcentajes de Áreas Eficientemente Regadas (AER), el valor de la ordenada al origen del modelo es la cambiante para cada caso de AER simulado.

$$V_p = \frac{a_n + B - DPH_a}{2} * \frac{\text{Volumen Total Aplicado}}{\text{Área Total Regada}} \quad 18$$

Se presentan datos de la evaluación en un pivote central con 20 años de uso en un predio sembrado con alfalfa. Dicho sistema consta de ocho torres que funcionan con energía eléctrica, y tiene una capacidad para regar 64 hectáreas. El primer bote se colocó a una

distancia de 5 m después del área sin cultivo con respecto al punto central del pivote; los receptáculos se colocaron en línea en transecto espaciados a 10 m. Los datos obtenidos en campo se resumen en el Cuadro 9.

**Cuadro 9. Datos requeridos para el computo de diagnóstico y mejoramiento del riego por aspersión pivote central por el EMPIC 2007.**

Nº bote	Volumen colectado (cm <sup>3</sup> )	Nº bote	Volumen colectado (cm <sup>3</sup> )	Nº bote	Volumen colectado (cm <sup>3</sup> )	Nº bote	Volumen colectado (cm <sup>3</sup> )
1	90	12	445	23	665	34	425
2	40	13	185	24	440	35	640
3	70	14	625	25	505	36	670
4	165	15	300	26	280	37	510
5	155	16	420	27	695	38	175
6	440	17	575	28	590	39	440
7	850	18	360	29	400	40	590
8	945	19	295	30	615	41	320
9	345	20	350	31	500	42	555
10	430	21	340	32	655	43	130
11	500	22	470	33	670	44	900

### Datos Generales

Nombre del lote o predio evaluado: alfalfa

Número de botes o recipientes (Nº): 44

Diámetro del recipiente (Dp): 10.99 cm

Espaciamiento sin cultivo (SSC): 7 m

SCS: se refiere al radio del área sin cultivo al centro del pivote

Lámina de riego requerida (DPH): 6.35 cm

Para la obtención de los datos en el campo, el área irrigada se divide en partes iguales o subáreas donde se colocan los pluviómetros en el centro de las mismas.

## **Resultados y Conclusiones del Ejemplo de la Evaluación del Pivote Central Aplicando el Programa Computacional EMPIC 2007**

### **Indicadores de eficiencia resultantes de la evaluación pluviométrica**

En las Figuras 12 a la 17 se muestra la pantalla principal así como las diferentes ventanas del programa para la entrada de datos así como las de resultados. En la Figura 12 de entrada de datos se proporciona el diagnóstico actual de las eficiencias, cómo está operando actualmente el pivote central. Las Figuras 13 y 14 muestran la distancia de colocación de los pluviómetros con respecto al punto central, la lámina y volúmenes encontrados en la superficie anular de los recipientes.

La Figura 15 reporta el modelo lineal obtenido a partir de los datos de pluviometría; muestra además el diagnóstico de las eficiencias con las que está operando el pivote central y finalmente las características técnicas generales como área irrigada, lámina media aplicada y lámina de riego requerida.

En la Figura 16 se muestra la variación de la lámina encontrada en los pluviómetros a lo largo de la línea regante, también se observa una línea horizontal que representa la lámina media y que se utiliza como referencia. Esta figura proporcionada por el programa de cómputo se conoce como distribución hidráulica del sistema. Es importante la detección de las variaciones de las láminas encontradas, ya que de esta manera se conocen las superficies anulares que tienen problemas de riego en exceso y las que tienen déficit del mismo. Esta información es útil para la reparación y/o reemplazo del cambio de boquillas del sistema de riego.

Además, en dicha figura se proporciona el diagnóstico de operación del sistema de riego con base en el cálculo de las eficiencias de riego. Para el caso presentado, la uniformidad de distribución del agua (41 %) por el sistema, está muy por debajo del que idealmente



debería tener (75-85 %); asimismo, la eficiencia global del sistema fue baja (36.5 %) con respecto a la óptima que es de 75 a 90 por ciento (Cuadro 3). Ambos valores sólo pueden mejorarse con un rediseño de boquillas; sin embargo lo contradictorio del caso es que el sistema presenta aceptables eficiencias de aplicación y de requerimiento (cerca al óptimo del 50 % del área eficientemente regada), lo cual se debe a los sobrerriegos efectuados y a las fugas que se tuvieron en la tubería regante en las uniones de las torres.

A manera de conclusión se puede argumentar que a pesar de tener un sistema de pivote central manejado ineficientemente debido a fallas en su diseño de boquillas y de fugas en las tuberías, se alcanzan eficiencias de aplicación y de requerimiento aceptable pero con eficiencias de uniformidad no aceptables por el déficit de riego generado en más del 50 por ciento del área regada.

### **Indicador de eficiencia dependiente del caudal bombeado**

El parámetro que evalúa este indicador es la eficiencia de captación representada por la ecuación 10. Para su estimación es necesario primeramente obtener el volumen total captado por cada superficie anular. El programa de cómputo lo reporta como volumen aplicado ( $m^3$ ) en la Figura 15, donde la suma fue de  $32,300.8 m^3$  como total aplicado del sistema para el tiempo de riego. En esta evaluación del sistema, el gasto utilizado fue de  $63.1 L s^{-1}$ , la velocidad de la máquina fue de 16 por ciento, y con ésta se cubrió un octavo de la superficie total irrigada por el pivote en 25.8 h. Con el producto del gasto y tiempo de riego con sus unidades dimensionales convenientes se obtiene que el riego del octavo de superficie se suministró un volumen de  $5,860.8 m^3$ . Finalmente, el volumen total que se suministraría a la superficie total del pivote sería de  $45,446.4 m^3$ .

La eficiencia de captación mediante la ecuación 10 es del 71 por ciento, que se obtiene de la división del volumen captado de  $33,134.8 m^3$  entre  $46,907.3 m^3$  y expresado en por ciento.

**RESULTADOS IMPRESOS POR  
EL PROGRAMA  
EMPIC 2007**





Figura 11. Pantalla principal de arranque del EMPIC 2007.

C:\Archivos de programa\EMPIC 2007 1.0

Proyectos Volumen Captado

Archivos: Ampuero

N	VC
26	280
27	695
28	590
29	400
30	615
31	500
32	655
33	670
34	425
35	640
36	670
37	510
38	175
39	440
40	590
41	320
42	555
43	130
44	900

Nuevo Proyecto

Ampuero

Nº = 44

Continuar

DP = 10.99 cm

SSC = 7 m

DPH = 6.35 cm

Opciones de Mejora

N = 44

DPHa = 1.34

Lm = 4.74

VA = 32300.78

ARt = 627566.02

cm

m 3

m 2

Reporte

Y = 0.48 + 1.49 x

R<sup>2</sup> = 0.91

Salir

Gráfico (Distribución)

Reporte

Salir

EFICIENCIAS DEL SISTEMA (%)

UDPC = 41.01 %

Ea = 89.13

Eaa = 36.55

D = 18.52

Er = 81.48

AER = 42.28

P = 10.87

Volumen Percolado

68.55

m<sup>3</sup> \* Ha

Calcular

Figura 12. Ventana de acceso de datos muestreados del Cuadro 9 y resultados preliminares de eficiencia actual del riego.

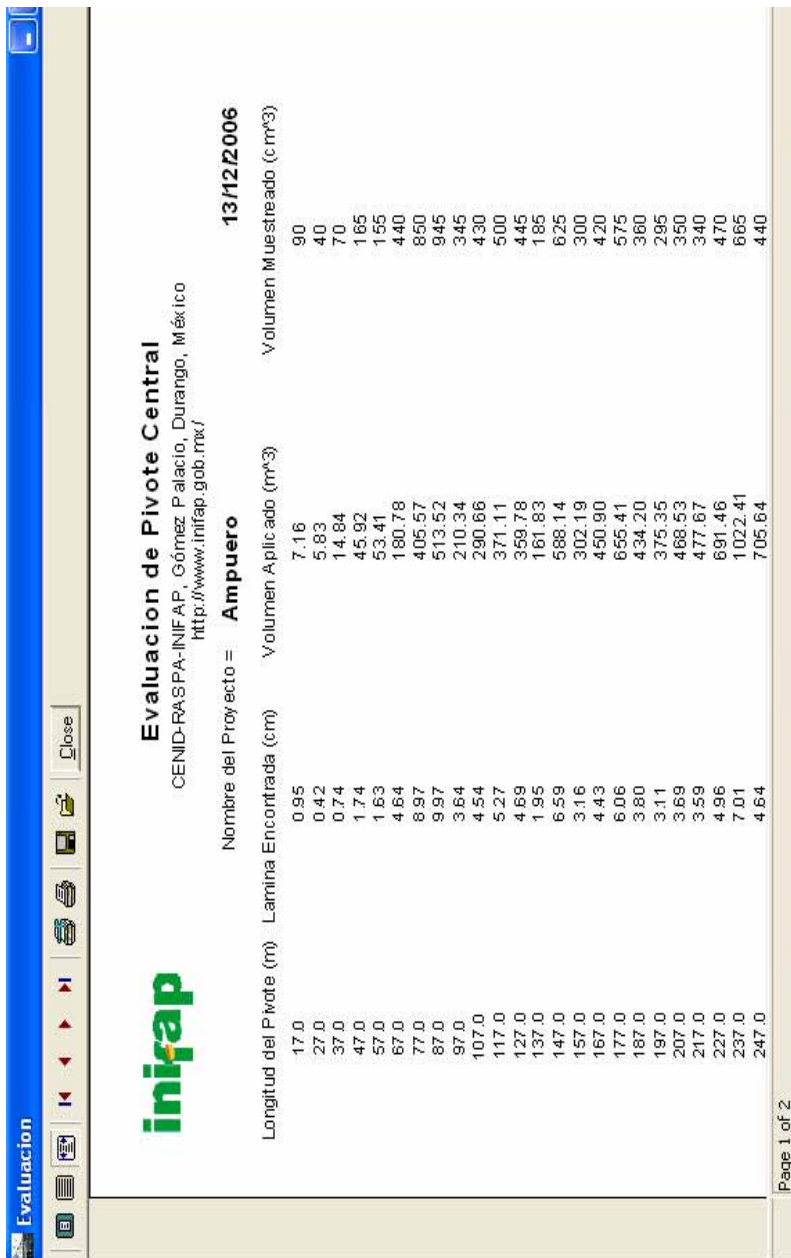


Figura 13. Resultados de Laminas de riego y volúmenes de riego aplicados en el transecto muestreado (hoja 1 del menú reporte).

... continuación

Evaluación		Close	
247.0	4.64	705.64	440
257.0	5.33	843.35	505
295	2.95	486.16	280
277.0	7.33	1252.76	695
287.0	6.22	1102.60	590
297.0	4.22	774.03	400
307.0	6.49	1230.83	615
317.0	5.27	1033.81	500
327.0	6.91	1397.70	655
337.0	7.07	1474.11	670
347.0	4.48	963.23	425
357.0	6.75	1492.93	640
367.0	7.07	1607.31	670
377.0	5.36	1257.27	510
387.0	1.85	443.01	175
397.0	4.64	1143.02	440
407.0	6.22	1571.79	590
417.0	3.38	873.70	320
427.0	5.85	1562.11	555
437.0	1.37	372.17	130
447.0	9.49	2636.21	900

Page 1 of 2

Figura 14. Láminas de riego y volúmenes de riego aplicados en el transecto muestreado (hoja 1 del menú reporte).

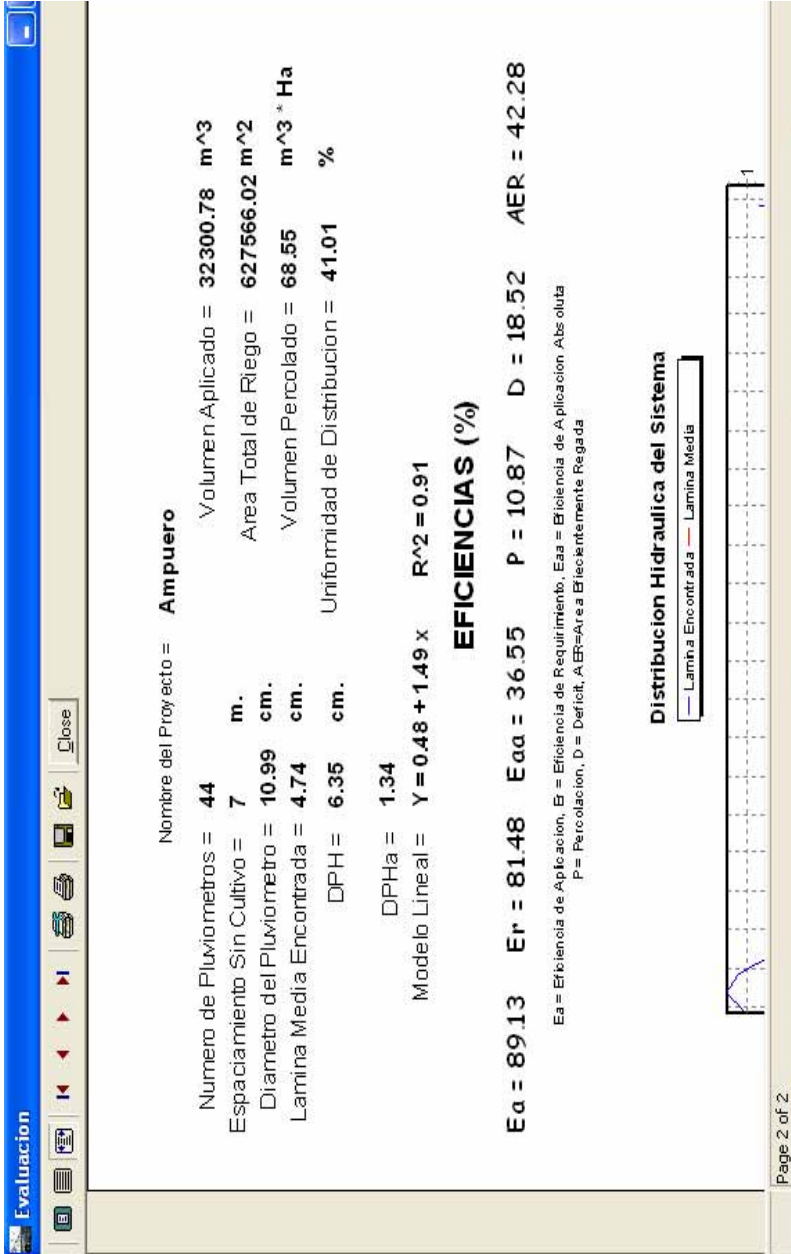


Figura 15. Reporte de indicadores de eficiencia encontrados y características técnicas de la evaluación realizada (hoja 2 del menú reporte).



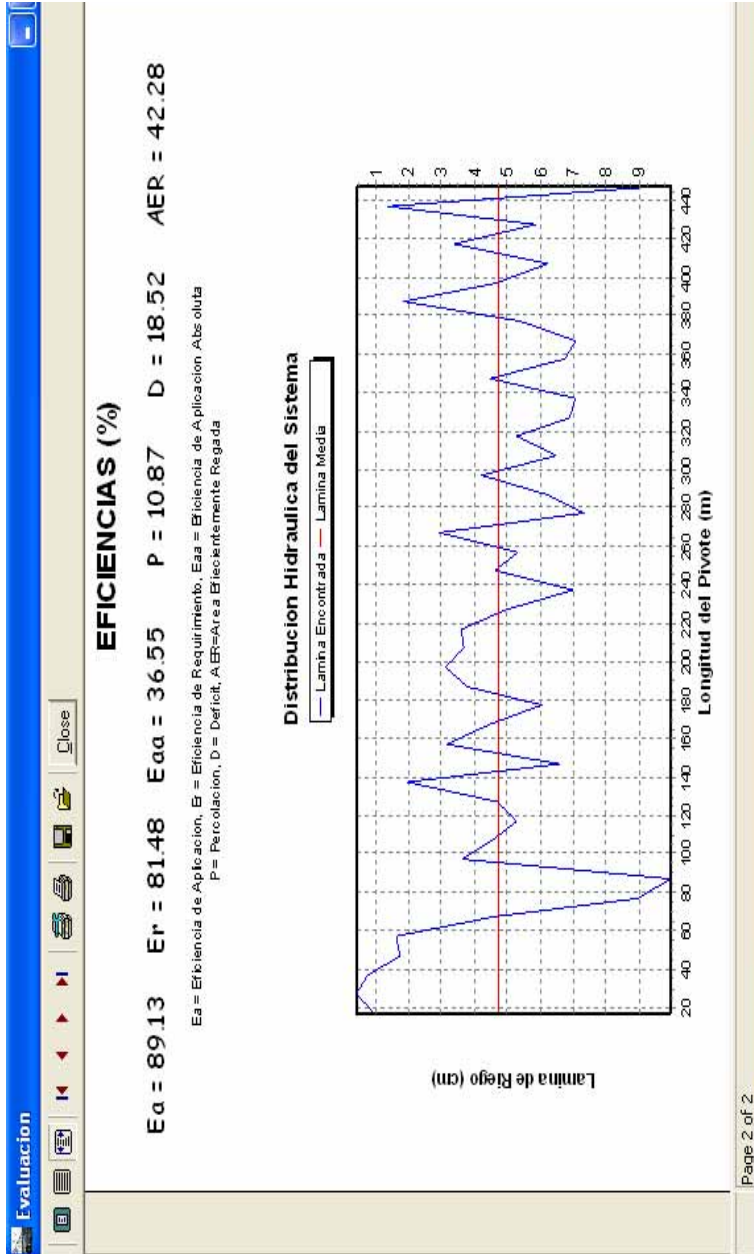
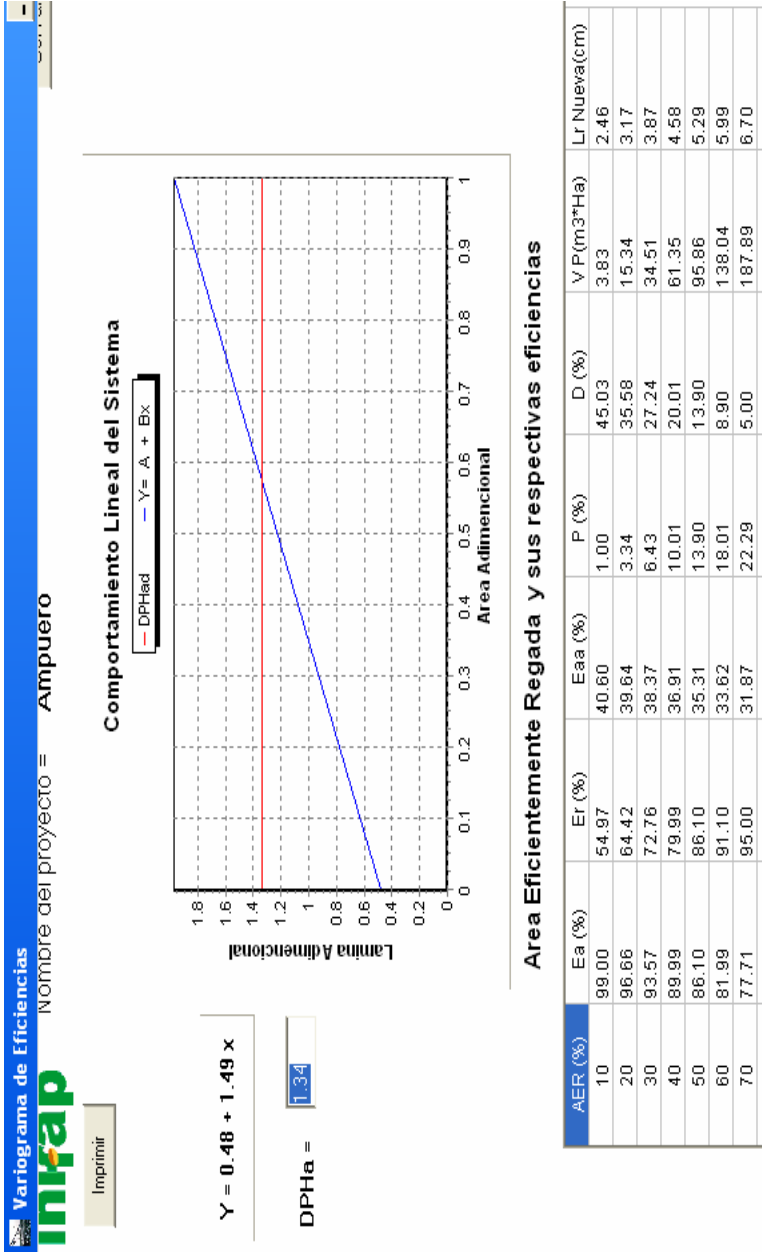


Figura 16. Variograma de la distribución de la lámina de riego a lo largo de la línea regante pivote de la evaluación realizada (continuación hoja 2 del menú reporte).



**Figura 17. Opciones de mejoramiento de las eficiencias del riego evaluado pivote central obtenidas del botón «opciones de mejora»**

## LITERATURA CITADA

- Allen, R. G. 1991 Sprinkler Pattern Overlap Program software Catch 3D Version 4-41 of. Dept. Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University Logan; UT 84322-4104 USA
- Anyoji, H. and I.P. Wu 1994 Normal Distribution Water Application for drip Irrigation Schedules. Transactions of the ASAE 37:159-164.
- Burt, Ch. M. and Styles S. W. 1994. Irrigation Efficiency and Uniformity. Drip and Microirrigacion for Trees, Vines, and Row Crops. ITRC. Department of Agricultural Engineering California Polytechnic State University. San Luis Obispo, California. USA
- Chavez M., J. 1978. Advances of irrigation engineering. Uniformity distribution in sprinkler irrigation. Trad. Lect 14: 182-190.
- Chen, D. and W. W. Wallender. 1984. Economic Sprinkler, Spacing and Orientation. Transactions of the ASAE 27: 737-743.
- Christiansen, J. E. 1942. Irrigation by sprinkling. Bulletin 670. Agricultural Experimental Station. Berkeley, California. USA 124 p.
- Flores L., L. F. 1989. Avances en tecnología de riego. Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnificación del Riego y Uso Racional de la Energía, FIRA-Banco de México, SARH, CFE p. 1-10.
- Hansen, V. E. 1960. New Concepts in Irrigation Efficiency. Transactions of the ASAE. Vol. p.p. 55-64. (Falta num volumen)
- Hills, D. J., R. C. M. Silveira and W.W. Wallender. 1986. Oscillating pressure for Improving Application Uniformity of Spray Emmiters. Transactions of the ASAE 29:1080-1089.
- Huerta M., J. 1987. Programa Nacional de Uso Eficiente de la Infraestructura Hidroagrícola. III Congreso Nacional de Irrigación, Los Mochis, Sin.

- Karmeli, D., J. Salazar L. and W. R. Walker. 1978. Assessing the Spatial Variability of Irrigation Water Applications. Robert S. Kere Environmental Research Laboratory. Office of Research and Development. U. S: Environmental Protection Agency, ADA, Oklahoma.
- \_\_\_\_\_ and J. Keller. 1987. Sprinkle & Trickle Irrigation Design. Edited and Published by Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation. Glendora, California, USA. 133 p.
- Lazarovitch N., A. W. Warrick, A. Furman, and J. Simunek. 2007. Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analysis. *Vadose Zone Journal*. 6:116-123.
- López T., F. 2005 Ponencia magistral de clausura de la XI Asamblea Ordinaria de la Asociación Nacional de usuarios de riego (ANUR), Acapulco Méx. Nov. 18 del 2005. Subsecretario de la SAGARPA. [http://www.queretaro.gob.mx/sede/PUBLICACIONES/DOCUMENTOS/NOTAS/riego\\_tecnificado.pdf](http://www.queretaro.gob.mx/sede/PUBLICACIONES/DOCUMENTOS/NOTAS/riego_tecnificado.pdf)
- Luna D., E. 1988. Aplicación del modelo de distribución lineal en la evaluación de los sistemas de riego por superficie. CENID-RASPA INIFAP SARH. Gómez Palacio, Dgo., Méx. Vol. 5: 47-63.
- \_\_\_\_\_ 1989. Aplicación de un modelo lineal para la evaluación del riego por superficie. CENID-RASPA INIFAP SARH. Gómez Palacio, Dgo., Méx. VOL 3 (Cap. 2):140-163.
- Merriam, L. J. and J. Keller. 1978. Farm irrigation system evaluation guide for management. Logan, Ut. USA. pp. 81-124.
- Merriam J. L., S. W. Styles and B. J. Freeman. 2007. Flexible Irrigation systems: Concept, design, and application. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 133:2-11
- Moreno S., F. 1992. Metodología para el diagnóstico de eficiencias y políticas de operaciones en riego por aspersión Tesis profesional Ing. Agrónomo en irrigación, Universidad Autónoma Agraria

- Antonio Narro Unidad Laguna, División de carreras agronómicas, Torreón, Coah., México. 77 p.
- Pair, H. C., W. Hainz W., R. Crawford and R. Kenneth. 1977. Sprinkler irrigation silver spring Maryland United State of America. Published by The irrigation Association, pp 209-219,452-456.
- Peña P., E. 1997. Tecnificación del riego presurizado. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. IMTA. P. 92.
- Rodríguez C., A., V. M. Delgado M. y L. Moreno D. 1982. Evaluación de sistemas de riego por aspersion. Memorias del VII curso de riego por aspersion. CENAMAR-SARH. Gómez Palacio, Dgo. Méx. pp 172-248.
- Rodríguez C., A. 1988 Evaluación de sistemas de riego presurizado (goteo y aspersion) en la Región Lagunera. INIFAP-SARH, Gómez Palacio, Dgo. Méx. pp 121-137,
- \_\_\_\_\_ y S. F. Mendoza M. 1990. Evaluación de sistemas de riego presurizados, Metodología de Investigación y Diagnóstico en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, SARH-INIFAP, CENID-RASPA, Gómez Palacio, Dgo., Méx. pp. 302-337.
- Román L., A. 1992. El diseño de riego por goteo con métodos numéricos y su evaluación mediante la uniformidad estadística. CENID-RASPA INIFAP SARH. Seminarios Técnicos Vol 9, N° 15, 1992.
- \_\_\_\_\_ 1993. Simulación de eficiencias de riego en aspersion no automatizada en base a patrones típicos de distribución de agua. Informes de investigación 1990 CENID-RASPA Vol. 5 (Cáp. III), 1993, INIFAP SARH. P. 379-411.
- \_\_\_\_\_ 2002. Patrones de humedad y eficiencias en micro aspersion. AGROFAZ. Gómez Palacio, Dgo. Méx. 2(2):143-151.
- Sebastián P., M. 2006. Simulación estocástica del riego por gravedad Tesis Profesional Ingeniero agrónomo en irrigación, UAAAN-UL,

División de carreras agronómicas, Departamento de Riego y Drenaje. Torreón, Coahuila México, 46 p.

Shearer, M. N. 1989. Cost analysis of the electric energy for irrigation. *In: Seminario internacional sobre tecnificación del riego y uso racional de la energía.* 10 al 13 abril. Comarca Lagunera, México. pp. 84-92.

Solomon, K. H. 1990 Selecting the appropriate irrigation system. characteristic of sprinkler and trickle systems Examined, special report agribusiness worldwide sep/oct 1990. P. 28-40.



Editor: Ing. Raquel Anguiano Gallegos

Comité Editorial del **CENID-RASPA**

Presidente: Dr. José Antonio Cueto Wong

Secretario: Ing. Raquel Anguiano Gallegos

Vocales: Dr. Guillermo González Cervantes

M. C. Miguel Rivera González

Editor Técnico:

Dra. Ma. Magdalena Villa Castorena

Esta publicación se terminó de imprimir en el mes de agosto del 2007 en los talleres del Grupo Colorama de Torreón, Coahuila.

Su tiraje consta de 600 ejemplares





**CENID-RASPA**

**Km 6.5 margen derecha canal Sacramento**

**Gómez Palacio. Durango. MÉXICO.**

**Apdo. Postal 41, Cd. Lerdo, Dgo.**

**Tels. y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34**

**e-mail: [roman.abel@inifap.gob.mx](mailto:roman.abel@inifap.gob.mx)**