

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”  
UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE**



**“EVALUACIÓN, DIAGNÓSTICO Y EFICIENCIA DE RIEGO POR  
ASPERSIÓN DE PIVOTE CENTRAL APLICANDO UN MODELO LINEAL.”**

**POR**

***ORLANDO RAMÍREZ VALLE***

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO "

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

"EVALUACIÓN, DIAGNOSTICO Y EFICIENCIA DE RIEGO POR ASPERSIÓN  
DE PIVOTE CENTRAL APLICANDO UN MODELO LINEAL"

POR:

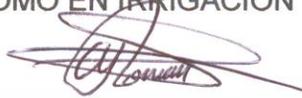
ORLANDO RAMÍREZ VALLE

TESIS

QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ ASESOR, COMO  
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

ASESOR PRINCIPAL:



M.C. ABEL ROMÁN LÓPEZ

ASESOR:



PH. D. MARCO ANTONIO INZUNZA IBARRA

ASESOR:



PH. D. VICENTE DE PAÚL ÁLVAREZ REYNA

ASESOR:



M.C. FEDERICO VEGA SOTELO



M.C. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División  
de Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.

DICIEMBRE 2007.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TESIS DEL C. ORLANDO RAMÍREZ VALLE Y QUE SE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR, COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EN TÍTULO DE:

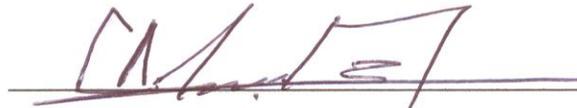
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

PRESIDENTE:



M.C. ABEL ROMÁN LÓPEZ

VOCAL:



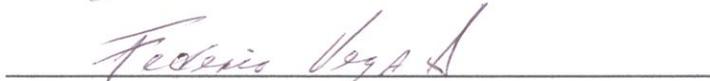
PH. D. MARCO ANTONIO INZUNZA IBARRA

VOCAL:

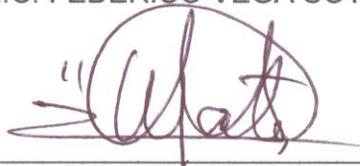


PH. D. VICENTE DE PAÚL ÁLVAREZ REYNA

VOCAL SUPLENTE:

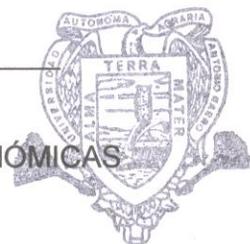


M.C. FEDERICO VEGA SOTELO



M.C. VÍCTOR MARTÍNEZ CUETO

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



Coordinación de la División  
de Carreras Agronómicas

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO.

DICIEMBRE 2007.

## DEDICATORIAS

### **A DIOS:**

Por haberme dado la sabiduría, Fe, Fortaleza, Salud y la esperanza ya que sin Él nada podemos hacer. Dios es quien nos concede el privilegio de la vida y nos ofrece lo necesario para lograr nuestras metas. Por las pruebas que me hacen crecer como persona y ser humano y me permiten dar lo mejor de mí.

### **A MIS PADRES:**

Hugo Ramírez López y Gregoria Valle Ramírez †, por enseñarme a luchar y seguir delante, por su gran corazón y capacidad de entrega, pero sobre todo por enseñarme a ser responsable, gracias a ustedes he llegado a esta meta. Espero se sientan muy orgullosos de este logro, pero quiero que sepan, que esto no es mas que el fruto de su maravillosa enseñanza. Quiero que esto sea un pequeño reconocimiento a su gran esfuerzo de la vida.

**Gregoria Valle Ramírez †**, a mi madre quien descansó en el Señor en el año 2002. A ti madre por concederme la vida, por el apoyo que me brindaste y toda tu comprensión. Aunque sé que estas en el cielo siento que estas conmigo.

### **A MI FAMILIA:**

Maria Isabel, René, mi cuñado y a mi sobrinita Evelyn Natalia, por su apoyo y confianza que depositaron en mí y a quienes de alguna manera contribuyeron a mi formación profesional.

### **A MI NOVIA:**

Adriana Zeny Morales Fabián. Quien es mi compañera, mi apoyo, mi amiga y es la persona más especial. Que con su paciencia y apoyo incondicional me ayudo a continuar y culminar el primer paso de mi vida. Te amo nunca cambies.

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A MI UNIVERSIDAD:**

Por brindarme las facilidades para desarrollar mis virtudes y destrezas por ser parte fundamental de mi formación profesional, quien me cobijo durante cuatro años en los cuales siempre alimentó y fortaleció la esperanza de mis padres.

### **AL CENID-RASPA:**

Por haberme permitido participar con el cuerpo científico que en el labora, por las facilidades que tuve durante la realización del presente trabajo.

### **A MIS ASESORES:**

**MC. Abel Román López**, Gracias por su apoyo y paciencia para la realización del trabajo profesional, gracias por ser mi maestro y transmitirme sus conocimientos e inculcarme amor y respeto al trabajo.

**Ph D. Marco Antonio Inzunza Ibarra**, Por su apoyo incondicional y dedicación para la culminación del presente trabajo.

**Ph D. Vicente de Paúl Álvarez Reyna**, por el empeño, dedicación y apoyo para la culminación de la presente Investigación.

**MC. Federico Vega Sotelo**, por el gran apoyo que recibí de el como profesor durante mi estancia en la Universidad.

**A mis Profesores:** por la gran amistad que me brindaron y por guiarme en el trayecto de mi formación Profesional.

**A MIS COMPAÑEROS:** Benjamín, Humberto, Martín, Rosibel, Pedro, Guillermo, Abraham, Marco Antonio, Argeo, Ramiro, Ildefonso, Paola, Amin, Gracias por su amistad que recibí de ellos durante la carrera.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

	PÁGINA
Dedicatorias.....	i
Agradecimientos.....	ii
Índice de contenido.....	iii
Índice de Figuras.....	v
Índice de Cuadros.....	vi
Resumen.....	vii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	3
III. OBJETIVOS.....	5
IV. META.....	5
V. HIPÓTESIS.....	5
VI. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
6.1. Pivote Central.....	6
6.1.2. Uniformidad de Riego.....	6
6.1.3. Coeficiente de Uniformidad o Uniformidad de Distribución (UD <sub>pc</sub> ) en sistemas de riego por aspersión Pivote Central.....	6
6.2. Eficiencia de Aplicación relativa. (E <sub>a</sub> ).....	7
6.2.1. Eficiencia de Aplicación Absoluta o Global (E <sub>aa</sub> ).....	8
6.2.2. Eficiencia de Almacenamiento o Requerimiento (E <sub>r</sub> ).....	8
6.2.3. Eficiencia de Captación.....	9
6.3. Percolación (P).....	9
6.4. Déficit (D).....	10
6.5. Modelo de Distribución Lineal.....	10
VII. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
7.1. La Comarca Lagunera como área de estudio.....	13
7.2. Ubicación Geográfica.....	13
7.3. Características Climáticas de la Comarca Lagunera.....	13
7.4. Procedimiento para la obtención de datos de Pluviometría.....	14
7.5. Consideraciones de diseño en pivote central.....	14
7.6. Consideraciones de operación en pivote central.....	15

7.7. Consideraciones de evaluación en pivote central.-----	15
7.8. Opciones de mejoramiento de las consideraciones propuestas.---	16
7.9. Obtención del Modelo Lineal.-----	18
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.-----	19
8.1. Obtención de la $UD_{pc}$ .-----	21
8.2. Análisis de Lámina aplicada en la Longitud del Pivote.-----	22
8.3. Obtención de la eficiencia de captación $E_c$ .-----	26
8.4. Opciones de mejoramiento de eficiencia en los Pivotes central evaluados.-----	28
8.5. Análisis de Modelo Lineal en Pivotes central.-----	30
IX. CONCLUSIONES.-----	32
9.1 Recomendación.-----	32
X. BIBLIOGRAFÍA.-----	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Ajuste de valores observados al modelo lineal para riego por aspersión.-----	12
Figura 2 Curva de la distribución del agua de riego adimensionalizada.-----	12
Figura 3 Lámina de agua aplicada por el pivote central AMP. De la Región Lagunera Jul 2006.-----	23
Figura 4 Lámina de agua aplicada por el pivote central Camsag. De la Región Lagunera Jul 2006.-----	23
Figura 5 Lámina de agua aplicada por el pivote central Prov. De la Región Lagunera Jul 2006.-----	24
Figura 6 Lámina de agua aplicada por el pivote central mont. De la Región Lagunera Jul 2006.-----	24
Figura 7 Lámina de agua aplicada por el pivote central mont red. De la Región Lagunera Jul 2006.-----	25
Figura 8 Lámina de agua aplicada por el pivote central Los Treinta. De la Región Lagunera Jul 2006.-----	25
Figura 9 Intercepción de la línea debido a una buena operativa del sistema.-----	31
Figura10 Representación gráfica de una mala operación del sistema--	31

## ÍNDICE DE CUADRO

	Página
Cuadro 1 Eficiencia de riego total o global ( $E_{aa}$ ) en diferentes sistemas de riego presurizado.-----	8
Cuadro 2 Características técnicas de diseño y operación de los pivotes muestreados.-----	19
Cuadro 3 Datos de pluviometría de los pivotes evaluados.-----	20
Cuadro 4 Datos de evaluación de del UDpc del pivote central "AMP", De la Región Lagunera Jul 2006.-----	21
Cuadro 5 Cálculos del volumen aplicado ( $V_i$ ). Del pivote central "AMP", De la Región Lagunera Jul 2006.-----	27
Cuadro 6 Indicadores de eficiencia encontrados en la evaluación.-----	28
Cuadro 7 Cuadro ejecutivo resultados de AER obtenidos con el modelo lineal.-----	29

## RESUMEN

La evaluación de máquinas de riego Pivote Central resulta necesaria para validar en condiciones de campo sus parámetros reales de funcionamiento, generalmente la evaluación pluviométrica proporciona los datos necesarios para corroborar el correcto funcionamiento hidráulico de la máquina.

La presente investigación tuvo como propósito principal integrar una metodología que permita hacer una evaluación Integral de pivote central. De acuerdo al muestreo realizado y evaluación de los pivotes instalados actualmente en la región lagunera, se encontraron indicadores de eficiencia global de 57 % y de uniformidad de riego del 62 %, valores muy por debajo de los valores de eficiencia esperados que teóricamente fluctúan en el rango de 75 a 90 % de acuerdo al tipo de aspersor utilizado. Adicionalmente a la baja eficiencia encontrada, se detectaron problemas operativos que contribuyen a la baja eficiencia global de los mencionados equipos, como la falta de programación del riego, limpieza o filtración del agua en el rebombeo y rediseño de boquillas.

## I. INTRODUCCIÓN

El territorio mexicano está cubierto por una gran diversidad de climas; al norte predominan los climas árido y semiárido, donde el uso eficiente del agua cobra especial importancia para la producción agrícola, tal es el caso de la región Lagunera Coahuila y Durango que se encuentra dentro de la región administrativa VII cuencas centrales del norte del país (CNA 2005). Cuenta con una superficie plana de 24,000 Km<sup>2</sup> (2.4 millones hectáreas) delimitada por una cordillera de montañas y con 12 municipios y un potencial de 220,000 hectáreas dentro de las cuales, 96,000 son susceptibles de riego (Cruz y Levine 1998).

Las principales fuentes de abastecimiento de agua para riego son; una presa almacenadora y otra derivadora en las vertientes del río Nazas que se utiliza en 60,000 hectáreas en hortalizas frutales y cultivos industriales. En el riego de la superficie restante, el agua es obtenida de 8 acuíferos los cuales, 3 se encuentran sobreexplotados, dos de ellos los más importantes, son el Principal y de Ceballos a los que se les extrae el 80 por ciento del agua utilizada (Cruz y Levine 1998). Del volumen total extraído en sus dos acuíferos principales (810/1297 MM<sup>3</sup>, Recarga/extracción), de 1297 MM<sup>3</sup>, se estima que se utilizan 641.6 MM<sup>3</sup> en el riego de 29,842 ha de alfalfa para forraje (Montemayor *et al.*, 2006).

Este volumen resulta de la aplicación de una lamina media anual de dos metros a este cultivo para el área referida, para una eficiencia de riego del 55% (Moreno *et al.* 2000). Sin embargo, resultados de investigación en riego deducen que es posible reducir las lamina anual de 2 m a 1.7 m anuales con riego por aspersion con una eficiencia global de riego entre 75-90 % (Román *et al.*, 2005), 510 Mm<sup>3</sup> de agua anual con un sustancial ahorro del volumen de agua del 20.5 %.

En este proceso productivo agua-forraje y la problemática expuesta, obviamente se han planeado y/o ejecutado acciones de resolución, como cambios de forrajes más eficientes en el uso del agua pero sin disminuir la calidad del forraje y manteniendo así la producción lechera regional, y de manera paralela se ha dado la adopción de la tecnificación del riego mediante la implementación de sistemas de riego por aspersión de movimiento continuo como el pivote central, que además sirven para reducir costos en la mano de obra y de controlar plagas y enfermedades. El área agrícola de la Comarca Lagunera en el 2004, se registraron 8,850 has con riegos presurizados, 4702 has correspondían a pivote central en forrajes, esto representó un 53 % de dicha superficie con estos sistemas.

En la actualidad el uso de sistemas presurizados de riego constituyen una alternativa viable al uso eficiente del agua, principalmente en las zonas agrícolas donde este recurso es escaso como en el norte de México.

El objetivo del presente estudio fue proporcionar una metodología integral de evaluación de la operación de un sistema de riego por aspersión de pivote central para su diagnóstico y mejoramiento, con el fin de incrementar la productividad del agua y calidad de las cosechas. Esto dentro del marco del Del proyecto preci N° 6035889M del INIFAP “Incremento en la Eficiencia del Uso del Agua de Riego en Regiones Agrícolas con Incertidumbre Climática”

## II. JUSTIFICACIÓN

La Comarca Lagunera Coah. – Dgo de la Republica Mexicana, cuenta con 8 acuíferos de los cuales cuatro de ellos se encuentran sobreexplotados, dos de los mas importantes, el Principal y Ceballos se encuentran en fase crítica, estudios recientes del acuífero Principal sobre el que se sustenta toda la actividad agropecuaria, demográfica e industrial, indican una recarga de  $518.9 \text{ Mm}^3$  y una extracción de  $1221.8 \text{ Mm}^3$  de los cuales  $1045.2 \text{ Mm}^3$  se destinan para uso agrícola (CNA 2002) y  $641.6 \text{ Mm}^3$  se utilizan en el riego de 29,842 has. de alfalfa para forraje (Montemayor *et al* 2006). En términos visuales el volumen del preciado liquido para forraje sobrepasa la recarga del acuífero Principal y constituye el 79 % de la extracción regional, porcentualmente la extracción regional excede en 60 por ciento a la recarga, y en el caso del Principal en 135.5 por ciento; conforme a los datos de Montemayor *et al* 2006. Un indicador de uso de agua anual por dicho forraje es de  $21,450 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  y una lamina de 2.15 m.

Resultados de investigación con aspersión fijo y lateral con ruedas de movimiento intermitente se concluye que se puede incrementar el rendimiento medio regional del cultivo de alfalfa en verde hasta en un 60% con una lámina anual aplicada de 1.58 cm (Rodríguez 1988.). En estos sistemas de irrigación su indicador es de  $15,800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , que representa un ahorro anual de  $5650 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  que es de un 26 %. Puede asumirse cuando la eficiencia uso del agua para aspersión fijo y lateral con ruedas es de 70 – 80 %, y 65 – 75 % respectivamente, y Pivote Central de 75 – 90 % según lo indica Solomón en 1990 citado por Román *et al* 2005, con tales indicadores se estima que posiblemente con el pivote central sea factible incrementar a mas de 23 % el ahorro de las extracciones de agua subterránea utilizada en el riego de forrajes.

En la tecnificación del riego mediante la implementación de sistemas de riego por aspersión de movimiento continuo como el pivote central para la producción de forraje en la región lagunera se desconocen los indicadores de eficiencia con la que operan los pivotes central, por lo que esto genera la necesidad de generar una metodología para su evaluación, diagnóstico y mejoramiento de dichos sistemas.

En la tecnificación del riego mediante la implementación de sistemas de riego por aspersión de movimiento continuo como el pivote central para la producción de forraje en la región lagunera se desconocen los indicadores de eficiencia con la que operan los pivotes central, por lo que esto genera la necesidad de generar una metodología para su evaluación, diagnóstico y mejoramiento de dichos sistemas.

### **III. OBJETIVOS**

#### **OBJETIVO GENERAL:**

Obtener una metodología de evaluación, diagnóstico y mejoramiento del funcionamiento y manejo de los sistemas de riego por aspersión de pivote central utilizados en el sistema producto forraje.

#### **OBJETIVO PARTICULAR:**

Generar e integrar una metodología que involucren los indicadores de eficiencia en el modelo lineal de evaluación en riego por aspersión para proporcionar políticas de mejoramiento.

### **IV. META**

Mejorar la eficiencia de riego de los sistemas de riego por aspersión pivote central.

Integrar una metodología para determinar la evaluación, diagnóstico y mejoramiento del funcionamiento y manejo de los sistemas de riego por aspersión de pivote central (automatizados) para la producción de forrajes.

### **V. HIPÓTESIS**

La metodología propuesta permite integrar los indicadores de eficiencia en el modelo lineal: La integración de indicadores nos permite el mejoramiento de eficiencia de los sistemas de riego por aspersión.

## VI. REVISIÓN DE LITERATURA

### 6.1. Pivote Central

Pivote es una máquina constituida fundamentalmente por una estructura metálica que soporta la tubería con los aspersores, dotada de un mecanismo de avance automático y una alimentación de agua continua, lo que permite regar durante el avance. La máquina gira alrededor de un extremo fijo (punto pivote), por donde recibe el agua y energía eléctrica, donde se sitúan los elementos de control. El equipo se compone de varios tramos articulados, soportados cada uno de ellos por una torre metálica que en su movimiento describen anillos circulares concéntricos. El movimiento de cada tramo se logra mediante un motor eléctrico o hidráulico que transmite el movimiento a unas ruedas mediante un engranaje reductor. El motor eléctrico se ha impuesto sobre el hidráulico, por que permite cambiar el sentido de la marcha y desplazar la máquina sin regar. (Fuentes y García 1999).

#### 6.1.2. Uniformidad de riego

Este parámetro se refiere a las especificaciones técnicas y se relaciona con la diferencia de presiones. Todo sistema de riego a presión se proyecta para que la diferencia de volumen o lámina de riego en los dos puntos extremos en una línea de aplicación tengan una diferencia no mayor de 10 %, para una diferencia de presión no mayor al 20 %. En términos prácticos, esto garantiza que el agua suministrada tenga al menos un 90% de uniformidad. (Román *et al.*, 2005)

#### 6.1.3. Coeficiente de uniformidad o Uniformidad de distribución ( $UD_{pc}$ ) en sistemas de riego por aspersión pivote central

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 metros 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

### 6.2.1 Eficiencia de aplicación absoluta o global ( $E_{aa}$ )

Indica la eficiencia real de uso de agua y se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{aa} = E_a * UD_{pc} \quad \text{Ec.3}$$

Donde  $UD_{pc}$  y  $E_a$  son determinados por las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

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, ya que es el producto de las eficiencias en conducción, distribución y aplicación.

En el caso de sistemas de riego presurizados, la eficiencia de conducción se asume que es 100 por ciento por conducirse en tuberías.

Cuadro 1. Eficiencia de riego total o global ( $E_{aa}$ ) en diferentes sistemas de riego presurizado. Fuente: Solomon 1990 citado por Román et al., 2005.

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

### 6.2.2. Eficiencia de almacenamiento o requerimiento ( $E_r$ )

Hansen (1960), citado por Román *et al.*, (2005) indica que esta eficiencia cuantifica los excesos (percolación) o deficiencias (déficit) de agua aplicada en el riego con relación a la cantidad de agua requerida por la

profundidad de raíces para la evaluación de este parámetro se realiza con la siguiente ecuación.

$$Er = \frac{Za}{Zr} * 100\% \quad \text{Ec.4}$$

Donde  $Za$  ya fue definida anteriormente,  $Zr$  es la lámina de agua requerida en la zona de raíces en (cm) (Román *et al.*, 2005).

### 6.2.3. Eficiencia de captación

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

$$Ec = \frac{Vi}{Vs} * 100\% \quad \text{Ec.5}$$

Donde  $Vi$  es el volumen captado en el área irrigada en  $m^3$  y  $Vs$  el volumen descargado por el sistema también en  $m^3$  (Román *et al.*, 2005)

### 6.3. Percolación (P)

Este término se define como la proporción de lámina infiltrada más allá de la profundidad de raíces, que no utilizan los cultivos; esto no solo se considera como pérdida de agua, sino también como fuente de contaminación del acuífero por lixiviación de fertilizantes. Lo anterior se expresa como un porcentaje de la cantidad total del agua aplicada por el riego sobre el campo. Anyoji y Wu 1994 citados por Román *et al.*, 2005 proponen la siguiente expresión:

$$P = (100 - Ea) \quad \text{Ec.6}$$

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

#### 6.4. Déficit (d)

Se denomina déficit cuando la profundidad de raíces no es irrigada por completo y corresponde al porcentaje de déficit con respecto a la cantidad total requerida. En su estimación se usa la siguiente ecuación (Anyoji y Wu 1994 citados por Román *et al.*, 2005):

$$D = (100 - Er) \quad \text{Ec.7}$$

Donde  $Er$  es la eficiencia de requerimiento

#### 6.5. Modelo de distribución lineal

El modelo de distribución lineal de Karmeli *et al.*, 1978 (ecuación 8) citado por García y Briones 1986, Luna 1988, Rodríguez 1989 y utilizado por Luna 1989 (adecuándolo para evaluación de riego superficial), así como Moreno 1992 y Román 1993 para aspersión de movimiento intermitente; Esta metodología fue propuesta para los sistemas de aspersión fijo con traslapes y facilita la caracterización e integración de los parámetros de eficiencia  $E_a$ , y  $E_r$  de las expresiones 2, 4 y se relacionan con la uniformidad de distribución del riego que se relaciona con la uniformidad de distribución lineal que para el caso de pivote central se atenuó esta relación debido al procedimiento de prorrateo empleado, dicha metodología consiste en obtener una regresión lineal entre la lámina de agua que esta entrando al suelo que se obtiene del agua captada en los botes colectores o pluviómetros acomodados en dicha superficie en una área regada por cuatro aspersores en cuadro o cuadrícula y un aspersor en cada vértice o esquina.

Dicha área que se esta irrigando, es dividida en partes iguales o sub-áreas definida por el espaciamiento entre botes y en las cuales se considera que el agua captada por un pluviómetro en el centro de la misma recibiendo una misma lámina de agua, este modelo de regresión representa la distribución del agua infiltrada en las áreas que la están recibiendo, y se expresa por la ecuación 8, mostrada a continuación:

$$Y_0 = a_0 + B X_0 \quad \text{Ec.8}$$

Donde:

- $Y_0$  = Dato adimensional de la lamina de "agua infiltrada"
- $X_0$  = Dato de área adimensional (0 – 1)
- $a_0$  y  $B$  = Parámetros obtenidos por regresión,  $a_0$  es la ordenada de la recta encontrada y  $B$  la pendiente de la misma

Una vez obtenida la ecuación de ajuste, esta se interpreta por medio de la figura 1 que presenta el caso idóneo o más eficiente que se puede recomendar como mínimo en el que se observa que cuando la recta del riego del modelo lineal cruza por 0.5 es el óptimo en aspersión fijo, donde la lámina media aplicada es igual a la lámina requerida (DPH), y que significa que el 50 por ciento del área esta eficientemente irrigada (%AER) por los aspersores, el área triangular achurada diagonalmente hacia la izquierda y sobre la línea de eje (— • —) horizontal representa la fracción de agua percolada, que es la indicada por el área bajo la curva PGJF de la figura 2 dicha gráfica es una representación física hipotética del agua infiltrada durante la irrigación que se representa por el área bajo la curva ABCDFGJA.

El triangulo por debajo de la línea horizontal (— • —) de la figura 1 representa el déficit de agua en la profundidad de raíces indicado por el área FDEF de la figura 2; Aplicando los conceptos de eficiencia de las expresiones 2 y 4 y en base a la figura 1, se generan las ecuaciones 9 y 10.

$$Ea = \left[ \frac{DPHa - \frac{(DPHa - a_0)^2}{2B}}{a_0 + \frac{B}{2}} \right] * 100 \quad \text{Ec.9}$$

$$Er = \left[ \frac{DPHa - \frac{(DPHa - a_0)^2}{2B}}{DPHa} \right] * 100 \quad \text{Ec.10}$$

En la figura 1 y en las ecuaciones 9 y 10 el parámetro  $DPHa$  corresponde a la relación de la lámina requerida entre la lámina media aplicada.

Para condiciones distintas de área eficientemente irrigada y sus respectivas  $E_a$  y  $E_r$  se consideraron las propuestas algebraicas de Luna 1988.

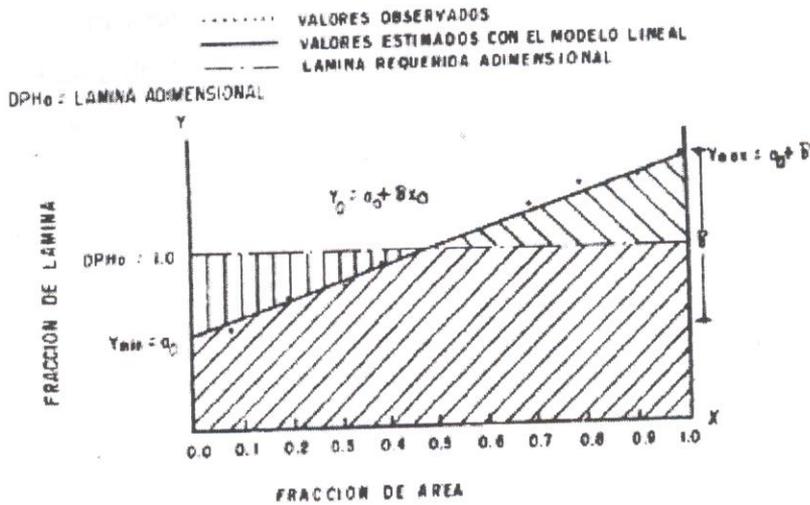


Figura 1. Ajuste de valores observados al modelo lineal para riego por aspersión, tomada de Luna 1988

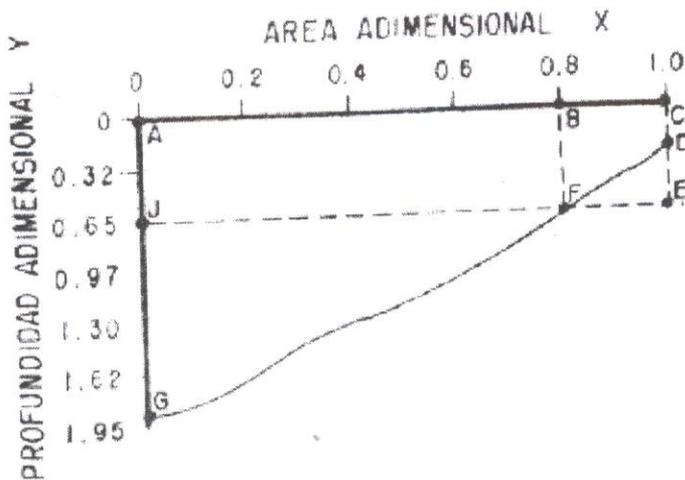


Figura 2. Curva de la distribución del agua de riego adimensionalizada que se obtuvo en las sub - áreas y área total

## **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **7.1. La comarca lagunera como área de estudio**

La Comarca Lagunera se localiza al Norte de México cuya altitud es de 1,100 msnm limitada al oeste por la sierra madre Occidental donde la altitud varia de 2,000 a 3,200 msnm, al este por la sierra madre Oriental cuya altitud varia de 1,800 a 2,500 msnm. Estas barreras orográficas son quienes determinan el clima árido y semiárido que predominan en la Comarca Lagunera.

### **7.2. Ubicación Geográfica.**

La Comarca Lagunera se localiza en las siguientes coordenadas: 102° 30' y 104° 48' de longitud Oeste y los paralelos 24°25' y 26°55' de latitud Norte.

### **7.3. Características Climáticas de la Comarca Lagunera**

En la generación de la metodología propuesta se procedió como requerimiento inicial la evaluación de una muestra de pivotes central de la Comarca Lagunera de Coahuila - Durango. A grandes rasgos las características generales de la Región son; altitud sobre el nivel del mar 1130 m, el valle donde se encuentra lo agrícola tiene un clima de tipo BWh, o sea muy seco y semi cálido, temperatura media anual es del orden de 18 °C a 30° C, precipitación media anual de 260 mm/año; período de lluvias junio a octubre, siendo julio, agosto y septiembre los meses más lluviosos (CNA 2002), El viento es muy importante en la selección y operación de los sistemas de riego por aspersion, una caracterización reportada por Hernández 1989 al respecto es; que durante siete meses al año de Febrero a Agosto se tienen valores considerables aunque no críticos una media de 9.5 Km/hr, el resto del año 5.9 Km/hr; la humedad relativa la mayor parte del tiempo de 35% durante las lluvias el promedio es de 48 % (Román 1989).

El tipo de suelo predominante tiene textura de arcilloso y arcillo-arenoso ambos con el 37 y 36 % de extensión territorial respectivamente, los primeros con buena capacidad de retención en el suelo y los segundos con buena capacidad de infiltración básica (Ostos 2001).

#### **7.4. Procedimiento para la obtención de datos de Pluviometría.**

En esta etapa se utiliza una hilera de recipientes colectores, y el tiempo de prueba esta definido por el tiempo de residencia o lo que dura en pasar el patrón de aplicación sobre un punto determinado.

Para coleccionar el volumen de agua en los sistemas de Pivotes central que consta de una línea regante montada en torres, se coloca una hilera de recipientes a lo largo de toda la línea; la separación entre estos será:

$S = L/N$ , Donde S es la separación entre recipientes, L la longitud de pivote central o radio de la maquina, N número de recipientes con la consigna de que S sea menor o igual 10 m; los espaciamentos entre recipientes colectores inicia con el primero colocándolo después del espaciamento sin cultivo procurando una distancia con respecto al punto pivote de  $\frac{1}{2} * S$ , con dicha iniciación de distribución geométrica se espera tener el mismo espaciamiento del ultimo colector con respecto al radio de riego final. El sistema de pivote de central los volúmenes coleccionados deben ponderarse por el área que representan ya que esta superficie se incrementa con la distancia desde el centro.

#### **7.5. Consideraciones de diseño en pivote central**

El valor critico que imposibilita la posible adopción de un riego por aspersion es mayor de 16 km/hr.; Los sistemas de aspersion de movimiento continuo (pivote central y lateral móvil) hipotéticamente son menos afectados por el viento. Sin embargo un traslape entre aspersores de 21.5% en la línea de riego si es considerado en el diseño del sistema (Pech, 1979) con la finalidad de obtener una uniformidad de riego  $\geq$  del 90 %.

## 7.6. Consideraciones de operación en pivote central

De acuerdo a la hidrología se estima que poco mas del 70% del agua que llueve en el país se evapotranspira y regresa a la atmósfera y el resto se distribuye en los almacenamientos superficiales y subterráneos (CNA 2005), paradójicamente en aspersión que es una lluvia artificial para el riego de los cultivos se estima que en sistemas de aspersión o microaspersión de gotas finas se puede llegar a perder hasta un 20 por ciento por evaporación directa a la atmósfera. En la programación de riegos, el usuario en la Comarca Lagunera los ha adecuado a riegos pesados en sectores circulares y mediante tandeos en los mismos desfasando desde cosecha hasta siembra las necesidades de agua, similar a como se trabaja en el riego tradicional por gravedad.

## 7.7. Consideraciones de evaluación en pivote central

La metodología de evaluación fue basada en la reportada por Román *et al.*, 2005, en donde se proporciona la manera de distribución y recepción de la pluviometría en los Pivotes central en la que además se proponen indicadores de eficiencia del desempeño de dichos sistemas de riego, los cuales den un diagnostico del funcionamiento actual de los mismos conforme a sus valores conservadores y si estos no se están dando proponer acciones de mejoramiento para lograrlo, dichos indicadores son resumidos mencionados a continuación: **Uniformidad de riego o distribución (UDpc):**  $UDpc = (M_{25}/M_{pp}) * 100$ , en la que  $M_{25}$  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 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):**  $Ea = (Za/Z) * 100$  siendo  $Za$  la lámina de agua promedio almacenada en la zona de raíces por

efecto del riego y Z la lámina total de agua aplicada en el riego ambas en cm. **Eficiencia de aplicación absoluta (Eaa)**  $E_{ap} = E_a * UD_{pc}$ , Solomon (1990) citado por Román *et al.*, 2005. reporta que en pivote central debe encontrarse entre 75 – 90 %. **Eficiencia de almacenamiento o requerimiento (Er)**  $E_r = (Z_a/Z_r)*100\%$ ,  $Z_r$  es la lámina de agua requerida en la zona de raíces también en Cm. **Percolación (P)**:  $P = (100 - E_a)$ , Donde  $E_a$  es la eficiencia de aplicación. **Déficit (D)**:  $D = (100 - E_r)$ , Donde  $E_r$  es la eficiencia de requerimientos.

**Eficiencia de captación (Ec)**:  $E_c = (V_i/V_s)*100\%$ :  $V_i$  es el Volumen captado en el área irrigada en  $m^3$  y  $V_s$  es el bombeado durante el riego.

### 7.8. Opciones de mejoramiento de las consideraciones propuestas

El mejoramiento de la eficiencia de riego en aspersión fijo utiliza el modelo de distribución lineal de Karmeli *et al.*, 1978 utilizado por Moreno 1992 y Román, 1993 para aspersión de movimiento intermitente. Esta metodología representa la distribución del agua infiltrada en las áreas que la están recibiendo, y se expresa por la ecuación:  $Y_0 = a_0 + B X_0$  Donde:  $Y_0$  es la lamina adimensional de "agua infiltrada";  $X_0$  el área adimensional con valor de (0 – 1),  $a_0$  y B son parámetros obtenidos por regresión.  $a_0$  es la ordenada de la recta encontrada y B la pendiente de la misma.

Uno de los inconvenientes para la aplicación del modelo de distribución lineal es la relación de áreas adimensionales que en pivotes central son coronas circulares crecientes conforme se van alejando del centro o punto pivote por lo cual fue necesario encontrar un procedimiento geométrico de áreas circulares crecientes conforme se van alejando del centro o punto pivote por lo cual se genero el siguiente algoritmo ( Ecuación 11)

$$A_n = \sum_{i=1}^n \left[ \pi (nS + S_{sc})^2 - \pi ((n-1)S - S_{sc})^2 \right] \quad \text{Ec. 11}$$

En la obtención del volumen de agua perdido por precolación conforme a la figura 1 se genero la expresión (13), para cada caso de porcentaje de área eficientemente irrigada (% AER) primeramente se obtiene dicho volumen para la condición inicial de riego procesando con  $a_0$  y su respectivo (%AER) y enseguida se procesa con el respectivos  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  y su correspondiente (%AER).

$$Vol.Percolado = \frac{a_n + B - DPH_a}{2} * \frac{Vol.Tot.Aplicado}{AreaTot.regada} \quad Ec.13$$

Finalmente, una vez que el modelo con todas las consideraciones anteriores es conceptualizado, para obtener una respuesta integral de diagnostico del mismo se procesaran los demás indicadores de eficiencia del riego por aspersion de pivote central como, los parámetros de eficiencia global del riego (Eaa), Precolación (P), Déficit (D), y Captación (Ec).

### 7.9. Obtención del Modelo Lineal

1. Ordenar las láminas medias aplicadas ( $y_i$ ) de menor a mayor.
2. Obtener el valor de la lámina media  $\bar{Y}$ .
3. Dividir cada valor de  $y_i$  entre  $\bar{Y}$  para obtener la lámina adimensional  $Y$ .
4. Determinar la fracción de área o longitud que le corresponde a cada valor de la lámina aplicada media, dividiendo el área correspondiente a cada estación de observación por el área o longitud total.
5. Listar en una forma acumulada los valores de fracción de área o longitud que le corresponda a cada valor de la lámina adimensional  $Y$ .
6. Obtener la lámina requerida adimensional dividiendo la lámina requerida para cierta profundidad de raíces por la lámina media aplicada medida.
7. Graficar y llevar a cavo la regresión lineal con los pares de valores de  $Y$  vs.  $X$ .
8. Al obtener los coeficientes de regresión lineal ( $a, b$ ) del modelo  $Y = a + bx$  y los valores  $X'$  y/o  $X''$  obtenga los índices de eficiencia de la calidad del riego en cada caso (Luna, 1988).

### VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 se muestran las características técnicas de campo y de archivo, o sea de diseño y operativas de los sistemas de riego por aspersión Pivote central ubicados en la región lagunera. En el Cuadro 3 se muestran los datos colectados en cada pivote en donde, **S** es la distancia entre pluviómetros y **Vol.** Es volumen captado en el muestreo en  $\text{cm}^3$  (ml), nótese que las primeras muestras están a espaciamientos mayores debido a que se tiene un área circular sin cultivo y por lo tanto sin riego.

Cuadro 2. Características técnicas de diseño y operación de los pivotes muestreados

Pivote	Q L s <sup>-1</sup>	Velocidad del pivote %	Viento			Temp. °C	HR %	Fecha	Sup. Has.
			Vel. Ms <sup>-1</sup> Kmh <sup>-1</sup>	Dirección	Afecta				
Mont.	32.69	30	6.33 (22.8)	NE	Perp.	34	37.5	Jun-05	24
Prov.	51.8	25	Inapreciable	NO	Variable	24	36.7	Sep-05	67.2
Los treinta	56.19	30	0.5	N	Diagonal	37.5	40.4	Nov-05	44.16
Mont. red.	38.2	30	3	N	Diagonal	32.5	40	Nov-05	28.5
CamSag.	57	30	6	N	Perp.	26	48.8	Jun-06	75
Amp.	63.08	16	8	S	Diagonal	31	52.6	Jul-06	65.6

Pivote	Superficie evaluada		Presión de operación		Presión de bomba PSI	Tipo de Bomba	TR por pasada hrs.	DPH riego cm	DPH pivote cm
	fracc.	Has	MCA	PSI					
Mont.	1/2	12	14.06	20		BCH	15.5	4.6	1.52
Prov.	1/4	16.8	37.26	53	55	BCH	16	2.46	3.65
Los treinta	1/4	11.63	28.12	40		BCV	14.24	4.69	2.48
Mont red.	1/2	14.25	8.43	12		BCH	15.5	4.18	1.49
Cam sag.	1/4	18.75	16.17	23	29	BCV*	12.97	1.98	1.42
Amp.	1/4	16.4	18.28	26		BCV	12.91	6.34	7.15

Mont. Pivote en Antes del rediseño

Mont. red. Pivote después del rediseño.

BCV\* En carcomo de bombeo.

Así mismo, los pivotes evaluados son registrados para tener un mejor control de los valores arrojados por el procedimiento.

Notas: Amp. y prov. se evaluaron 2 pasadas, en prov. el pivote es para 67.2 has, pero solo riegan con pozos profundo 50.4 has, 33.6 has de alfalfa que es la mitad, y 16.8 has de maíz que es un cuarto, al momento del riego se evaluó lo correspondiente al riego de un cuarto de alfalfa.

Cuadro 3. Datos de pluviometría de los pivotes evaluados

MONT.			PROV.			LOS 30			MONT. RED.			CAMSAG			AMP		
Nº	S	Vol.	Nº	S	Vol.	Nº	S	Vol.	Nº	S	Vol.	Nº	S	Vol.	Nº	S	Vol.
	m	Cm <sup>3</sup> (ml)		m	Cm <sup>3</sup> (ml)		m	Cm <sup>3</sup> (ml)		m	Cm <sup>3</sup> ml		m	Cm <sup>3</sup> ml		m	Cm <sup>3</sup> ml
1	12	18	1	15	60	1	15	285	1	15	85	1	8	124	1	12	90
2	9	60	2	10	45	2	10	155	2	10	120	2	10	150	2	10	40
3	9	80	3	10	210	3	10	305	3	10	105	3	10	120	3	10	70
4	9	112	4	10	125	4	10	140	4	10	130	4	10	148	4	10	165
5	9	75	5	10	215	5	10	85	5	10	80	5	10	179	5	10	155
6	6	39	6	10	135	6	10	185	6	10	115	6	10	145	6	10	440
7	9	41	7	10	250	7	10	150	7	10	125	7	10	175	7	10	850
8	9	100	8	10	200	8	10	260	8	10	110	8	10	175	8	10	945
9	9	120	9	10	270	9	10	85	9	9	115	9	10	155	9	10	345
10	9	155	10	10	175	10	10	130	10	9	145	10	10	100	10	10	430
11	6	12	11	10	332	11	10	110	11	10	60	11	10	115	11	10	500
12	9	70	12	10	338	12	10	185	12	10	110	12	10	110	12	10	445
13	9	180	13	10	293	13	10	145	13	10	135	13	10	135	13	10	185
14	9	140	14	10	327	14	10	125	14	13	125	14	10	130	14	10	625
15	9	162	15	11	377	15	10	115	15	13	105	15	10	155	15	10	300
16	9	108	16	10	325	16	10	185	16	10	95	16	10	130	16	10	420
17	7	115	17	10	413	17	10	190	17	10	125	17	10	125	17	10	575
18	8	136	18	10	357	18	10	235	18	10	145	18	10	110	18	10	360
19	9	170	19	10	367	19	10	150	19	15	25	19	10	120	19	10	295
20	9	142	20	12	370	20	10	105	20	15	115	20	10	105	20	10	350
21	9	152	21	10	227	21	10	225	21	10	175	21	10	125	21	10	340
22	9	120	22	10	182	22	10	170	22	10	120	22	10	115	22	10	470
23	6	70	23	10	182	23	10	50	23	10	130	23	10	123	23	10	665
24	6	130	24	10	130	24	10	185	24	15	110	24	10	70	24	10	440
25	9	130	25	14	477	25	10	145	25	15	65	25	10	95	25	10	505
26	9	155	26	10	157	26	10	145	26	10	65	26	10	145	26	10	280
27	9	155	27	10	304	27	10	135	27	10	65	27	10	160	27	10	695
28	9	170	28	10	245	28	10	145	28	3	35	28	10	135	28	10	590
29	8	160	29	10	255	29	10	155				29	10	105	29	10	400
30	4	93	30	15	250	30	10	90				30	10	135	30	10	615
31	9	58	31	10	208	31	10	60				31	10	110	31	10	500
32	9	162	32	10	238	32	10	35				32	10	110	32	10	655
33	4	85	33	10	273	33	10	85				33	10	115	33	10	670
			34	10	475	34	10	150				34	10	195	34	10	425
			35	13	260	35	10	250				35	10	140	35	10	640
			36	10	325	36	10	135				36	10	95	36	10	670
			37	10	195	37	10	215				37	10	145	37	10	510
			38	10	210							38	10	85	38	10	175
			39	10	260							39	10	115	39	10	440
			40	17	313							40	10	105	40	10	590
			41	10	204							41	10	125	41	10	320
			42	10	217							42	10	140	42	10	555
			43	10	315							43	10	80	43	10	130
			44	10	100							44	10	115	44	10	900
			45	10	113							45	10	105	45	10	420
			46	5	150							46	10	120			
			47	5	345							47	10	89			
												48	10	375			

### 8.1. Obtención de la UD<sub>pc</sub>

Conforme a los datos de pluviometría del Cuadro 3, se procede de acuerdo a la ecuación (1 UD<sub>pc</sub>), a aplicarla a cada uno de ellos en el cuadro 4 se proporciona un caso procesado en una hoja de cálculo (como Excel de Microsoft Office) para aplicar dicha expresión y obtener su respectivo UD<sub>pc</sub>, el mismo formato se utilizó para los demás pivotes del Cuadro 3.

Cuadro 4. Datos de evaluación de del UD<sub>pc</sub> del pivote central "AMP", De la Región Lagunera Jul 2006. (CENID- RASPA).

Posición N° ó N° de Pluviometro	Longitud de pivote m	Volumen muestreado ml	Lamina encontrada cm	Lamina ponderada N° * cm
1*	10.00	90	0.95*	0.95*
2*	20.00	40	0.42*	0.84*
3*	30.00	70	0.74*	2.21*
4*	40.00	165	1.74*	6.96*
5*	50.00	155	1.63*	8.17*
6	60.00	440	4.64	27.84
7	70.00	850	8.97	62.76
8	80.00	945	9.97	79.74
9	90.00	345	3.64	32.75
10	100.00	430	4.54	45.35
11	110.00	500	5.27	58.01
12	120.00	445	4.69	56.32
13*	130.00	185	1.95*	25.37*
14	140.00	625	6.59	92.29
15*	150.00	300	3.16*	47.46*
16	160.00	420	4.43	70.88
17	170.00	575	6.06	103.10
18	180.00	360	3.80	68.35
19*	190.00	295	3.11*	59.12*
20	200.00	350	3.69	73.83
21	210.00	340	3.59	75.31
22	220.00	470	4.96	109.06
23	230.00	665	7.01	161.32
24	240.00	440	4.64	111.38
25	250.00	505	5.33	133.16
26*	260.00	280	2.95*	76.78*
27	270.00	695	7.33	197.92
28	280.00	590	6.22	174.24
29	290.00	400	4.22	122.35
30	300.00	615	6.49	194.59
31	310.00	500	5.27	163.48
32	320.00	655	6.91	221.07
33	330.00	670	7.07	233.20
34	340.00	425	4.48	152.41
35	350.00	640	6.75	236.26
36	360.00	670	7.07	254.40
37	370.00	510	5.38	199.02
38*	380.00	175	1.85*	70.14*
39	390.00	440	4.64	180.99
40	400.00	590	6.22	248.91
41	410.00	320	3.38	138.38
42	420.00	555	5.85	245.85
43*	430.00	130	1.37*	58.96*
44	440.00	900	9.49	417.67
45	450.00	420	4.43	199.34
Σ N° de posición			Lamina promedio cm	Σ Lamina ponderada
1035			4.73	5298.46

La uniformidad de distribución del pivote central (UDpc) es de 41 %, acorde a la expresión (1) y conforme a los datos colectados en la evaluación y mostrados en el Cuadro 3, esta se obtiene de la siguiente manera; el 25 por ciento de los valores mas bajos esta identificado mediante un asterisco en el Cuadro 4, sumándose tanto sus correspondientes valores ponderados (Lamina ponderada) como los de sus posiciones. En este caso 356.96 y 169, respectivamente. De esta manera la media ponderada del 25 por ciento de los valores con menor aforo resulta de la división de 356.96 entre 169 que resulta de 2.11, de manera similar la media ponderada total resulta de 5.12, dividiendo 5298.46 entre 1035 (Cuadro 4) y finalmente la relación de  $2.11/5.12$  y multiplicado por 100% se obtiene la uniformidad indicada.

Con el mismo procedimiento presentado se obtienen las uniformidades de distribución de los demás pivotes y su respectivo valor es presentado en el Cuadro 5.

## **8.2. Análisis de Lámina aplicada en la Longitud del Pivote.**

Con la finalidad de encontrar problema de exceso o faltante con respecto a la lámina promedio en toda la longitud de la línea regante o pivote central, a continuación se proponen los análisis gráficos (Variogramas), Con la finalidad de visualizar problemas de encharcamiento y déficit de lamina de agua con respecto al promedio aritmético esperado a continuación se presentan en las figuras 3 a 8 para los pivotes evaluados, las variaciones de las láminas con respecto a la longitud del pivote con respecto al centro del mismo, el área achurada nos indica la lamina por el pivote central en toda su longitud.

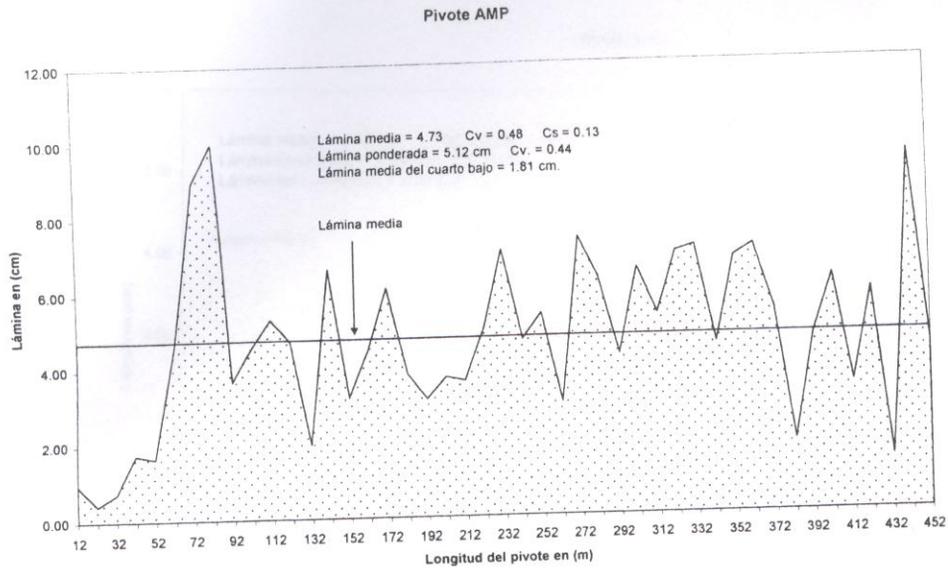


Figura 3. Lámina de agua aplicada por el pivote central AMP. De la Región Lagunera Julio 2006. (CENID- RASPA)

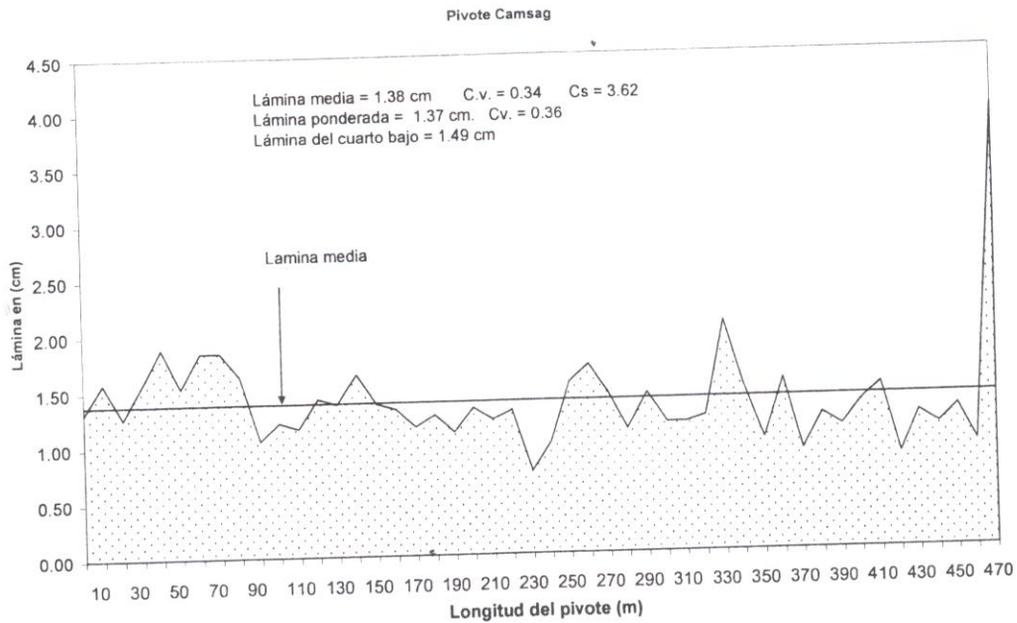


Figura 4. Lámina de agua aplicada por el pivote central Camsag. De la Región Lagunera Julio 2006. (CENID- RASPA).

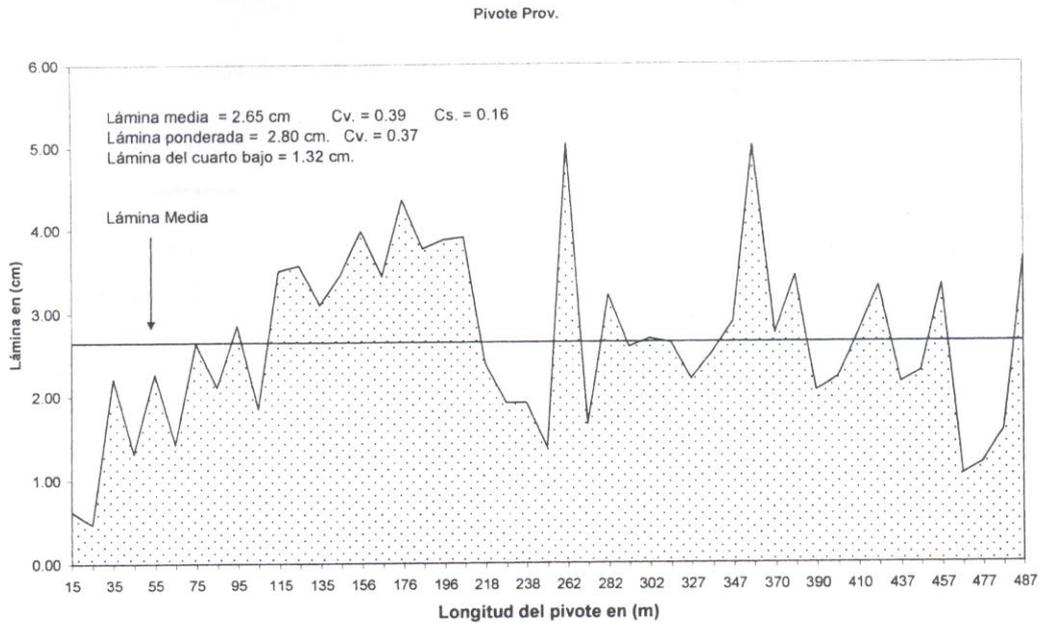


Figura 5. Lámina de agua aplicada por el pivote central Prov. De la Región Lagunera Julio 2006. (CENID- RASPA).

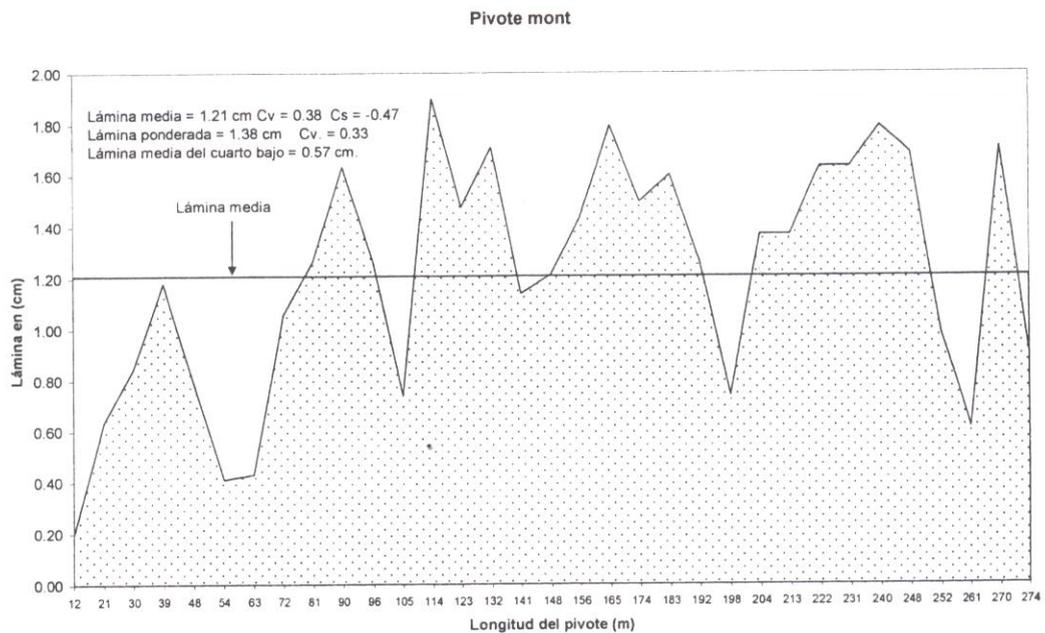


Figura 6. Lámina de agua aplicada por el pivote central mont. De la Región Lagunera Julio 2006. (CENID- RASPA).

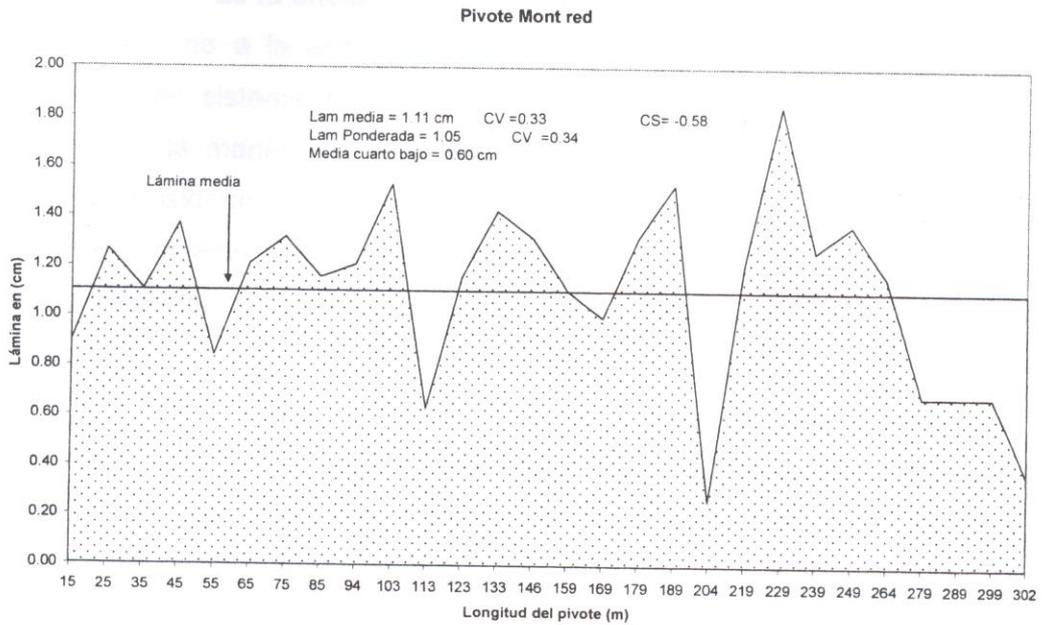


Figura 7. Lámina de agua aplicada por el pivote central mont red. De la Región Lagunera Julio 2006. (CENID- RASPA).

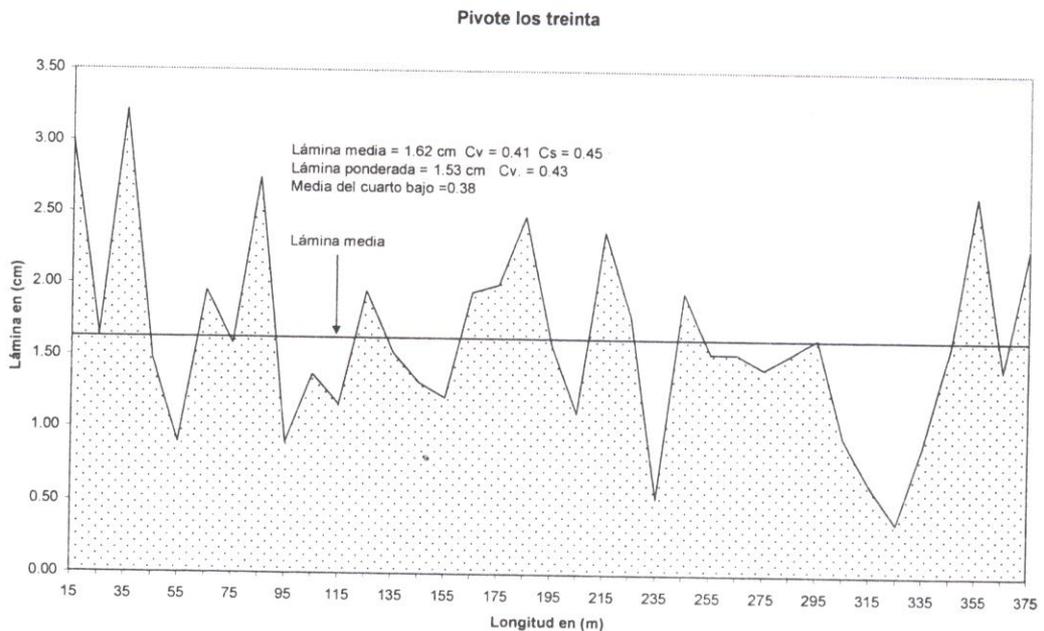


Figura 8. Lámina de agua aplicada por el pivote central Los Treinta. De la Región Lagunera Julio 2006. (CENID- RASPA).

### 8.3. Obtención de la eficiencia de captación $E_c$ .

Conforme a la expresión 5 para la estimación de la eficiencia de captación del sistema pivote central de aspersión, en el Cuadro 5 se proporciona la manera de cómo se obtiene el volumen aplicado, en este caso se consideraron coronas de superficie circular crecientes para cada pluviómetro colector por lo que fue necesario la aplicación de la expresión 11 para la obtención de las áreas irrigadas por cada pluviómetro.

Una vez obtenida el área de influencia por pluviómetro, su sumatoria es la superficie agrícola total irrigada por el pivote, dividiendo cada área parcial con la total se obtiene la proporción del área total, dicha proporción o relación de áreas adimensionales se utilizarán posteriormente en la aplicación del modelo lineal.

Con el producto de la proporción y lámina correspondiente para cada superficie circular se adquiere el volumen aplicado, sumariéndolos, se obtiene el volumen total aplicado ( $V_i$ ) por el pivote.

Para el volumen suministrado ( $V_s$ ) por el equipamiento de bombeo, el gasto de bombeo ( $Q$ ) del pivote AMP es de  $63.08 \text{ L s}^{-1}$  multiplicado por el tiempo de exposición del riego ( $t$ ) que en este caso con velocidad al 16 % , cubre un octavo de la superficie total en 12.91 h., evaluándose dos pasadas,  $V_s = [12.91 \text{ h} * 2 * 3600 \text{ s h}^{-1} * 63.08 \text{ L s}^{-1}] = 5863412.16 \text{ L s}^{-1} = 5863.41 \text{ m}^3$  , relacionando  $V_i$  total (cuadro 5)/  $V_s$  y multiplicándolo por cien por ciento se determina que la eficiencia de captación ( $E_c$ ) es de 71.54 %. Posteriormente, siguiendo este mismo procedimiento indicado, se obtiene las eficiencias de captación para los demás pivotes evaluados y su valor correspondiente lo podemos observar en el Cuadro 6

Cuadro 5. Cálculos del volumen aplicado (Vi). Del pivote central "AMP", De la Región Lagunera Julio 2006. (CENID- RASPA).

Posicion N° ó N° de Pluviometro	Lamina encontrada cm	Area de influencia m2	Proporcion del area total	Lamina encontrada m	Vol. (vi) Aplicado m <sup>3</sup>
1*	0.95	753.984	0.0011	0.0095	0.8946
2*	0.42	1382.304	0.0021	0.0042	0.7290
3*	0.74	2010.624	0.0031	0.0074	1.8556
4*	1.74	2638.944	0.0040	0.0174	5.7406
5*	1.63	3267.264	0.0050	0.0163	6.6767
6	4.64	3895.584	0.0059	0.0464	22.5980
7	8.97	4523.904	0.0069	0.0897	50.6964
8	9.97	5152.224	0.0079	0.0997	64.1906
9	3.64	5780.544	0.0088	0.0364	26.2926
10	4.54	6408.864	0.0098	0.0454	36.3324
11	5.27	7037.184	0.0107	0.0527	46.3889
12	4.69	7665.504	0.0117	0.0469	44.9724
13*	1.95	8293.824	0.0126	0.0195	20.2289
14	6.59	8922.144	0.0136	0.0659	73.5181
15*	3.16	9550.464	0.0146	0.0316	37.7738
16	4.43	10178.784	0.0155	0.0443	56.3625
17	6.06	10807.104	0.0165	0.0606	81.9261
18	3.80	11435.424	0.0174	0.0380	54.2750
19*	3.11	12063.744	0.0184	0.0311	46.9190
20	3.69	12692.064	0.0193	0.0369	58.5660
21	3.59	13320.384	0.0203	0.0359	59.7091
22	4.96	13948.704	0.0213	0.0496	86.4324
23	7.01	14577.024	0.0222	0.0701	127.8014
24	4.64	15205.344	0.0232	0.0464	88.2051
25	5.33	15833.664	0.0241	0.0533	105.4187
26*	2.95	16461.984	0.0251	0.0295	60.7694
27	7.33	17090.304	0.0261	0.0733	156.5956
28	6.22	17718.624	0.0270	0.0622	137.8247
29	4.22	18346.944	0.0280	0.0422	96.7539
30	6.49	18975.264	0.0289	0.0649	153.8537
31	5.27	19603.584	0.0299	0.0527	129.2262
32	6.91	20231.904	0.0308	0.0691	174.7121
33	7.07	20860.224	0.0318	0.0707	184.2633
34	4.48	21488.544	0.0328	0.0448	120.4040
35	6.75	22116.864	0.0337	0.0675	186.6158
36	7.07	22745.184	0.0347	0.0707	200.9136
37	5.38	23373.504	0.0356	0.0538	157.1589
38*	1.85	24001.824	0.0366	0.0185	55.3767
39	4.64	24630.144	0.0375	0.0464	142.8777
40	6.22	25258.464	0.0385	0.0622	196.4735
41	3.38	25886.784	0.0395	0.0338	109.2127
42	5.85	26515.104	0.0404	0.0585	194.0132
43*	1.37	27143.424	0.0414	0.0137	46.5214
44	9.49	27771.744	0.0423	0.0949	329.5267
45	4.43	28400.064	0.0433	0.0443	157.2583
		Area total ( $\Sigma$ ) m <sup>2</sup>	Suma de proporciones		Vol. Total aplicado m <sup>3</sup>
		655966.1	1.0000		4194.85525

Cuadro 6.- Indicadores de eficiencia encontrados en la evaluación.

<b>Predio</b>	<b>UDpc (%)</b>	<b>UDpc * Re (%)</b>	<b>Ea (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>Er (%)</b>	<b>D (%)</b>	<b>Eaa (%)</b>	<b>(Eaa) RE (%)</b>	<b>EC %</b>	<b>Lam. Prom. cm.</b>
Mont.	56	75 - 85	99	1	11	89	55	75 - 90	87	1.21
Prov.	76	75 - 85	93	7	22	78	71	75 - 90	78.63	2.65
Los treinta	65	75 - 85	69	31	35	65	45	75 - 90	57	1.62
Mont red	60	75 - 85	99	1	27	73	59	75 - 90	72	1.11
Cam Sag	72	75 - 85	99	1	69	31	72	75 - 90	96.5	1.38
Amp.	41	75 - 85	89	11	81	19	37	75 - 90	71.54	4.74
PROMEDIOS	62	80	91	9	41	59	57	82.5	77.11	2.11

En la Uniformidad de Distribución de riego en los pivotes evaluados existe una diferencia entre ellos, teniendo una uniformidad mayor de 76 % y una menor de 41% con diferencia entre si de un 35 %. Cabe mencionar que solo un pivote de los 6 evaluados esta dentro del rango de la Uniformidad de Distribución Recomendada (UDpc Re).

Para la obtención de los parámetros Ea, Er, Eaa, P, D, de manera Integral en el modelo lineal se diseño una hoja de cálculo en Excel para facilitar el procedimiento de cálculo y obtención de dichos indicadores para proporcionar su diagnóstico mediante el cuadro 6 y su mejoramiento mediante el cuadro 7.

#### **8.4. Opciones de mejoramiento de eficiencia en los Pivotes central evaluados.**

En el Cuadro 7 se presentan los resultados obtenidos después de haber analizado con el modelo lineal los datos obtenidos en campo.

Cuadro 7 Cuadro ejecutivo resultados de AER obtenidos con el modelo lineal.

	N	AER %	Ea %	Er %	Eaa %	P %	D %	a	b	AP m3/ha	Lr cm
Pivote Amp	1	0	100.0	44.9	41.0	0.0	55.1	-0.137	1.4796	0.00	1.80
	2	30	93.6	73.0	38.4	6.4	27.0	0.307	1.4796	34.06	3.90
	3	50	86.2	86.2	35.4	13.8	13.8	0.603	1.4796	94.62	5.30
	4	42	89.4	81.4	36.6	10.6	18.6	0.483	1.4796	66.62	4.73
	5	70	77.9	95.0	31.9	22.1	5.0	0.899	1.4796	185.46	6.70
	6	80	73.5	97.8	30.1	26.5	2.2	1.047	1.4796	242.23	7.40
	7	90	69.0	99.4	28.3	31.0	0.6	1.195	1.4796	306.57	8.10
	8	95	66.8	99.9	27.4	33.2	0.1	1.269	1.4796	341.58	8.45
Pivote Los treinta	1	0	100.0	78.1	41.0	0.0	21.9	1.626	1.269	0.00	3.35
	2	30	97.8	89.3	40.1	2.2	10.7	2.007	1.269	12.85	3.97
	3	50	94.5	94.5	38.8	5.5	5.5	2.261	1.269	35.68	4.38
	4	-84	100.0	-----	41.0	0.0	-----	0.5569	1.269	0.00	1.62
	5	70	90.1	98.0	37.0	9.9	2.0	2.514	1.269	69.94	4.79
	6	80	87.6	99.1	35.9	12.4	0.9	2.641	1.269	91.35	5.00
	7	90	84.9	99.8	34.8	15.1	0.2	2.768	1.269	115.61	5.20
	8	95	83.5	99.9	34.2	16.5	0.1	2.832	1.269	128.82	5.31
Mont	1	0	100.0	80.5	56.0	0.0	19.5	2.322	1.4796	0.00	3.44
	2	30	98.1	90.5	54.9	1.9	9.5	2.766	1.4796	9.19	3.97
	3	50	95.1	95.1	53.3	4.9	4.9	3.062	1.4796	25.54	4.33
	4	-178	100.0	-----	56.0	0.0	-----	0.483	1.4796	225.98	1.21
	5	70	91.2	98.2	51.0	8.8	1.8	3.358	1.4796	50.05	4.69
	6	80	88.8	99.2	49.8	11.2	0.8	3.506	1.4796	65.37	4.87
	7	90	86.4	99.8	48.4	13.6	0.2	3.654	1.4796	82.73	5.05
	8	95	85.1	100.0	47.6	14.9	0.0	3.728	1.4796	92.18	5.14
Mont red	1	0	100.0	87.4	60.0	0.0	12.6	2.814	0.9516	0.00	3.43
	2	30	98.8	93.8	59.3	1.2	6.2	3.100	0.9516	4.51	3.75
	3	50	96.8	96.8	58.1	3.2	3.2	3.290	0.9516	12.52	3.96
	4	-220	100.0	-----	60.0	0.0	-----	0.7199	0.9516	0.00	1.11
	5	70	94.1	98.9	56.5	5.9	1.1	3.480	0.9516	24.54	4.17
	6	80	92.5	99.5	55.5	7.5	0.5	3.575	0.9516	32.06	4.28
	7	90	90.7	99.9	54.4	9.3	0.1	3.671	0.9516	40.57	4.39
	8	95	89.8	100.0	53.9	10.2	0.0	3.718	0.9516	45.21	4.44
Pivote Prov	1	0	100.0	28.9	76.0	0.0	71.1	-0.391	1.3196	0.00	0.06
	2	30	91.1	65.2	69.2	8.9	34.8	0.005	1.3196	14.55	1.11
	3	50	82.2	82.2	62.5	17.8	17.8	0.269	1.3196	40.42	1.81
	4	74	71.0	95.2	53.9	29.0	4.8	0.5859	1.3196	88.60	2.65
	5	70	72.9	93.6	55.4	27.1	6.4	0.532	1.3196	79.23	2.51
	6	80	68.1	97.2	51.8	31.9	2.8	0.664	1.3196	103.48	2.86
	7	90	63.3	99.3	48.1	36.7	0.7	0.796	1.3196	130.97	3.21
	8	95	60.9	99.8	46.3	39.1	0.2	0.862	1.3196	145.92	3.38
Pivote Camsag	1	0	100.0	68.7	72.0	0.0	31.3	0.536	0.8988	0.00	1.16
	2	30	96.8	84.7	69.7	3.2	15.3	0.806	0.8988	5.74	1.53
	3	50	92.2	92.2	66.4	7.8	7.8	0.985	0.8988	15.94	1.78
	4	18	98.8	78.7	71.1	1.2	21.3	0.6944	0.8988	2.02	1.38
	5	70	86.4	97.2	62.2	13.6	2.8	1.165	0.8988	31.24	2.03
	6	80	83.1	98.7	59.9	16.9	1.3	1.255	0.8988	40.80	2.15
	7	90	79.7	99.7	57.4	20.3	0.3	1.345	0.8988	51.64	2.28
	8	95	77.9	99.9	56.1	22.1	0.1	1.390	0.8988	57.54	2.34

### 8.5. Análisis de Modelo Lineal en Pivotes central.

Con fines Ilustrativos sobre el diagnostico y mejoramiento con la aplicación del modelo lineal a continuación se presentan dos análisis.

En la Figura 9 se presenta un caso idóneo de intercepción de una buena operativa que se explota el sistema conforme al que requerimos no necesariamente la mejor Eficiencia. En la figura 9 el pivote AMP. Presenta el siguiente diagnostico: teniendo un AER. De 42 %, con los siguientes indicadores una  $E_a = 89.4 \%$ , una  $E_r = 81.4 \%$ ,  $E_{aa} = 36.6 \%$ ,  $P = 10.6 \%$  y  $D = 18.6 \%$ . Con la lámina requerida y proporcionada por el sistema, si se desea mejorar al menos al 50% de AER o mas aun en el cuadro 7 se observan las políticas de riego para dichos mejoramientos involucra un incremento de la lámina de riego, y por consecuencia aumento también en volúmenes percolados, como se puede observar el diagnostico de mejoramiento no es muy satisfactorio debido al bajo UDpc. Así como fugas en el sistema, un reemplazo de boquillas y corrección de fugas mejoraría significativamente al UDpc. y por consecuencia incrementaría los valores de los demás indicadores de eficiencia que dependen de dicho parámetro.

En la figura 10 se muestra un caso contrario donde se puede observar que la maquina de riego no se esta operando muy deficiente, el comportamiento del sistema de acuerdo a la Figura antes mencionada se debe en muchos de los casos a aspersores que no pueden distribuir el agua con una pluviometría uniforme por problemas de taponamiento, dando como resultado láminas deficientes para los cultivos, mismas que se reflejan en la UDpc. Teniendo una Influencia en la aplicación del Modelo Lineal y los resultados de las eficiencias.

Modelo Lineal y Efc. Pivote Amp

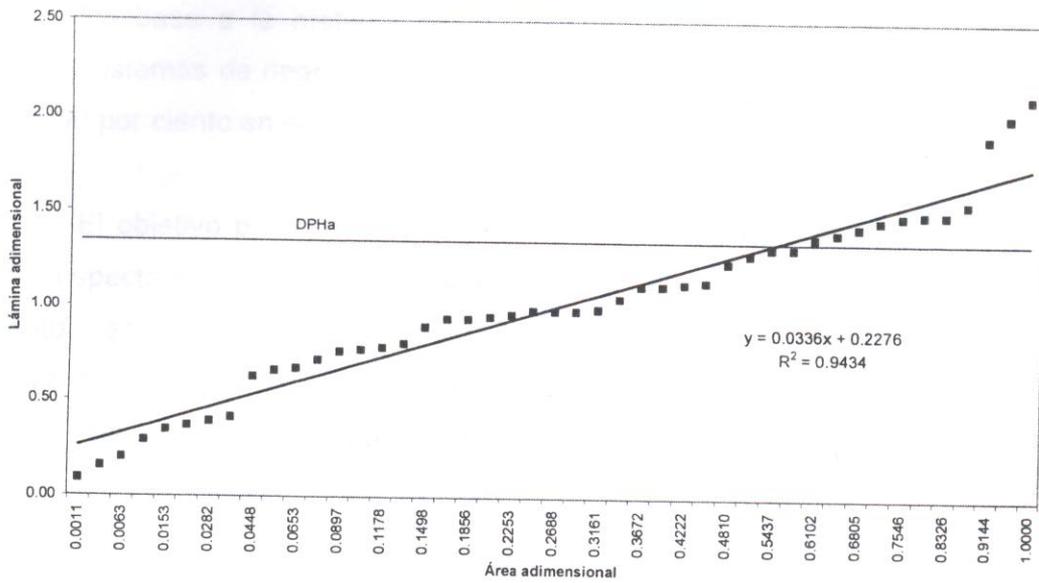


Figura 9.- Intercepción de la línea debido a una buena operativa del sistema.

Pivote mont red

Modelo Lin y Efc. Pivote Mon red.

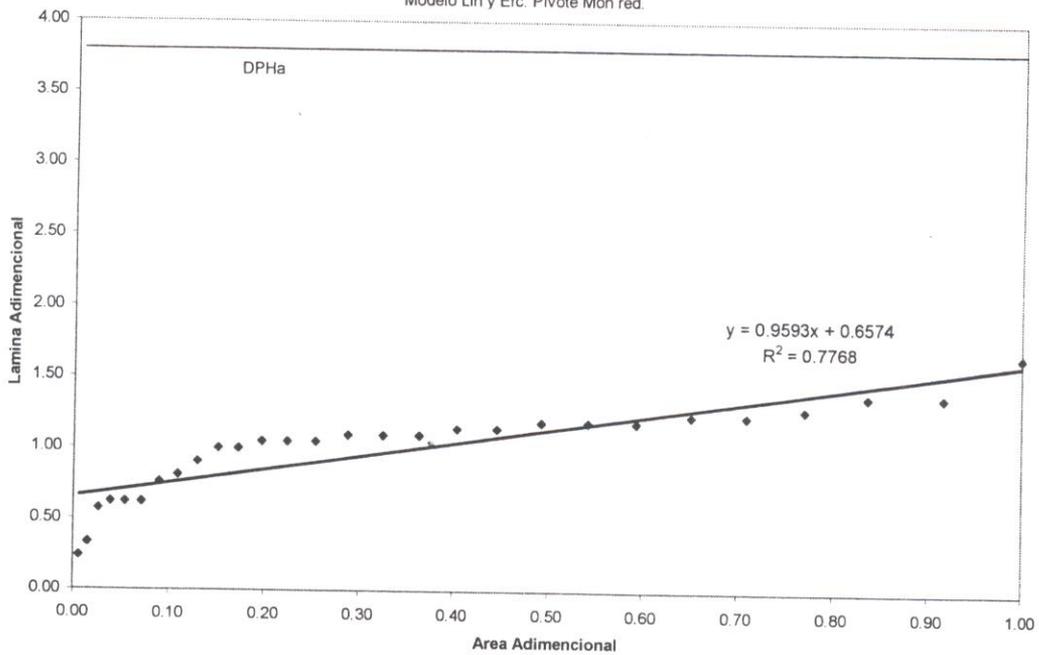


Figura 10.- Representación gráfica de una mala operación del sistema.

## IX. CONCLUSIONES

En base a la metodología y muestreo realizado se concluye que dichos sistemas de riego que en teoría elevan la eficiencia de riego total de 75 a 90 por ciento en la realidad están operando a un 57 por ciento.

El objetivo primordial del pivote central es eficientar el uso de agua con respecto al método tradicional de gravedad que se estima es de 55 por ciento, ante lo cual no se ve diferencia entre ambos métodos, indiscutiblemente donde el productor probablemente si ve significativo dicho cambio de método es en el ahorro de mano de obra utilizada en la irrigación de los forrajes.

La metodología integral para el diagnostico y mejoramiento del riego por aspersión con pivote central establecida en el presente documento, marco la iniciación de un paquete computacional de manera paralela en el CENID-RASPA, exponiéndose este documento como afinación y validación de dicho "hardware".

### 9.1.- Recomendación

Para el mejoramiento del sistema de riego evaluado, en esta metodología se proponen acciones para incrementar el área eficientemente regada con la finalidad de incrementar la superficie que reciba al menos la lamina requerida por el cultivo para evitar el decremento de la producción por la falta de agua, pero esto se logra con incrementos en lamina y tiempos de riego que repercute en un incremento en los volúmenes de agua susceptibles de percolarse y esto de ninguna manera por lo general mejorara la eficiencia total del agua de riego debido al mal diseño u operación del pivote central.

## X. BIBLIOGRAFÍA

- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero principal, estados de Durango y Coahuila, Subdirección General técnica, gerencia de aguas subterráneas, subgerencia de evaluación y modelación hidrogeológica, México, D.F. 30 de Abril del 2002. 24 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2005. Estadísticas del agua en México. El recurso hídrico en México 2005, vol.3, 78 pp.
- Cruz A. y G. Levine. 1998. El uso de las aguas subterráneas en el distrito de riego 017, Región Lagunera, México. Instituto Internacional del Manejo del Agua (IWMI), serie latinoamericana N° 3.
- Fuentes Yagüe J. L. Legaspi García G. 1999. Técnicas de riego, Sistemas de riego en la agricultura Primera edición 1999. Editorial Mundi Prensa. México P. 273 – 275.
- García C., I. y G. Briones S. 1986. Diseño y Evaluación de sistemas de riego por aspersión y goteo. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, División Ing. Depto. De Riego y Drenaje. Buenavista, Saltillo. Coah., México.
- Hernández., Y. C. 1989. Necesidades de agua de nueve cultivos en la Región Lagunera. Informe de investigación CENID-RASPA Vol. 3 Cáp. I CENID-RASPA, INIFAP-SARH, Gómez Palacio Dgo. Méx. P 126 -140.

- Luna D., E. 1988. Aplicación del Modelo de distribución Lineal en la evaluación de los sistemas de riego por superficie, Seminarios Técnicos PRONAPA, Vol. 5 N° 3 1988 del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria (RASPA), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de la SARH Gómez Palacio, Dgo., Méx. P 47-63.
- Luna D., E. 1989. Aplicación de un Modelo Lineal para la evaluación del riego por superficie, Informes de investigación CENID-RASPA Vol. 3 (Cáp. 2.) 1989 del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de la SARH Gómez Palacio, Dgo., Méx. P. 140 -163.
- Moreno S., F. 1992. Metodología para el diagnóstico de eficiencias y políticas de operaciones en riego por aspersion Tesis profesional Ing. Agrónomo en irrigación, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna, División de carreras agronómicas, Torreón, Coah., México. 77 p.
- Moreno L. D., D. García A. y R. Faz C. 2000. Manejo del riego en la alfalfa, Producción y utilización de la alfalfa en la zona norte de México, Libro Técnico N° 2, Campo Experimental La Laguna del INIFAP – SAGAR.
- Montemayor T. J. A., Aguirre A. H., Fortiz H. M., Olague R. J., Rodríguez R. J. C., Chavarria G. J. A., Aldaco N. R., Bravo S. S. R., Huerta R. A., Galindo L. G. 2006. Uso del agua en la alfalfa con riego subsuperficial II, Memoria de la XVIII Semana Internacional de Agronomía de la FAZ-UJED

- Ostos., C. F. 2001. Riego por aspersión, su descripción y posibilidad de adopción en la Comarca Lagunera. Monografía para titulación de Ing. Agrónomo en Irrigación. UAAAN-UL, División de carreras agronómicas, Torreón Coah., Méx. P 3 -9.
- Pech., C. J. 1979. Diseño y operación de equipos de riego por aspersión de pivote central. M.T. 395, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Dirección general de distritos y unidades de riego, unidad de programación, presupuestación y evaluación, Depto. De información, Méx. D. F. Nov. De 1979. 34 p.
- Rodríguez., C. A. 1988. Sistemas de riego por aspersión en alfalfa (*Medicago sativa L.*) de Gómez Palacio, Dgo. Informe de investigación CENID-RASPA Vol. 2 Cáp. 2 1988. SARH, INIFAP, Nov. De 1988 Gómez Palacio, Dgo. Méx. p. 91 – 102.
- Rodríguez C., A. 1989. Uniformidad de aplicación del agua de riego en sistemas de aspersión (Metodologías para su Evaluación), Seminarios Técnicos, Vol. 6 N° 9 1989 del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de la SARH Gómez Palacio, Dgo., Méx. P 160-181.
- Román., L. A. 1989. Gradiente de humedad inducido sistemáticamente con una línea de riego por aspersión en cultivo de frijol tesis prof. Maestro en Ciencias en riego y drenaje. UAAAN – US. Buenavista, Saltillo. Coah., Méx. May- de 1989.

Román L., A. 1993. Simulación de eficiencias de riego en aspersión no automatizada en base a patrones típicos de distribución de agua. Informes de investigación 1990 CENID-RASPA Vol. 5 (Cáp. III), 1993, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de la SARH. P. 379 – 411.

Román L. A., S. F. Mendoza M., M. A. Inzunza I., I. Sánchez C., A. Rodríguez C. 2005. Evaluación de sistemas de riego presurizado. Folleto Científico N ° 17 del CENID-RASPA, INIFAP.