

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



“PRONÓSTICO DEL RENDIMIENTO DE LA PAPA (*Solanum tuberosum*) CV. UNICA SOMETIDA A ESTRÉS HÍDRICO PARA CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA MOLINA”

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METEORÓLOGO**

MARCELO DANIELI CERVANTES CAMAC

LIMA - PERÚ

2020

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 – Reglamento de propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“PRONÓSTICO DEL RENDIMIENTO DE LA PAPA (*Solanum tuberosum*) CV.
UNICA SOMETIDA A ESTRÉS HÍDRICO PARA CONDICIONES CLIMÁTICAS
DE LA MOLINA”**

Presentada por:

MARCELO DANIELI CERVANTES CAMAC

**Tesis para optar el título profesional de
INGENIERO METEORÓLOGO**

Sustentada y aprobada ante el siguiente Jurado:

Mg. Sc. Ely Oliver Guardia Jara

PRESIDENTE

Mg. Sc. Victoria Doris Calle Montes

MIEMBRO

Mg. Sc. Rolando Egúsquiza Bayona

MIEMBRO

Mestre. Jerónimo García Villanueva

ASESOR

DEDICATORIA

A mis padres: Ruth y Eliseo, a mi hermana Gresly y a mi sobrino Marshall.

A mi abuelo Ángel Jesús, un hombre valiente y versado.

AGRADECIMIENTO

Cito información que fue alguna vez difundida por un exitoso empresario colombiano llamado Norman Cornejo como la ley de lo trascendente y precisa que el éxito en cualquier ámbito de la vida implica también aquellas personas que influyan positivamente durante el proceso de alcanzar un objetivo en específico, de manera que pretendo hacer un sincero reconocimiento a las siguientes personas:

Al patrocinador de esta investigación, Mestre Jerónimo García Villanueva, maestro de maestros, a quien guardo un profundo respeto. Le agradezco por su tiempo, paciencia, consideración y compromiso al presente proyecto desde el primer día.

Al miembro del jurado, Mg Sc. Rolando Egúsqiiza Bayona, por su cordialidad, predisposición y sabios consejos. Sus conocimientos bastos sobre cultivos tuberosos serán claves para la adaptación del cambio climático en décadas venideras, sobre todo en la sierra del país. La Facultad de Agronomía debe sentirse muy afortunada.

Al presidente de esta investigación, Mg Sc. Ely Guardia Jara por el apoyo incondicional, asesoría y constante compromiso a la investigación desde la designación a este cargo. Los aportes desde su perspectiva fueron necesarios para la finalización exitosa de este trabajo.

Finalmente, al todo equipo científico del Centro Internacional de la Papa, entre ellos: Dr. David Ramírez Collantes, Mg Sc. Javier Rinza Díaz, todo el equipo técnico y tesisistas del proyecto CIP-UNALM 2018, por su amistad y cordialidad. De forma muy especial al Ing. Randall Vargas Pradinett y a la Mg Sc. Victoria Calle Montes.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Papa (<i>Solanum Tuberosum</i>) vc. Única.....	3
2.2.1. Generalidades de la variedad.....	3
2.2.2. Factores del rendimiento del tubérculo	5
2.3. Crop Water Stress Index (CWSI)	7
2.4. Modelo Agrícola Solanum.....	9
2.5. Climatic Forecast System Versión 2 (CFSV2).....	11
2.6. Modelo Regional Weather Research and Forecasting (WRF).....	12
2.6.1. Grillaje tridimensional del modelo	13
2.6.2. Anidamiento del modelo	15
2.6.3. Componentes del modelo	16
2.7. Diseño en bloques completamente al azar con repeticiones (D.B.C.A.)	18
2.7.1. Modelo lineal de un D.B.C.A.	19
2.7.2. Prueba de Friedman	20
III. METODOLOGÍA	21
3.1. Materiales.....	21
3.1.1. <i>Softwares</i> principales	21
3.1.2. <i>Softwares</i> complementarios	22
3.1.3. Datos utilizados en el pronóstico de rendimiento.....	22
3.1.4. Instrumental de campo (equipos)	23
3.1.5. Otros materiales	23
3.2. Métodos	24
3.2.1. Obtención de los datos climáticos redictores	24
3.2.2. Estimación del rendimiento del tubérculo	30
3.2.3. Estimación del rendimiento del tubérculo pronosticado antes de la cosecha	45
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
4.1. Obtención de los datos climáticos predictores.....	50

4.1.1.	Temperatura máxima y mínima diaria.....	50
4.1.2.	Precipitación y radiación solar diaria acumulada	54
4.1.3.	Evapotranspiración potencial	58
4.2.	Estimación del rendimiento del tubérculo	64
4.2.1.	Identificación del inicio de la etapa de tuberización	64
4.2.2.	Evolución temporal del CWSI y rendimiento del tubérculo	66
4.3.	Estimación del rendimiento del tubérculo pronosticado antes de la cosecha	76
4.3.1.	Obtención del día de emergencia.....	76
4.3.2.	Lámina de agua disponible en el suelo	76
4.3.3.	Crecimiento del sistema radicular	77
4.3.4.	Pronóstico del rendimiento del tubérculo antes de la cosecha	80
V.	CONCLUSIONES	94
VI.	RECOMENDACIONES	95
VII.	BIBLIOGRAFÍA	96
VIII.	ANEXOS	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Factores modificadores del crecimiento.....	4
Tabla 2: Número de días entre dos riegos para evitar estrés de humedad en dos texturas de suelo.....	6
Tabla 3: Efectos del Estrés hídrico en cultivos de papa (<i>Solanum Tuberosum</i>).....	7
Tabla 4: Datos de entrada necesarios para el pronóstico de rendimiento.....	10
Tabla 5: Variables estimadas según ecuaciones matemáticas del modelo SOLANUM.....	11
Tabla 6: Documentación disponible del CFS versión 2 (CFSv2).....	11
Tabla 7: Descripción de los productos del CFS versión 2.....	12
Tabla 8: Descripción de los datos entrada.....	25
Tabla 9: Configuración general elegida en el modelo regional.....	25
Tabla 10: Variables predictores directamente obtenidas.....	26
Tabla 11: Variables predictores estimadas.....	30
Tabla 12: Componentes porcentuales de la fertilización.....	31
Tabla 13: Fechas de aplicación del fertirriego.....	31
Tabla 14: Datos establecidos para el diseño del campo experimental en un surco.....	41
Tabla 15: Registro general de las 17 muestras de biomasa y una cosecha final.....	43
Tabla 16: Temperatura mínima pronosticada (°C).....	50
Tabla 17: Temperatura máxima pronosticada (°C).....	52
Tabla 18: Precipitación diaria acumulada pronosticada (mm/día).....	54
Tabla 19: Radiación solar acumulada diaria pronosticada (MJ/m ² día).....	56
Tabla 20: Evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T1 (mm/día).....	58
Tabla 21: Evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T2 (mm/día).....	60
Tabla 22: Evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T3 (mm/día).....	62
Tabla 23: Duración en días de las etapas y sub-etapa de la campaña agrícola por tratamiento.....	65
Tabla 24: Variaciones de estrés hídrico según la escala del CWSI.....	67
Tabla 25: Variaciones de estrés hídrico (escala del CWSI) durante el llenado de tubérculo.....	70
Tabla 26: Variaciones de estrés hídrico durante la sub-etapa de la cúspide de producción foliar.....	70
Tabla 27: Variaciones de estrés hídrico (escala del CWSI) hasta el inicio de la madurez.....	73

Tabla 28: Recuperaciones estrés hídrico (escala del CWSI) hasta el inicio de la madurez	74
Tabla 29: Registro de emergencias de las semillas por fecha	76
Tabla 30: Láminas de agua disponible en el suelo (mm), utilizados en el pronóstico de rendimiento	77
Tabla 31: Valores de profundidad radicular (cm) considerados para el pronóstico del rendimiento	79
Tabla 32: Valores registrado de la profundidad radicular (cm) durante la campaña agrícola	80
Tabla 33: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso fresco para T1 (tn/ha)	81
Tabla 34: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso fresco para T2 (tn/ha)	83
Tabla 35: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso fresco para T3 (tn/ha)	84
Tabla 36: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco para T1 (tn/ha)	86
Tabla 37: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco para T2 (tn/ha)	87
Tabla 38: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco para T3 (tn/ha)	89
Tabla 39: Balance numérico entre los eventos de variaciones y recuperación de estrés hídrico clasificado por intensidad durante toda la campaña	91
Tabla 40: Rendimiento de tubérculo	91
Tabla 41: valores p de los supuestos del DBCA	92
Tabla 42: Resultados de la prueba de Friedman	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estabilidad de la variedad UNICA para 10 localidades de Costa, entre 1995 y 1996.	2
Figura 2: Imágenes del tallo, hoja, tubérculo y flor de la variedad UNICA.	4
Figura 3: Grillaje bidimensional del modelo regional WRF.	14
Figura 4: Grillaje Arawaka C del modelo regional WRF.....	14
Figura 5: Coordenadas verticales del modelo regional WRF.....	15
Figura 6: Grilla horizontal con anidamiento de proporción 3:1.	16
Figura 7: Componentes del modelo regional WRF.	16
Figura 8: Diagrama de flujo para obtención del pronóstico climático.	24
Figura 9: Semillas pre- básicas de papa UNICA (<i>Solanum tuberosum</i> L.).....	30
Figura 10: Instalación de trampas amarillas anexas a los surcos.	32
Figura 11: Trampa con feromona ubicadas entre las sub-parcelas.....	32
Figura 12: Ubicación de los puntos periféricos del campo experimental en una imagen satelital del USGV a 50 metros de alcance de la superficie.	33
Figura 13: Diseño experimental del campo de cultivo.	34
Figura 14: Denominación de las subparcelas del experimento.	35
Figura 15: Distribución de las sub-parcelas de cultivo de papa.	36
Figura 16: Cámara térmica FLIR E60 utilizada en campo.	38
Figura 17: Cuerpo referencial para el cálculo de T_{wet}	38
Figura 18: Cuerpo referencial para temperatura reflejada.	39
Figura 19: Posicionamiento adecuado de la cámara térmica.....	39
Figura 20: Estación meteorológica automática HOBO situado en el centro del campo experimental.	40
Figura 21: Área rectangular referencial para el cálculo de cobertura vegetal.	41
Figura 22: Protocolo de medición de la cobertura Vegetal.	42
Figura 23: Distribución de las filas de cada sub-parcela.	43
Figura 24: Muestreo de biomasa C4_Z2.	44
Figura 25: Proceso de pesado y conteo de tubérculo.....	44
Figura 26: Muestras de tubérculo en la esterilizadora digital.....	45
Figura 27: Germinación de una plántula en la parcela 2, T1.....	46
Figura 28: Muestreo de cada parcela experimental para determinar la lámina disponible de agua.....	47

Figura 29: Medición del sistema radicular realizado el miércoles 25 de julio.....	48
Figura 30: Meteorograma de las temperaturas mínimas pronosticadas (°C).....	52
Figura 31: Meteorograma de las temperaturas máximas pronosticadas (°C).....	54
Figura 32: Meteorograma de la precipitación diaria pronosticada (mm/día).....	56
Figura 33: Meteorograma de la radiación solar diaria acumulada pronosticada (MJ/m ² .día).....	58
Figura 34: Meteorograma de la evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T1 (mm/día).....	60
Figura 35: Meteorograma de la evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T2 (mm/día).....	62
Figura 36: Meteorograma de evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T3 (mm/día).....	64
Figura 37: Cobertura Vegetal (%) vs Días después de la siembra.	65
Figura 38: Unidades experimentales durante la muestra de biomasa C1_Z1 (34 DDS), se observan los tuberculillos de la parcelas 13,14 y 15 (T2, T1 y T3).	66
Figura 39: Evolución temporal de las variaciones del índice CWSI para los tratamientos entre el inicio del periodo de tuberización y llenado de tubérculo.	67
Figura 40: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso fresco (tn/ha) durante 34-50 dds.	68
Figura 41: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso seco (tn/ha) durante 34-50 dds.	69
Figura 42: Evolución temporal de las variaciones del índice CWSI para los tratamientos entre llenado de tubérculo temprano (Solo para T1 y T3), cúspide de producción foliar y llenado de tubérculo tardío.....	71
Figura 43: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso fresco (tn/ha) durante 50-70 dds	72
Figura 44: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso seco (tn/ha) durante 50-70 dds.	72
Figura 45: Evolución temporal de las variaciones del índice CWSI para los tratamientos entre las etapas de llenado de tubérculo tardío y madurez.	73
Figura 46: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso fresco (tn/ha) durante 70-92 dds.	75
Figura 47: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso seco (tn/ha) durante 70-92 dds.	75

Figura 48: Lámina de agua disponible a través de la campaña agrícola	77
Figura 49: Profundidad del sistema radicular vs DDS para los diferentes tratamientos de estrés hídrico con desviaciones estándar.	78
Figura 50: Profundidad del sistema radicular vs DDS durante la etapa de llenado de tubérculo hasta el inicio del periodo de madurez. Los rectángulos punteados representan eventos de variación del estrés hídrico.....	79
Figura 51: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso fresco (tn/ha) para T1 durante de las etapas del desarrollo y los días después de la siembra.	82
Figura 52: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco (tn/ha) para T2 durante de las etapas del desarrollo y los días después de la siembra.	84
Figura 53: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso fresco (tn/ha) para T3 durante de las etapas del desarrollo y los días después de la siembra.	85
Figura 54: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco (tn/ha) para T1 durante de las etapas del desarrollo y los días después de la siembra	87
Figura 55: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco (tn/ha) para T2 durante las etapas del desarrollo y los días después de la siembra.....	89
Figura 56: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco (tn/ha) para T3 durante las etapas del desarrollo y los días después de la siembra.....	90

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Código fuente del <i>namelist.wps</i> : Pronóstico climático de un mes y medio antes de la cosecha.....	101
Anexo 2: Código fuente del <i>namelist.input</i> : Pronóstico de un mes antes de la cosecha...	113
Anexo 3: Medidas de precisión de los pronósticos climáticos	115
Anexo 4: Medidas de precisión de los pronósticos de rendimiento del tubérculo	116

RESUMEN

En el contexto de déficit hídrico que experimentará la costa peruana durante las próximas décadas (Maddocks *et al.*, 2015), es de utilidad implementar metodologías que permitan pronosticar el rendimiento de los cultivos en condiciones de estrés hídrico. La presente investigación fue realizada con un cultivo de suma importancia en nuestro país como lo es la papa (*Solanum tuberosum*) utilizando el pronóstico climático simulado desde un mes y medio; y un mes de anterioridad a la cosecha con el Modelo Regional *Weather Research and Forecasting* (WRF) y el Modelo Agrícola *Solanum*, propuesto por el Centro Internacional de La Papa (CIP) que incluye parámetros integrales para la modelación del rendimiento como el cálculo del estrés hídrico mediante la termometría infrarroja. Se instaló un experimento con la variedad de papa Única en diseño bloques completamente al azar con tres tratamientos de humedad en el suelo (24.15 %, 21.81 % y 18.87 %), en donde se realizaron evaluaciones del crecimiento y desarrollo. Los resultados del pronóstico indicaron al 95 por ciento de confianza, la inexistencia de diferencias significativas entre los valores observados y pronosticados de los rendimientos de tubérculo, presentando un mejor resultado utilizando el pronóstico con un mes y medio antes de cosecha, destacando el segundo tratamiento con subestimaciones de 3.09 tn/ha y 1.20 tn/ha para el peso fresco y seco, respectivamente.

Palabras clave: Gestión agrícola, pronóstico de rendimiento, modelo regional *WRF*, datos *CFSv2*, Centro Internacional de la papa, Modelo agrícola *SOLANUM*, papa (*Solanum tuberosum*) cv. *UNICA*, *Crop Stress Water Index (CSWI)*.

ABSTRACT

In the context of the water deficit that the Peruvian coast will experience in the coming decades (Maddocks *et al.*, 2015), it is useful to implement methodologies that allow forecasting the yield of crops under conditions of water stress. The present investigation was carried out with a very important crop in our country such as the potato (*Solanum tuberosum*) using the simulated climate forecast from a month and a half; and one month before harvest with the *Weather Research and Forecasting Model (WRF)* and the *Solanum Agricultural Model*, proposed by the International Potato Center (CIP) that includes comprehensive parameters for yield modeling such as stress calculation hydric through infrared thermometry. An experiment was installed with the Unique potato variety in a completely randomized block design with three soil moisture treatments (24.15 %, 21.81 % y 18.87 %), where growth and development evaluations were performed. The forecast results indicated at 95 per cent confidence, the non-existence of significant differences between the observed and predicted values of the tuber yields, presenting a better result using the climate forecast with a month and a half before harvest, highlighting the second treatment with underestimations of 3.09 tn/ha and 1.20 tn/ha for fresh and dry weight, respectively.

Keywords: Agricultural management, yield forecast, *WRF* model, *CFSv2* data, International Potato Center, *SOLANUM* agricultural model, UNICA potato (*Solanum tuberosum*), Crop Stress Water Index (CSWI).

I. INTRODUCCIÓN

Con una producción anual de 4 473.03 toneladas, Perú es considerado como el mayor productor latinoamericano de papa (*Solanum tuberosum*) en la actualidad (INIA, 2016). No obstante, la publicación de Maddocks *et al.* (2015) indica que el país experimentaría un crecimiento de hasta -80 por ciento respecto a su oferta hídrica actual para el año 2040, afectando nocivamente a la producción agrícola esperada, principalmente en la costa peruana.

Por otro lado, Gutiérrez *et al.* (2007) han afirmado a la Única como una variedad de papa (*Solanum tuberosum*) resistente al estrés hídrico, de corto periodo vegetativo y de alta demanda en el mercado industrial por su aptitud para la fritura, logrando mantener un rendimiento promedio de 40 tn/ha respecto a otras variedades similares durante todo el año en la costa peruana (CIP, 1998).

En ese sentido en esta investigación se pronosticó el rendimiento de tubérculo de papa cv. Única (*Solanum tuberosum*), sometida a tres niveles de estrés hídrico, con anterioridad a la cosecha, utilizando el pronóstico climático y la modelación agrícola. De esta forma, se adicionó evidencias científicas relacionados con la producción alimentaria ante escenarios adversos relacionados con el cambio climático (Devaux *et al.*, 2010), obteniendo nuevos productos agroclimáticos para la toma de decisiones en la gestión agrícola. Para ello se plantearon los siguientes objetivos:

Obtener los datos climáticos predictores al rendimiento del tubérculo, estimar el rendimiento del tubérculo en diferentes escalas de estrés hídrico (tratamientos de humedad en el suelo) en condiciones experimentales y estimar el rendimiento del tubérculo pronosticado para un mes y medio; y un mes de anticipación a la cosecha.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

La papa (*Solanum tuberosum*) variedad UNICA ha sido sembrada entre los 8° a 18° de latitud sur, y en altitudes desde 80 a 3800 m, obteniendo un rendimiento promedio de 40 tn/ha en localidades como Huancayo en Junín y Chaglla en Huánuco (CIP, 2002). Además, ha logrado mantener su rendimiento a través del año, a diferencia de otras variedades fisiológicamente parecidas como Canchán y Tomasa (CIP, 1998).

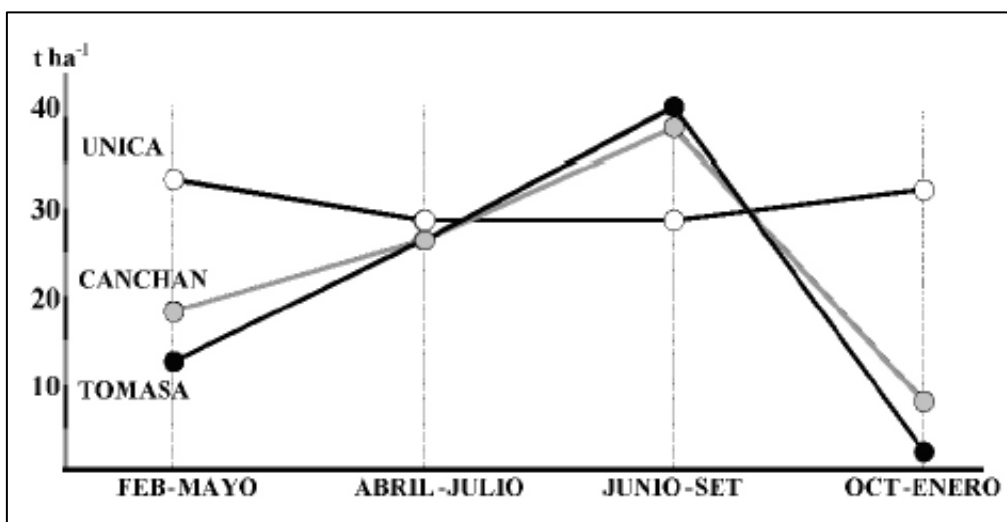


Figura 1: Estabilidad de la variedad UNICA para 10 localidades de Costa, entre 1995 y 1996.

FUENTE: CIP (1998)

Por otro lado, Jones (1999) utilizó el CWSI para cuantificar el estrés hídrico durante largos periodos de sequía en zonas áridas del estado de Arizona (Estados Unidos), por medio de la termometría infrarroja, teniendo en cuenta que las plantas manifiestan ciertas respuestas sensibles como la tasa de crecimiento y cierre estomático.

Adicionalmente, los pronósticos realizados con el modelo *WRF* han podido representar la variabilidad del tiempo atmosférico durante eventos climáticos intra-estacionales (Vargas, 2019), obteniendo aceptables resultados en los pronósticos de temperaturas horarias utilizando anidamientos de hasta 3km (Ñavincopa, 2018).

Respecto a estudios agro-climáticos, los pronósticos ejecutados a través del *WRF* han sido a partir de pronósticos globales en tiempo pasado, es decir, con datos de entrada del *Global Forecast System* (GFS) o también *Reanalysis 1* y *2*. No existió hasta el momento algún antecedente de la performance de datos climáticos como los *Climate Forecast System* (CFSv2), que corresponde por el contrario, a simulaciones para tiempo futuro. Además de acoplar en este proceso tres tipos de información: FLXF (superficie), PGBF (atmósfera) y OCNF (océano).

2.2. Papa (*Solanum Tuberosum*) vc. Única

2.2.1. Generalidades de la variedad

Egúsquiza (2014) clasificó la cv. Única como una variedad híbrida y moderna, es decir, aquella en la que ambos progenitores o predecesores se conocen, además de estar enfocada a la demanda industrial, presentando una agradable aptitud para la fritura. Se ha desarrollado tanto en la costa como en la sierra del país, abarcando una mayor área de siembra de la que se ha aprovechado una productividad competitiva para el mercado (Gutiérrez *et al.*, 2007).

Es considerado una variedad de periodo vegetativo precoz, por lo tanto una campaña agrícola puede extenderse alrededor de los tres meses. Vásquez (2003) coincide que este periodo puede ser de 70 hasta 90 días después de la siembra. No obstante, Egúsquiza (2014) sugiere que este periodo puede alargarse o adelantarse según los factores de la Tabla 1:

Tabla 1: Factores modificadores del crecimiento

Factores	Alargan	Adelantan
Edad de la semilla	Joven	Vieja
Nitrógeno disponible en el suelo	Abundantes	Escaso
Temperatura superficial	Calurosa	Fría
Disponibilidad de agua	Abundantes	Escaza
Reguladores de crecimiento	Promotores	Inhibidores

FUENTE: Egúsquiza (2014).

Por sus características, es una planta de porte bajo, follaje verde oscuro con tallos pigmentados. Escaza floración, en el caso de haberlas presentan un color violáceo pálido que desde lejos asemejan ser blancas.



Figura 2: Imágenes del tallo, hoja, tubérculo y flor de la variedad UNICA.

FUENTE: Gutiérrez *et al.* (2007). Fotografía: María Miki.

El tubérculo es de tamaño uniforme, de forma alargada, color rojo claro, ojos superficiales, una pulpa blanca marfil y unos brotes rojos violáceos. Es de consistencia menos harinosa. También es resistente a los virus PVX, PVY y PLRV, se le ha observado moderada resistencia al “nematodo del nudo”. Por otro lado, también ha demostrado ser resistente al estrés hídrico (Gutiérrez *et al.*, 2007).

2.2.2. Factores del rendimiento del tubérculo

Egúsquiza (2018) afirma que el rendimiento de la cosecha es resultado por un lado, de la contribución genética o al aporte intrínseco de la planta, del individuo, del órgano y aún de la célula que determinan la expresión de las características, como también el efecto medio ambiental donde se refiere al medio aéreo (clima), subterráneo (suelo) y por último los organismos benéficos (incluye al hombre) y patógenos.

En ese sentido, se sintetizó información relevante de las variables meteorológicas y edáficas relacionadas con las condiciones de La Molina:

2.2.2.1. Temperatura Ambiental

La papa crece de forma óptima entre valores de 16 °C y 25 °C. Concluyó que una buena producción existe mientras exista mayor diferencia entre la temperatura diurna y nocturna.

En el periodo de siembra- emergencia es preferible entre valores de 22 °C y 24 °C, interviene en la velocidad de diferenciación de raíces, elongación de brotes y determinación de futuros tallos.

En los nudos del tallo, el crecimiento es favorecido de manera lineal con un valor de temperatura hasta aproximadamente 24 °C, permitiendo la diferenciación y crecimiento de las hojas. A mayores valores al umbral, pueden contribuir con el crecimiento del tallo de forma lineal hasta los 35 °C, posteriormente inhibiendo el adecuado desarrollo foliar. Por lo tanto, esto se relaciona con la energía lumínica y solar el cual sería menor.

También concluyó que el crecimiento del tallo está relacionado a mayores valores de la temperatura nocturna, por su parte el crecimiento aéreo del tallo es favorecido con mayores valores de la temperatura diurna. Por ello, es preferible que existan mayores valores de la temperatura diurna y menores valores en la nocturna. Si el valor es mayor a 25 °C, se reduce la fotosíntesis.

Por otro lado, si la temperatura nocturna es mayor a 21 °C, retrasa el inicio de tuberización. Si este valor supera los 30 °C dificultaría este evento.

Finalmente las temperaturas mayores a 25°C, pueden contribuir con dos sucesos:

Primero, la disminución en la asimilación neta a causa de mayor respiración, por lo tanto, producen plantas con mayor peso de tallos con entrenudos largos al reducir el área foliar. Finalmente, la producción de tubérculos con menor materia seca por disminuir el tamaño de los mismos.

2.2.2.2. Temperatura de Suelo

Influye en la velocidad de crecimiento: Si el valor es bajo retarda aquel periodo que involucra desde siembra hasta la emergencia, sin embargo, un valor alto no solo retarda la tuberización, sino que contribuye a que la planta disminuya en el tamaño y número de tubérculos.

2.2.2.3. Humedad en el Suelo

Un valor deficiente también retarda aquel periodo que involucra desde siembra hasta la emergencia. También contribuye con la diferenciación de raíces y estolones.

2.2.2.4. Demanda Hídrica, Evapotranspiración

La frecuencia de riegos en el cultivo de papa debe ser más corto en comparación a las necesarias en otros cultivos como algodón y cebada, variando según la textura de suelo.

Cuanto mayor sea la evapotranspiración diaria, el número de días entre dos riegos debe ser más corto y aún más corto en suelos con textura media (más suelto o de textura de suelo franca) para evitar condiciones estresantes por déficit de agua en las plantas.

Tabla 2: Número de días entre dos riegos para evitar estrés de humedad en dos texturas de suelo

Evapotranspiración diaria	Textura Fina	Textura media (Franco arenoso)
3	12	8
5	5	3
7	3	2
9	2	1

FUENTE: Egúsquiza (2014).

Como respuesta inmediata al déficit hídrico, se produce el cierre de las estomas. Por lo tanto, reduce la transpiración para retener la humedad disponible, aunque ello produzca la reducción la actividad fotosintética, involucrando de esta forma el crecimiento y desarrollo aéreo, como también al rendimiento del tubérculo (Ver Tabla 3).

Cuando existe reposición de agua en el suelo, están involucrados: La fuerza de succión del sistema radicular frente y la fuerza de retención de las partículas de suelo. Se tiene en cuenta que el equilibrio de ambas fuerzas (absorción y retención) puede producirse a una profundidad de 15 cm siempre y cuando exista una presión de 0.5 bar, a la que denomina valor límite de tensión hídrica.

Tabla 3: Efectos del Estrés hídrico en cultivos de papa (*Solanum Tuberosum*)

Etapas de la Campaña agrícola	Efectos del déficit hídrico
Periodo de siembra – emergencia	Retrasa la emergencia de plantas. Reduce la masa radicular. Produce emergencia desuniforme. Produce desuniformidad en el tamaño de plantas. Produce “fallas” en la densidad del cultivo. Reduce el número de tallos principales.
Crecimiento inicial y lineal	Reduce la tasa de crecimiento Producen floración anticipada: Produce tuberización anticipada Incrementa la susceptibilidad de las plantas a plagas insectiles
Periodo de pleno crecimiento	Reducción de la actividad fotosintética Reduce el número de tubérculos Produce maduración anticipada Produce tubérculos de menor tamaño

FUENTE: Egúsquiza (2014).

2.3. Crop Water Stress Index (CWSI)

El parámetro denominado *Crop Water Stress Index* (CWSI) permite calcular el grado de transpiración (perdida hídrica) que ocurre en una planta instantáneamente. Para ello es requerido el registro de la temperatura de la planta y el déficit de presión de vapor del agua. En una planta estresada, existe menos transpiración por causa del cierre estomático aumentando la temperatura de la hoja respecto al ambiente (López *et al.*, 2009). Por lo tanto,

esta técnica utiliza la termografía para la cuantificación del estrés, es decir, la detección de la radiación infrarroja emitida por la planta.

Adicionalmente, esta metodología es de importante uso práctico dentro de la programación del riego en regiones áridas y semiáridas (López *et al.*, 2009), ya que existe relación lineal directa con potencial hídrico de la hoja y la conductividad presente en suelos costeros. De esta forma, se convierte en una herramienta eficiente para la agricultura intensiva sostenible o también llamada agricultura de precisión, esto es, cuando se optimiza el riego para la adecuada gestión hídrica (Capraro, 2017).

La ecuación general incluye parámetros ambientales que afectan de forma directa en la relación entre temperatura del dosel vegetativo y estado hídrico. Sus valores oscilan entre 0 a 1, cuando las plantas van de una condición bien regada a una condición totalmente estresada, respectivamente (López *et al.*, 2009).

$$CWSI = \frac{T_C - T_{wet}}{T_{dry} - T_{wet}}$$

Dónde: T_C : temperatura del dosel vegetativo, T_{wet} : temperatura de una hoja transpirando a la máxima tasa de potencial y T_{dry} : temperatura de una hoja que no transpira.

Adicionalmente Bellvert *et al.* (2010) han determinado una ecuación empírica utilizando la diferencia de la temperatura de la hoja y del ambiente. En síntesis, se determina el valor de T_{dry} adicionando 7 °C a la temperatura del ambiente, siempre y cuando el valor de T_C se obtenga entre las 12 y 15 UTC. Así mismo, T_C y T_{wet} se cuantifica analíticamente a través de las cámaras térmicas, un proceso que explicará en la metodología.

Por lo tanto, según el criterio utilizado por Bellvert *et al.* (2010), la ecuación empírica para la costa peruana es:

$$CWSI = \frac{T_C - T_{wet}}{(T_a + 7) - T_{wet}}$$

Dónde: T_a es la temperatura del ambiente

2.4. Modelo Agrícola *Solanum*

El Centro Internacional de la Papa (CIP) ha definido el modelo agrícola *Solanum* como una representación de los procesos de crecimiento y desarrollo de un cultivo de la papa (*Solanum Tuberosum*), expresada en ecuaciones matemáticas. Es un software gratuito y disponible para Microsoft Windows.

Está basado en un modelo de crecimiento de cultivo que simula la asimilación de materia seca a través del uso eficiente de radiación (Kooman *et al.*, 1996). Este principio define que la velocidad de producción de biomasa (rendimiento) es directamente proporcional a la radiación interceptada por el cultivo. Coincidiendo con el criterio de García (1992) que afirma la producción de biomasa (rendimiento) será dependiente de la radiación solar, siempre y cuando exista un control del recurso hídrico suministrado.

En efecto, estas condiciones deberán cumplir siempre y cuando el cultivo se encuentre bajo condiciones biofísicas óptimas posibles (semillas pre-básicas), sin limitaciones de agua y nutrientes, sin daño causado por enfermedades, plagas y competencias de malezas.

El modelo simula el rendimiento del tubérculo en diferentes etapas del desarrollo del cultivo, considerando las condiciones ambientales y otros factores que contribuyen al resultado final del rendimiento (Egúsquiza, 2018). Incluye valores registrados para diferentes variedades de papa (*Solanum tuberosum*), como la Única, adicionando sus respectivos parámetros fisiológicos obtenidos anteriormente en el campo experimental, como se observa en la Tabla 4 (Condori *et al.*, 2018).

Cada ejecución del modelo se denomina *escenario*. Los registros finales de cada *escenario* detallan reportes diarios en formato *.txt* sobre el rendimiento hasta los 160 días posteriores a la siembra, indicando los siguientes parámetros:

- Producción total de biomasa (tn/ha)
- Producción de peso fresco del tubérculo (tn/ha)
- Producción de peso seco del tubérculo (tn/ha)

Cada escenario puede ser bajo dos condiciones:

- Crecimiento potencial o sin restricción de agua
- Condiciones donde existe limitación de agua, en el cual permite realizar análisis del rendimiento bajo diferentes regímenes de agua y diferencias entre tratamientos de riego.

Tabla 4: Datos de entrada necesarios para el pronóstico de rendimiento

Datos predictores o de entrada	Condiciones del pronóstico	
	Crecimiento Potencial	Restricción hídrica
Datos climáticos	Temperatura máxima (°C)	
	Temperatura mínima (°C)	
Datos climáticos	Radiación solar (MJ/m ² . día)	
	Horas de sol teórica (fotoperiodo)	
Parámetros de cultivo (Para cv. UNICA La Molina-2018)	Desarrollo de Cobertura Foliar	Precipitación (mm)
		Evapotranspiración potencial (mm)
		Complementarios (no obligatorios): Irrigación (mm), temperatura de suelo(°C) y horas de sol efectiva
		Densidad de planta (Planta por metro cuadrado) = (Por definir)
		Índice Máximo de Cobertura Foliar = 1.0
		Tiempo térmico desde la tasa máxima de crecimiento de la Cobertura Foliar = 287.6 Cd
		Tiempo térmico de la tasa máxima de la Cobertura Foliar = 859.5 Cd
	Producción de la materia seca del tubérculo	Índice máximo de cosecha = 0.9
		Tiempo térmico máximo del tubérculo en tasa de partición = 607.4 Cd
	Otros	Tiempo térmico antes proceso de iniciación de la tuberización = 310.3 Cd
Contenido de materia seca de tubérculos = 0.18		
Parámetros del suelo	Sensibilidad al fotoperiodo = 0.5	
	Fotoperiodo crítico = 15	
	Uso de radiación promedio eficiencia (RUE) = 5.12	
	Día de emergencia = (Por definir)	
	Tubo de riego	Temperatura mínima para el inicio de la tuberización = 4°C
		Temperatura máxima para el inicio de la tuberización = 35°C
		Temperatura óptima para el inicio de la tuberización = 17 °C
		No requerido
		Tipo de suelo (textura)
		Contenido de humedad en el suelo o lámina de agua (mm)
	Profundidad del sistema radicular (m)	

FUENTE: Condori *et al.* (2018).

Cabe aclarar que si no se cuenta con los datos climáticos tales como la radiación solar, horas de sol teórica y evapotranspiración potencial, pueden ser obtenidos a partir de variables previamente estimadas, especificadas en la Tabla 5:

Tabla 5: Variables estimadas según ecuaciones matemáticas del modelo Solanum

Variable a calcular	Variabes pre-estimadas en el modelo
Horas teóricas de sol	Latitud exacta (Grados, minutos y segundos).
Radiación Solar	Coficiente empírico de Angstrom-Prescott. Horas teóricas de sol
Evapotranspiración Potencial	Intensidad de viento, Albedo, elevación sobre el nivel del mar, horas efectivas de sol o radiación solar.

2.5. Climatic Forecast System Versión 2 (CFSV2)

Es un modelo que representa la interacción global entre los océanos, la superficie y la atmósfera, producido por científicos bajo la guía de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP). Utiliza enfoques científicos para captar observaciones de fuentes de datos que incluyen observaciones de superficie, observaciones de globos aerostáticos, observaciones de aeronaves y observaciones de satélite.

La versión 2 de CFS representa una actualización del modelo y comenzó a funcionar en el NCEP a partir del 30 marzo de 2011. Esta versión ofrece una mejorada resolución en comparación al producto anterior, incluyendo la siguiente documentación: parámetros de presión (PGB), archivos de flujo (FLXF), información oceánica (OCNH y OCNF) y superficies isentrópicas (IPVF), todas especificadas en las tablas 6 y 7 (Saha *et al.*, 2010).

Tabla 6: Documentación disponible del CFS versión 2 (CFSv2)

Información	Resolución (2011-presente)	Descripción
FLXF	T126 (Matriz gaussiana 384x190)	Superficie, Flujos radiativos (103 variables)
PGBF	1 grado	Datos en 3 D con 37 niveles en mb (524 variables)
OCNH	0.5 grados	Datos en 3 D de datos oceanográficos con 40
OCNF	0.5 grados	niveles en mb (222 variables)
IPVF	1 grado	Datos en 3 D con niveles isotrópicos con 16 niveles en mb

FUENTE: Saha *et al.* (2010).

Por otro lado, las predicciones climáticas globales obtenidas son tres:

Tabla 7: Descripción de los productos del CFS versión 2

Pronostico Climático	Características	Resolución Temporal	Resolución Espacial	Observaciones
Nivel 1:				39 variables FLX
Pronostico climático estacional	88 variables seleccionadas		Matriz T574	15 variables PGB 21 variables OCN
Nivel 2:	Medias mensuales para los 5 tipos de información	Cada 6 horas	Horizontal: 27 km Vertical: 64 niveles de presión híbridos sigma	3 variables IPV Datos cada 00Z,06Z,12Z, 18Z y promedios diarios para cada mes
Pronostico climático completo cada 9 meses	Climáticos diarios con 88 variables seleccionadas		para el análisis de tiempo real	39 variables FLX 15 variables PGB 21 variables OCN 3 variables IPV
Nivel 3:				
Pronostico climático completo cada 45 días				

FUENTE: Saha *et al.* (2010).

2.6. Modelo Regional Weather Research and Forecasting (WRF)

Es un modelo de predicción numérica a nivel de usuario enfocado en realizar *pronósticos* para fines de investigación y enseñanza. Entendiendo el término *pronóstico* como la ejecución del modelo que puede ser para tiempo pasado o futuro respecto a la condición inicial.

Actualmente es gestionado por *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) y por la *University Corporation for Atmospheric Research* (UCAR). Ambas instituciones permiten la actualización y la guía tutorial para cualquier usuario (Dudhia, 2014).

El modelo regional tiene un sistema de asimilación de datos (WRFDA) que permite mejorar la calidad de las condiciones iniciales, también se pueden hacer simulaciones ideales para verificar la correcta instalación del modelo en los ordenadores.

Presenta un código abierto que puede ser descargado a través de un sistema operativo basados en *UNIX* como *Darwin* o *AIX*, o en OS's cuyo kernel sea *LINUX*. Este presenta dos

núcleos dinámicos de operación integrados en el mismo paquete informativo (Ñavincopa, 2014):

- *Advance Research WRF (WRF-ARW)*: Desarrollado y gestionado por *NCAR Mesoscale and Microscale Meteorology Division (NCAR-MMM)*. Ofrece más versatilidad en la configuración y el manejo para el usuario, por ello es más utilizado alrededor del mundo (Dudhia, 2014).
- *WRF Non-hydrostatic Mesoscale Model (WRF-NMM)*. Desarrollado por la NOAA/NCEP y la *Developmental Testbed Center (DTC)*. Tiene fines operacionales, es más rápido y eficiente.

2.6.1. Grillaje tridimensional del modelo

Aunque las dimensiones de las grillas horizontales (Δx y Δy) sean constantes en la formulación del modelo, no se cumple para la longitud de la grilla vertical ($\Delta \eta$), donde el número de niveles es especificado en la inicialización.

2.6.1.1. Grilla Horizontal

Esta grilla es del tipo Arakawa C. En los puntos de esta grilla horizontal se calculan las variables meteorológicas necesarias para la simulación (Ver figura 3).

- Las variables “ θ ” representan a las variables escalares: temperatura, precipitación, radiación solar, humedad relativa, etc. El valor ubicado en el centro de cada celda representa el promedio en toda la grilla (Coiffier, 2011).
- Las variables vectoriales como el viento se representa con sus componentes: zonal y meridional (u , v), respectivamente, en el centro de cada lado de una celda de grilla

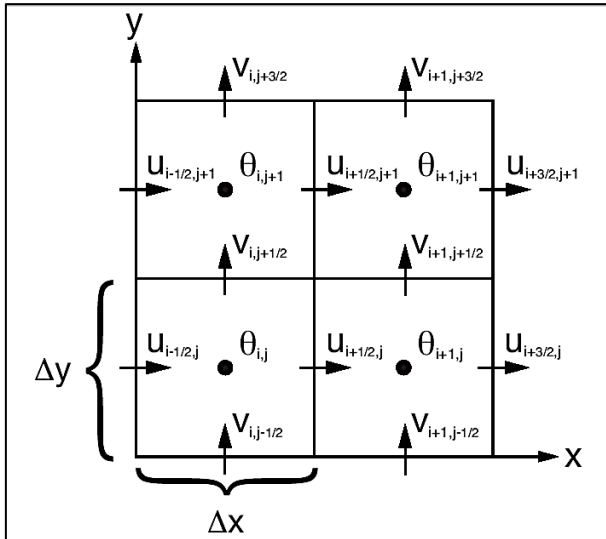


Figura 3: Grillage bidimensional del modelo regional WRF.

FUENTE: Coiffer (2011).

2.6.1.2. Grilla Vertical

Se conocen como coordenadas verticales del tipo sigma (η), un tipo de coordenadas que imita la forma del relieve topográfico para mejorar los pronósticos (Skamarock *et al.*, 2008).

Este tipo de coordenadas permite calcular las variables meteorológicas en puntos determinados de cada celda de simulación según la grilla vertical (Ver figura 4).

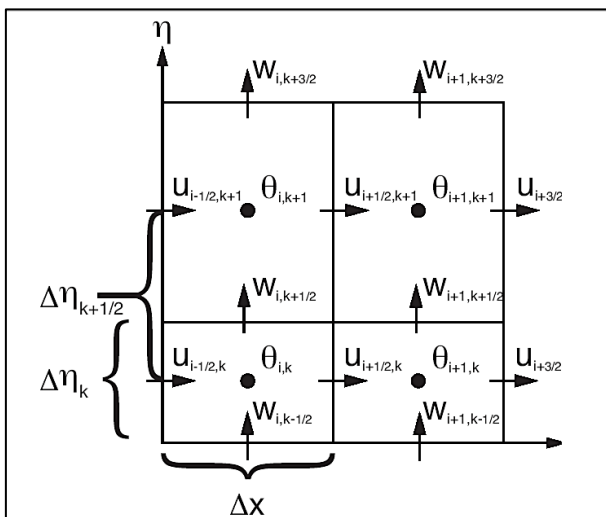


Figura 4: Grillage Arawaka C del modelo regional WRF.

FUENTE: Coiffer (2011).

Las coordenadas verticales de presión se denotan por el valor de η y sus valores oscilan desde uno a cero, desde la superficie hasta el nivel más alto del dominio, respectivamente (Skamarock *et al.*, 2008) como se observa en la Figura 5:

$$\eta = \frac{P_h - P_{ht}}{P_{hs} - P_{ht}}$$

Dónde: η es la coordenada vertical, P_h es la componente hidrostática de la presión, P_{hs} es la componente hidrostática de la presión en la superficie y P_{ht} es la componente hidrostática de la presión a un determinado nivel.

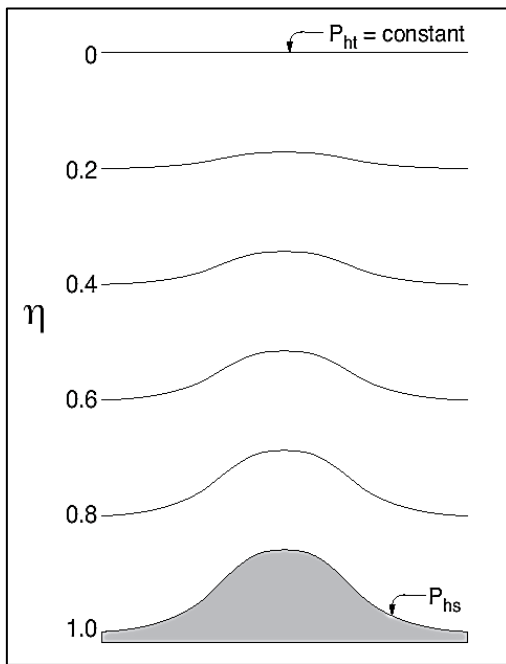


Figura 5: Coordenadas verticales del modelo regional WRF.

FUENTE: Coiffer (2011).

2.6.2. Anidamiento del modelo

El término se refiere al proceso de obtener un dominio más pequeño (nido o dominio hijo) y por lo tanto, una mayor resolución espacial sobre una región de interés dentro de un dominio más grande (dominio padre), estableciendo este último las condiciones de frontera del dominio más pequeño (Ver figura 6). Solo es posible el anidamiento horizontal (Skamarock *et al.*, 2008).

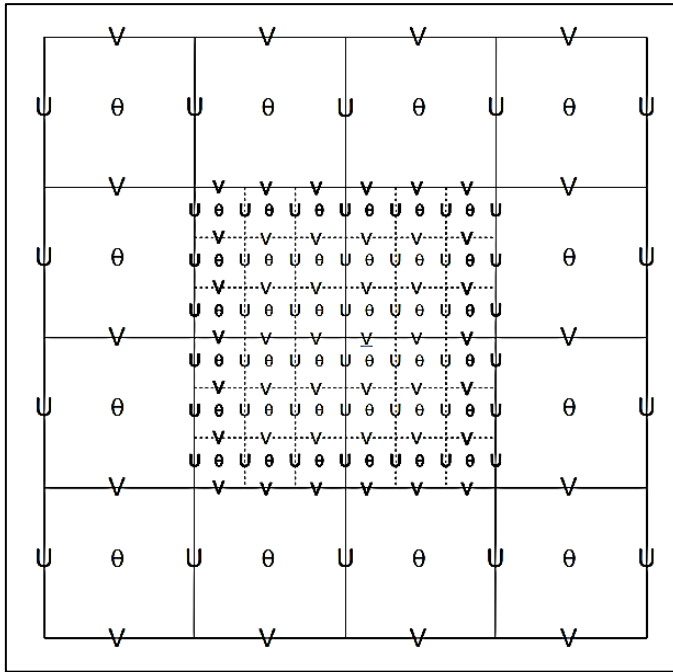


Figura 6: Grilla horizontal con anidamiento de proporción 3:1.

FUENTE: Skamarock *et al.* (2008).

2.6.3. Componentes del modelo

Todo el sistema permite realizar los *pronósticos* meteorológicos y climáticos para un tiempo pasado o futuro. Fundamentalmente es requerido datos de entrada, también denominado *datos de análisis* (Ñavincopa, 2014), provistos generalmente por los modelos globales disponibles en la web.

Consta de tres principales componentes, a su vez estos tienen programas (paquetes informáticos) que permiten la ejecución completa del modelo regional (Ver figura 7).

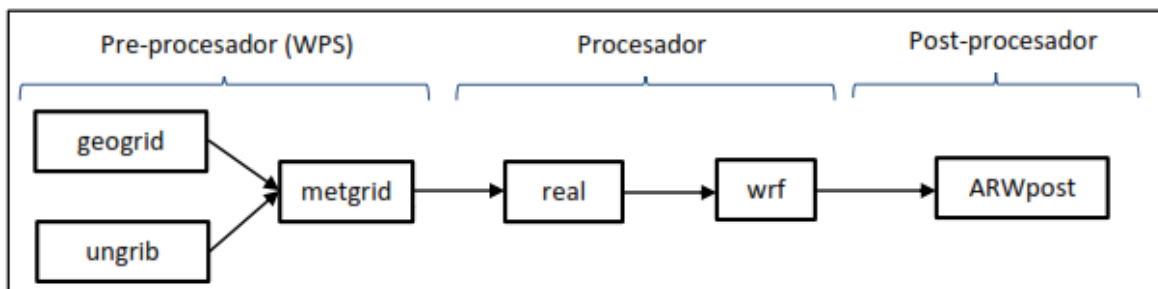


Figura 7: Componentes del modelo regional WRF.

FUENTE: Ñavincopa (2014).

2.6.3.1. Sistema de pre-procesamiento del WRF (WPS)

Tiene como objetivo disponer los datos de entrada para el siguiente componente del modelo. Para ello está compuesto con tres programas: *geogrid*, *ungrib* y *metgrid*. (Ñavincopa, 2014)

Geogrid

- Define la proyección del mapa terrestre (Como la Proyección *Mercator* para latitudes ecuatoriales).
- Establece el lugar geográfico (coordenadas) y las dimensiones de los dominios (también denominado como *nidos*).
- Interpola los datos terrestres estáticos horizontalmente (altura de topografía, uso de suelo, tipo de suelo, vegetación, albedo).

Ungrib

- Pasa los datos de entrada desde un formato GRIB (como los *PGB*, *FLX* & *OCN*) a un formato intermedio.
- Extrae los campos meteorológicos necesarios de los datos de entrada.

Metgrid

- Interpola horizontalmente los datos meteorológicos de entrada extraídas por el *ungrib* para los dominios definidos por el *geogrid*.
- Interpola otros campos meteorológicos a la ubicación “ θ ” de las celdas de *grilla* del modelo WRF.

2.6.3.2. Procesador del WRF (WRF-ARW)

Realiza la integración numérica tanto en las coordenadas horizontales, como en las coordenadas verticales del modelo. Para ello cuenta con dos programas: *real* y *wrf*.

Real

- Elige los niveles del modelo en la vertical.
- Interpola los datos a los niveles del modelo en la vertical.
- Elabora las condiciones iniciales de los dominios que se eligen.
- Elabora las condiciones de frontera del *pronóstico*.

Wrf

- Realiza las integraciones numéricas del *pronóstico*.
- Calcula las parametrizaciones físicas para el *pronóstico*.

2.6.3.3. Post-procesador y herramientas de visualización

Está conformado por un único programa denominado *ARWpost*, que permite convertir los archivos de salida del *wrf* a un formato que pueda ser leído por otro *software*. No obstante, también existen otros post-procesadores disponibles que no pertenecen a los componentes del modelo regional. Para visualizar las salidas post-procesadas del modelo se puede usar *softwares* como GRADS o NCL.

2.7. Diseño en bloques completamente al azar con repeticiones (D.B.C.A.)

Se define un D.B.C.A. cuando existen unidades experimentales (como un grupo de plantas) distribuidos en bloques (estratos) y tratamientos (niveles de un factor), con el objetivo de disminuir la variabilidad que podría existir entre ellas (Badii *et al.*, 2007).

Badii *et al.* (2007) afirman que la principal ventaja de utilizar este diseño experimental, es de aumentar la precisión del experimento, mediante tres principios:

- Para un diseño experimental compuesto de 3 a 5 grupos (bloques y tratamientos), las repeticiones de la variable respuesta (rendimiento del tubérculo) deberían ser un mínimo de cinco. De esta forma se obtienen los suficientes grados de libertad del error experimental, es decir, la variancia estimada mediante dicho tratamiento disminuye a medida que se incrementa el número de repeticiones.
- Es requerido que cada unidad experimental tenga iguales condiciones para recibir el tratamiento, es decir, que cumpla con la aleatorización. Este proceso implica la asignación aleatoria de los tratamientos a las unidades experimentales, permitiendo que las conclusiones realizadas sean estadísticamente válidas. Adicionalmente evita sesgos tanto en la estimación del error experimental como los efectos de los tratamientos.

- El control local, así como el uso de tratamientos y bloques tienen como objetivo reducir el error experimental, siempre y cuando el agrupamiento de las unidades experimentales sean homogéneas (del mismo tipo de procedencia, variedad, etc.)

2.7.1. Modelo lineal de un D.B.C.A.

Badii *et al.* (2007) plantea el denominado *Modelo de efectos fijos*, que consiste cuando los tratamientos incluidos en el proceso experimental han sido fijados por el investigador, por lo tanto, las conclusiones determinadas mediante las pruebas de hipótesis posteriores serán estadísticamente válidas para los tratamientos. Este modelo es el más utilizado por la comunidad científica.

El modelo lineal del presente trabajo de investigación está representado por:

$$y_{ij} = \mu + t_{i(T1,T2,T3)} + \beta_{j(Observado,Pronosticado)} + \varepsilon_{ij}$$

Dónde: y_{ij} = Rendimiento del cultivo cuantificado (Peso fresco y seco del tubérculo)

μ = Es el efecto de la media general de los rendimientos.

$t_{i(T1,T2,T3)}$ = Es el efecto del tratamiento (Niveles de estrés hídrico por el CWSI)

$\beta_{j(Observado,Pronosticado)}$ = Es el efecto de los bloques (Metodología de cálculo).

ε_{ij} = Es el efecto el error experimental en el i-esimo tratamiento y j-esimo bloque.

Este modelo está sujeto a varios supuestos:

- Los efectos del modelo son aditivos.
- Las relaciones entre los efectos del modelo son lineales.
- Los errores del modelo siguen una distribución normal estandarizada. (Existen pruebas como la de *Anderson-Darling*, *Shapiro Wilks*, *Kolmogorov-Smimov*, etc.)
- Los resultados del experimento son independientes entre los tratamientos y bloques.
- Las diferentes poblaciones generadas por los grupos de los diferentes tratamientos tienen variancias iguales (*Prueba de Bartlett*).

2.7.2. Prueba de Friedman

Wilks (2006) lo define como una prueba estadística no paramétrica, considerándolo como un alternativo al análisis de varianza (ANOVA), en otros términos, también tiene como objetivo comprobar si existen diferencias significativas entre los tratamientos. La hipótesis nula señala que todos los tratamientos tienen efectos idénticos y por el contrario, la hipótesis alterna concluye diferencias entre sí. En estos casos, se utilizan indicadores como el promedio y los rangos (categorías).

Es aplicable cuando las unidades experimentales estén distribuidas en un DBCA y no cumplan con algunos de los supuestos del *modelo de efectos fijos*.

III. METODOLOGÍA

3.1. Materiales

3.1.1. *Softwares* principales

- *Solanum* versión 3.5, el modelo incluye casi todos los parámetros de cultivo de la variedad UNICA, con excepción de la densidad de planta y el día del inicio de emergencia.
- *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) versión 3.8, modelo atmosférico que procesa datos de entrada para realizar proceso de *downscasting* dinámico y generar datos a resolución horizontal deseada o el pronóstico climático.
- Microsoft Excel 2013, para la gestión de los datos obtenidos del proceso.
- *R Studio* versión 3.6.1, entorno de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R para desarrollar pruebas estadísticas relacionadas con el D.B.C.A. y Friedman.

3.1.2. *Softwares complementarios*

- *TIP CIP* versión 3.1, para obtener registros de las temperaturas foliares (dosel de la hoja).
- *FLIR*, procesa las fotografías de las cámaras térmicas obtenidas en campo y para obtener el valor de T_{wet} utilizado en la fórmula del CSWI.
- *Canopy Cover* versión 2.1.1, permite obtener los valores de la cobertura vegetal.

3.1.3. **Datos utilizados en el pronóstico de rendimiento**

- Datos climáticos diarios de la estación meteorológica del CIP: temperatura máxima y mínima (°C), radiación solar ($MJ/m^2.día$), precipitación acumulada (mm) y evapotranspiración potencial (mm/día) desde el 13 de junio hasta el 13 de setiembre del 2018.
- Datos climáticos diarios pronosticados con el *WRF* utilizando datos de entrada *CFSv2*: temperatura máxima y mínima (°C), así como la precipitación diaria (mm) desde el 27 julio hasta el 13 setiembre del 2018.
- Datos climáticos diarios estimados a partir de los datos climáticos diarios pronosticados: radiación solar ($MJ/m^2.día$), horas de sol teórica y evapotranspiración potencial (mm) 27 julio hasta el 13 setiembre del 2018.
- Datos de cobertura vegetal (%), temperatura foliar (°C), lámina de agua disponible en suelo (mm) y longitud del sistema radicular (cm) desde el 13 de junio hasta el 13 de setiembre del 2018.

3.1.4. Instrumental de campo (equipos)

- Estación meteorológica automática HOBO.
- Un horno industrial o esterilizador y una balanza *Pesacon* de serie *EK-3000i*.
- Una cámara térmica de marca *FLIR E60*.
- Cámara fotográfica profesional marca *Canon*.
- Nivelador, una regla y un soporte.

3.1.5. Otros materiales

- 2700 semillas pre-básicas de papa (*Solanum Tuberosum*) cv. Única.
- 15 bolsas plásticas y 60 bolsas de material periódico reutilizables.
- Tabla de registro, bolígrafos, marcador indeleble, lápiz y borrador.
- Cintas de riego tecnificado. Incluyendo bombas (*plasson*), válvulas y tampones.
- Reservorio de agua *Eternit* una capacidad de 5000 y 250 litros.
- 12 trampas para polillas: Una batea plástica, agua, detergente y feromonas.
- 15 trampas amarillas para insectos menores: Soporte de madera, chinches o clavos, material plástico de color amarillo.
- Herramientas de trabajo de campo: Huincha, pico, rastrillo, escalera y pala.
- 6 muestreadores de suelo de forma cilíndrica de metal y 15 de vidrio.
- Paletas, bandeja rectangular con una tela blanca, un cartón rectangular y cubetas de plástico.
- Fertilizantes con los siguientes componentes: Nitrato de Potasio cristalizado (KNO_3), Nitrato de Amonio (NH_4NO_3), Ácido fosfórico (H_3PO_4), Nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) y Nitrato de Magnesio hexahidratado ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) con pureza al 98 por ciento.

3.2. Métodos

3.2.1. Obtención de los datos climáticos predictores

Para la obtención de los datos meteorológicos predictores, se tuvo en cuenta el siguiente diagrama de flujo:

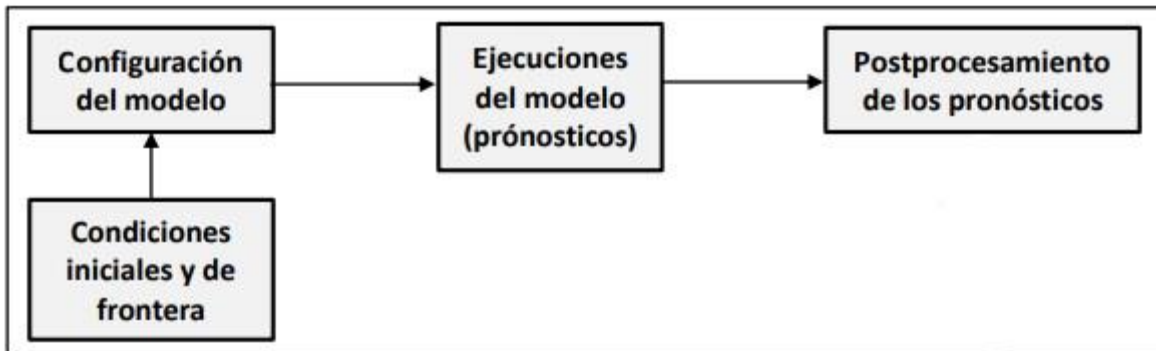


Figura 8: Diagrama de flujo para obtención del pronóstico climático.

FUENTE: Ñavincopa (2018).

3.2.1.1. Determinación de las condiciones iniciales y de frontera

Se usaron como condiciones iniciales y de frontera los datos de pronóstico del modelo *Climatic Forecast System versión 2* (CFSv2), descargados desde la página web: https://nomads.ncdc.noaa.gov/modeldata/cfsv2_forecast_6-hourly_9mon. Estos datos son parte de un pronóstico global completo de 9 meses, conteniendo información de procesos físicos en la atmosfera, superficie y océano: parámetros de presión (PGBF), archivos de flujo (FLXF) y datos oceánicos (OCNF), respectivamente. Se describen algunas especificaciones a continuación:

- Tienen una resolución temporal de 6 horas (00, 06, 12 y 18 UTC) en formato *GRB2*.
- Tiene una resolución espacial de 0.5° (55.87 Km) con 37 niveles de presión.

Los datos descargados se describen en la Tabla 8. Nótese que las condiciones iniciales empezaron con 24 horas de anterioridad a la fecha de interés, con este criterio considera un periodo de estabilización del modelo denominado *spin-up* (Ñavincopa, 2018). Criterio propuesto por los meteorólogos Brandt Maxwell (*National Oceanic and Atmospheric*

Administration- NOAA) y Julio Reyes Fernández (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE) para realizar pronósticos climáticos con el modelo regional.

Tabla 8: Descripción de los datos entrada

	Un mes de anticipación a la cosecha	Un mes y medio de anticipación a la cosecha
Condiciones iniciales (Resolución temporal de 6 horas)	12 de agosto a las 00 Z hasta el 14 de setiembre a las 00 Z (136 archivos)	27 de julio a las 00 Z hasta el 14 de setiembre a las 18 Z (200 archivos)
Condiciones de frontera (Resolución temporal de 6 horas)	4 archivos consecutivos para cada condición inicial hasta completar 24 horas (528 archivos)	4 archivos consecutivos para cada condición inicial hasta completar 24 horas. (800 archivos)
Total de datos (PGB. FLX y OCN)	$(136+528)*3 = 1992$ archivos GRB2	$(200+800)*3 = 3000$ archivos GRB2

3.2.1.2. Configuración y ejecución del modelo

La configuración del modelo regional consistió en obtener las dimensiones en un espacio tridimensional, en donde se ejecutaron posteriormente los pronósticos de las variables meteorológicas predictores al rendimiento (Ñavincopa, 2018).

Se crearon un dominio padre de 27 km y dos anidamientos de 9 km y 3 km, respectivamente (Ver Tabla 9). Todos ellos enfocados para el área de La Molina y establecidos por la coordenada ubicada en el centro de la parcela experimental (12° 04 latitud sur y 76° 57 longitud oeste). Tanto en el dominio padre como en los anidamientos, se registraron información por defecto posteriormente modificados mediante los archivos de texto acoplados al modelo *namelist.wps* y *namelist.input*.

Tabla 9: Configuración general elegida en el modelo regional

	Dominio Padre	1er Anidamiento	2do Anidamiento
Niveles verticales		37	
Resolución horizontal dx	27 km	9 km	3 km
Resolución horizontal dy	27 km	9 km	3 km
Resolución temporal		1 hora	
Tipo de anidamiento		<i>Two-way</i>	

El tipo de anidamiento *two-way* permitió que cada de una de ellas retroalimente al dominio padre enriqueciendo el mecanismo de la simulación, obteniendo mejores pronósticos (Dudhia, 2014).

La ejecución del modelo se desarrolló inicialmente en preprocesador del modelo (Carpeta *WPS*). Con el archivo de texto *namelist.wps* previamente configurado, se procedió la ejecución de *geogrid.exe*, *ungrib.exe* y *metgrib.exe*, respetando este orden. En este proceso se interpolan características topográficas y de las grillas, respectivamente.

Las salidas obtenidas de la ejecución del *WPS* se enlazaron al directorio donde se encontraron los programas: *real*, *wrf*, además del archivo de texto *namelist.input* previamente configurado. Luego se ejecutaron *real.exe* y *wrf.exe*, respetando este orden. En este proceso se generaron las condiciones iniciales y de frontera, así como los pronósticos climáticos incluyendo las variables meteorológicas predictoras (3 archivos de formato *.nc*, correspondientes a cada dominio).

En el post-procesamiento se ejecutó *ARWpost.exe*, con el archivo de texto *namelist.ARWpost* previamente configurado. Aquí se colocaron las fechas de interés con una resolución temporal horaria: Desde el 27 de julio a las 05:00 UTC (00:00 hora local) y el 12 de agosto 05:00 UTC (00:00 hora local) hasta el 14 de setiembre a las 04:00 UTC (23:00 hora local), respectivamente. Los resultados fueron archivos binarios de formatos *.ctl* y *.dat*, posteriormente visualizados con el software *GRADS*.

3.2.1.3. Obtención de las variables meteorológicas predictoras

Los archivos binarios se visualizaron con el software *GRADS*, en donde se procedió a extraer las variables meteorológicas predictoras (Ver Tabla 10).

Tabla 10: Variables predictoros directamente obtenidas

Dato obtenido en el post-procesamiento del WRF (<i>GRADS</i>)	Dato predictor en el Modelo Agrícola SOLANUM
Temperatura (°C)	Temperatura máxima y mínima (°C)
Precipitación total acumulada (mm/día)	Precipitación acumulada diaria (mm/día)

Las temperaturas máximas y mínimas, respectivamente, fueron identificadas mediante la comparación de los valores horarios del *enésimo* día.

Así mismo, la precipitación acumulada total fue obtenida mediante la diferencia entre los valores obtenidos del día siguiente y el *enésimo* día a las 07:00 am hora local. Es decir, bajo el mismo protocolo de un observador meteorológico al aplicar la medición de un instrumento totalizador de precipitación tipo costa.

La radiación solar diaria acumulada fue estimada mediante la fórmula de Hargreaves y Samani, tal como lo indica el manual 56 de Allen *et al.* (1998), utilizando las temperaturas máximas y mínimas pronosticadas anteriormente:

$$R_S = R_E * KT * (T_x - T_m)^{0.5}$$

Dónde: R_S es la radiación solar diaria acumulada ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$), R_E es la radiación extraterrestre diaria, KT es el coeficiente empírico. T_x y T_m son las temperaturas máximas y mínimas pronosticadas diarias ($^{\circ}\text{C}$), respectivamente.

Según el criterio de Hargreaves, debería considerarse un valor para KT de 0.19 en zonas costeras, no obstante, se aplicó la corrección por altitud según el modelo propuesto por Annandale *et al.* (2002):

$$KT_{\text{corregido}} = KT * (1 + 2.7 * 10^{-5}Z)$$

Dónde: $Z = 241$ m (altitud de La Molina).

Así también, la radiación solar extraterrestre fue estimada mediante la fórmula:

$$R_E = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{SC} * d_r (\omega_s \sin \delta * \sin \varphi + \cos \varphi * \cos \delta * \sin \omega_s)$$

Dónde: $G_{SC} = 0.082 \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ (constante solar), d_r es la distancia relativa tierra-sol, ω_s es el ángulo de la puesta de sol (rad), δ es la declinación solar (rad) y $\varphi = -0.2106$ rad (latitud para La Molina).

Por lo tanto, se utilizó también las siguientes fórmulas auxiliares registradas en el manual 56 (Allen *et al.*, 1998):

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right)$$

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(\tan \varphi * \tan \delta)$$

Dónde: J= [209,256] (número ordinal según los días en el año, es decir, correspondientes a las fechas desde el 28 de julio hasta el 13 de setiembre, respectivamente).

Por otro lado, respecto a los valores de horas teóricas de sol diarias se cuantificaron a través de la fórmula:

$$H_{ST} = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

Dónde: H_{ST} son las horas teóricas de sol (fotoperiodo) y ω_s es el ángulo de radiación a la puesta de sol (rad) calculada anteriormente.

Respecto a la evapotranspiración potencial a nivel diario se estimó mediante la fórmula de *Penman-Monteith* registrado en el manual 56 (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_O = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{\bar{T} + 243} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Dónde: ET_O es la evapotranspiración potencial diaria (mm/día)

Δ es la pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura media pronosticada (KPa/°C)

R_n es la radiación neta solar (MJ/m².día), $G \cong 0$ MJ/m².día (flujo de calor en el suelo a nivel diario)

\bar{T} es la temperatura media pronosticada = $\frac{T_x + T_m}{2}$ (°C), $\gamma = 0.665 * 10^{-3}$ KPa/°C (Constante psicométrica)

u_2 es la velocidad del viento promedio diario pronosticado a 2 metros de altura (m/s)

e_s es la presión de vapor a saturación (KPa) y e_a es la presión real de vapor (KPa)

Para transformar las unidades de R_n y G a mm/día, se multiplicó con un factor igual a 0.408.

Por otro lado, también se utilizó las siguientes fórmulas auxiliares del manual 56:

$$\Delta = \frac{4098 * 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * \bar{T}}{\bar{T} + 237.3}\right)}{(\bar{T} + 237.3)^2}$$

$$R_n = (1 - \alpha)R_s$$

$$e_s = \frac{e^0(T_x) + e^0(T_m)}{2}$$

$$e_a = \frac{e^0(T_x) * \frac{HR_x}{100} + e^0(T_m) * \frac{HR_m}{100}}{2}$$

$$e^0(T) = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right)$$

$$HR = e^0(Td)/e^0(T) * 100\%$$

Dónde: α es albedo de la superficie. Tomando en cuenta el criterio de *Nkemdirin (1978)*, se tomó valores de 0.15, 0.20 y 0.25 según los niveles de estrés hídrico: T_1, T_2 y T_3 , respectivamente.

$e^0(T)$ es la presión de saturación de vapor una temperatura de aire determinada (KPa).

T es la temperatura ambiental (°C)

Td es la temperatura de rocío (°C),

$\exp(\dots)$ 2.7183 (base logaritmo natural) elevado a la potencia (...)

HR_x y HR_m son la humedad relativa pronosticada máxima y mínima en el día (%).

En ese sentido, se obtuvieron los valores horarios del *enésimo* día de la humedad relativa pronosticada y posteriormente fueron comparadas entre sí para obtener los máximos y mínimos.

De igual manera, se obtuvieron los pronósticos del viento sobre 2 metros desde la superficie, incluyendo los componentes zonales y meridionales mediante registros horarios del *enésimo* día. Posteriormente, se obtuvieron los promedios aritméticos de cada componente por separado y finalmente se calculó la magnitud correspondiente (Ver tabla 11).

Tabla 11: Variables predictoras estimadas

Dato obtenido en el post-procesamiento del WRF (<i>GRADS</i>)	Dato predictor en el Modelo Agrícola SOLANUM
Temperatura máxima y mínima (°C)	Radiación solar diaria (MJ/m ² .día)
X-wind & Y-wind component (m/s)	Evapotranspiración potencial diaria (mm/día)
Dew temperature (°C)	

Una vez obtenidas todas las variables predictoras al rendimiento, se registraron y guardaron en un archivo de extensión *.csv* (*delimitados por comas*) organizados en columnas donde incluyeron el día, mes, año, temperatura mínima, temperatura máxima, radiación solar acumulada, precipitación, evapotranspiración potencial y horas de sol teórica.

3.2.2. Estimación del rendimiento del tubérculo

3.2.2.1. Semillas, fertirriego, control de plagas, ubicación geográfica y diseño experimental

El rendimiento del cultivo fue estimado a partir de 2700 semillas sembradas en un campo, que a su vez, fueron obtenidas a partir de 800 semillas pre-básicas provistas por el Centro Internacional de la Papa (Ver figura 9). Esta campaña agrícola comprendió desde el 13 de junio hasta el 13 de setiembre del 2018.



Figura 9: Semillas pre- básicas de papa UNICA (*Solanum tuberosum L.*)

FUENTE: Centro Internacional de la papa. Foto: Mg. Sc. Javier Rinza

También se aplicó un plan de fertirriego en la parcela experimental, el cual estuvo previsto para diferentes fechas de suministro. Las dosis recomendadas fueron proporcionadas por expertos en la especialidad nutricional de cultivos de tuberosas (Ver tabla 12).

Tabla 12: Componentes porcentuales de la fertilización

Fertilizante	Símbolo	Potasio (K_2O)	Nitrógeno (N)	Fosforo (P_2O_5)	Calcio soluble (CaO)	Magnesio (MgO)
Nitrato de Potasio cristalizado (KNO_3)	NK	45%	13.50%			
Nitrato de Amonio (NH_4NO_3)	NDA		33%	3%		
Ácido fosfórico (H_3PO_4)	AF			85%		
Nitrato de calcio $Ca(NO_3)_2$	NCA		15.50%		26%	
Nitrato de Magnesio hexahidratado ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) Pureza 98%	NMG		11%			16%
Interpretación del análisis de suelo en La Molina		Medio		Alto	Medio	
Dosis sugerida por el Ing. Lorenzo Hurtado (UNALM)		180	160	80	60kg/ha	30kg/ha

Los nutrientes se suministraron teniendo en cuenta que son mejor aprovechados hasta los 56 días después de la siembra (INIA, 2016). Por lo tanto, estuvieron distribuidas en las primeras cinco semanas (Ver tabla 13).

Tabla 13: Fechas de aplicación del fertirriego

Fecha	Semana	DDS
20/06/2018	1	7
27/06/2018	2	14
04/07/2018	3	21
11/07/2018	4	28
18/07/2018	5	35

* DDS son los días después de la siembra.

Para evitar plagas como la polilla de la papa (*Tecia solanivora* y *Phthorimaea operculella*), se instalaron 15 trampas amarillas (Ver Figura 10). Así como 8 trampas con feromonas (Ver Figura 11) para controlar daños al follaje provocados por la mosquita minadora (*Liriomyza sp.*), afidos (*Myzus persicae*) y psilido de papa (*Paratrioza cockerelli*).



Figura 10: Instalación de trampas amarillas anexas a los surcos.



Figura 11: Trampa con feromona ubicadas entre las sub-parcelas.

El campo experimental abarcó una extensión de 1738.8 m^2 a una altitud de 241 m, ubicado en el frontis del edificio del laboratorio del departamento de los recursos hídricos de la

Facultad de Ingeniería Agrícola dentro del campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Ver Figura 12).

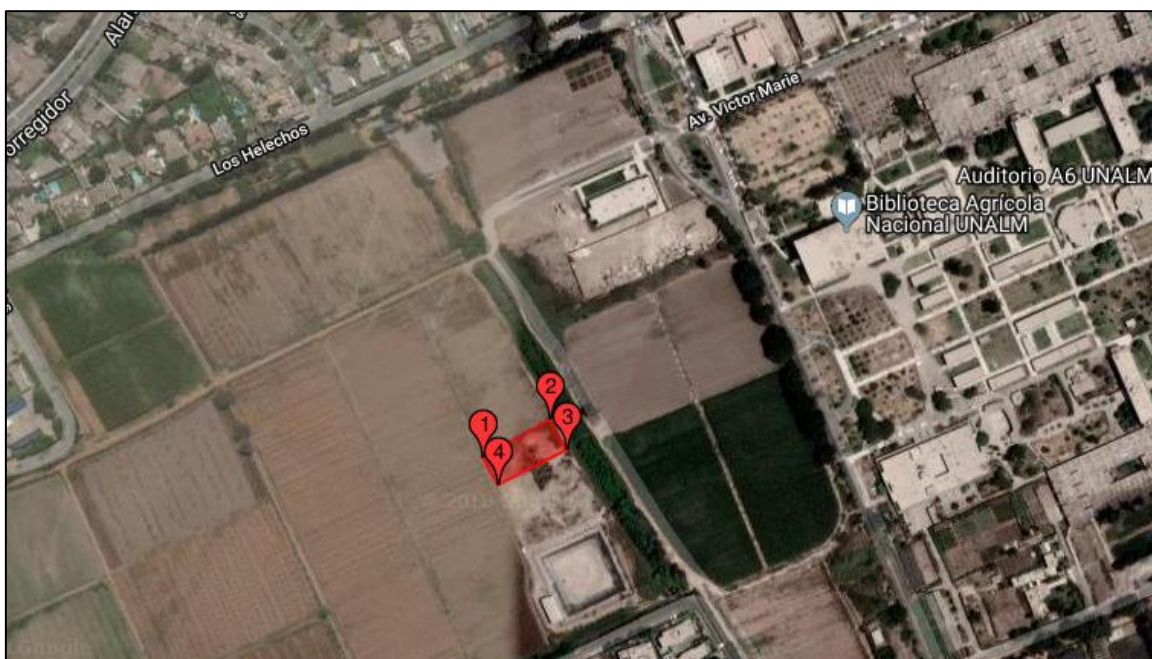


Figura 12: Ubicación de los puntos periféricos del campo experimental en una imagen satelital del USGV a 50 metros de alcance de la superficie.

FUENTE: *Science for a changing world*. (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

Las coordenadas exactas de los puntos periféricos de campo experimental:

- Punto 1: latitud: 12 ° 04' 59'', longitud: 76° 57' 08''.
- Punto 2: latitud: 12 ° 04' 58'', longitud: 76° 57' 06''.
- Punto 3: latitud: 12 ° 04' 58'', longitud: 76° 57' 08''.
- Punto 4: latitud: 12 ° 04' 59'', longitud: 76° 57' 08''.

Las parcelas de cultivo fueron distribuidos en un diseño experimental de bloques completamente al azar con repeticiones, de manera que se aplicaron tres diferentes niveles de estrés hídrico indicados por el CWSI (Ver Figura 13):

- Nivel 1 o control (T_1): Riego controlado de 35kPa o hasta 0.4 en la escala de CWSI. Con un promedio de humedad volumétrica en el suelo de 24.15 por ciento.

- Nivel 2 (T_2) con Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI) desde 0.4 a 0.6
Con un promedio de humedad volumétrica en el suelo de 21.81 por ciento.
- Nivel 3 (T_3) con Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI) desde 0.6.
Con un promedio de humedad volumétrica en el suelo de 18.17 por ciento.

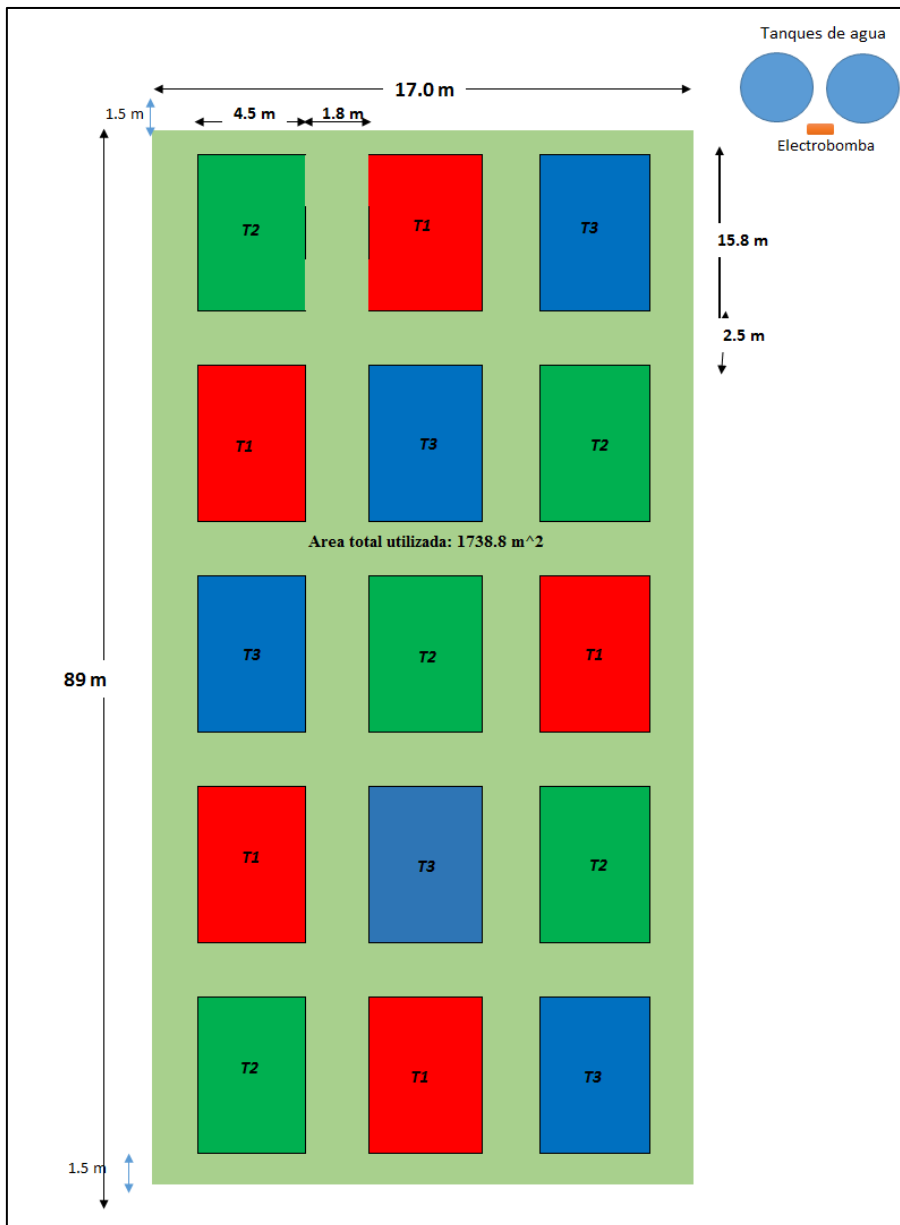


Figura 13: Diseño experimental del campo de cultivo.

* T_1 , T_2 y T_3 representados por rojo, verde y azul, respectivamente.

Cada parcela contuvo seis sub-parcelas (Designadas como C1, C2, C3, C4, C5 y C6)

compuestas por 30 plantas distribuidas en 5 surcos y 6 plantas dentro de un área de 8.1 m^2 . Por lo tanto, se obtuvo una densidad de plantación de 3.7 plantas/m^2 (Ver figuras 14 y 15).

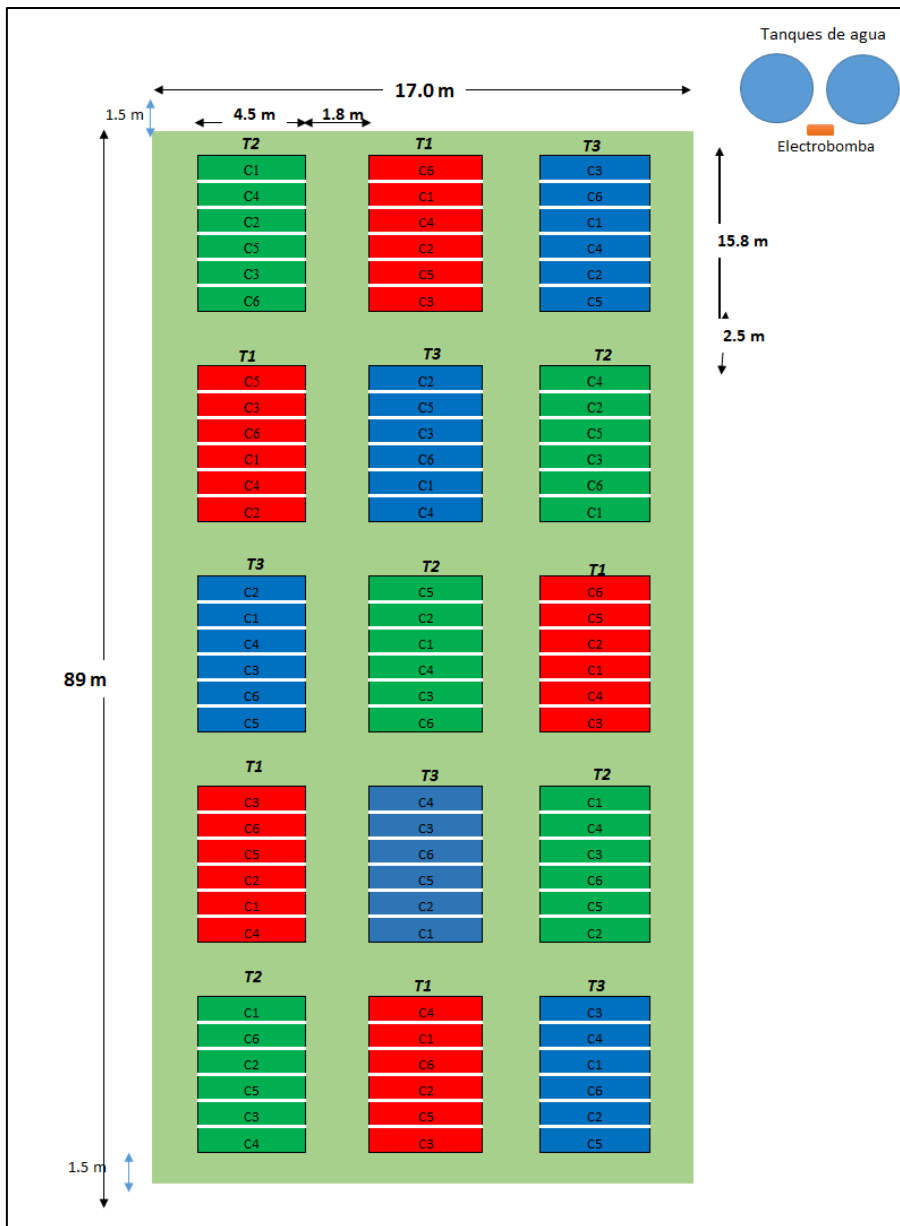


Figura 14: Denominación de las subparcelas del experimento.

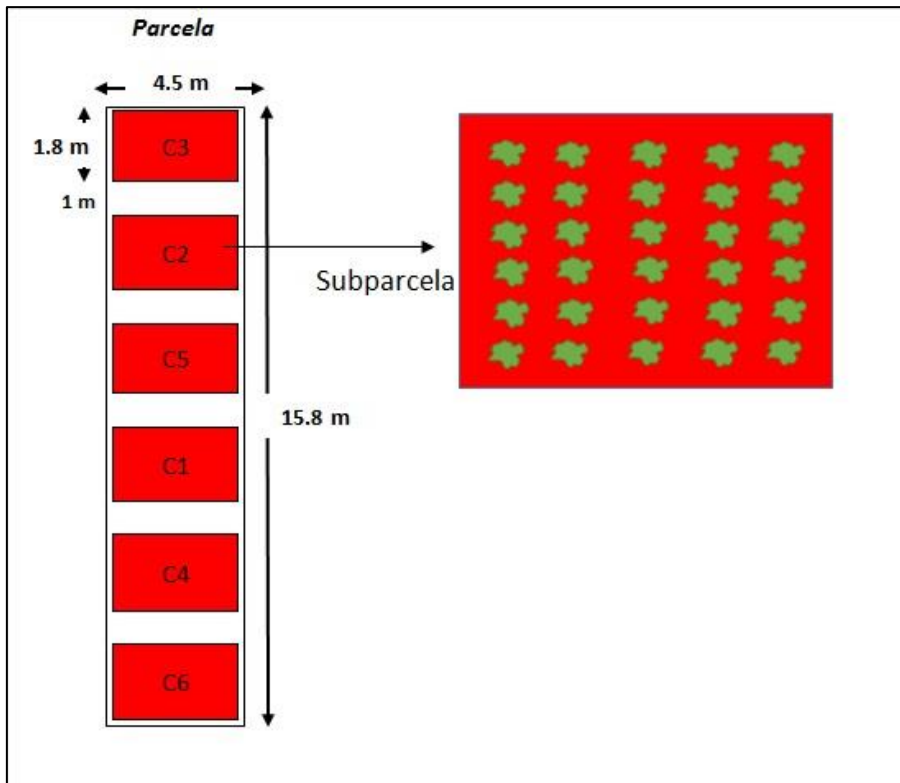


Figura 15: Distribución de las sub-parcelas de cultivo de papa.

La distribución de las sub-parcelas tuvo tres razones principales:

- Realizar mediciones de la cobertura vegetal en la sub-parcela C6 y determinar el inicio del periodo de tuberización para empezar con el muestreo de biomasa.
- Realizar el monitoreo en la sub-parcela y mantener índice de estrés CWSI entre los tratamientos.
- Obtener el valor del rendimiento del tubérculo en diferentes fechas durante el periodo de crecimiento y desarrollo: Inicio del periodo de tuberización hasta la madurez.

3.2.2.2. Monitoreo y control del estrés hídrico

La disponibilidad de agua o las condiciones de riego fue la misma en las 15 parcelas del campo experimental hasta el inicio del periodo de la tuberización.

A partir de aquí, se ha realizado el monitoreo del índice CWSI con el objetivo de mantener los niveles de estrés hídrico a lo largo de la campaña. Al observar la tendencia de superar el umbral de estrés para un tratamiento (Ver figura 13), se optó por regar hasta capacidad de

campo. Para ello se obtuvo previamente el tiempo de riego que se detallará posteriormente.

Cabe precisar que para todos los tratamientos se esperó que los valores obtenidos mediante el CWSI se mantuvieran bajo sus respectivos umbrales, sin embargo, a través de la campaña agrícola dichos registros fueron inconstantes. Como estas variaciones aumentaron o disminuyeron temporalmente según la escala del CWSI, fue conveniente diferenciar aquellos eventos que describieran cuando un tratamiento obtenía un menor umbral de estrés hídrico, a esto se le denominó *recuperación*.

En ese sentido, fue preciso clasificar las variaciones cuantitativas de estrés hídrico tomando en cuenta la escala en referencia, es decir:

- Variación de estrés hídrico < 0.1 (leve).
- $0.1 \leq$ variación de estrés hídrico < 0.2 (Normal).
- $0.2 \leq$ variación de estrés hídrico < 0.3 (Severo).
- Variación de estrés hídrico ≥ 0.3 (Muy Severo).

Como se mencionó anteriormente, se utilizó la sub-parcela C6 de cada tratamiento para realizar el monitoreo del estrés hídrico durante tres veces por semana: lunes, miércoles y viernes. Se aplicó a fórmula empírica de Bellvert *et al.* (2010) para La Molina. Se describe el procedimiento para la obtención de los parámetros que componen dicha ecuación:

- La temperatura del dosel vegetativo (T_c) y la temperatura de una hoja transpirando a la máxima tasa de potencial (T_{wet}).

Este procedimiento consistió en capturar de 15 fotografías térmicas con la cámara *FLIR E60* (Ver figura 16) a las 7:00 am hora local, obteniendo una imagen térmica (infrarroja) y otra visible (RGB). Posteriormente ambas imágenes fueron procesadas en el software *TIPCIP* en donde se obtuvieron los valores T_c y T_{wet} . Para calcular este último, se utilizó un cuerpo referencial envuelto con una tela de seda blanca humedecida (Ver figura 17).



Figura 16: Cámara térmica FLIR E60 utilizada en campo.



Figura 17: Cuerpo referencial para el cálculo de T_{wet} .

La configuración de la cámara térmica consistió en registrar el valor de emisividad de las hojas de papa (0.96), la temperatura ambiental y humedad relativa registrada desde la estación meteorológica, así como la temperatura reflejada de un cuerpo referencialmente oscuro. Para ello previamente se utilizó un cartón de superficie uniforme e inclinada a una distancia aproximada de un metro del lente (Ver figura 18).



Figura 18: Cuerpo referencial para temperatura reflejada.

La captura fotográfica de la cámara térmica abarcó un área de seis plantas, es decir, aproximadamente $1 m^2$. La posición del lente, ubicado en un nivel superior, apuntó hacia abajo de manera que formó un ángulo de 30° con el eje vertical, opuesto a la fuente de luz solar y a una lejanía de 3 metros con el área de interés (Ver Figura 19).



Figura 19: Posicionamiento adecuado de la cámara térmica.

- La temperatura de una hoja que no transpira (T_{dry})

T_{dry} fue obtenida adicionando un valor de 7°C a la temperatura ambiental utilizada para la configuración de la cámara térmica, es decir, aquel valor registrado desde la estación meteorológica (Ver Figura 20).



Figura 20: Estación meteorológica automática HOBO situado en el centro del campo experimental.

Para calcular el tiempo de riego, que permitió llegar a un tratamiento hasta capacidad de campo, se utilizó la fórmula empírica:

$$T_r = \frac{v_r}{Q}$$

Dónde: T_r es el tiempo de riego (minutos), v_r es el volumen a regar (litros)

Q es el caudal del riego (litros/minutos)

Para obtener los parámetros de la fórmula, se utilizaron los datos establecidos del diseño tridimensional de un surco (Ver Tabla 14). Se especifican a continuación:

Tabla 14: Datos establecidos para el diseño del campo experimental en un surco

Datos previstos	Valor cuantitativo
Distancia entre goteros (cinta)	0.2 m
Profundidad del sistema radicular	Valor obtenido según del monitoreo
Long. Surco a regar (toda la parcela)	15.8 m
Distancia entre plantas (surcos)	0.3 m
Loma de surco	0.4 m
Caudal Gotero	1.56 litros/hora
Numero de goteros por surco (doble cinta)	156
Volumen de suelo a regar (m^3)	(Profundidad del sistema del sistema radicular * longitud del surco a regar*Loma de surco)
Lamina de Riego (mm)	Volumen a regar en el surco (L)/(Long. Surco a regar*Loma de surco)
Humedad Volumétrica Faltante o Hvf (%)	Humedad volumétrica a capacidad de campo menos la disponible en el suelo
Volumen a regar en el surco (L)	Hvf* Volumen de suelo a regar*10
Caudal de agua aplicada (todo un surco) en L/min	(Caudal Gotero * # de goteros) / 60

3.2.2.3. Identificación del inicio del periodo de tuberización y muestras de biomasa y cosecha final

Conforme al protocolo del Centro Internacional de La Papa, el inicio de la tuberización ocurre cuando la cobertura vegetal alcanza un valor aproximadamente al 40 por ciento. Por lo tanto, se realizó el monitoreo durante tres veces por semana: lunes, miércoles y viernes. Para obtener dicho valor, se utilizó el software *CanopyCover*. Este proceso implicó utilizar cuatro fotografías donde cada imagen abarcó un total de seis plantas (Ver Figura 21). El software tiene un algoritmo de segmentación simple para discriminar la cobertura de vegetación capturada en las fotografías, es decir, utilizó un índice de vegetación existente en el espectro visible entre las 7:00 y 8:00 am. Para ello fue necesario registrar previamente el valor de la reflectancia en las hojas de papa: 0.075.

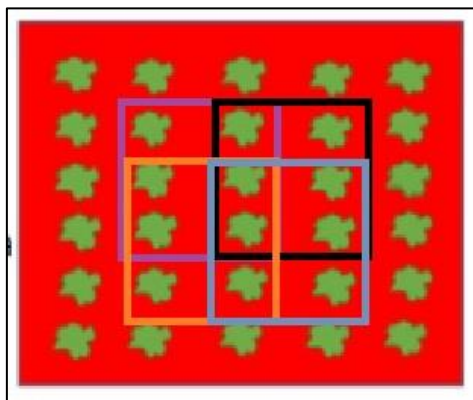


Figura 21: Área rectangular referencial para el cálculo de cobertura vegetal.

El procedimiento adecuado consistió ubicar la cámara profesional a una altura de 0.3 metros por encima del tope de la planta, de tal forma que el lente se encuentre perpendicularmente con la superficie, para ello se colocó un nivelador pequeño sobre la cámara. Adicionalmente, se utilizó una regla referencial ubicada horizontalmente respecto a la superficie adjunto a un mástil de soporte en uno de los extremos (Ver figura 22).



Figura 22: Protocolo de medición de la cobertura Vegetal.

Habiendo identificado el inicio del periodo de tuberización, se realizó la estimación del rendimiento del tubérculo con 17 muestras de biomasa y la cosecha final (Ver Tabla 15). Cada muestreo consistió en la selección de cuatro plantas de los surcos Z1, Z2 y Z3, respectivamente, ubicados en una determinada sub-parcela (Ver Figura 23). Este proceso fue registrado tomando en cuenta la siguiente nomenclatura:

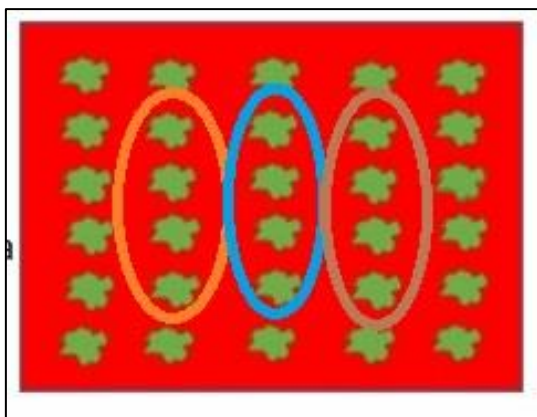


Figura 23: Distribución de las filas de cada sub-parcela.

C1_Z1, se denominó al muestreo obtenido de la sub-parcela uno del primer surco. Nótese que no se consideró aquellas plantas ubicadas en la periferia para descartar el efecto borde.

Tabla 15: Registro general de las 17 muestras de biomasa y una cosecha final

Numero	Fecha	DDS	Nomenclatura
1	17-jul	34	C1_Z1
2	25-jul	42	C2_Z1
3	27-jul	44	C3_Z1
4	30-jul	47	C4_Z1
5	02-ago	50	C5_Z1
6	06-ago	54	C1_Z2
7	08-ago	56	C2_Z2
8	10-ago	58	C3_Z2
9	13-ago	61	C4_Z2
10	15-ago	63	C5_Z2
11	17-ago	65	C1_Z3
12	22-ago	70	C2_Z3
13	27-ago	75	C3_Z3
14	31-ago	79	C4_Z3
15	03-sep	82	C5_Z3
16	07-sep	86	C6_Z1
17	10-sep	89	C6_Z2
18	13-sep	92	C6_Z3

* DDS son los días después de la siembra.

Para los valores del rendimiento del tubérculo estimado se obtuvieron dos variables respuesta: rendimiento del tubérculo en peso fresco y peso seco, respectivamente (tn/ha).

Este proceso inicialmente consistió en separar en raíz, tallo, hojas y tubérculos (Ver figura 24), luego estas fueron pesadas en una balanza de marca *Pesacon* de serie *EK-3000i* para contribuir con el registro del peso fresco (Ver figura 25). Posteriormente, fueron colocados en bolsas de papeles por separado y depositados en una esterilizadora digital de precisión sometidos a 100°C por un periodo mínimo de 24 horas con la finalidad de deshidratarlas (Ver figura 26). Finalmente, se volvió a pesar y se registró el peso seco.



Figura 24: Muestreo de biomasa C4_Z2.



Figura 25: Proceso de pesado y conteo de tubérculo.



Figura 26: Muestras de tubérculo en la esterilizadora digital.

Se obtuvieron un total de 60 registros. Posteriormente se aplicó el promedio aritmético a los valores registrados de los cuatro ejemplares del surco, obteniendo finalmente un total de 15 registros, es decir, cinco valores estimados del rendimiento del tubérculo por tratamiento.

3.2.3. Estimación del rendimiento del tubérculo pronosticado antes de la cosecha

3.2.3.1. Datos de entrada del pronóstico

Según la Tabla 4, para estimar el pronóstico del rendimiento del tubérculo, se requieren de los datos climáticos, parámetros del cultivo y de suelo.

Como se ha detallado, los datos climáticos para toda la campaña agrícola, incluyeron aquellos valores obtenidos mediante registros de la estación meteorológica automática del CIP desde el 13 de junio del 2018 hasta 27 de julio y 12 de agosto, respectivamente. Y por otro lado, para fechas que comprendieron el resto de la campaña, hasta el 13 de setiembre, fueron aquellos valores obtenidos por el pronóstico climático en el WRF y las ecuaciones utilizadas del manual 56 (FAO, 1998). Ambos archivos fueron registrados y guardados en archivos de extensión .csv (delimitados por comas).

Respecto a los parámetros de cultivos se requirieron de dos datos: El valor de densidad de plantación de $3.7 \text{ plantas}/\text{m}^2$ (especificado en el diseño experimental) y el día de la emergencia. Este último fue determinado por conteos de las plántulas a partir del día de la siembra mediante un registro físico (Ver Figura 27).



Figura 27: Germinación de una plántula en la parcela 2, T1.

Finalmente, para los parámetros de suelo se consideró una textura franco arenoso. Mientras que los procesos implicados en la obtención de la lámina de agua disponible en el suelo y la profundidad del sistema radicular se describen a continuación:

Según el diseño tridimensional de la loma del surco en la Tabla 14, la lámina de agua disponible en el suelo (mm) se estimó mediante la siguiente fórmula:

$$L_m = \frac{v_a}{L * P}$$

Dónde: L_m es la lámina de agua disponible en el suelo (mm), v_a es el volumen de agua disponible en el suelo (litros), $L = 15.8 \text{ m}$ y $P = 0.4 \text{ m}$ son la longitud y loma del surco, respectivamente.

Por lo tanto, también se utilizaron las formulas auxiliares:

$$v_d = \frac{H_v * V_r * 1000}{100}$$

$$H_v = H_g * d_a$$

$$H_g = \frac{P_h - P_s}{P_s} * 100$$

Dónde: H_v es la humedad volumétrica del suelo (%) y $V_r = 1.64 \text{ m}^3$ (volumen de suelo a regar)
 $d_a = 1.6 \text{ g/m}^3$ (densidad aparente del suelo), H_g es la humedad gravimétrica del suelo (%)
 P_h y P_s , son los pesos húmedo y seco de una muestra suelo.

Este proceso consistió en pesar 15 muestras (correspondientes a cada parcela) de suelo húmedo y posteriormente seco, respectivamente, mediante la balanza *Pesacon* de serie EK-3000i (Ver figura 28). El tiempo de deshidratación de una muestra húmeda fue de 12 horas después de someterse al horno esterilizador digital. Ese procedimiento se realizó tres veces por semana: lunes, miércoles y viernes.



Figura 28: Muestreo de cada parcela experimental para determinar la lámina disponible de agua.

La profundidad del sistema radicular fue obtenido también tres veces por semana: lunes, miércoles y viernes. Se midió con una regla la profundidad máxima alcanzada por el sistema radicular tomando en cuenta el 80% de la distancia entre la superficie de la tierra y el ápice (Ver figura 29).



Figura 29: Medición del sistema radicular realizado el miércoles 25 de julio.

3.2.3.2. Determinación del pronóstico de rendimiento

Se ejecutaron un total de 49 y 31 *escenarios* para los pronósticos diarios con un mes y medio; y un mes con anterioridad a la cosecha, respectivamente, obteniendo las siguientes variables respuesta: rendimiento de tubérculo en peso fresco y seco (tn/ha).

3.2.3.3. Validación estadística parcial

Con la finalidad de validar parcialmente los resultados del modelo agrícola *Solanum*, se utilizaron las herramientas estadísticas relacionadas al diseño experimental de bloques completamente al azar. Se consideró ambas variables respuestas del rendimiento del tubérculo: peso fresco y seco, los tratamientos de estrés hídrico (T1, T2 y T3) y la metodología utilizada para obtención de dichos valores (observación y pronóstico). Todos los valores involucrados fueron desde los 44 hasta los 58 días después de la siembra.

Posteriormente, se procedió a evaluar con las pruebas estadísticas previas al ANOVA, *Tukey*, etc. (Badii *et al.*, 2007). Cabe señalar, que en el caso de no cumplir alguno de las pruebas previas, se aplica en reemplazo, la prueba no paramétrica de Friedman. En todas las pruebas estadísticas se aplicó un nivel significancia del 5 por ciento y se utilizó el software *R studio 3.6.1* cuyos comandos se especifican a continuación:

- Normalidad de los errores (Prueba de *Shapiro-Wilk*): **shapiro.test.**

H_0 : Los errores se distribuyen normalmente.

H_a : Los errores no se distribuyen normalmente.

- Homogeneidad de variancias (Prueba de *Bartlett*). **stats::bartlett.test.**

H_0 : $\sigma_{\text{observados}}^2 = \sigma_{\text{pronóstico (un mes y medio a.c.)}}^2 = \sigma_{\text{pronóstico (un mes a.c.)}}^2$.

H_a : $\sigma_{\text{observados}}^2 \neq \sigma_{\text{pronóstico (un mes y medio a.c.)}}^2 \cdots \neq \sigma_{\text{pronóstico (un mes a.c.)}}^2$

- Independencia de observaciones, también denominado como no auto correlación (Prueba de *Durbin-Watson*). **lmtest::dwtest**

H_0 : No existe auto correlación entre los errores.

H_a : Existe auto correlación entre los errores.

Como no se aceptó la hipótesis nula en más de una de las pruebas señaladas anteriormente, finalmente se aplicó la prueba de Friedman, cuya hipótesis nula describe que no existió diferencia significativa entre las metodologías de cálculo del rendimiento del tubérculo, es decir, concluye la semejanza estadística entre los datos observados y pronosticados de la variable respuesta. De esta forma, se comprobó si la precisión del pronóstico del rendimiento del modelo agrícola *Solanum*, fue estadísticamente significativa. Para ello en el software *R studio 3.6.1*, se requirió instalar la librería **agricolae** y aplicar el comando **resul_pm<-friedman.**

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Obtención de los datos climáticos predictores

4.1.1. Temperatura máxima y mínima diaria

Los valores mínimos pronosticados fueron inferiores a los que permiten un eficiente crecimiento y desarrollo de la planta, es decir, menores a 16 °C (Ver Tabla 16). Por lo tanto, se esperó que influya en el desarrollo del sistema radicular y la elongación de los brotes a partir del inicio del periodo de tuberización (día 45 después de la siembra). Así también, estimar valores óptimos de rendimiento del tubérculo dado la amplitud de la variación diaria (Egúsqüiza, 2014). También se observó una mejor variabilidad respecto al tiempo en el pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha (Ver Figura 30 y 31).

Tabla 16: Temperatura mínima pronosticada (°C)

Fecha	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	14.50	
29-jul	46	14.00	
30-jul	47	14.40	
31-jul	48	14.20	
01-ago	49	13.80	
02-ago	50	14.40	
03-ago	51	15.00	
04-ago	52	14.70	
05-ago	53	14.30	
06-ago	54	14.00	
07-ago	55	16.00	
08-ago	56	15.60	
09-ago	57	14.90	
10-ago	58	14.80	
11-ago	59	15.00	
12-ago	60	14.60	

«continuación»

13-ago	61	14.50	14.50
14-ago	62	14.10	15.77
15-ago	63	14.70	14.98
16-ago	64	14.20	14.18
17-ago	65	15.70	15.66
18-ago	66	15.10	15.12
19-ago	67	15.60	15.63
20-ago	68	15.10	15.09
21-ago	69	16.10	16.09
22-ago	70	16.70	16.72
23-ago	71	15.70	15.67
24-ago	72	16.10	16.11
25-ago	73	15.60	15.64
26-ago	74	15.00	14.97
27-ago	75	14.20	14.19
28-ago	76	14.60	14.65
29-ago	77	14.60	15.93
30-ago	78	14.20	13.71
31-ago	79	13.90	13.95
01-sep	80	14.10	13.33
02-sep	81	14.90	12.83
03-sep	82	15.10	14.48
04-sep	83	15.00	15.43
05-sep	84	14.10	16.05
06-sep	85	14.70	15.47
07-sep	86	14.50	15.20
08-sep	87	14.60	15.09
09-sep	88	14.70	14.36
10-sep	89	15.40	13.48
11-sep	90	15.10	14.04
12-sep	91	14.70	14.06
13-sep	92	14.60	15.57

* DDS es el día después de la siembra.

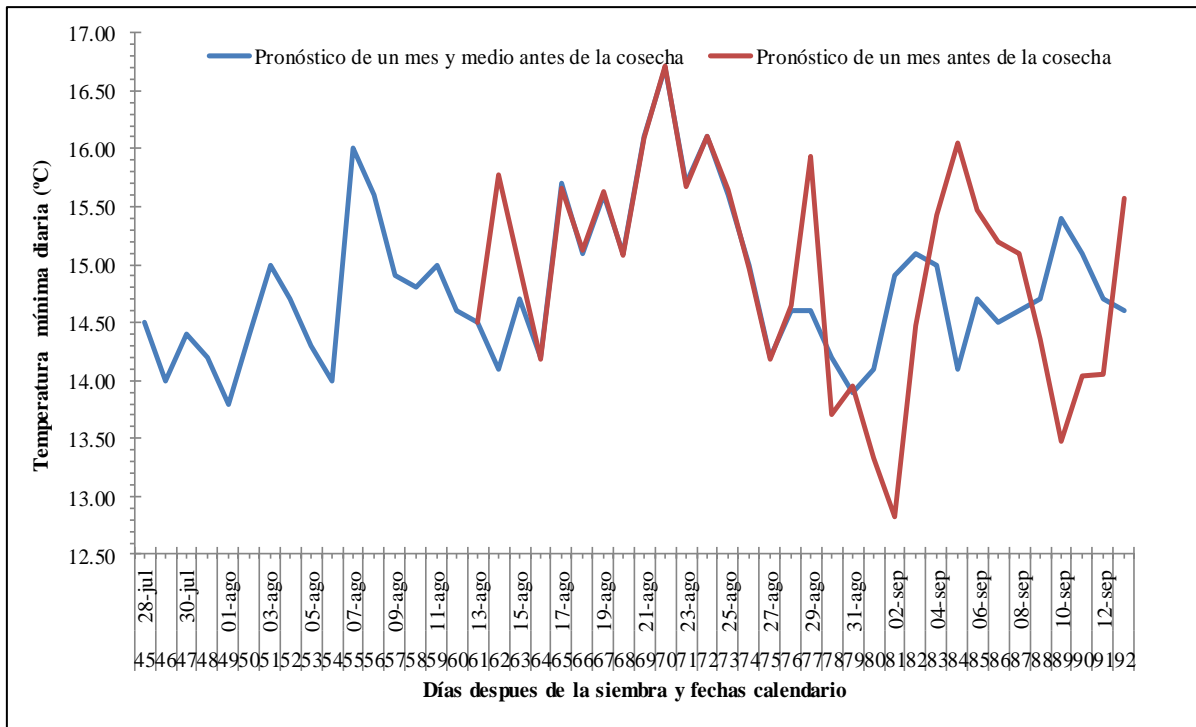


Figura 30: Meteorograma de las temperaturas mínimas pronosticadas (°C).

Por otro lado, los valores máximos pronosticados favorecieron a una adecuada eficiencia de la fotosíntesis al no superar valores de 25 °C (Ver Tabla 17), influyendo en el óptimo desarrollo del tallo, y en efecto, predisponiendo a obtener valores límites en su cobertura vegetal debido al peso equilibrado de las hojas. Así también, pudo influir en la producción óptima del rendimiento en peso seco del tubérculo (Egúsquiza, 2018).

Tabla 17: Temperatura máxima pronosticada (°C)

Fecha	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	21.31	
29-jul	46	21.80	
30-jul	47	23.23	
31-jul	48	22.46	
01-ago	49	22.07	
02-ago	50	24.93	
03-ago	51	21.46	
04-ago	52	22.59	
05-ago	53	22.36	
06-ago	54	22.80	
07-ago	55	21.96	
08-ago	56	23.74	

«continuación»

09-ago	57	23.19	
10-ago	58	24.08	
11-ago	59	23.73	
12-ago	60	22.50	
13-ago	61	22.99	23.40
14-ago	62	22.99	22.25
15-ago	63	23.06	22.74
16-ago	64	22.86	22.86
17-ago	65	22.05	22.05
18-ago	66	23.09	23.09
19-ago	67	22.60	22.60
20-ago	68	22.83	22.83
21-ago	69	22.30	22.30
22-ago	70	22.85	22.85
23-ago	71	22.34	22.34
24-ago	72	22.45	22.45
25-ago	73	22.80	22.80
26-ago	74	23.27	23.27
27-ago	75	22.41	22.41
28-ago	76	21.66	21.66
29-ago	77	21.64	25.36
30-ago	78	20.97	22.01
31-ago	79	20.22	19.94
01-sep	80	20.79	20.98
02-sep	81	21.93	21.90
03-sep	82	22.35	22.26
04-sep	83	21.69	21.94
05-sep	84	22.44	21.57
06-sep	85	22.51	22.26
07-sep	86	22.91	23.15
08-sep	87	22.52	23.09
09-sep	88	22.47	22.41
10-sep	89	24.76	22.36
11-sep	90	23.63	21.22
12-sep	91	23.13	22.59
13-sep	92	24.67	21.80

* DDS es el día después de la siembra.

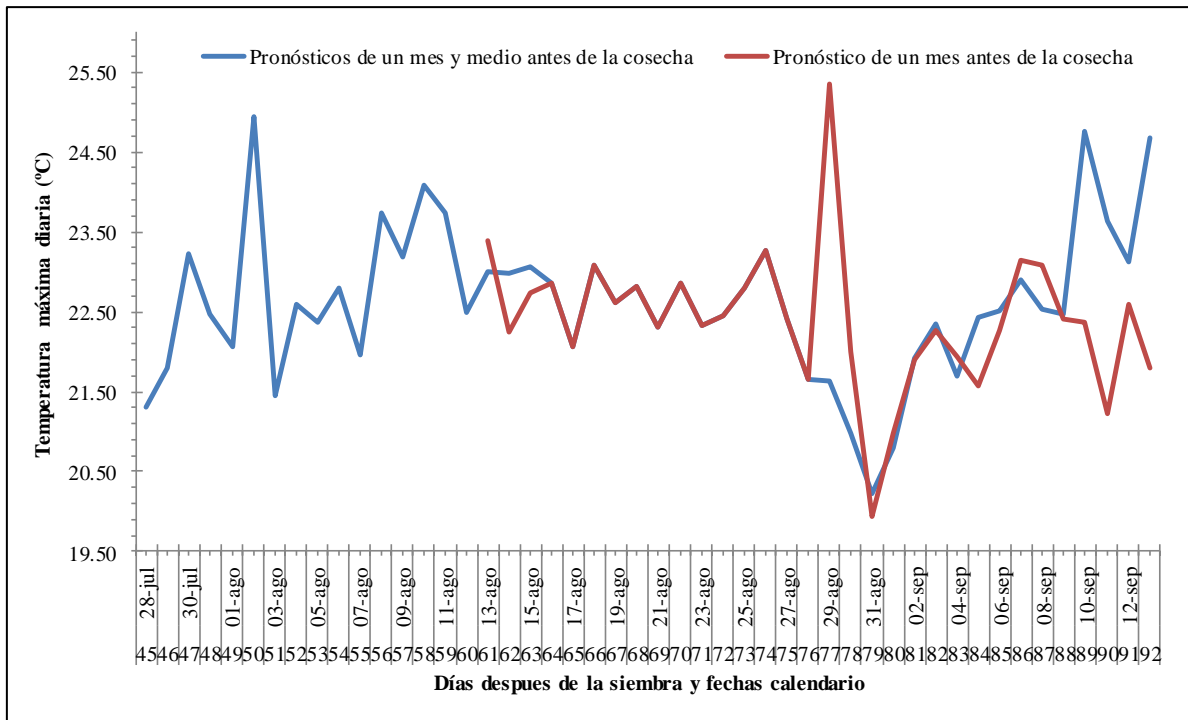


Figura 31: Meteorograma de las temperaturas máximas pronosticadas (°C).

4.1.2. Precipitación y radiación solar diaria acumulada

Se observó una mayor frecuencia de eventos de precipitación durante la etapa de llenado de tubérculo (45-60 días después de la siembra) con valores inferiores a 0.6 mm/día (Ver Tabla 18). Por lo tanto, la cantidad de precipitación acumulada no fue significativo para el requerimiento hídrico en la producción del rendimiento del tubérculo (Ver Figura 32).

Tabla 18: Precipitación diaria acumulada pronosticada (mm/día)

Fecha	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	0.05	
29-jul	46	0.00	
30-jul	47	0.00	
31-jul	48	0.00	
01-ago	49	0.00	
02-ago	50	0.06	
03-ago	51	0.02	
04-ago	52	0.00	
05-ago	53	0.00	
06-ago	54	0.00	
07-ago	55	0.00	
08-ago	56	0.00	

«continuación»

09-ago	57	0.00	
10-ago	58	0.00	
11-ago	59	0.00	
12-ago	60	0.00	
13-ago	61	0.00	0.00
14-ago	62	0.00	0.00
15-ago	63	0.00	0.00
16-ago	64	0.00	0.00
17-ago	65	0.00	0.00
18-ago	66	0.00	0.00
19-ago	67	0.00	0.00
20-ago	68	0.00	0.00
21-ago	69	0.00	0.00
22-ago	70	0.00	0.00
23-ago	71	0.00	0.00
24-ago	72	0.00	0.00
25-ago	73	0.00	0.00
26-ago	74	0.00	0.00
27-ago	75	0.00	0.00
28-ago	76	0.00	0.00
29-ago	77	0.00	0.00
30-ago	78	0.00	0.00
31-ago	79	0.00	0.00
01-sep	80	0.00	0.00
02-sep	81	0.00	0.00
03-sep	82	0.00	0.00
04-sep	83	0.00	0.00
05-sep	84	0.00	0.00
06-sep	85	0.00	0.00
07-sep	86	0.00	0.00
08-sep	87	0.00	0.00
09-sep	88	0.00	0.00
10-sep	89	0.00	0.00
11-sep	90	0.01	0.00
12-sep	91	0.00	0.00
13-sep	92	0.00	0.00

* DDS es el día después de la siembra.

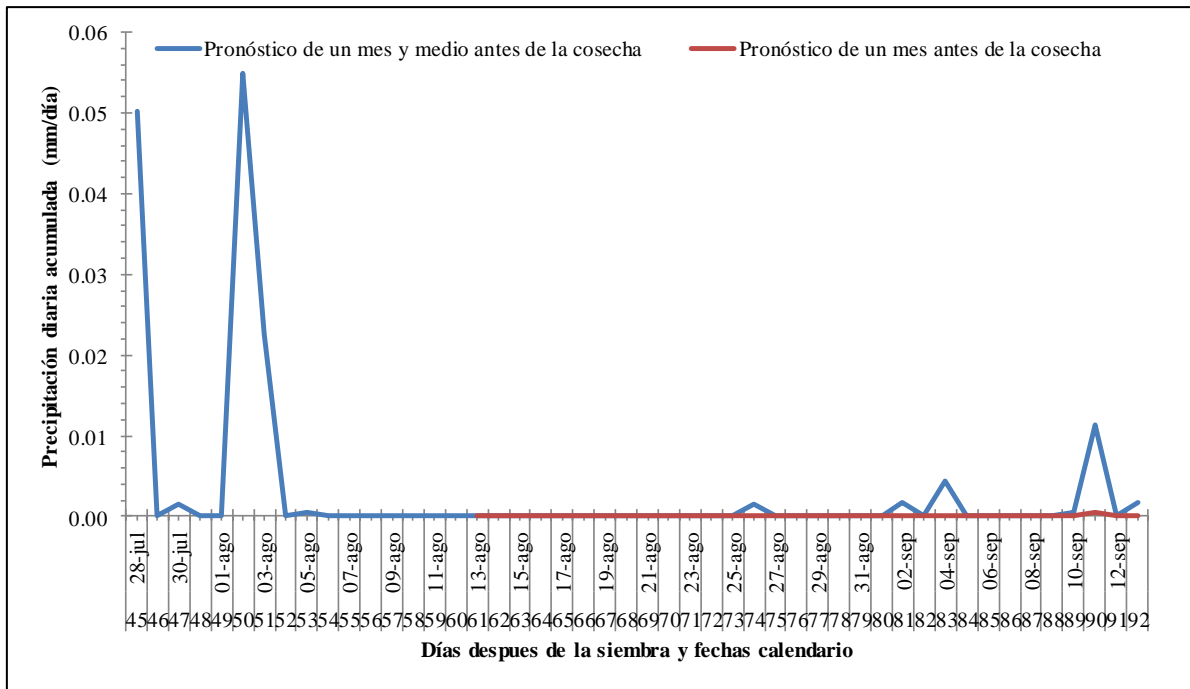


Figura 32: Meteorograma de la precipitación diaria pronosticada (mm/día).

Respecto a los valores de radiación solar acumulada manifestaron una similar variabilidad desde el inicio del periodo de tuberización hasta el final de campaña (Ver Figura 33).

Nótese que los valores empiezan a incrementarse en la etapa del llenado del tubérculo (Ver Tabla 19), específicamente a finales de la cúspide del desarrollo foliar (día 70 después de la siembra), término que se detallará posteriormente. Este acontecimiento coincidió con una tendencia decreciente en los valores de la temperatura mínima (Ver Figura 30), obteniendo una mayor variación diurna que finalmente incremento los valores estimados de radiación solar acumulada a través de la ecuación de Hargreaves y Samani. Por lo tanto, se esperaba una tendencia creciente para las estimaciones de rendimiento de tubérculo pronosticado a partir de esta fecha.

Tabla 19: Radiación solar acumulada diaria pronosticada (MJ/m²día).

Fecha	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	5.88	
29-jul	46	6.30	
30-jul	47	6.69	
31-jul	48	6.50	
01-ago	49	7.22	

«continuación»

02-ago	50	8.12	
03-ago	51	6.39	
04-ago	52	7.04	
05-ago	53	7.13	
06-ago	54	7.43	
07-ago	55	6.14	
08-ago	56	7.13	
09-ago	57	7.22	
10-ago	58	7.64	
11-ago	59	7.39	
12-ago	60	7.04	
13-ago	61	7.30	7.47
14-ago	62	7.47	6.39
15-ago	63	7.26	6.95
16-ago	64	7.39	7.39
17-ago	65	6.34	6.34
18-ago	66	7.09	7.09
19-ago	67	6.63	6.63
20-ago	68	6.95	6.95
21-ago	69	6.24	6.24
22-ago	70	6.24	6.24
23-ago	71	6.44	6.44
24-ago	72	6.29	6.29
25-ago	73	6.72	6.72
26-ago	74	7.22	7.22
27-ago	75	7.17	7.17
28-ago	76	6.68	6.68
29-ago	77	6.63	7.72
30-ago	78	6.53	7.22
31-ago	79	6.29	6.09
01-sep	80	7.28	7.80
02-sep	81	7.44	8.48
03-sep	82	7.60	7.85
04-sep	83	7.28	7.17
05-sep	84	8.10	6.59
06-sep	85	7.85	7.33
07-sep	86	8.15	7.90
08-sep	87	7.90	7.95
09-sep	88	7.85	7.95
10-sep	89	8.62	8.39
11-sep	90	8.20	7.54
12-sep	91	8.15	8.20
13-sep	92	8.93	7.00

* DDS es el día después de la siembra.

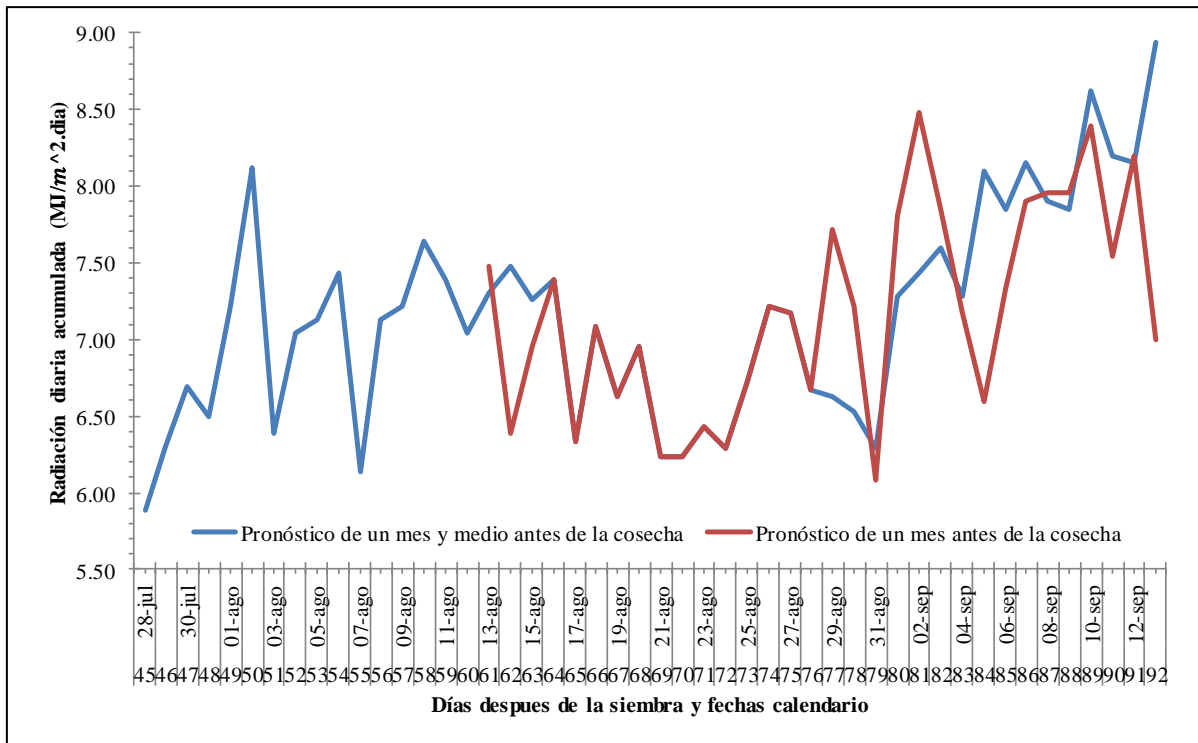


Figura 33: Meteorograma de la radiación solar diaria acumulada pronosticada (MJ/m².día)

4.1.3. Evapotranspiración potencial

Se observó una mejor variabilidad respecto al tiempo en el pronóstico de un mes y medio con anterioridad a la cosecha (Ver Figuras 34, 35 y 36). Tomando en cuenta todos los tratamientos, se evidencio que a mayor sometimiento de estrés hídrico, menores fueron los valores de evapotranspiración potencial, coincidiendo con los criterios teóricos de Egúsqiza (2014), el cual indica la disminución de esta variable provocado por el cierre estomático de la hoja como respuesta a una mayor restricción hídrica. Como los valores no superaron a 3 mm/día (Ver Tablas 20, 21 y 22) y teniendo en cuenta la textura del suelo en La Molina, el tiempo entre cada riego no debió superar los 8 días.

Tabla 20: Evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T1 (mm/día)

Fecha	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	1.19	
29-jul	46	0.96	
30-jul	47	1.02	
31-jul	48	1.88	

«continuación»

01-ago	49	1.18	
02-ago	50	2.3	
03-ago	51	1.87	
04-ago	52	0.89	
05-ago	53	0.97	
06-ago	54	1.46	
07-ago	55	1.09	
08-ago	56	1.12	
09-ago	57	0.85	
10-ago	58	1.08	
11-ago	59	1.06	
12-ago	60	1.07	
13-ago	61	1.08	2.29
14-ago	62	1.31	1.9
15-ago	63	1.36	2.1
16-ago	64	2.27	2.24
17-ago	65	2.29	1.89
18-ago	66	2.36	2.16
19-ago	67	1.48	2
20-ago	68	1.64	2.11
21-ago	69	2.44	1.87
22-ago	70	1.45	1.9
23-ago	71	1.98	1.94
24-ago	72	1	1.9
25-ago	73	1.28	2.05
26-ago	74	1.72	2.23
27-ago	75	1.45	2.17
28-ago	76	2.03	1.99
29-ago	77	1.46	2.52
30-ago	78	1.35	2.17
31-ago	79	2.4	1.74
01-sep	80	1.61	2.14
02-sep	81	2.23	2.38
03-sep	82	1.83	2.23
04-sep	83	2.37	2.02
05-sep	84	1.62	1.85
06-sep	85	2.16	2.09
07-sep	86	2.68	2.3
08-sep	87	2.9	2.31
09-sep	88	2.59	2.28
10-sep	89	1.78	2.4
11-sep	90	1.33	2.1
12-sep	91	1.97	2.36
13-sep	92	2.04	1.98

* DDS es el día después de la siembra.

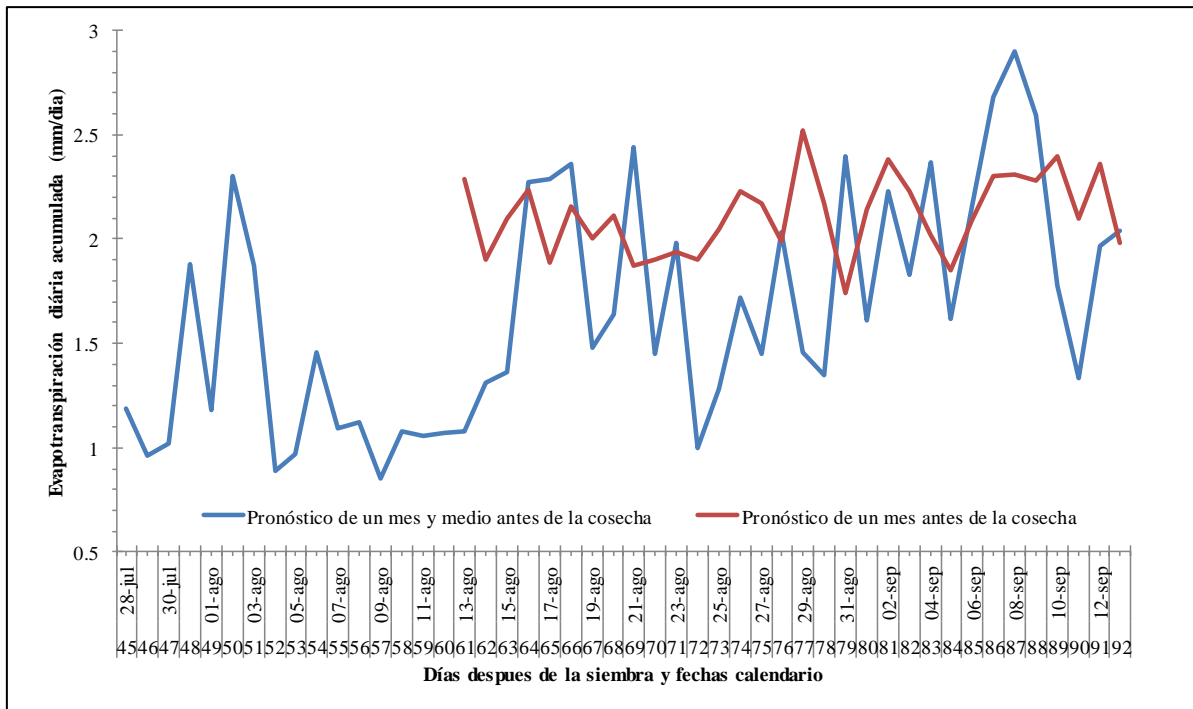


Figura 34: Meteorograma de la evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T1 (mm/día)

Tabla 21: Evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T2 (mm/día)

Fecha	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	1.12	
29-jul	46	0.91	
30-jul	47	0.97	
31-jul	48	1.74	
01-ago	49	1.11	
02-ago	50	2.12	
03-ago	51	1.73	
04-ago	52	0.85	
05-ago	53	0.93	
06-ago	54	1.36	
07-ago	55	1.03	
08-ago	56	1.05	
09-ago	57	0.82	
10-ago	58	1.02	
11-ago	59	1	
12-ago	60	1.01	
13-ago	61	1.03	2.2
14-ago	62	1.23	1.83
15-ago	63	1.28	2.02

«continuación»

16-ago	64	2.1	2.16
17-ago	65	2.12	1.81
18-ago	66	2.18	2.08
19-ago	67	1.39	1.93
20-ago	68	1.53	2.03
21-ago	69	2.24	1.8
22-ago	70	1.36	1.83
23-ago	71	1.83	1.86
24-ago	72	0.96	1.83
25-ago	73	1.2	1.97
26-ago	74	1.6	2.15
27-ago	75	1.37	2.09
28-ago	76	1.89	1.92
29-ago	77	1.37	2.42
30-ago	78	1.28	2.09
31-ago	79	2.22	1.68
01-sep	80	1.51	2.05
02-sep	81	2.07	2.29
03-sep	82	1.7	2.14
04-sep	83	2.2	1.94
05-sep	84	1.52	1.77
06-sep	85	2	2.01
07-sep	86	2.48	2.2
08-sep	87	2.68	2.22
09-sep	88	2.4	2.19
10-sep	89	1.67	2.31
11-sep	90	1.25	2.02
12-sep	91	1.84	2.27
13-sep	92	1.9	1.9

* DDS es el día después de la siembra.

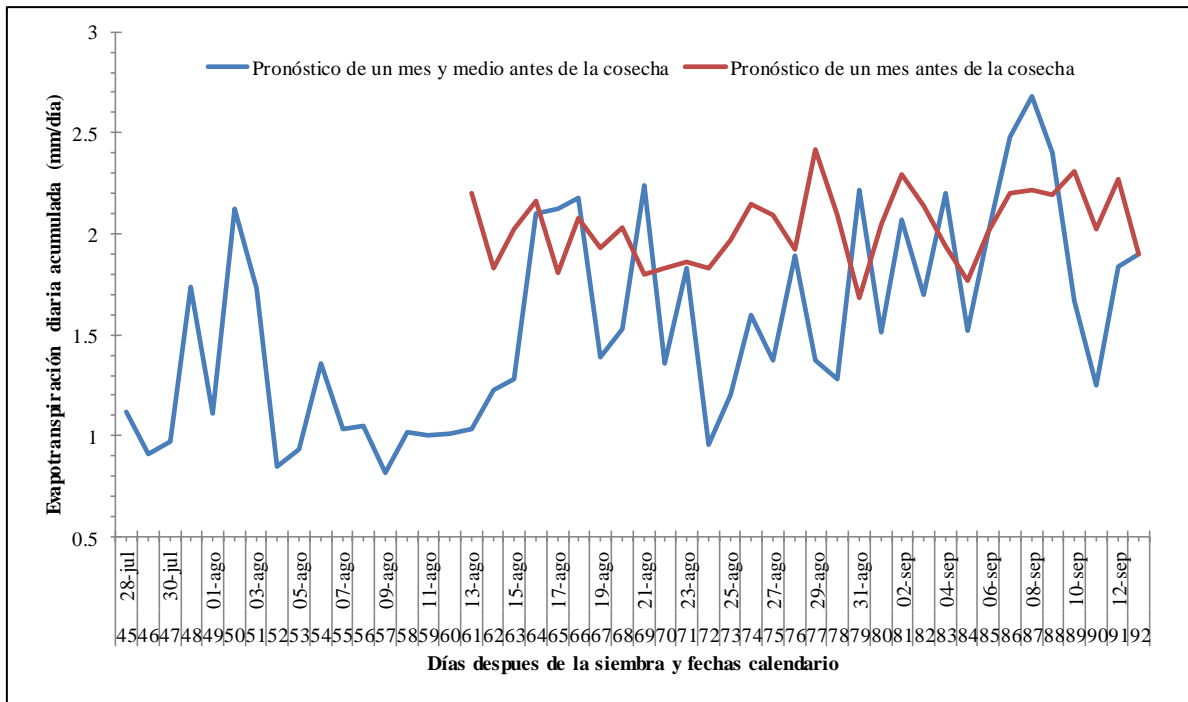


Figura 35: Meteorograma de la evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T2 (mm/día)

Tabla 22: Evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T3 (mm/día)

Fecha	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	1.05	
29-jul	46	0.86	
30-jul	47	0.92	
31-jul	48	1.6	
01-ago	49	1.05	
02-ago	50	1.94	
03-ago	51	1.59	
04-ago	52	0.81	
05-ago	53	0.88	
06-ago	54	1.27	
07-ago	55	0.97	
08-ago	56	0.99	
09-ago	57	0.79	
10-ago	58	0.96	
11-ago	59	0.95	
12-ago	60	0.96	
13-ago	61	0.97	2.12
14-ago	62	1.15	1.76
15-ago	63	1.2	1.94

«continuación»

16-ago	64	1.92	2.07
17-ago	65	1.95	1.74
18-ago	66	2	2
19-ago	67	1.29	1.85
20-ago	68	1.42	1.95
21-ago	69	2.05	1.73
22-ago	70	1.27	1.76
23-ago	71	1.69	1.79
24-ago	72	0.91	1.75
25-ago	73	1.13	1.9
26-ago	74	1.49	2.07
27-ago	75	1.28	2.01
28-ago	76	1.74	1.84
29-ago	77	1.28	2.33
30-ago	78	1.2	2.01
31-ago	79	2.04	1.61
01-sep	80	1.41	1.97
02-sep	81	1.9	2.19
03-sep	82	1.58	2.05
04-sep	83	2.02	1.86
05-sep	84	1.41	1.7
06-sep	85	1.84	1.92
07-sep	86	2.27	2.11
08-sep	87	2.45	2.13
09-sep	88	2.21	2.1
10-sep	89	1.55	2.21
11-sep	90	1.18	1.93
12-sep	91	1.7	2.18
13-sep	92	1.76	1.83

* DDS es el día después de la siembra.

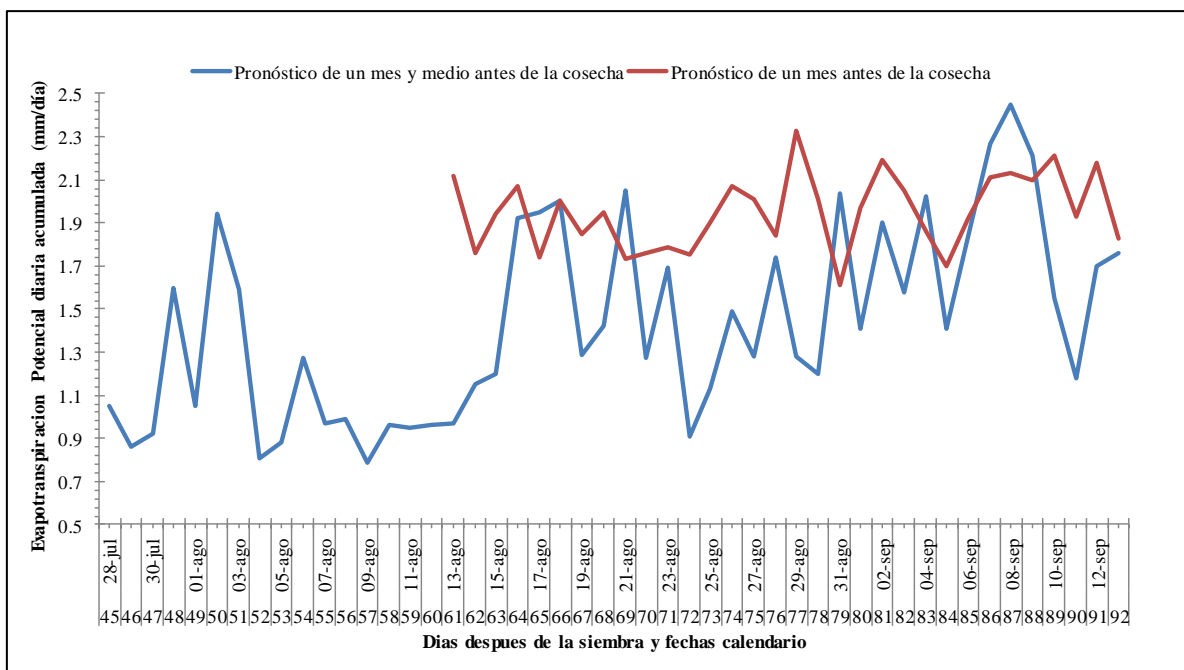


Figura 36: Meteorograma de evapotranspiración potencial acumulada pronosticada para T3 (mm/día)

4.2. Estimación del rendimiento del tubérculo

4.2.1. Identificación del inicio de la etapa de tuberización

Basado en la evolución temporal de los valores obtenidos de cobertura vegetal y los conceptos descritos en la bibliografía de Egúsqiza (2016), se identificaron tres etapas del crecimiento y desarrollo del tubérculo: Inicio del periodo de tuberización (crecimiento lineal), llenado del tubérculo (pleno crecimiento) y madurez. Adicionalmente se incluyó una sub-etapa al que se le denominó cúspide de producción foliar, en donde los valores porcentuales de cobertura llegaron al 100 por ciento (Ver Tabla 23).

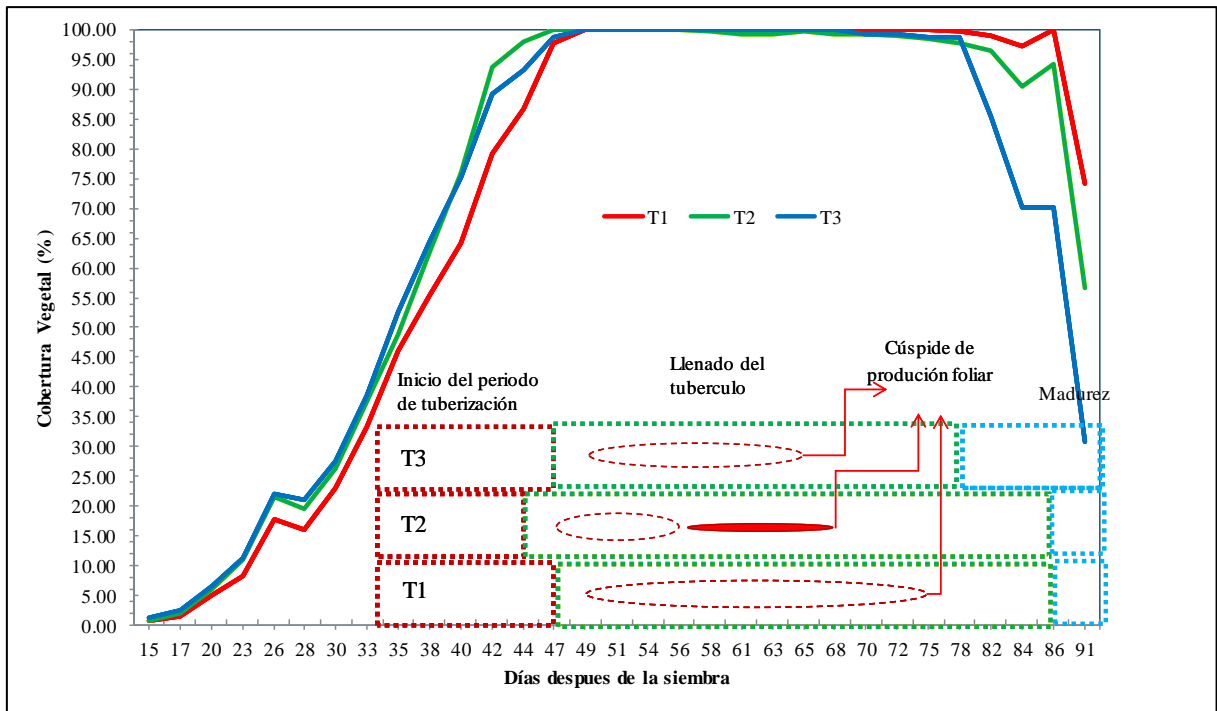


Figura 37: Cobertura Vegetal (%) vs Días después de la siembra.

Como se observaron valores de cobertura vegetal superiores al 40 por ciento a partir del día 33 después de la siembra (para T2 y T3) y 35 después de la siembra (para T1), respectivamente (Ver Figura 37), se registró mayor precocidad en T2 respecto al inicio del periodo de tuberización, sin embargo, sucedió lo contrario en el llenado de tubérculo (Ver Tabla 23). Este indicio fue comprobado con éxito en la primera muestra de biomasa C1_Z1, extrayendo tubérculos hasta con 4.5 cm de diámetro (Ver Figura 38).

Tabla 23: Duración en días de las etapas y sub-etapa de la campaña agrícola por tratamiento

Tratamiento	Inicio del periodo de tuberización	Llenado de Tubérculo	Cúspide de producción foliar	Llenado de Tubérculo	Madurez
T1	34 – 47 DDS (14 días)	47 – 49 DDS	49 – 75 DDS 40 días (27 días)	75 – 86 DDS	86– 91 DDS (6 días)
T2	34 – 44 DDS (11 días)	44 – 47 DDS	47 – 65 DDS 43 días (19 días)	68 – 86 DDS	86 – 91 DDS (6 días)
T3	34 – 47 DDS (14 días)	47 – 49 DDS	49 – 65 DDS 32 días (17 días)	65 – 78 DDS	78 – 91 DDS (14 días)

* DDS son los días después de la siembra.



Figura 38: Unidades experimentales durante la muestra de biomasa C1_Z1 (34 DDS), se observan los tuberculillos de la parcelas 13,14 y 15 (T2, T1 y T3).

4.2.2. Evolución temporal del CWSI y rendimiento del tubérculo

En términos generales, se evidenció una relación directa en el aumento porcentual del rendimiento del tubérculo y la intensidad de recuperación al estrés hídrico suscitado en días anteriores, y viceversa, especialmente durante el periodo de tuberización y llenado de tubérculo. Con la finalidad de describir cada evento relevante, se agruparon según las etapas de la campaña agrícola, describiéndose a continuación.

4.2.2.1. Inicio del periodo de tuberización al llenado de tubérculo

En síntesis, durante el inicio del periodo de tuberización, existió un predominio en los valores de rendimiento del tubérculo a favor de T2 hasta en un 30.31 % y 17.73 % sobre T1 y T3, respectivamente (Ver Figuras 40 y 41). Las muestras de biomasa en donde predominaron estos valores fueron C1_Z1 (34 DDS), C3_Z1 (44 DDS) y C4_Z1 (47 DDS), que coincidieron con una serie de eventos previos, cuyas medidas de nivel de estrés se registraron como los más bajos respecto a otros tratamientos (Ver Figura 39).

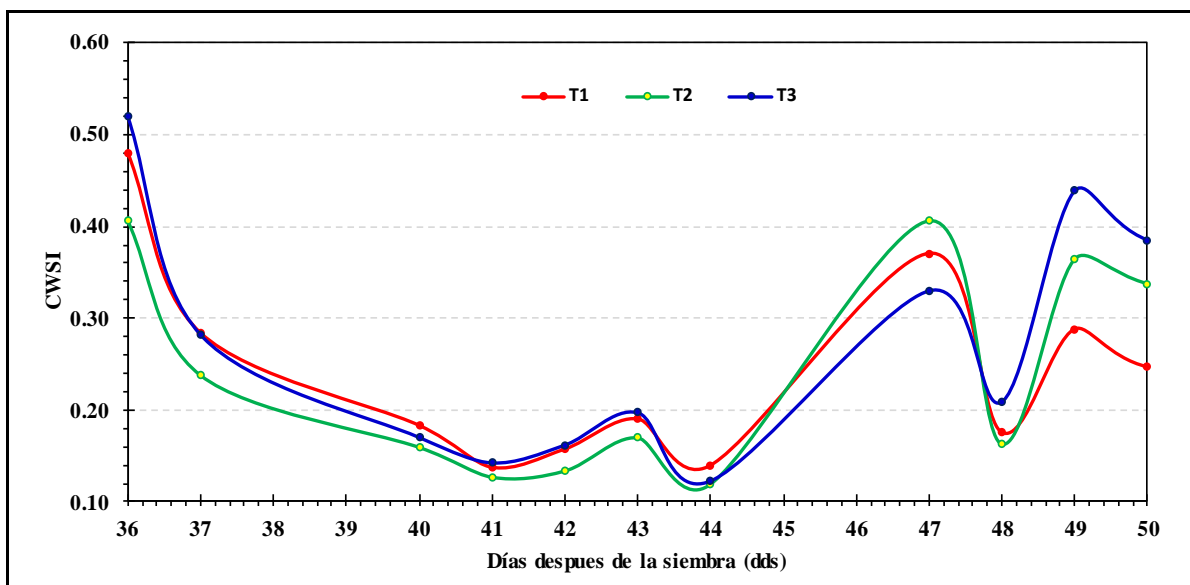


Figura 39: Evolución temporal de las variaciones del índice CWSI para los tratamientos entre el inicio del periodo de tuberización y llenado de tubérculo.

Se puede inferir que la superioridad de los valores cuantitativos de T2 durante C3_Z1 (44 DDS) se ha debido al menor sometimiento de estrés hídrico durante los 41-43 días después de la siembra (un total de 0.04 en la escala del CWSI en la Tabla 24). Finalmente, este punto de vista ha permitido explicar que algunos eventos de *recuperación* afectaron positivamente al resultado final del rendimiento entre los tratamientos.

Por ejemplo, en dos eventos consecutivos de *recuperación* durante los 36-41 días después de la siembra, T1 fue sometido a una mayor intensidad respecto a otros tratamientos (un total de 0.35 en la escala del CWSI en la Tabla 24). En consecuencia, los resultados del rendimiento del tubérculo aumentaron a favor este tratamiento durante C2_Z1 (42 DDS) (Ver Figuras 40 y 41).

Tabla 24: Variaciones de estrés hídrico según la escala del CWSI

Tratamiento	Recuperación				Estrés		
	36-37DDS	37-41DDS	43-44 DDS	47-48 DDS	41-43 DDS	44-47 DDS	48-49 DDS
T1	0.2	0.15	0.06	0.21	0.05	0.23	0.13
T2	0.17	0.1	0.06	0.25	0.04	0.29 (*)	0.21
T3	0.14	0.14	0.07	0.12	0.05	0.11	0.23 (*)

* DDS son los días después de la siembra

(*) Alcanzaron un umbral superior a 0.4 según la Figura 40.

Así también, se registraron dos eventos sucesivos de estrés hídrico: el primero desde 44-47 días después de la siembra, y posteriormente, desde los 48-49 días después de la siembra, involucrando por separado a T2 y T3, respectivamente (Ver Tabla 24).

Durante estos sucesos, no solo se observó que ambos tratamientos superaron el valor de 0.4 según la escala de referencia, coincidiendo con la finalización de las respectivas etapas de inicio de tuberización, sino que también fueron las fluctuaciones (0.29 y 0.23 en la escala de CWSI, respectivamente en la Tabla 24), que contribuyeron indirectamente a una mayor producción del rendimiento del tubérculo a favor de T1 durante C5_Z1 (50 DDS) (Ver Figuras 40 y 41).

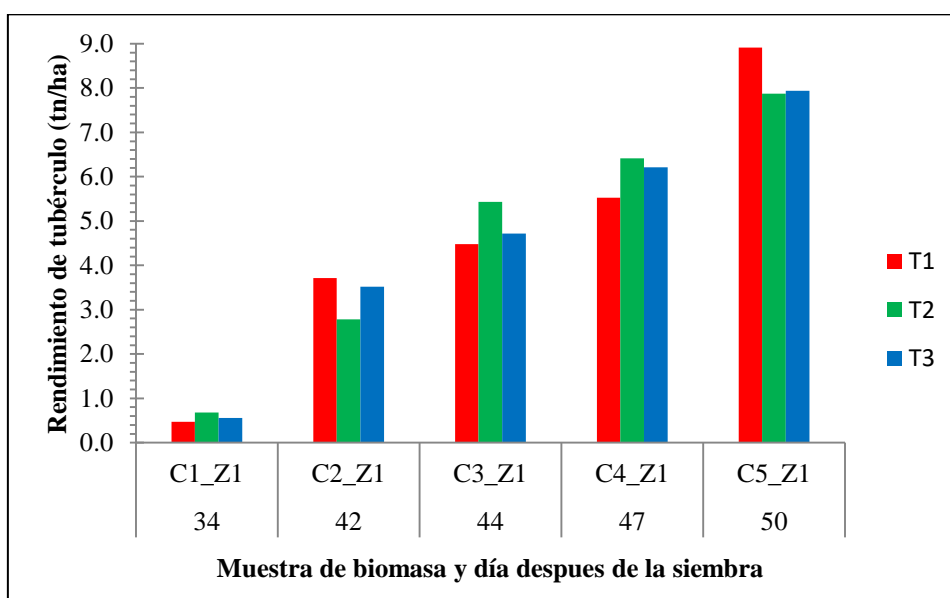


Figura 40: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso fresco (tn/ha) durante 34-50 dds.

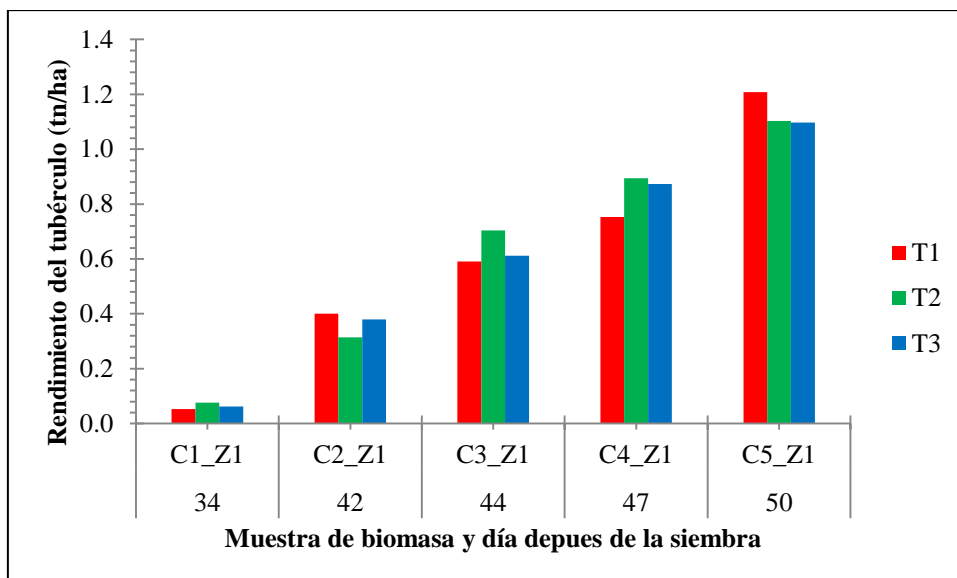


Figura 41: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso seco (tn/ha) durante 34-50 dds.

4.2.2.2. Llenado de tubérculo a Cúspide del desarrollo foliar

Durante esta etapa de la campaña, surgieron eventos de mayor intensidad de *recuperación* en complemento a otros de menor intensidad en sometimiento a estrés hídrico que contribuyeron al mayor aumento porcentual del rendimiento del tubérculo en el largo plazo. En efecto, los eventos registrados en la Tabla 24, favorecieron a T3 durante el inicio de la etapa de tuberización, obteniendo los mayores valores de rendimiento, después de T2 (Ver Figuras 40 y 41).

Así como también, los eventos de *recuperación* suscitados desde los 36-41 días después de la siembra (0.28 en la escala de CWSI en la Tabla 26), 43-44 días después de la siembra (0.07 en la escala de CWSI en la Tabla 24) y 49-57 días después de la siembra (0.2 en la escala de CWSI en la Tabla 25), incluyendo un evento de estrés donde se obtuvo la menor variación cuantitativa desde los 41-43 días después de la siembra (0.05 en la escala de CWSI en la Tabla 24), tuvieron un impacto favorable en el rendimiento de T3 durante C1_Z2 (54 DDS), superando a otros tratamientos hasta en un 13.17 por ciento. Así mismo, se registró similar evidencia para el rendimiento del tubérculo en peso seco durante C2_Z2 (56 DDS) y C3_Z2 (58 DDS) (Ver Figura 43 y 44).

Tabla 25: Variaciones de estrés hídrico (escala del CWSI) durante el llenado de tubérculo

Tratamiento	Recuperación			Estrés	
	49-50 DDS	50-57 DDS	68-72 DDS	57-61 DDS (*)	61-63 DDS
T1	0.04	0.08	0.32	0.08	0.29
T2	0.02	0.1	0.37	0.20	0.18
T3	0.06	0.14	0.22	0.21	0.26

* DDS son los días después de la siembra

(*) Alcanzó el umbral superior a 0.7 según la Figura 42.

Adicionalmente a ello existieron otros eventos que afectaron al rendimiento en T3: Desde los 63-65 días después de la siembra (0.16 en la escala de CWSI en la Tabla 26), siendo temporalmente la más extensa recuperación respecto a otros tratamientos, y otro que posteriormente fuese la menor variación de estrés durante los 65-68 días después de la siembra (0.06 en la escala de CWSI en la Tabla 26) y finalmente volviendo a experimentar una *recuperación* hasta el día 72 después de la siembra (0.22 en la escala de CWSI en la Tabla 25). En consecuencia, se registró mayor aumento porcentual en su rendimiento del tubérculo durante C2_Z3 (70 DDS): 29.54 % (peso fresco) y 29.41 % (peso seco), respectivamente. No obstante, los valores registrados no superaron a los de T1 (Ver Figuras 43 y 44).

Tabla 26: Variaciones de estrés hídrico durante la sub-etapa de la cúspide de producción foliar

T1		T2			T3		
Estrés	Recuperación	Estrés	Recuperación	Estrés	Recuperación	Recuperación	Estrés
63-64		65-68		64-68			65-68
DDS	64-65 DDS	DDS	63-64 DDS	DDS (*)	63-64 DDS	64-65 DDS	DDS
0.06	0.1	0.17	0.03	0.15	0.06	0.1	0.06

* DDS son los días después de la siembra

(*) Alcanzó el umbral superior a 0.7 en la Figura 42.

Por otro lado, existió una peculiaridad en T2, ya que sus valores de estrés hídrico estuvieron fluctuando entre 0.2 y 0.4, según la escala del CWSI (Ver Figura 42). Ambos umbrales coincidieron con el menor y mayor registro de rendimientos en comparación a otros tratamientos, como por ejemplo, los valores obtenidos durante C2_Z2 (56 DDS) y C4_Z1 (61 DDS), respectivamente. En esta última muestra de biomasa, T2 registraría valores de rendimiento superiores en un 8.75 % y 5.41 % respecto a T1 y T3, respectivamente (Ver Figura 42).

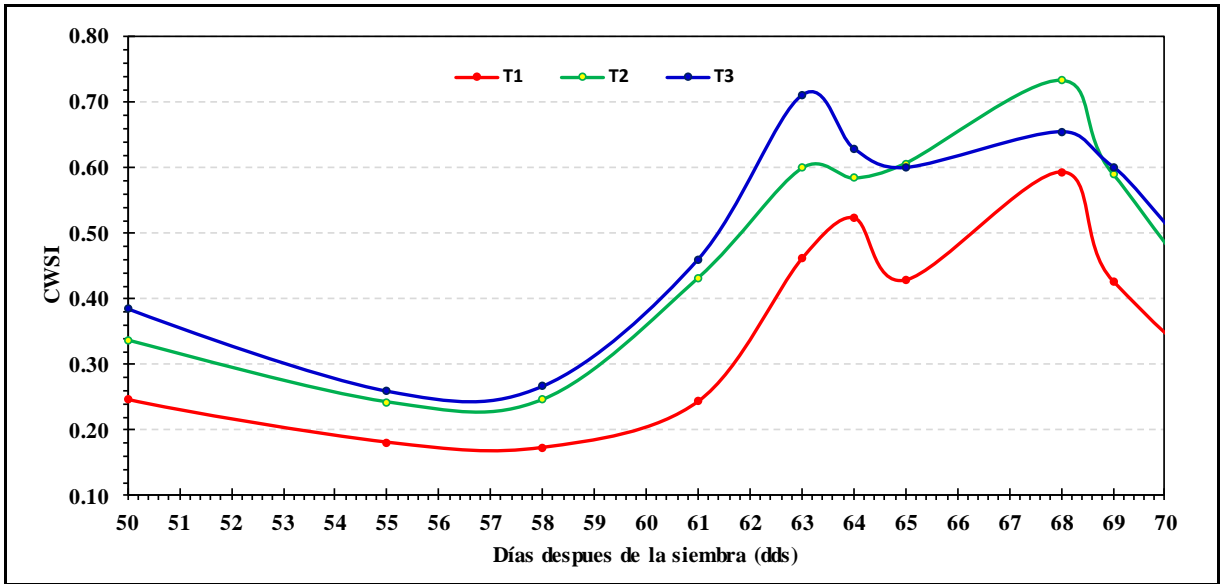


Figura 42: Evolución temporal de las variaciones del índice CWSI para los tratamientos entre llenado de tubérculo temprano (Solo para T1 y T3), cúspide de producción foliar y llenado de tubérculo tardío.

Adicionalmente, el estrés hídrico al superar el umbral de 0.7, según la escala de referencia, coincidió con la finalización de la sub-etapa cúspide del desarrollo foliar, como se suscitó durante 64-68 días después de la siembra y 57-61 días después de la siembra, para T2 y T3 respectivamente (Ver Tablas 25 y 26). En efecto, ambos tratamientos obtuvieron valores similares de rendimiento del tubérculo e inferiores a T1 en 6.49 por ciento durante C2_Z3 (70 DDS) (Ver Figuras 43 y 44).

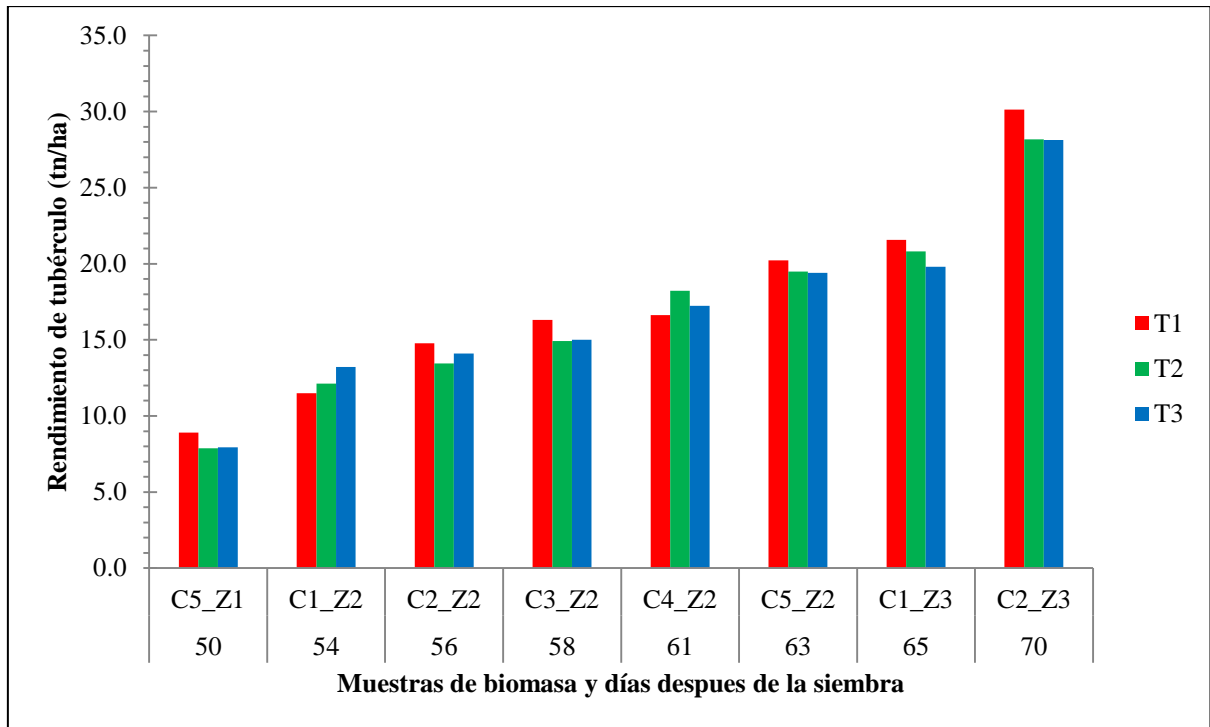


Figura 43: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso fresco (tn/ha) durante 50-70 dds

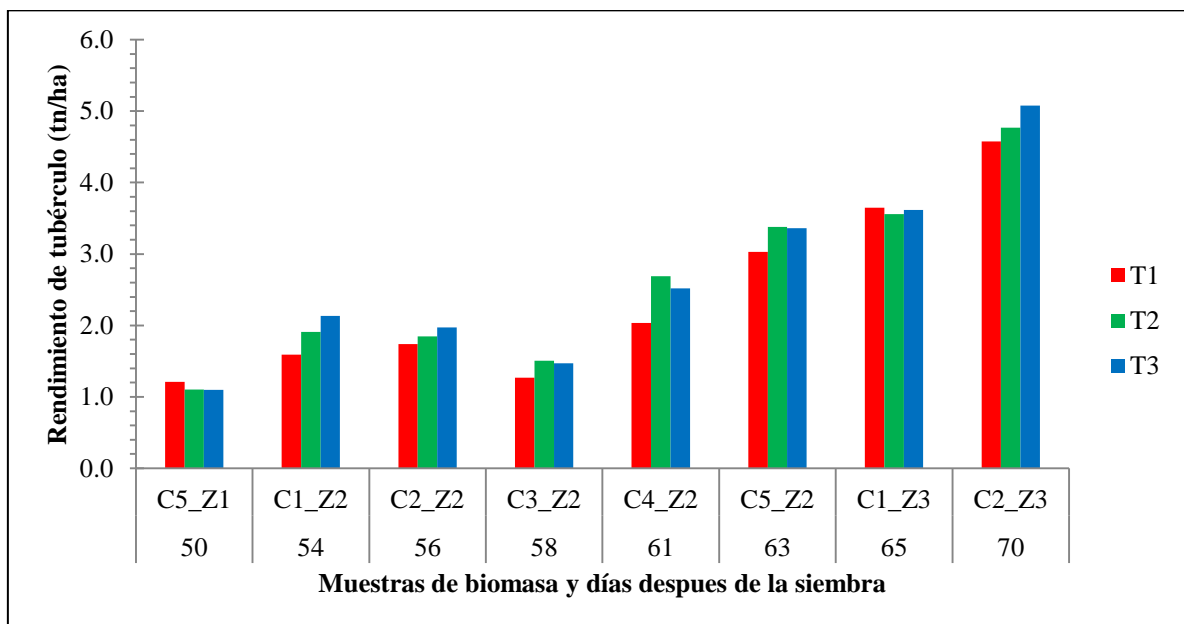


Figura 44: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso seco (tn/ha) durante 50-70 dds.

4.2.2.3. Llenado del tubérculo hasta la madurez

En estas últimas etapas de la campaña agrícola, se ratificaron las evidencias planteadas en párrafos anteriores. Por ejemplo, se estimaron mayores valores de rendimiento del tubérculo en T1 hasta el final de campaña, puesto que registraron la menor cuantificación de estrés hídrico (Ver Figura 45), considerando que los valores con más altos del rendimiento coincidieron cuando los umbrales de estrés hídrico fluctuaban cercanos a 0.4. Por ejemplo, durante C3_Z3 (75 DDS), C4_Z3 (79 DDS) y C5_Z2 (82 DDS) (Ver Figura 45).

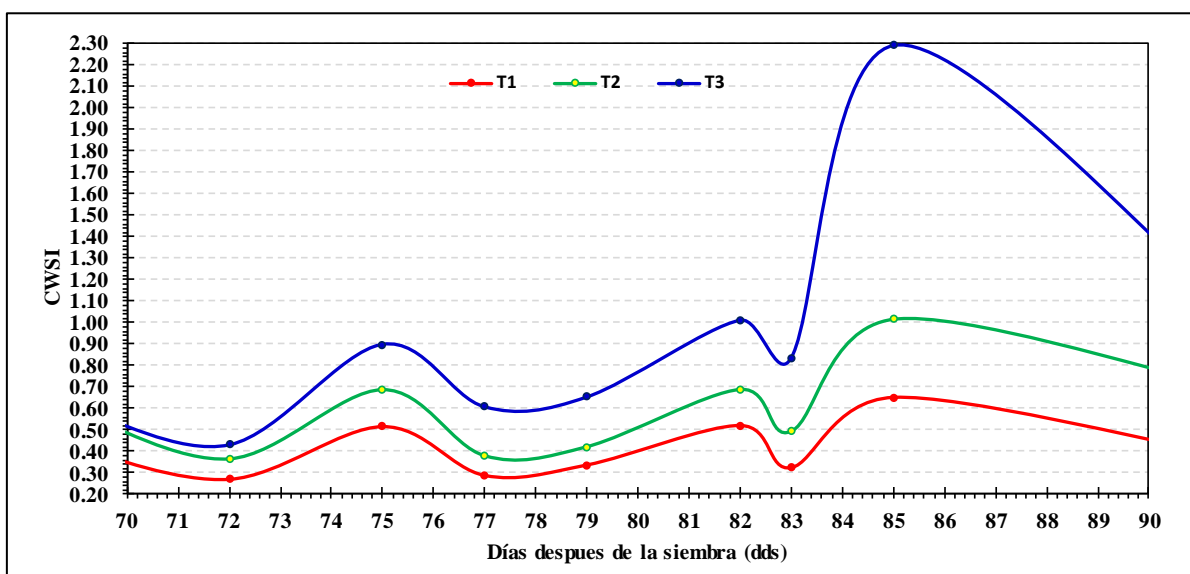


Figura 45: Evolución temporal de las variaciones del índice CWSI para los tratamientos entre las etapas de llenado de tubérculo tardío y madurez.

Por otro lado, existieron desde dos eventos de interés en el aumento del estrés hídrico: desde 72-75 días después de la siembra y desde 78-82 días después de la siembra. En ambos casos, los umbrales superaron a 0.7 y 0.9, respectivamente, para T2 y T3 (Ver Tabla 27).

Tabla 27: Variaciones de estrés hídrico (escala del CWSI) hasta el inicio de la madurez

Tratamiento	Estrés		
	72-75 DDS (*)	78-82 DDS (**)	83-85 DDS (***)
T1	0.246	0.231	0.328
T2	0.323	0.3189	0.522
T3	0.468	0.422	1.463

DDS son los días después de la siembra.

Alcanzaron umbrales superiores a 0.7 (*), 0.9 (**) y 0.8 (***) según la Figura 45.

En efecto, esto produjo valores decrecientes del rendimiento en peso fresco durante C5_Z3 (82 DDS), C6_Z1 (86 DDS) y C6_Z2 (89 DDS) (Ver Figuras 46 y 47). Dicha evidencia concuerda con los resultados obtenidos en la publicación de Erdem *et al.* (2005), donde observó una tendencia en la disminución de los valores del rendimiento del tubérculo, en cuanto al estrés hídrico superó el umbral de 0.8. No obstante, también se tuvo en cuenta el evento suscitado desde los 83-85 días después de la siembra (Ver Tabla 27).

También cabe señalar que al superar el umbral de 0.8, según la escala del CWSI, coincidió con la interrupción de la etapa del llenado del tubérculo y aparentemente aceleró la etapa de madurez para T3 (Ver Tabla 23).

Se reiteró que los eventos de *recuperación* al estrés hídrico pueden contribuir con el aumento porcentual del rendimiento más sin poder superar sus valores óptimos, siempre y cuando, el tratamiento este sometido a un umbral muy alto de estrés.

Por ejemplo, si se toma en cuenta el mayor aumento porcentual alcanzado por T1 durante C4_Z3 (79 DDS) y C6_Z3 (92 DDS): 10.53 y 18.13 por ciento, respectivamente, en contraste a los valores alcanzados en T2 y T3: 7 y 12 por ciento, respectivamente (Ver Figuras 46 y 47). Se debió al menor umbral de estrés sometido en T1, más que a los eventos de *recuperación severa* (en el caso de T1) y *muy severa* (en el caso de T2 y T3) que se registran en la Tabla 28.

Tabla 28: Recuperaciones estrés hídrico (escala del CWSI) hasta el inicio de la madurez

Tratamiento	Recuperación				
	68-70 DDS	70-72 DDS	75-78 DDS	82-83 DDS	85-92 DDS
T1	0.144	0.18	0.226	0.197	0.245
T2	0.1355	0.2335	0.318	0.1949	0.285
T3	0.224	0	0.309	0.212	1.097

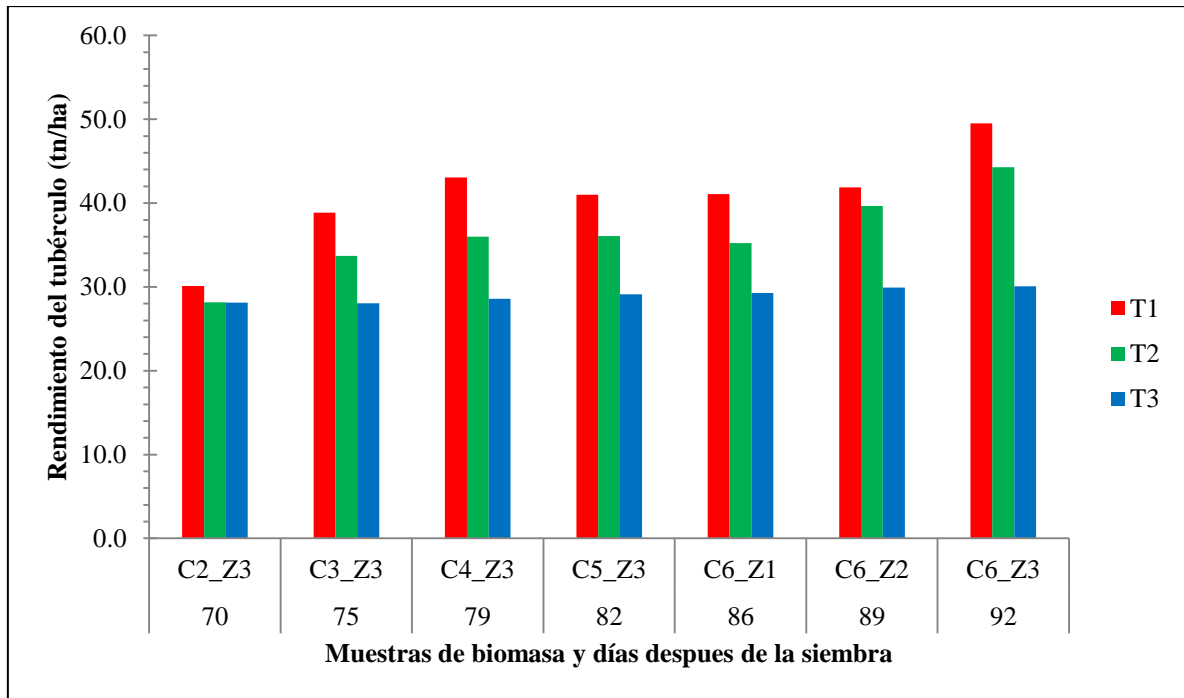


Figura 46: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso fresco (tn/ha) durante 70-92 dds.

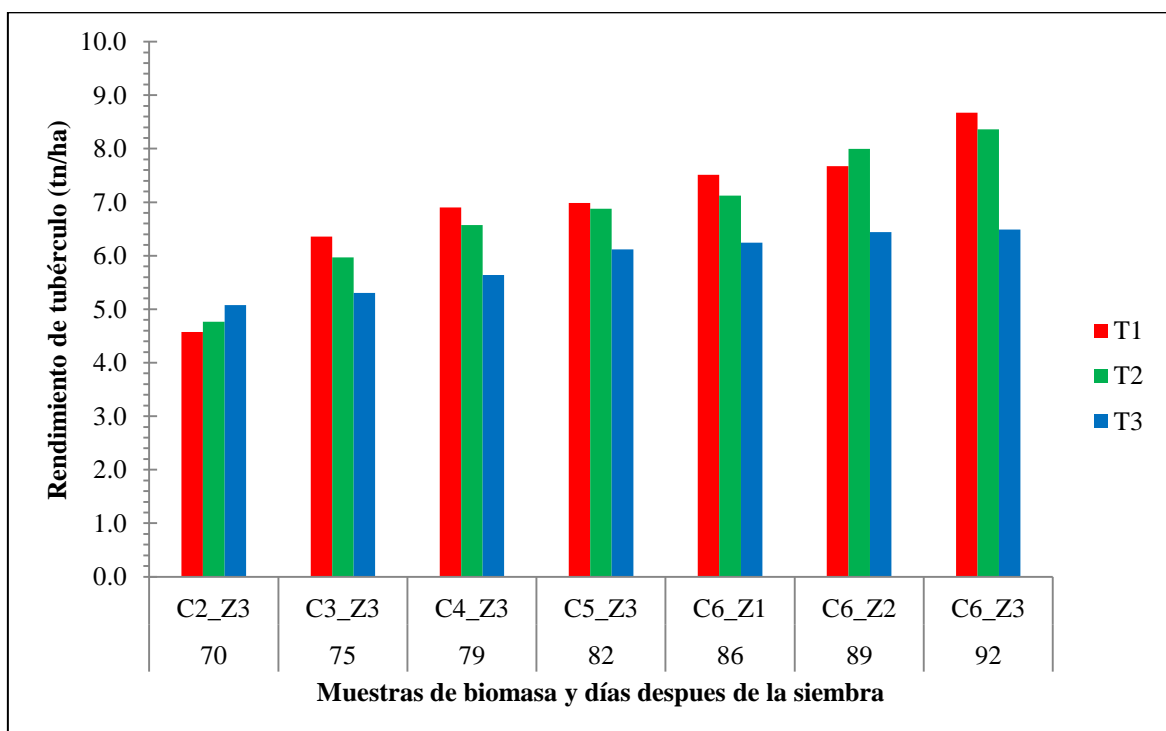


Figura 47: Evolución temporal del rendimiento del tubérculo en peso seco (tn/ha) durante 70-92 dds.

4.3. Estimación del rendimiento del tubérculo pronosticado antes de la cosecha

4.3.1. Obtención del día de emergencia

Al presentarse condiciones de alta de humedad relativa durante los días posteriores a la fecha de siembra, comprometieron la demora y no uniformidad en la germinación de las semillas.

Por esta razón, se optó por obtener previamente diversos pronósticos de rendimiento de tubérculo, considerando desde los 13-23 días después de la siembra como fechas tentativas para el día de emergencia. Finalmente se obtuvo un mejor resultado para el primero de ellos, es decir, cuando el porcentaje de germinación fue superior al 60 por ciento (Ver Tabla 29).

Tabla 29: Registro de emergencias de las semillas por fecha

Fechas	DDS	Emergencia (%)	Manifestaciones
25-jun	12	42.6	1151
26-jun	13	60.7	1640
27-jun	14	74.7	2016
28-jun	15	84.0	2268
30-jun	17	94.0	2538
02-jul	19	97.8	2641
03-jul	20	98.6	2663
04-jul	21	99.1	2677
05-jul	22	99.4	2684

* DDS son los días después de la siembra.

4.3.2. Lámina de agua disponible en el suelo

Al aplicar las distintas fechas de riego y llegar el suelo a capacidad de campo, se registraron valores semejantes de lámina disponible en el suelo entre los tratamientos (Ver Figura 48).

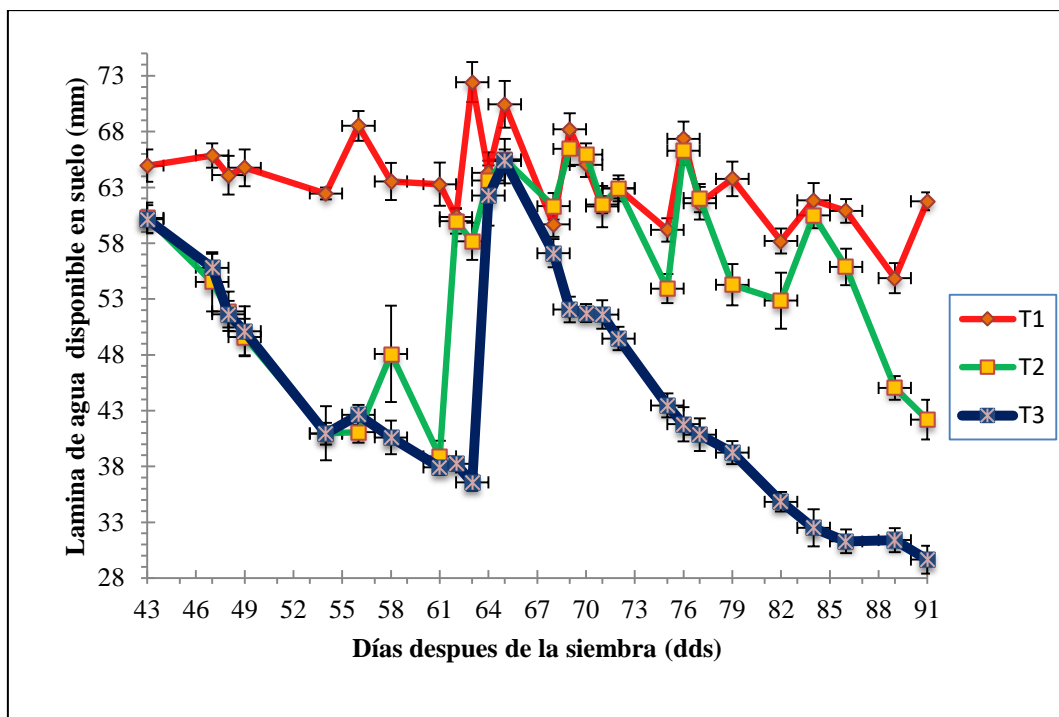


Figura 48: Lámina de agua disponible a través de la campaña agrícola

Por ejemplo, para el primer pronóstico de rendimiento (día 45 después de la siembra), se registraron valores similares en T2 y T3 (Ver Tabla 30). De igual modo, en T1 y T2, para el segundo pronóstico (día 61 después de la siembra).

Tabla 30: Láminas de agua disponible en el suelo (mm), utilizados en el pronóstico de rendimiento

Tratamientos	1 mes y medio antes de la cosecha	1 mes antes de la cosecha
T1	64.95	60.34
T2	60.26	59.96
T3	60.16	38.23

* DDS son los días después de la siembra.

4.3.3. Crecimiento del sistema radicular

Se registró mediciones superiores a 30 cm, específicamente desde la sub-etapa de cúspide de producción foliar e inicio del primer pronóstico de rendimiento (Ver Figura 50).

En el día 35 después de la siembra, se registraron mayores valores porcentuales a favor de T2: 2.17 % y 10.87 %, en comparación a T1 y T3, respectivamente. Por lo tanto, existió una

relación inversa entre la elongación del sistema radicular con la intensidad de estrés sometida durante el inicio del periodo de tuberización (Ver Figura 49).

Otra evidencia se observó a partir del día 44 después de la siembra, en donde todos los tratamientos registraron una variación de estrés hídrico de hasta 0.25 en la escala de CWSI (Ver Tabla 24). Posteriormente, T2 disminuyó la tendencia del crecimiento del sistema radicular respecto a T1, mientras que T3 mantuvo sus valores respecto a los demás. Por lo tanto, el cambio estrés hídrico severo disminuyó la rapidez del crecimiento en las raíces para T2 (Ver Figura 49).

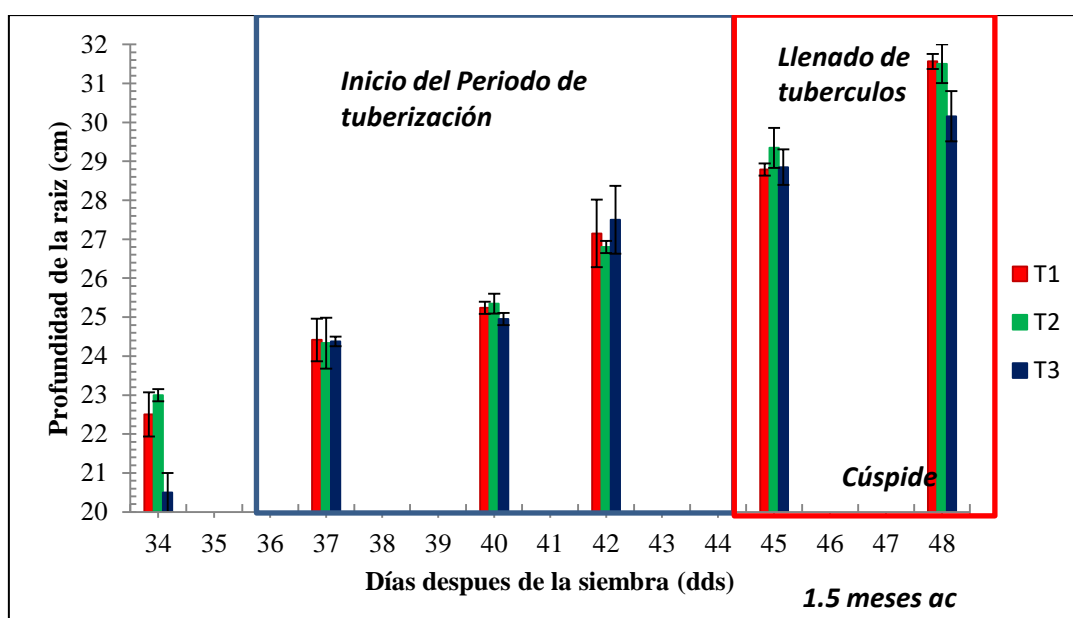


Figura 49: Profundidad del sistema radicular vs DDS para los diferentes tratamientos de estrés hídrico con desviaciones estándar.

También se suscitó cuando T2 estuvo sometido a una variación de estrés de 0.41, desde el día 83 después de la siembra (Ver Tabla 29). Aunque se observó estabilidad en sus valores del profundidad radicular, fue a partir día 89 después de la siembra que recuperó una tendencia creciente (Ver Figura 50 y Tabla 32).

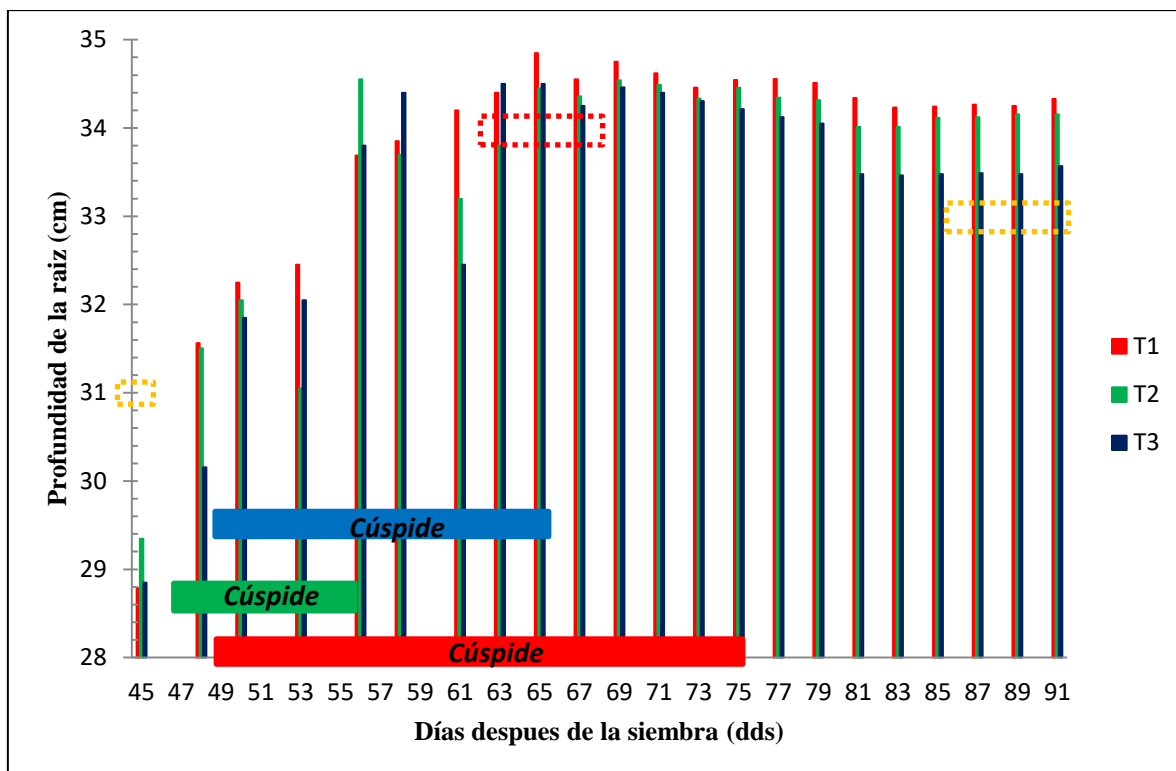


Figura 50: Profundidad del sistema radicular vs DDS durante la etapa de llenado de tubérculo hasta el inicio del periodo de madurez. Los rectángulos punteados representan eventos de variación del estrés hídrico.

En cuanto a los datos de la profundidad del sistema radicular utilizados en los pronósticos de rendimiento, se aplicaron valores muy similares al primer pronóstico, en contraste del segundo (Ver Tabla 31).

Tabla 31: Valores de profundidad radicular (cm) considerados para el pronóstico del rendimiento

Tratamientos	1 mes y medio antes de la cosecha	
	1 mes y medio antes de la cosecha	1 mes antes de la cosecha
T1	28.79	34.20
T2	29.34	33.20
T3	28.85	32.45

* DDS son los días después de la siembra.

Tabla 32: Valores registrado de la profundidad radicular (cm) durante la campaña agrícola

Fecha	DDS	T1	T2	T3
17-jul	34	22.50	23.00	20.50
20-jul	37	24.42	24.33	24.38
23-jul	40	25.24	25.35	24.95
25-jul	42	27.15	26.80	27.50
28-jul	45	28.79	29.35	28.85
31-jul	48	31.56	31.51	30.16
02-ago	50	32.25	32.05	31.85
05-ago	53	32.45	31.05	32.05
08-ago	56	33.69	34.55	33.80
10-ago	58	33.85	33.70	34.40
13-ago	61	34.20	33.20	32.45
15-ago	63	34.40	33.80	34.50
17-ago	65	34.85	34.45	34.50
19-ago	67	34.55	34.36	34.25
21-ago	69	34.75	34.54	34.46
23-ago	71	34.62	34.49	34.40
25-ago	73	34.46	34.33	34.31
27-ago	75	34.55	34.46	34.21
29-ago	77	34.56	34.35	34.12
31-ago	79	34.51	34.31	34.05
02-sep	81	34.34	34.02	33.48
04-sep	83	34.23	34.02	33.46
06-sep	85	34.24	34.12	33.48
08-sep	87	34.26	34.12	33.49
10-sep	89	34.25	34.15	33.48
12-sep	91	34.33	34.15	33.57

Donde DDS son los días después de la siembra.

4.3.4. Pronóstico del rendimiento del tubérculo antes de la cosecha

4.3.4.1. Determinación del Pronóstico del rendimiento

Se estimaron los mayores valores de pronóstico de rendimiento utilizando el pronóstico climático de un mes y medio antes de la cosecha, valga la redundancia. (Ver Figura 51, 52, 53, 54, 55 y 56). De igual manera, se manifestó mayor superioridad en T2, seguido por T1 y T3 (Ver Tabla 33, 34, 35, 36, 37 y 38).

También se evidenció que el inicio del crecimiento exponencial de los valores pronosticados coincidió desde la *cúspide de desarrollo foliar* para todos los tratamientos (Ver Figura 51, 52, 53, 54, 55 y 56).

Por otro lado, se verificó la precocidad de la etapa de madurez en T3 respecto a otros tratamientos (Ver Figura 53 y 56), esta premisa coincidió con el criterio de Egúsquiza (2014) que describe a la poca disponibilidad de agua como un factor que acelera el crecimiento y disminuye la optimización del rendimiento del tubérculo. En ese sentido, se puede afirmar que el modelo agrícola predijo el rendimiento acorde al estrés hídrico de los tratamientos.

Tabla 33: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso fresco para T1 (tn/ha)

Fecha	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	3.05	
29-jul	46	3.37	
30-jul	47	3.75	
31-jul	48	4.17	
01-ago	49	4.64	
02-ago	50	5.12	
03-ago	51	5.68	
04-ago	52	6.30	
05-ago	53	6.88	
06-ago	54	7.52	
07-ago	55	8.19	
08-ago	56	8.92	
09-ago	57	9.63	
10-ago	58	10.41	
11-ago	59	11.23	
12-ago	60	12.10	
13-ago	61	12.96	11.10
14-ago	62	13.83	11.75
15-ago	63	14.74	12.62
16-ago	64	15.68	13.44
17-ago	65	16.62	14.31
18-ago	66	17.59	15.25
19-ago	67	18.50	16.12
20-ago	68	19.48	17.07
21-ago	69	20.42	17.99
22-ago	70	21.41	18.95
23-ago	71	22.35	19.87

«continuación»

24-ago	72	23.27	20.78
25-ago	73	24.21	21.72
26-ago	74	25.13	22.64
27-ago	75	26.08	23.60
28-ago	76	27.06	24.58
29-ago	77	28.01	25.55
30-ago	78	28.91	26.53
31-ago	79	29.79	27.52
01-sep	80	30.63	28.45
02-sep	81	31.45	29.27
03-sep	82	32.34	30.23
04-sep	83	33.24	31.25
05-sep	84	34.11	32.20
06-sep	85	34.94	33.08
07-sep	86	35.80	33.89
08-sep	87	36.61	34.73
09-sep	88	37.41	35.59
10-sep	89	38.15	36.40
11-sep	90	38.87	37.17
12-sep	91	39.58	37.93
13-sep	92	40.20	38.61

Donde DDS son los días después de la siembra

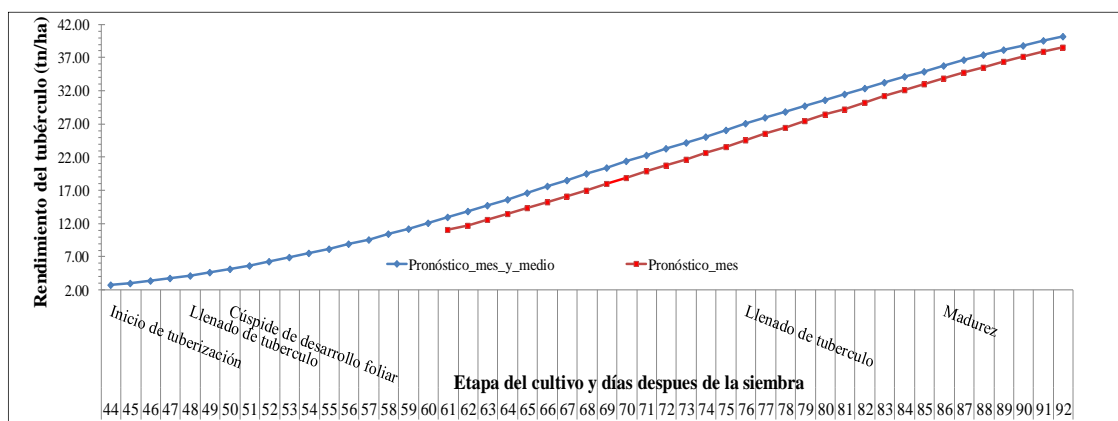


Figura 51: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso fresco (tn/ha) para T1 durante de las etapas del desarrollo y los días después de la siembra.

Tabla 34: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso fresco para T2 (tn/ha)

Fechas	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	3.13	
29-jul	46	3.45	
30-jul	47	3.83	
31-jul	48	4.27	
01-ago	49	4.74	
02-ago	50	5.24	
03-ago	51	5.82	
04-ago	52	6.45	
05-ago	53	7.04	
06-ago	54	7.69	
07-ago	55	8.38	
08-ago	56	9.13	
09-ago	57	9.86	
10-ago	58	10.65	
11-ago	59	11.49	
12-ago	60	12.38	
13-ago	61	13.27	11.37
14-ago	62	14.16	12.04
15-ago	63	15.08	12.93
16-ago	64	16.05	13.77
17-ago	65	17.01	14.66
18-ago	66	18.01	15.62
19-ago	67	18.94	16.51
20-ago	68	19.94	17.48
21-ago	69	20.90	18.43
22-ago	70	21.91	19.41
23-ago	71	22.87	20.36
24-ago	72	23.81	21.29
25-ago	73	24.78	22.25
26-ago	74	25.72	23.20
27-ago	75	26.70	24.18
28-ago	76	27.69	25.18
29-ago	77	28.67	26.18
30-ago	78	29.59	27.18
31-ago	79	30.49	28.20
01-sep	80	31.35	29.14
02-sep	81	32.19	29.98
03-sep	82	33.10	30.96
04-sep	83	34.02	32.01
05-sep	84	34.92	32.98
06-sep	85	35.76	33.88
07-sep	86	36.64	34.71
08-sep	87	37.47	35.58

«continuación»

09-sep	88	38.29	36.46
10-sep	89	39.05	37.29
11-sep	90	39.79	38.08
12-sep	91	40.51	38.86
13-sep	92	41.14	39.56

Donde DDS son los días después de la siembra

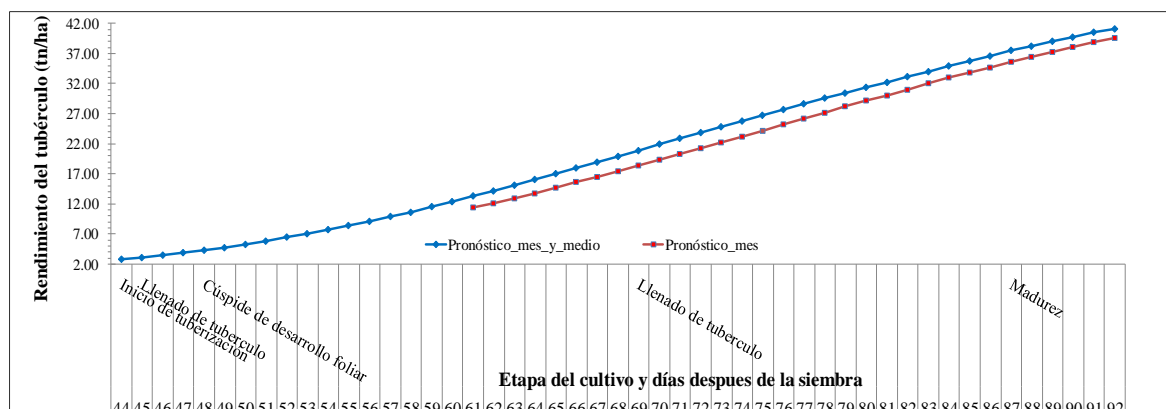


Figura 52: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco (tn/ha) para T2 durante de las etapas del desarrollo y los días después de la siembra.

Tabla 35: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso fresco para T3 (tn/ha)

Fechas	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	3.02	
29-jul	46	3.34	
30-jul	47	3.71	
31-jul	48	4.13	
01-ago	49	4.59	
02-ago	50	5.06	
03-ago	51	5.62	
04-ago	52	6.23	
05-ago	53	6.81	
06-ago	54	7.44	
07-ago	55	8.10	
08-ago	56	8.83	
09-ago	57	9.53	
10-ago	58	10.30	
11-ago	59	11.11	
12-ago	60	11.97	
13-ago	61	12.82	10.83
14-ago	62	13.68	11.46

«continuación»

15-ago	63	14.58	12.31
16-ago	64	15.51	13.11
17-ago	65	16.44	13.96
18-ago	66	17.41	14.87
19-ago	67	18.30	15.72
20-ago	68	19.27	16.65
21-ago	69	20.21	17.54
22-ago	70	21.18	18.48
23-ago	71	22.11	19.39
24-ago	72	23.02	20.27
25-ago	73	23.95	21.19
26-ago	74	24.86	22.09
27-ago	75	25.81	23.02
28-ago	76	26.77	23.98
29-ago	77	27.71	24.93
30-ago	78	28.61	25.87
31-ago	79	29.47	26.85
01-sep	80	30.30	27.75
02-sep	81	31.11	28.55
03-sep	82	32.00	29.48
04-sep	83	32.88	30.48
05-sep	84	33.75	31.41
06-sep	85	34.57	32.26
07-sep	86	35.42	33.05
08-sep	87	36.22	33.88
09-sep	88	37.01	34.71
10-sep	89	37.74	35.50
11-sep	90	38.46	36.26
12-sep	91	39.15	37.00
13-sep	92	39.77	37.66

Donde DDS son los días después de la siembra

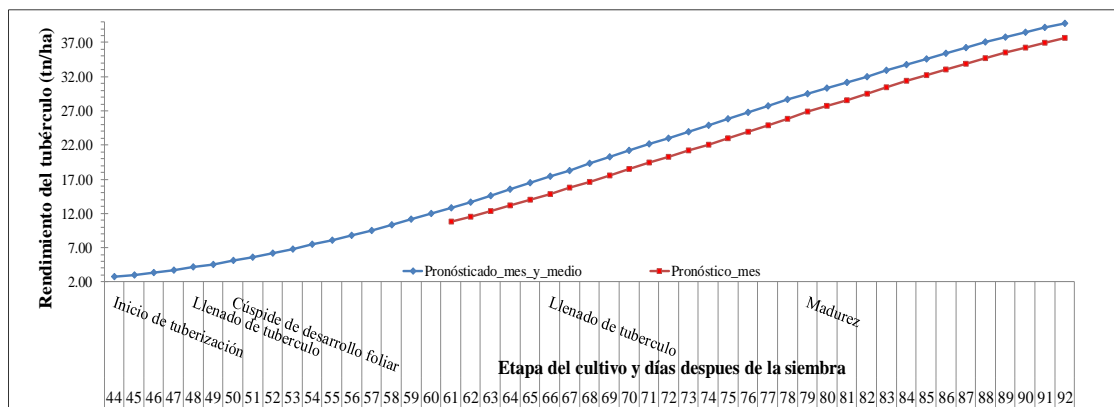


Figura 53: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso fresco (tn/ha) para T3 durante de las etapas del desarrollo y los días después de la siembra.

Tabla 36: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco para T1 (tn/ha)

Fechas	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	0.55	
29-jul	46	0.61	
30-jul	47	0.67	
31-jul	48	0.75	
01-ago	49	0.83	
02-ago	50	0.92	
03-ago	51	1.02	
04-ago	52	1.13	
05-ago	53	1.24	
06-ago	54	1.35	
07-ago	55	1.47	
08-ago	56	1.61	
09-ago	57	1.73	
10-ago	58	1.87	
11-ago	59	2.02	
12-ago	60	2.18	
13-ago	61	2.33	2.00
14-ago	62	2.49	2.11
15-ago	63	2.65	2.27
16-ago	64	2.82	2.42
17-ago	65	2.99	2.58
18-ago	66	3.17	2.74
19-ago	67	3.33	2.90
20-ago	68	3.51	3.07
21-ago	69	3.68	3.24
22-ago	70	3.85	3.41
23-ago	71	4.02	3.58
24-ago	72	4.19	3.74
25-ago	73	4.36	3.91
26-ago	74	4.52	4.08
27-ago	75	4.70	4.25
28-ago	76	4.87	4.43
29-ago	77	5.04	4.60
30-ago	78	5.20	4.77
31-ago	79	5.36	4.95
01-sep	80	5.51	5.12
02-sep	81	5.66	5.27
03-sep	82	5.82	5.44
04-sep	83	5.98	5.62
05-sep	84	6.14	5.80
06-sep	85	6.29	5.95
07-sep	86	6.44	6.10
08-sep	87	6.59	6.25

«continuación»

09-sep	88	6.73	6.41
10-sep	89	6.87	6.55
11-sep	90	7.00	6.69
12-sep	91	7.12	6.83
13-sep	92	7.24	6.95

Donde DDS son los días después de la siembra

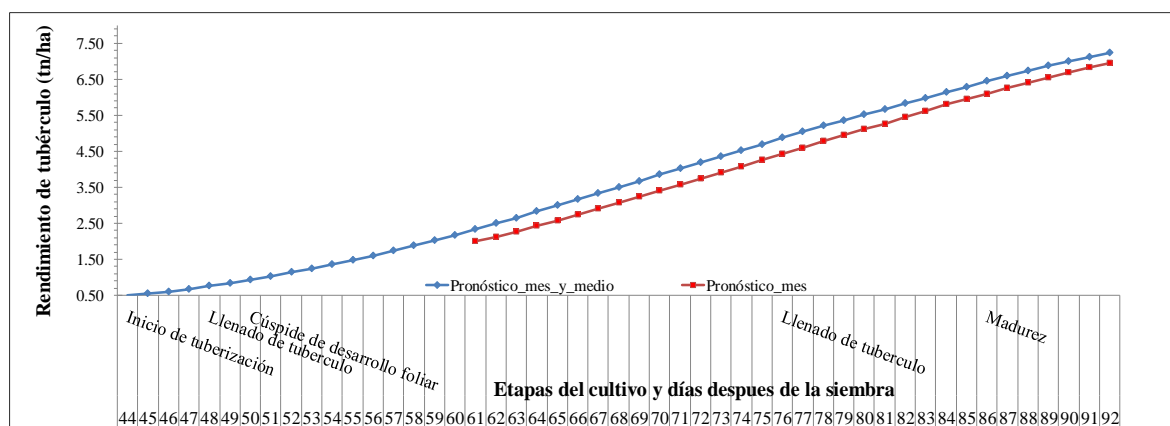


Figura 54: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco (tn/ha) para T1 durante de las etapas del desarrollo y los días después de la siembra

Tabla 37: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco para T2 (tn/ha)

Fechas	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	0.56	
29-jul	46	0.62	
30-jul	47	0.69	
31-jul	48	0.77	
01-ago	49	0.85	
02-ago	50	0.94	
03-ago	51	1.05	
04-ago	52	1.16	
05-ago	53	1.27	
06-ago	54	1.38	
07-ago	55	1.51	
08-ago	56	1.64	
09-ago	57	1.77	
10-ago	58	1.92	
11-ago	59	2.07	
12-ago	60	2.23	
13-ago	61	2.39	2.05
14-ago	62	2.55	2.17

«continuación»

15-ago	63	2.71	2.33
16-ago	64	2.89	2.48
17-ago	65	3.06	2.64
18-ago	66	3.24	2.81
19-ago	67	3.41	2.97
20-ago	68	3.59	3.15
21-ago	69	3.76	3.32
22-ago	70	3.94	3.49
23-ago	71	4.12	3.66
24-ago	72	4.29	3.83
25-ago	73	4.46	4.01
26-ago	74	4.63	4.18
27-ago	75	4.81	4.35
28-ago	76	4.98	4.53
29-ago	77	5.16	4.71
30-ago	78	5.33	4.89
31-ago	79	5.49	5.08
01-sep	80	5.64	5.25
02-sep	81	5.79	5.40
03-sep	82	5.96	5.57
04-sep	83	6.12	5.76
05-sep	84	6.28	5.94
06-sep	85	6.44	6.10
07-sep	86	6.60	6.25
08-sep	87	6.74	6.40
09-sep	88	6.89	6.56
10-sep	89	7.03	6.71
11-sep	90	7.16	6.85
12-sep	91	7.29	6.99
13-sep	92	7.41	7.12

Donde DDS son los días después de la siembra

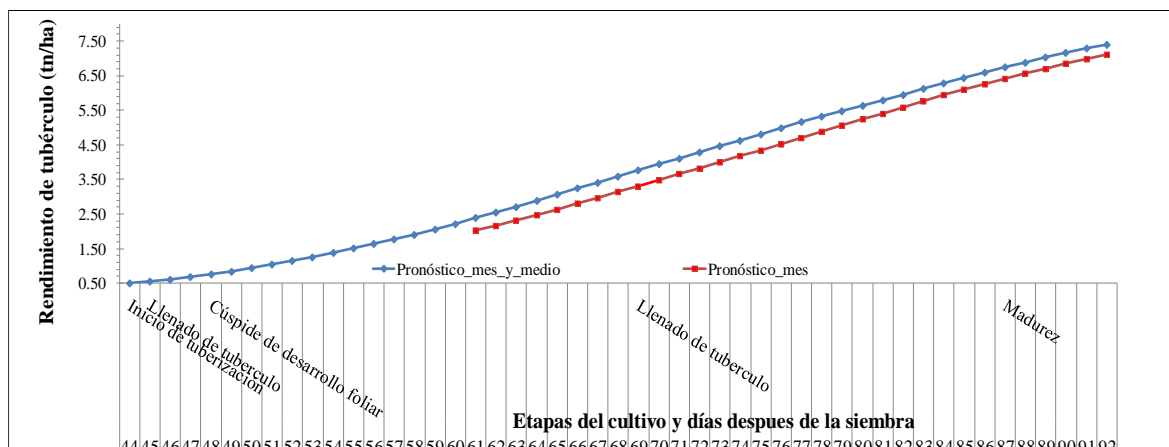


Figura 55: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco (tn/ha) para T2 durante las etapas del desarrollo y los días después de la siembra.

Tabla 38: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco para T3 (tn/ha)

Fechas	DDS	Pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha	Pronóstico de un mes antes de la cosecha
28-jul	45	0.54	
29-jul	46	0.60	
30-jul	47	0.67	
31-jul	48	0.74	
01-ago	49	0.83	
02-ago	50	0.91	
03-ago	51	1.01	
04-ago	52	1.12	
05-ago	53	1.23	
06-ago	54	1.34	
07-ago	55	1.46	
08-ago	56	1.59	
09-ago	57	1.71	
10-ago	58	1.85	
11-ago	59	2.00	
12-ago	60	2.15	
13-ago	61	2.31	1.95
14-ago	62	2.46	2.06
15-ago	63	2.62	2.22
16-ago	64	2.79	2.36
17-ago	65	2.96	2.51
18-ago	66	3.13	2.68
19-ago	67	3.29	2.83
20-ago	68	3.47	3.00
21-ago	69	3.64	3.16
22-ago	70	3.81	3.33

«continuación»

23-ago	71	3.98	3.49
24-ago	72	4.14	3.65
25-ago	73	4.31	3.81
26-ago	74	4.48	3.98
27-ago	75	4.65	4.14
28-ago	76	4.82	4.32
29-ago	77	4.99	4.49
30-ago	78	5.15	4.66
31-ago	79	5.30	4.83
01-sep	80	5.45	4.99
02-sep	81	5.60	5.14
03-sep	82	5.76	5.31
04-sep	83	5.92	5.49
05-sep	84	6.08	5.65
06-sep	85	6.22	5.81
07-sep	86	6.38	5.95
08-sep	87	6.52	6.10
09-sep	88	6.66	6.25
10-sep	89	6.79	6.39
11-sep	90	6.92	6.53
12-sep	91	7.05	6.66
13-sep	92	7.16	6.78

Donde DDS son los días después de la siembra

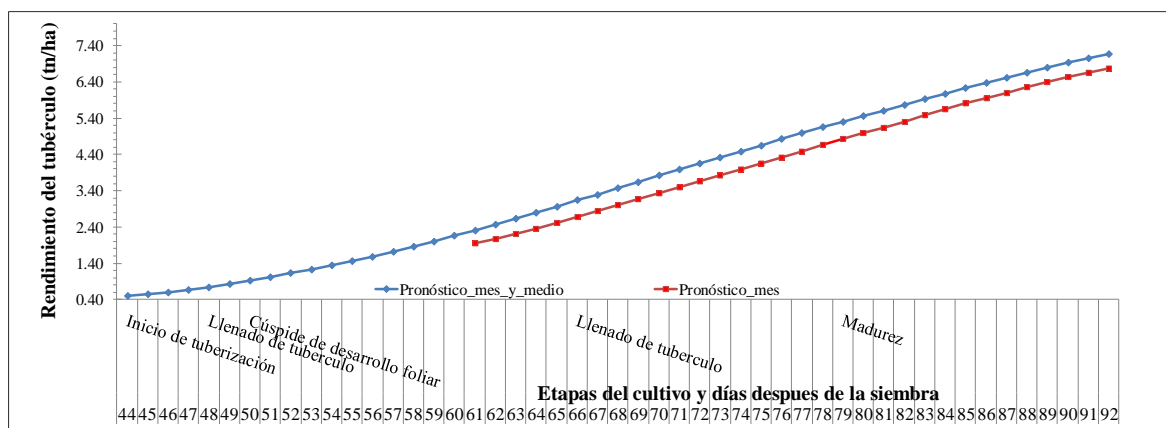


Figura 56: Pronóstico de rendimiento de tubérculo en peso seco (tn/ha) para T3 durante las etapas del desarrollo y los días después de la siembra.

Por otro lado, si se clasifican todos los eventos de las fluctuaciones de estrés hídrico y recuperación suscitados por frecuencia, intensidad y tratamiento, se observa que existió una compensación numérica entre ellos, especialmente en T2 (Ver Tabla 39). Esta premisa puede

incluir dos evidencias respecto a la eficacia del pronóstico del rendimiento en un tratamiento: La compensación equilibrada de su estado hídrico o una etapa de llenado de tubérculo más extensa (Ver figuras 52 y 55).

Tabla 39: Balance numérico entre los eventos de variaciones y recuperación de estrés hídrico clasificado por intensidad durante toda la campaña

Tratamiento	Número de eventos de variación de estrés			
	Leve	Normal	Severo	muy severo
T1	3	2	4	1
T2	1	2	3	3
T3	2	1	3	3

Tratamiento	Número de eventos de recuperación de estrés			
	Leve	Normal	Severo	muy severo
T1	1	5	4	2
T2	2	2	4	2
T3	2	3	3	3

Tratamiento	Balance estrés vs recuperación			
	Leve	Normal	Severo	muy severo
T1	2	-3	0	-1
T2	-1	0	-1	1
T3	0	-2	0	0

4.3.4.2. Validación estadística parcial del modelo *Solanum*

Tomando en cuenta los principios de Badii *et al.* (2007) para un diseño en bloques completamente aleatoria, se obtuvo un cuadro experimental incluyendo las variables respuesta: rendimiento de tubérculo en peso fresco y seco (Ver Tabla 40). Todos los datos correspondieron a rendimientos de tubérculo obtenidos entre los 44-58 días después de la siembra, es decir, tiempo entre el primer y segundo pronóstico de rendimiento.

Tabla 40: Rendimiento de tubérculo

Nomenclatura	DDS	Tratamiento	Peso fresco		Peso seco	
			Pronóstico	Observado	Pronóstico	Observado
		T1	2.78	4.5	0.5	0.6
		T2	2.73	5.4	0.49	0.7
C3_Z1	44	T3	2.73	4.7	0.49	0.6
C4_Z1	47	T1	3.72	5.5	0.67	0.8

«continuación»

		T2	3.78	6.4	0.68	0.9
		T3	3.72	6.2	0.67	0.9
		T1	5.02	8.9	0.9	1.2
C5_Z1	50	T2	5.07	7.9	0.91	1.1
		T3	4.97	7.9	0.89	1.1
		T1	7.67	11.5	1.32	1.6
C1_Z2	54	T2	7.46	12.1	1.34	1.9
		T3	7.63	13.2	1.37	2.1
		T1	9	14.8	1.62	1.7
C2_Z2	56	T2	8.58	13.4	1.54	1.8
		T3	8.74	14.1	1.57	2
		T1	10.49	16.3	1.89	1.3
C3_Z2	58	T2	10.04	14.9	1.81	1.5
		T3	10.44	15	1.88	1.5

DDS son los días después de la siembra

Los resultados de las pruebas estadísticas prescindibles a la elección de metodologías paramétrica, evidenciaron que los errores de las variables respuesta no siguieron necesariamente una distribución normal, con excepción de los valores de peso fresco. Por otro lado, ninguna variable respuesta cumplió con la prueba de homogeneidad. También no existió independencia entre las observaciones variables respuesta, en otros términos, no cumplió con el supuesto de auto-correlación, salvo en los valores obtenidos del rendimiento del tubérculo en peso seco (Ver Tabla 41).

Tabla 41: Valores p de los supuestos del DBCA

Nomenclatura	DDS	Pruebas estadísticas (supuestos)	Peso fresco	Peso Seco
C3_Z1	44	<i>Shapiro-Wilk</i> (Normalidad de errores)	0.12	8.42E-05
		<i>Barlett</i> (Homogeneidad de varianzas)	2.14E-16	2.12E-16
		<i>Durbin-Watson</i> (No autocorrelación errores)	2.85E-06	0.11
		<i>Shapiro-Wilk</i> (Normalidad de errores)	0.12	8.40E-05
		<i>Barlett</i> (Homogeneidad de varianzas)	2.14E-16	2.15E-16
		<i>Durbin-Watson</i> (No autocorrelación errores)	2.85E-06	0.11
C4_Z1	47	<i>Shapiro-Wilk</i> (Normalidad de errores)	0.15	8.41E-05
		<i>Barlett</i> (Homogeneidad de varianzas)	2.14E-16	2.13E-16
		<i>Durbin-Watson</i> (No autocorrelación errores)	2.85E-06	0.12
C5_Z1	50	<i>Shapiro-Wilk</i> (Normalidad de errores)	0.12	8.42E-05
		<i>Barlett</i> (Homogeneidad de varianzas)	2.14E-16	2.14E-16

		<i>Durbin-Watson</i> (No autocorrelación errores)	2.85E-06	0.11
«continuación»				
		<i>Shapiro-Wilk</i> (Normalidad de errores)	0.11	8.42E-05
		<i>Barlett</i> (Homogeneidad de varianzas)	2.14E-16	2.15E-16
C2_Z2	56	<i>Durbin-Watson</i> (No autocorrelación errores)	2.85E-06	0.09
		<i>Shapiro-Wilk</i> (Normalidad de errores)	0.12	8.42E-05
		<i>Barlett</i> (Homogeneidad de varianzas)	2.14E-16	2.13E-16
C3_Z2	58	<i>Durbin-Watson</i> (No autocorrelación errores)	2.85E-06	0.11

DDS son los días después de la siembra. Nivel de significancia del 5%.

De acuerdo al resultado de los supuestos planteados y al no cumplir varios de ellos, se aplicó la prueba no paramétrica de Friedman.

Conforme al valor p obtenido, se obtuvo la evidencia estadística suficiente para afirmar que no existen diferencias significativas entre los valores de rendimiento observados y pronosticados. Esto se puede interpretar, bajo otros términos, que existió similitud estadística entre los valores registrados en el campo experimental y los pronósticos de rendimiento de tubérculo obtenidos por el modelo *Solanum* entre fechas posteriores al inicio del periodo de tuberización y llenado del tubérculo, independientemente a los niveles de estrés involucrados (Ver Tabla 42).

Tabla 42: Resultados de la prueba de Friedman

Nomenglatura	Muestra		Peso fresco		Peso Seco	
	DDS	Metodología	Promedio	Suma de calificaciones	Promedio	Suma de calificaciones
C3_Z1	44	Pronóstico	2.73	3	0.605	3
		Observado	4.7	6	0.495	6
C4_Z1	47	Pronóstico	3.72	3	0.895	3
		Observado	6.2	6	0.675	6
C5_Z1	50	Pronóstico	5.02	3	1.11	3
		Observado	7.95	6	0.9	6
C1_Z2	54	Pronóstico	12.1	3	1.9	3
		Observado	7.46	6	1.34	6
C2_Z2	56	Pronóstico	14.1	3	1.8	3
		Observado	8.74	6	1.54	6
C3_Z2	58	Pronóstico	15.15	3	1.465	3
		Observado	10.29	6	1.845	6

DDS son los días después de la siembra. Valor p de 0.085 y un nivel de significancia del 5%.

V. CONCLUSIONES

Se ha obtenido con éxito los datos climáticos predictores para el uso con el modelo agrícola *Solanum* en el pronóstico del rendimiento del tubérculo. Los pronósticos climáticos del modelo *CFSv2*, modificando su resolución espacial a las condiciones del campo experimental con el *WRF*, son de gran utilidad. Se obtuvo mejor resultado con el pronóstico de un mes y medio antes de la cosecha.

Se estimó el rendimiento del tubérculo en condiciones experimentales sometidas a diferentes escalas del CWSI (humedad volumétrica en el suelo de 24.15 %, 21.81 % y 18.87 %). Los resultados indicaron que la variación del CWSI influye en el rendimiento del tubérculo. Estas fueron 49.52, 44.3 y 30.1 tn/ha para peso fresco y 8.7, 8.4 y 6.5 tn/ha para peso seco, respectivamente.

Se estimaron los pronósticos de rendimiento del tubérculo con un mes y medio de anterioridad a la cosecha, los cuales fueron: 40.63, 39.59 y 39.3 tn/ha para peso fresco y 7.31, 7.13 y 7.03 tn/ha para el peso seco, respectivamente según el tratamiento. De igual manera, para un mes con anterioridad a la cosecha: 37.08, 37.78 y 37.5 tn/ha para peso fresco y 6.68, 6.8 y 6.75 tn/ha para peso seco. La prueba de Friedman, indica una semejanza estadística entre los valores observados y los pronosticados al 95 por ciento de confianza, especialmente para el segundo tratamiento del primer pronóstico.

VI. RECOMENDACIONES

Respecto la obtención de datos climáticos predictores, teniendo en cuenta el proceso de ejecución del modelo *WRF*, podría modificarse los códigos que corresponden a los parámetros físicos en el *namelist.input*:. Como por ejemplo, aquellos que codifican la nubosidad, pues afecta directamente a los valores pronosticados de precipitación acumulada diaria. Se podría tener en cuenta las condiciones climatológicas en el distrito de La Molina y posteriormente validar los pronósticos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. (1998). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos. *Estudio FAO Rio y Drenaje*, 1(227). Recuperado de <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- Annandale, J.; Jovanic, N.; Benade, N.; Allen, R. (2002). Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Irrigation Science*, 21: 57-67. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s002710100047>
- Badii, M.; Castillo, J.; Rodríguez, M.; Wong, A.; Villalpando, P. (2007). Diseños experimentales e investigación científica. *Innovaciones de Negocio*, 2: 283-300. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/315813627_Disenos_experimentales_e_investigacion_cientifica Experimental designs and scientific research
- Bellvert, J.; Girona, J.; Zarco-Tejada, J.; Fereres, E. (2010). Utilización del Crop Water Stress Index (CWSI) para la programación del riego en viñedos. Instituto de Agricultura Sostenible, 1(10). Recuperado de https://quantalab.ias.csic.es/pdf/Agricultura%20Agua%20y%20Energia_2011.pdf
- Capraro, F. (setiembre, 2017). Revisión y análisis de índices de estado hídrico de cultivos bajo riego utilizando termografía: Casos de uso en olivos y almendros. Noveno congreso de Agro informática. Simposio llevado a cabo en el Instituto de Automática (INAUT), San Juan, Argentina.

- Centro Internacional de la Papa (CIP). (1998). Informe técnico anual 1997-1998 para el Mejoramiento y Semilla de Papa. Proyecto Promensa, 1(326).
- CIP. (2002). Informe Técnico Anual 2001-2002 para la Selección y Utilización de Variedades de Papa con Resistencia a Enfermedades para el Procesamiento Industrial de América Latina. Proyecto Fontagro, 1(112).
- Condori, B.; Barreda, C.; Bararyenya, A.; Byarugada, A.; Kude, D.; Lung'aho, C.; Onditi, J. (2018). How big is the potato (*Solanum tuberosum* L.) yield gap in Sub-Saharan Africa and why? A participatory approach. *Open Agriculture*, 3: 180-189. doi: 10.1515/opag-2018-0019
- Coiffier, J. (2011). *Fundamentals of Numerical Weather Prediction*. New York. Estados Unidos de América: Cambridge University Press.
- Devaux, D.; Ordinola, M.; Hibon, A.; Flores, R. (2010). El sector papa en la región Andina: Diagnóstico y elementos para una visión estratégica (Bolivia, Ecuador y Perú). Centro Internacional de la Papa, 1(271). Recuperado de <http://cipotato.org/wp-content/uploads/2014/08/005363.pdf>
- Dudhia, J. (2014). WRF Modeling System Overview. WRF-ARW tutorials. Mesoscale and Microscale Meteorology Division. NCAR. Recuperado de <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/supports/tutorial.html>
- Erdem, T.; Orta, H; Ahi, Y.; Okursoy, H. (2005). Crop water stress index for potato under furrow and drip irrigation systems. *Potato Research*, 48: 49-58. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02733681>
- Egúsqüiza, R. (2014). *La papa en el Perú*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.

- Egúsquiza, R. (agosto, 2018). Efectos del Cambio Climático en el Cultivo de papa. Taller de intercambio científico sobre Innovación Agraria Base de datos. Simposio llevado a cabo en SNIA/PNIA, Huancayo, Perú.
- García, J. (1992). Agrometeorología. Energía y Agua en la Agricultura. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Gil, J. & Padilla, M. (2018). Análisis de datos en la investigación educativa. España: Universidad de Sevilla.
- Gutiérrez, J.; Espinoza, M.; Bonierbale, M. (2007). Única: Variedad Peruana para mercado fresco y papa frita con tolerancia y Resistencia para condiciones climáticas adversas. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 14 (1): 41-50. doi: 10.37066/ralap.v14i1.143
- Jones, H. (1999). Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible air to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95 (3): 139-149. doi: 10.1016/S0168-1923(99)00030-1
- Kooman, P.; Fahem, M.; Tegera, P.; Haverkort, A. (1996). Effects of climate on different potato genotypes: Radiation interception, total and tuber dry matter production. *European Journal of Agronomy*, 5 (3): 193-205. doi: 10.1016/S1161-0301(96)02031-X
- Lopez, I.; Arteaga, R.; Lopez, R.; Vasquez, M.; Sanchez, I. (2009). Water stress index as an indicator of irrigation timing in agricultural crops. *Agricultura Técnica*, 35 (1): 92-106. Recuperado en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000100010

- Maddocks, A.; Young, S.; Reig, P. (2015). Ranking the World's Most Water-Stressed Countries in 2040. The World Resources Institute. Recuperado de <https://www.wri.org/blog/2015/08/ranking-world%E2%80%99s-most-water-stressed-countries-2040>
- Nkemdirin, L. (1972). A note on Albedo of Surface. *American Meteorological Society*, 11 (5): 867-874. doi: 10.2307/26175463
- Ñavincopa, V. (2018). Validación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) al simular temperaturas en zonas altoandinas de Puno y Arequipa. (Tesis de Grado). UNALM. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3211>
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (2016). *Estrés Hídrico y Térmico en papas: Avances y Protocolos*. Santiago de Chile: INIA.
- Ramachandran, K.; Tsokos, M.; Chris, P. (2009). *Mathematical Statistics with Applications*. Estados Unidos: Elsevier Inc.
- Saha, S.; Moorthi, S.; Hua-Lu, H.; Wu, X.; Wang, J.; Nadiga, S.;...Golberg, M. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *American Meteorological Society*, 91 (8): 1015–1058. doi: 10.1175/2010BAMS3001.1
- Skamarock, W.; Klemp, J.; Dudhia, J.; Gill, D.; Barker, D.; Duda, M.;...Powers, J. (2008). A Description of the Advanced Research WRF model, Version 3. Estados Unidos: NCAR.
- Vargas, R. (2019). Estudio del Fenómeno El niño en la región 1+2 durante el 2017 usando el modelo regional WRF e índice Atmosférico. (Tesis de Grado). UNALM. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3920>

- Vásquez, E. (2003). *Influencia de los Factores Ambientales en la Predicción del Comportamiento de los Clones de Papa para la Costa del Perú*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú
- Wilks, D. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Estados Unidos: Elsevier Inc.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Código fuente del *namelist.wps*: Pronóstico climático de un mes y medio antes de la cosecha

```
&share
  wrf_core = 'ARW',
  max_dom = 3,
  start_date = '2018-07-27_00:00:00','2018-07-27_00:00:00','2018-07-
27_00:00:00'
  end_date   = '2018-09-14_18:00:00','2018-09-14_18:00:00','2018-09-
14_18:00:00'
  interval_seconds = 21600
  io_form_geogrid = 2,
/

&geogrid
  parent_id           = 1, 1, 2,
  parent_grid_ratio  = 1, 3, 3,
  i_parent_start     = 1, 7, 11,
  j_parent_start     = 1, 7, 10,
  e_we               = 25, 37, 61,
  e_sn               = 25, 40, 55,
  !
  !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
  ! The default datasets used to produce the HGT_M, GREENFRAC,
  ! and LU_INDEX/LANDUSEF fields have changed in WPS v3.8. The HGT_M field
  ! is now interpolated from 30-arc-second USGS GMTED2010, the GREENFRAC
  ! field is interpolated from MODIS FPAR, and the LU_INDEX/LANDUSEF
fields
  ! are interpolated from 21-class MODIS.
  !
  ! To match the output given by the default namelist.wps in WPS v3.7.1,
  ! the following setting for geog_data_res may be used:
  !
  ! geog_data_res =
'gtopo_10m+usgs_10m+nesdis_greenfrac+10m','gtopo_2m+usgs_2m+nesdis_greenf
rac+2m',
  !
  !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
  !
  geog_data_res = '30s','30s','30s',
  dx = 27000,
  dy = 27000,
  map_proj = 'mercator',
  ref_lat  = -12.083,
  ref_lon  = -77.61,
  truelat1 = -12.083,
```

```
truelat2 = 0,  
stand_lon = -77.61,  
geog_data_path = '/home/chelo/geog/'  
/
```

```
&ungrib  
out_format = 'WPS',  
prefix = 'PGB',  
/
```

```
&metgrid  
fg_name = 'FLX','PGB','OCN'  
io_form_metgrid = 3,  
/
```

Anexo 2: Código fuente del *namelist.input*: Pronóstico de un mes antes de la cosecha

```

&time_control
run_days           = 0,
run_hours          = 0,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2018, 2018, 2018,
start_month        = 08,  08,  08,
start_day          = 12,  12,  12,
start_hour         = 00,  00,  00,
start_minute       = 00,  00,  00,
start_second       = 00,  00,  00,
end_year           = 2018, 2018, 2018,
end_month          = 09,  09,  09,
end_day            = 14,  14,  14,
end_hour           = 18,  18,  18,
end_minute         = 00,  00,  00,
end_second         = 00,  00,  00,
interval_seconds   = 21600
input_from_file    = .true.,.true.,.true.,
history_interval   = 60,  60,  60,
frames_per_outfile = 1000, 1000, 1000,
restart            = .false.,
restart_interval   = 5000,
io_form_history    = 2
io_form_restart    = 2
io_form_input      = 2
io_form_boundary   = 2
debug_level        = 0
/

&domains
time_step          = 162,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom            = 3,
e_we               = 25,   37,   61,
e_sn                = 25,   40,   55,
e_vert             = 32,   32,   32,
p_top_requested    = 5000,
num_metgrid_levels = 38,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                 = 27000, 9000, 3000,
dy                 = 27000, 9000, 3000,
grid_id            = 1,   2,   3,
parent_id          = 1,   1,   2,
i_parent_start     = 1,   7,  11,
j_parent_start     = 1,   7,  10,
parent_grid_ratio   = 1,   3,   3,
parent_time_step_ratio = 1,  3,  3,
feedback           = 1,
smooth_option      = 0,
/

&physics
mp_physics         = 3,   3,   3,
ra_lw_physics      = 1,   1,   1,
ra_sw_physics      = 1,   1,   1,
radt               = 30,  30,  30,

```

```

sf_sfclay_physics      = 1,      1,      1,
sf_surface_physics    = 2,      2,      2,
bl_pbl_physics        = 1,      1,      1,
bldt                  = 0,      0,      0,
cu_physics            = 1,      1,      0,
cudt                  = 5,      5,      5,
isfflx                = 1,
ifsnow                = 1,
icloud                = 1,
surface_input_source  = 3,
num_soil_layers       = 4,
num_land_cat          = 21,
sf_urban_physics     = 0,      0,      0,
/

&fdda
/

&dynamics
w_damping             = 0,
diff_opt              = 1,      1,      1,
km_opt                = 4,      4,      4,
diff_6th_opt          = 0,      0,      0,
diff_6th_factor       = 0.12,  0.12,  0.12,
base_temp             = 290.,
damp_opt              = 0,
zdamp                 = 5000.,  5000.,  5000.,
dampcoef              = 0.2,    0.2,    0.2,
khdif                 = 0,      0,      0,
kvdif                 = 0,      0,      0,
non_hydrostatic       = .true.,  .true.,  .true.,
moist_adv_opt         = 1,      1,      1,
scalar_adv_opt        = 1,      1,      1,
/

&bdy_control
spec_bdy_width        = 5,
spec_zone              = 1,
relax_zone            = 4,
specified              = .true.,  .false., .false.,
nested                = .false.,  .true.,  .true.,
/

&grib2
/

&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups = 1,
/

```

Anexo 3: Medidas de precisión de los pronósticos climáticos

	1 mes y medio antes de la cosecha			1 mes antes de la cosecha			
	BIAS	RMSE	MAE	BIAS	RMSE	MAE	
Temperatura Mínima (°C)	0.39	1.09	0.74	0.53	1.42	1.16	
Temperatura Máxima (°C)	2.6	3.35	2.8	1.62	2.45	1.90	
Radiación Solar ($MJ/m^2 \cdot dia$)	-1.10	3.86	3.13	-2.35	4.14	3.24	
Precipitación (mm/día)	-0.07	0.15	0.07	-0.07	0.06	0.07	
Evapotranspiración Potencial (mm/día)	T1	-0.30	0.37	0.31	-0.10	0.50	0.42
	T2	-0.32	0.38	0.33	-0.08	0.47	0.39
	T3	-0.34	0.40	0.34	-0.05	0.43	0.35

Anexo 4: Medidas de precisión de los pronósticos de rendimiento del tubérculo

A. Pronóstico del rendimiento del tubérculo en peso fresco (tn/ha) de un mes y medio antes de la cosecha

Etapas de crecimiento y desarrollo	BIAS			RMSE			MAE		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Inicio de tuberización	-1.75	-2.67	-2.23	1.24	2.67	2.24	1.75	2.67	2.23
Llenado de tubérculo	-11.46	-4.74	-4.28	11.72	5.59	4.90	11.46	4.74	4.28
<i>Cúspide de desarrollo foliar</i>	-6.14	-4.53	-4.26	6.75	4.59	4.36	6.14	4.53	4.26
Madurez	-6.15	-3.09	5.27	6.46	3.49	6.03	6.15	3.09	5.27

B. Pronóstico del rendimiento del tubérculo en peso fresco (tn/ha) de un mes antes de la cosecha

Etapas de crecimiento y desarrollo	BIAS			RMSE			MAE		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Llenado de tubérculo	-14.12	-7.26	-7.32	14.32	8.15	7.66	14.12	7.26	7.32
<i>Cúspide de desarrollo foliar</i>	-9.58	-7.02	-6.39	10.25	7.03	6.43	9.58	7.02	6.39
Madurez	-8.84	-4.99	3.44	9.21	5.22	4.73	8.84	4.99	3.98

C. Pronóstico del rendimiento del tubérculo en peso seco (tn/ha) de un mes y medio antes de la cosecha

Etapas de crecimiento y desarrollo	BIAS			RMSE			MAE		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Inicio de tuberización	-0.12	-0.21	-0.17	0.12	0.21	0.18	0.12	0.21	0.17
Llenado de tubérculo	-1.45	-0.97	-0.91	1.47	1.04	0.97	1.45	0.97	0.91
<i>Cúspide de desarrollo foliar</i>	-0.36	-0.36	-0.34	0.71	0.49	0.50	0.36	0.45	0.45
Madurez	-1.13	-1.20	0.08	1.14	1.20	0.34	1.13	1.20	0.31

D. Pronóstico del rendimiento del tubérculo en peso seco (tn/ha) de un mes antes de la cosecha

Etapas de crecimiento y desarrollo	BIAS			RMSE			MAE		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Llenado de tubérculo	-1.93	-1.61	-1.46	1.94	1.52	1.49	1.93	1.61	1.46
<i>Cúspide de desarrollo foliar</i>	-1.06	-0.99	-1.03	1.28	1.01	1.04	1.06	0.99	1.03
Madurez	-1.61	-1.54	-0.25	1.63	1.54	0.46	1.61	1.54	0.38