

Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”

Facultad de Ciencias Agrarias

TRABAJO DE DIPLOMA

Para Optar por el Título de Ingeniero Agrónomo

TITULO: Determinación de los parámetros reales de explotación de la máquina de riego de pivote central # 16 en la Granja 7 de la Empresa Agropecuaria Horquita

Diplomante: Osvaldo Morejón Rodríguez.

Tutor: MsC. Reinaldo Pérez Armas.

Cienfuegos, 2012



RESUMEN

El trabajo se realizó en áreas regadas con la máquina de riego # 16 de 7 torres, en un suelo ferralítico rojo típico con 50 cm de profundidad efectiva cultivado de papa de la variedad Romano, en la Granja 7 de la Empresa Agropecuaria Horquita del municipio Abreus, provincia Cienfuegos, en el período comprendido desde noviembre 2011 hasta febrero del 2012, con el objetivo de determinar cuál será el comportamiento real de la máquina eléctrica de pivote central de la marca Western. Se hace una comprobación de los parámetros técnicos descritos en el catálogo del suministrador, se calculó el régimen de riego de explotación el que de acuerdo con los datos del clima, el suelo y el cultivo debía aplicarse comparándose con el aplicado y se evaluó la pluviometría de la máquina procesando los valores de la lluvia recogida con el software pluviopivot. Los resultados del trabajo permitieron comprobar que la máquina se encuentra dentro de los parámetros técnicos establecidos por el fabricante, el régimen de riego aplicado implicó un empleo adicional del número de riegos y del volumen total de agua. La máquina mostró un coeficiente de uniformidad de 85,9 % y una UD_{25} % del 78,3 %, que permite catalogar al riego como de buena calidad.

Palabras clave: coeficiente de uniformidad, pivote central, pluviometría,

ABSTRACT.

The work carried out in areas watered with the machine of irrigation # 16 of 7 towers, at a ground red typical ferralítico with 50 in-depth cm effective grown of potato of variety Romano, at the Farm 7 of the "Empresa Agropecuaria Horquita" of the Abreus municipality in Cienfuegos province, in the period understood since November 2011 to February of the 2012, for the sake of determining which one will be the real behavior of the electric machine of central pivot of the check mark Western. A checking plucks up the technical parameters described in the supplier's catalog, the regimen of irrigation of exploitation was calculated the than according to the data of the climate, the ground and cultivation should have been applicable comparing with the diligent and pluviopivot evaluated the pluviometry of the machine processing the valuables of the rain picked up with the software itself. The results of work allowed verifying that he finds the machine

within the technical parameters established by the manufacturer, the regimen of applied irrigation implied an additional job of the number of irrigations and of the total volume of water. The machine showed a % of uniformity coefficient of 85.9 % and an UD25 the 78.3 %, the fact that it allows cataloging the irrigation like good-quality.

Keywords: coefficient of uniformity, central pivot, pluviometry.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	6
I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
1.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE RIEGO WESTERN	10
1.1.1. EL RIEGO. ORIGEN E IMPORTANCIA	10
1.1.2. LAS MÁQUINAS DE RIEGO.	12
1.1.3. LAS MÁQUINAS DE PIVOTE	14
1.1.4. EL RIEGO Y EL MEDIO AMBIENTE	15
1.1.4.1. REDUCCIÓN DEL IMPACTO DE LAS GOTAS SOBRE EL SUELO Y LOS CULTIVOS	17
1.1.4.2. DISMINUCIÓN DE LAS AFECTACIONES DEL RIEGO FUERA DEL ÁREA CULTIVADA.	18
1.2. RÉGIMEN DE RIEGO	18
1.2.1. RÉGIMENES DE RIEGO DE PROYECTO Y DE EXPLOTACIÓN.	19
1.2.2. RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-CLIMA.	20
1.2.3. PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DE LOS SUELOS	21
1.2.4. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA HUMEDAD EN EL SUELO.	24
1.2.5. MOMENTO DE RIEGO.	34
1.2.5.1. MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE RIEGO DE UN CULTIVO	37
1.3. LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN Y LA EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE AGUA.	44
1.3.1. EVALUACIÓN DE LAS MÁQUINAS DE RIEGO DE PIVOTE CENTRAL	46

II. MATERIALES Y MÉTODOS	48
2.1. LOCALIZACIÓN	48
2.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE RIEGO	50
2.3. DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE RIEGO DE EXPLOTACIÓN	51
2.4. EVALUACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE LA MÁQUINA DE RIEGO WESTERN	53
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE PIVOTE CENTRAL WESTERN	59
3.2. RÉGIMEN DE RIEGO REQUERIDO Y APLICADO EL CULTIVO DE LA PAPA	64
3.3. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REAL DE LA MÁQUINA DE PIVOTE CENTRAL # 16 WESTERN	70
CONCLUSIONES	76
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

Varios expertos, incluyendo estadistas, consideran que en un futuro no muy lejano las guerras se desatarán por el dominio y posesión del agua y no por el Petróleo, asuntos geopolíticos o de otra naturaleza como ha ocurrido hasta ahora. Ese recurso, imprescindible para la vida, se agota aceleradamente debido al uso irracional que de él hacen las personas, empresas, fábricas y sectores de gran consumo. Las comunidades y países se han vuelto cada vez más sedientos y cada vez más desesperados por el recurso natural máspreciado y fundamental.

Un tercio de los habitantes del mundo vive en zonas con grandes carencias de agua, donde el consumo rebasa al abastecimiento. Para el 2025, si el consumo actual no es revisado, dos tercios de la población se verán atrapados en estas condiciones aterradoras.

El 70 % del agua que se consume en el mundo está destinada al riego de los cultivos con una distribución desigual entre países y regiones dadas sus posibilidades económicas y las disponibilidades cada vez mas reducidas de este recurso como resultado de la sobre-explotación, la industrialización y la falta de una conciencia de consumo delpreciado líquido bajo los principios de la sostenibilidad.

Al nivel de desarrollo actual de la ciencia y la tecnología, con una población creciente de manera acelerada en las últimas décadas y en un mundo constantemente amenazado por los efectos del cambio climático entre los que está la reducción de los niveles de lluvias, es imposible pensar que se puede satisfacer las demandas de alimentos sin la utilización del riego para asegurar los niveles de agua que cada cultivo requiere y que por la vía natural es cada vez más improbable que se pueda lograr.

Ante este incremento de los niveles de áreas bajo riego y del consumo de agua con fines agrícolas la eficiencia de los sistemas de riego es un tema prioritario para la mayoría de los países del mundo, donde se plantea este como un factor importante para el aprovechamiento optimo de los recursos hídricos en función de

potenciar los rendimientos y contribuir a la seguridad alimentaria de los pueblos (Madramootoo y Fyles, 2010).

En Cuba aunque el 70% del potencial hídrico se dedica a la actividad del riego, aún resulta insuficiente en relación con las áreas potencialmente cultivables. La baja eficiencia en la operación de los sistemas de riego constituye también uno de los problemas más agudos que afectan a las áreas bajo riego Alemán *et al.* (2003), por tal razón, todo trabajo que se relacione con la cuantificación de índices de eficiencia de aplicación del agua para la optimización del aprovechamiento de los recursos hídricos y energéticos y la preservación del medio ambiente, adquiere un valor considerable para las zonas bajo regadío.

El hombre en su afán por modernizar el riego y hacer cada vez más humana esta milenaria labor creó primero un dispositivo que lograra entregar el agua simulando la lluvia y lo llamó aspersor, luego siguió mecanizando los elementos del sistema de riego y logró mecanizar el lateral lo que llevó a la aparición de las máquinas de riego, las que han tenido un sostenido e impetuoso desarrollo en los aproximadamente 60 años que han transcurrido desde su surgimiento. En esta misma dirección se han establecido programas computarizados para la explotación automatizada de los sistemas de riego y ha sido esta una de las actividades de más avance dentro de la llamada agricultura de precisión que ha incluido el empleo de sensores remotos en las máquinas para aplicar normas de riego diferentes en una misma aplicación.

Las máquinas de riego han llegado ya a la plenitud de su desarrollo mecánico y ahora se centra la atención en la mejora de la eficiencia. Los nuevos diseños se enfocan principalmente a los emisores. El propósito es encontrar emisores que trabajen a baja presión, que tengan un gran alcance y que sean poco afectados por el viento que es el elemento que más incide de manera negativa en la uniformidad y eficiencia del riego con su impacto en los resultados económicos de la actividad y en los rendimientos de los cultivos..

La efectividad de los sistemas de riego y drenaje depende de lo cuidadoso que sean los usuarios en todas las fases que transita, desde su diseño, selección,

instalación, operación y mantenimiento, con la finalidad de que el agua llegue a todos los puntos del área de producción agrícola en las proporciones requeridas y en el momento adecuado para lograr que se convierta en humedad del suelo aprovechable por el cultivo.

Las máquinas del tipo pivote central están entre los sistemas de riego más populares del mundo, teniendo en cuenta las ventajas que reporta, su adaptabilidad a cualquier tipo de suelo, a terrenos accidentados y con pendientes relativamente pronunciadas. Se pueden encontrar cientos de modelos diseminados por todo el mundo.

En Cuba, explotando máquinas tanto hidráulicas como eléctricas se acumula ya más de tres décadas de experiencia cuyos primeros ejemplares nos llegaron desde la antigua URSS, país que ayudó también a que Cuba comenzara a producirlas y se comenzó con la Fregat y luego se redimensionó la fábrica para producir la ya conocida máquina de pivote central Ballama.

En los últimos años el Ministerio de la Agricultura de Cuba ha desarrollado importantes inversiones para la modernización de los sistemas de riego en las cuales están incluidos con un gran peso los pivotes. Existen en estos momentos diferentes firmas que proveen estos equipos de tecnología moderna que se destinan a programas priorizados como los cultivos de la papa y la soya.

Por la importancia de la Empresa Agropecuaria Horquita para la provincia de Cienfuegos y para el País siempre ha sido beneficiada con el suministro de nuevas tecnologías, que en el caso del riego ha cambiado con frecuencia relativamente alta, desde las máquinas DDA-100-MA hasta las actuales Urapivot y Western que están en explotación, pero se desconoce cuál es su verdadero comportamiento a partir de las condiciones concretas de cada escenario donde están instaladas. Todo lo anterior nos llevó a declarar el siguiente problema:

Problema Científico: ¿Cuál será el comportamiento real de la máquina de pivote central # 16 Western instalada en la granja 7 de la Empresa Agropecuaria Horquita?

Considerando lo planteado anteriormente y la experiencia ya acumulada en el trabajo con las máquinas de riego nos planteamos la siguiente hipótesis:

Hipótesis: Si se evalúa el comportamiento real de los principales indicadores de trabajo de la máquina de pivote central # 16 se podrá explotar adecuadamente en función de las exigencias de los cultivos, las características del suelo y de los parámetros técnicos de la máquina.

Objeto de Estudio: La aplicación del riego con la máquina de pivote central # 16 Western instalada en de la Empresa Agropecuaria Horquita.

Campo de Acción: Los parámetros de explotación de las máquinas de riego.

Objetivo General: Determinar los parámetros reales de explotación de la máquina de riego de pivote central # 16 en la Granja 7 de la Empresa Agropecuaria Horquita

Objetivos específicos:

1. Caracterizar la máquina de pivote central # 16 Western.
2. Determinar el régimen de riego de explotación para el cultivo de la papa en las condiciones edafoclimáticas de la máquina de riego # 16 Western
3. Evaluar el comportamiento real de la máquina de pivote central # 16 Western en las condiciones de Granja 7 de la Empresa Agropecuaria Horquita

I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE RIEGO WESTERN

1.1.1. EL RIEGO. ORIGEN E IMPORTANCIA

Investigaciones arqueológicas han encontrado evidencias de riego en Mesopotamia y Egipto que datan desde el siglo VI a.n.e. donde la cebada era sembrada en lugares con niveles de precipitaciones insuficientes para satisfacer al cultivo (García, 2006).

En un valle de las montañas de Los Andes, en Perú; fueron encontrados restos de tres canales de riego que según las pruebas realizadas fueron construidos en los siglos IV y III a.n.e. y del IX de nuestra era. Estos canales constituyen las más antiguas muestras de riego en el llamado nuevo mundo. (Dillehay, *et al.*, 2005). Son estos los primeros indicios del origen del riego, el que tuvo un desarrollo lento hasta que en siglo XX se comenzaron a emplear los motores de combustión interna y eléctricos para esta actividad lo que permitió extraer el agua de las profundidades de los acuíferos o impulsarla a grande distancias favoreciendo de manera directa el desarrollo del riego que avanzaba día a día y se extendía por todo el mundo.

El espectro de la escasez mundial de alimentos que recorrió el mundo en el decenio de 1960 se pudo superar gracias a las innovaciones y a las inversiones oportunas en la revolución verde y en tecnologías de control de los recursos hídricos. El aumento de la superficie regada y la mejora en los rendimientos han contribuido en buena medida a estabilizar la producción de alimentos per cápita, a pesar del aumento significativo de la población y del aporte energético per cápita. Hasta la fecha, la agricultura de regadío proporciona aproximadamente el 40% de los alimentos mundiales con sólo el 17% de la tierra cultivada.

En Cuba la actividad de Riego y Drenaje, prácticamente inexistente antes de 1959, ha tenido igual que muchas otras esferas del sector agropecuario, un extraordinario desarrollo, habiéndose dedicado por el estado cuantiosas inversiones en el fomento de fuentes de abasto, sistemas de riego y drenaje, formación de profesionales y técnicos especializados, así como las bases necesarias para la creación de una industria nacional de equipos de regadío.

Los primeros indicios del riego en Cuba se encuentran en las zanjas maestras construidas al sur de la ciudad de Güines en la actual provincia de Mayabeque en el río homónimo y donde se constituyó la comunidad de regantes del Mayabeque, también es un ejemplo de las primeras manifestaciones del uso del agua para riego en Cuba las instalaciones de bombas para pozos profundos de Horquita en la provincia de Cienfuegos (García, 1996).

Antes de 1959 el País contaba sólo con 13 embalses que almacenaban 48 hm³ destinados fundamentalmente al abastecimiento a la población y al riego de la caña de azúcar. A finales del año 2000 existían 241 embalses, con una capacidad total de 8 810 hm³ (INRH 2000). El área bajo riego aumentó de 162 000 ha en 1958 hasta 1 062 191 ha en 1991, la cifra más alta de la historia (incluida la caña de azúcar).

La crisis económica ocurrida a partir de 1991, motivada por el derrumbe del campo socialista y el desmembramiento de la URSS y el recrudecimiento del bloqueo económico por parte del gobierno de los Estados Unidos, ha provocado serias afectaciones al desarrollo hidráulico cubano. Por una parte se detuvo el proceso inversionista en las obras hidráulicas, incluyendo los sistemas de riego y drenaje, además, los recursos financieros existentes no fueron suficientes para el mantenimiento de los sistemas ya construidos, por tales razones ya en el año 2000 habían perdido valor de uso para regadíos unas 160 577 ha, disminuyendo el área bajo riego en el país un 27 %. Aunque en el 2002 se aprecian signos de recuperación por el incremento de las nuevas áreas bajo riego (Arroz popular, huertos y organopónicos).

Por otro lado y por las mismas razones antes expuestas hubo un éxodo del personal capacitado y con experiencia hacia otros sectores de la economía en busca de mejoras económicas y laborales que condujeron al decrecimiento de la fuerza técnica y no ha permitido explotar eficientemente los sistemas de riego y drenaje existentes y los nuevos adquiridos. La situación actual en el riego y el drenaje se torna difícil debido a la inestabilidad en el suministro de diesel y el deterioro acelerado de los sistemas de riego, no obstante el País hace inusitados esfuerzos por mantener los niveles de áreas bajo riego, recuperar equipos y

sistemas con varios años de explotación, sustitución de motores de combustión interna por motores eléctricos, introducir modernas tecnologías que incluye la automatización del riego y lograr un mejor uso del agua y la energía e incrementar las producciones agrícolas.

La situación actual de las áreas bajo riego por cada una de las técnicas empleada en Cuba puede apreciarse en la siguiente tabla

Tabla 1 Áreas beneficiadas por técnicas de riego

Concepto	Área ha
Áreas Totales	491.249,3
Aspersión Portátil	27.837,5
Aspersión Semiestacionaria.	50.772,1
Fregat	4.918,6
Pivot Eléctrico	20.671,5
Volzhanka.	786,0
Goteo	18.155,3
Micro-aspersión	9.547,8
Gravedad con bombeo	189.595,5
Gravedad sin bombeo	162.195,4
Otras Técnicas	6.769,4

1.1.2. LAS MÁQUINAS DE RIEGO.

Numerosos han sido los cambios ocurridos en la agricultura desde que en 1954 comenzó a girar la primera máquina de pivote central en el mundo. La gran cantidad de modificaciones que se han introducido desde entonces en estas máquinas ha propiciado su diseminación por todo el mundo sobre los más diversos suelos y cultivo con los más disímiles modelos. Esto ha posibilitado no

sólo el riego; sino también la combinación con otras labores como la fertirrigación con el consiguiente ahorro de equipamientos e insumos, el incremento de la productividad y la eficiencia de las labores

La sustitución de los aspersores por boquillas difusoras en los pivotes marcó una nueva era en el riego con un notable incremento en la uniformidad, la eficiencia de riego y un uso más racional de la energía (Tarjuelo 1999)

En Cuba, con más de dos décadas de experiencia en el uso de esta técnica, se riegan actualmente más de 25.000 hectáreas con máquinas de pivote de diferentes generaciones y modelos (IIRD, 2012).

A inicios del 1990 se comenzó a analizar la necesidad transformar las viejas máquinas existente con aspersores de impacto en máquinas con boquillas difusoras de baja presión debido a la creciente necesidad del ahorro energético, del consumo de agua y de hacer más eficiente la labor de riego (Domínguez *et al.* 1998)

En los últimos años se ha popularizado en el mundo la utilización de boquillas que trabajan entre 10 y 18 m. c. a. (metros de la columna de agua) con un ahorro considerable de energía. El modelo Spray es un emisor fijo de baja presión donde el agua al salir por la boquilla choca contra el plato estático que está ranurado formando un chorro de agua a una presión que oscila entre 4 y 18 m. c. a.

Existen varios tipo de platos que pueden proporcionar diferentes chorros de salida de agua (chorros fino, chorro medianos y chorro fuertes) debido a que la entrega de agua es fija la aplicación instantánea es alta y se recomienda en suelo de poca pendiente y alta velocidad de infiltración.

La última tecnología disponible en el mercado internacional es el rotatorio, sólo gira a una velocidad lenta debido a un freno en el plato y necesita una presión de operación superior, tiene un radio de alcance de más de 8 m, riega con una gota más grande y maneja el viento mejor que todos los emisores, presenta un coeficiente de uniformidad superior al 86%.

1.1.3. LAS MÁQUINAS DE PIVOTE

El origen del riego con máquinas de pivote central se remonta a 1949 con la creación de las rampas giratorias construida en el estado de Nebraska (Estados Unidos), este sistema permitía el riego en círculos de gran radio prácticamente sin mano de obra, utilizándose una cantidad muy pequeña energía hidráulica para mover al equipo.

Así comenzó a girar el primer modelo rústico de accionamiento hidráulico y que posteriormente fue perfeccionado. Existen en la actualidad más de 10 millones de hectáreas regadas con la técnica de pivote central en el mundo.

En 1977 se introdujo en Cuba los primeros pivotes que fueron los de la marca "Fregat" (de tracción hidráulica), procedentes de la antigua URSS, los que muy pronto se convirtieron en una técnica aceptada por los productores y generalizada en todo el país. Al principio se beneficiaron 469. 7 ha y diez años después ya existían 209 máquinas regando 3 247. 64 hectáreas, en los finales de la década de los 80 y principios de los 90 se llegaron a tener en explotación 1 200 máquinas. El máximo de superficie regada por esta técnica de riego fue alcanzado en 1992, cuando se superaron las 43 mil hectáreas. A partir de este año se inicia una reducción paulatina del área bajo riego a consecuencia de la crisis económica que atravesó el país. Al iniciar la presente centuria y más aún en los últimos 5 años, se han operado cambios cualitativos en estos sistemas de riego que apuntan a una mayor eficiencia en el empleo de esta técnica de riego y una contribución importante al medio ambiente en varios aspectos.

La separación entre las torres varía de acuerdo a los diferentes tipos de máquinas y modelos, por lo general la separación mínima es del orden de los 25 metros y la máxima 75 metros aunque es frecuente encontrar las de 30 metros y 38 metros, por ejemplo la firma VALLEY en el modelo 8120 utiliza tramos entre 43 metros y 60 metros. Los modelos de tramos largos resultan más económicos debido a que la torre es uno de los elementos más costosos del sistema.

Durante el tiempos transcurrido desde la instalación de la primera máquina de pivote central en Cuba hasta la actualidad han pasado por nuestros campos varias generaciones, modelos y marcas o prototipos entre las que se pueden la Fregat,

Valmont, Agrocaja, Valley, Kuban, Nieper, entre otras hasta llegar a las actuales Western, Urapivot, Ballama, etc,. Aunque en extensión, el área regada con estas máquinas representa un 7 % del área total del país, es importante señalar que un monto significativo de las inversiones de riego recae sobre dichas máquinas, encargadas de garantizar el riego del 70 % del área que se siembra de papa y que además, están ubicadas sobre los suelos más productivos del país.

Estas máquinas logran relativamente altas uniformidades de aplicación de agua debido al movimiento continuado del sistema de aspersion, logran hacer buenos manejos del riego y aplicaciones oportunas del agua, fertilizantes y otros productos químicos, amplio rango de intensidades que se traduce en aplicación de diferentes láminas de riego a través del ciclo fonológico del cultivo, aplicación rápida de láminas ligeras de riego los cuales son beneficiosas en la germinación de las semillas (González, 2005).

En los últimos 12 años el comportamiento de las áreas regadas con máquinas de pivote central en la agricultura no cañera ha estado marcado por cambios cuantitativos y cualitativos.

A pesar de las limitaciones económicas, las inversiones y estrategias que se han estado llevando a cabo en el riego de las máquinas de pivote central reducen de forma considerable ciertos impactos negativos del riego sobre el medio ambiente, además de tener una marcada influencia sobre el incremento de los rendimientos agrícolas y la eficiencia económica de la labor.

Aunque no se reportan estudios que cuantifiquen sus aportes, la modernización de las máquinas de pivote central ha permitido importantes beneficios a los ecosistemas.

1.1.4. EL RIEGO Y EL MEDIO AMBIENTE

La necesidad de evitar impactos adversos y de asegurar beneficios a largo plazo condujo a la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo en su informe, en 1987, al concepto de **desarrollo sostenible** (FAO, 1992).

Los que en su afán de abordar el tema del medio ambiente dejan de incluir el impacto del riego y el drenaje sólo podrán llegar a enfoques parciales del

problema. Tan parcial es este enfoque como la conocida tendencia de diseñar sistemas de riego sin tener en consideración los sistemas de drenaje y la inserción de ambos en el ecosistema local o regional.

Las estadísticas actuales muestran cómo y dónde la irrigación moderna ha crecido en importancia, desde los 8 millones de hectáreas que se regaban en el 1800 hasta los 271.4 millones que se alcanzaron en 1998.

Los efectos de la degradación existente en la actualidad en forma de erosión, agotamiento de los nutrientes, salinización de los suelos y contaminación del agua aparecen de forma implícita en los informes de producción.

Según reportes del ISRIC-PNUMA la erosión de los suelos es, de todas las existentes, la causa más extendida de la degradación y su principal agente es la erosión hídrica.

La agricultura de regadío es esencial para la economía, la salud y el bienestar de una parte considerable del tercer mundo, y por tanto, es uno de los factores más importantes para la seguridad alimentaria del planeta. Sin embargo, no puede olvidarse que el regadío cambia radicalmente el uso de la tierra y es a su vez el mayor consumidor de agua. Por ello puede afirmarse que el desarrollo del riego tiene un impacto considerable sobre el ambiente, y todo proyecto que no esté bien concebido puede convertirse en un elemento degradante del medio.

Hace más de 10 años (Hernández, 1999) en estudios y observaciones señaló como las causas fundamentales de la degradación de los suelos agrícolas las siguientes:

- Incorrecta elección de las prácticas agrícolas.
- Inadecuada planificación del uso de los suelos.
- Ausencia de un sistema de tecnología de cultivos de acuerdo con los tipos de suelo.
- Ausencia de control de la erosión y escaso conocimiento sobre este fenómeno.
- Uso irracional de fertilizantes y agrotóxicos.
- Violaciones de las instrucciones técnicas de preparación de suelos.
- Violaciones jurídicas de las leyes y disposiciones legales relativas al uso, conservación y mejoramiento de los suelos.

- Riegos con aguas de elevada mineralización.
- Elevación de mantos freáticos salinos al no existir sistemas de drenaje que evacúen los excesos de agua aportados por el riego.
- Construcciones de obras civiles.
- Uso indiscriminado de los recursos hídricos.
- Ausencia de un programa sistemático de información e instrucción al personal relacionado con la actividad agrícola.

En 1996 el Instituto de Investigaciones de Suelos reportó 2,5 MMha con problemas de erosión media o alta, 1 MMha con problemas de salinidad y sodicidad y 1,52 MMha en desertificación. La existencia de 2,8 MMha afectadas por el mal drenaje y de alrededor de 1 MMha con problemas de salinidad son muestras de que aún queda mucho por hacer en materia de recuperación de suelos.

En los últimos años las investigaciones e invenciones relacionadas con el riego han tenido en cuenta las afectaciones que ha provocado esta actividad al medio ambiente y se han dirigido a buscarle las soluciones más ventajosas.

1.1.4.1. REDUCCIÓN DEL IMPACTO DE LAS GOTAS SOBRE EL SUELO Y LOS CULTIVOS

Con la sustitución de aspersores de impacto por emisores de baja presión (boquillas difusoras o rotators") y la colocación de los mismos a baja altura, se reduce el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo y el follaje de los cultivos. La lluvia provocada por estos dispositivos es más fina y su afectación sobre el suelo y los cultivos es menor, debido a que las gotas provenientes de las boquillas salen con un diámetro más pequeño y además provienen de una altura inferior sobre el suelo (1 m), a diferencia de los aspersores (2,40 a 4,00 m de altura). De esta manera quedan minimizados los dos factores que más inciden en la energía de impacto de la gota: el diámetro y la velocidad, según Stillmunkes citado por Jiménez (2008).

1.1.4.2. DISMINUCIÓN DE LAS AFECTACIONES DEL RIEGO FUERA DEL ÁREA CULTIVADA

La reducción del arrastre del agua de riego provocado por el viento fuera del área cultivada es otro elemento positivo. A pesar de que está demostrado que la lluvia de gota más fina es más susceptible al arrastre del viento, el riego con boquillas a menos de un metro del follaje de los cultivos reduce este arrastre, por lo que permite una mayor eficiencia de aplicación del riego y con ello un uso más racional del agua destinada para este fin. Esto proporciona dos ventajas adicionales: por una parte produce menos afectaciones al camino periférico que rodea a los pivotes y por otra ofrece una mayor garantía de no contaminación a las áreas aledañas si se pretende aplicar algún producto químico disuelto en el agua de riego.

1.2. RÉGIMEN DE RIEGO

El régimen de riego es la determinación y distribución correctas de la cantidad de agua que necesita un cultivo (volumen, normas de riego, número de riegos e intervalos de riego) durante el desarrollo de su período vegetativo para garantizar el régimen de humedad óptimo en la capa de suelo donde se desarrolla el sistema radicular, en determinadas condiciones naturales y agrotécnicas.

Para definir el régimen de riego de un cultivo deben tenerse presentes varios factores determinantes (Pacheco, 2006):

- Climáticos: precipitaciones, temperatura, humedad relativa, régimen de vientos, radiación solar.
- Especies y variedades.
- Labores agrotécnicas: fertilización, control de malezas, control de plagas y enfermedades, otras labores de cultivos, etc.
- Propiedades hidrofísicas de los suelos.
- Técnica de riego disponible.

Estos factores conforman zonas geográficas con características similares para un mismo cultivo, pero debido a las variaciones climáticas que muestran diferencias

considerables al comparar unos años con otros, hacen que exista variabilidad en el régimen de riego al comparar unos años con otros.

1.2.1. RÉGIMENES DE RIEGO DE PROYECTO Y DE EXPLOTACIÓN.

En el estudio del régimen de riego es necesario distinguir dos fases:

1. **Régimen de riego de proyecto:** representa un pronóstico estadístico con cierto grado de certeza, obtenido sobre la base de los factores que lo condicionaron en un período pasado, el cual debe ser lo suficientemente largo para tener una adecuada representación de la variabilidad de los factores climáticos. No se repite exactamente en la explotación pero serán semejantes en la medida en que el proyecto se calcule con datos científicamente fundamentados. Permite el cálculo de los recursos humanos, materiales y financieros así como el diseño y construcción del proyecto de riego.

2. **Régimen de riego de explotación:** es el cálculo de los recursos materiales, humanos financieros, así como los volúmenes de agua y plazos de aplicación necesarios para garantizar la regulación de la humedad del suelo de acuerdo con el desarrollo concreto de los factores que la condicionan en el propio año en que se confecciona y aplica. Está estrechamente relacionado con la organización de la producción y se desarrolla en las empresas y unidades agrícolas hasta el nivel de sistemas de riego, bloques, lotes y campos.

El suelo es el almacén natural de agua para las plantas y mantiene un intercambio constante de esta con la atmósfera, de manera que para cualquier período de tiempo que se analice, la variación de la reserva de agua en el suelo se puede expresar por la ecuación:

$$\pm \Delta W = \text{Ingresos} - \text{Egresos},$$

donde:

ΔW - variación de la reserva de agua en el suelo.

Para la determinación del régimen de riego de los cultivos es necesario conocer los factores que influyen en el mismo y su interrelación en el tiempo.

1.2.2. RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-CLIMA.

Como todos los organismos vivientes, las plantas tienen necesidad de agua para vivir y desarrollarse, el agua forma lo esencial de sus tejidos y representa casi el único medio de nutrición.

Solo unas pocas plantas pueden soportar una falta de agua durante un largo período, en el que se encuentran en estado de reposo vegetativo, pero la vuelta a la vida activa solo se puede realizar en presencia de agua.

El vegetal es en la naturaleza un organismo poco favorecido porque no puede, como los animales, desplazarse en busca de agua y alimentos; como máximo puede dirigir su sistema radicular a la busca del agua contenida en los horizontes de suelo más húmedos y más ricos en sales minerales.

Para vivir la planta debe desde luego absorber el agua que ha servido para disolver las sales minerales y las materias orgánicas del suelo y después llevarlas a lugar de su asimilación.

Una parte del agua absorbida del suelo queda fijada a la planta con las sales minerales que transporta, el resto es transpirada por su sistema foliar. El completo desarrollo solo se alcanza si el vegetal dispone permanentemente de toda el agua que necesita.

El agua del suelo es absorbida por la planta por medio de los pelos absorbentes de su sistema radicular. El agua penetra en la célula gracias a la presión osmótica ejercida por el jugo celular, fuerza que es equilibrada por la presión ejercida por la célula misma sobre sus paredes. La diferencia entre la presión osmótica y la turgencia, constituye la fuerza de succión de la planta. Se expresa en atmósferas y varía entre 5 y 15. Gracias a esta fuerza la planta puede sacar del suelo agua que a menudo está fijada sólidamente a las partículas de suelo.

El agua tomada por las raíces debe ser llevada hacia las células donde será, bien fijada, bien transpirada, después de haber dejado las sales minerales que transportaba.

Para que el movimiento del agua dentro de la planta sea regular y continuo es necesaria que parte de esta agua sea eliminada. Este fenómeno se produce al nivel del sistema foliar mediante los estomas por la expulsión del agua en forma gaseosa hacia la atmósfera.

Los factores que influyen sobre la evaporación, influyen igualmente en el consumo de agua de vegetación y especialmente:

- la luz y el calor que pueden hacer variar la transpiración en proporciones de 1 a 60.

- los vientos y el grado higroscópico del aire – el aire seco y cálido aumenta la transpiración.

Así como un cierto número de factores que dependen de la planta y del suelo, entre otros:

- la duración del período vegetativo,

- la riqueza en sales minerales del suelo,

- el desarrollo del sistema foliar.

Estos factores en una u otra medida influyen en la relación existente entre la planta, el suelo, el agua y el clima, ya que estas cuatro categorías están presentes y estrechamente relacionadas unas con otras durante el desarrollo del período vegetativo de los cultivos. Las tecnologías agrícolas modernas permiten en determinado grado modificar el comportamiento de estas categorías en función de lograr rendimientos más elevados de las cosechas y mejor calidad de los productos.

1.2.3. PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DE LOS SUELOS.

La regulación del régimen hídrico de los suelos es una actividad agrícola íntimamente ligada a las propiedades físicas de los suelos, por ser dichas propiedades las que rigen el movimiento del agua en el suelo y su capacidad para retenerla.

Cuando el suelo se humedece producto de la aplicación de un riego abundante o de un aguacero, se inicia un movimiento fundamentalmente descendente provocado por la fuerza de gravedad en un momento en que las partículas del suelo no son capaces de retener más agua, o sea, cuando se ha desplazado el aire de los microporos y de acuerdo con la intensidad de la aplicación del agua, se inicia el proceso de saturación en el cual el agua también ocupa los macroporos con la particularidad de que no es retenida. Cuando se detiene la aplicación de agua, el movimiento gravitacional continúa hasta que los macroporos vuelven a ser ocupados por aire y en ese momento se dice que el suelo está en **capacidad de campo**, con adecuado balance agua-aire. Este estado se alcanza pocas horas después de la aplicación del riego o de la ocurrencia de una lluvia significativa, estando el tiempo en este caso directamente relacionado con el tipo de suelo. Se toma como promedio un valor de pF de 2.5 cuando el suelo está en este estado.

Como consecuencia de la evaporación directa desde la superficie del suelo y de la transpiración de las plantas, el agua retenida en el suelo comienza a disminuir y la fuerza con la que la misma es retenida por las partículas de suelo aumenta hasta que llega a un estado en el cual la mayoría de las especies no pueden succionar el agua contenida en el suelo. En ese momento se ha llegado al punto de marchitez y se corresponde aproximadamente con un pF de 4.2.

Tanto la capacidad de campo (CC) como el punto de marchitez (PM) se expresan en tanto por ciento de humedad sobre la base del peso de suelo seco (pss).

Ambos estados de humedad del suelo son característicos de cada tipo de suelo y tienen una estrecha relación con sus propiedades hidrofísicas fundamentales.

Los límites de humedad representados por la saturación, la capacidad de campo y el punto de marchitez, establecen rangos que representan volúmenes de agua en el perfil del suelo y que determinan el tipo de agua a partir de las posibilidades de su utilización por la planta.

Límite productivo.

El desarrollo óptimo de un cultivo se logra, si además del aporte de agua necesaria, hay un adecuado balance aire-agua en el suelo, lo que ocurre cuando un 10-12 % del volumen de poros está ocupado por aire para la mayoría de las especies. En este caso, dentro del rango de humedad utilizable, el agua se encuentra a menor tensión siendo más fácil a la planta su extracción y en la medida en que esta es utilizada, el volumen irá descendiendo, haciéndose más difícil su extracción por la planta y acercándose más al límite productivo. El límite inferior de este rango en que la planta ya no tiene las condiciones óptimas de humedad para su desarrollo porque se le hace más difícil extraer el agua del suelo se llama **límite productivo** y aparece antes del punto de marchitez. Este valor se expresa como un por ciento de la capacidad de campo y oscila aproximadamente entre un 75 y un 90 % de la misma.

Determinación del contenido de agua en el suelo

Las capacidades de humedad del suelo expresadas en forma de volumen de agua permiten distinguir o establecer tres niveles fundamentales de humedad en el suelo en que el agua es retenida por las partículas y es de interés para el riego:

- Humedad máxima (H_{max}),
- Humedad mínima (H_{min}),
- Humedad presente (H_p).

Humedad máxima: es la humedad existente en el suelo en el momento en que están ocupados los microporos y retenida la mayor cantidad posible de agua y corresponde a la capacidad de campo. En este momento el agua de los macroporos ha pasado a las capas inferiores por efecto de la fuerza de gravedad.

Humedad mínima: es el nivel mínimo de humedad permisible para lograr un desarrollo adecuado de los cultivos y una respuesta eficiente en cuanto a rendimientos. Por debajo de este punto se presentan afectaciones sensibles a los cultivos. Se corresponde con el límite productivo.

Humedad presente: es la humedad presente en el perfil considerado (normalmente la capa activa) en un momento determinado y puede encontrarse en el rango entre la saturación y el punto de marchitez o lo que es igual: entre la humedad máxima y la humedad mínima.

Los niveles de humedad se pueden expresar en por ciento con relación al peso de suelo seco pero es más común a los efectos del cálculo del régimen de riego de los cultivos expresarlo como el **volumen de agua contenido en la capa activa** y las unidades que más se usan son el $m^3 \cdot ha^{-1}$ o su equivalente en lámina de agua en milímetros y el l / m^2 .

Generalmente los cálculos se hacen para una hectárea de terreno o para un metro cuadrado lo que permite posteriormente efectuar el cálculo para cualquier otra área en igualdad de condiciones.

Para hacer el cálculo se parte de la siguiente deducción: sea un área de 1 hectárea equivalente a $10\,000\ m^2$, con una humedad determinada (puede ser H_{max} , H_{min} o H_p), una capa activa de espesor H expresado en metros y un peso volumétrico α en g/cm^3 . El volumen de agua (W_{agua}) contenido en ese suelo será:

$$W_{agua} = 100 H \alpha H_p, \quad \text{en } m^3 \cdot ha^{-1}.$$

El parámetro H_p empleado en esta fórmula se refiere a la humedad presente, pero puede ser también $H_{máx}$ o $H_{mín}$. Como anteriormente se explicó que la capacidad de campo se relaciona directamente con la humedad máxima y el límite productivo con la humedad mínima necesaria par el buen desarrollo de la plantación, esta fórmula nos permite calcular ambos parámetros a partir de conocer el % de humedad para cada caso en función del tipo de suelo de que se trate.

1.2.4. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA HUMEDAD EN EL SUELO.

Para una correcta explotación del riego es necesario determinar el contenido de humedad presente en el suelo. Para ello existen varios métodos, algunos de los cuales son:

- método gravimétrico
- método de la resistencia eléctrica
- método del tensiómetro
- método de la sonda de neutrones.

Hasta hace relativamente poco tiempo y aún hoy se usa el método gravimétrico que consiste en tomar muestras de suelo en recipientes de aluminio con tapa hermética, del cual se conoce su peso, pesar la muestra de suelo húmedo con lo que se obtiene el peso neto de suelo húmedo P_{sh} , someter el recipiente con la muestra a una temperatura de 105 ° C durante varias horas hasta que pierda la humedad, pesar la muestra nuevamente para conocer el peso del suelo seco P_{ss} , aplicando la fórmula:

$$H_{bss} = [(P_{sh} - P_{ss}) / P_{ss}] 100,$$

Así se determina el contenido de humedad del suelo expresada en % en un momento dado. Es un método muy exacto aunque laborioso, por lo que generalmente se emplea como método de control para corregir otros métodos

Norma de riego parcial neta.

Es la cantidad de agua que se entrega a una unidad de área para elevar la humedad desde la humedad presente hasta la capacidad de campo. La capacidad de campo equivale al contenido máximo de humedad en el suelo que es factible lograr a los efectos de su utilización por las plantas y la humedad presente en este caso representa el límite productivo que es aquel momento en que se debe aplicar el riego. Se calcula por la siguiente fórmula:

$$mn = W_{m\acute{a}x.} - W_{m\acute{i}n.} = 100 H \alpha CC - 100 H \alpha Lp = 100 H \alpha (CC - LP) [m^3 \cdot ha^{-1}]$$

donde:

mn – norma de riego parcial neta, $m^3 \cdot ha^{-1}$

H – capa activa de suelo, m

α - peso volumétrico, g/cm^3

CC – capacidad de campo en % de P_{ss}

LP – límite productivo % de P_{ss}

Depende del tipo de suelo y sus propiedades hidrofísicas y de la profundidad radicular. Su determinación es un momento importante en la planificación y ejecución del riego.

Ecuación de balance hídrico en el suelo.

La ecuación de balance hídrico tiene en cuenta todos los ingresos y egresos de humedad en el suelo, y considerando un período de tiempo determinado donde hay una reserva de humedad inicial y otra final, mediante la misma se pueden calcular los ingresos artificiales de agua que son necesarios para el óptimo desarrollo del cultivo.

$$W_f = W_i + P_a + M_k + M_{\Delta H} + M - E_t$$

Donde: W_f – humedad al final del período considerado

W_i – humedad al inicio del período considerado

P_a – lluvia aprovechable

M_k – de humedad por capilaridad cuando el manto freático está alto

$M_{\Delta H}$ – aumento de la reserva de humedad por incremento de la capa activa

M – ingreso por suministro artificial (riego) de agua

E_t – evapotranspiración del cultivo.

Como unidad de medida puede emplearse el $m^3 \cdot ha^{-1}$ o el milímetro para cada uno de los componentes de la ecuación. Es considerada como la ecuación fundamental del régimen de riego.

Evapotranspiración.

Es la suma de las pérdidas de agua del suelo producto de la evaporación que tiene lugar desde sus capas superficiales más la transpiración de las plantas.

La evaporación que tiene lugar desde el suelo y la transpiración de las plantas son difíciles de diferenciar entre sí. Los factores que influyen en estos dos procesos influyen a su vez en la magnitud de la evapotranspiración. En la práctica del riego se procura hacer la determinación simultánea de ambas magnitudes. En las primeras fases de un cultivo cuando el follaje no es aún denso la evaporación es mayor que la transpiración, pero en la medida en que el cultivo va arropando al suelo con su follaje, esta situación se invierte. Los residuos vegetales sobre el terreno también influyen sobre la evaporación al no permitir la acción directa de los rayos del sol sobre los mismos. En el cultivo del arroz la evaporación se produce durante el riego desde la superficie de la lámina de agua en los diques. Los principales factores que inciden en la evapotranspiración son los siguientes:

- ✓ el poder evaporante de la atmósfera
- ✓ las particularidades biológicas de las plantas
- ✓ la humedad presente en el suelo dentro de la capa activa, desarrollo radicular y contenido de sales del suelo
- ✓ las técnicas de riego empleadas

En las condiciones de Cuba la evapotranspiración (E_t) se incrementa durante la mañana y alcanza su máximo entre las 12 y las 2 de la tarde, disminuyendo después, con valores muy bajos durante la noche.

Métodos para determinar la evapotranspiración.

Métodos directos.

Los métodos directos de mayor aplicación práctica son: el método lisimétrico y el método gravimétrico en parcelas experimentales.

Método lisimétrico: son tanques o lisímetros que se usan para determinar la evaporación de un suelo desnudo o la E_t de un cultivo. El tanque se llena de suelo por capas tratando de no alterar la estructura del mismo. Mediante sistemas de

medición del agua de lluvia y el agua drenada por el fondo se puede conocer por diferencia la magnitud de la lámina de agua evaporada y/o evapotranspirada.

Método gravimétrico: Utiliza las condiciones reales del cultivo en parcelas de por lo menos 50 m² con condiciones homogéneas de suelo y cultivo. La evapotranspiración se determina mediante balances de humedad entre muestras de suelo tomadas cada 7 ó 10 días. Para determinar la Et se utiliza la siguiente ecuación que viene de la ecuación de balance hídrico:

$$E_t = W_i - W_f + P_a + M_k + M_{\Delta H} + M.$$

Métodos indirectos: Los métodos indirectos se pueden agrupar en cuatro grupos fundamentales, según los factores que consideran.

Dada la diversidad de factores que intervienen en el cálculo de la evapotranspiración y las condiciones de clima y cultivos en las diferentes regiones donde se han originado los métodos, se puede considerar y de hecho así resulta en la práctica, que los resultados varían para una zona dada cuando se hacen cálculos por diferentes métodos. Algunos métodos que pueden tener importancia práctica en las condiciones de Cuba son los siguientes:

Método de Penman.

Penman obtuvo una fórmula que permite calcular la evapotranspiración de un suelo cubierto de vegetación empleando un factor de corrección en el cálculo de la evaporación de una superficie de agua libre. Esta fórmula está basada en el balance de energía y se escribe:

$$E = \frac{(H\Delta) + (Y.E_a)}{\Delta + Y}$$

la evapotranspiración es entonces:

$$E_t = E \cdot K.$$

En esta fórmula:

H – cantidad de energía absorbida por el suelo

Δ – la derivada de la tensión máxima de vapor de agua con respecto a la temperatura dada en función de la temperatura en las tablas de Seuner

Y – constante psicrométrica de Bowen igual a 0.486 ó 0.5

Ea – Poder absorbente del aire calculado a partir de la fórmula de Rohwer

K – corrector dependiente de la cubierta vegetal.

Esta fórmula que es muy compleja, se puede hacer más sencilla gracias a la ayuda de tablas y ábacos.

Método de Blaney-Criddle.

Relaciona la evapotranspiración con diversos factores correctores observados estadísticamente y hace intervenir la planta y el suelo. La fórmula se escribe de la forma siguiente:

$$E_t = 0.254 (1.8 t + 32) P K$$

Donde:

K – coeficiente variable que comprende varios factores no analizados y definidos por la estadística, que varía de 0.5 a 0.85

t – temperatura media mensual

P – por ciento de horas diurnas durante el mes considerado con respecto al número de horas diurnas anuales.

Método de Hargreaves.

Esta fórmula derivada de la de Blaney-Criddle, se completa haciendo intervenir la humedad relativa del aire en el centro del día, puesto que la evaporación está próxima a 0 cuando la humedad del aire al mediodía está próxima a 100.

$$E_t = 47.5 d t (0.38 - 0.0038 H) K$$

Donde:

t – temperatura media mensual

d – coeficiente de corrección que depende de las variaciones mensuales de la duración de la iluminación

d = 1 si la duración de la iluminación en porcentaje es igual a 8.33 (duración media).

Si la duración de la iluminación es diferente, se toma:

$$d = 8 \% \left(\frac{1}{8.33} \right)$$

K – coeficiente mensual para cada cultivo.

Método de Thornthwaite.

En esta fórmula, más compleja que la de Blaney-Criddle, no intervienen más que factores climatológicos que son corregidos por un factor empírico. Rey (1984) calculó la evapotranspiración del cultivo de la soya con este método obteniendo buenos resultados.

Según Thornthwaite.

$$E_t = \frac{1.6 (10.T)^a}{I}$$

Donde:

T – temperatura media mensual en °C,

I - índice anual de calor (se calcula como la suma de los índices de las eficiencias mensuales de la temperatura t).

Método de Turc.

Esta fórmula presenta, sobre las anteriormente descritas, la ventaja indiscutible de emplearse a la vez factores climatológicos (precipitaciones, radiaciones solares, temperatura, vientos) y factores de suelo y de la planta (ritmo de crecimiento, rendimiento, desarrollo).

Otra ventaja que ofrece es el hecho de que se puede calcular la evapotranspiración para períodos de 10 días y no por meses como en la mayoría de las otras fórmulas. La fórmula se escribe de la forma siguiente:

$$Et = \frac{\dots P + a + v \dots}{\sqrt{1 + \frac{(P + a)}{1} + \frac{V}{21}}}$$

donde:

P – precipitación en diez días,

a – altura de agua susceptible de ser evaporada a expensas del suelo en cm durante un período de diez días,

V – factor de vegetación, dependiente de numerosos datos, este factor solo interviene a partir del vigésimo día después de la plantación o la siembra,

I – evaporación máxima alcanzada durante la década, considerando la aportación de agua como constante, y no debiendo constituir un factor limitante,

I – radiación total en calorías por cm² y por día, que es dada por tablas,

V es sensiblemente proporcional a la raíz cuadrada del rendimiento de la vegetación durante la década.

Para los cultivos de regadío V = 70 salvo en el caso en que P < 10 en el que V = 0.

a varía en función del contenido de agua en el suelo Δ por lo que respecta a la capacidad de retención.

Si $\Delta \leq 25$ mm $a = 10$ mm; Si $25 < \Delta < 35$ mm $a = 35 - \Delta$, Si $\Delta > 35$ mm $a = 1$ mm.

Método de Alpatiev.

Este método se basa en el uso del déficit de humedad en la atmósfera durante un período de la vegetación de un cultivo e incluye un coeficiente llamado coeficiente de bioclimático o de evaporación. La fórmula se presenta como:

$$E_t = K \Sigma D.$$

donde:

K – coeficiente bioclimático,

ΣD – sumatoria del déficit de humedad del aire durante el período vegetativo del cultivo, mm.

Método del evaporímetro clase A.

El evaporímetro clase A es un tanque circular de 125 cm de diámetro y 25.5 cm de profundidad, construido de hierro galvanizado y montado sobre una plataforma con listones de madera, de modo que permita la circulación libre del aire en contacto con el fondo del tanque. La evaporación se calcula como la diferencia entre dos lecturas diarias consecutivas, haciéndose los ajustes por precipitaciones ocurridas y medidas en un pluviómetro cercano.

Este método se basa en el criterio de que sobre la lámina de agua del evaporímetro influye todo un complejo de elementos climáticos que condicionan la evapotranspiración del agua por las plantas como fenómeno físico, por lo que integra todos los métodos anteriores. Se acepta que con los datos de un evaporímetro puede calcularse la evapotranspiración para un radio de 50 km. Presenta las siguientes ventajas:

- es un método de aplicación sencilla,
- puede usarse para cálculos en los proyectos y en la explotación,

- integra todos los factores climáticos,
- puede usarse para calcular la evapotranspiración en diferentes períodos de tiempo, incluyendo un día.

Para calcular la evapotranspiración a partir de datos de evaporación, debe conocerse con anterioridad la relación entre ambos términos, para las diferentes fases de desarrollo del cultivo y para determinada época de siembra o plantación, o sea, debe conocerse el coeficiente que relaciona ambas magnitudes, llamado coeficiente biológico K_b .

Generalmente el K_b puede variar para cada decena del ciclo vegetativo y su expresión será:

$$K_b = \frac{E_t}{E_o}$$

de aquí se obtiene que $E_t = K_b E_o$,

donde:

E_o – evaporación desde la superficie de agua del tanque evaporímetro clase A.

La determinación de K_b corresponde a las estaciones experimentales y es un dato importante para la proyección y explotación del régimen de riego. Para la mayoría de los cultivos y fases de desarrollo la evaporación del tanque clase A resulta mayor que la evapotranspiración del cultivo, luego los valores de K_b serán menores que la unidad.

Intervalo de riego.

El intervalo de riego (IR) representa el tiempo en días que media entre dos riegos sucesivos y su valor es diferente según se desarrolla el cultivo o cambien las condiciones climáticas que inciden en el consumo de agua. Tiene mucha importancia en el proyecto para calcular el tiempo de que dispone la técnica de riego para regar un área dada, es decir para calcular el turno de riego t . Para este fin se usa el intervalo mínimo o crítico que se obtiene en los períodos de mayor consumo de agua por la planta cuando no hay otros ingresos de agua para la planta. Se calcula por la fórmula:

$$IR = \frac{m}{Etd} \quad (\text{Días})$$

donde:

m – norma parcial neta de riego, m³.ha⁻¹,

Etd – evapotranspiración diaria del cultivo.

El intervalo de riego varía de 2 a 5 días para hortalizas (en riego de alta frecuencia puede ser diario) y de 12 hasta 25 días para cultivo perennes. Para un mismo cultivo suele ser mas pequeño en suelos ligeros que en suelos pesados.

1.2.5. MOMENTO DE RIEGO.

La determinación del momento de riego, así como la cantidad de agua a aplicar son las dos cuestiones más importantes del riego una vez que ya se han dado los pasos de selección, diseño y montaje del sistema de riego. Es un problema que se presenta durante la explotación de los sistemas de riego debido a la falta de experiencia y condiciones para determinar estos dos elementos.

Se puede realizar de diferentes formas. Las más importantes son:

1. Mediante muestreo gravimétrico del suelo. Este método consiste en tomar muestras frecuentemente de la capa de suelo y decidir el riego cuando la reserva de humedad promedio se acerca o coincide con el límite productivo de ese suelo y cultivo.
2. Mediante la tensión de humedad el suelo. Para ello se usa un aparato llamado tensiómetro, previamente calibrado. El límite productivo se mide en unidades de tensión (KPa, MPa) en la curva tensión- humedad del equipo previamente establecida.
3. Mediante indicadores fisiológicos de determinadas plantas que cambian su coloración, el índice de humedad de las vainas hojas, la apertura de los estomas, etc. Este método ha adquirido mucha importancia en los últimos tiempos al

encarecerse el monitoreo continuo de las áreas de riego en el mundo dada su crecimiento, y al mayor conocimiento acumulado con relación a la biodiversidad.

4. Método bioclimático. Se basa en el uso del evaporímetro clase A para determinar la evapotranspiración real. Ha demostrado ser muy práctico y efectivo en las condiciones de Cuba y está planteada su utilización en las empresas agrícolas (NRGA, 1986). Permite pronosticar con varios días de antelación la posible fecha del próximo riego, que se llama riego por pronóstico. Al multiplicar el valor de la evaporación del evaporímetro diariamente por el coeficiente biológico del cultivo para esa fase de desarrollo, se obtiene el valor de la evapotranspiración real para cada día del ciclo vegetativo del cultivo. La evapotranspiración así obtenida se resta de la humedad existente cada día y el momento de riego llegará cuando aquella reserva coincida con el valor de $W_{mín}$. Entonces el pronóstico se realiza por la ecuación:

$$dr = \frac{Wp - W_{mín}}{Etr_m}$$

donde:

dr – días que faltan para el riego,

Etr_m – evapotranspiración real media de los últimos cinco días transcurridos, $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot día^{-1}$.

Según Cisneros (2011), en la década de los 80 en Cuba se instrumentó a gran escala el pronóstico del riego por el método bioclimático para determinar el momento y la dosis o norma de riego que revolucionó la agricultura de regadío y para lo cual con un soporte material que garantizaba la aplicación del método e incluyó la instalación de pluviómetros, tanques evaporímetros, manuales, determinación de los coeficiente bioclimáticos de los principales cultivos y una adecuada capacitación de todo el personal que planificaba y ejecutaba el riego.

Esta actividad permitió dar un salto en la organización y ganar en la eficiencia del uso del agua así como incrementar los rendimientos agrícolas. No obstante a partir de la situación económica crítica que vivió el país en los años 90, esta actividad decreció hasta quedarse prácticamente nula debido a la falta de personal

y de una estructura adecuada a nivel de empresas que acometiera esta tarea técnica. A la luz de la recuperación económica del país y bajo la visión actual de ir a la búsqueda de soluciones que involucren la participación de los productores en la aplicación de los resultados científicos en la práctica productiva los SAR pueden convertirse en el punto de contacto entre los centros de investigación y los productores.

Norma total neta de riego.

La norma total neta de riego es la cantidad de agua que se debe suministrar a un cultivo durante su ciclo vegetativo para mantener la humedad entre el límite productivo escogido y la capacidad de campo de un suelo. Su determinación se hace a partir de la ecuación de balance hídrico:

$$M = W_f + ET - P_a - M_k - M\Delta h - W_{ig}, \quad [m^3 \cdot ha^{-1}]$$

Para las condiciones de Cuba los términos W_i y W_f no tienen una significación importante por tanto la ecuación se puede escribir:

$$M = E_t - (P_a + M_k + M\Delta h).$$

De lo anterior explicado se deduce que la norma neta total es la suma de todas las normas netas parciales aplicadas durante el ciclo vegetativo del cultivo.

La norma total neta de riego tiene las siguientes características:

- no se aplica de una sola vez al cultivo
- no son iguales para todos los años
- varían en dependencia de los factores climáticos, de las características del suelo.
- los aportes de sus componentes varían.

Numero de riegos.

Del estudio del concepto de norma total neta de riego se deduce que el número de riegos que se aplica a un cultivo durante su ciclo vegetativo, estará dado por la

relación entre la norma total neta y la norma parcial neta de riego, si esta última es constante, o sea:

$$NR = \frac{Mn}{mn}$$

Donde: NR – número de riegos.

El número de riegos variará en dependencia de si son suelos ligeros, medios o pesados, ya que en dependencia de ello varia la norma parcial neta que admite cada uno de ellos. En las condiciones de cuba, el factor lluvia es el que define en lo fundamental las mayores desviaciones de la norma parcial neta para un mismo cultivo y por tanto del número de riegos, ya que la evapotranspiración varía en rangos no tan amplios y los demás ingresos generalmente tiene poco efecto.

En las condiciones de Cuba el comportamiento de la lluvia caída, el escurrimiento anual de los ríos, la evaporación, la transpiración de las plantas, el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa del aire, etc., varían en función de un número grande de factores y pueden considerarse casuales. Como que estos factores condicionan en su mayoría las dimensiones de los ingresos y egresos de humedad en el suelo, la dimensión de la norma neta de riego será también variable durante los diferentes años y puede tratarse como un fenómeno casual. Debido al gran número de factores que determinan el valor de cualquiera de los elementos mencionados y la imposibilidad de determinar la influencia por separado de cada uno de ellos, es necesario el uso de la estadística para a través de los análisis de series más o menos largas de los elementos en estudio, realizar un pronóstico estadístico.

1.2.5.1. MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE RIEGO DE UN CULTIVO.

Para el cálculo del régimen de riego de los cultivos en el proyecto se pueden hacer de dos formas: gráfica y analítica. (Pacheco, 2006)

Método gráfico.

Es el método propuesto por el académico ruso A. N. Kostiakov, el cual consiste en elegir un sistema de coordenadas, ubicar el tiempo en el eje de las abscisas y la reserva de humedad del suelo en el eje de las ordenadas. El gráfico consta de tres líneas que representan $W_{\text{mín.}}$, $W_{\text{máx.}}$, y W_p durante todo el periodo que se proyecta el régimen de riego. Teniendo en cuenta que la norma parcial neta de riego m quedó definida como $W_{\text{máx.}} - W_{\text{mín.}}$ puede apreciarse que cuando se produce variación en esas líneas, la norma será mayor o menor, según se produzca la variación. La línea W_p se inicia en el primer día del ciclo del cultivo con el valor que le corresponde a la humedad inicial W_i y su trayectoria será recta hasta el final del periodo T para el cual se realiza el balance, utilizándose para esto la conocida ecuación de balance hídrico sin el término referido al aporte por riego, porque este se deduce del gráfico, o sea:

$$W_f = W_i + P_a + M_k + M_{\Delta H} - E_t \quad [m^3 \cdot ha^{-1}].$$

donde:

W_f – volumen o reserva de agua en la capa activa al final del periodo sin considerar el riego.

$M_{\Delta H}$ – se suma como ingreso solamente en el periodo en que se reporte cambio de la capa activa.

El momento de riego se produce cuando la línea W_p se intercepta con aquella correspondiente a $W_{\text{mín.}}$ y en ese momento se levanta una perpendicular a $W_{\text{mín.}}$ hasta $W_{\text{máx.}}$, lo que gráficamente representa el riego aplicado para elevar la humedad del suelo desde el límite productivo hasta la capacidad de campo y la longitud de esa línea será el valor de la norma parcial. Dentro de un mismo periodo de balance la línea W_p tendrá una misma pendiente y cuando se produzca un riego descenderá desde $W_{\text{máx.}}$ paralela a su anterior dirección.

Del gráfico se obtiene las normas parciales, las fechas de riegos, el intervalo de riego más pequeño o crítico y la norma total de riego que resulta de sumar todas

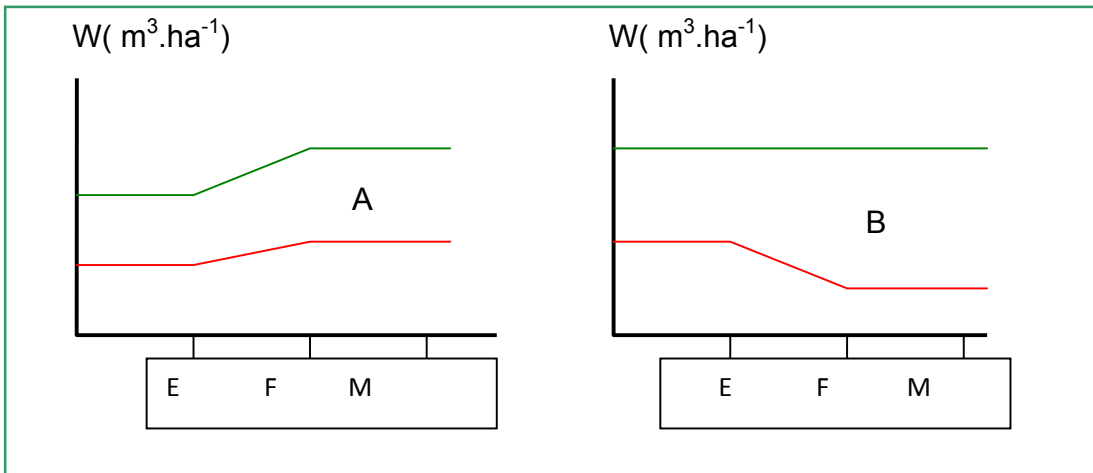
las normas parciales aplicadas. El gráfico se puede precisar en la escala del tiempo hasta un día, pero es más frecuente trabajar con períodos decenales. Los datos necesarios para la determinación del régimen de riego de un cultivo son:

- tipo de cultivos y características de sus fases de desarrollo,
- Evapotranspiración calculada por decenas u otros períodos, para lo cual se acude a métodos indirectos,
- capa activa del suelo y sus variaciones por fases,
- Capacidad de campo, Coeficiente de marchitez y peso volumétrico del suelo,
- límite productivo de humedad para el cultivo por fases de desarrollo,
- contenido de humedad en el inicio del desarrollo del ciclo vegetativo,
- lluvia aprovechable para cada periodo T.

Por este método se puede conocer la magnitud de la lluvia aprovechable si no la tenemos calculada pero conocemos la lluvia total caída en el periodo.

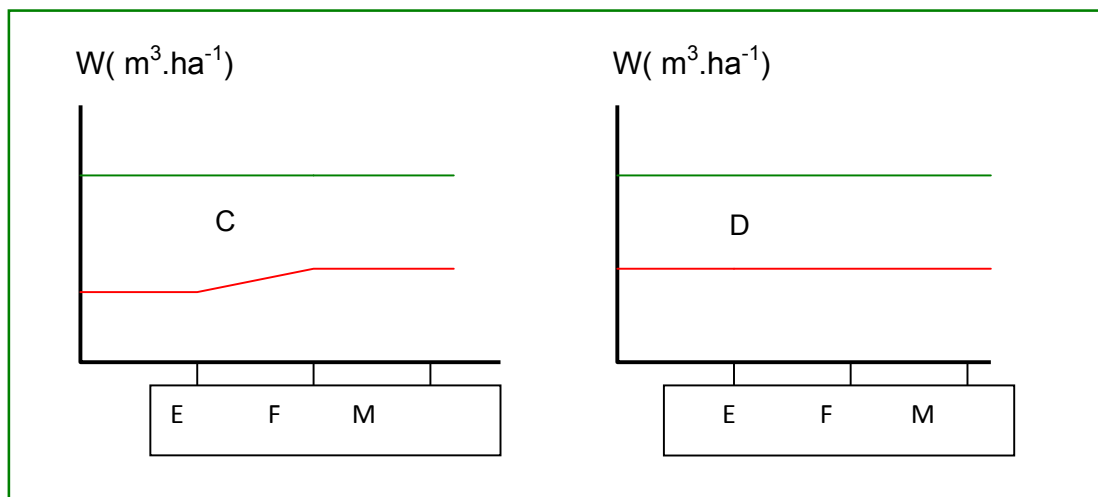
Variaciones de $W_{máx.}$ y $W_{mín.}$ durante el ciclo vegetativo de un cultivo.

Figura 1. Diferentes variaciones del régimen de riego por le método gráfico:



A – variación de la capa activa.

B – disminución del límite productivo con capa activa constante.



C – incremento del límite productivo con capa activa constante

D – capa activa y límite productivo constante

Solución gráfica del régimen de riego de un cultivo.

Método analítico.

Los principios de este método son esencialmente los mismos, pero en lugar de un gráfico se usa una tabla que facilita la realización de los cálculos. Para ello son necesarios también datos de lluvia, evaporación, etc., diarios, decenales o mensuales.

Para una decena puede ocurrir que la lluvia caída sea mayor que la evapotranspiración ocurrida.

Lluvia aprovechable:

Si $P \leq ET$, $Pa = P$;

Si $P > Et + (W_{\text{máx.}} - Wi)$, $Pa = Et + (W_{\text{máx.}} - Wi)$;

Si $Et < P \leq Et + (W_{\text{máx.}} - Wi)$, $Pa = P$.

Criterio de riego.

La necesidad de riego en una decena se define del modo siguiente:

Si $E_t \leq (W_i - W_{\text{mín.}}) + P_a$, no se riega;

Si $E_t > (W_i - W_{\text{mín.}}) + P_a$, se efectúa el riego.

Número de riegos.

Cuando es necesario regar, se aplican tantos riegos como sea necesario hasta satisfacer la siguiente expresión:

$E_t \leq (W_i - W_{\text{mín.}}) + P_a + N R \cdot m$.

Fecha de riego.

Se obtiene mediante la siguiente expresión:

Fecha de riego = $\frac{[(W_i - W_{\text{mín.}}) + P_a + N R \cdot m]}{E_{\text{tm}}} + 1$,

E_{tm}

Donde:

E_{tm} – evapotranspiración media diaria de la decena y anteriores al riego al cual se calcula. Si no se ha regado en esa decena el término se anula.

N_r – número de riegos aplicados en esa misma decena,

m – norma parcial

Total de ingresos.

Es la suma de $W_{\text{ei}} + P_a + m$, ya que $M_{\Delta H}$ se incluye junto a W_i en la decena que hay incremento.

Evapotranspiración.

Se calcula por los datos históricos de evaporación para la probabilidad deseada y el coeficiente bioclimático K_b .

$E_t = E_o \cdot K_b$.

Reserva de humedad inicial.

Al inicio del período se asume como el 90 % de $W_{m\acute{a}x.}$, y en el resto de los periodos se toma la humedad de reserva final W_f del balance del periodo anterior. Si ocurren cambios en la profundidad de humedecimiento (capa activa) W_i se determina por la suma de W_f anterior más el volumen correspondiente al 90 % de la diferencia de las reservas de humedad máxima ($W_{m\acute{a}x.}$), es decir:

$$W_i = W_{f_{t-1}} + 0.9 (W_{m\acute{a}x_t} - W_{m\acute{a}x_{t-1}});$$

donde:

$W_{f_{t-1}}$ – reserva de humedad final del periodo anterior al que se calcula, $m^3.ha^{-1}$;

$W_{m\acute{a}x_t}$ – reserva máxima del periodo al cual se le calcula la W_i , $m^3.ha^{-1}$;

$W_{m\acute{a}x_{t-1}}$ – reserva máxima del periodo anterior al que se le calcula la W_i , $m^3.ha^{-1}$.

Reserva de humedad final.

Se calcula teniendo en cuenta los egresos e ingresos en $m^3.ha^{-1}$.

$W_f = \text{total de ingresos} - \text{total de egresos}$.

Reserva de la humedad consumida.

$$W_{cons} = W_{m\acute{a}x.} - W_f. \quad m^3.ha^{-1}$$

donde:

W_{cons} – reserva de humedad consumida en $m^3.ha^{-1}$.

Reserva de humedad presente.

$$W_p = W_f - W_{m\acute{i}n.} \quad m^3.ha^{-1}$$

Para la mayoría de los cultivos se toman para el proyecto los datos correspondientes a años medio-secos con probabilidad de la norma total de riego

del 25 %, o de la lluvia igual a 75 %, aunque por razones técnico-económicas pueden elegirse otras probabilidades.

Hidromódulo de riego. Volumen de agua para regar un área.

Hidromódulo se define como el caudal de agua que debe suministrarse a una unidad de área bajo riego durante la jornada laboral para humedecer adecuadamente toda la superficie, cumpliendo con los parámetros establecidos del régimen de riego. Se expresa en litros por segundo por hectárea (L.s.ha⁻¹) y sus valores oscilan entre 0.1 y 2.0 L.s.ha⁻¹ aproximadamente. Para llegar a este concepto se puede hacer el siguiente razonamiento:

Sea un área A, a la cual en un momento determinado del desarrollo del ciclo vegetativo del cultivo corresponde una norma neta parcial m que se aplica durante un turno de trabajo t. el volumen de agua que deberá suministrarse a toda el área será el producto del caudal Q por el tiempo t durante el cual se riega lo que es lo mismo, el producto del área a regar por la norma neta parcial a aplicar m. Esto nos permite conformar una ecuación fundamental para las técnicas de riego que es la siguiente:

$$Q \cdot t = A \cdot mn,$$

Donde:

Q – caudal necesario m³.dia⁻¹,

t – tiempo de riego, días (turno)

A - área, ha,

mn – norma neta parcial, m³.ha⁻¹.

Esta fórmula se puede usar para calcular cualquiera de los cuatro términos que la forman conociendo tres de ellos.

Para obtener el caudal en litros por segundos tendremos que:

$$Q = \frac{A \cdot mn}{86.4 \cdot t} \quad [\text{L.s.ha}^{-1}],$$

Entonces para calcular el hidromódulo, partiendo de la definición dada, dividimos el caudal por el área como sigue:

$$q = \frac{Q}{A} \quad q = \frac{mn.}{86.4 \cdot t}$$

Donde:

q – hidromódulo en L.s.ha⁻¹.

Cuando no se riegan las 24 horas del día, cosa que es muy frecuente, se introduce el término T que indica la duración de la jornada de riego diaria en horas.

$$q = \frac{mn.}{3,6 \cdot T \cdot t}$$

Esta fórmula tiene gran aplicación en los cálculos de riego, el hidromódulo así calculado puede ser neto o bruto según se haya empleado la norma m neta o bruta.

Volumen de a para cubrir las necesidades totales de un grupo de cultivos.

1.3. LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN Y LA EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE AGUA.

El objetivo del riego es suministrar a los cultivos, de forma eficiente y sin alterar la fertilidad del suelo, el agua adicional a la precipitación que necesita para su crecimiento óptimo y cubrir las necesidades de lavado de sales de forma que evite su acumulación en el perfil del suelo, asegurando la sostenibilidad del regadío.

La terminología utilizada para describir el comportamiento del riego a nivel de área incluye normalmente los términos de eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución. Lamentablemente no existe ningún parámetro que por sí solo sea

suficiente para describir el comportamiento del riego, por lo que siempre se valoran varios parámetros a la vez.

La uniformidad del riego indica el grado de igualdad de dosis recibida por los diferentes puntos de la parcela.

La eficiencia de riego puede ser definida como el porcentaje de agua bruta aplicada que es aprovechada para satisfacer las necesidades del cultivo.

Para aproximar el concepto de uniformidad de distribución puramente espacial de la lámina de agua infiltrada, como fue definida anteriormente, al concepto de “uso eficiente por el cultivo”, se pueden contemplar las zonas donde se concentra la actividad radicular, no debiendo tener en cuenta las zonas secas entre plantas (caso de riego localizado en árboles). De esta manera se introduce el concepto de “zonas con planta”.

El grupo de trabajo de ASCE en Eficiencia de Riego y Uniformidad de Distribución (Clemmens and Solomon, 1951), introduce el concepto de *agua interceptada* para hacer más próximo el concepto de uniformidad a lo que experimenta el cultivo. Este incluye tanto el agua infiltrada como el agua utilizada por la cubierta vegetal (por ejemplo para reemplazar transpiración durante el riego).

Dependiendo de las necesidades de manejo pueden definirse distintas uniformidades de distribución (UD) como la relación entre alguna medida de mínima altura interceptada y la altura media interceptada. El sentido de mínimo lo proporciona la media de las menores alturas interceptadas en una fracción concreta de “zona con planta”

En el riego por aspersión está muy extendida la utilización del coeficiente de uniformidad de Christiansen. Este es equivalente a la UD 50 correspondiente a la media del 50 % del área menos regada.

En general, cuando se aplica un riego, no toda el agua queda almacenada en la zona del suelo explorada por las raíces, sino que parte se pierde por evaporación, escorrentía y percolación profunda, siendo muy diferentes la cuantía de cada tipo de pérdida según el tipo de suelo y sistema de riego.

Conceptualmente, la idoneidad de un riego depende de: el incremento del agua almacenada en la zona radicular del cultivo producido por el riego, las pérdidas por

percolación profunda y por escorrentía superficial, la uniformidad de la lámina infiltrada y el déficit de humedad del suelo después del riego.

El término uniformidad del riego es un elemento que siempre ha estado presente al evaluar un sistema de riego, compararlo con otro o elegir el más conveniente o factible para una determinada zona, siempre aspirándose a encontrar aquel que logre que en todos los puntos que atiende llegue la misma cantidad de agua o lo que es la mismo una aplicación con el 100 % de uniformidad

Según FAO (2002), hay Seis claves para lograr la eficiencia y uniformidad de los sistemas de riego

- reducir las filtraciones de los canales por medio de revestimientos o utilizar tuberías;
- reducir la evaporación evitando los riegos de medio día y utilizar riego por aspersión por debajo de la copa de los árboles en vez de riego por aspersión sobre la copa de los mismos;
- evitar el riego excesivo;
- controlar las malas hierbas en las fajas entre cultivos y mantener secas estas fajas;
- sembrar y cosechar en los momentos óptimos;
- regar frecuentemente con la cantidad correcta de agua para evitar déficits de humedad

1.3.1. EVALUACIÓN DE LAS MÁQUINAS DE RIEGO DE PIVOTE CENTRAL

La evaluación de máquinas de riego de pivote central, resulta necesaria para validar en condiciones de campo sus reales parámetros de funcionamiento. Generalmente, la evaluación pluviométrica proporciona los datos necesarios para validar el funcionamiento hidráulico de la máquina.

La evaluación pluviométrica, puede incluir la obtención de datos pertenecientes a 200 o más pluviómetros acompañados de toda la información que caracteriza a la máquina y al lugar del ensayo en ese momento. El manejo de todos estos datos tomados en el campo y su posterior procesamiento es lo que se facilita con el software "**Pluviopivot**", el cual guarda en un fichero los datos sistematizados y los resultados del análisis (Pacheco, 2006).

Para el análisis hidráulico de estas máquinas existen en el país varios programas como por ejemplo el “**Pivot**” referido por González y Navarro (1999) y el “**Simufre**” referido por Pérez (1998), los cuales como resultado ofrecen las soluciones para mejorar la distribución del agua. El análisis hidráulico, sin embargo, debe estar siempre acompañado de una correcta evaluación pluviométrica.

El estudio de la pluviometría en las máquinas de riego de pivote central resulta más complejo que en otros sistemas de aspersion, porque la corona circular representada por cada pluviómetro es mayor en la medida que su posición se aleja del pivote. Luego, el peso relativo de los diferentes pluviómetros en el cálculo de los parámetros de uniformidad no puede ser igual, lo que da lugar a que se introduzca un factor de ponderación que se corresponde con la superficie que representa cada pluviómetro y por consiguiente todos los coeficientes de uniformidad calculados resultan ponderados por la superficie. El uso de coeficientes de uniformidad ponderados por superficie para máquinas de pivote central, se viene planteando desde el pasado siglo en la bibliografía internacional destacándose los trabajos de Heerman y Hein, citados por Pacheco (2004), que modificaron el conocido Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (1942) para ponderarlo por superficie. Posteriormente, Merriam y Keller (1978), Merriam et. al., (1980), citado este último por Faci y Bercero (1990) contribuyeron todos al desarrollo de los actuales conceptos de la ponderación por superficie. En nuestro país se publica sobre la ponderación por superficie para las máquinas de pivote central en los trabajos de Pacheco et al., (1995), Pérez (1998) y Pacheco (2003).

III MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. LOCALIZACIÓN

El trabajo fue realizado en la Granja 7 donde se encuentra instalada la Máquina de pivote central # 16 de la marca Western, perteneciente a la Empresa Agropecuaria Horquita, del municipio de Abreus, provincia Cienfuegos, en el período comprendido desde noviembre 2011 hasta febrero del 2012.

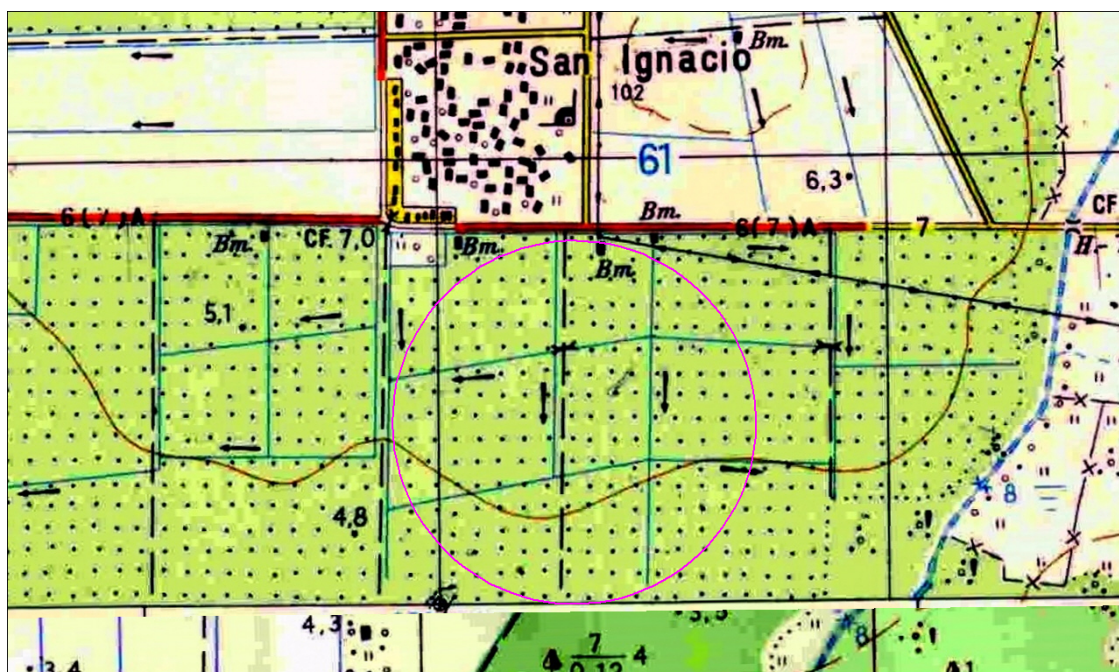


Figura 2. Ubicación de la máquina objeto de estudio.

La superficie total de la máquina es de 52.30 ha dividida en 4 cuadrantes de 13,75 ha cada uno, los cultivos beneficiados son: Papa (dos cuadrantes) y frijol (dos cuadrantes), las variedades plantadas son: de papa Romano y de frijol Cuba-cueto.

El área del estudio se caracteriza por tener un suelo Ferralítico rojo, típico con 50 cm de profundidad efectiva, con Capacidad de Campo en base al peso del suelo seco de 35 % y Densidad aparente de 1,3 g.cm⁻³, la velocidad de infiltración 40 mm/h. (II Clasificación Genética de Suelos de la Academia de Ciencias de Cuba)

Durante la etapa evaluada el clima tuvo un comportamiento estable para la época, es decir para un período seco con escasas precipitaciones, temperaturas

relativamente altas, vientos entre 4,3 y 5,8 m.s⁻¹ que hacen que los niveles de evapotranspiración sean altos. Se tomó los datos aportados por la estación de protección de plantas de Yaguaramas

Tabla 2. Medias mensuales de las variables climáticas

Elementos	UM	noviembre	diciembre	enero	febrero
Temperatura Máxima	°C	28.9	27.7	27.7	29.7
Temperatura Mínima	°C	18.05	17.14	15.5	17.5
Temperatura media	°C	23.48	22.4	21.6	23.7
Media histórica	°C	23	22.1	21	23
Humedad relativa	%	75.8	75.12	68.8	68.7
Lluvias	mm	5	1.5	0	38
Evaporación	mm.día ⁻¹	5.11	4.96	5.32	6.12
Velocidad del Vientos	m.s ⁻¹	4.31	5.8	5.14	4.93

Durante el periodo en que se realiza el estudio fueron casi insignificantes las lluvias, con excepción del mes de marzo, pues los valores no sobrepasaron los 4 mm.

Las temperaturas muestran un comportamiento que difiere con los valores históricos al estar en todos los meses su valor medio por encima de la media histórica y en todos los casos supera también el límite superior óptimo de temperatura que requiere este cultivo para lograr un desarrollo y crecimiento normal (13 a 18 °C)

Para realizar el trabajo se hace un bosquejo histórico del riego en el mundo y en Cuba a través de consulta de documentos, búsquedas en Internet, entrevista con obreros y dirigentes de la empresa, etc, se hizo énfasis en el método de riego por aspersión y dentro de este en las máquinas de riego.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE RIEGO

Se realiza una caracterización de la máquina teniendo en cuenta los parámetros técnicos de acuerdo con el diseño del fabricante (tabla 2) que están recogidos en el catálogo que acompaña al equipo el que incluye la carta de riego, la cual fue consultada previamente tomando los datos referidos a boquillas empleadas, caudal general y por boquillas, disposición de las boquillas, presión de trabajo, etc. De los elementos descritos en el catálogo de la máquina se comprobó la disposición y tipo de boquillas, la velocidad de giro de la máquina en las tres regulaciones observadas, presión de trabajo a la entrada de la máquina. (WESTERN IRRIGATION SYSTEMS, 2005)

Tabla # 3 Características técnicas de diseño de la máquina de riego de pivote central eléctrica de la marca Western # 16.

Parámetros	UM	Valor	Observaciones
Gasto	L.s ⁻¹	72	
Radio de riego	m	408	No tiene voladizo final
Radio torre final	m	408	Coincide con el radio de riego
Norma mínima	m ³ .ha ⁻¹	63.53	Movimiento a la máxima velocidad
Tiempo de giro mínimo	h	12.81	
Área	ha	52.25	Esta es el área bruta
Velocidad máxima	m.h ⁻¹	200	
Número de torres	u	7	
Número de boquillas	u	229	De diferentes diámetros según su posición
Hidromódulo máximo	L.s.ha ⁻¹	1,30	
Altura de la máquina	m	3.6	

Altura de las boquillas	m	1,00	Con el empleo de bajantes
Presión	bar	3,4	Al inicio de la máquina, luego va disminuyendo hasta el final

Para la caracterización de la máquina se tiene en cuenta el desarrollo histórico del riego y de las máquinas hasta llegar a la máquina objeto de estudio para lo cual se realiza consulta y análisis de documentos y observaciones.

2.3. DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE RIEGO DE EXPLOTACIÓN

Se determina el régimen de riego de explotación para verificar la correspondencia de las láminas e intervalos de riego aplicados con las exigencias del cultivo en las condiciones del suelo, del clima y del cultivo en que se desarrolló.

Para el cálculo del régimen de riego se tiene en cuenta los límites de la humedad óptima (Cc y Lp) que determinan el valor de las normas de riego. El momento de riego se determina por este método considerando los ingresos y egresos de humedad que forman parte de la ecuación del balance de humedad, la que dice en qué momento la humedad del suelo está o puede estar próxima al límite productivo, siendo este el momento oportuno para aplicar el riego. Así siguiendo la dinámica de la humedad del suelo, el consumo promedio diario y la humedad disponible se puede predecir con anticipación cuando será necesario volver a regar.

El método analítico diseñado para el cálculo del régimen de riego ha sido perfeccionado con el empleo de la aplicación informática Microsoft Excel en cuya hoja de cálculo se ha diseñado la tabla que permite llevar toda la dinámica de la humedad de un suelo para un área dada (Pacheco, 2006), la que puede observarse a continuación

Tabla 4. Método analítico para el cálculo del régimen de riego

Dias	H	CC	□	Lp	Wm _{ax}	Wm _{in}	mn	Ingresos				□ _{ing}	Egresos		W _f	W _c	W _p
								Wi	Pc	Pa	MN		Eo	Et			
	m	%	t/m ³	%	m ³ /a	m ³ /a	m ³ /a	m ³ /a	m ³ /a	m ³ /a	m ³ /a	m ³ /a	m ³ /a	m ³ /a	m ³ /a	m ³ /a	m ³ /a

	s	C																

Para el cálculo del régimen de riego también se hace un estudio y análisis de documentos como regímenes de riego aplicados al cultivo en otras temporadas, los datos climáticos aportados por la estación agroclimática, los datos del cultivo y del suelo. Se emplean métodos matemáticos para el cálculo de los elementos del régimen de riego (Pacheco, 2006a), tales como:

Las reservas de humedad máxima y mínimas se determinan por las siguientes fórmulas

$$W_{\text{máx}} = 100 * H * \alpha * C_c \quad \text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$$

$$W_{\text{agua}} = 100 * H * \alpha * H_p \quad \text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$$

La norma de riego (mn) se determina como

$$mn = W_{\text{máx}} - W_{\text{mín}} \quad \text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$$

La lluvia aprovechada se obtiene de determinar cuál de la lluvia caída es capaz de llevar la humedad del suelo hasta el límite máximo, por lo que puede ser aprovechada toda o solo una parte de ella.

La norma total de riego (MN): es la suma de todas las normas parciales de riego aplicadas en el periodo considerado.

La evapotranspiración se determina al multiplicar la evaporación por el coeficiente bioclimático del cultivo

$$E_{vt} = E_v * k_b$$

La reserva final se calcula a partir de la siguiente fórmula que es considerada como la ecuación fundamental del régimen de riego y que es aplicable a cualquier periodo de tiempo en que se quiera balancear la humedad.

$$W_f = W_i + P_a + M_k + M_{\Delta H} + MN - E_t \quad \text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$$

La Humedad consumida es la cantidad de agua que se va extrayendo del suelo

$$W_c = W_{\text{máx}} - W_f \quad \text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$$

La humedad presente es el contenido de agua que queda en el suelo hasta llegar a la reserva mínima

$$W_p = W_f - W_{\text{mín.}} \quad \text{m}^3.\text{ha}^{-1}$$

Este método de cálculo del régimen de riego se encuentra en una hoja electrónica de cálculo lo que hace más fácil la operación.

2.4. EVALUACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE LA MÁQUINA DE RIEGO WESTERN

Se realiza una evaluación del comportamiento de los parámetros reales de funcionamiento de la máquina en las condiciones de producción, para lo que se realizan tres mediciones pluviométricas empleando para ello recipientes de 400 mL de capacidad y 6,1 cm de diámetro, que cumplieron la función de pluviómetros. Las tres mediciones se realizaron en el primer cuadrante uno de los dos que se encontraban plantados de papa, siempre en horas de la mañana pero con diferentes velocidades del viento y con diferentes regulaciones de la máquina.

Los pluviómetros fueron colocados cada 5 m por lo que fueron instalados 81 en cada medición.

De los pluviómetros se tomó el volumen de agua recogido durante el paso de la máquina por ese lugar previamente seleccionado, ese volumen se vertió en una probeta graduada de 500 ml y se registró la medición.

En cada una de las tres mediciones se tuvo en cuenta también la velocidad y dirección del viento por su influencia directa en la uniformidad del riego, el cual fue un factor determinante para elegir la zona donde se colocarían los pluviómetros.

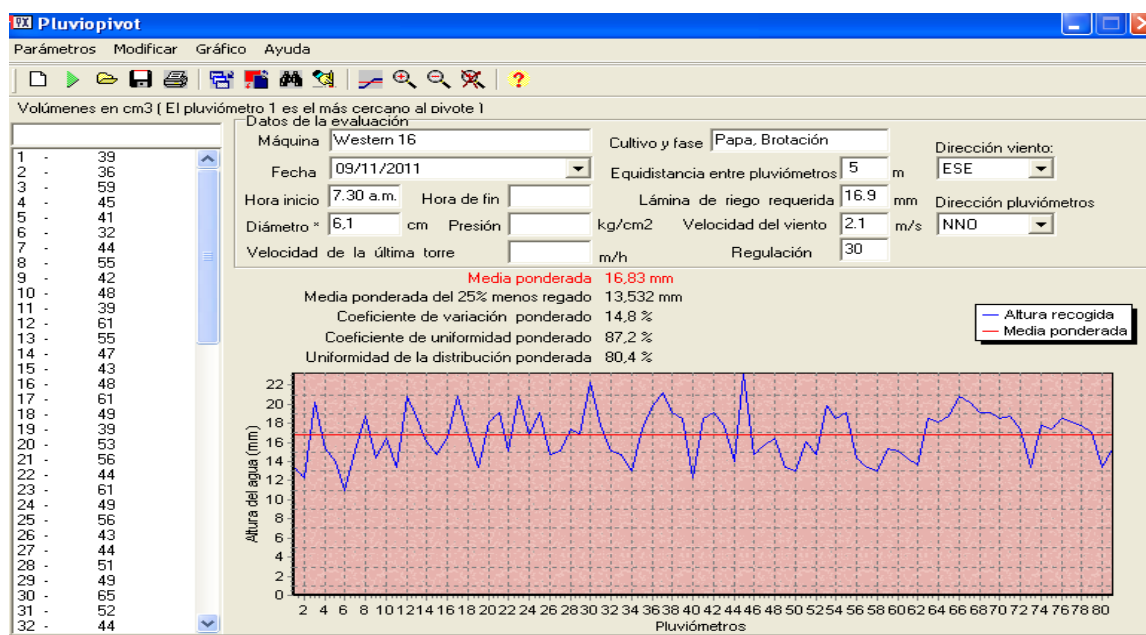
TABLA # 5. Características y condiciones en que se realizaron las evaluaciones en el pivote

Evaluaciones	1	2	3
Fecha	9/11	20/12	28/01

Lámina requerida (mm)	16.9	25.4	8.5
Regulación (%)	30	20	60
Velocidad última torre ($m \cdot min^{-1}$)	1	0.67	2
Velocidad del viento ($m \cdot s^{-1}$)	1,8	6,4	0,5
Dirección del viento	ESE	ESE	N
Emisores	Boquillas D3000 y PC DS		
Presión de trabajo (bar)	3,4	3,4	3,4
Dirección de la máquina	N	N	N

Una vez obtenida la información de la lluvia registrada en cada medición se procedió a procesar los datos con ayuda del software [Pluviopivot](#) (Pacheco, 2006 b), con el que se pudo obtener la media ponderada, Coeficiente de Variación Ponderado, Coeficiente de Uniformidad Ponderado, media ponderada para el 25 % menos regado y uniformidad de la distribución ponderada.

Figura 3: Ventana principal del Software Pluviopivot



Los parámetros de uniformidad ponderados que obtiene “**Pluviopivot**” se calculan teniendo en cuenta las expresiones anteriores y por las fórmulas siguientes:

Media Ponderada

$$m_p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times n_i}{\sum_{i=1}^n n_i}$$

Donde:

mp = media ponderada de las alturas de agua recogidas.

mi = altura de agua recogida en el pluviómetro “i”.

n = número de pluviómetros.

ni = posición ocupada por el pluviómetro “i” con valor de 1 para el más cercano al pivote, 2 para el siguiente y así sucesivamente.

Coefficiente de variación ponderado:

$$CV_p = \frac{S_p}{m_p} \times 100$$

Donde:

CVp = Coeficiente de variación ponderado de las alturas de agua recogidas %.

Sp = desviación típica ponderada de las alturas de agua recogidas.

Desviación típica ponderada:

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n n_i (m_i - m_p)^2}{\sum_{i=1}^n n_i - 1}}$$

sp = Desviación típica ponderada de las alturas de agua recogidas.

Coefficiente de uniformidad ponderado:

$$CU_p = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n n_i (m_i - m_p)}{m_p \times \sum_{i=1}^n n_i} \right] \times 100$$

Donde:

CUp = coeficiente de uniformidad ponderado de las alturas de agua recogidas.

Los valores de CUp pueden clasificarse, según SIAR (2003), de la forma siguiente:

< 80 % Inaceptable

80-85 % Aceptable

85-90 % Bueno

> 90 % Muy Bueno

Media Ponderada del 25% menos regado:

$$m_{25p} = \frac{\sum_{j=1}^b m_j n_j}{\sum_{j=1}^b n_j}$$

Donde:

M25p = altura media ponderada recogida en el 25% del área menos regada.

J = subíndice de ordenación de menor a mayor de las alturas de agua recogidas en los pluviómetros.

Uniformidad de Distribución Ponderada

UDp= m_{25p} / m_p (8)

Donde:

UDp = uniformidad de distribución ponderada de las alturas de agua recogidas.

En la elaboración de este trabajo se emplean como métodos

Histórico-lógico: para el análisis evolutivo del desarrollo del riego y sus técnicas principales, la evaluación de los sistemas de riego y la selección de las metodologías más adecuadas para evaluar el régimen de riego y la pluviometría de la máquina de riego.

Analítico-sintético: para procesar toda la información disponible relacionada con las máquinas de riego, el régimen de riego que se calcula y el que se aplica, lo que permite hacer un uso más eficiente de la tecnología partiendo de la experiencia práctica alcanzada a nivel de la propia Empresa, nacional e internacional. Toda la información que se obtiene de manera directa o a través de los cálculos realizados se analiza para interpretarla y llegar a conclusiones

Inductivo-deductivo: permite indagar en el problema, hacer deducciones, inferencias y llegar a conclusiones parciales y generales. Es por esto que la pluviometría de la máquina se evalúa con diferentes láminas de aplicación

Métodos del nivel empírico:

La observación: se realizaron varias observaciones al funcionamiento de la máquina en diferentes momentos del ciclo del cultivo y a diferentes horas para inferir las posibles afectaciones a la calidad del riego asociándolas a las posibles causas.

Entrevista a directivos: Se realiza con el objetivo de la planificación del riego en cuanto al momento en que se aplica y las dosis de riego recomendadas, sus bases y las formas para controlar la satisfacción de las necesidades de agua del cultivo.

Mediciones pluviométricas: para conocer la lámina de agua que llega al suelo a diferentes velocidades de la máquina

Del nivel matemático:

Empleo de hojas de cálculo: para determinar el régimen de riego de explotación

Análisis porcentual: para organizar y procesar la información obtenida como resultado de la aplicación de los diferentes instrumentos de investigación.

Empleo de software: para procesar los datos de la lluvia recogida por los pluviómetros.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA DE PIVOTE CENTRAL WESTERN

La máquina de riego que es objeto de evaluación fue instalada en octubre del 2008, con la participación de especialistas del Instituto de Investigaciones en Riego y Drenaje (IIRD), de la Delegación Provincial de la Agricultura y de la Empresa Agropecuaria Horqueta.

La máquina consta de 7 torres e igual cantidad de tramos de los cuales cuatro son de 60.5 m y los tres restantes son de 54,86 m cada uno para una longitud total de 408 m, sin cañón final, trabaja con un caudal de $72 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, tiene un radio de riego de 408 m, la velocidad de trabajo es variable, por lo que el tiempo requerido para dar una vuelta va desde 12,81 h hasta 128, 11 h dependiendo de la norma de riego a aplicar, es decir que la regulación de la cantidad de agua a entregar al cultivo se varía a partir de la velocidad de giro del sistema. La máquina posee en el pivote un regulador de la velocidad de trabajo de la máquina con el cual se fija la velocidad de la última torre con la que se regula la velocidad de la máquina completa. La altura de la máquina es de 3,6 m lo que le da la oportunidad de sembrar una gran gama de cultivos cuyo desarrollo foliar no exceda esta altura.

En el mismo pivote de la máquina se encuentra el equipo de bombeo que se encarga de extraer el agua del manto freático e impulsarla hasta el final del sistema con la presión requerida y en las cantidades necesarias que garanticen el riego con un funcionamiento adecuado de las boquillas. En este propio pivote está montado también el equipo para la fertirrigación que es otra de las facilidades que brinda este sistema de riego.

Los tramos que conforman la máquina poseen particularidades en cuanto a su longitud, disposición de las boquillas, presión de trabajo y caudal como puede apreciarse en la siguiente tabla

Tabla 6: Distribución de boquillas y presión por tramos de la máquina Western de 7 torres.

Tramos	U/M	1	2	3	4	5	6	7
Longitud	m	60.5	60.5	60.5	60.5	54,86	54,86	54,86
# de boquillas	U	27	29	29	29	26	26	26
Presión	bar	3.0	2.7	2.5	2.2	2.1	2.0	1.9

La distribución de las boquillas y la altura de estas sobre el cultivo se corresponden con las indicaciones del fabricante.

En el catálogo de la máquina se establece que el hidromódulo es de 1,30 L.s.ha⁻¹, considerado como el más alto para estos equipos lo que difiere con lo planteado por González (2002) que demostró que para el cultivo de la papa un hidromódulo de 1,20 L.s.ha⁻¹, es suficiente. Sin embargo Pacheco, 2011 estableció que para las máquinas Western el hidromódulo de 1,30 L.s.ha⁻¹ es adecuado para el cultivo de la papa

Para la operación de la máquina se partió de la carta de riego que el fabricante propone y se ajustó esta a las condiciones de trabajo, determinándose el % de regulación de la velocidad en el temporizador del panel de control de la máquina, para cada norma de riego que podía entregar, asegurando así una gran gama de normas de riego que van desde la posibilidad de moverse al 100 % de la velocidad de diseño que presupone la menor norma de entrega hasta moverse al 10 % de su velocidad con una entrega alta y por tanto un tiempo prolongado para dar una vuelta completa o transitar por los cuatro cuadrantes

Esto da la posibilidad de utilizar diferentes normas de riego de acuerdo a las exigencias del cultivo en un momento dado ya sea para humedecer el suelo con vistas a realizar otra labor o por que al producirse una lluvia previa a la aplicación del riego pero que no cubrió el 100 % de la necesidad del cultivo en ese momento y se decide complementar con el riego para no hacer cambios en la programación del riego. En este caso se aplica un riego con norma reducida. También da la posibilidad de tener bajo la misma máquina más de un cultivo con exigencias hídricas diferentes sin que por ello se produzca alguna afectación. Los cultivos

cuando son más de uno por máquina estarían establecidos por cuadrantes como en el caso objeto de estudio donde dos cuadrantes fueron sembrados de frijol y los otros fueron plantados de papa, incluso puede darse el caso de tener un cultivo por cuadrante

Según la mencionada carta de riego que aparece a continuación y que está en manos de los operadores de la máquina, se puede decidir a que % de la velocidad total deberá girar la máquina para cumplir con la norma a aplicar. Como puede observarse al seleccionar el % de regulación se conocerá también el tiempo que demorará en transitar por cada cuadrante y en dar la vuelta completa, lo que facilita además la organización de otras labores de cultivo sin la interferencia de estas con el riego y viceversa. Las normas brutas están calculadas a partir de considerar que el sistema trabaja con una eficiencia del 80 %, es decir que un 20 % del agua aplicada no llega al suelo, siendo interceptada por el follaje de la planta, se evapora o es desviada por el viento.

Tabla 7: programación del riego de acuerdo con las normas de riego

Marca: Western		# de torres 7		
Máquina 16		Velocidad mínima 200m.h ⁻¹		
Área 52,30 ha		Caudal del pivote 72 L.s ⁻¹		
Radio de riego 406.55 m		Norma mínima 53,63 m.h ⁻¹		
Torre final 406.55 m		Tiempo de giro mínimo 12,81 h		
Ajuste temporizador	mb	mn	Tiempo de giro	tiempo x cuadrante
%	m ³ .ha ⁻¹	m ³ .ha ⁻¹	h	h
10	635	508	128,11	32,03
12	529	424	106,76	26,69
14	454	363	91,51	22,88
16	397	318	80,07	20,02
18	353	282	71,17	17,79

20	318	254	64,06	16,01
22	289	231	58,23	14,56
24	265	212	53,38	13,35
26	244	195	49,27	12,32
28	227	182	48,75	11,44
30	212	169	42,7	10,68
32	199	159	40,04	10,01
34	187	149	37,68	9,42
36	176	141	35,59	8,9
38	167	134	33,71	8,43
40	159	127	32,03	8,01
42	151	121	30,8	7,63
44	144	116	29,12	7,28
46	138	110	27,85	6,96
48	132	106	26,69	6,67
50	127	102	25,62	6,41
52	122	96	24,64	6,16
54	118	94	23,72	5,93
56	113	91	22,88	5,72
58	110	88	22,09	5,52
60	106	85	21,35	5,34
62	102	82	20,66	5,17
64	99	79	20,02	5
66	96	77	19,41	4,85
68	93	75	18,84	4,71
70	91	73	18,3	4,58

72	88	71	17,79	4,45
74	86	69	17,31	4,33
76	84	67	16,86	4,21
78	81	65	16,42	4,11
80	79	64	16,01	4
82	77	62	15,62	3,91
84	76	61	15,25	3,81
86	74	59	14,9	3,72
88	72	58	14,56	3,64
90	71	56	14,23	3,56
100	64	51	12,81	3,2

Al procesar la tabla del fabricante se encontró la ecuación que relaciona la configuración del cronómetro con la lámina de riego bruta que aplica la máquina la cual permite seleccionar la regulación del cronómetro para cualquier otra lámina de riego que no aparezca en la tabla, dándole mayor aplicabilidad y versatilidad a este sistema pudiendo ajustarse a cualquier norma de riego, la ecuación se muestra a continuación:

$$y = \frac{6390}{X}$$

Donde:

X: Norma bruta requerida (mm)

y: Configuración del cronómetro (%)

La caracterización realizada a la máquina permitió comprobar que se cumple cabalmente con las indicaciones del fabricante en cuanto a disposición y tamaño de las boquillas, caudal, presión de trabajo lo que unido a una adecuada relación de estos elementos con las características del suelo, el cultivo y el clima debe

garantizar un riego adecuado que se revierta en altos rendimientos con bajos costos.

3.2. RÉGIMEN DE RIEGO REQUERIDO Y APLICADO PARA EL CULTIVO DE LA PAPA

La papa es un cultivo de ciclo corto muy exigente en agua, aunque un exceso reduce el porcentaje en fécula y favorece el desarrollo de enfermedades. Desde la siembra, el estado hídrico del suelo tiene influencia sobre toda la evolución del cultivo.

Las alternancias de períodos secos y húmedos dan lugar a modificaciones en la velocidad de engrosamiento de los tubérculos, ya que son el origen de ciertos defectos como: grietas, surcos, estrechamientos, etc. Antes de la tuberización un ligero déficit hídrico favorece el desarrollo de las raíces.

Durante el periodo de tuberización las necesidades hídricas pueden llegar hasta 80 metros cúbicos por hectárea por día. Por estas razones y teniendo en cuenta que las precipitaciones de este periodo no satisfacen las exigencias de humedad del cultivo, la aportación artificial de agua debe ser bien manejada lo que implica establecer un régimen de riego que garantice al cultivo la humedad en el momento oportuno y en las cantidades necesarias, pero sin despreciar las lluvias que ocurren en este periodo, es decir se requiere de una regulación de la humedad del suelo tomando en consideración la dinámica que esta va experimentando diariamente en el suelo

A partir de los datos del suelo, del clima de la zona y las características y exigencias del cultivo se determinó el régimen de riego de explotación por el método analítico que se debía aplicar al cultivo lo que incluyó las láminas de agua requeridas y los intervalos de riego. Para el cálculo del régimen de riego se partió de considerar el periodo anterior como lluvioso por lo que para determinar la W inicial se consideró esta como el 90 % de la reserva máxima, se consideraron como ingresos solamente el riego aplicado y la lluvia caída siempre que fuera superior a 4 mm y que elevara la humedad del suelo hasta la capacidad de campo

(W máxima) o menos, considerándose esta como lluvia aprovechable. En el periodo que duró el estudio se produjeron lluvias equivalentes a 44,5 mm. Los límites de la humedad óptima se calcularon y a partir de ellos se determinó la norma de riego neta que puede aplicarse al suelo de acuerdo con las propiedades hidrofísicas y el menor número de riegos sin provocar encharcamientos en el suelo al encontrarse por debajo de la velocidad de infiltración. Para determinar la evapotranspiración diaria se tomó la evaporación aportada por la EPP de yaguaramas y el coeficiente bioclimático propuesto por Pacheco, (2006 a). La dinámica diaria de la humedad se determina a partir de la ecuación fundamental del régimen de riego.

El régimen de riego calculado permitió determinar que en las condiciones en que se desarrolló el cultivo requería de 14 riegos con intervalos promedios de 8,8 días entre dos riegos sucesivos y un volumen de agua total a aplicar de 390,6 mm. Las láminas parciales de agua se determinaron a partir de los límites óptimos de la humedad llevando siempre esta hasta la reserva máxima o capacidad de campo, estas láminas tuvieron un incremento a partir de séptimo riego por considerarse una capa activa mayor en correspondencia con el incremento del volumen y profundidad del sistema de raíces de las plantas. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Pacheco (2010), quien al estudiar la programación del riego para el cultivo de la papa en la Empresa Valle del Yabú de Santa Clara, demostró que un aumento de las normas o láminas de riego y el alargamiento de los intervalos de riego, se redujo hasta 13 el número de aplicaciones con el consiguiente ahorro de energía eléctrica, a la vez que se evitó los atascamientos de la máquina.

Estas láminas de aguas calculadas pueden ser aplicadas por la máquina moviéndose al 23.4 % para la primera norma y al 22 % para la segunda norma de riego. Un resumen del régimen de riego calculado aparece en la siguiente tabla.

Tabla 8: Programación de la fecha y las normas de riego por el método analítico para el régimen de riego de explotación determinado para las condiciones de la máquina Western 16

# riegos	Fecha de riego	Intervalo entre riegos (días)	Lámina de agua requerida (mm)
1	6 noviembre 2011		22.7
2	15 noviembre 2011	9	22.7
3	25 noviembre 2011	10	22.7
4	3 diciembre 2011	8	22.7
5	10 diciembre 2011	7	22.7
6	18 diciembre 2011	8	22.7
7	26 diciembre 2011	8	31.8
8	6 enero 2012	11	31.8
9	16 enero 2012	10	31.8
10	25 enero 2012	9	31.8
11	3 febrero 2012	9	31.8
12	11 febrero 2012	8	31.8
13	20 febrero 2012	9	31.8
14	29 febrero 2012	9	31.8
		8.8	390.6

El régimen de riego calculado fue comparado con el aplicado al cultivo con el objetivo de comprobar la efectividad del mismo y el ajuste de los intervalos y normas de riego a las exigencias de la papa atendiendo a las condiciones en las cuales creció y se desarrolló

Para realizar esa comparación tomamos el registro que llevan los operadores de la aplicación del riego durante todo el ciclo vegetativo de la papa desde el mine aplicado para realizar la plantación hasta la cosecha el cual fue resumido en la siguiente tabla. En esta planificación asumen una eficiencia de la aplicación del

80 % con la que se determinó la norma parcial bruta necesaria que asegure la norma parcial neta requerida.

Tabla 9: Régimen de riego aplicado al cultivo de la papa en el I cuadrante de la máquina Western 16 de la granja 7.

Mes	Día	Cuadrante	Regulación	Área	Riegos	mb	mn	IR
			%	ha		m ³ .ha-1	m ³ .ha-1	días
1. Noviembre	1	2	20	13,5	1	318	254	
2. Noviembre	9	2	30	13,5	1	212	169	8
3. Noviembre	16	2	30	13,5	1	212	169	7
4. Noviembre	22	2	30	13,5	1	212	169	6
5. Noviembre	23	2	30	13,5	1	212	169	1
6. Noviembre	27	2 (1/2)	30	6.75	1	212	169	4
7. Noviembre	28	2 (1/2)	30	6.75	1	212	169	5
8. Diciembre	3	2	20	13,5	1	318	254	6 y 5
9. Diciembre	7	2	20	13,5	1	318	254	4
10. Diciembre	11	2	30	13,5	1	212	169	4
11. Diciembre	15	2 (1/2)	20	6.75	1	318	254	4
12. Diciembre	16	2 (1/2)	20	6.75	1	318	254	5
13. Diciembre	20	2	20	13,5	1	318	254	4
14. Diciembre	23	2	20	13,5	1	318	254	3
15. Diciembre	27	2	20	13,5	1	318	254	4
16. Diciembre	31	2	20	13,5	1	318	254	4
17. Enero	4	2	20	13,5	1	318	254	4
18. Enero	8	2	20	13,5	1	318	254	4
19. Enero	16	2	20	13,5	1	318	254	8

20. Enero	28	2	60	13,5	1	106	85	12
21. Febrero	18	2	20	13,5	1	318	254	19
TOTALES				13,5	19	5194	4485	
Promedio						273.36	236.05	6.01

Con este régimen de riego aplicado el cultivo recibió 21 riegos con una lámina neta promedio de $236.05 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (23.6 mm), recibiendo durante todo el ciclo $4\,485 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (448,5 mm). Estos resultados comparados con los obtenidos en el cálculo del régimen de riego demuestran que se aplicó $579 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de agua en exceso al cultivo que equivale a un volumen total de $15\,633 \text{ m}^3$ en las 27 ha destinadas a este cultivo en la máquina objeto de estudio, este exceso implicó que un volumen de agua no requerido fue extraído del manto freático, succionado por una bomba accionada por un motor eléctrico con considerable consumo innecesario de esta energía, con un gasto adicional por concepto de salario y uso del equipo y todo esto en su conjunto encarecen aún más esta labor y hacen un uso irracional del recurso agua. El volumen de agua recibido por el cultivo que se obtiene de la suma de del volumen aplicado (448,5 mm) y del incorporado por concepto de lluvia (44,5 mm) fue de 493,0 mm, el que difiere sustancialmente con los 455 mm que, según Klassen et al. (2001), requiere la papa.

Se realizó un número de riegos mayor de lo requerido, pues según lo calculado sólo se realizarían 14 aplicaciones sin embargo se realizaron 21, lo que implicó un mayor número de pases (7) de la máquina por el campo con el consiguiente efecto sobre la compactación del suelo.

En la Empresa existe la tendencia a la disminución de las láminas de agua aplicadas a expensas de un aumento del número de riegos para evitar posibles afectaciones por atascamiento de la máquina o por una rotura previa a un riego con el contenido de humedad cercano al límite productivo. Con esta decisión se trata de mantener la humedad del suelo muy cercano a la capacidad de campo. Es por eso que el régimen de trabajo de la máquina es intenso regándose todos los

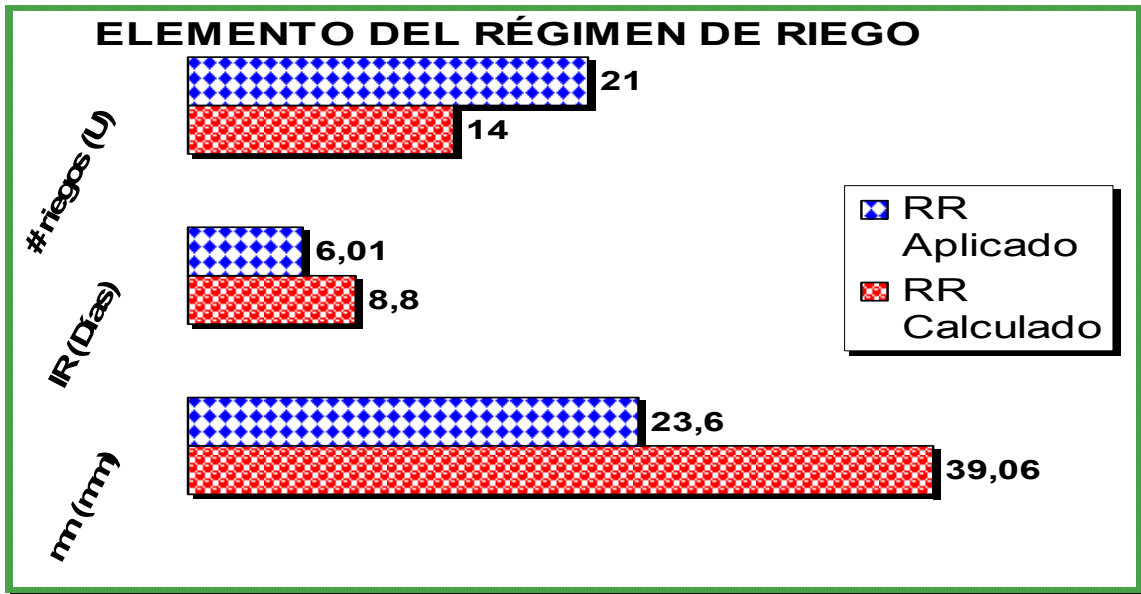
días. No obstante la lámina total aplicada no se corresponde con la exigida por el cultivo y se dieron riegos innecesarios que encarecen la labor además de hacer un uso irracional del agua.

La norma o lámina bruta aplicada consideró una eficiencia única del 80 %, asumiendo un valor de pérdidas de agua por evaporación y arrastre por el viento del 20 %, valor este que difiere con lo planteado por Tarjuelo (2005), quien considera que en condiciones normales las pérdidas por evaporación y arrastre varían entre el 5 y el 10% y que dependen principalmente de la humedad del aire, la temperatura del mismo y del agua, el tamaño de las gotas y de la velocidad del viento.

El intervalo de riego promedio fue de 6,01 días, afectado este elemento por los últimos dos riegos aplicados que teniendo en cuenta la fase del cultivo y la ocurrencia de algunas lluvias hicieron que se extendiera el intervalo, pero si se observa la tabla se puede precisar que generalmente se regaba cada 4 ó 5 días, período este que no siempre permitía que el agua aplicada fuera consumida por que en varias ocasiones el riego aplicado excedía la demanda para llevar la humedad del suelo hasta la capacidad de campo llevando entonces un exceso de humedad.

Esta comparación entre ambos regímenes de riego se resume en tres de los elementos principales que lo componen y que se ilustran en el siguiente gráfico:

Figura 4: comparación entre el régimen de riego calculado y el aplicado

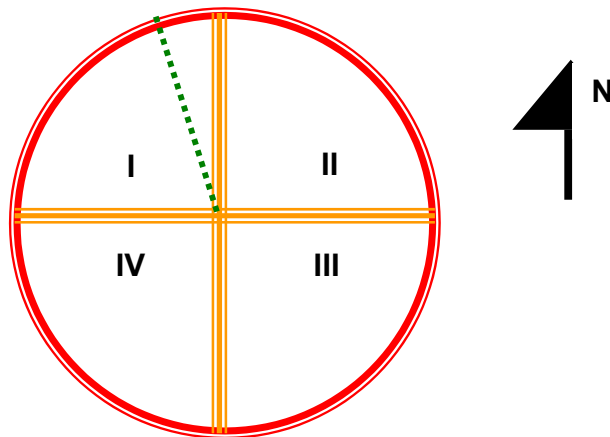


4.3. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REAL DE LA MÁQUINA DE PIVOTE CENTRAL # 16 WESTERN

Las evaluaciones pluviométricas se realizaron por el método de (Heermann y Hein, 1968), en un solo eje, en horas tempranas de la mañana con una red pluviométrica estacionadas en línea recta cada 5 metros.

Los pluviómetros fueron colocados cuidadosamente, asegurando que quedarán bien asentados, en posición vertical y a la distancia correcta, incluso aquellos que al final de cada tramo quedaban próximos a la torre. La ubicación de los pluviómetros siguió una línea recta para evitar variabilidad en los factores que influyen en la uniformidad. Las tres mediciones fueron realizadas en el cuadrante I y en la misma dirección como ilustra la figura 1

Figura 5: División por cuadrantes de la máquina de pivote central y línea en la cual se colocaron los pluviómetros



Una vez que concluyó el paso de la máquina por el eje donde estaban colocados los pluviómetros se procedió a cuantificar la lámina de agua recogida por cada uno de ellos comenzando por el pluviómetro más cercano al pivote y que se identificó con el número 1, hasta el último identificado con el número 81 situado al final de la máquina, registrando los datos en un modelo habilitado al efecto. Para la medición se utilizó una probeta graduada de 500 mL.

Los datos pluviométricos se procesaron por el paquete Pluviopivot Versión 3.0 para el cálculo de los coeficiente de uniformidad en máquinas eléctricas de pivote (Pacheco, 2004).

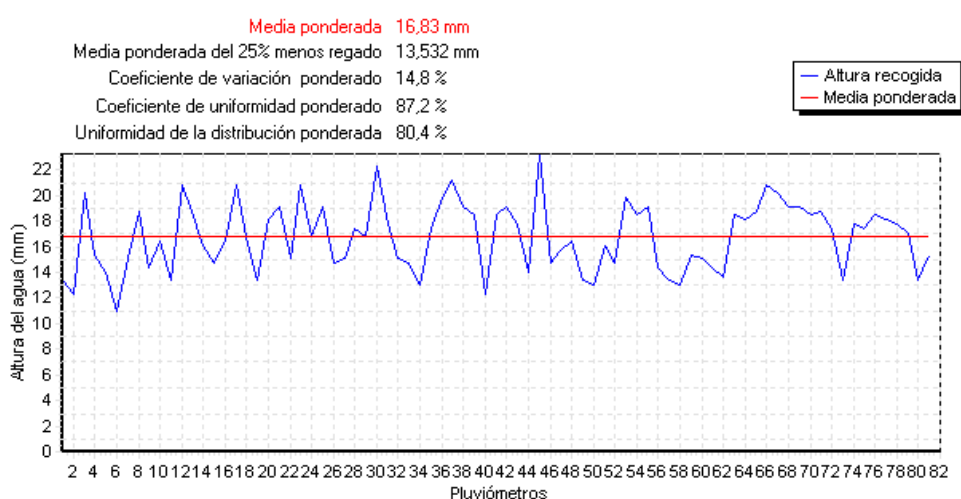
La primera medición fue realizada nueve de noviembre cuando el cultivo se encontraba en la fase de brotación, se aplicó una norma de riego de $169 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ por lo que según la carta de riego para esta norma corresponde una regulación del 30 %. El trabajo se inició a las 7:30 a.m. donde predominaba la brisa leve de $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ que soplaba del Este - Sudeste.

Después de procesado los datos con el software se pudo constatar que la máquina cumple con las características establecidas en su catálogo en lo referente a la pluviometría al lograr una media ponderada de 16,83 mm muy cercana a los 16,9 mm que debía entregar para una regulación del 30 %. El coeficiente de uniformidad fue de 87,2 %, por lo que se considera como buena teniendo en cuenta el criterio de (Montero *et al.* 2005), quienes consideran que

una parcela está bien regada cuando se consigue un coeficiente de uniformidad entre el 85 % y 90 %.

La representación gráfica obtenida al procesar la medición pluviométrica puede observarse en la figura dos, donde puede verse también el comportamiento de las láminas de agua recogidas en relación con la distancia a que se encuentra cada pluviómetro desde el pivote de la máquina. En general la baja velocidad del viento favoreció el riego uniforme, no obstante se observan variaciones en las láminas de agua recogidas

Figura 6: Primera evaluación pluviométrica realizada a la máquina Western 16



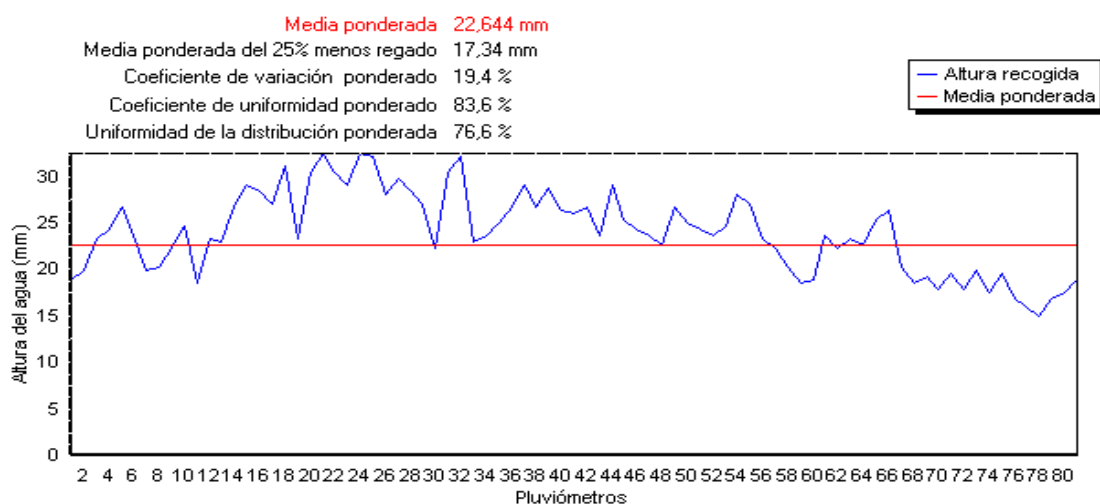
La segunda medición se realizó el 20 de diciembre cuando la máquina debía aplicar una lámina de 25,4 mm en el primer cuadrante, para ello el regulador del temporizador fue puesto al 20 %. El día se caracterizó por ser soleado y con un viento ligero de $6,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ que provenía del Este Sudeste

Los resultados obtenidos y procesados con el software demostraron la influencia del viento en la uniformidad del riego al encontrarse que la media ponderada fue de 22,6 mm lo que representa un déficit en la aplicación de 2,8 mm equivalente a $28 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$. el 25 % menos regado del área presenta una media ponderada de 17,34 mm, es decir 8,06 mm menos que lo que debía recibir lo que no es compensado con los movimientos del agua en el suelo al concentrarse mayormente en el tramo final de la máquina.

El coeficiente de uniformidad ponderado permite evaluar esta zona como que no fue bien regada al no estar por encima del 85 %, criterio considerado para que el área sea evaluada como bien regada (Montero *et al.*, 2005).

La representación gráfica de estos elementos y de los volúmenes de agua recogidos por cada pluviómetros pueden verse en la gráfica 7, donde se aprecia como en el segundo y tercer tramo de la máquina reportaron los mayores volúmenes, mientras en los pluviómetros colocados en los últimos tramos registraron los valores más bajos que influyeron de manera decisiva en la evaluación general de la máquina. Es precisamente el viento y su dirección el elemento clave identificado como responsable de estos problemas en esta aplicación del riego

Figura 7: Segunda evaluación pluviométrica realizada a la máquina Western 16



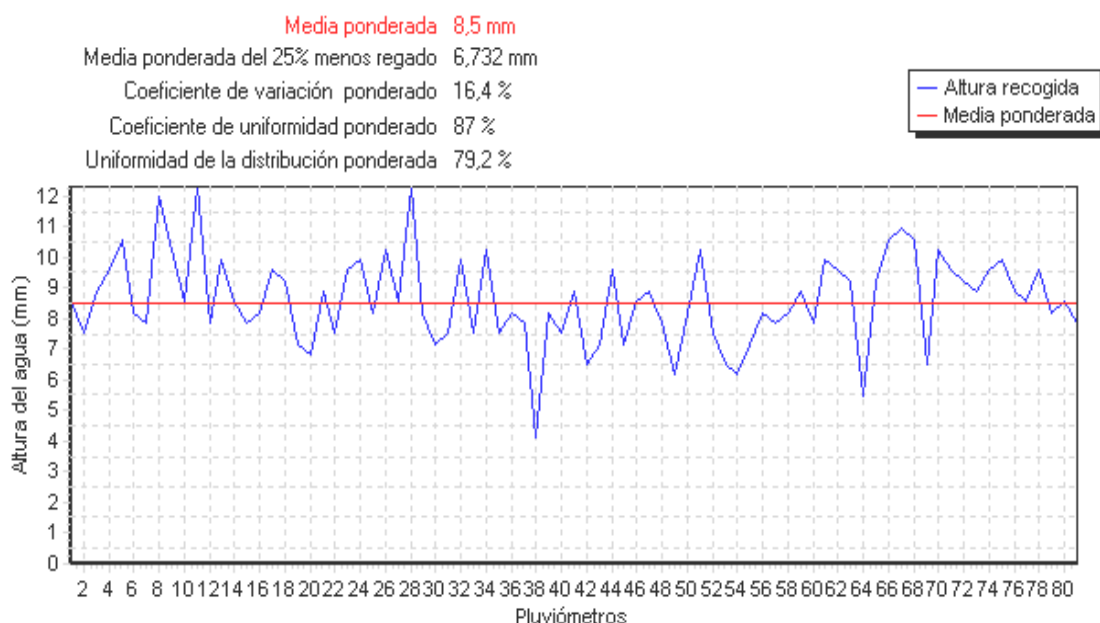
La tercera evaluación se realizó el 28 de enero, correspondiendo con la etapa de maduración del cultivo donde disminuyen las exigencias hídricas del cultivo por lo que las láminas de agua a aplicar son menores. De acuerdo con la programación disponible se aplicó una lámina o norma de riego de 8,5 mm para la que corresponde una regulación de la máquina del 60 %, es decir a menor lámina mayor velocidad de giro de la máquina y por consiguiente menos tiempo en cubrir el riego en ese cuadrante.

El día se caracterizó por ser de brisas muy suaves con valores de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ y algo, el primer dato tomado de la estación agroclimática de la ETPP de Yaguaramas y el segundo fue observado en la propia área.

Una vez que se dispuso de los datos pluviométricos de la máquina se procedió a su procesamiento encontrándose en esta medición una correspondencia casi exacta de la lámina media ponderada con la que debía entregarse corroborando lo planteado anteriormente que la máquina posee una correcta distribución de las boquillas en cuanto a su espaciamiento, diámetro y caudal.

La aplicación presentó un coeficiente de uniformidad ponderado de 87,5 % superando el límite mínimo del 85 % para considerarse como área bien regada

Figura 8: Tercera evaluación pluviométrica realizada a la máquina Western 16



Después de realizadas las tres mediciones pluviométricas y procesados los datos se pudo observar que la máquina logra una uniformidad entre 83,6 y 87,2 % como se ilustra en la tabla 10, lo que puede considerarse bueno y superiores a los obtenido por Jiménez (2010), que al evaluar la uniformidad del riego en una máquina de pivote central en la Unidad de Desarrollo Científico y Técnico en Pulido, Alquízar que obtuvo valores entre 64,79 % y 82,33%.

Los resultados también demuestran que la maquina entrega la lamina que señala el cronometro con bastante precisión. Sin embargo, cerca del pivot aplica volúmenes demasiado altos como lo muestran las figuras 7,8 y 9.

La uniformidad de la distribución ponderada tuvo un comportamiento similar al coeficiente de uniformidad con valores altos entre 76,6 y 80,4 %, siendo la segunda medición la más baja donde la máquina se vio afectada por un viento cuya velocidad superó al las otras dos estando en $6,4 \text{ m.s}^{-1}$

Tabla 10: Resultado de las tres evaluaciones realizadas a la Máquina Western # 16

Parámetros	U.M	1	2	3
Regulación de la máquina	%	30	20	60
Lámina a entregar	mm	16,9	25,4	8,5
Media ponderada	mm	16,83	22,644	8,5
Media ponderada para el 25 % menos regado	mm	13,532	17,34	6,732
Coeficiente de variación ponderado	%	14,8	19,4	16,4
Coeficiente de uniformidad ponderado	%	87,2	83,6	87
Uniformidad de la distribución ponderada	%	80,4	76,6	79,2

CONCLUSIONES

1. La evaluación del comportamiento real de los principales indicadores de trabajo de la máquina de pivote central # 16 permite explotarla adecuadamente en función de las exigencias de los cultivos, las características del suelo, las condiciones del clima y de los parámetros técnicos de la máquina.
2. La máquina Western # 16 se encuentra en los parámetros técnicos establecidos por el fabricante lo que le permite ajustarse a las características del suelo y a las exigencias del cultivo.
3. El régimen de riego aplicado, que se determinó empíricamente, no tuvo en cuenta la dinámica de la humedad del suelo lo que implicó una aplicación de 7 riegos innecesarios y volumen adicional de agua de $579 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$
4. La pluviometría de la máquina mostró un coeficiente de uniformidad de 85,9 % y una UD_{25} % del 78,3 %, que permite catalogar al riego como de buena calidad.

RECOMENDACIONES

1. Exponer los resultados de este trabajo ante la dirección de la Empresa Agropecuaria Horquita para que se apliquen en las campañas siguientes del cultivo de la papa.
2. Generalizar estas evaluaciones para el resto de las máquinas de la Empresa Agropecuaria Horquita, considerando las rotaciones de cultivos de cada una.

BIBLIOGRAFÍA

- Alemán, C.; et al: (2003). Organización: Aspectos clave en la sostenibilidad de los sistemas de riego y la eficiencia del uso del agua. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 12(3), 31-36.
- Alkhorayef Industries. (2005). Center Pivot Standart Owners Manual. WESTERN IRRIGATION SYSTEMS.
- Cisneros, E. (2005). Resultados preliminares de la implementación del servicio de asesoramiento al regante en una empresa piloto de la provincia La Habana. *Congreso Internacional CUBARIEGO*.
- Cisneros, E.; et al: (2011). Consideraciones sobre el servicio de asesoramiento al regante para las condiciones de Cuba. *SCIELO. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(3), 10.
- Clemmens, A.J., Solomon, K.H.: (1995). Procedures for combining distribution uniformity components. *Water resources Engineering*, ASCE, 2.
- Desarrollo de coeficientes de uniformidad ponderados con la superficie en evaluaciones de riego de ramales autotransportados giratorios (pivotes). (1990). *Investigación Agr.: Producción y Protección Veg.*, 5(1), 103-113.
- Dillehay, T.D.; et. al.: (2005). "Pre-ceramic irrigation canals in the Peruvian Andes". Proceedings of the National Academy of Sciences. Retrieved from <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?tool=pmcentrez&artid=1>.
- Domínguez, G.M.; et. al.: (1998). Máquina de riego por aspersión de pivote central hidráulica de baja presión con colgantes. *Revistas Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 7(1), 56-58.
- FAO. (2002a). *Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030*. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/004/y3557s/y3557s00.htm#TopOfPage>.
- FAO. (2002b). *El agua frente a la seguridad alimentaria*. Día Mundial de la Alimentación. Retrieved from <http://www.fao.org>.

- García, R.J.; et. al.: (1996). *El Riego* (Primera.). Pueblo y Educación.
- González, P. (2005). Manual para el diseño y operación de maquina de pivote central. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 11(1), 47-53.
- González, P., Navarro. R. (1999). Programa de computación "Pivot" para el cálculo de la distribución de boquillas y aspersores en las máquinas de pivote central. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 8(2), 33-35.
- Heermann, D.F.; Hein P .R.: (1968). Performance characteristics of self-propelled center pivot sprinkler irrigation systems. *Trans of the ASAE*, 11(1). Retrieved from USA.
- Hernández, A.; et. al.: (1999). Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba, *AGRINFOR. La Habana*, 18.
- Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. (2007). 5to Curso Nacional de Inspección Estatal (Bases Jurídicas). *INRH*. Retrieved from La Habana. Cuba.
- Jiménez, E. R. y Domínguez, M.: (2008). Estudio comparativo del spray Nelson d3000 a diferentes alturas en condiciones aisladas. *Revistas Ciencias Técnicas Agropecuarias. Universidad Agraria de La Habana. Cuba*, 17(3), 5.
- Jiménez, E.R.; et. al.: (2010). Estudio de la uniformidad de riego, en una máquina de pivote central. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(1), 73-78.
- Klassen, G.; et. al.: (2001). Potato Production. Irrigation. [en línea]: Retrieved January 4, 2012, .
- Madramootoo, Ch. A., F. H. (2010). Irrigation in the context of today's global food crisis. *Irrigation and Drainage*, 59, 40-52.
- Merriam, J. L. and J. Keller.: (1978). Farm irrigation systems evaluation. A guide for management. *Utah State University.*, 235.
- Merriam. L., et. al.: (1980). Evaluating irrigation systems and Practices. *ASAE.Michiogan.*, *M.E. Jensen.*, 721-776.
- Montero, J. F.; et. al.: (2005). *Recomendaciones para un adecuado diseño y manejo de los sistemas de riego por aspersión.* (p. 17). Albacete. España: Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla.

- NRGA 709. (1986). Pronóstico del momento de Riego. Detrminación. Método bioclimático. Ministerio de la Agricultura.
- Pacheco, J., et. al.: (2003). Evaluación pluviométrica con ponderación de las áreas en máquinas de riego de pivote central. In *Memorias en CD de la II Conferencia Internacional sobre Desarrollo Agrop. y Sostenibilidad*. Presented at the Simposio de Ing. Agrícola., Univ. Central de las Villas. Retrieved from Santa Clara. Cuba.
- Pacheco, J., et. al.: (2010). Evaluación del manejo del riego de la papa en la Empresa de Cultivos Varios “Valle del Yabú”. *Nexos*, 23(02), 41-46.
- Pacheco, J.; et. al.: (2006). *Riego y Drenaje* (Segunda.). Félix Varela.
- Pacheco, Y.; pacheco, J.: (2006). Aplicación de software para calcular coeficientes de uniformidad ponderados por superficie en máquinas de riego de pivote central. *Revista Ingeniería de recursos naturales y del ambiente. Universidad de Cali, Colombia*, 1(2), 12-15.
- Pérez, J. R.: (1998). *Un Manual de Práctica Laboral de riego y drenaje para estudiantes de 4to año de Agronomía*. Tesis presentada en opción al Título de M.Sc. en Riego y Drenaje., ISCAH. La Habana. Cuba.
- Tarjuelo, J.M.: (1999). *El Riego por Aspersión y su Tecnología*. Mundi- Prensa. Madrid.
- Tarjuelo, J.M.: (2005). *El riego por aspersión y su tecnología* (Tercera.). Madrid. España: Mundi- Prensa.
- WESTERN IRRIGATION SYSTEMS. (2005). *Center Pivot Standart Owners Manual*. Alkhoray Industries, USA.