

Evaluación de la eficiencia en riego por aspersión fijo en el Distrito de Riego 019 de Tehuantepec

Marina Cano-Paez¹

Jorge Flores-Velázquez^{1,§}

Héctor Flores-Magdaleno¹

Agustín Ruiz-García²

Roberto Asencio-Hernández¹

1 Colegio de Postgraduados - Campus Montecillo, Carretera México - Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. 595 9520200 México

2 Departamento de Irrigación - Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. México

§Autor para correspondencia: jorgelv@colpos.mx.

Resumen

La velocidad del viento es una variable climática que condiciona la eficiencia de riego en sistemas por aspersión. Su medición y monitoreo es escaso en las estaciones meteorológicas de México. El objetivo de este trabajo fue estimar la velocidad de viento a nivel del cultivo (1-3 m) con base a datos de viento de sensores del Atlas Eólico Mexicano, para evaluar la eficiencia del sistema de riego por aspersión de alta presión en el módulo 6 La Ventosa, del DR 019 Tehuantepec, Oaxaca, México. El trabajo se desarrolló en 2004, se utilizaron bases de datos de la estación anemométrica del Centro Regional de Tecnología Eólica y se utilizó un modelo aditivo generalizado para definir su perfil y determinar los patrones del viento. Se evaluó experimentalmente un sistema de riego en condiciones de operación del lugar, de acuerdo con la normativa. Los resultados indican que la varianza de la rapidez dificulta obtener un valor medio de velocidad de viento. Durante el período de la canícula se observó un aumento significativo de la magnitud de velocidad de viento (por arriba de los 9 m s^{-1}). Bajo las condiciones evaluadas la eficiencia de riego en el sistema de aspersión de alta presión fijo es de 60%, lo cual está dentro del promedio. La velocidad del viento es el núcleo en la estimación de la eficiencia del riego por aspersión, una mejor evaluación requiere medidas experimentales directas en la zona de cultivo. La estimación de velocidades y direcciones del viento aporta información para el diseño del sistema de riego y su operación, con el fin de incrementar la eficiencia.

Palabras clave:

perfil logarítmico, rapidez del viento, uniformidad de distribución de riego, uso eficiente del agua.



License (open-access): Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia **Creative Commons**

Introducción

Con el fin de reducir el consumo de agua en el sector agrícola, acciones como la búsqueda de dispositivos de aforo para entrega volumétrica de agua y el incremento en eficiencia del agua de riego son temas de una agenda actual en política de agua. El agua para riego constituye el 70% de las extracciones de agua, y contribuye el 40% de alimentos a nivel mundial, por lo que la inversión en tecnologías de riego pretende incrementar la eficiencia en la aplicación y con ello contribuir en mantener rendimientos con el menor uso de recursos, en este caso agua (Grafton *et al.* , 2018).

El incremento en la eficiencia de los sistemas de riego es un logro en la tecnificación del riego, con ello se maximiza la uniformidad en la distribución del agua a las plantas en espacio y tiempo (Bjorneberg *et al.* , 2020 ; Salvatierra-Bellido *et al.* , 2018). El riego por aspersión se considera apto en cultivos de grano (Abd El-Wahed *et al.* , 2016). La desventaja más importante del riego por aspersión con respecto del riego por goteo es la uniformidad de aplicación como función de las condiciones de viento y la manera de determinarla (Salvatierra-Bellido *et al.* , 2018).

Los parámetros a considerar para la evaluación del sistema de riego por aspersión principalmente son velocidad de descarga, radio de mojado, patrón de distribución, velocidad de aplicación y tamaño de gotas, las cuales están condicionadas por la velocidad del viento, por lo cual se hacen recomendaciones de tipo de suelo, cultivo y condiciones de operación (Saccon, 2018). La eficiencia de la aplicación está en función del tipo de sistema, así los rangos para sistemas por aspersión pueden variar de entre 60 y 80% (Stambouli *et al.* , 2013).

La uniformidad superpuesta y distribución del tamaño de gotas es generalmente usada para evaluar, clasificar y mejorar la eficiencia de los sistemas de riego por aspersión (Zhu *et al.* , 2021). La uniformidad de riego y las pérdidas de arrastre por viento y evaporación son las variables críticas en la operación de sistemas de riego por aspersión (Yacoubi *et al.* , 2012). Uniformidades de distribución de 50% reducen todos los parámetros de bioproducción en cultivos (Contreras *et al.* , 2020).

El factor climático de mayor relevancia en el patrón de distribución del agua en riego por aspersión es el viento, debiéndose considerar su velocidad, dirección y persistencia para su diseño y operación (Cisneros-Zayas *et al.* , 2019) lo que implica la uniformidad de distribución de agua (Merriam y Keller, 1978; Dechmi *et al.* , 2003). El inconveniente de ese factor es que no existe información fidedigna y distribuida de los valores de rapidez en la zona de cultivo por lo que en la mayoría de los casos se recurre a métodos de interpolación estadística para su uso en la evaluación.

En México existe dispersión y falta de datos continuos de viento que limitan la utilización de modelos de predicción numéricos climáticos y atmosféricos (Thomas *et al.* , 2021). Investigaciones como las de Morales-Ruvalcaba *et al.* (2020); Thomas *et al.* (2021) utilizan herramientas como ERA-5 reanálisis climático de quinta generación del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), producido por el servicio de cambio climático de Copernicus (C3S (datos de 2005 al 2007 a 80 m de altura cada 10 min), el análisis retrospectivo de la era moderna para investigación y aplicaciones, Versión 2 MERRA-2 (datos de 2004 al 2008 de 10 a 80 msnm a cada 10 min) y estaciones de las 2012 puestas por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo de Finanzas Ambientales Globales (UNDP-GEF) y el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.

Entre las alternativas numéricas para el análisis de la velocidad del viento, es el uso del modelo lineal generalizado mixto. Los modelos mixtos se utilizan cuando de una unidad muestral se generan varios registros en la base de datos (Correa-Morales y Salazar-Urbe, 2016). Situaciones básicas que producen estructuras de bases de datos agrupados en procesos aleatorios jerárquicos que implica, submuestreo, splitting y selección aleatoria de tratamientos o bloques, y el uso de datos longitudinales, que a su vez implica una variación en el tiempo, espacio o ambos.

Los efectos fijos, se considera que son determinados por sí mismo y no representan a efectos externos (Correa-Morales y Salazar-Urbe, 2016). El modelo de dos etapas es una técnica para describir datos con estadísticos básicos de resumen (Correa-Morales y Salazar-Urbe, 2016). La etapa 1 ajusta un modelo para cada dato por separado. La etapa 2 explica la variabilidad en los coeficientes de regresión, usando efectos fijos.

En el Distrito de Riego 019, Tehuantepec, Oaxaca, México: CONAGUA implementó del 2018 en adelante un programa de tecnificación de riego, mediante el programa de apoyo a la infraestructura hidroagrícola (CONAGUA, 2020); se instalaron sistemas de riego presurizados en sus módulos: incluyendo el módulo 6 'La Ventosa. En la región conocida como La Ventosa, Oaxaca ocurre un fenómeno de vientos canalizados llamado 'Paso de Chivela', la topografía particular del Istmo de Tehuantepec hace que en el Paso de Chivela se concentren velocidades de viento muy fuertes (Wang *et al* ., 2018).

Estas velocidades de viento altas son conocidas en México como 'vientos del norte o tehuanos (Morales-Ruvalcaba *et al* ., 2020). El objetivo de este trabajo fue estimar la velocidad del viento al nivel de cultivo de maíz y evaluar su efecto en las variables de eficiencia del riego por aspersión, principalmente en la distribución, en condiciones de producción en el Distrito de Riego 019, Tehuantepec.

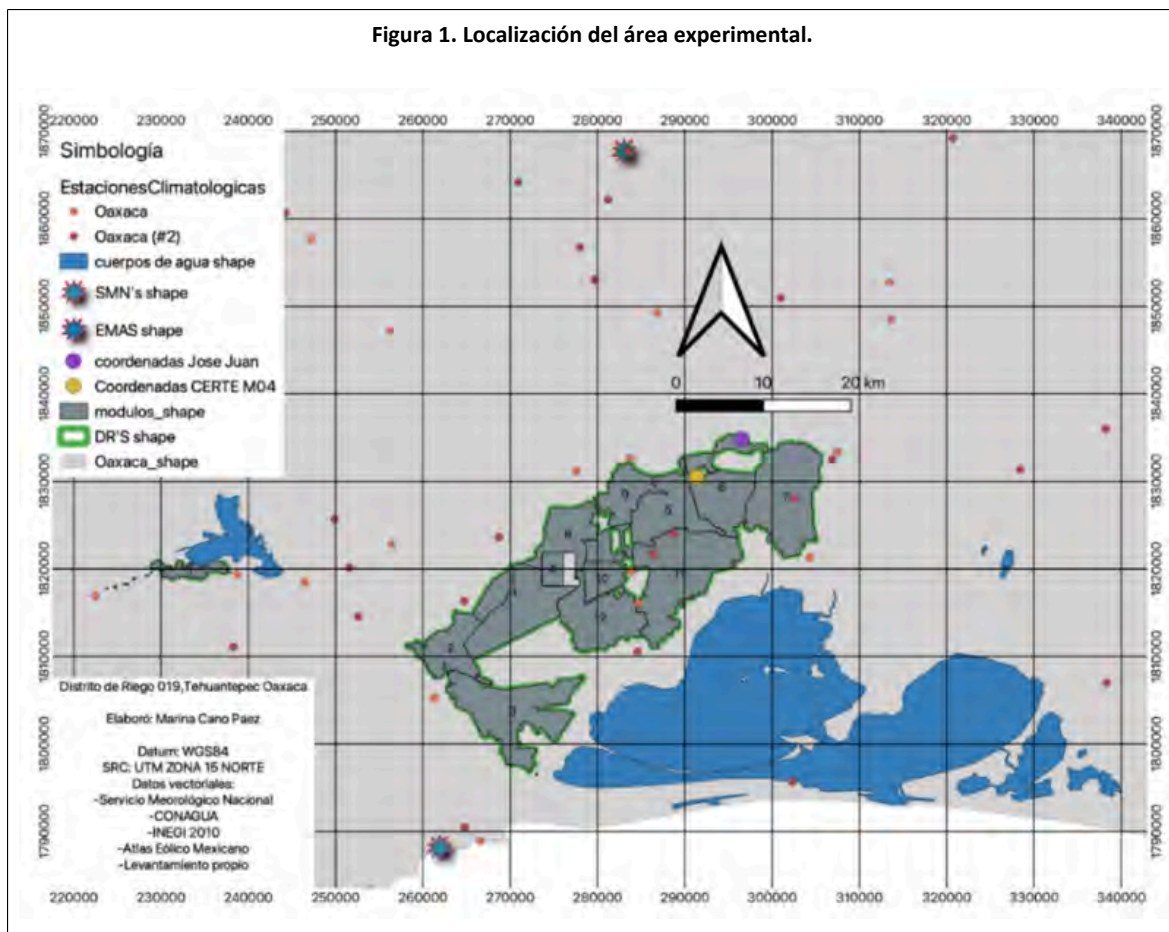
Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

El Distrito de Riego 019, Tehuantepec, Oaxaca, tiene una superficie de 20 242 ha, se ubica en la parte sur del Istmo de Tehuantepec, México (Figura 1), abarca los municipios de Santa María Mixtequilla, Santo Domingo Tehuantepec, Villa de San Blas Atempa, San Pedro Huilotepec, San Pedro Comitancillo, Asunción Ixtaltepec, El Espinal, Juchitán de Zaragoza y Unión Hidalgo, entre las coordenadas 16° 14' y 16° 34' latitud norte; 94° 50' y 95° 32' longitud oeste. Está formado por 12 módulos de riego y un Urderal.



Figura 1. Localización del área experimental.



Las pruebas se llevaron a cabo en una parcela del módulo 6, La Ventosa en el municipio de Juchitán, con las coordenadas $16^{\circ} 34' 46.26''$ latitud norte y $94^{\circ} 52' 2.98''$ longitud oeste. La región es caracterizada por su clima tropical, cálido subhúmedo próximo a seco con régimen de lluvias de verano y temperatura media anual de 27°C . Su precipitación media anual es de 835 mm y evaporación media anual de 1 834.05 mm. Hay presencia de los vientos tehuanos o vientos del norte este módulo. Las pruebas de campo se diseñaron de acuerdo con las prácticas locales de aspersión: rango de presión de operación en el cabezal y el espaciamiento entre aspersores locales de la parcela.

Análisis estadístico de viento

Análisis estadístico de viento. Los modelos estadísticos empleados en este trabajo fueron los GAM (ecuación 2.1 3) de dos etapas (Correa-Morales y Salazar-Urbe, 201 6), el análisis del viento consistió en predecir el comportamiento del viento a partir de datos de tiempo, los GAM en este estudio son series temporales de la variable viento: su comportamiento fue analizado para lecturas cada 10 min, horario, diurno, semanal, mensual y anual.

En la primera etapa se ajustó cada lectura por separado de acuerdo con el perfil logarítmico para obtener la velocidad del viento a la altura de 0.5, 1 y 1.5 m, de la base de datos del AEM, estación M4 CERTE. Se seleccionaron las lecturas medidas por la torre A de la altura de 80 m para realizar la regresión logarítmica y las velocidades de viento correspondientes a 60, 40 y 20 m, tomando una quinta altura 0 m, donde la velocidad del viento se consideró cero.

La variable respuesta fueron la velocidad y dirección del viento, y la variable predictiva usada fue la fecha, hora y minuto. La predicción se realizó con los resultados del análisis de datos agrupados por promedio, máximos y mínimos diario, la velocidad de viento se declaró serie de tiempo en el

software R y su modelo asumió una distribución gaussiana o normal de los errores, finalmente las funciones suavizadoras 's' aseguraron el análisis de comportamiento anual, mensual y diario. R es un lenguaje para el análisis estadístico y gráfico. Se trata de un ambiente de programación formado por un conjunto de herramientas muy flexibles, que pueden ampliarse fácilmente mediante paquetes, librerías o funciones propias.

Además, es gratuito y de código abierto (open source), parte del proyecto GNU, como Linux o Mozilla Firefox. Se obtuvo la base datos de medición de viento de la región: M04 Certe, del Atlas Eólico Mexicano (Miranda y Saldaña, 2019) localizada en el municipio de Juchitán a 7 km de la parcela experimental. Se utilizaron las paqueterías: Pandas, Numpy, Datetime, Matplotlib y Windrose en el software Python para su análisis estadístico (Harris *et al.* , 2020 ; Quick *et al.* , 2020 ; Reback *et al.* , 2020 ; Caswell *et al.* , 2021), se utilizaron las mediciones del año 2018.

Muestreo para la evaluación del sistema de riego

Muestreo para la evaluación del sistema de riego. En junio del 2020, se tomó una muestra aleatoria irrestricta de cinco sistemas de riego distribuidos en los módulos: número 3, San Blas Atempa, número 5: El Espinal y número 6: La Ventosa, se registraron las siguientes cualidades: altura, diámetro y material de la tubería elevadora porta aspersores, tipo de aspersor utilizado.

Se utilizaron las fórmulas de muestreo con proporciones para estimar las cualidades de la mayoría de los sistemas de riego por aspersión instalados dentro del distrito. Se llamó : a la cualidad observada en los cinco sistemas de riego: altura, diámetro y material de tubería elevadora, y tipo de aspersor. Se llamo a la cualidad observada en los cinco sistemas de riego distinta de las cualidades mencionadas en el párrafo anterior.

La ecuación 1 muestra la fórmula de la varianza estimada de la cualidad

$$\text{Var}(p) = \frac{pq}{n} \frac{N-n}{N}$$

1), la fórmula 2 infiere la cota de error de la estimación con la muestra

$$B = 2\text{Var}$$

2) y la ecuación 3 permite estimar el intervalo de confianza de la estimación de la muestra

$$\text{IC}: [p - B, p + B]$$

3). Donde: n es el tamaño de la muestra de sistemas de riego por aspersión; N= es el tamaño de la población de sistemas de riego por aspersión existentes en el distrito de riego; B= es el límite del error; e IC= el intervalo de confianza Cálculo de la uniformidad de riego. La evaluación de la uniformidad de riego se realizó en suelo sin cultivo, se eligió una sección media, de acuerdo con la metodología de evaluación de riego por aspersión (Merriam y Keller, 1978). Se estableció una cuadrícula de vasos pluviométricos separados a 3 m de distancia, de acuerdo con las normas internacionales (ISO 7749-2, 1990 ; ISO 15886-3, 2021).

Cálculo de la uniformidad de riego

Los vasos fueron de plástico, con una altura de 120 mm y un diámetro de 95 mm. La separación entre los aspersores fue de 30 m trabajando simultáneamente dos. El tiempo de trabajo de los aspersores fue de 1 h, se midió el volumen recogido por cada vaso con una probeta graduada de 50 ml y la presión de operación de los aspersores con un manómetro de glicerina.

Las variables climatológicas: temperatura (°C), viento (m s^{-1}) y humedad relativa (%) se midieron a cada 15 min durante las pruebas a una distancia de 2 m de la superficie de suelo. El volumen de

agua recogido por cada vaso fue registrado en una base de datos y utilizado para determinar los parámetros de uniformidad de riego. Coeficiente de uniformidad de distribución de Christiansen.

La ecuación 4 es usada para calcular el coeficiente de uniformidad de distribución (CDU) desarrollada por Christiansen (ISO 7749-2, 1990):

$$CDU = 100 * \left(1 - \frac{\sum |h_m - h_i|}{n * h_m} \right)$$

4). Donde: CDU es el coeficiente de uniformidad de distribución; n es el número de lecturas; es la lectura individual de cada colector; es la suma del valor absoluto de las desviaciones estándar del promedio.

Uniformidad de distribución de Merriam y Keller

Uniformidad de distribución de Merriam y Keller. A partir de la ecuación 5, es posible calcular la uniformidad de distribución (Merriam y Keller, 1978):

$$UD = 100 * \frac{V(25\%)}{V_m}$$

5). Donde: V(25%) es el volumen recogido en el cuarto inferior de los volúmenes recogidos; V_m es el volumen medio recogido en el total de la cuadrícula de vasos.

Coeficiente de variación

Coeficiente de variación. El coeficiente de variación (ecuación 6) se calcula como la desviación estándar de todas las mediciones de los vasos recolectores dividida entre el promedio $\bar{d}$ (Abd El-Wahed et al., 2016):

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{d}}$$

6). Donde: es la desviación estándar asociada a las medidas de los vasos colectores.

Análisis estadístico

Análisis estadístico. El diseño experimental es un factorial completo 23: siendo los factores el diámetro de la boquilla de cada aspersor trabajando (12, 14, 16, 18, 20 y 22 mm), con tres niveles para cada uno correspondientes a las variables: temperatura, velocidad de viento y humedad relativa. Con las variables respuestas CDU, UD y CV definidas anteriormente. Se realizó una Andeva para hacer su análisis.

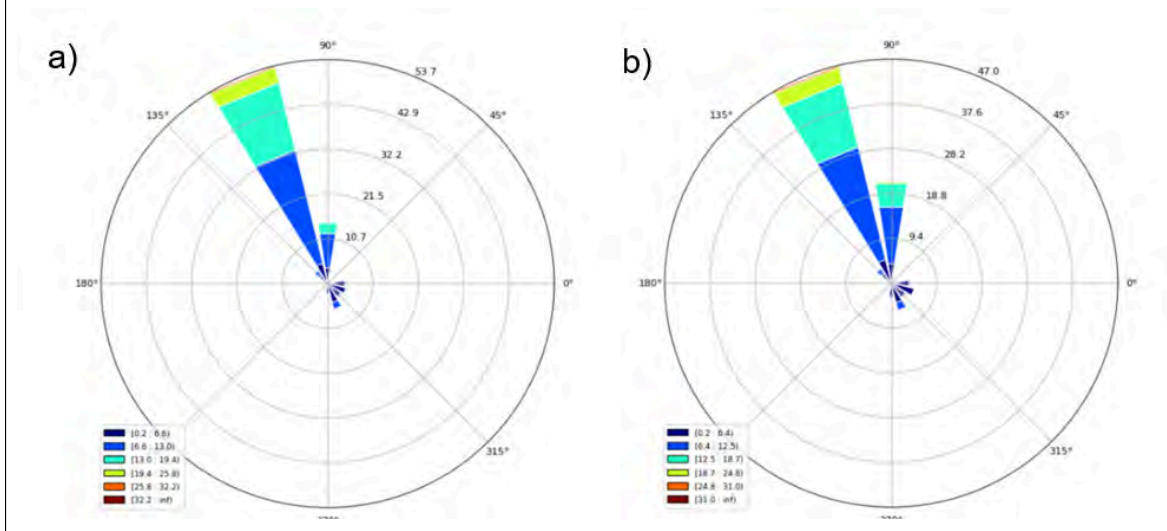
Resultados y discusión

Rosa de vientos de La Ventosa, Juchitán

Los datos de las observaciones de dirección medidas por la estación M04 Certe, Oaxaca corresponden a 78 m y 58 m (Figura 2) de altura, la dirección predominante para el total de lecturas en Juchitán es la de los vientos tehuanos o norteños del nor-noroeste.



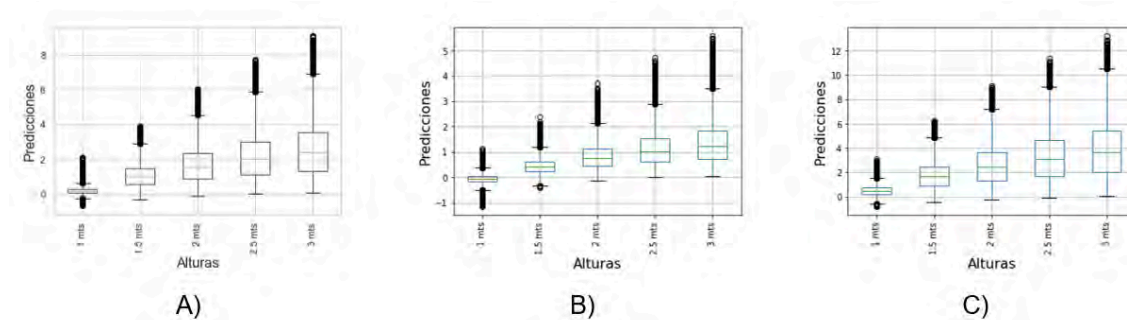
Figura 2. Estimación de la Rosa de los vientos promedio en la zona del cultivo.



El 53% de las velocidades medidas de viento tuvieron dirección NNO, estas velocidades de viento se encuentran entre los 0 y 43 m s^{-1} (Figura 2); de estas, la magnitud del 30% de las velocidades medidas estuvieron en un rango de 0 a 13 m s^{-1} , 15% en un rango de 13 a 19.5 m s^{-1} , un porcentaje menor al 5% corresponde a las velocidades en un rango de 19.5 a 26 m s^{-1} y un porcentaje aún menor a las velocidades máximas registradas, un 10% de las velocidades de 0 a 12 m s^{-1} tienen dirección norte completamente. Porcentajes cercanos al 5% tuvieron direcciones E, ESE, SE, SSE y NO con velocidades menores a 6.6 m s^{-1} .

Las velocidades calculadas dentro de los primeros 10 m de la superficie del suelo con los coeficientes a y b tuvieron distribuciones en las que el rango inter cuartil se amplió conforme se elevó la altura (Figura 3).

Figura 3. A) gráfica de cajas de las velocidades de viento medias estimadas entre 1 y 3 m de altura sobre la superficie terrestre; B) mínimas; y C) máximas.



Con la estimación de las velocidades de viento en la zona del cultivo se procede a la extinción de los parámetros de uniformidad y eficiencia de riego de los sistemas evaluados en campo, atendiendo la metodología de Kelly. Para la uniformidad de riego, el tamaño de la muestra de la población de sistemas de riego por aspersión en el Distrito de Riego 019, 'n' fue de cinco a partir de los cuales se procedió a la estimación de los parámetros para evaluar la uniformidad de este, siguiendo la metodología expuesta en dicha sección.

El Cuadro 1 muestra características físicas de los sistemas evaluados. Cabe señalar que para fines de este trabajo solo se considera la evaluación de la eficiencia del riego, sin considerar la

fuentes de energía para activar dichos sistemas. Lo anterior debido a que se tienen diferentes fuentes de potencia (Cuadro 1); no obstante, se realizó el mismo procedimiento para captar las 'precipitaciones' del aspersor de alta presión sobre la parcela, independientemente del sistema de impulsión y el tipo de cultivo (o ausencia como en caso 1).

Cuadro 1. Muestreo de los sistemas de riego por aspersión

Núm.	Módulo	Cultivo	Bomba	Tipo Cañón	Tubería elevador	Altura del elevador (m)
1	2	Sin cultivo	Solar	Yuzuak Euro Rain Jet 40	PVC 2"	1
2	5	Maíz	Eléctrica-CFE	Yuzuak Euro Rain Jet 40	PVC 2"	1
3	5	Maíz	Eléctrica-CFE	Yuzuak Euro Rain Jet 40	PVC 2"	1
4	5	Maíz	Eléctrica-CFE	Yuzuak Euro Rain Jet 40	PVC 2"	1
5	6	Maíz-pasto	Motor	Yuzuak Euro Rain Jet 40	PVC 2"	1

Se observó que los cinco sistemas de riego cuentan con las mismas cualidades descritas: tubería elevadora de 2 pulgadas, cubierta de concreto hasta el punto anterior a su válvula; el aspersor fue un cañón gigante de la categoría de caudales grandes, dispersión del chorro con turbina de agua (Ge *et al.* , 2020) de la marca Yuzuak, modelo Jet-40.

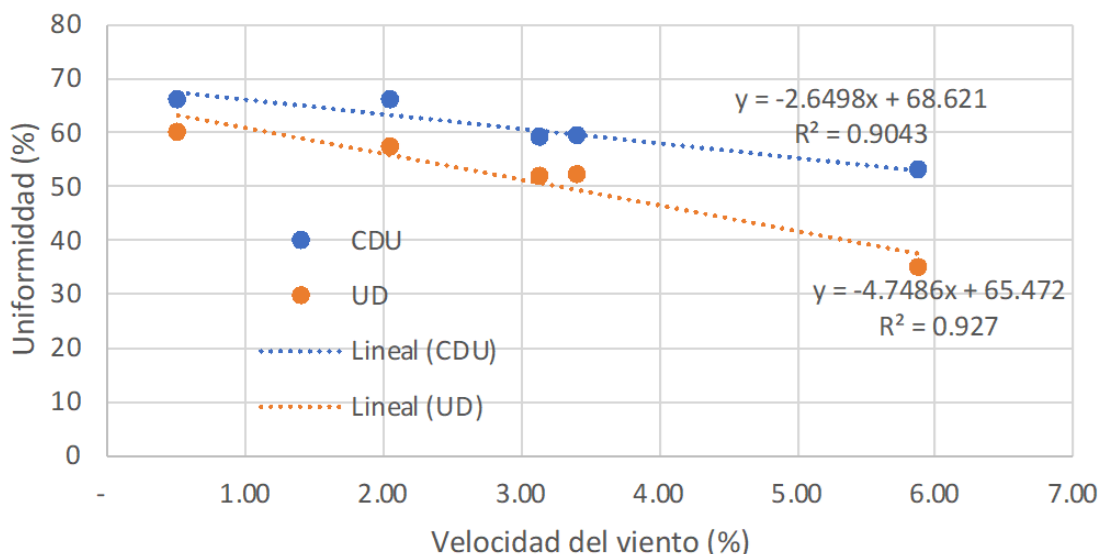
Los resultados de la evaluación de los sistemas de riego se resumen en el Cuadro 2 . Con la parametrización de uniformidad de riego en la modalidad de aspersores de alta presión es posible observar una disminución de esta conforme la velocidad de viento aumenta. Lo cual concuerda con resultados de sistemas de riego cuya forma de dispersión es el viento, o que dependen de esta variable.

Cuadro 2. Resultados de la evaluación del riego, uniformidad y variación del riego.

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m s-1)	CDU (%)	UD (%)	CV
17/06/2021	12:00	31.27	0.51	66	60	0.42
12/03/2022	12:00	33.73	5.88	53	35	0.57
27/06/2022	10:00	32.1	3.4	59	52	0.49
27/06/2022	11:00	30.4	3.14	59	51	0.5
07/07/2022	10:00	32.42	2.04	66	57	0.37

Esquemáticamente la Figura 4 , presenta de manera integrada la relación entre la velocidad del viento y la uniformidad de riego para los sistemas evaluados, que puede ser extrapolado al distrito de riego. La uniformidad de riego del sistema de riego con aspersores Yuzuak, Jet 40 es lineal negativa, independientemente que se encuentre trabajando uno solo o dos al mismo tiempo.

Figura 4. Coeficientes de uniformidad en riego con aspersores de alta presión.



Este resultado es hasta cierto punto lógico, pero ahora se tiene bases para decir que un incremento de velocidad de viento en la operación de los sistemas de riego por aspersión con estas características, la uniformidad disminuye. Incluso en condiciones de viento menores a 2 m s^{-1} provocan uniformidades menores a 70%. Sin embargo, el hecho de que se haya encontrado esta relación lineal no implica que siempre lo sea, Martín-Benito, (2005) encontró relaciones no-lineales entre la uniformidad de riego por aspersión y velocidad de viento. El viento con una velocidad de 2 m s^{-1} cambió el patrón de distribución de agua, provocando concentraciones de agua puntuales.

Una razón por la que el modelo de reparto de agua se observó no uniforme con dos aspersores de alta presión trabajando simultáneamente, es que el sistema de riego muestreado no sigue la norma oficial mexicana (NMX-O-177-SCFI-2011, 2011) en la separación de sus aspersores, de acuerdo con el diámetro de mojado del modelo del aspersor de alta presión y la velocidad de viento estimada a 2 m de altura, este resultado puede ser debido en parte a la falta de medición de datos de viento dentro del DR 019.

Cabe destacar que no se tomó en cuenta la dirección del viento, debido a que no se midió durante las pruebas. El hecho de que no haya traslape con dos aspersores trabajando simultáneamente, se debe a que el radio del alcance de los aspersores con toberas de 18 mm es de 38 m con una presión requerida de 5.88 bar, la cual no se alcanzó en campo, se podría mejorar el rendimiento del sistema de riego mejorando el equipo de suministro de energía a la bomba, esto también mejoraría la aplicación de agua de los aspersores y uniformidad de riego.

Conclusiones

Las velocidades de viento mínimas se presentan en verano en el mes de junio, mientras que las velocidades de viento máximas se presentan en enero. El período de velocidades altas de viento coincide con el período de entrega de agua de parte del distrito de riego a los usuarios por lo que, si es necesario analizar la influencia del viento en los parámetros de distribución de viento y en base a ellos plantear la mejor distribución de aspersores, ya sea actuales o posteriores.

El muestreo realizado de los sistemas de riego por aspersión del DR, se puede considerar piloto, de tal modo que, la inferencia sobre los sistemas de riego por aspersión utilizados en el DR fue representativa en cuanto a características de aspersores, tuberías porta-aspersor y altura de la tubería elevadora de aspersores, pero no representativos en cuanto al tipo de bomba utilizada por los sistemas de riego.

Si se desea profundizar en estudios posteriores sobre los tipos de bombas utilizados en el DR, se recomienda tomar en cuenta los resultados del muestreo realizado en esta investigación, y técnicas de muestreo, para determinar el tamaño de la muestra ideal de sistemas de riego y de esta manera, realizar inferencia más acertada con respecto a los equipos de bombeo utilizados en este tipo de sistemas de riego dentro del DR.

Agradecimientos

Al Dr. Osvaldo Rodríguez Hernández del Instituto de Energías Renovables de la UNAM por la información del Atlas Eólico Mexicano.

Bibliografía

- 1 Abd El-Wahed, M. H.; Medici, M. and Lorenzini, G. 2016. Sprinkler irrigation uniformity: impact on the crop yield and water use efficiency. *Journal of Engineering Thermophysics*, Maik Nauka-Interperiodica Publishing. 25(1):117-125.
- 2 Bjorneberg, D. L.; King, B. A. and Koehn, A. C. 2020. Watershed water balance changes as furrow irrigation are converted to sprinkler irrigation in an arid region. *Journal of Soil and Water Conservation*. 75(3):254-262. <https://doi.org/10.2489/JSWC.75.3.254>.
- 3 Caswell, T. A.; Droettboom, M.; Lee, A.; Andrade, E. S.; Hoffmann, T.; Hunter, J.; Klymak, J.; Firing, E.; Stansby, D.; Varoquaux, N.; Nielsen, J. H.; Root, B.; May, R.; Elson, P.; Seppänen, J. K.; Dale, D.; Lee, J. J.; McDougall, D.; Straw, A.; Hobson, P.; Hannah, Gohlke, C.; Vincent, A. F.; Yu, T. S.; Ma, E.; Silvester, S.; Moad, C.; Kniazhev, N.; Ernest, E.; Ivanov, P. 2021. Matplotlib/matplotlib: REL: v3.5.0. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5706396>.
- 4 Cisneros- Zayas; Venero- Delgado; Placeres- Miranda and González- Robaina. 2019. El viento y su influencia en los parámetros de calidad del riego. *Ingeniería Agrícola*. 9(4):1-25.
- 5 CONAGUA. 2020. Reglas de operación para el programa de apoyo a la infraestructura hidroagrícola, a cargo de la Comisión Nacional Del Agua, aplicables a partir de 2021. <https://www.dof.gob.mx/nota-detalle.php?codigo=5609029&fecha=28/12/2020&print=true>.
- 6 Contreras, J. I.; Baeza, R.; Alonso, F.; Cánovas, G.; Gavilán, P. and Lozano, D. 2020. Effect of distribution uniformity and fertigation volume on the bio-productivity of the greenhouse Zucchini crop. *Water (Switzerland)*. MDPI AG. 12(8):2183-2198. <https://doi.org/10.3390/W12082183>.
- 7 Ge, M.; Wu, P.; Zhu, D. and Zhang, L. 2020. Comparisons of spray characteristics between vertical impact and turbine drive sprinklers -a case study of the 50PYC and HY50 big gun-type sprinklers. *Agricultural Water Management*. Elsevier B. V. 228:105847. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105847>.
- 8 Grafton, R. Q.; Williams, J.; Perry, C. J.; Molle, F.; Ringler, C.; Steduto, P.; Udall, B. 2018. The paradox of irrigation efficiency. *Science, American Association for the Advancement of Science*. 361(6404):748-750.
- 9 Harris, C. R.; Millman, K. J.; Van der Walt, S. J.; Gommers, R.; Virtanen, P.; Cournapeau, D.; Wieser, E.; Taylor, J.; Berg, S.; Smith, N. J.; Kern, R.; Picus, M.; Hoyer, D. S.; Van Kerkwijk, M. H.; Brett, M.; Haldane, A.; Fernández del Río, J.; Wiebe, M.; Peterson, P.; Gérard-Marchant, P.; Sheppard, K.; Reddy, T.; Weckesser, W.; Abbasi, H.; Gohlke, C. and Travis E. Oliphant. 2020. Array programming with NumPy. *Nature*. 585:357-362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.

- 10 ISO 15886-3. 2021. Characterization of distribution and test methods. Matériel Agricole d'irrigation-asperseurs-partie 3: caractérisation de la distribution et méthodes d'essai. Available at: www.iso.org.
- 11 Issaka, Z.; Li, H.; Yue, J.; Tang, P. and Darko, R. O. 2018. Water-smart sprinkler irrigation, prerequisite to climate change adaptation: a review. *Journal of Water and Climate Change*. 9(2):383-398.
- 12 Martín-Benito, J. Ma. 2005. El riego por aspersión y su tecnología. 3ra. Edición. Mundi-Prensa. 581 p.
- 13 Merriam, J. L. and Keller, J. 1978. Farm Irrigation system evaluation: a guide for management. Book Publisher, Utah State University. 271 p. (<https://digitalcommons.usu.edu/cee-facpub/3779/>).
- 14 Miháliková, M. and Dengiz, O. 2019. Towards more effective Irrigation water usage by employing land suitability assessment for various irrigation techniques. *Irrigation and Drainage*, John Wiley and Sons Ltd. 68(4):617-628.
- 15 Miranda, U. and Saldaña, R. 2019. El Atlas Eólico Mexicano, avances, Mexico. <http://aems.ineel.mx/>.
- 16 Morales-Ruvalcaba, C. F.; Rodríguez-Hernández, O.; Martínez-Alvarado, O.; Drew, D. R. and Ramos, E. 2020. Estimating wind speed and capacity factors in Mexico using reanalysis data. *Energy for Sustainable Development*. Elsevier, B. 58:158-166. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.006>.
- 17 NMX-O-177-SCFI-2011, Pub. L. No. MNX-O-SCFI-2011, NMX-O-177-SCFI-2011 33. 2011. <https://dof.gob.mx/nota-etalle.php?codigo=5205216&fecha=18/08/2011#gsc.tab=0>.
- 18 Quick, J.; Ogasawara, I.; Maussion, F.; Bachant, P.; Rodas, M.; McCann, J. 2020. Ppython-windrose/windrose: v1.6.8. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4028419>.
- 19 Reback, J.; McKinney, W.; Bossche, J.; Augspurger, T.; Cloud, P.; Klein, A.; Roeschke, M.; Tratner, J.; She, C.; Ayd, W.; Hawkins, S.; Petersen, T.; Schendel, J.; Hayden, A.; Garcia, M.; Jancauskas, V.; Battiston, P.; Seabold, S.; Hoyer, S.; Overmeire, W.; Mehyar, M.; Whelan, C. and Kluyver, T. 2020. Pandas-dev/pandas: Pandas 1.0.0. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3630805>.
- 20 Saccon, P. 2018. Water for agriculture, irrigation management. *Applied Soil Ecology*. Elsevier B. 123:793-796.
- 21 Salvatierra-Bellido, B.; Montero-Martínez, J. and Pérez-Urrestarazu, L. 2018. Development of an automatic test bench to assess sprinkler irrigation uniformity in different wind conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier B. 151:31-40.
- 22 Stambouli, T.; Martínez-Cob, A.; Faci, J. M.; Howell, T. and Zapata, N. 2013. Sprinkler evaporation losses in alfalfa during solid-set sprinkler irrigation in semiarid areas. *Irrigation Science*. 31(5):1075-1089.
- 23 Wang, M.; Ullrich, P. and Millstein, D. 2018. Datasets on hub-height wind speed comparisons for wind farms in California. *Data in Brief*. Elsevier Inc. 19:214-221.
- 24 Yacoubi, S.; Zayani, K.; Slatni, A. and Playán, E. 2012. Assessing sprinkler irrigation performance using field evaluations at the Medjerda lower Valley of Tunisia. *Engineering. Scientific Research Publishing Inc.* 4(10):682-691.
- 25 Zerihun, D.; Sanchez, C. A., Thorp, K. R. and Hagler, M. J. 2019. Hydraulics of linear-move sprinkler irrigation systems, III: model evaluation. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*. 8(2):237-248.
- 26 Zhu, X.; Lewballah, J.; Fordjour, A.; Jiang, X.; Liu, J.; Ofosu, S. and Dwomoh, F. 2021. Modelling of water drop movement and distribution in no wind and windy conditions for different nozzle sizes. *Water*. 13(21):3006-3018.

Evaluación de la eficiencia en riego por aspersión fijo en el Distrito de Riego 019 de Tehuantepec

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
ISSN (electronic): 2007-9230
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (México)

Article/Issue Information
Date received: 01 May 2026
Date accepted: 01 July 2026
Publication date: 01 August 2026
Electronic Location Identifier: e4128
DOI: 10.29312/remexca.v17i5.4128

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

perfil logarítmico
rapidez del viento
uniformidad de distribución de riego
uso eficiente del agua

Counts

Figures: 4

Tables: 2

Equations: 6

References: 26