

**Universidad Autónoma de Sinaloa**  
Colegio en Ciencias Agropecuarias  
**Maestría en Ciencias Agropecuarias**



**TESIS**

**DESEMPEÑO DE ASPERSORES EN RIEGO POR  
ASPERSIÓN FIJA, APOYADO CON PROGRAMACIÓN  
INTEGRAL EN PAPA**

**Que para obtener el grado de Maestro en  
Ciencias Agropecuarias**

**PRESENTA:**

**Jesús Alejandro Beltrán Félix**

**DIRECTORES DE TESIS:**

Dra. Blanca Elvira López Valenzuela

Dr. Ernesto Sifuentes Ibarra

**ASESORES:**

Dra. Jesús del Rosario Ruelas Islas

Dr. Quintín Armando Ayala Armenta

Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México. Junio de 2023.



Dirección General de Bibliotecas  
Ciudad Universitaria  
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios  
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.  
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57  
dgbuas@uas.edu.mx

## UAS-Dirección General de Bibliotecas

### Repositorio Institucional Buelna

#### Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial  
Compartir Igual, 4.0 Internacional



## **AGRADECIMIENTOS**

**Agradezco a Dios** por darme una gran familia que me ha apoyado en está de estudio e investigación.

**Agradezco al Dr. Ernesto Sifuentes Ibarra y a la Dra. Blanca Elvira López Valenzuela**, sin ustedes y sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado tan fácil. Sus consejos fueron siempre útiles cuando no salían de mi pensamiento las ideas para escribir lo que hoy he logrado. Ustedes formaron parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que los caracterizan. Gracias por sus orientaciones.

**Agradezco a mis asesores de tesis:** Dra. Jesús del Rosario Ruelas Islas y Dr. Quintín Armando Ayala Armenta por su valioso apoyo en este proyecto de investigación.

**Al Posgrado del Colegio en Ciencias Agropecuarias** por brindarme los conocimientos necesarios para concluir el grado de Maestro en Ciencias Agropecuarias.

**Al Instituto Nacional de Investigación Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)** por haberme permitido formar parte de su institución, en especial al Programa de Ingeniería de Riegos por brindarme el apoyo de establecer el proyecto en esta área.

**Agradezco a cada una de mis amistades** que me brindaron su apoyo, motivación durante el proceso de maestría.

## **DEDICATORIA**

### **A mi esposa y mis hijas**

Quiero agradecer profundamente a mi esposa, y a mis hijas. Me brindaron su apoyo, me comprendieron, tuvieron tolerancia e infinita paciencia y cedieron su tiempo para que “Papá estudie”, para permitir así llevar adelante un proyecto que pasó de ser una meta personal a otro emprendimiento más de familia. A ellos, mi eterno amor y gratitud. Esta misma motivación y pasión con la que describo el especial e incondicional acompañamiento de mi pareja, fue el mismo con el que generé cada parte y punto de esta tesis, y por ello mismo puedo asegurar y pronosticar su triunfo y gusto para todos sus leyentes.

### **A mis padres.**

Carlos Beltrán Miranda (†) & Lisa Patricia Félix Lopez; Hoy cuando concluyo mis estudios de maestría, les dedico a ustedes este logro amados padres, como una meta más conquistada. Orgulloso de que me hayan tocado como mis padres y que estén a mi lado en este momento tan importante. Gracias por nunca dejarme solo y ayudarme a ser una gran persona, les agradezco cada esfuerzo y sacrificio que han realizado por mí. Gracias por creer en mí.

### **A mis hermanos.**

Por el apoyo, cariño y motivación diaria que me brindan para salir adelante siempre.

### **A la familia Beltrán Félix y Valdez Sandoval.**

Gracias a cada uno de sus integrantes por el apoyo brindado a mí persona y a mi familia cuando los necesitan.

# CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS .....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT .....	XIII
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. ANTECEDENTES.....	4
2.1 IMPORTANCIA DEL RIEGO EN MÉXICO.....	4
2.2 IMPORTANCIA DEL CULTIVO DE PAPA EN MÉXICO.....	5
2.3 RESPUESTA DEL CULTIVO DE PAPA AL AGUA.....	6
2.4 CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN BAJA.....	8
2.5 EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN.....	10
2.6 MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN DEL RIEGO.....	14
III. HIPÓTESIS .....	17
VI. OBJETIVOS.....	18
4.1. OBJETIVO GENERAL .....	18
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
5.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	19
5.2. SELECCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOTES DE ESTUDIO.....	21
5.2.1. <i>Lote diagnóstico</i> .....	21
5.3. LOTE EXPERIMENTAL.....	26
5.3.1. <i>Descripción del tratamiento</i> .....	27
5.3.2. ESTABLECIMIENTO Y MANEJO DEL CULTIVO.....	28
5.3.3. <i>VARIABLES MEDIDAS</i> .....	29
5.3.3.1 <i>Humedad volumétrica del suelo</i> .....	29
5.3.3.2 <i>Índice de clorofila (SPAD)</i> .....	30
5.3.3.3 <i>Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)</i> .....	30
5.3.3.4 <i>Fenología del cultivo</i> .....	31
5.3.3.5 <i>Materia fresca y materia seca</i> .....	32
5.3.3.6 DESEMPEÑO DE ASPERSORES.....	32

5.3.3.6.1	<i>Variabilidad espacial de la humedad del suelo</i> .....	32
5.3.3.6.2	<i>Patrón de aplicación:</i> .....	33
5.3.3.6.3	<i>Eficiencia de aplicación (Ea):</i> .....	34
5.3.3.6.3	<i>Eficiencia de uniformidad:</i> .....	34
5.4.	ACTUALIZACIÓN DE BASES DE DATOS Y PARÁMETROS EN EL MODELO INTEGRAL DE RIEGO	35
5.4.1.	<i>Clima</i> .....	35
5.4.2.	<i>Fenología</i> .....	36
5.4.3.	<i>Parámetros del modelo</i> .....	37
5.5.	RENDIMIENTO Y CALIDAD.....	38
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
6.1.	LOTE DIAGNÓSTICO. ....	39
6.1.1.	<i>Láminas y eficiencias de aplicación</i> .....	39
6.1.2.	<i>Desempeño de la operación</i> .....	41
6.1.2.1.	<i>Coeficiente de distribución de Christiansen (CUC)</i> .....	41
6.1.2.2.	<i>Presión</i> .....	41
6.1.2.3.	<i>Diámetro de mojado</i> .....	42
6.2.	LOTE EXPERIMENTAL.....	44
6.2.1.	<i>Láminas y eficiencia de aplicación (EA)</i> .....	44
6.2.2.	<i>Desempeño de la operación</i> .....	45
6.2.2.1.	<i>Variación de láminas mínimas y máximas</i> .....	45
6.2.2.2.	<i>Coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC)</i> .....	48
6.2.2.3.	<i>Humedad del suelo</i> .....	49
6.2.2.4.	<i>Comportamiento del NDVI en el lote experimental de papa</i> .....	51
6.2.	FENOLOGÍA DEL CULTIVO.....	54
6.3.	PARÁMETROS DEL CULTIVO. ....	56
6.4.	PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN EL LOTE EXPERIMENTAL DE PAPA.....	56
6.5.	RENDIMIENTO Y CALIDAD DE TUBÉRCULOS. ....	58
VII.	CONCLUSIONES.....	61
IX.	LITERATURA CITADA. ....	62
9.1.	ANOVA .....	68

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. PORCENTAJES DE EFICIENCIA POR SISTEMA DE RIEGO. (TANJI Y HANSON, 1990). .....	10
CUADRO 2. INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD EN UN SISTEMA DE RIEGO POR ASPERSIÓN. (FAO, 2020). 12	
CUADRO 3. CONSTANTES HÍDRICAS PROMEDIOS PARA CINCO CLASES TEXTURALES, EXPRESADAS EN CM <sup>3</sup> CM <sup>-3</sup> (ADAPTADO DE SAXTON ET AL., 1986). .....	15
CUADRO 4. FENOLOGÍA DE LA PAPA EN EL VALLE DEL FUERTE, SINALOA, EN FUNCIÓN DE TIEMPO TÉRMICO (SIFUENTES ET AL., 2008). .....	31
CUADRO 5. FENOLOGÍA DEL CULTIVO DE PAPA, DE ACUERDO AL TIEMPO TÉRMICO EN EL VALLE DEL FUERTE, SINALOA. (SIFUENTES Y MACÍAS, 2015).....	36
CUADRO 6. COMPONENTES DEL MODELO DE PROGRAMACIÓN INTEGRAL DEL RIEGO PARA EL CULTIVO DE PAPA BAJO RIEGO POR ASPERSIÓN FIJA-BAJA EN EL NORTE DE SINALOA, MÉXICO (AJUSTADO DE OJEDA ET AL., 2004). .....	37
CUADRO 7. CLASIFICACIÓN DE TUBÉRCULOS DE PAPA CON BASE EN EL DIÁMETRO ECUATORIAL UTILIZADO EN EL NORTE DE SINALOA, MÉXICO (SIFUENTES ET AL., 2008).....	38
CUADRO 8. RESUMEN DE RIEGOS APLICADOS DE ACUERDO AL MANEJO TRADICIONAL DEL PRODUCTOR, EN LOTE DIAGNÓSTICO DE PAPA. FECHA DE SIEMBRA 20/11/2020. ....	39
CUADRO 9. RESUMEN DE RIEGOS PROGRAMADOS CON EL MODELO INTEGRAL USANDO LA PLATAFORMA IRRIMODEL ©, EN LOTE DIAGNÓSTICO DE PAPA.....	40
CUADRO 10. RESUMEN DE RIEGOS APLICADOS CON EL MODELO INTEGRAL USANDO LA PLATAFORMA IRRIMODEL, EN LOTE EXPERIMENTAL DE PAPA. ....	45
CUADRO 11. RESUMEN DE LÁMINAS DE RIEGO MÁXIMA, MÍNIMA Y MEDIA TOMADAS DE LOS PLUVIOMETROS, EN LOTE EXPERIMENTAL DE PAPA CON EL ASPERSOR NAAN DAN 5022. ....	46
CUADRO 12. RESUMEN DE LÁMINAS DE RIEGO, MÁXIMA, MÍNIMA Y MEDIA TOMADAS DE PLUVIÓMETROS INSTALADOS EN LOTE EXPERIMENTAL DE PAPA CON EL ASPERSOR XCELL WOBBLER. ....	47
CUADRO 13. VARIABLES ESTADÍSTICAS DEL COMPORTAMIENTO DE HUMEDAD DEL SUELO EN DOS TIPOS DE ASPERSORES. ....	51
CUADRO 14. VALORES PROMEDIO DE NDVI EN DOS TIPOS DE ASPERSORES Y TRASLAPE DE ESTOS.....	52
CUADRO 15. FENOLOGÍA DEL CULTIVO DE PAPA VARIEDAD FIANA CON PARÁMETROS DE TIEMPO TÉRMICO ACTUALIZADOS, DURANTE EL CICLO 21-22 EN EL VALLE DEL FUERTE. ....	55

<b>CUADRO 16.PARÁMETROS DEL MODELO DE PROGRAMACIÓN INTEGRAL DEL RIEGO PARA EL CULTIVO DE PAPA BAJO RIEGO POR ASPERSIÓN FIJA-BAJA EN EL NORTE DE SINALOA, MÉXICO AJUSTADOS.....</b>	<b>56</b>
<b>CUADRO 17.RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA VARIANZA COMO BLOQUES COMPLETOS AL AZAR DE LA VARIABLE RENDIMIENTO. ....</b>	<b>60</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	19
FIGURA 2. ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL ESTADO DE SINALOA (INEGI, 2017). .....	20
FIGURA 3. UBICACIÓN DEL LOTE DIAGNOSTICO BAJO ESTUDIO.....	22
FIGURA 4. PLANO Y DISEÑO DE SISTEMA DE RIEGO DEL LOTE BAJO ESTUDIO.....	23
FIGURA 5. EVALUACIÓN DE SISTEMA DE RIEGO DEL LOTE BAJO ESTUDIO.....	24
FIGURA 6. DIAGRAMA DE EVALUACIÓN DE ASPERSORES EN EL LOTE. ....	25
FIGURA 7. UBICACIÓN DE LOS VASOS PLUVIOMÉTRICOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	26
FIGURA 8. MAPA DE UBICACIÓN DEL LOTE BAJO ESTUDIO CEVAF. ....	27
FIGURA 9. CROQUIS DEL LOTE EXPERIMENTAL, INIFAP-CEVAF, CICLO AGRÍCOLA OI 2021-2022.....	28
FIGURA 10. INTERFACE PRINCIPAL DE LA PLATAFORMA IRRIMODEL PARA LA PROGRAMACIÓN INTEGRAL DEL RIEGO.....	29
FIGURA 11. MEDICIÓN DE VARIABLES DE HUMEDAD DEL SUELO.....	33
FIGURA 12. PATRÓN DE APLICACIÓN DE AGUA DE LOS ASPERSORES EVALUADOS CON SEPARACIÓN DE 9 X 9 METROS. ....	34
FIGURA 13. BASE DE DATOS CLIMÁTICOS HISTÓRICA DE LA ESTACIÓN CEVAF 1997-2022. ....	35
FIGURA 14. RESULTADOS DE PRUEBAS PLUVIOMÉTRICAS EN LOTE TESTIGO CON ASPERSOR NAAN DAN 5022.....	41
FIGURA 15. COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN (PSI) EN UNA LINEA DE ASPERSORES NAAN DAN 5022, EN EL TERCER RIEGO DE AUXILIO EN LOTE DIAGNÓSTICO DE PAPA.....	42
FIGURA 16. DIÁMETROS DE MOJADO EN METROS ENTRE ASPERSOR Y ASPERSOR (MARCO DE INSTALACIÓN).....	43
FIGURA 17. LÁMINAS DE RIEGO MEDIAS APLICADAS (LB) CON DOS TIPOS DE ASPERSORES EN RIEGO POR ASPERSIÓN BAJA-FIJA, EN EL CULTIVO DE PAPA.....	48
FIGURA 18. RESULTADOS EXPRESADOS EN PORCENTAJE DE LA EFICIENCIA DE DISTRIBUCIÓN EN EL TRATAMIENTO NAAN DAN 5022 Y EN EL TRATAMIENTO XCELL WOBBLER DURANTE LOS RIEGOS ESTABLECIDOS. ....	49

FIGURA 19. RESULTADOS PROMEDIO POR RIEGO DE LA HUMEDAD EN EL SUELO OBTENIDA CON EL SENSOR DE HUMEDAD TDR EN EL ÁREA REGADA POR LOS DOS TIPOS DE ASPERSORES.....	51
FIGURA 20. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DEL NDVI EN LOS DOS TRATAMIENTOS Y EN EL TRASLAPÉ ENTRE ELLOS, CON LA FECHA DE CADA VUELO.....	52
FIGURA 21. COMPORTAMIENTO DEL NDVI EN LOS TRATAMIENTOS DE RIEGO POR ASPERSIÓN EN PAPA, USANDO DRONES. ....	54
FIGURA 22. COMPARACIÓN DEL DESARROLLO FENOLÓGICO INICIAL (IRRIMODEL) Y DESARROLLO FENOLÓGICO AJUSTADO EN CULTIVO DE PAPA VARIEDAD FIANA. ....	56
FIGURA 23. RESULTADOS PROMEDIO OBTENIDOS DE MATERIA SECA EN LOS DOS TIPOS DE ASPERSORES Y DONDE SE TRASLAPAN LOS DOS. ....	57
FIGURA 24. RESULTADOS PROMEDIO OBTENIDOS EN KG HA <sup>-1</sup> DE TUBÉRCULOS EN LOS DOS TIPOS DE ASPERSORES Y DONDE SE TRASLAPAN LOS DOS. ....	59
FIGURA 25. RESULTADOS PROMEDIO OBTENIDOS EN KG HA <sup>-1</sup> EN CALIDAD DE TUBÉRCULOS EN LOS DOS TRATAMIENTOS ESTABLECIDOS Y DONDE TRASLAPAN LOS DOS.....	60

## RESUMEN

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) es considerado un cultivo básico dentro de la dieta de cientos de personas en el mundo. La importancia de las áreas de riego en México es fundamental para contribuir a garantizar la seguridad alimentaria que se indica en el Plan Nacional de Desarrollo, dentro de la meta de México Próspero; en este sentido a lo largo de la historia en el país se han realizado diversas acciones para su transformación. La actividad agrícola consume más del 80% del agua total disponible a nivel mundial. El análisis del problema actual radica en el desperdicio del agua que se genera al realizar el riego de cultivos de manera inadecuada, debido a que el sector agrícola es el principal partícipe del uso del agua que por lo general tienen un uso ineficiente de ella, desperdiciando este recurso natural limitado. Después de definir la problemática se ha propuesto un modelo de riego programado con un modelo integral que tiene como objeto la aplicación de riegos en tiempo adecuado en el cultivo de papa en la región norte del estado de Sinaloa, a su vez mejorar la producción tratando de disminuir y optimizar el uso del agua. Debido a esto se propuso la evaluación de dos tipos de aspersores y la utilización de un modelo integral de manejo de riego para el cultivo de papa, con el fin de conocer las capacidades operativas de cada uno de los aspersores y su efecto en la eficiencia del riego, en el rendimiento y calidad de tubérculos. Conocer experimentalmente las capacidades operativas de los principales aspersores utilizados en sistemas de riego por aspersión fija (presión, lamina de riego, uniformidad de riego). Permitirán seleccionar aquellos con las mejores características operativas y utilizarlas para el diseño y evaluación de estos sistemas, que operados mediante programación integral sería posible mejorar la eficiencia en el uso del agua, rendimiento y calidad de las cosechas. Se actualizó la fenología del cultivo de papa variedad Fiana en tiempo térmico en el norte de Sinaloa. El rendimiento obtenido mediante la aplicación del calendario de riegos generado en la plataforma IriModel generó un rendimiento de 42 Mg ha<sup>-1</sup>, mediante la aplicación del modelo integral con el aspersor Xcell Wobbler.

**Palabras Clave:** *Solanum tuberosum* L., eficiencia de uniformidad, rendimiento y calidad, variabilidad climática, adaptación.

## ABSTRACT

The potato crop (*Solanum tuberosum* L.) is considered a basic crop in the diet of hundreds of people in the world. The importance of irrigated areas in Mexico is essential to help guarantee the food security indicated in the National Development Plan, within the goal of a Prosperous Mexico; In this sense, throughout the country's history, various actions have been carried out for its transformation. Agricultural activity consumes more than 80% of the total water available worldwide. The analysis of the current problem lies in the waste of water that is generated when irrigating crops improperly, due to the fact that the agricultural sector is the main participant in the use of water, which generally has an inefficient use of it, wasting this limited natural resource. After defining the problem, a programmed irrigation model has been proposed with an integral model that has as its objective the application of irrigation at an adequate time in the potato crop in the northern region of the state of Sinaloa, in turn improving production trying to reduce and optimize the use of water. Due to this, the evaluation of two types of sprinklers and the use of an integral model of irrigation management for the potato crop were proposed, in order to know the operational capacities of each one of the sprinklers and their effect on the efficiency of the irrigation system. irrigation, in the yield and quality of tubers. Know experimentally the operational capacities of the main sprinklers used in fixed sprinkler irrigation systems (pressure, irrigation sheet, irrigation uniformity). They will make it possible to select those with the best operating characteristics and use them for the design and evaluation of these systems, which, operated through comprehensive programming, would be able to improve efficiency in the use of water, yield, and quality of crops. The phenology of the Fiana variety potato crop in thermal time in northern Sinaloa was updated. The yield obtained through the application of the irrigation calendar generated in the IrriModel platform generated a yield of 42 Mg ha<sup>-1</sup>, through the application of the integral model with the Xcell Wobbler sprinkler.

**Keywords:** *Solanum tuberosum* L., uniformity efficiency, yield and quality, climatic variability, adaptation.

## I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) es considerado un cultivo básico dentro de la dieta de cientos de personas en el mundo por ser un importante proveedor de carbohidratos, vitaminas y minerales (Camire, 2016). En México, los principales estados productores son: Sinaloa, Sonora y Chihuahua con un promedio en la producción de 315,955.16, 257,961.30 y 168,628.78 toneladas respectivamente en el periodo 2000 al 2009, solo estos tres estados contribuyen en promedio al 46.45% de la producción nacional en el mismo periodo. Este cultivo es sensible al déficit hídrico (Kafkafi y Trchitzky, 2012; Quiroz, 2012) y la escasez de agua provoca una reducción en la producción de tubérculos (Rodríguez-Pérez, 2010; Quiroz, 2012). Para alcanzar los rendimientos potenciales, el cultivo tiene un requerimiento hídrico de entre 400 a 700 mm (Manickam et al, 2018; Quiroz, 2012). La etapa más crítica y de mayor exigencia de agua en el cultivo de papa es la floración, que coincide con la tuberización (100 dds), pues su disponibilidad limitada reduce el número de tubérculos por planta. (Corpoica, 2009, Manickam et al, 2018).

La tecnología es un soporte necesario para el tratamiento de la información, y en el campo de la agricultura no podía quedar a un lado México; el sector agrícola es una parte vital del país, por lo que se considera como la mayor proporción de fuerza laboral, proporciona una fuente de ingresos de dinero en el país (Arámbulo-Marin y Salazar-Tapia, 2017). La Agricultura debe tener un riego constante y controlado Para evitar mermas en el rendimiento y en la calidad de la producción, es por esto que surge la necesidad de automatizar el sistema de riego mediante el uso de sensores que facilitan la toma de las decisiones de riego, para lograr ahorros en los costos de trabajo, en el tiempo invertido en el riego manual de las plantas, y a su vez optimizar el uso del líquido vital.

Las grandes zonas de riego se ubican en las zonas áridas y semiáridas del país, las cuales requieren del riego para obtener rendimientos comerciales; ya que la sequía es el principal evento natural que afecta negativa y recurrentemente a la agricultura ocasionando graves problemas por su impacto en los cultivos que presentan una alta

vulnerabilidad a la falta de agua (Flores-Gallardo et. al., 2006). Los sistemas de riego presurizado que se emplean permiten la aplicación de cantidades precisas de agua sin desperdicios, pero además permiten el uso integrado de fertilizantes a través de estos. Por este motivo a lo largo de los años se desarrollan proyectos tecnológicos enfocados a mejorar la producción agrícola, tal es el caso de los sistemas de riego automatizados que permiten optimizar el uso del agua a través de un mecanismo automatizado, y mediante sensores que permiten monitorear ya sea la humedad, temperatura del suelo, regando solamente cuando se necesite el agua. De esta manera reducir el desperdicio del agua, aumentar considerablemente la producción y a su vez generar ahorro en la mano de obra.

Es sabido que las actividades agropecuarias son la base de la alimentación y de sobrevivencia para el hombre, por esta razón cada una de sus áreas o disciplinas de estudio e investigación, deben fortalecerse para producir más con menos recursos y a un menor costo. El riego agrícola, por su estrecha relación con el uso, el manejo y la conservación del agua, es una de estas áreas dentro de la agricultura que requiere de mayores estudios, avances tecnológicos y de la aplicación de los mismos sin deteriorar el medio ambiente.

El riego es una práctica indispensable que se debe realizar para alcanzar el potencial productivo del cultivo en zonas de bajas precipitaciones; esto se realizaba mediante sistema de riego convencional por gravedad o de superficie, pero la FAO (2002) argumenta que el riego de superficie es menos eficiente y en ocasiones causa problemas de anegamiento y salinización. El sistema de riego por aspersión presenta una eficiencia de aplicación del 85% del agua que la planta demanda, por lo cual se puede reducir el consumo de agua entre un 30 % y un 60 % (FAO, 2002), sin embargo, el diseño, programación y manejo deficientes reducen sus capacidades con afectaciones importantes en el rendimiento y calidad. Ante esta situación se requiere mejorar la programación, evaluación y desempeño de los componentes de estos sistemas de riego, principalmente los aspersores que tienen impacto directo en la calidad y cantidad de producción en cultivos como papa.

En el norte de Sinaloa, en los últimos 15 años ha aumentado el uso de sistemas de riego de aspersión fija baja los cuales emplean comúnmente los aspersores Naan Dan y Xcell Wobbler, y se carece de una programación del riego eficiente.

Con el conocimiento experimental de las capacidades operativas de los principales aspersores utilizados en sistemas de riego por aspersión fija (presión, lamina de riego, uniformidad de riego), nos permitió seleccionar aquellos con las mejores características operativas y utilizarlas para el diseño y evaluación de estos sistemas, que operados mediante programación integral nos hizo posible mejorar la eficiencia en el uso del agua, rendimiento y calidad de las cosechas.

Por lo anterior, el objetivo de este proyecto fue determinar las capacidades operativas de los principales tipos de aspersores usados en sistemas de aspersión baja, operados mediante programación integral del riego en el cultivo de papa, en el norte de Sinaloa, México.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1 Importancia del riego en México.

La importancia de las áreas de riego en México es fundamental para contribuir a garantizar la seguridad alimentaria que se indica en el Plan Nacional de Desarrollo, dentro de la meta de México Próspero; en este sentido a lo largo de la historia en el país se han realizado diversas acciones para su transformación.

En los 90 con la firma del Tratado de Libre Comercio y la creación de la Alianza para el Campo se otorgaron diversos apoyos para la tecnificación del riego. Ésta nuevamente toma una escalada a finales del 2008 y hasta la actualidad. La actividad agrícola consume más del 80 % del agua total disponible a nivel mundial. En México los porcentajes correspondientes son 77, 17 y 5 %, con 6.3 millones de hectáreas bajo riego en las que la eficiencia global es menor al 50 % (Sánchez et al., 2006). La menor disponibilidad de agua observada en las presas del país, producto de los cambios en los patrones de precipitación pluvial de los últimos años, probablemente ha contribuido a que se mantenga o incremente la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos. Así, de los 202 acuíferos en uso del país, 102 se encuentran sobre explotados con tasas de abatimiento anual, en algunos casos, de hasta 3.5 metros por año (CONAGUA, 2010; Sánchez, 2005). Esta situación indica la necesidad de establecer estrategias para ejercer un mayor control en la administración de los recursos hídricos. Entre estas estrategias, la tecnificación del riego implica la incorporación de técnicas y métodos más racionales y cuantitativos que permitan ejercer un mayor control del agua que se utiliza en esta importante práctica agrícola. Dentro de la programación del riego se habla de: cuánto, cuándo, y cómo regar los cultivos para obtener máxima eficiencia y productividad en el uso del agua.

En la programación de los riegos destaca la cuantificación de las necesidades hídricas de los cultivos, lo cuales se obtienen por los parámetros de evaporación y transpiración. La medición de estos procesos por separado es difícil, por lo que se utiliza el término evapotranspiración para referirse de manera conjunta a la

evaporación de agua que ocurre físicamente controlada desde la superficie del suelo y a la que ocurre fisiológicamente controlada desde la superficie de las hojas.

## **2.2 Importancia del cultivo de papa en México.**

Las papas son muy sensibles a los excesos y deficiencias de humedad del suelo. El uso de un modelo basado en el concepto de grado día permite realizar una mejor programación del riego porque tiene en cuenta las variaciones climáticas locales. Esto permitió determinar con mayor precisión el inicio de las etapas fenológicas del cultivo y sus respectivas demandas hídricas, de esta manera se puede incrementar la eficiencia del riego.

La papa ocupa el 5º lugar a nivel mundial de los cultivos de mayor producción seguido del maíz, arroz, trigo y frijol, en el mundo se producen 385 millones de toneladas de papa, siendo China el principal productor y después la India, Estados Unidos, Rusia y Alemania. México ocupa el lugar 31 en la producción mundial de este importante tubérculo, se cultivan alrededor de 68 000 has en nuestro país de donde se obtienen un total de 1.8 millones de toneladas con un valor de la producción de 11 300 millones de pesos. Al cultivo de la papa se dedican 8 700 productores y dependen 77 800 familias, genera 17 500 empleos directos y se estiman más de 50 mil indirectos, además de 7 millones de jornales al año.

La papa se cultiva en 23 entidades de la República mexicana, Sonora es el principal Estado productor de papa a nivel nacional con el 24.5% del total, le siguen Sinaloa con el 17%, Puebla con el 9.85%, Veracruz con el 8.30% y hay otros Estados importantes como el Estado de México, Nuevo León, Chihuahua y Baja California Sur. El 29% de la producción nacional de papa se destina a la industria, el 56% es para consumo en fresco y el 15% se utiliza para la producción de semilla. México es autosuficiente en la producción de papa, por su amplia distribución en nuestro país, se produce todo el año, aunque el consumo nacional es bajo, estamos hablando de 14.3 kilogramos per cápita anual, cuando en países como Rusia y Alemania se consumen 130 kg, en Perú 80 kg, en Canadá 60 kg y casos como Estados Unidos que consumen 56 kg promedio por persona anualmente. México importa alrededor de 120 mil

toneladas con un valor de 50 millones de dólares (mdd) y exportamos 2,140 toneladas con un valor de 1.2 mdd. Por lo que la balanza comercial en este producto presenta un déficit de poco más de 48 mdd. La papa forma parte del sistema alimentario mundial y es por ello que la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) declaró en el 2008 como el año internacional de la papa, considerándolo como el alimento del futuro y un producto fundamental para la seguridad alimentaria en el mundo. Existe un mito de que la papa engorda a quien la consume, la realidad es que la papa es más sana y nutritiva de lo que uno se imagina, una papa cocida solo contiene 26 calorías, contiene una gran cantidad de nutrientes como Vitamina C, B, B3, B6, ácido fólico, magnesio, manganeso, potasio, hierro, contiene un 20% de almidón y poco más del 70% es agua, incluso la cascara contiene un 2% de fibra por lo que se recomienda también su consumo.

Los productores de papa en nuestro País han mejorado sustancialmente los procesos de producción, los aspectos de responsabilidad social y cuidado del medio ambiente. La Confederación de Productores de Papa de la República Mexicana (CONPAPA) es la organización más representativa de los productores de este cultivo a nivel nacional y promueven el desarrollo de un sector más productivo, eficiente, más responsable, sustentable e incluyente. El cultivo de la papa en México es importante por todo lo que genera, lo principal es que es un alimento que es de fácil acceso para la población y una buena base para la alimentación de los mexicanos.

### **2.3 Respuesta del cultivo de papa al agua.**

La papa destaca por su uso productivo del agua, ya que ofrece más alimento por unidad de agua que cualquiera de los demás cultivos principales. Junto al cacahuete, la cebolla y la zanahoria, presenta una "productividad nutricional" en especial elevada: por cada m<sup>3</sup> de agua aplicada a su cultivo, la papa produce 5 600 calorías (kcal) de energía alimentaria, en comparación con las 3 860 calorías del maíz, 2 300 del trigo y sólo 2 000 del arroz. Con el mismo metro cúbico, la papa brinda 150 gramos de proteína, el doble que el maíz y el trigo, y 540 mg de calcio, el doble que el trigo y cuatro veces lo que ofrece el arroz. Si se aumentara la proporción de papa en la alimentación se reduciría la presión sobre los recursos hídricos. Actualmente, la

producción de los alimentos –en especial los de origen animal– que componen la dieta media en el mundo desarrollado necesita la extracción de unos 4 000 litros por persona al día (se requieren, por ejemplo, de 13 000 a 15 000 litros de agua aproximadamente para producir Un kilogramo de carne de bovino alimentado con cereales). Pero un estudio reciente estimó que una alimentación equilibrada a base de papa, cacahuetes, cebolla y zanahorias necesitaría un consumo de agua per cápita de sólo 1 000 litros al día.

Las variedades modernas de papa son sensibles a la falta de agua en el suelo y necesitan una irrigación frecuente y superficial. Un cultivo de papas de 120 a 150 días consume de 500 a 700 mm de agua, y la producción se reduce si se agota más del 50 % del total del agua disponible en el suelo durante el período de crecimiento (FAO 2008). Las variedades modernas de papa son sensibles a la falta de agua en el suelo y necesitan una irrigación frecuente y superficial. Un cultivo de papas de 120 a 150 días consume de 500 a 700 mm de agua, y la producción se reduce si se agota más del 50 % del total del agua disponible en el suelo durante el período de crecimiento.

En general, la falta de agua durante la parte media y final del período de crecimiento, es decir, durante la estolonización y el inicio de la formación de los tubérculos y el crecimiento de los mismos, tiende a reducir la producción, mientras que el cultivo sufre menos la falta de agua al inicio del crecimiento vegetativo. También se puede economizar agua permitiendo un mayor agotamiento hacia el período de maduración, a fin de que el cultivo utilice toda el agua disponible en la zona de las raíces, práctica que también puede acelerar la maduración y aumentar el contenido de materia seca.

Los métodos más comunes de irrigación para la papa utilizan sistemas de surcos o aspersión. La irrigación de surcos es relativamente poco eficaz en el uso del agua, y es conveniente cuando hay un suministro abundante de la misma. Donde hay escasez de agua es preferible la irrigación por aspersión o por goteo, sobre todo en suelos con poca capacidad de retención. El manejo adecuado del riego es uno de los factores más importantes que influyen en el rendimiento del cultivo, tanto en cantidad como calidad, ya que del 85 al 95% del tubérculo es agua.

La papa no tolera sequía y no debe faltarle humedad, especialmente desde la formación de tubérculos hasta floración. La papa o patata requiere de 0.35 a 0.8 m<sup>3</sup> de agua para producir un kilogramo de materia seca de tubérculos. En condiciones de campo, esto se traduce en requerimientos hídricos de 350 a 650 mm durante el período de crecimiento, que dependen del clima y de la variedad (Sood y Singh, 2003). La escasez de agua puede provocar un rendimiento reducido de los tubérculos, en cantidad y en tamaño, y una disminución de la calidad de los mismos. Con el fin de optimizar el rendimiento, generalmente no se debe agotar el agua disponible total (TAW) del suelo más allá del 30 al 50 %.

En condiciones de suministro hídrico limitado, el suministro disponible, preferencialmente, debería centrarse en maximizar el rendimiento por hectárea en lugar de repartir el agua limitada en un área más grande. Se puede ahorrar agua principalmente a través de un calendario mejorado y profundidad de la aplicación del riego. El déficit hídrico en las primeras etapas, durante la formación de estolones, la brotación de tubérculos y después de la misma, tiene los efectos más adversos en el rendimiento final. Aunque el crecimiento foliar es muy sensible al déficit hídrico, si el déficit es moderado y corto, el crecimiento foliar después de que se termina el déficit se puede compensar por lluvia o riego, y el efecto sobre el rendimiento sería leve. La etapa de senescencia es menos sensible, siempre que el déficit no sea tan severo que acorte sustancialmente la duración del dosel verde. En general, los déficits hídricos de la mitad y hacia el final del período de crecimiento suelen reducir el rendimiento menos que en la primera parte, pero esto puede cambiar entre variedades. Algunas variedades responden mejor al riego al principio de la etapa de formación de tubérculos, mientras que otras muestran una mejor respuesta hacia el final de dicha etapa (FAO, 2011).

#### **2.4 Características y clasificación de los sistemas de riego por aspersión baja.**

El sistema de riego por aspersión es uno de los múltiples métodos de riego de cultivos que existen en la actualidad. Consiste en aplicar el agua imitando la lluvia, es decir, mediante un chorro de agua pulverizada en gotas. El mecanismo funciona a través de una red de tuberías que transporta el agua hasta los aspersores, los cuales

utilizan presión para dispararla. El riego como tal es potenciado a través de un sistema de bombeo. La distribución de los aspersores debe realizarse de forma tal que todo el terreno esté cubierto de la forma más homogénea posible. Por lo general, las tuberías que componen el sistema van enterradas. Además, se compone de tomas de agua o hidrantes, ramales de aspersión y los aspersores como tal. Este sistema es considerado el mejor para las superficies de gran producción.

Un aspersor es un dispositivo que puede suministrar agua a diferentes presiones rociándola desde un brazo con una o más salidas llamadas boquillas, según el modelo, y según el tipo adquirido alcance la distancia. Se puede alcanzar la mayor parte o toda la superficie si la presión no es demasiado alta para que salga el chorro. Además de este tipo de ambientes, también se adapta perfectamente a rendimientos bajos, ya que la acción de este sistema de riego reduce la evaporación y la acción del viento. Por ejemplo, papas, sorgo, plátanos, viveros, invernaderos, jardines o sistemas de riego subterráneos suelen utilizar este tipo de sistemas. Es una técnica de riego muy utilizada en todo el mundo. La tecnología está muy desarrollada en zonas con climas secos y escasos recursos hídricos para riego, como España, California (EE.UU.) y el noreste de Brasil (Chamsap, 2022).

Se adapta mejor a terrenos planos o semi planos. A medida que aumenta la pendiente, se incrementa el riesgo de erosión debido al desprendimiento de partículas de suelo que causa el impacto de las gotas. Además, a medida que aumenta la pendiente, la distribución del agua es cada vez más desigual, formando un círculo de menor radio del lado superior del aspersor, donde se aplica más agua y con más presión. En áreas con pendiente se recomienda utilizar aspersores que producen gotas pequeñas y que requieren menos carga o presión. Se adapta mejor a aquellos cultivos que ocupan toda el área del terreno o que poseen espaciamiento pequeño, cuyos sistemas radiculares ocupan todo el volumen de suelo sembrado. Es poco eficiente para aquellos cultivos sembrados en espalderas o ramadas, porque estas estructuras no permiten la distribución uniforme del agua. No es un sistema adecuado para los cultivos altos y frondosos. Utiliza menos agua que el riego por inundación, pero al menos el doble que el sistema de goteo.

En la Eficiencia de riego que es la relación del agua que benéficamente es utilizada en los cultivos y el agua total utilizada en la práctica del riego, podemos ver los porcentajes de cada uno en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Porcentajes de eficiencia por sistema de riego. (Tanji y Hanson, 1990).**

Sistema de Riego	Coefficiente de uniformidad (%)	Eficiencia de aplicación (%)
Movimiento Periódico	70-80	65-80
Movimiento Continuo	70-90	75-85
Aspersión Fija Baja	90-95	80-85
Goteo	85-90	85-90
Melgas	60-75	65-70

Se puede controlar bien la cantidad de agua aplicada a través de pluviómetros sencillos o por la relación caudal/tiempo de los aspersores. Sin embargo, si la presión en los aspersores es baja o desigual entre ellos, la distribución del agua también es desigual dentro del perímetro regado; por lo tanto, se aplica más agua en algunas áreas que en otras. La aspersion funciona como si fuera una lluvia natural. Las gotas aspergidas chocando contra la superficie del suelo pueden producir erosión. De ser posible, el riego por aspersion debe ser evitado en zonas de laderas o utilizado con mucho cuidado, protegiéndose bien el suelo con cobertura vegetal y utilizando aspersores de baja energía, que producen gotas más pequeñas (Tipo Bowler), bien regulados y mantenidos. El mayor uso de mano de obra está en la operación del sistema y, más específicamente, en la rotación de los equipos en el terreno en cada turno de riego. En todo caso, esta labor es menos ardua que la requerida para el manejo de los sistemas de inundación, principalmente por surcos.

## 2.5 Evaluación de sistemas de riego por aspersion.

El diseño de una instalación de riego por aspersion es de gran importancia porque permitirá conocer la capacidad del sistema y su adaptación para el riego de

determinados cultivos. El proceso de diseño de una instalación de riego por aspersión comienza reuniendo información de tipo agronómico acerca del tipo de suelo, cantidad y calidad de agua, clima y cultivos, así como sobre la topografía y dimensiones de la zona a regar. También habrá que considerar la capacidad del agricultor para soportar el coste de la instalación y su explotación, la viabilidad para realizar las técnicas de cultivo, y la posibilidad de formación para el manejo de la instalación.

Con toda esta información se definirán las características generales del sistema y se procederá a la planificación y el cálculo hidráulico (diámetros de tuberías, caudales, presiones, características del sistema de bombeo, entre otras), De acuerdo con las limitaciones de tipo económico, de mano de obra y del entorno y de sostenibilidad como se muestra en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Indicadores de sostenibilidad en un sistema de riego por aspersión. (FAO, 2020).**

Indicadores de sostenibilidad	Aspersión
Inversión inicial	Mediana
Utilización de mano de obra en la operación	Mediana
Riesgo de erosión en zonas de laderas	Mediano
Necesidad de energía para distribuir el agua	Alta
Consumo de agua	Mediano
Control de consumo de agua	Bajo
Transmisión de enfermedades	Alta
Posibilidad de generar conflicto por el agua	Mediano
Riesgo de ineficiencia energética	Mediano
Posibilidad de consumo de plaguicidas	Alta

La evaluación en campo de los sistemas de riego permite conocer el funcionamiento del mismo y establecer criterios de manejo que mejoren la eficiencia y los resultados del riego. La evaluación en campo de un sistema de riego por aspersión, permite determinar su eficiencia de aplicación de agua que está relacionada con la uniformidad de aplicación del agua y engloba las pérdidas por filtración profunda (debidas a la mala distribución del agua por el sistema); las pérdidas por escorrentía superficial (debidas tanto a un proyecto del sistema inadecuado como a su manejo); las pérdidas por evaporación y arrastre durante el riego y otras posibles pérdidas producidas durante transporte del agua en las conducciones desde el punto de toma en la parcela hasta su descarga por la unidad de riego (Keller y Bliesner, 1990). Los sistemas de riego a presión se caracterizan por tener una determinada uniformidad en la aplicación de agua.

Los valores de uniformidad bajos pueden afectar al rendimiento y/o calidad de los cultivos y a la eficiencia en el uso de agua, (Warrick y Gardner, 1983; Letey et al., 1984; Montovani et al., 1995; Li, 1998). La evaluación en campo de los sistemas de riego permite evaluar su funcionamiento, y establecer criterios de manejo que mejoren su eficiencia y los resultados del riego. El riego por aspersión se caracteriza por la

aplicación uniforme del agua en toda la cobertura del área de riego, sin embargo, es posible que el grado de uniformidad se vea afectado por diversos factores como la presión de operación, la descarga del emisor y principalmente por la velocidad y dirección del viento; este aspecto resulta muy importante para el diseño, manejo y evaluación económica del sistema de riego. Según Christiansen (Rendón y Fuentes, 2007) considera un coeficiente de uniformidad aceptable a valores por encima del 80 % resultado que refleja una correcta aplicación y distribución del agua en el área bajo riego, permitiendo un uso más eficiente del agua disponible maximizando la producción debido a que los cultivos instalados reciben la misma cantidad de agua de acuerdo a sus necesidades hídricas.

La eficiencia de riego es un concepto usado en proyectos y en el manejo de sistemas de riego. La calidad del riego se evalúa con base en indicadores de desempeño como eficiencia y uniformidad y mediante índices de productividad de agua que relacionan el rendimiento de los cultivos y el valor económico de la producción por unidad de lámina de agua aplicada o consumida (Lorite et al., 2004; Bos et al., 2005).

La eficiencia de aplicación de agua irrigada es un parámetro que cuantifica cuanto del agua aplicada es realmente utilizada. Este parámetro es subdividido en eficiencia de aplicación ( $E_a$ ), eficiencia de almacenamiento ( $E_s$ ), pérdida por percolación debajo de la zona radicular ( $P_p$ ) y déficit de agua en el suelo ( $D$ ). La  $E_a$  indica la cantidad de agua incorporada al suelo hasta la profundidad de estudio, en relación con la cantidad total de agua aplicada por el sistema de riego; así, la diferencia entre éstas indica el volumen de agua perdido por percolación o por evaporación.

La eficiencia de almacenamiento ( $E_s$ ) muestra la relación entre el volumen de agua almacenado y el requerido para una determinada profundidad del suelo, y la diferencia de estos volúmenes es un indicador de déficit (Zocoler et al., 2004). Para evaluar la calidad del riego a partir del análisis de distribución de agua en el suelo, se realizan ajustes de la relación entre la lámina de agua infiltrada y el área irrigada usando modelos matemáticos que permiten la simulación del desempeño de un sistema con otro tipo de manejo de irrigación (Fietz et al., 1999).

Otra variable que está relacionada con la evaluación de sistemas de riego es la variabilidad de la humedad del suelo, la técnica de TDR (Time Domain Reflectometry) es adecuada para medir la humedad del suelo porque permite realizar mayor número de lecturas en menos tiempo, proporciona repeticiones de las lecturas, no es destructivo, es portátil y de fácil acoplamiento a dispositivos recolectores de datos, permite automatización y las mediciones se realizan en tiempo real, en condiciones de laboratorio o de campo en cualquier dirección o perfil del suelo (Topp et al., 1980; Coelho y Arruda, 2001; Souza et al., 2004).

## **2.6 Métodos de Programación del riego.**

La aplicación del riego se realiza de acuerdo al criterio o experiencia del agricultor y al manejo que ofrece cada parcela, ya que la programación científica del riego se realiza aplicando los procedimientos de la FAO por la limitada información experimental generada localmente (Sifuentes et al., 2003).

En la programación del riego se habla como objetivo central el que se tomen decisiones orientadas a determinar las cantidades de agua por aplicar y las fechas de aplicación de cada riego con la intención de minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo que pudieran causar efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos. Teniendo una adecuada programación del riego se puede lograr un importante ahorro en el agua, y así disminuir costos por ahorro de energía y mano de obra, minimizando el estrés hídrico y maximizando rendimientos, así como la calidad, rentabilidad e ingresos en los cultivos.

La programación de riego se refiere al tiempo, la frecuencia y la cantidad de agua aplicada al cultivo. En otras palabras, cuándo y cuánto regar. Existen varios métodos y modelos para determinar la cantidad y el momento del riego. Los métodos generalmente se basan en el estado de humedad del suelo, parámetros climáticos y la etapa de crecimiento del cultivo (Cuadro 3 adaptado de Saxton et al. 1986).

**Cuadro 3. Constantes hídricas promedios para cinco clases texturales, expresadas en  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  (adaptado de Saxton et al., 1986).**

Textura	Saturación	CC	PMP	HA
Arenosa	0.3545	0.1280	0.0567	0.0714
Areno francosa	0.3878	0.1598	0.0764	0.0834
Franco arenosa	0.4697	0.2522	0.1740	0.0782
Franca	0.4617	0.2540	0.1180	0.1360
Franco arcillo arenosa	0.4784	0.2676	0.1724	0.0952

CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, HA: humedad aprovechable

El campo mexicano se sirve de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) para evitar el desperdicio de agua a través de IrriModel V 2.0, un software que programa el manejo y la gestión de riego en los campos de cultivo. La aplicación les permite a los productores locales optimizar la administración del recurso en condiciones críticas, sobre todo en las regiones donde se carece de agua.

Mediante la herramienta es posible pronosticar y calendarizar el riego de las parcelas en diferentes fechas de siembra y texturas de suelo, con base en información climática en tiempo real. Su uso ofrece una eficiencia de entre 60 y 80 por ciento si se emplean sistemas de riego por gravedad y 95 por ciento mediante la técnica de riego por goteo.

Esto representa un ahorro de entre 1 500 y 3 500 metros cúbicos de agua por hectárea. El usuario entra a IrriModel V 2.0 e ingresa datos sobre su cultivo, el tipo de riego que utiliza, la lluvia que ha caído en sus predios y la estación meteorológica más cercana a su parcela. Entonces el software se conecta con la estación, que le envía información en tiempo real sobre el clima.

El programa interpreta esa información y le indica al productor el momento y la cantidad de agua que tiene que utilizar para el riego. Sifuentes y Macías (2015) afirmaron que un factor importante para el éxito de este proyecto radica en que los

productores pueden consultar la información a través de sus computadoras y teléfonos inteligentes conectados a Internet.

### **III. HIPÓTESIS**

Conocer experimentalmente las capacidades operativas de los principales aspersores utilizados en sistemas de riego por aspersión fija (presión, lamina de riego, uniformidad de riego) en el norte de Sinaloa, permitirán seleccionar aquellos con las mejores características operativas y utilizarlas para el diseño y evaluación de estos sistemas, que operados mediante programación integral mejoran la eficiencia en el uso del agua, rendimiento y calidad de las cosechas.

## **VI. OBJETIVOS**

### **4.1. Objetivo general**

Determinar las capacidades operativas de los principales tipos de aspersores usados en sistemas de aspersión baja, operados mediante programación integral del riego en el cultivo de papa, en el norte de Sinaloa, México.

### **4.2. Objetivos específicos**

1. Evaluar la operación convencional de los sistemas de riego de aspersión baja en el norte de Sinaloa en el cultivo de papa.
2. Evaluar las capacidades de los aspersores seleccionados en riego por aspersión baja, operados mediante programación integral en términos de eficiencias de riego, rendimiento, calidad de la producción y costos-beneficio.
3. Actualizar parámetros y bases de datos requeridos por el modelo de programación integral del riego, que mejoren la precisión del modelo.

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Ubicación de la zona de estudio.

El trabajo se realizó durante el ciclo otoño-invierno (OI) 2021 en el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado frente a Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa a la altura del Km 1,609 de la carretera internacional México-Nogales (Figura 1), en la parte norte del estado con coordenadas 25° 48' 53" N y 109° 01' 32" O, dentro del distrito de riego 075 Río Fuerte, el cual colinda con los distritos 063 Guasave y 076 Valle del Carrizo.



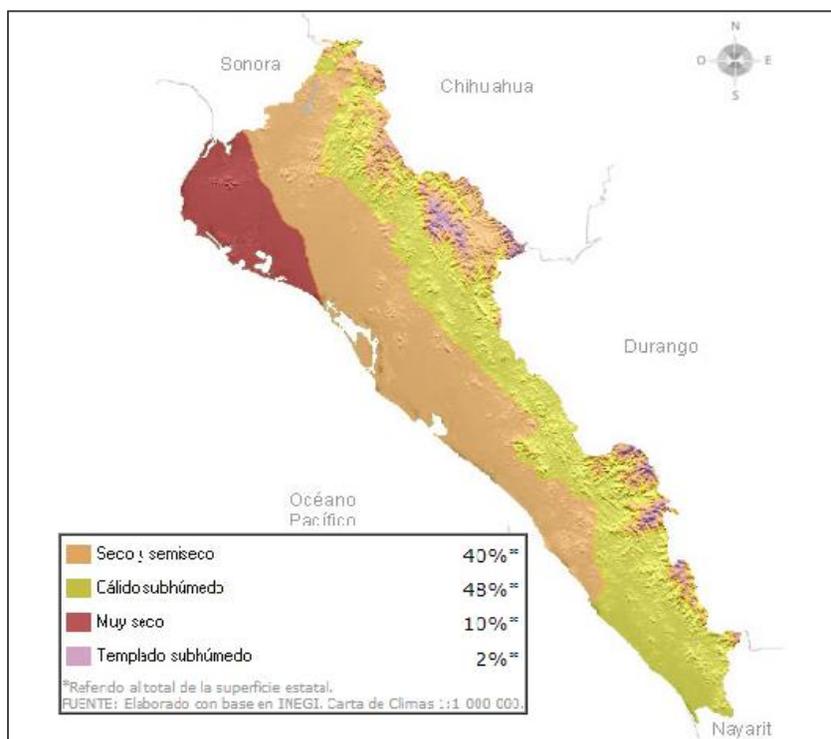
**Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.**

Esta región se considera como vulnerable a periodos de baja disponibilidad hídrica, la variación histórica del volumen almacenado en el sistema de presas al primero de octubre de cada año refleja un periodo de escasez de 10 años continuos (1995 a 2005) donde el año agrícola más crítico fue el 2003/2004 con solo el 30% de agua disponible (CONAGUA, 2019).

El 48% del estado presenta clima cálido subhúmedo localizado en una franja noreste-sureste que abarca desde Choix hasta los límites con Nayarit, el 40% es clima

seco y semiseco presentes en una franja que va desde El Fuerte hasta Mazatlán, el 10% es muy seco y se localiza en la zona de Los Mochis, el restante 2% es clima templado subhúmedo localizado en las partes altas de la Sierra Madre Occidental. Las zonas climáticas del estado de Sinaloa se muestran en la Figura 2. La temperatura media anual del estado es alrededor de 25°C, las temperaturas mínimas promedio son alrededor de 10.5°C en el mes de enero y las máximas promedio pueden ser mayores a 36°C durante los meses de mayo a julio.

Las lluvias se presentan en el verano durante los meses de julio a septiembre, la precipitación media del estado es de 790 mm anuales. Sinaloa es muy importante como productor agrícola nacional, las principales áreas de cultivo se encuentran en los climas secos y semisecos, por lo que requiere riego siendo los principales cultivos: maíz, frijol, papa, cártamo, soya, algodón, sorgo, garbanzo y cártamo entre otros. En la región que presenta clima cálido subhúmedo se cultiva jitomate, sandía melón y hortalizas.



**Figura 2. Zonificación climática del estado de Sinaloa (INEGI, 2017).**

De acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2018), las características geográficas adecuadas para la producción de papa son las siguientes:

- Altitud: 1,500 a 2,600 msnm.
- Lluvia: 400 a 1,200 mm.
- Temperatura: 15 a 20 grados centígrados.
- Edafología: Textura franca, arenosa, alto contenido orgánico, pH de 4.8-5.6

Sonora y Sinaloa son los principales productores de papa en el país; durante 2017, el volumen de sus cosechas les generó un ingreso en conjunto de 4 685 millones de pesos. Con producciones menores, Veracruz y Nuevo León, obtuvieron más de mil millones de pesos cada uno por la comercialización de las cosechas de papa.

## **5.2. Selección y características de lotes de estudio.**

### **5.2.1. Lote diagnóstico.**

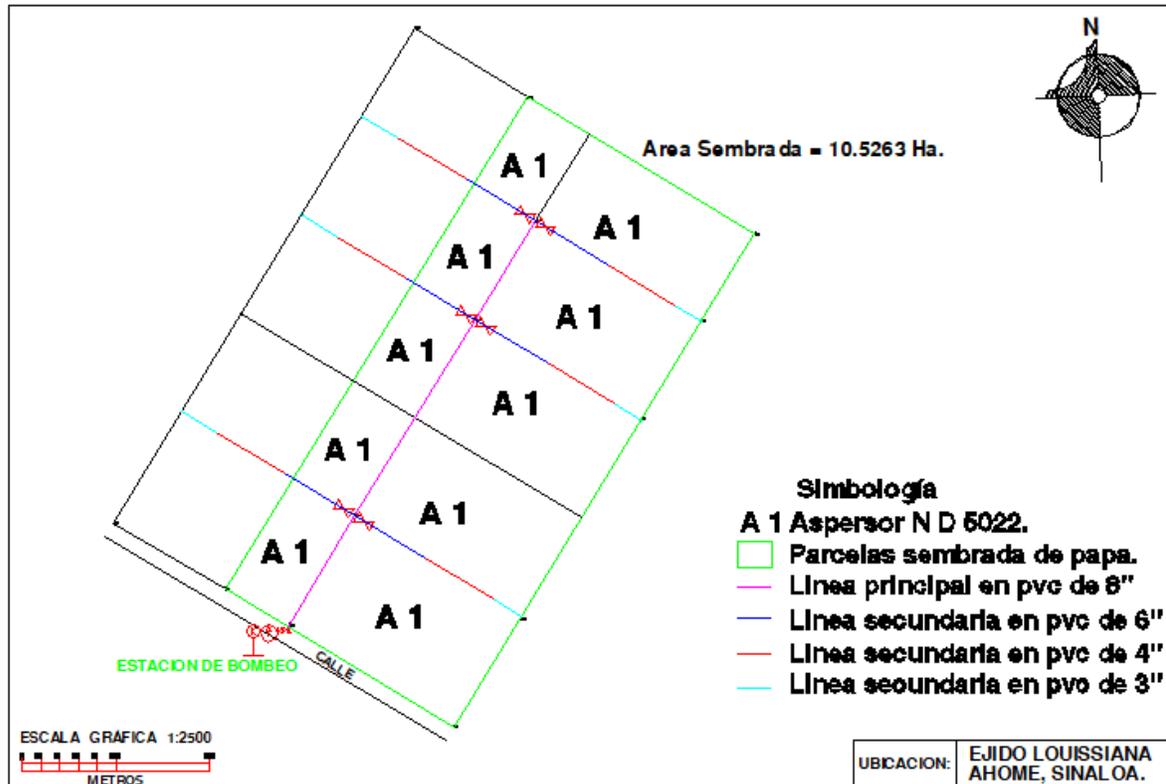
Se seleccionó un lote representativo de 10 hectáreas sembrado con papa, para la realización de un diagnóstico y evaluación del desempeño de los sistemas de riego de aspersión fija-baja en la zona de estudio, con suelo de textura franco-arcillosa, ubicada en el Módulo de Riego Taxtes III-2, DR075, en las coordenadas 25°46'24.90"N y 109° 4'40.91"O, en las inmediaciones del Ejido Plan de San Luis, Ahome, Sinaloa (Figura 3).



**Figura 3. Ubicación del lote diagnostico bajo estudio.**

El sistema utilizó aspersores marca Naan Dan modelo 5022, ese lote se dividió en tres sectores de similar tamaño, en cada uno de los cuadros, hasta donde fue posible, con el fin de facilitar el manejo del agua en los diferentes turnos de riego.

El agua se condujo en el terreno por medio de una tubería PVC clase 5 de 8", esta línea se conectó al equipo de bombeo y alimento al Sistema de Aspersión Fija-Baja. En la Figura 4 se observan las líneas secundarias de PVC en diámetros de 6" y 4", dichas líneas alimentaron a cada regante por medio de conectores de seguridad, como válvulas de seccionamiento, se utilizaron del tipo manual mariposa metálicas, con toma de presión para el manómetro.



**Figura 4. Plano y Diseño de sistema de riego del lote bajo estudio.**

El equipo de riego que se analizó consta de aspersores plásticos completos, marca Naan Dan modelo 5022, con una boquilla número 7.5. Radio de seis metros, y un espacio 12 metros entre aspersores. Cada aspersor incluye base de fierro de 25.4 mm x 1.2 metros y su tubing con conexiones rápidas. Su presión de operación ronda de los 30 a los 35 psi para una mayor uniformidad. Y un gasto máximo de  $1.43 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

El cultivo se estableció el 10 de noviembre de 2020, en bordos de 0.9 metros de ancho, utilizando la variedad Fiana con una densidad de siembra de  $40\,000 \text{ semillas ha}^{-1}$ .

El objetivo del diagnóstico y evaluación fue analizar el manejo de estos sistemas de riego e identificar problemas de operación que impacten negativamente en el rendimiento y calidad de cosechas e identificar aspectos para la mejora del desempeño de estos sistemas de riego.

El procedimiento de diagnóstico se realizó de la siguiente manera: antes de cada riego se revisaba que el número de válvulas abiertas fuera el que marcaba cada

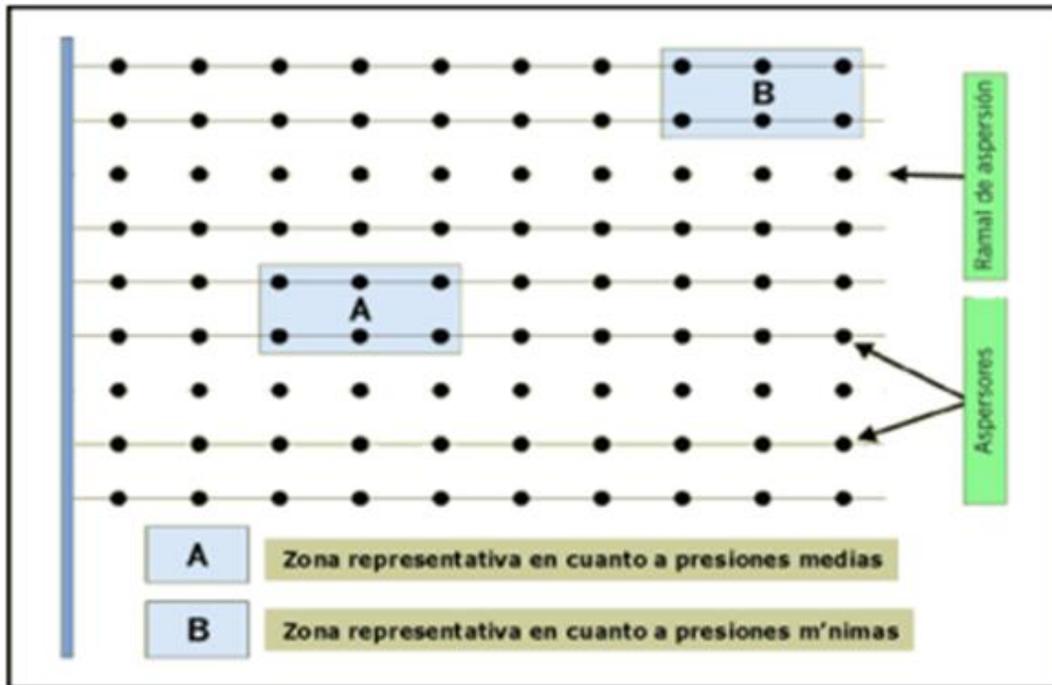
sección en el plano, al encender el motor del equipo de bombeo, se midió la presión de operación y los litros por segundo en el medidor de flujo de la estación de bombeo como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5. Evaluación de sistema de riego del lote bajo estudio.**

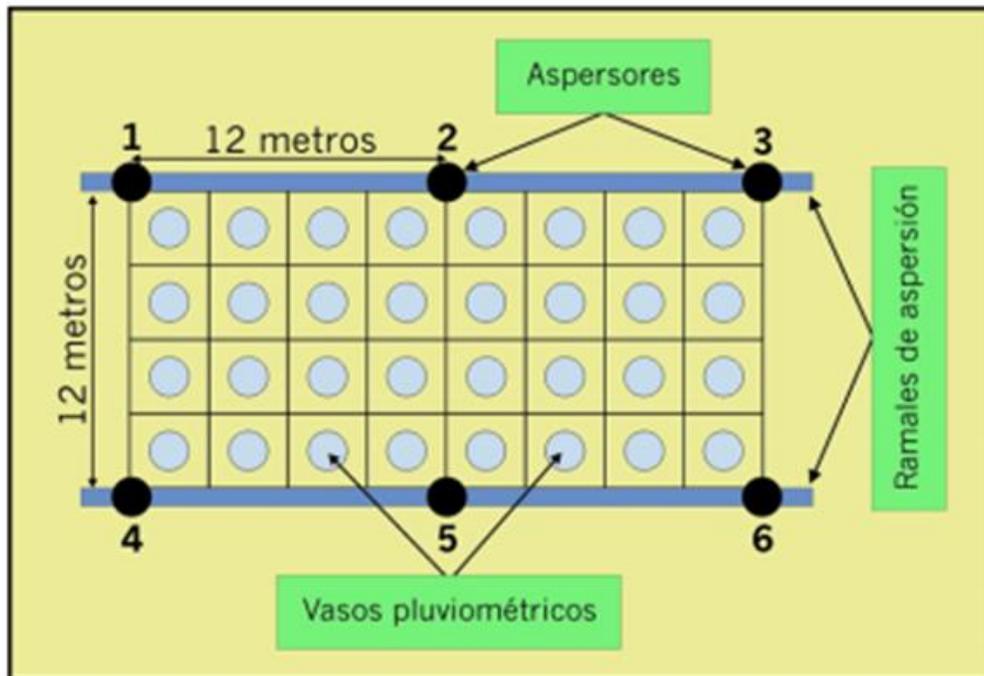
Para evaluar la uniformidad de un sistema de riego por aspersión el primer paso fue elegir la zona de evaluación, la cual fue representativa del sistema respecto al desempeño de los aspersores, marco de riego, número de boquillas y diámetro. También se tomó la presión cercana a la media (lo que ocurre a un tercio del inicio de los ramales de aspersión, si no existe pendiente o es reducida) o a la mínima (lo que se produce al final de los ramales si la pendiente es nula o ascendente), lo anterior se realizó en ambas zonas.

Antes de iniciar cada riego, se instaló una red de vasos pluviométricos formando una malla de 6 x 6 metros entre dos ramales como se observa en la Figura 6, que recogieron agua de cuatro aspersores.



**Figura 6. Diagrama de evaluación de aspersores en el lote.**

Los vasos se instalaron sobre el suelo donde el cultivo no altere la lluvia de los aspersores, y justo sobre el cultivo en caso contrario (Figura 7).



### **Figura 7. Ubicación de los vasos pluviométricos en la zona de estudio.**

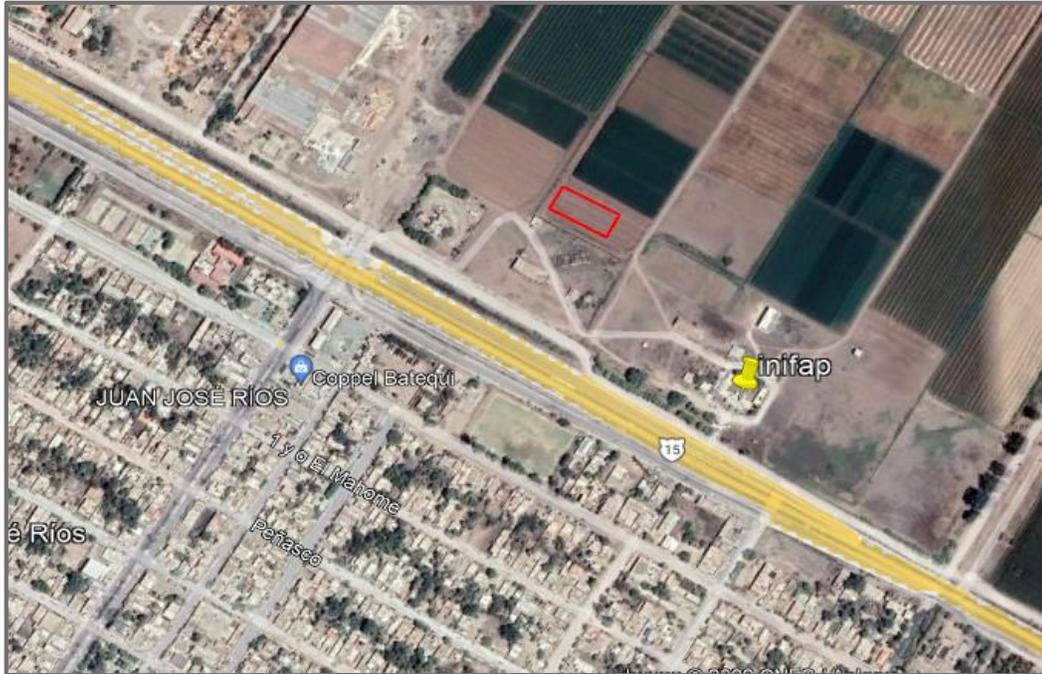
Al finalizar los riegos se procedió a entrar al lote a revisar los pluviómetros, midiendo la cantidad de agua recolectado por cada uno de ellos, para hacer un análisis final del procedimiento y manejo del equipo de acuerdo a esos resultados

Para completar la evaluación del sistema de riego por aspersión, fue necesario comprobar si el manejo que se estaba haciendo del riego era el correcto, una vez analizados los componentes de la instalación y la uniformidad del riego. Por ello fue necesario conocer la frecuencia y la duración de los riegos.

Para el caso del lote que fue analizado en esta etapa de estudio, se recolectaron datos del lote del agricultor con manejo convencional del riego y se anexaron a la plataforma IRRIMODEL. Se comparó con una programación que arrojó IRRIMODEL, comparando eficiencia entre lo realizado por el agricultor y lo programado por IRRIMODEL.

### **5.3. Lote experimental.**

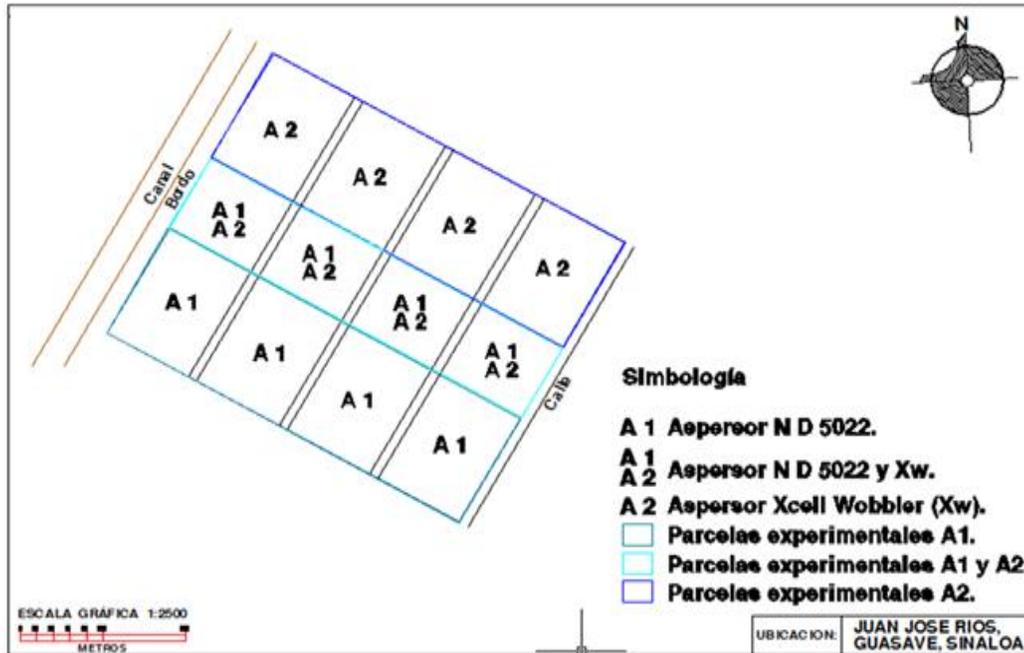
El lote experimental se estableció dentro del CEVAF en las inmediaciones de Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa (Figura 8), en un lote de 0.12 ha bajo riego por aspersión fija-baja. Se evaluaron dos tipos de aspersores.



**Figura 8. Mapa de Ubicación del lote bajo estudio CEVAF.**

### **5.3.1. Descripción del tratamiento.**

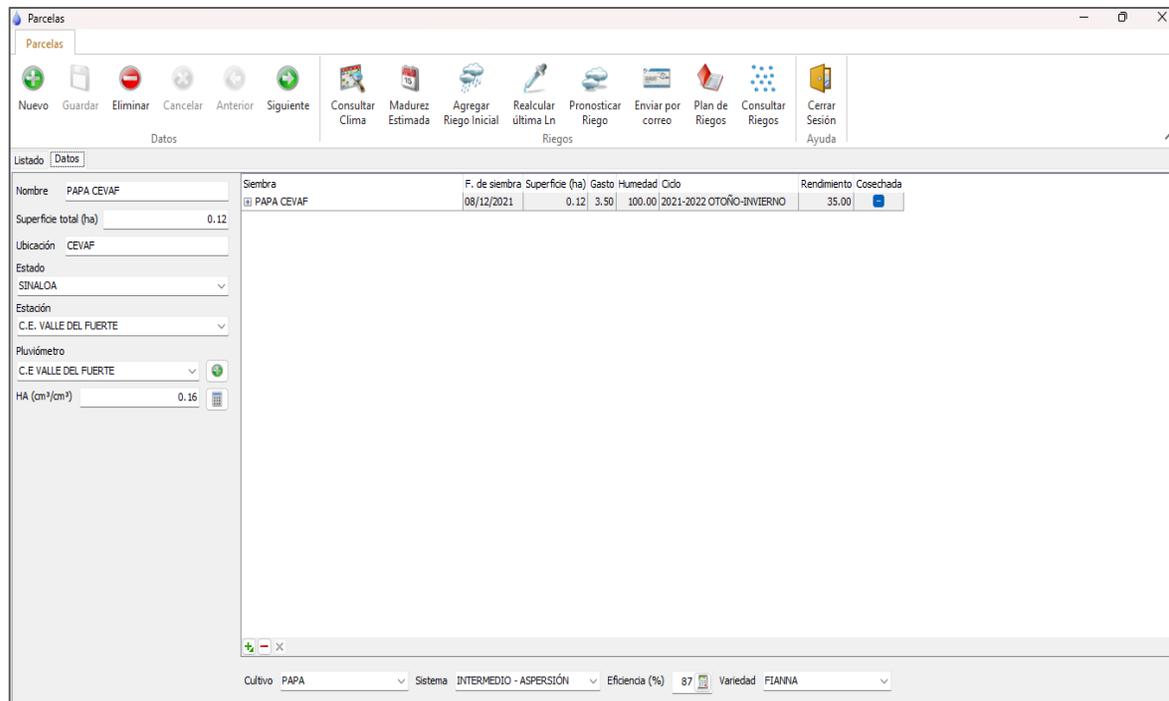
Se estableció un lote experimental en el cual se instalaron tres secciones de aspersores en cultivo de papa. Una sección está compuesta por 12 aspersores de la marca Senninger, modelo Xcell Wobbler y la segunda sección 12 aspersores de la marca Naan Dan, Modelo 5022, como se muestra en la Figura 9.



**Figura 9. Croquis del lote experimental, INIFAP-CEVAF, ciclo agrícola OI 2021-2022.**

### 5.3.2. Establecimiento y manejo del cultivo.

La preparación del terreno se realizó de manera convencional, consistiendo en un barbecho, rastreo cruzado y marca de surcos. Antes de la siembra se realizó un análisis físico-químico de suelo y se aplicó un riego por gravedad para humedecer la zona de raíces, estimada en 1 m del perfil de suelo. El cultivo se estableció el 08/12/2021 en un lote de 1 200 m<sup>2</sup> usando una densidad de siembra de 4 a 5 tubérculos por metro lineal para tener una densidad de siembra de 50 000 semillas ha<sup>-1</sup>, y una separación entre surcos de 0.8 m con longitud de 40 m. El cálculo de grados-día desarrollo (GDD), láminas y volúmenes de riego se realizó con la plataforma IRRIMODEL del INIFAP (Sifuentes y Macías, 2015) con parámetros convencionales (Figura 10). El manejo de plagas y enfermedades se hizo de acuerdo a recomendaciones del INIFAP-CEVAF (Sifuentes et al., 2008).



**Figura 10. Interface principal de la plataforma IRRIMODEL para la programación integral del riego.**

### 5.3.3. Variables medidas.

La medición de las variables suelo-planta se realizó en forma manual en sitios de muestreo ubicados en cada parcela experimental (repeticiones), como se describe a continuación:

#### 5.3.3.1 Humedad volumétrica del suelo.

El contenido de agua en el suelo es una de las principales limitantes para el crecimiento de las plantas. Tanto su exceso como su carencia, provocan un efecto que va en detrimento del rendimiento de los cultivos, por lo que su estimación y la variación de su contenido en el campo en forma rápida, es uno de los aspectos prioritarios para el manejo adecuado de este importante recurso en los agro ecosistemas. Se sabe que el contenido de agua en el suelo es fundamental para todos los procesos de crecimiento de las plantas, en particular en su nutrición, debido a que funciona como medio de transporte de los elementos a través de un mecanismo de flujo de masa lo

cual incrementa el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Gavande, 1973; Porta et al., 2003; Torrán 2007).

Esta variable se midió en dos estratos del perfil de suelo (0-30 y 30-60) utilizando sensor de humedad portátil TDR calibrado localmente en forma gravimétrica. La frecuencia de medición se trató de realizar antes de cada riego.

#### **5.3.3.2 Índice de clorofila (SPAD).**

El índice SPAD (Soil Plant Analysis Development) obtenido por el clorofilómetro portátil, es proporcional a la cantidad de clorofila presente en la hoja (Minolta Camera Co. 1989). El SPAD determina la cantidad relativa de clorofila presente mediante la medición de la absorción de la hoja en dos regiones de longitud de onda; en las regiones roja y cercanas a infrarroja. Este índice se midió con sensor conocido como SPAD en la última hoja desarrollada utilizando el promedio de tres repeticiones en la misma hoja.

#### **5.3.3.3 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).**

El NDVI ayuda a diferenciar la vegetación de otros tipos de cobertura del suelo (artificial) y determinar su estado general. También permite definir y visualizar áreas con vegetación en el mapa, así como detectar cambios anormales en el proceso de crecimiento. Este índice se midió con sensor Green-Seeker portátil en cinco metros de planta a 60 cm por encima de este. Para el cálculo del índice NDVI en QGIS, se debe utilizar la Calculadora de Ráster QGIS cargando los datos necesarios. El NDVI se calcula con la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

La fórmula para calcular el índice NDVI en ArcGIS no varía y, al igual que en QGIS, hay una Calculadora de Ráster propia donde introducir manualmente o cargar los datos de entrada. ArcGIS también posee una extensión llamada Image Analyst que permite la visualización avanzada de imágenes de forma automática. el NDVI tiene una escala de valores que van de -1 a 1. Los valores negativos de NDVI corresponden a áreas con superficies de agua, estructuras hechas por el hombre, rocas, nubes o

nieve; el suelo desnudo suele estar dentro del rango de 0.1 a 0.2 y las plantas siempre tendrán valores positivos entre 0.2 y 1. El dosel de la vegetación densa y saludable debería estar por encima de 0.5, y la vegetación dispersa muy probablemente estará dentro del rango de 0.2 a 0.5. Sin embargo, es sólo una regla general y siempre hay que tener en cuenta la estación, el tipo de planta y las peculiaridades regionales para saber la interpretación de los valores del NDVI correcta (Eos Crop, 2020).

#### 5.3.3.4 Fenología del cultivo.

En 1991, los investigadores Jefferies y Lawson desarrollaron la guía que se divide en siete estados principales de desarrollo: Germinación de semilla y emergencia, dormancia o inactividad del tubérculo, brotación del tubérculo, emergencia y desarrollo de brotes, floración, desarrollo de tubérculos y madurez. Al igual que la guía descrita anteriormente, los estados principales fueron divididos en fases intermedias, a las que se les asignó una clave de identificación. Sifuentes et al. (2008), adaptaron esta metodología como se muestra en el siguiente cuadro:

**Cuadro 4. Fenología de la papa en el Valle del Fuerte, Sinaloa, en función de tiempo térmico (Sifuentes et al. 2008).**

No.	Etapa	Clave
1	Brotación	B
2	Emergencia	E
3	Inicio de estolonización	le
4	Elongación de estolones	Ee
5	Inicio de tuberización (diám:> 1 cm)	It
6	Desarrollo de Tubérculos (3-5 cm)	Dt
7	Tubérculos desarrollados (> 5 cm)	Td
8	Desvare (cáscara completa), diám: 7 cm	D
9	Cosecha	C

### **5.3.3.5 Materia fresca y materia seca.**

Se realizó en forma destructiva en un metro lineal de plantas. Se extrajeron las plantas completas y se determinó el peso fresco de cada órgano. El peso seco o materia seca se determinó utilizando una muestra de 200 g de cada órgano de la muestra en fresco la cual se secó en horno de aire forzado a 65 °C hasta peso constante.

### **5.3.3.6 Desempeño de aspersores.**

**5.3.3.6.1 Variabilidad espacial de la humedad del suelo:** La variabilidad de las propiedades del suelo es una condición inherente al mismo, debido a que en su formación intervienen varios procesos diferentes que, a su vez, están controlados por los factores de formación (clima, material parental, organismos, relieve y tiempo). Estas interacciones pueden ser muy variadas dando como consecuencia una alta cantidad de suelos posibles (Jaramillo, 2011).

La variabilidad de la humedad del suelo está gobernada por un conjunto amplio de factores cuya importancia está condicionada por la escala espacio temporal de análisis (Western et al., 1998). Vinnikov et al. (1996) y Wagner et al. (1999) distinguen, de forma general, entre una escala de detalle o local, en donde el dominio espacial varía en un rango de centenas de metros y el temporal es de varios días; y una escala regional, en donde el dominio espacial es del orden de 400-800 km, y el temporal siempre superior a un mes. En el primer caso, una serie de factores locales como la topografía (pendiente, orientación, curvatura de la ladera, área de contribución específica, elevación relativa), propiedades del suelo (textura, materia orgánica, estructura y macro porosidad) y cobertura vegetal, explicarán las diferencias (Famiglietti et al., 1998; Gómez-Plaza et al., 2001); mientras que en el segundo caso el factor climático será clave (Seyfried, 1998; Entin et al., 2000).

La variabilidad espacial se realizó con los valores de humedad en cada repetición, se realizó un análisis de varianza con Infostat (<https://www.infostat.com>) y la ecuación de Christiansen. En la Figura 11 se muestra la toma de muestras de humedad dentro del lote experimental.



**Figura 11. Medición de variables de humedad del suelo.**

**5.3.3.6.2 Patrón de aplicación:** El patrón de humedecimiento de los aspersores varía con la distancia (Figura 12). La máxima cantidad de agua cae cerca del aspersor y disminuye en la medida que se aleja de éste. Por tal motivo, las áreas de mojado de los aspersores deben tener un traslape completo para aplicar láminas de agua uniforme. Esto se relaciona también con las condiciones de viento de la zona, ya que éste modifica la distribución del agua. Para determinar esta variable se instalaron Pluviómetros en puntos específicos del lote, destinado a medir la cantidad de agua caída, en forma de lluvia, expresada a través de la cantidad de litros o milímetros caídos por metro cuadrado. Se instaló una línea vertical y transversal de Pluviómetros (formando una cruz) con el fin de determinar la lámina aplicada en cada tratamiento.



**Figura 12. Patrón de aplicación de agua de los aspersores evaluados con separación de 9 x 9 metros.**

**5.3.3.6.3. Eficiencia de aplicación (Ea):** Es la relación entre el agua realmente almacenada en la zona de raíces de la planta (y por lo tanto disponible para el uso de la planta) y el agua total aplicada durante el riego. La fórmula utilizada para determinar la eficiencia de la aspersión es:

$$Ea = (Ln/Lb) \times 100$$

Donde Ln es la cantidad neta de agua que se necesita aplicar en riego para cubrir el consumo de agua del cultivo durante la evapotranspiración. Lb es el espesor (expresado en centímetros) de la capa de agua ocupada por una determinada cantidad de agua extraída de una determinada fuente de área regada. Para los principales sistemas de riego la eficiencia de aplicación es la siguiente: aspersión baja presión: 0.75-0.80; alta presión: 0.60-0.65; pivote: 0.80-0.85; avance frontal: 0.70-0.75; riego localizado: 0.85-0.90; gravedad: 0.45-0.50. (Cun, 2010; Ríos, 2015)

**5.3.3.6.3 Eficiencia de uniformidad:** La uniformidad es la distribución equitativa de agua y se mide como la habilidad para aplicar la misma profundidad de agua en cada zona, en el caso de riego por aspersión, o el mismo volumen de agua a cada planta, en el caso de riego por goteo. Uniformidad es la clave para realizar un riego suficiente y eficiente. Para evaluar esta uniformidad en la distribución en la lámina infiltrada se utiliza el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC).

$$CUC=1-\frac{\sum_{i=1}^n |I_i - I_m|}{n I_m}$$

Dónde: CUC es el coeficiente de uniformidad de Christiansen (%)  $I_i$ : Intensidad medida en cada pluviómetro (mm/h)  $I_m$ : Intensidad media de todas las observaciones (mm/h)  $n$ : Cantidad de observaciones totales. (Rendón y Fuentes, 2007).

## 5.4. Actualización de bases de datos y parámetros en el modelo integral de riego

### 5.4.1. Clima

Se actualizó una base de datos climáticos histórica de 1997 a 2022 de la estación meteorológica automatizada C.E. Valle del Fuerte, perteneciente a la red nacional de estaciones del INIFAP, ubicada frente al lote de estudio. La Figura 13 muestra la base de datos de Temperatura media del periodo mencionado.

	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
4	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
5	18.02	15.70	18.03	17.89	16.40	16.80	18.10	18.46	16.68	14.6	14.44	17.74	16.64	14.27	17.56
6	18.32	16.11	15.33	19.03	15.80	17.40	17.00	18.99	17.27	13.2	16.07	18.06	16.29	13.86	19.36
7	18.95	15.41	13.56	21.00	16.00	17.90	16.30	19.33	17.41	12.9	16.71	14.97	16.57	14.42	19.58
8	18.96	17.07	13.23	22.80	14.90	18.10	15.70	19.56	17.76	14.9	17.31	15.32	17.22	16.69	18.88
9	18.10	15.24	13.91	21.64	14.90	19.00	15.70	18.04	17.62	15.2	20.95	17.42	17.00	15.86	17.42
10	16.01	16.20	12.25	21.12	15.40	19.60	16.10	15.05	17.98	14.0	18.42	13.55	16.24	17.72	16.61
11	13.56	16.98	12.60	19.57	16.00	19.50	16.30	15.37	19.06	16.6	16.24	14.80	15.78	17.69	16.83
12	14.30	15.78	13.68	17.75	16.90	20.40	16.90	17.66	18.55	16.5	15.46	14.89	17.92	14.64	16.76
13	14.86	14.80	13.74	17.36	16.10	19.60	17.40	17.80	17.02	18.6	15.41	16.18	18.21	13.40	13.54
14	16.04	15.05	14.75	16.25	16.80	18.90	17.70	19.02	16.96	19.6	14.55	15.38	17.15	13.40	14.47
15	16.21	15.68	14.49	17.40	16.00	19.20	18.30	20.03	16.87	18.5	15.65	15.25	16.94	14.88	14.9
16	16.04	14.50	16.13	16.07	17.60	18.50	18.40	15.89	16.56	20.3	15.37	15.29	17.11	14.56	15.81
17	15.94	14.28	17.10	15.83	16.80	18.90	18.20	15.03	16.67	17.2	14.68	16.11	17.62	14.66	16.1
18	16.41	15.05	18.78	14.41	15.60	19.10	17.60	15.80	19.36	13.6	13.32	15.77	15.89	14.20	18.06
19	16.85	15.13	18.30	15.61	15.60	19.10	16.70	17.34	19.09	12.0	13.05	16.82	16.28	13.62	19.71
20	16.18	15.14	19.11	13.49	17.70	19.20	15.90	18.41	14.60	13.8	13.20	17.98	16.80	14.70	18.68
21	16.34	15.66	18.62	13.40	19.10	19.40	15.40	17.43	13.19	13.9	12.56	18.76	17.44	15.36	18.94
22	17.98	16.22	19.01	12.89	19.40	19.30	15.60	18.16	14.56	15.0	11.93	18.53	16.63	15.02	17.5
23	17.72	17.07	18.16	13.58	17.70	19.10	15.60	19.94	13.50	14.4	13.17	19.91	17.25	16.12	15.75
24	16.98	16.67	18.24	15.15	17.40	19.00	15.30	19.22	15.22	13.2	13.42	21.41	16.18	17.92	15.61
25	16.92	17.46	16.19	16.44	16.30	18.70	15.50	19.94	14.83	12.3	12.52	21.11	17.20	16.58	15.8
26	17.57	16.82	15.59	16.38	16.80	18.90	14.90	17.03	13.99	11.1	15.15	21.81	20.01	15.98	16.11

Figura 13. Base de datos climáticos histórica de la estación CEVAF 1997-2022.

#### 5.4.2. Fenología.

Se utilizaron los parámetros de fenología de acuerdo al tiempo térmico en el Valle del Fuerte, existentes en el programa IRRIMODEL y se actualizaron de acuerdo al ciclo 2021-2022 para tener datos más exactos sobre el desarrollo del cultivo de acuerdo al tiempo térmico acumulado, en el Cuadro 5 se muestran los datos existentes en el programa IRRIMODEL.

**Cuadro 5. Fenología del cultivo de papa, de acuerdo al tiempo térmico en el Valle del Fuerte, Sinaloa. (Sifuentes y Macías, 2015).**

No	Etapa	Clave	GDD (° C)	GDDA (° C)	DF (%)
1	Siembra	S	0.00	0.00	0.00
2	Brotación	B	286.00	286.00	14
2	Emergencia	E	246.00	532.00	26
3	Inicio de estolonización	IE	178.00	710.00	35
4	Elongación de estolones	EE	218.00	928.00	46
5	Inicio de tuberización (diám:> 1 cm)	IT	191.00	1119.00	55
6	Desarrollo de Tubérculos (3-5 cm)	DT	195.00	1314.00	65
7	Tubérculos desarrollados (> 5 cm)	TD	292.00	1606.00	79
8	Desvare (cáscara completa), diám: 7 cm	D	200.00	1806.00	89
9	Cosecha	C	212.00	2018.00	100

### 5.4.3. Parámetros del modelo.

Se realizó un ajuste de los parámetros del IRRIMODEL, los cuales se muestran en el Cuadro 6.

**Cuadro 6. Componentes del modelo de programación integral del riego para el cultivo de papa bajo riego por aspersión fija-baja en el norte de Sinaloa, México (ajustado de Ojeda et al., 2004).**

Variable	Función	Parámetro
Coeficiente de cultivo (Kc)	$K_c = \frac{K_{m\acute{a}x} \operatorname{erfc}[(x - x_{m\acute{a}x})]^2}{\alpha_1}$ <p>Si <math>K_c &lt; K_{c_0}</math>, entonces <math>K_c = K_{c_0}</math></p>	$K_{m\acute{a}x} = 1.3$ $XK_{m\acute{a}x} = 0.52$ $\alpha_1 = 0.45$ $K_{c_0} = 0.2$
Profundidad radical (Pr)	$Pr = Pr_0 + (Pr_{m\acute{a}x} - Pr_0) \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{(GDD_n)^2}{\alpha_2^2} \right] \right\}$	$Pr_0 = 0.2 \text{ m}$ $Pr_{m\acute{a}x} = 0.7 \text{ m}$ $\alpha_2 = 600$
Máximo déficit de humedad permisible (MDP)	$MDP = \alpha_3 \cdot \alpha_1 K_c$	$\alpha_3 = 0.35$

$K_{c_0}$  representa el coeficiente de cultivo para la primera etapa fenológica la cual depende esencialmente de la evaporación del suelo,  $K_{m\acute{a}x}$  es el máximo valor de  $K_c$  durante su desarrollo,  $XK_{m\acute{a}x}$  corresponde a una variable auxiliar definida por los GDDA cuando el cultivo alcanza su máximo  $K_c$ ,  $\alpha_1$  es un parámetro de regresión obtenido mediante ajuste de datos experimentales,  $\operatorname{erfc}$  es la función complementaria del error y  $x$  es una variable auxiliar calculada con la siguiente ecuación.

$$x = \frac{GDDA}{\alpha_0}$$

Dónde: GDDA es el valor acumulado de GDD desde la siembra hasta la fecha de cálculo y  $\alpha_0$  son los GDDA requeridos hasta el final del ciclo fenológico.  $Pr_0$  y  $Pr_{m\acute{a}x}$  representan la profundidad de siembra y profundidad máxima de la raíz respectivamente, el valor  $\alpha_2$  fue ajustado empíricamente de un valor aproximado a 2/3 del valor de GDDA donde la papa alcanza la profundidad radical máxima. El parámetro  $\alpha_3$  representa el valor máximo de abatimiento de humedad durante el ciclo del cultivo.

## 5.5. Rendimiento y calidad.

El análisis del rendimiento y calidad de la producción se llevó a cabo sacando la muestra de tubérculos en cuatro surcos de 0.80 cm y un metro lineal que dio un área de 3.2 m<sup>2</sup>, esto se hizo en cada uno de los dos tratamientos establecidos y en el área de traslape entre los dos tratamientos, con tres repeticiones por tratamiento. Y se convirtió el resultado a kg/ha por medio de la siguiente formula:

$$Y = \frac{PM}{AM} \times 10\ 000$$

Donde Y es el rendimiento estimado en kg ha<sup>-1</sup>, PM representa el peso medido (kg) y AM representa el área muestreada (m<sup>2</sup>). Con los resultados obtenidos de estos muestreos se utilizó la clasificación de los tubérculos de papa con base en el diámetro ecuatorial, de acuerdo a Sifuentes et al. (2008), como se muestra en el Cuadro 7.

En el mejoramiento de papa es común aplicar la técnica de selección negativa, la cual se basa en descartar, principalmente, los materiales que tengan defectos obvios, para así lograr una intensidad moderada en la selección de características que implican la discriminación visual (Tai y Young 1984, Love et al. 1997).

**Cuadro 7. Clasificación de tubérculos de papa con base en el diámetro ecuatorial utilizado en el norte de Sinaloa, México (Sifuentes et al., 2008).**

Calidad	Clave	Diámetro (mm)
Primera	C1	71-80
Segunda	C2	51-70
Tercera	C3	41-50
Cuarta	C4	31-40
Quinta	C5	21-30
Gigantes	GIG	>80
Deformes	DEF	---
Rezagas	REZ	---

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 6.1. Lote diagnóstico.

#### 6.1.1. Láminas y eficiencias de aplicación.

El Cuadro 8 muestra el resumen de riegos aplicados por el productor que fueron seis riegos de auxilio y el riego de presiembra, con láminas aplicadas desde 2.9 hasta 9.4 cm en los auxilios y de 16.5 cm en el riego inicial, con una eficiencia promedio de 67.87%. El requerimiento de riego o lámina neta ( $L_n$ ) fue de 29.62 cm, menor al estimado por el modelo el cual sugiere 30.87 cm debido a menor estrés hídrico que incrementa la evapotranspiración del cultivo y rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1979). Sin embargo, la lámina bruta o por aplicar es 10 cm menor al convencional, lo cual también ayudará a reducir la presencia de enfermedades.

**Cuadro 8. Resumen de riegos aplicados de acuerdo al manejo tradicional del productor, en lote diagnóstico de papa. Fecha de siembra 20/11/2020.**

Número de riego	Días al riego	Lámina neta (cm)	Lámina bruta (cm)	Eficiencia de aplicación (%)
1	-31	9.98	16.50	60.48
2	26	2.52	2.90	87.00
3	33	1.31	3.39	38.64
4	41	2.07	3.40	60.89
5	62	5.88	9.40	62.57
6	71	3.66	4.87	75.22
7	81	4.20	4.65	90.30
<b>Total</b>		<b>29.62</b>	<b>45.10</b>	<b>67.87</b>

El rendimiento obtenido mediante la aplicación del calendario de riegos anterior fue de 38 Mg ha<sup>-1</sup>, el cual es posible incrementar en cantidad y calidad mediante la aplicación del modelo integral.

El Cuadro 9 muestra un resumen de riegos programados para la producción de papa mediante riego por aspersión fija-baja generado mediante el modelo integral

propuesto y la plataforma IRRIMODEL. Este modelo recomienda aplicar 12 riegos de auxilio con láminas de 1.5 a 2.4 cm por riego y una lámina total de 35.49 cm, considerando una eficiencia de aplicación del 87%.

**Cuadro 9. Resumen de riegos programados con el modelo integral usando la plataforma IRRIMODEL ©, en lote diagnóstico de papa.**

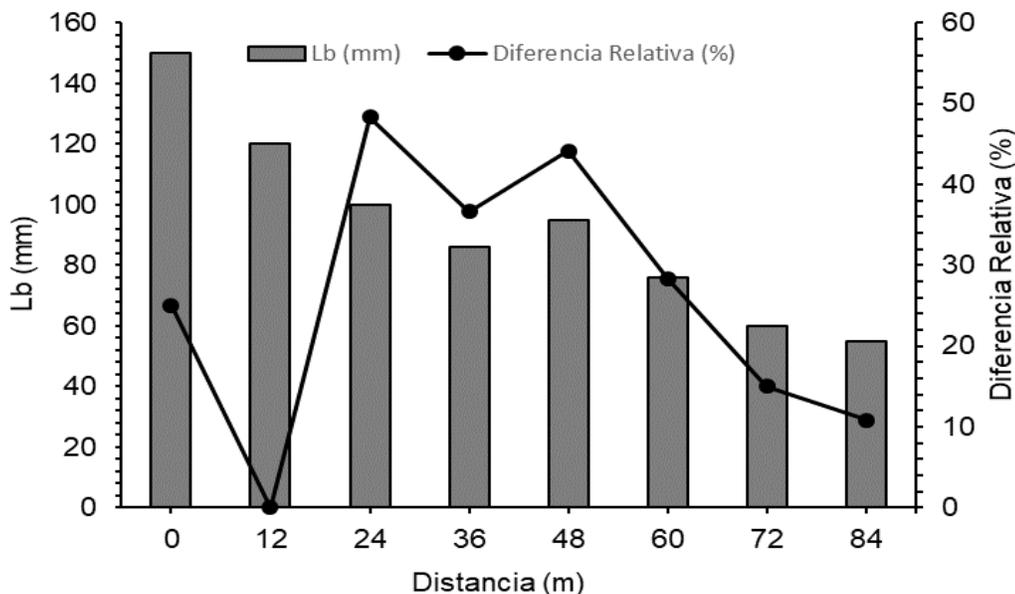
Número de riego	Días al riego	Lámina neta (cm)	Lámina bruta (cm)	Eficiencia de aplicación (%)
1	-31	9.98	11.47	87
2	16	1.28	1.47	87
3	27	1.54	1.77	87
4	35	1.54	1.77	87
5	41	1.64	1.89	87
6	47	1.78	2.04	87
7	54	1.96	2.26	87
8	60	1.79	2.06	87
9	64	1.71	1.97	87
10	69	1.98	2.27	87
11	73	1.80	2.07	87
12	77	1.77	2.03	87
13	82	2.10	2.42	87
<b>Total</b>		<b>30.87</b>	<b>35.49</b>	<b>87</b>

La utilización de menor gasto de agua se encuentra en función de la disponibilidad en la fuente de abastecimiento como la capacidad del suelo para retener agua, como consecuencia de esto se obtiene la reducción del perímetro mojado y áreas de riego (Gurovich, 1999).

## 6.1.2. Desempeño de la operación.

### 6.1.2.1. Coeficiente de distribución de Christiansen (CUC).

La Figura 14 presenta los resultados obtenidos en función de la prueba de aforo volumétrico, tomando ocho datos como referencia siguiendo la diagonal de presión, obteniendo caudales de 55 mm hasta 150 mm.



**Figura 14. Resultados de pruebas pluviométricas en lote testigo con aspersor Naan Dan 5022.**

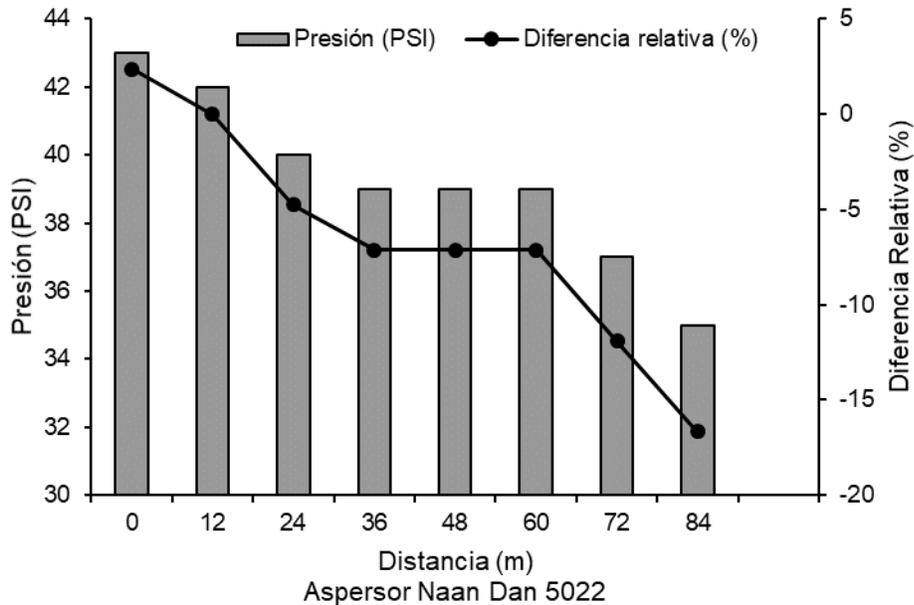
### 6.1.2.2. Presión.

Los sistemas de riego por aspersión están basados en la conducción del agua desde un punto de almacenamiento hasta los emisores, circulando por una red de distribución de tuberías cerradas para que el agua llegue a los puntos de emisión, siendo preciso que circule con suficiente presión y poder superar las diferencias de alturas que pueda encontrar desde la fuente de abastecimiento hasta el momento de su descarga (Sevilla, 2010).

La Figura 15 presenta los datos obtenidos de presión en ocho aspersores siguiendo la diagonal de presión, existiendo variabilidad entre los datos de presión que van desde 35 psi hasta 43 psi presentando una variabilidad muy significativa debido a

que las presiones de menores valores son de los emisores que se ubican más lejos de la fuente de abastecimiento, lo cual nos habla de un mal manejo del sistema de riego.

Existe una diferencia relativa del 19% en las presiones de los aspersores, lo cual indica que existe un mal manejo de las presiones en el lote testigo, ya que, al encontrarse más lejos del punto de bombeo, se tendría que aumentar las presiones para disminuir la diferencia relativa y de esta manera hacer más eficiente el trabajo del aspersor.



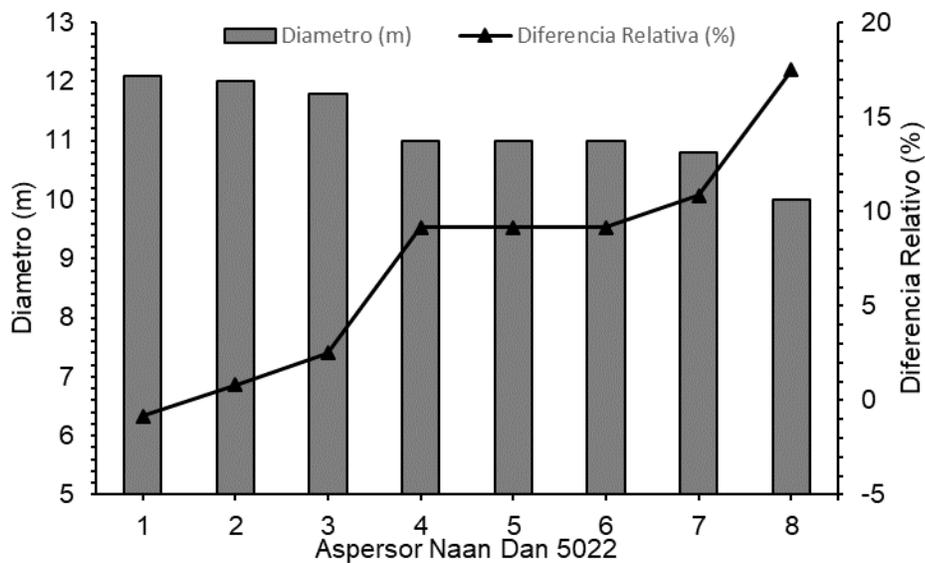
**Figura 15. Comportamiento de la presión (psi) en una línea de aspersores Naan Dan 5022, en el tercer riego de auxilio en lote diagnóstico de papa.**

### 6.1.2.3. Diámetro de mojado.

Cuando la intensidad de aplicación del riego es alta, descompone la estructura del suelo y altera su composición, esto impide que las siguientes aplicaciones no infiltren apropiadamente y esto da como resultado la acumulación del agua en la superficie y la generación de escorrentías que arrastran parte del suelo si existen pendientes. El viento es uno de los principales elementos que distorsiona el perfil de distribución de la lluvia del aspersor de tal forma que, a mayor velocidad del viento, mayor distorsión del chorro de agua, así que, para lograr mayor área regada o buen

humedecimiento de la superficie, es necesario que exista un buen solapamiento por tal razón los marcos de separación son fundamentales (Sevilla, 2006).

En la Figura 16 se muestran los resultados de diámetro de humedecimiento a través de los radios de alcance medidos, los datos fueron tomados en los mismos 8 aspersores donde fue tomado la variable de presión y caudal, siguiendo la diagonal de presión, obteniendo resultados de 10 m hasta 12.10 m de diámetro, el marco de separación actual del sistema de riego establecido en el lote diagnóstico es de 12 x12 m, en la cual se presenta una diferencia relativa del 17% la más alta en el traslape entre ellos. Esto debido al mal manejo de las presiones en el sistema de riego por aspersión. A menores presiones en el sistema mayor será la diferencia relativa, afectando de manera significativa el traslape entre aspersores y por lo tanto la uniformidad del riego aplicado.



**Figura 16. Diámetros de mojado en metros entre aspersor y aspersor (marco de instalación).**

## **6.2. Lote experimental.**

### **6.2.1. Láminas y eficiencia de aplicación (EA).**

El Cuadro 10 muestra un resumen de riegos aplicados para la producción de papa mediante riego por aspersión fija-baja generado mediante el modelo integral propuesto y la plataforma IRRIMODEL. Se aplicaron 11 riegos de auxilio con láminas de 2.2 a 3.9 cm por riego y una lámina total de 33.90 cm, con una eficiencia de aplicación del 87% en los riegos de auxilio 3 al 12, de 61% en el riego de asiento y 75% en los riegos 1 y 2, obteniendo un promedio de 83.15%, lo cual es similar a o lo reportado por Pacheco-Sagui y Pérez-Correa (2010) donde evalúan la pluviometría de un equipo de aspersión por pivote central, donde el coeficiente de uniformidad fue de 84.5% y según Montero et al. (2005) una parcela está bien regada cuando se consigue un coeficiente de uniformidad entre el 85 y 90%.

Determinar el comportamiento de las láminas que se pueden aplicar en un área durante el riego, es fundamental debido que se logra determinar las cantidades de agua que el suelo podría captar y poder ser caracterizado como suelo utilizable, es de importancia conocer cuando se está aplicando una lámina de agua por encima de la capacidad de infiltración (Díaz Quiroz y Herrera Pérez 2019).

**Cuadro 10. Resumen de riegos aplicados con el modelo integral usando la plataforma IRRIMODEL, en lote experimental de papa.**

Número de riego	Días al riego	Lámina neta (cm)	Lámina bruta (cm)	Eficiencia de aplicación (%)	GDDA
0	Presiembra	10.87	18.00	61	0
1	7	0.57	0.76	75	134.8
2	37	3.91	5.24	75	598.7
3	44	2.31	2.65	87	711.12
4	51	2.26	2.60	87	803.9
5	57	2.36	2.72	87	884.7
6	64	3.15	3.62	87	976
7	71	2.91	3.35	87	1081.1
8	78	3.62	4.16	87	1182
9	85	3.84	4.41	87	1284.4
10	92	3.70	4.26	87	1380.5
11	98	3.31	3.81	87	1470.20
12	103	2.53	2.91	87	1552.9
<b>Total</b>		<b>45.34</b>	<b>58.49</b>	<b>83.15</b>	

## 6.2.2. Desempeño de la operación.

### 6.2.2.1. Variación de láminas mínimas y máximas.

Para la mejora de la eficiencia de aplicación es necesaria la aplicación de modernas técnicas de programación del riego. Las mismas se pueden ver limitadas por las características del sistema de entrega o distribución del agua a los usuarios, y por factores culturales de los propios regantes (Bautista et al, 2009).

Las evaluaciones de desempeño de los sistemas de riego a campo, juegan un papel fundamental para la optimización de los mismos, brindando valiosa información a los agricultores y/o ingenieros proyectistas, para la mejora del diseño y prácticas de manejo, como así también brindan información básica a las instituciones responsables del manejo y administración del recurso hídrico, para la gestión integrada del recurso

(Schilardi, 2010). El Cuadro 11 muestra el comportamiento de láminas de riegos mínimas y máximas del aspersor Naan Dan 5022, donde se puede observar que hay una variación importante en las láminas mínimas, lo cual nos indica la baja eficiencia que tiene este modelo de aspersor en comparación con el Xcell Wobbler.

**Cuadro 11. Resumen de láminas de riego máxima, mínima y media tomadas de los Pluviómetros, en lote experimental de papa con el aspersor Naan Dan 5022.**

Número de riego	Días al riego	GDDA	Lámina mínima (mm)	Lámina máxima (mm)	Lámina media (mm)
1	37	598.7	98	157	131.50
2	44	711.2	20	124	58.13
3	51	803.9	10	120	51.75
4	57	884.7	0	106	42.31
5	64	976	48	178	103.25
6	71	1081.1	18	158	92.75
7	78	1182	40	158	97.63
8	85	1284.4	52	166	129.94
9	92	1380.5	48	100	82.62
10	98	1470.2	60	165	105.94
<b>Total</b>			<b>39.4</b>	<b>143.20</b>	<b>89.58</b>

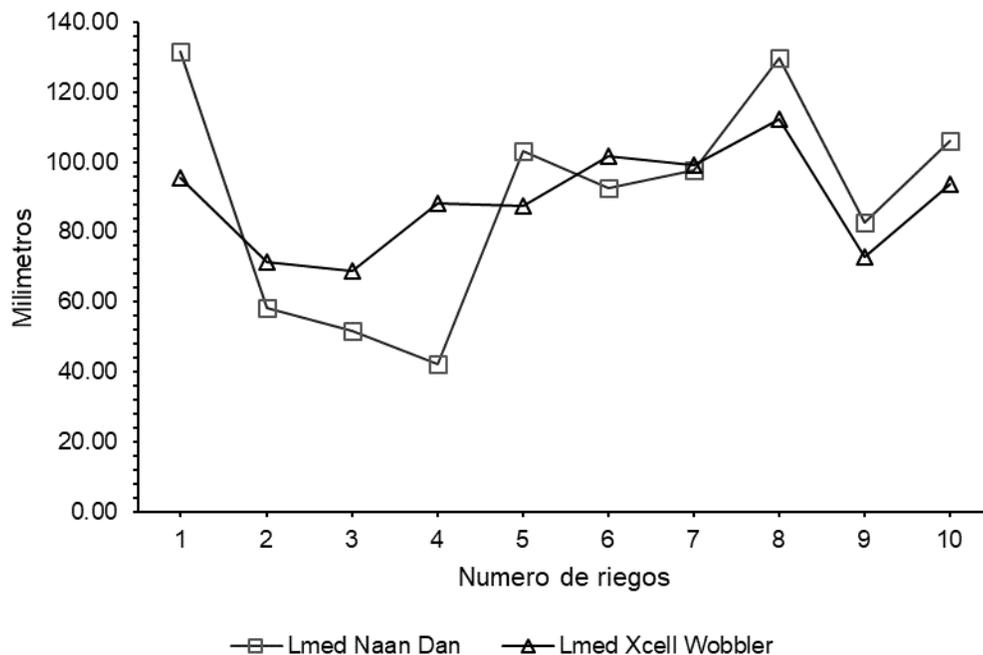
Resulta importante analizar la estrategia de riego a seguir: utilizar pequeñas láminas e intervalos de riego cortos o láminas e intervalos de riego mayores. En el primer caso, las pérdidas por evaporación y deriva podrían reducir la eficiencia de aplicación del sistema (Morábito et al, 2015).

En el Cuadro 12 podemos observar los resultados de láminas mínimas y máximas del aspersor Xcell Wobbler en el cual podemos darnos cuenta del comportamiento del aspersor, obteniendo laminas más uniformes en su aplicación.

**Cuadro 12. Resumen de láminas de riego, máxima, mínima y media tomadas de pluviómetros instalados en lote experimental de papa con el aspensor Xcell Wobbler.**

Número de riego	Días al riego	GDDA	Lámina mínima (mm)	Lámina máxima (mm)	Lámina media (mm)
1	37	598.7	52	150	95.44
2	44	711.2	40	120	71.25
3	51	803.9	15	109	68.94
4	57	884.7	64	132	88.06
5	64	976	64	130	87.63
6	71	1081.1	60	150	101.63
7	78	1182	70	134	99.31
8	85	1284.4	88	174	112.38
9	92	1380.5	54	96	73.00
10	98	1470.2	70	120	93.56
<b>Total</b>			<b>57.7</b>	<b>131.5</b>	<b>89.12</b>

Después del cálculo de la eficiencia de distribución en los dos tratamientos se calcularon las láminas máximas y mínimas que se registraron en los Pluviómetros instalados en el campo distribuidos en los dos tratamientos establecidos. Una vez que se recolectaron los datos de dichas láminas de riego, se obtuvieron las láminas medias del aspensor Naan Dan 5022 y del Xcell Wobbler, mostrando un comportamiento diferente cada uno de ellos, como se muestra en la Figura 17.



**Figura 17. Láminas de riego medias aplicadas (Lb) con dos tipos de aspersores en riego por aspersión baja-fija, en el cultivo de papa.**

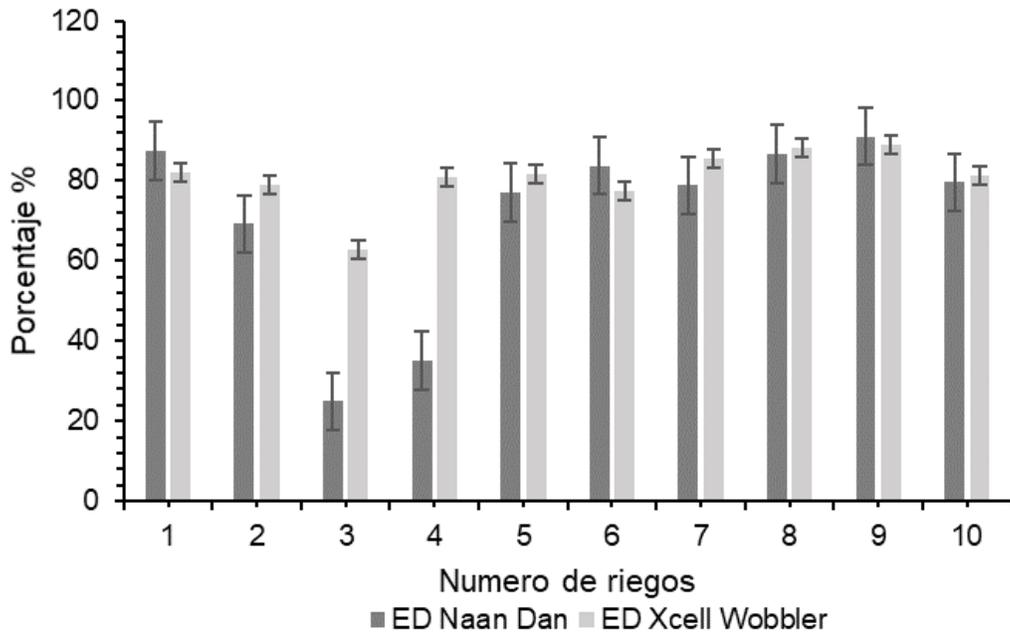
#### 6.2.2.2. Coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC).

La Figura 18 muestra el comportamiento del CUC obtenido los 10 riegos evaluados, donde se puede apreciar que el aspersor analizado Naan Dan 5022 no resultó satisfactoria ya que está un poco por debajo del promedio la eficiencia de distribución. Se deberá mejorar el mantenimiento de los equipos, el funcionamiento de los emisores (suelen trabarse), reducir o eliminar las pérdidas o fugas de agua en acoples de las tuberías y asegurar adecuada presión de trabajo en cabecera del sistema. De esta forma se estaría en condiciones de lograr el objetivo de mejorar la uniformidad, ahorrar agua, reducir el consumo energético y aumentar la productividad en el cultivo de papa.

En el caso del aspersor modelo Xcell Wobbler utilizado en el lote de estudio hubo una mejora en la eficiencia de distribución, que fue del 81% promedio en todos los riegos de auxilio que se le aplicó al lote de papa experimental y según Montero et al. (2005), una parcela está bien regada cuando se consigue un coeficiente de uniformidad entre el 80 % y 90 %.

Para evaluar esta eficiencia de la distribución en la lámina infiltrada se utilizó el coeficiente de uniformidad de Christiansen.

La determinación de la Eficiencia de Distribución (Ed), se llevó a cabo al tomar el promedio de las láminas mínimas captadas por los colectores de agua y se dividió entre la lámina promedio captada por los colectores de agua multiplicado por cien como se muestra en la Figura 18.



**Figura 18. Resultados expresados en porcentaje de la eficiencia de distribución en el tratamiento Naan Dan 5022 y en el tratamiento Xcell Wobbler durante los riegos establecidos.**

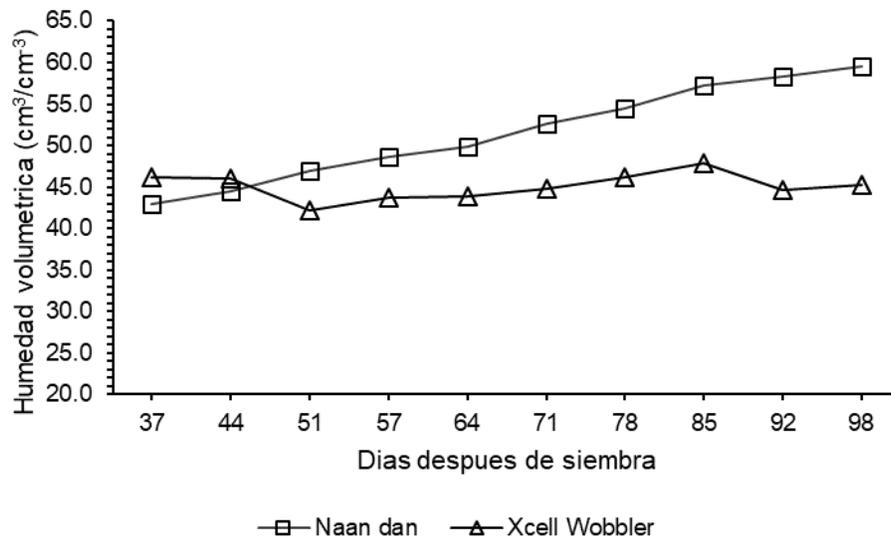
### 6.2.2.3. Humedad del suelo.

Un método que se usa comúnmente para determinar cuándo regar es monitorear la disminución de agua en el suelo. Cuando una planta crece, utiliza el agua del suelo alrededor de su zona de raíces. A medida que las plantas utilizan el agua, la humedad en el suelo baja hasta un nivel en el cual se requiere aplicar un riego o el cultivo comienza a estresarse por falta de agua. Si no se aplica agua, la planta continuará haciendo uso de la poca humedad que queda hasta que finalmente utilice toda el agua disponible en el suelo y muera de sed.

Cuando el perfil del suelo está lleno de agua y alcanza lo que se llama capacidad de campo (CC), se dice que el perfil está al 100% de su contenido de humedad disponible o aproximadamente 0.1 bares de tensión.

Los instrumentos TDR funcionan bajo el principio de que la presencia de agua en el suelo afecta la velocidad de propagación de una onda electromagnética (la hace más lenta). El TDR envía una onda electromagnética a través de una guía (generalmente un par de puntas paralelas de metal) colocada en el suelo a la profundidad deseada. El TDR entonces mide el tiempo que le toma a la onda viajar por la guía hacia el suelo y regresar. Este aparato registra el tiempo y lo convierte a una lectura de la humedad del suelo. Entre más mojado esté el suelo, más tiempo le toma a la onda magnética viajar por el suelo y regresar por la guía.

La Figura 19 presenta el comportamiento de la humedad del suelo medida con TDR en dos estratos (0-30 y 30-60 cm) en los dos tratamientos de aspersores, antes de cada fecha de riego programada por el programa IrriModel. En el cuadro 13 se muestran las variables estadísticas del comportamiento de la humedad del suelo en los dos tratamientos establecidos.



**Figura 19. Resultados promedio por riego de la humedad en el suelo obtenida con el sensor de humedad TDR en el área regada por los dos tipos de aspersores.**

**Cuadro 13. Variables estadísticas del comportamiento de humedad del suelo en dos tipos de aspersores.**

Variable	Xcell Wobbler		Naan Dan 5022	
Promedio	42.6272	47.4622	40.2229	46.6108
Desviación Estándar	2.3094	1.6025	1.2235	2.9074
Coefficiente de Variación	5.4176	3.3763	3.0417	6.2376

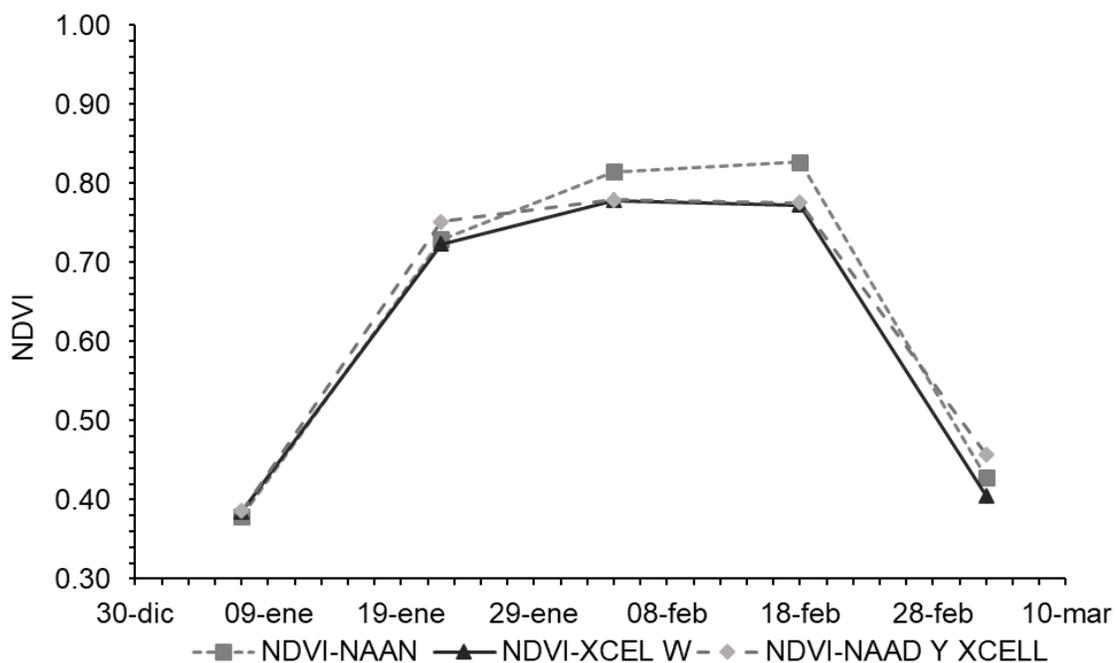
#### **6.2.2.4. Comportamiento del NDVI en el lote experimental de papa.**

Los resultados del NDVI se representan con un mapa de colores, donde cada color corresponde a un cierto rango de valores. No hay una paleta de colores estándar, pero la mayoría de los programas informáticos utilizan la variante “rojo-verde”, lo que significa que los colores rojo-naranja-amarillo indican suelo desnudo o vegetación muerta/dispersa y los tonos de verde son un signo de una cubierta vegetal normal o densa. Para el cálculo del índice NDVI en QGIS, se debe utilizar la Calculadora de Ráster QGIS cargando los datos necesarios.

Del análisis del comportamiento del NDVI en el cultivo de papa con tres tratamientos de riego se obtuvieron los resultados mostrados en el Cuadro 14 y en la Figura 20 podemos observar gráficamente ese comportamiento del NDVI en los tratamientos por cada vuelo.

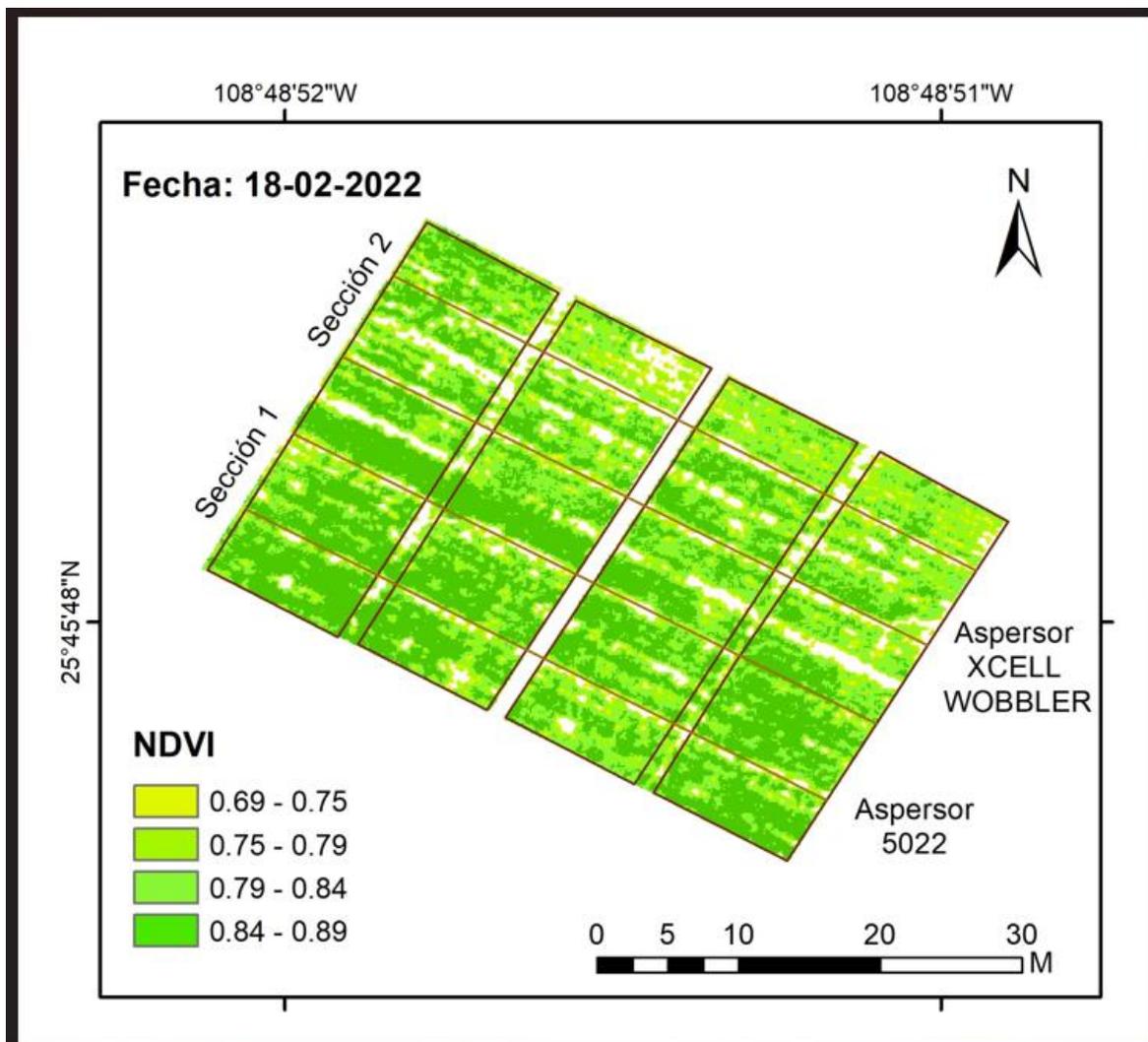
**Cuadro 14. Valores promedio de NDVI en dos tipos de aspersores y traslape de estos.**

Fecha de Vuelo	Naan Dan 5022		Xcell Wobbler		Xcell Wobbler y Naan Dan 5022	
	NDVI Máximo promedio	NDVI Mínimo promedio	NDVI Máximo promedio	NDVI Mínimo promedio	NDVI Máximo promedio	NDVI Mínimo promedio
07/01/22	0.4266	0.3791	0.4272	0.3851	0.4327	0.3859
22/01/22	0.8716	0.7294	0.8739	0.7235	0.8845	0.7515
04/02/22	0.9099	0.8145	0.8777	0.7787	0.8940	0.7793
18/02/22	0.9209	0.8273	0.8790	0.7728	0.8751	0.7727
04/03/22	0.4358	0.4284	0.4299	0.4056	0.5341	0.4577



**Figura 20. Resultados del comportamiento del NDVI en los dos tratamientos y en el traslape entre ellos, con la fecha de cada vuelo.**

El NDVI mide el estado y la salud de los cultivos o el vigor de estos. Este índice de vegetación es un indicador de verdor y tiene una fuerte relación con la biomasa verde, que es indicativa de crecimiento. También se sabe que los valores de NDVI tienen una alta relación con el rendimiento de los cultivos, lo que significa que puede utilizarse como herramienta para medir la productividad de los cultivos y predecir su rendimiento futuro. Durante las primeras etapas del crecimiento de los cultivos, cuando la superficie foliar verde es pequeña, los resultados del NDVI son muy sensibles a los efectos de fondo del suelo. En la Figura 21 se muestra el comportamiento del NDVI en los tratamientos de riego establecidos, usando drones para tomar las imágenes.



**Figura 21. Comportamiento del NDVI en los tratamientos de riego por aspersión en papa, usando drones.**

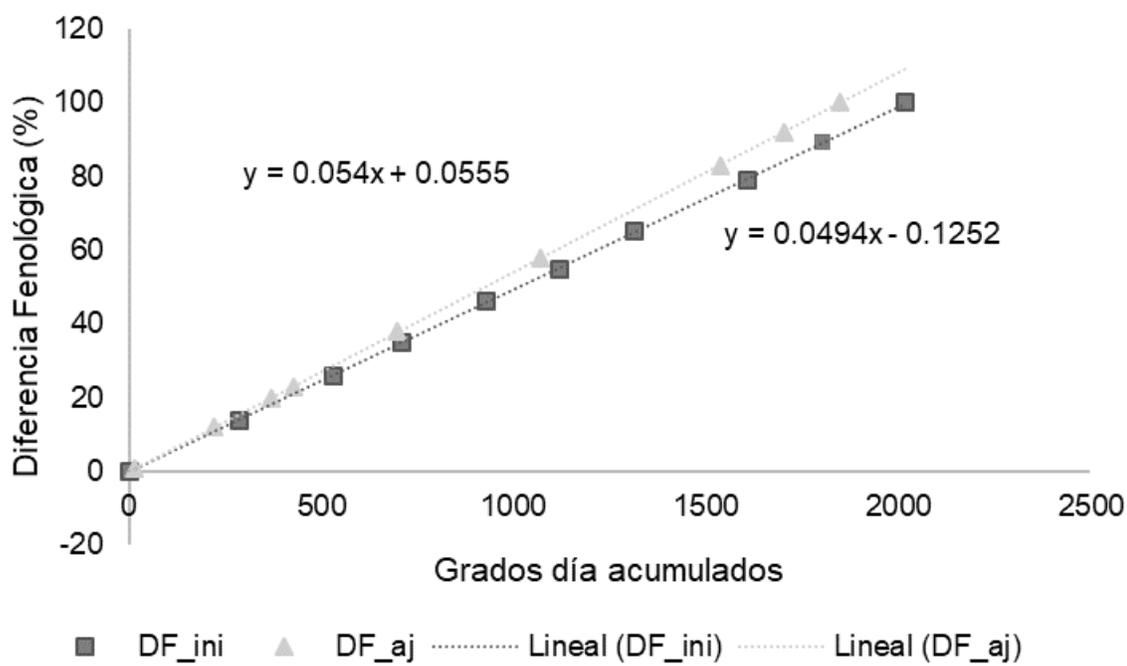
## 6.2. Fenología del cultivo.

Se actualizaron los parámetros de fenología de acuerdo al tiempo térmico en el valle del fuerte, existentes en el programa irrimodel de acuerdo al ciclo 21-22 para tener datos más exactos sobre el desarrollo del cultivo de papa, en el Cuadro 15 se muestran los datos actualizados para el programa irrimodel. En la Figura 22 se podemos observar el desarrollo fenológico inicial que nos arroja el programa irrimodel y el ajustado con los resultados obtenidos en el proyecto establecido en el cultivo de

papa variedad Fiana expresándose un aumento en el porcentaje mejor en el desarrollo fenológico.

**Cuadro 15. Fenología del cultivo de papa variedad Fiana con parámetros de tiempo térmico actualizados, durante el ciclo 21-22 en el Valle del Fuerte.**

No.	Etapa	Clave	GD (° C)	GDDA (° C)	DF (%)
1	Siembra	S	13.9	13.9	0.75
2	Brotación	B	208.3	222.2	12.01
2	Emergencia	E	95	317.2	17.15
3	Inicio de estolonización	IE	51.9	369.1	19.95
4	Elongación de estolones	EE	60.1	429.2	23.20
5	Inicio de tuberización (diám:> 1 cm)	IT	268.2	697.4	37.70
6	Desarrollo de Tubérculos (3-5 cm)	DT	370.3	1067.7	57.71
7	Desarrollo de tubérculos (> 5 cm)	DT	402.5	1470.2	79.47
8	Tubérculos desarrollados, diám: 7 cm	TD	67.1	1537.3	83.10
9	Desvare	D	167.3	1704.6	92.14
10	Cosecha	C	145.4	1850	100.00



**Figura 22. Comparación del desarrollo fenológico inicial (IrriModel) y desarrollo fenológico ajustado en cultivo de papa variedad Fiana.**

### 6.3. Parámetros del cultivo.

Al utilizar el modelo ajustado de Ojeda-Bustamante et al, 2004, y ver los resultados de las parcelas en estudio, se vio la necesidad de hacer una actualización de esos mismos parámetros, los cuales vienen descritos en el Cuadro 16.

**Cuadro 16. Parámetros del modelo de programación integral del riego para el cultivo de papa bajo riego por aspersión fija-baja en el norte de Sinaloa, México ajustados**

Variable	Parámetro Inicial	Parámetro Ajustado
Coeficiente de cultivo (Kc)	$K_{m\acute{a}x} = 1.3$	$K_{m\acute{a}x} = 1.3$
	$XK_{m\acute{a}x} = 0.52$	$XK_{m\acute{a}x} = 0.52$
	$\alpha_1 = 0.45$	$\alpha_1 = 0.45$
	$K_{C_0} = 0.2$	$K_{C_0} = 0.2$
Profundidad radical (Pr)	$Pr_0 = 0.2 \text{ m}$	$Pr_0 = 0.2 \text{ m}$
	$Pr_{m\acute{a}x} = 0.7 \text{ m}$	$Pr_{m\acute{a}x} = 0.7 \text{ m}$
	$\alpha_2 = 600$	$\alpha_2 = 600$
Máximo déficit de humedad permisible (MDP)	$\alpha_3 = 0.35$	<b><math>\alpha_3 = 0.40</math></b>
Criterio Ultimo Riego de auxilio	$\alpha_5 = \text{No aplica}$	<b><math>\alpha_5 = 1650 \text{ GDDA}</math></b>

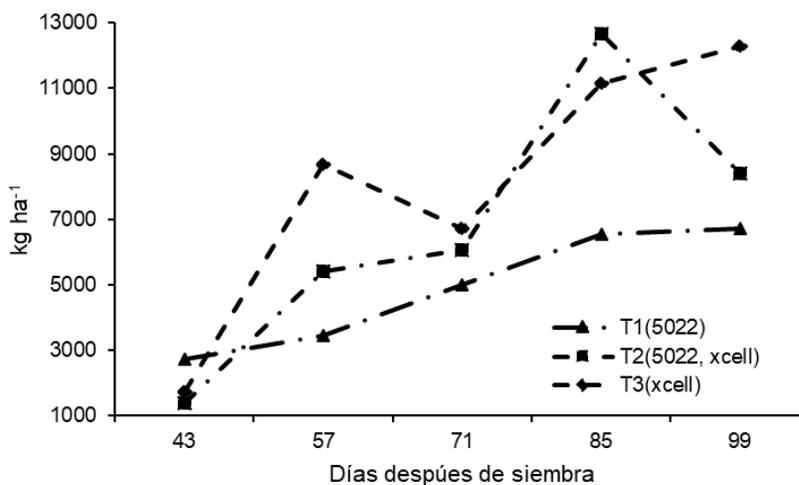
### 6.4. Producción de biomasa en el lote experimental de papa.

La biomasa fue en aumento hasta los 71 días después de siembra, esto relacionado muy probablemente a la movilización de los asimilados a los tubérculos (Segura et al., 2006), órganos donde se reservan los contenidos nutritivos para una nueva planta y/o consumo. Luego las plantas, en su desarrollo, movilizaron los asimilados a los tubérculos, y se fueron secando las hojas y los tallos, caracterizando el fin del ciclo del cultivo, en esta variedad entre 85 y 100 ddp (Canadian Food Inspection Agency, 2008).

La diferencia de las biomásas totales entre los tratamientos en las distintas fechas después de siembra dependió del comportamiento de la biomasa de los tubérculos; lo

cual se debe, principalmente, a que estas estructuras de reserva representan aproximadamente entre el 70 y 80% de la biomasa total de la planta. Sin embargo, con el aspersor Xcell Wobbler las semillas de papa variedad Fiana dieron plantas de mayor biomasa, a la cosecha hubo diferencias entre aspersores mostrando mayor producción y calidad de los tubérculos (Figura 23).

A partir de la octava semana se ve como los valores fueron variables, menores, debido, principalmente, a que las plantas ya no presentaban un crecimiento acelerado, sino más bien un poco más lento y, en algunos casos, sin crecimiento como por ejemplo a los 71 dds. Además, las plantas entraron en senescencia y las biomazas de la semana siguiente con respecto a la anterior eran menores. Situación que se asume corresponde con la ganancia de biomasa semanal que se acumula en hojas, tallos y raíces y luego se moviliza a los órganos de perpetuación, los tubérculos. Esto tiene concordancia con el trabajo realizado por Aguilar et al. (2006), en el cual sus valores máximos de ICC se alcanzaron en los primeros 20 dds y los valores más pequeños, incluyendo negativos, a los 70 dds, lo que indicaba que las plantas estaban en senescencia.



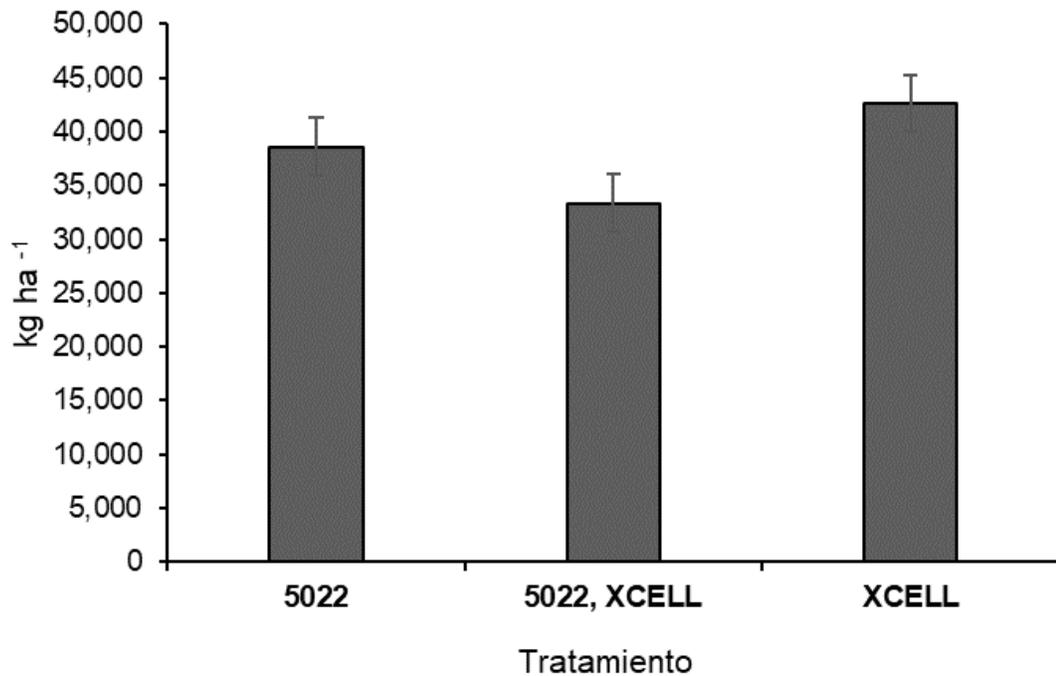
**Figura 23. Resultados promedio obtenidos de materia seca en los dos tipos de aspersores y donde se traslapan los dos.**

## 6.5. Rendimiento y calidad de tubérculos.

En los sistemas de riego por aspersión fija, que se utilizaron en este proyecto, el riego es superficial y el humedecimiento de la superficie del suelo es del 100%, por lo que mantuvo contenidos de humedad a capacidad de campo y se evitó la formación de grietas. Otros sistemas de riego presurizado como es el caso de los riegos por goteo, si se producen grietas en el suelo ya que no cubre el 100% del suelo. Según Jaramillo (2014), esto sucede en suelos con medios contenidos de arcilla, como es el caso del suelo donde se establecieron los tratamientos. Cuando las arcillas se secan se genera una contracción y una reducción del volumen ocupado generando la formación de grietas.

El peso de los tubérculos por unidad, está en función al tamaño, en calidades superiores o categorías más altas, un menor número de tubérculos completan un kilogramo de este producto. Las categorías menores, comparando con las categorías más altas, son menos requeridos por los consumidores y se venden a menores precios.

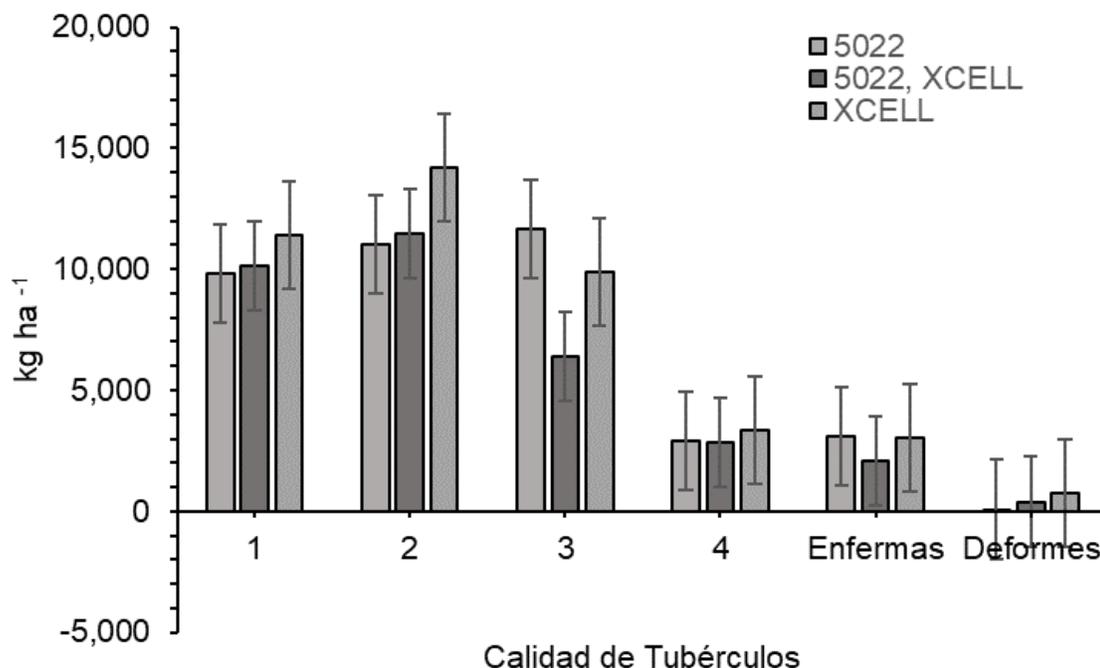
Con la comparación de los dos tipos de aspersores (Xcell Wobbler y Naan Dan 5022), se pudo identificar que en la variedad Fiana hubo un mayor rendimiento por hectárea ( $42,617 \text{ kg ha}^{-1}$ ) con el aspersor Xcell Wobbler, seguido del Naan Dan 5022 (con rendimiento de  $38,617 \text{ kg ha}^{-1}$ ), mientras que en el área de traslape de los dos aspersores fue el más bajo (con un rendimiento de  $33,359 \text{ kg ha}^{-1}$ ) como se presentan en la Figura 24.



**Figura 24. Resultados promedio obtenidos en kg ha<sup>-1</sup> de tubérculos en los dos tipos de aspersores y donde se traslapan los dos.**

La calidad del tubérculo, su contenido de materia seca, contenido de almidón, desórdenes internos o cualidades de cocción, es muy importante para el consumidor final. La calidad considera características del tubérculo como su forma, el tamaño, la profundidad de los ojos y la resistencia a plagas o patógenos habitantes del suelo entre otras.

Dentro del proyecto establecido se obtuvieron resultados en cuanto a la calidad de los tubérculos, en el tratamiento Xcell Wobbler se presentaron más kg ha<sup>-1</sup> en calidades primeras y segundas, en comparación con el Naan Dan 5022 que presento más calidades segundas y terceras como se presenta en la Figura 25.



**Figura 25. Resultados promedio obtenidos en kg ha<sup>-1</sup> en calidad de tubérculos en los dos tratamientos establecidos y donde traslapan los dos.**

El rendimiento obtenido mediante la aplicación del calendario de riegos generado en la plataforma IriModel generó un rendimiento de 42 Mg ha<sup>-1</sup>, mediante la aplicación del modelo integral con el aspersor Xcell Wobbler.

**Cuadro 17. Resultados del análisis de la varianza como bloques completos al azar de la variable rendimiento.**

Tratamientos	Y	C1	C2	C3	C4	DEF	REZ
	Kg ha-1						
A1	38617.19	9804.69	11054.69	11679.69	2914.06	78.13	3085.95
A2	42617.19	11406.25	14218.75	9882.81	3320.31	742.19	3046.88
A1, A2	33359.38	10156.25	11484.38	6406.25	2851.56	390.63	2070.31
DMS	16022.33	5203.13	9229.79	5793.1	1370.45	1878.05	2818.72
TUKEY (p<0.10)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

El análisis de varianza no detectó diferencias estadísticas significativas para las medias de rendimiento entre los tratamientos ( $\alpha=0.10$ ) como se muestra en el Cuadro 17. Sin embargo, físicamente en el análisis (cosecha) de resultados se presentó una diferencia en kg ha<sup>-1</sup> entre los dos tratamientos establecidos y donde se juntaban estos mismos.

## VII. CONCLUSIONES.

- De las capacidades operativas de los dos tipos de aspersores, el Xcell Wobbler tiene un coeficiente de uniformidad más elevado, lo cual clasifica como aceptable.
- El área donde se estableció el tratamiento 2 (aspersor Xcell Wobbler) presentó un mayor rendimiento y calidad de los tubérculos.
- Se actualizó la fenología del cultivo de papa variedad Fiana en tiempo térmico en el norte de Sinaloa.
- Se actualizó la base de datos climáticos para el programa IrriModel.
- Con la finalización de este proyecto se llegó a la conclusión de que al utilizar el aspersor Xcell Wobbler con programación integral de riego se mejorará la producción del cultivo de papa en el norte del estado de Sinaloa, obteniendo un mayor rendimiento y una mejor calidad de las cosechas.

## VIII. LITERATURA CITADA.

- Arámbula, A. F., Salazar, A. A. (2017).** Diseño y construcción de un prototipo de sistema de riego automatizado con tecnología open source y energía renovable con monitoreo vía web para los huertos organopónicos de la prefectura del guayas.
- Bos, M. G., M. A. Burton, and D. J. Molden. (2005).** Irrigation and Drainage Performance Assessment: Practical Guidelines. CABI International. Wallingford. 158 p.
- Camargo, D.C., Montoya, F. Ortega, J. F., Córcoles, J. I. (2015).** Potato Yield and Water Use Efficiency Responses to Irrigation in Semiarid Conditions. Agron. J. 107:2120–2131, doi:10.2134/agronj14.0572.
- Camire, M. (2016).** Potatoes and Human Health. En: Singh, J.; Kaur, L. (eds). Advances in Potato Chemistry and Technology. Elsevier Inc., p, 685-704.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). (2010).** Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F. 643 p
- CNA (Comisión Nacional del Agua). (2019).** Estadísticas del agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F. 276 p
- Coelho, E. F., e F. B. Arruda. (2001).** Aplicações da técnica de TDR: Manejo da água no solo. In: Matsura, E. E., A. Tavares–Junior, E. Gomes P., e C. Souza F. (eds). Aplicações da Técnica da TDR na Agricultura. Feagri/Unicamp. Campinas. pp: 129–145.
- Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. (CORPOICA) (2009).** Escalas fenológicas de las variedades de papa parda pastusa, Diacol capiro y criolla “yema de huevo” en las zonas productoras de Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia. 34p. Recuperado de: [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12893/44240\\_56518.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12893/44240_56518.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

- EOSDA Crop Monitoring (2020).** NDVI: Índice De Vegetación De Diferencia Normalizada. <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/>  
Consulta: diciembre 28, 2022.
- FAO. (2020).** El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2020. Superar los desafíos relacionados con el agua en la agricultura. Roma. <https://doi.org/10.4060/cb1447es>
- Famiglietti, J.S., Rudnicki, J.W., Rodell, M. (1998).** Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 210. 259-281.
- Fietz, C., M. Folegatti, S. Vieira, e J. Frizzone. (1999).** Efeito da variabilidade do armazenamento de agua no solo na qualidade da irrigação por aspersão. *Rev. Bras. Eng. Agríc. e Ambiental* 3: 150–153.
- Gómez-Plaza, A., Alvarez-Rogel, J., Albaladejo, J., Castillo, V. (2000).** Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. *Hydrological Processes*, 14. 1261-1277.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México (2017).** Anuario estadístico y geográfico de Sinaloa 2017 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. -- México: INEGI, c2017. 475 p.
- JARAMILLO, L. (2011).** Nutrient Cycling in Tropical Forest Ecosystems: Principles and their application. Chichester, U-K. Wiley. 190 p.
- Kafkafi, U., Tarchitzky, J. (2012).** Fertirrigación, una herramienta para una eficiente fertilización y manejo del agua. Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA) e Instituto Internacional de la Potasa, p 151. [https://www.ipipotash.org/udocs/391-2012\\_ifa\\_ipi\\_fertirrigacion.pdf](https://www.ipipotash.org/udocs/391-2012_ifa_ipi_fertirrigacion.pdf).
- Keller, J. y Bliesner R.D. (1990).** Sprinkle and Trickle Irrigation. AVI Book. Van Nostrand Reinhold. New York.

- León, J. E., Silva, J. S., Tacle, P. M., Lema, C. A. (2022).** Diseño y aplicación del método de riego por aspersión en el cultivo de papa en la estación experimental tunshi. *Pol. Con.* (Edición núm. 70) vol. 7, núm. 9, pp.1564-1574, ISSN: 2550 – 682X, DOI: 10.23857/pc.v7i8.
- Li, J. (1998).** Modelling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system. *Agric. Water Manage.* 38:135-146.
- Lorite, I. J., L. Mateos, and E. Fereres. (2004).** Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment: I. model and general assessment of an irrigation scheme. *Irrigation Sci.* 23: 77–84.
- Montovani, E. C., Villalobos, F. J., Orgaz, F., and Fereres, E. (1995).** Modeling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. *Agric. Water Manage.* 27:243-257
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO) (2002).** Agua y cultivos logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Recuperado de: [http://www.fao.org/tempref/agl/AGLW/docs/cropsdrops\\_s.pdf](http://www.fao.org/tempref/agl/AGLW/docs/cropsdrops_s.pdf), p 22.
- Peñafiel, M. G., Serrano, G., Ortuño, L. H. (2020).** Evaluación de la uniformidad de aplicación acorde al comportamiento hidráulico en el riego por aspersión empleado al cultivo de Papa (*Solanum tuberosum* L.) en la Estación Experimental de Cota Cota. *Apthapi* 6(3):2044-2056. Septiembre - diciembre. 2020. ISSN: 2519-9382
- PORTA J., LÓPEZ M., ROQUERO C. (2003).** Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. España. 929 p
- Quiroz, R. (2012).** Papa o patata. En: Steduto, P.; Hsiao, T.; Fereres, E.; Raes, D. (eds). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO). Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>, p 530.

**Rodríguez-Pérez, L. (2010).** Ecofisiología del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). Rev. Colomb. Cienc. Hortic, 4 (1), 97-108.

**Sánchez, I., Catalán, E., González, G., Estrada, J., García, D. (2006).** Indicadores comparativos del uso del agua en la agricultura, Agricultura Técnica en México, vol. 32, núm. 3, septiembre-diciembre, 2006, pp. 333-340 Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Texcoco, México.

**Saxton, K. E., Romberger, J. S., Papendick, R.I. (1986).** Estimación de las características generalizadas del suelo y el agua a partir de la textura. Contribución de Agric. Res. Serv., USDA, en cooperación con el Colegio de Agric. y Economía Doméstica, Agric. Res. Center, Universidad del Estado de Washington, Pullman, WA 99164. Documento científico n. 6911.

**SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2018).** La papa, el cuarto cultivo de mayor producción en el mundo. <https://www.gob.mx/siap/articulos/la-papa-el-cuarto-cultivo-de-mayor-produccion-en-el-mundo#:~:text=De%20acuerdo%20con%20datos%20del,15%20a%2020%20qrados%20cent%C3%ADgrados>.

Consulta: diciembre 22, 2022.

**Sifuentes, E., Ojeda, W., Vázquez, P., Gutiérrez, A. (2003).** Manejo del agua en módulos de riego bajo condiciones de escasez de agua: aplicación al distrito de riego 075. Fundación Produce Sinaloa, A.C. Culiacán, Sinaloa.

**Sifuentes, E., Macías, J. (2015).** Programación Integral y Gestión del Riego a Través de Internet. Manual del Usuario. Version 2.0. Folleto Técnico No. 42. P. 36.

**Sifuentes, E., Macías, J., Apodaca, M. A. y Cortez, E. (2008).** Predicción de la fenología de papa (principios y aplicaciones prácticas). INIFAP-CIRNO. Campo Experimental Valle del Fuerte. Folleto Técnico No. 32. Los Mochis, Sinaloa, México. 54 p.

- Seyfried, M. (1998).** Spatial variability constraints to modeling soil water at different scales. *Geoderma*, 85. 231-254.
- Sood, M. C., Singh, N. (2003).** Water Management. In: Khurana, S.M.P.; Minhas, J.S.; Pandey, S.K. (eds.). *The Potato: Production and Utilization in Sub-Tropics*. Mehta Publishers. New Delhi, pp. 111-120.
- Souza, C. F., E. E. Matsura, e R. Testezlaf. (2001).** Experiência de laboratório de hidráulica, irrigação e drenagem da Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP no uso da técnica da TDR. In: Matsura, E. E., A. Tavares–Junior, E. Gomes P., e C. Souza F. (eds). *Aplicações da Técnica da TDR na Agricultura*. Feagri/Unicamp. Campinas. pp: 147 – 176.
- Tanji, K. K., Hanson, B. R. (1990).** Drainage and return flows in relation to irrigation management. *Irrigation of agricultural crops*. B. A. Stewart y D.R. Nielsen (ed.), pp. 1057-1087. Am. Soc. Agronomy, Madison.
- Topp, G., J. L. Davis, and A. P. Annan. (1980).** Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Res.* 16: 574 – 582.
- TORRÁN E. (2007).** Impacto de las plantaciones de *Eucalyptus grandis* sobre el contenido de humedad del suelo. Tesis de maestría, Universidad Tecnológica Nacional, Concepción del Uruguay. 113 p
- Vinnikov, K.Y.; Robock, A., Speranskaya, N.A., Schlosser, C.A. (1996).** Scales of temporal and spatial variability of mid latitude soil moisture. *Journal of Geophysical Research*, 101 (D3): 7163-7174.
- Wagner, W., Lemoine, G., Rott, H. (1999).** A method for estimating soil moisture from ERS Scatter meter and soil data. *Remote Sensing of Environment*, 70. 191-207.
- Warrick, A. W. and Gardner, W. R. (1983).** Crop yield as affected by spatial variation of soil and irrigation. *Water Resour. Res.* 19:181-186.

**Western, A.W., Blöschl, G., Grayson, R.B. (1998).** Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. *Journal of Hydrology*, 205. 20-37.

**Zocoler, J. L., L. E. V. Cesar, e L. S. Vanzela. (2004).** Efeito da posição relativa da linha lateral de um equipamento de irrigação do tipo pivô central na uniformidade de distribuição de água e eficiência de irrigação. *Eng. Agric.* 2 (4): 290–297.

## IX. ANEXOS.

### 9.1. ANOVA

#### Análisis de la varianza

Y

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Y	12	0.33	0.00	23.58

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	241713053.39	5	48342610.68	0.60	0.7066
TT	172468912.76	2	86234456.38	1.06	0.4025
Rep	69244140.63	3	23081380.21	0.28	0.8351
Error	486586425.78	6	81097737.63		
Total	728299479.17	11			

#### Test: Tukey Alfa=0.10 DMS=16022.33001

Error: 81097737.6302 gl: 6

TT	Medias	n	E.E.	
A2	42617.19	4	4502.71	A
A1	38617.19	4	4502.71	A
A1, A2	33359.38	4	4502.71	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.10$ )

C1

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
C1	12	0.51	0.10	27.97

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	53346761.07	5	10669352.21	1.25	0.3921
TT	5668131.51	2	2834065.76	0.33	0.7303
Rep	47678629.56	3	15892876.52	1.86	0.2374
Error	51314290.36	6	8552381.73		
Total	104661051.43	11			

**Test:Tukey Alfa=0.10 DMS=5203.13197**

Error: 8552381.7274 gl: 6

TT	Medias	n	E.E.	
A2	11406.25	4	1462.22	A
A1, A2	10156.25	4	1462.22	A
A1	9804.69	4	1462.22	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.10$ )

**C2**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
C2	12	0.17	0.00	44.17

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	36948649.09	5	7389729.82	0.25	0.9239
TT	23563639.32	2	11781819.66	0.40	0.6856
Rep	13385009.77	3	4461669.92	0.15	0.9245
Error	175769042.97	6	29294840.49		
Total	212717692.06	11			

**Test:Tukey Alfa=0.10 DMS=9629.79123**

Error: 29294840.4948 gl: 6

TT	Medias	n	E.E.	
A2	14218.75	4	2706.24	A
A1, A2	11484.38	4	2706.24	A
A1	11054.69	4	2706.24	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.10$ )

**C3**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
C3	12	0.54	0.15	34.93

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	73465983.07		5	14693196.61	1.39 0.3476
TT	57499186.20		2	28749593.10	2.71 0.1449
Rep	15966796.88		3	5322265.63	0.50 0.6947
Error	63610839.84		6	10601806.64	
Total	137076822.92		11		

**Test:Tukey Alfa=0.10 DMS=5793.10290***Error: 10601806.6406 gl: 6*

TT	Medias	n	E.E.	
A1	11679.69	4	1628.02	A
A2	9882.81	4	1628.02	A
A1, A2	6406.25	4	1628.02	A

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.10$ )***C4**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
C4	12	0.52	0.12	25.43

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3886311.85		5	777262.37	1.31 0.3712
TT	518229.17		2	259114.58	0.44 0.6652
Rep	3368082.68		3	1122694.23	1.89 0.2319
Error	3559895.83		6	593315.97	
Total	7446207.68		11		

**Test:Tukey Alfa=0.10 DMS=1370.45356***Error: 593315.9722 gl: 6*

TT	Medias	n	E.E.	
A2	3320.31	4	385.14	A
A1	2914.06	4	385.14	A
A1, A2	2851.56	4	385.14	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.10$ )

**DEF**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
DEF	12	0.29	0.00	261.51

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2711995.44	5	542399.09	0.49	0.7766
TT	882975.26	2	441487.63	0.40	0.6892
Rep	1829020.18	3	609673.39	0.55	0.6681
Error	6685384.11	6	1114230.69		
Total	9397379.56	11			

**Test:Tukey Alfa=0.10 DMS=1878.05739**

Error: 1114230.6858 gl: 6

TT	Medias	n	E.E.	
A2	742.19	4	527.79	A
A1, A2	390.63	4	527.79	A
A1	78.13	4	527.79	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.10$ )

**REZ**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
REZ	12	0.21	0.00	57.94

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3959164.06	5	791832.81	0.32	0.8869
TT	2648960.94	2	1324480.47	0.53	0.6150
Rep	1310203.13	3	436734.38	0.17	0.9102
Error	15059570.31	6	2509928.39		
Total	19018734.38	11			

**Test:Tukey Alfa=0.10 DMS=2818.72020**

Error: 2509928.3856 gl: 6

<u>TT</u>	<u>Medias</u>	<u>n</u>	<u>E.E.</u>	
A1	3085.95	4	792.14	A
A2	3046.88	4	792.14	A
<u>A1, A2</u>	<u>2070.31</u>	<u>4</u>	<u>792.14</u>	<u>A</u>

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.10$ )*