

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN METEOROLOGÍA APLICADA



**“TEMPERATURA RADIOMÉTRICA DE FOLLAJE COMO
INDICADOR DEL ESTATUS HÍDRICO DEL CULTIVO DE PAPA
(*Solanum tuberosum* L.) EN LA MOLINA-PERÚ”**

Presentada por:

JAVIER ISIDORO RINZA DÍAZ

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN
METEOROLOGÍA APLICADA**

Lima - Perú

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN METEOROLOGÍA APLICADA

**“TEMPERATURA RADIOMÉTRICA DE FOLLAJE COMO
INDICADOR DEL ESTATUS HÍDRICO DEL CULTIVO DE PAPA
(*Solanum tuberosum* L.) EN LA MOLINA-PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

JAVIER ISIDORO RINZA DÍAZ

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Constantino Calderón Mendoza

PRESIDENTE

Mg.Sc. Jerónimo García Villanueva

ASESOR

Dr. David Antonio Ramírez Collantes

CO-ASESOR

Mg.Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño

MIEMBRO

Mg. Sc. Alessandri Canchoa Quispe

MIEMBRO

DEDICATORIA

A mis padres Isidoro y Margarita por su amor infinito. A mis hermanos que a pesar de la distancia han sabido confiar en mi persona. A todos mis amigos por su apoyo en todo momento en esta etapa importante de mi vida profesional, en especial al Prof. Jerónimo García.

AGRADECIMIENTOS

-Al Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA) con el proyecto N°: 016-2015-INIA-PNIA/UPMSI/IE “Uso efectivo del agua en el cultivo de papa en zonas áridas: Mejorando el manejo del riego mediante el monitoreo del estatus hídrico para enfrentar al Cambio Climático” por el apoyo financiero.

-Al Centro Internacional de la Papa (CIP) y a todo el equipo de la División de Intensificación de Sistemas de Cultivos y Cambio Climático, liderado por el Dr. Roberto Quiroz por todas las facilidades brindadas para desallorar la presente investigación. Al Programa de investigación del CGIAR “Raíces, Tubérculos y Banano” por el co-financiamiento.

-A la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) por contribuir a mi formación profesional.

-Al Dr. David Ramírez por todo el apoyo y confianza depositada para la culminación de la presente investigación.

-A los miembros del jurado y a mi asesor Jerónimo García por sus valiosas sugerencias al presente trabajo.

-A mis compañeros de trabajo: Wendy Yactayo, Carolina Barreda, Nikolai Alarcon, Jesus Zamalloa, Cecilia Silva y Johan Ninanya.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Aspectos generales del cultivo de papa.....	4
2.2 Balance de energía y temperatura del follaje del cultivo.....	5
2.4 Índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI).....	9
2.5 Alcances ecofisiológicos para la determinación del estatus hídrico en el cultivo de papa.....	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
3.1 Descripción del lugar de estudio.....	13
3.2 Condiciones experimentales y mediciones ecofisiológicas.....	13
3.2.1 . Experimento realizado en macetas.....	13
3.2.2 . Experimento realizado en campo.....	15
3.3 Métodos.....	21
3.3.1 Identificación en que momento del día la diferencia de temperatura de hoja y el aire (dT) y la conductancia estomática máxima (g_{s_max}) reflejan mejor el estatus hídrico de la planta.....	21
3.3.2 Determinación de umbrales de riego con el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI).....	22
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
4.1 Momento del día donde la diferencia de temperatura de hoja y el aire (dT) y la conductancia estomática máxima (g_{s_max}) reflejan mejor el estatus hídrico de cultivo.....	25
4.2 Umbrales de riego con el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI).....	32
V. CONCLUSIONES.....	41
VI. RECOMENDACIONES.....	42
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
VIII. ANEXOS.....	49

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1: Principales formas de estimación de las temperaturas umbrales (seca y húmeda) para la obtención del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) por los métodos empírico, estadístico y teórico.....	11
Cuadro 2: Características del campo experimental llevadas a cabo bajo riego por goteo, entre el 3 de octubre del 2016 al 16 de enero del 2017.....	15
Cuadro 3: Promedio de la humedad volumétrica del suelo (θ), lámina de riego total (L_r) y potencial mátrico del suelo (Ψ_m), medidos entre el 11 de noviembre al 23 de diciembre del 2016.....	39
Cuadro 4: Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables de respuesta evaluadas: índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), conductancia estomática máxima (g_{s_max}), biomasa seca de tubérculo (BST), potencial hídrico de hoja (Ψ_{Hoja}), potencial mátrico del suelo (Ψ_m), discriminación de isótopos de carbono de tubérculos (Δ_{tuber}) y de hoja (Δ_{hoja}) evaluadas en promedio para toda las evaluaciones realizadas en el cultivo.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1:	Imágenes del tallo, hoja, tubérculo y flor de la papa variedad UNICA. Fuente: Gutiérrez et al. (2007)..... 4
Figura 2:	Etapas de crecimiento del cultivo de papa indicando la curva de crecimiento vegetativo (desarrollo aéreo) y reproductivo (desarrollo de tubérculo). Fuente: www.sqm.com/estudio/papa/5
Figura 3:	Variaciones de temperatura de una hoja en un campo de leguminosa (aproximadamente 30 cm ²), junto con las variaciones de temperatura del aire y la temperatura de un cuerpo artificial con una superficie de referencia humedecida (aluminio cubierto con un papel filtro) (a) y las variaciones de radiación neta (b). Fuente: Jones (2014).....7
Figura 4:	Representación esquemática de los principales factores que intervienen en la medición de la T_f con una cámara térmica (o con termómetro infrarrojo). 1: Entorno (cuerpos calientes), 2: Planta, 3: Atmósfera y 4: Cámara térmica. Donde T_{ref} es la temperatura aparente reflejada (determinada por una superficie de cartón), ϵ es la emisividad del cultivo, T_a es la temperatura del aire, T_f es la temperatura de follaje y τ es la transmisividad de la atmósfera. Fuente: FLIR (2016)..... 8
Figura 5:	Relación entre $(T_f - T_a)$ y VPD para condiciones bien regadas y máximo estrés en variedad de alfalfa en diferentes ciudades de Estados Unidos. Fuente: Idso et al. (1981)..... 9
Figura 6:	Esquema ilustrativo para la definición del CWSI, obtenido de la razón entre los términos “x” e “y”, tal como fue propuesto por Idso. Fuente: Jones (2014).....10
Figura 7:	Imagen que muestra las macetas con plantas con tratamiento de control (capacidad de campo, CC) y de restricción hídrica (50 % CC).....14
Figura 8:	Diseño de la parcela experimental con un área de 416.1 m ² , donde se testaron tres tratamientos de riego distribuidos al azar y repetidos en cuatro bloques bajo sistema de riego por goteo. El primer tratamiento fue a capacidad de campo o control (T_1) y los otros dos bajo condición de restricción de agua con un umbral preestablecido de conductancia estomática máxima (g_{s_max}) de 0.15

y $0.050 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para T_2 y T_3 respectivamente. Este experimento se llevó a cabo entre 3 de octubre del 2016 al 16 de enero del 2017. E, es la ubicación de la estación meteorológica y F_1 y F_2 son las estaciones de monitoreo de temperatura del aire, radiación neta, temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco..... 16

- Figura 9: Dimensiones del volumen de suelo regado por surco en el sistema de riego por goteo, con A (0.35 m) x L (4.5 m) x Z . Donde A ancho del surco a regar y L es la longitud de surco. Z es la profundidad del sistema radicular del cultivo..... 18
- Figura 10: Imagen que muestra las parcelas regadas con el sistema de riego por goteo del experimento realizado en campo..... 19
- Figura 11: Imagen térmica (a) y visible (b) tomada en campo del cultivo de papa, en el segundo experimento. SRAH es la superficie de referencia artificial húmeda..... 23
- Figura 12: Diagrama ilustrativo del proceso de adquisición y procesamiento de imágenes térmicas y visibles, para la obtención de la temperatura radiométrica promedio del follaje (T_f) y del cálculo del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI)..... 24
- Figura 13: Comportamiento diurno (promedio y error estándar) de la conductancia estomática en luz saturada o máxima (g_{s_max}). Las mediciones fueron realizadas los días 6 (a), 13 (b), 20 (c) y 26 (d) de mayo y días 2 (e) y 9 (f) de junio de 2016, correspondiente a 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra (DSS) respectivamente. Los tratamientos de control (C) y de restricción hídrica (S) están representados en círculo negro y blanco respectivamente (** $p < 0.01$, * $p < 0.05$ y $n.s. > 0.05$ no significativo).....27
- Figura 14: Comportamiento diurno (promedio \pm error estándar) de la diferencia de temperatura de hoja y el aire (dT). Las mediciones se realizaron los días 06 (a), 13 (b), 20 (c) y 26(d) de mayo y los días 2 (e) y 09 (f) de junio de 2016 correspondientes a 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra (DSS) respectivamente. Los tratamientos de control (C) y de restricción hídrica (S) se muestran en barra negra y blanca respectivamente (** $p < 0.01$, * $p < 0.05$ y $n.s. > 0.05$ no significativo)..... 28

Figura 15:	Diagrama de dispersión entre la diferencia de temperatura de la hoja y el aire (dT) y déficit de presión de vapor (VPD), en plantas en tratamiento de control (círculo negro) y de restricción hídrica (círculo blanco).....	30
Figura 16:	Comportamiento diurno de la temperatura de hoja (T_h) bajo tratamiento de control (C) y de restricción hídrica (S). Las mediciones de la temperatura del aire (T_a) y radiación neta (R_n) fueron realizadas los días 06 (a), 13 (b), 20 (c) y 26 (d) de mayo y los días 2 (e) y 9 (f) de junio de 2016, correspondiente a 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra (DSS) respectivamente.....	31
Figura 17:	Variación horaria de la diferencia de temperatura de hoja (medida con termocuplas) y el aire (dT), realizados los días 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra, bajo tratamiento de control (C) y de restricción hídrica (S). El rectángulo celeste corresponde al periodo donde ocurre las máximas dT en plantas en condición de restricción hídrica.....	32
Figura 18:	Comportamiento del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) a lo largo de la etapa de crecimiento, obtenidos para 12 parcelas en las cuales se testaron tres tratamientos de riego por goteo: T_1 capacidad de campo o control P_1, P_4, P_8 y P_{11} (a), T_2 con un g_{s_max} de $0.15 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en las parcelas P_2, P_6, P_9 y en P_{12} (b) y T_3 con un umbral de g_{s_max} de $0.05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en P_3, P_5, P_7 y P_{10} (c). L_r , láminas de riego aplicado y DDS, días después de la siembra.....	33
Figura 19:	Gráfico de dispersión de los valores promedio del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) con la conductancia estomática máxima (g_{s_max} , a), la discriminación de isótopos de carbono de tubérculos (Δ_{tuber} , b) y biomasa seca de tubérculo (BST, c) con su respectiva regresión lineal.....	35
Figura 20:	La biomasa promedio de tubérculo seco (\pm error estándar) en relación a la respuesta al control (T_1) y otros dos tratamientos de riego con umbrales de riego de valor promedio de conductancia estomática máxima de 0.15 (T_2) y 0.05 (T_3) $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Diferentes letras significan diferencias significativas (en $p < 0.05$) detectadas por ANOVA de una vía.....	36

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1: Fotos de evaluaciones de g_{s_max} con el equipo de medición de fotosíntesis portátil (LI-6400) (a) y el termómetro infrarrojo (DT-882, CEM) (b) en el experimento llevado a cabo en macetas en el laboratorio del CIP.....	49
ANEXO 2: Datos horarios promedios de temperatura del aire (T_a), humedad relativa (HR), radiación solar global (R_s) y déficit de presión de vapor (VPD) durante las evaluaciones de T_h y g_{s_max} correspondiente a los días 06 (a), 13 (b), 20 (c) y 26 (d) de mayo y los días 2 (e) y 9 (f) de junio de 2016 o 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra (DSS) respectivamente (primer ensayo). En gris el cambio más intenso durante el día en las condiciones meteorológicas.....	50
ANEXO 3: Condiciones meteorológicas reinantes (cada 5 minutos) correspondientes a las evaluaciones de T_h y g_{s_max} del primer experimento realizado el 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra (DDS). Temperatura del aire (T_a), déficit de presión de vapor (VPD), radiación solar (R_s) y velocidad del viento (V_v).....	52
ANEXO 4: Características técnicas de la cámara térmica (FLIR, E60) y del termómetro infrarrojo (CEM DT-8865) usados en los 2 experimentos realizados.....	53
ANEXO 5: Obtención de muestras superficiales de suelo en la parcela experimental (a) y su posterior análisis en el laboratorio (b y c) de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente – Departamento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina.....	54
ANEXO 6: Caracterización espacial del suelo superficial del campo experimental (Campo 2 del CIP), las muestras fueron extraídas el 30 de setiembre del 2016 y analizadas en el Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente – Departamento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina.....	55
ANEXO 7: Preparación del área inundada ($1.2 \times 1 \text{ m}^2$) y su cubrimiento con plástico (a), para la realización de una calicata de 0.5 m de profundidad (b) para la obtención de muestras de suelo en un cilindro muestreador para la evaluación	

	de las propiedades físicas del suelo (humedad volumétrica a capacidad de campo y densidad aparente) en los niveles de 0, 0.1, 0.25 y 0.4 m. en la parcela experimental.....	60
ANEXO 8:	Principales resultados obtenidos en el experimento de campo llevado a cabo entre octubre de 2016 a enero de 2017.....	61
ANEXO 9:	Adquisición de imágenes térmicas de follaje (a) y medición de la temperatura de follaje con el termómetro infrarrojo CEM DT-8865 (b), realizado en el campo experimental de la campaña entre octubre de 2016 a enero de 2017.....	75
ANEXO 10:	Prueba de uniformidad de presión y determinación de caudal de gotero del sistema de riego por goteo (a) y evaluación con el medidor de fotosíntesis portátil LI-6400 (b) en la parcela experimental de la campaña entre octubre de 2016 a enero de 2017.....	76
ANEXO 11:	Comunicación por correo electrónico (h.g.jones@dundee.ac.uk) sobre la estimación de T_s ($T_{dry} = T_a + 13$) y de la sensibilidad del CWSI con Hamlyn G. Jones, profesor Emérito de Ecología Vegetal de la División de Ciencias de las Plantas de la Universidad de Dundee (móvil: 07749 880650) y Profesor Adjunto de la Escuela de Agricultura y Medio Ambiente de la Universidad Western Australia.....	77
ANEXO 12:	Condiciones meteorológicas reinantes registradas por la estación meteorológica del CIP correspondiente al año 2016, 2017 y el periodo 2013-2017. Temperatura del aire (T_a), humedad relativa (HR) y déficit de presión de vapor máximo (VPD_{max}).....	78

LISTA DE ABREVIATURAS

- A_n : Fotosíntesis neta
- A_{Recup} : Recuperación de fotosíntesis neta
- CC : Capacidad de campo
- CIP : Centro Internacional de la Papa
- CWSI : Índice de estrés hídrico del cultivo
- DDS : Días después de la siembra
- T_h : Temperatura de hoja
- T_a : Temperatura del aire
- dT : Diferencia de temperatura de la hoja y el aire
- g_{s_max} : Conductancia estomática a luz saturada, máxima o a media mañana
- L_r : Lámina de riego
- PNIA : Programa Nacional de Innovación Agraria
- T_f : Temperatura del follaje
- $T_f - T_a$: Diferencia de temperatura de follaje y el aire
- T_s : Temperatura de superficie seca o de referencia de límite superior, donde la conductancia estomática es nula.
- T_{sh} : Temperatura de superficie húmeda o de línea de base no estresada de agua, donde implica conductancia estomática finita.
- VPD : Déficit de presión de vapor
- Δ_{hoja} : Discriminación de isótopos de carbono medido en hojas
- Δ_{tuber} : Discriminación de isótopos de carbono medido en tubérculos.
- Ψ_{Hoja} : Potencial hídrico de hoja
- Ψ_m : Potencial mátrico del suelo
- θ : Humedad volumétrica del suelo

RESUMEN

La implementación de técnicas de medición remotas como el uso de la radiometría infrarroja (termometría y termografía infrarroja) para la detección del cierre estomático como una medición del estatus hídrico de la planta con bajos déficit de presión de vapor (< 2 kPa) como la costa central del Perú, han sido discutidos en el presente estudio. Se llevaron a cabo dos experimentos, el primero realizado en macetas con el objetivo de identificar en qué momento del día la diferencia de temperatura de hoja y el aire (dT) y la conductancia estomática máxima a luz saturada (g_{s_max}) reflejan mejor el estatus hídrico de la planta. Dicho experimento se llevó a cabo en plantas bien regadas (capacidad de campo, CC) y bajo restricción hídrica (50% CC). El segundo experimento fue llevado en campo, donde se evaluó el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) con la metodología de la superficie de referencia y con el objetivo de establecer umbrales de riego. Se aplicaron tres tratamientos de riego: uno bajo condición de control (T_1 , CC) y otros dos con un umbral preestablecido de g_{s_max} ($0.15 [T_2]$ y $0.05 [T_3]$ mol H_2O $m^{-2} s^{-1}$). Se detectó una sensibilidad al cierre estomático con una caída de g_{s_max} ($g_{s\downarrow}$) provocado por la intensificación de las condiciones meteorológicas en horas de la mañana. El cierre estomático intenso causó un incremento de dT que mostró valores positivos más altos (> 2 °C) después de $g_{s\downarrow}$. La significativa reducción en el rendimiento de T_2 en relación al control (-38.2 ± 10.7 %) se recomienda usar valores de $g_{s_max} > 0.15$ para garantizar un buen rendimiento. Esta investigación, propone el umbral de 0.4 de CWSI para establecer el momento adecuado para el riego en papa con evaluaciones tomadas alrededor de las 14:00 horas, tiempo en que permite una detección apropiada de las emisiones térmicas.

Palabras clave: *Condiciones húmedas, conductancia estomática máxima, discriminación isotópica de carbono, índice de estrés hídrico del cultivo, sensoramiento termal, Solanum tuberosum.*

SUMMARY

The implementation of remote measurement techniques such as the use of infrared radiometry (infrared thermometry and thermography) for the detection of stomatal closure as a measure of the water status of the plant in an environment humid conditions with low vapor pressure deficit (< 2 kPa) the central coast of Perú, have been discussed in the present study. Two experiments were carried out, the first carried out in pots with the objective of identifying at which time of the day the leaf and air temperature difference (dT) and the maximum, saturated-light stomatal conductance (g_{s_max}) better reflects the water status of the plant. This experiment was carried out in well-watered plants (field capacity, CC) and under water restriction (50% CC). The second experiment was carried out in the field, where the crop water stress index (CWSI) was evaluated using the reference surface methodology with the objective of establishing irrigation thresholds. Three treatments were applied: one under control condition (T_1 , CC) and another two with a pre-established threshold of g_{s_max} ($0.15 [T_2]$ and $0.05 [T_3]$ mol $H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$). A sensitivity to stomatal closure was detected with a drop of g_{s_max} ($g_{s\downarrow}$) caused by the intensification of weather conditions in the morning hours. Intense stomatal closure caused an increase in dT that showed higher positive values ($> 2\ ^\circ C$) after $g_{s\downarrow}$. The significant reduction in the yield of T_2 in relation to the control ($-38.2 \pm 10.7\ %$) proposes to use values of $g_{s_max} > 0.15$ must be used to warrant a good yield. In the present study, the CWSI threshold 0.4 is proposed to establish the moment right for irrigation in potato with assessments taken around 2:00 pm, time in which it allows an appropriate detection of thermal emissions.

Key words: Carbon isotope discrimination, crop water stress index, humid conditions, infrared thermal, maximum stomatal conductance, Solanum tuberosum.

I. INTRODUCCIÓN

La papa es uno de los cultivos más importantes y ampliamente cultivados en el mundo (Harris, 1992), ocupa el cuarto lugar en la producción después de los cereales como el maíz, arroz y trigo (FAO, 2018). Este cultivo es considerado como sensible al déficit hídrico debido a su superficial sistema de raíces (Ahmadi et al., 2010). La determinación del estatus hídrico en este cultivo es por tanto una prioridad para llevar a cabo un adecuado manejo del agua y garantizar rendimientos óptimos (Monneveux et al., 2013; Ramírez et al., 2016a). Recientes estudios en papa (Ramírez et al., 2016a) remarcan que la conductancia estomática, asociada al cierre y apertura de los poros o estomas en las hojas constituye un apropiado descriptor del estatus hídrico. Por lo general, el estatus hídrico de la planta puede estar definido en términos del potencial hídrico y del contenido de agua en la planta (Kramer, 1988), siendo bien conocido la ausencia de este último como un factor limitante en el rendimiento de un cultivo (FAO, 2012; Kramer, 1983) y en especial en papa (Harris, 1992; Ramírez et al., 2016a, 2015, 2014; Rolando et al., 2015; van Loon, 1981; Yactayo et al., 2013). El cierre de los estomas es una manifestación de la planta a la limitación de agua a los tejidos (Jones, 2014) y tiene como consecuencia el incremento de temperatura de follaje (T_f) debido a la reducción en la disipación de energía (Jackson et al., 1981; Jones, 1999). Esta temperatura T_f es reconocida como un buen indicador del estatus hídrico del cultivo (Idso et al., 1981; Jackson et al., 1981; Jones, 2004a; Moller et al., 2006; Prashar et al., 2013) y además se ha encontrado tener una estrecha relación con diferentes variables ecofisiológicas, como el potencial hídrico de hoja (Cohen et al., 2005; Meron et al., 2010). Medrano et al. (2002) proponen a la conductancia estomática a luz saturada, máxima o a media mañana (g_{s_max}) como un parámetro de referencia para definir el estatus hídrico en plantas. Esta variable ha sido testada en el cultivo de papa siendo el valor de g_{s_max} de $0.05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ definido como un umbral de severidad fisiológica (Ramírez et al., 2016a). No obstante, dicha variable se mide a escala de hoja por lo que conlleva a una laboriosa medición en campo (Jones, 2004b) siendo necesario el análisis de otras variables relacionadas a la g_{s_max} que permita una inspección a una mayor escala.

La temperatura radiométrica del follaje estimada por termometría o termografía infrarroja, es obtenida a través de la medición de la radiación termal emitida por la superficie del follaje (Campbell y Norman, 1998) y proporcionan un medio remoto y portátil en la estimación de T_f (Jones, 2004a) a diferencia de las obtenidas convencionalmente con termocuplas. Estas técnicas de medición han sido muy usadas para la definición de índices de estrés hídrico en diferentes cultivos (Gómez-Bellot et al., 2015; Idso et al., 1981; Jones, 1999; Meron et al., 2010; Moller et al., 2006), incluyendo papa (Prashar et al., 2013; Ramírez et al., 2016b; Rud et al., 2014; Stark et al., 1991; Stark y Wright, 1985). Dentro de la familia de índices basados en temperatura radiométrica del follaje se encuentra el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI, del inglés Crop Water Stress Index) el cual ha sido implementado para regiones de climas áridos (Jones, 2004a, 1999). Ramírez et al. (2016a) sugieren valores superiores a 0.4 de CWSI para establecer el momento óptimo de riego en ambientes secos y despejados. Además, se ha reportado ampliamente una estrecha relación con la conductancia estomática (Moller et al., 2006; Ramírez et al., 2016a; Rud et al., 2014). No obstante, el CWSI evaluado con la metodología de las superficies de referencias presenta ventajas en ambientes húmedos (Jones, 1999), con bajos déficit de presión de vapor (VPD) como la costa central del Perú (SENAMHI, 2018). Por lo que se requiere llevar investigaciones para valorar y ajustar su medición a estas condiciones climáticas.

Hoy en día los diferentes métodos de monitoreo del estatus hídrico de la planta se basan principalmente en evaluaciones de las respuestas fisiológicas de la planta. La mayoría de estas técnicas requieren de labores muy intensas en las mediciones, de un personal especializado, son muy caros y sus mediciones son a nivel de hoja o rama de la planta (Jones, 2004b). El uso de la termometría o la termografía infrarroja se destacan como potentes herramientas para el monitoreo del estatus hídrico del cultivo en función de la temperatura de follaje (Stark et al., 1991), ya que pueden ser usados remotamente (sin necesidad de contacto), además tienen la capacidad de ampliar a extensas áreas de cultivos especialmente con imágenes (Rud et al., 2014). Estas herramientas poseen la capacidad de proporcionar detalles de la heterogeneidad de temperatura del cultivo y una ventaja de incorporar índices de estrés hídrico, el más difundido el CWSI. En el caso de termómetros infrarrojos son portátiles y de bajo costo, pudiendo ser de mucha utilidad a los agricultores para la toma de decisión del momento oportuno del riego de los campos agrícolas.

Con la finalidad de conocer el uso de la temperatura radiométrica del follaje como indicador del estatus hídrico del cultivo en papa para la aplicación de riego y bajo las condiciones ambientales de La Molina, se desarrollaron dos experimentos uno realizado en macetas y el otro en campo bajo los siguientes objetivos:

- Identificar en qué momento del día la diferencia de temperatura de hoja y el aire (dT) y la conductancia estomática máxima (g_{s_max}) reflejan mejor el estatus hídrico de la planta.
- Determinar umbrales de riego con el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Aspectos generales del cultivo de papa

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es una planta perteneciente a la familia de las solanáceas originaria de Sudamérica y específicamente de los Andes de Perú y Bolivia (Harris, 1992). Es una planta herbácea, tuberosa y de tallo grueso alcanzando una longitud de 0.9 a 1.2 m., de hojas compuestas por 5 pares de folíolos y de forma lanceolada en la variedad UNICA (Gutiérrez et al., 2007) como se muestra en la Figura 1. Este cultivo, es particularmente adecuada para climas fríos, requiere de 0.35 a 0.8 m³ de agua para producir 1 kg de materia seca de tubérculo o 350 a 650 mm de requerimiento hídrico durante su etapa de crecimiento (FAO, 2012). En la Figura 2, se muestra las diferentes etapas de crecimiento del cultivo de papa, indicando la curva de crecimiento vegetativo (desarrollo aéreo) y reproductivo (desarrollo de tubérculo).

Se estima que existen más de cuatro mil variedades de papas cultivadas en el mundo (CIP, 2016), siendo UNICA (código CIP N°392797.22) una variedad que fue seleccionada por el CIP (Centro Internacional de la Papa). La misma que tiene atributos de resistencia a virus, tolerancia al calor y con periodo vegetativo semi-precoz de 90 a 110 días después de la siembra para la costa (Gutiérrez et al., 2007).



Figura 1: Imágenes del tallo, hoja, tubérculo y flor de la papa variedad UNICA.

FUENTE: Gutiérrez et al. (2007).

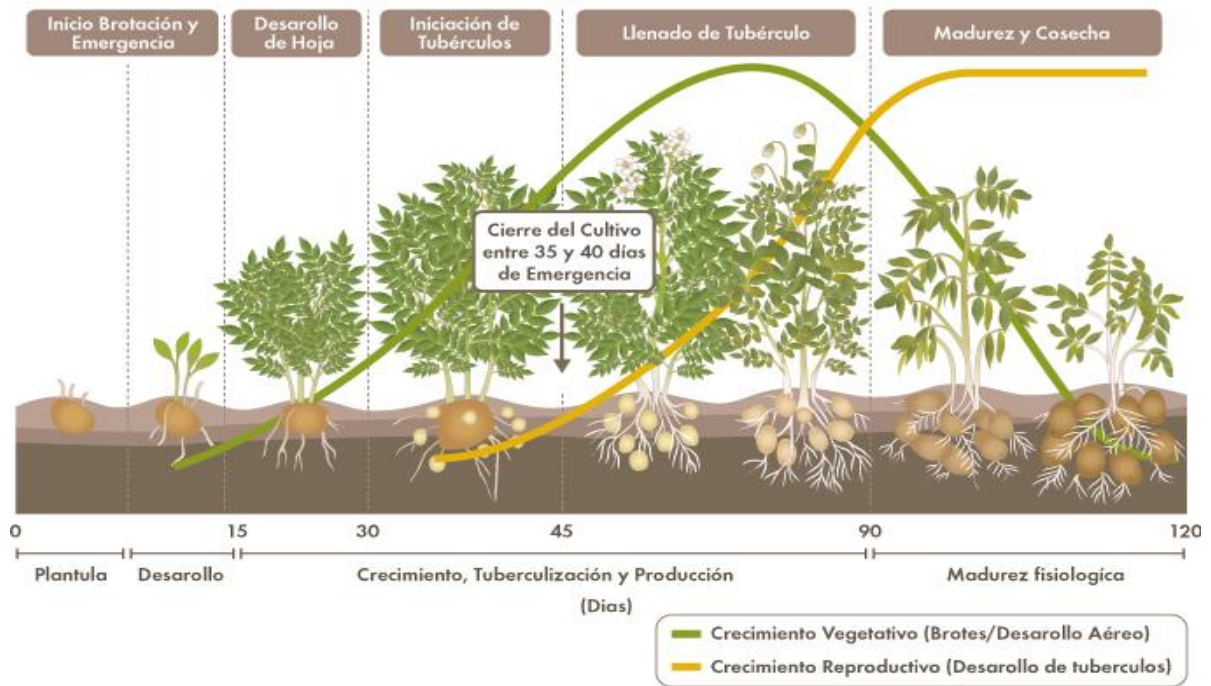


Figura 2: Etapa de crecimiento del cultivo de papa indicando la curva de crecimiento vegetativo (desarrollo aéreo) y reproductivo (desarrollo de tubérculo).
FUENTE: www.sqm.com/estudio/papa/.

2.2. Balance de energía y temperatura del follaje del cultivo

Para entender los términos más importantes del proceso para la obtención de T_f y la misma en la estimación del CWSI, se presenta resumidamente el principio de conservación de la energía a nivel de follaje (hoja). Este principio se basa en la primera ley de la termodinámica (conservación de la energía), la cual se basa en que la energía no se crea ni se destruye, solo cambia de una forma a otra. Aplicando esto al follaje puede expresarse como la diferencia entre todos los flujos de entrada y salida (Jackson et al., 1981):

$$R_n - G - H - \lambda E = 0 \quad (2.1)$$

Donde R_n es la radiación neta ($W m^{-2}$), G es el flujo de calor debajo de follaje ($W m^{-2}$), H es el flujo de calor sensible ($W m^{-2}$) del follaje al aire y λE es el flujo de calor latente ($W m^{-2}$) siendo λ el calor latente de vaporización ($J kg^{-1}$). Jones (2014) expresa H y E como:

$$H = \rho c_p (T_f - T_a) / r_a \quad (2.2)$$

$$\lambda E = (\rho c_p / \gamma) (e_f^* - e_a) / (r_a + r_f) \quad (2.3)$$

Donde ρ es la densidad del aire ($kg m^{-3}$), c_p es la capacidad calorífica específica del aire ($29.3 J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$), T_a la temperatura del aire ($^\circ C$), e_f^* es la presión de vapor de saturación a T_f , e_a es la presión de vapor (Pa), γ es la constante psicrométrica ($Pa ^\circ C^{-1}$), r_a es la

resistencia aerodinámica ($s\ m^{-1}$) y r_f es la resistencia del follaje ($s\ m^{-1}$) al transporte del vapor del agua (definida como la inversa de la conductancia).

De las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3) y asumiendo que G es despreciable (es 2 % de R_n para una cobertura densa) se obtiene:

$$T_f - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho c_p} \cdot \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_f}{r_a}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_f}{r_a}\right)} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_f}{r_a}\right)} \quad (2.4)$$

Donde Δ es la pendiente de la presión de vapor de saturación en $Pa\ ^\circ C^{-1}$:

$$\Delta = \frac{e_f^* - e_a}{T_f - T_a} \quad (2.5)$$

Y el término VPD es el déficit de presión de vapor:

$$VPD = e_a^* - e_a \quad (2.6)$$

La ecuación (2.4) puede ser expresada en ecuaciones más simples realizando algunas consideraciones, la primera cuando la resistencia del cultivo r_f se incrementa sin límites ($r_f \rightarrow \infty$, límite superior) la expresión resulta:

$$T_f - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho c_p} \quad (2.7)$$

y al contrario, si un cultivo se encuentra en óptimas condiciones hídricas, no opone resistencia al transporte de vapor de agua desde su interior, tendiendo prácticamente a cero ($r_f \rightarrow 0$, límite inferior):

$$T_f - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho c_p} \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma} \quad (2.8)$$

Las ecuaciones (2.4) y (2.8) describen una relación lineal entre la diferencia entre la temperatura de follaje y el aire ($T_f - T_a$) y el VPD. Idso (1982) encontró estas relaciones con datos experimentales en diferentes cultivos incluyendo papa. Además de la ecuación (2.4) se puede despejar y encontrar T_f considerando que el follaje es muy complejo, siendo compuesta por hojas, ramas, entre otros (Campbell y Norman, 1998). A esta temperatura que es producto de un balance de energía se conoce como temperatura aerodinámica (Norman y Becker, 1995). En la Figura 3 se observa el comportamiento de la temperatura de hoja en el tiempo comparado con la temperatura de una superficie referencial humedecida y las mediciones de radiómetro neto.

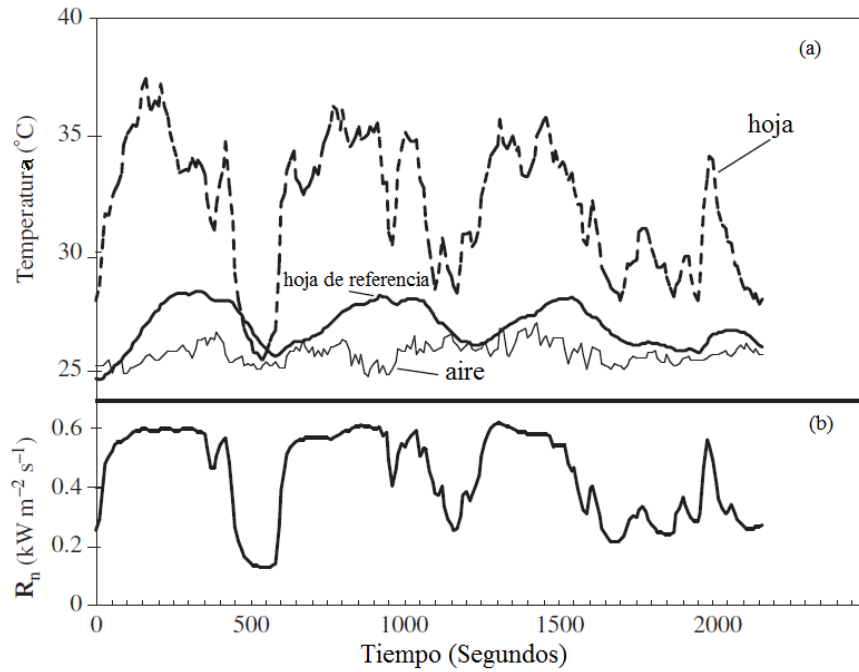


Figura 3: Variaciones de temperatura de una hoja en un campo de leguminosa (aproximadamente 30 cm²), junto con las variaciones de temperatura del aire y la temperatura de un cuerpo artificial con una superficie de referencia humedecida (aluminio cubierto con un papel filtro) (a) y las variaciones de radiación neta (b). FUENTE: Jones (2014).

2.3. Principio de medición de la temperatura radiométrica de follaje

La temperatura del follaje puede estar bien definida por la ecuación 2.4, llamada también temperatura aerodinámica la cual es muy difícil de medir (Campbell y Norman, 1998), sin embargo, puede ser fácilmente medida por la temperatura radiométrica. Esta última se basa en que todos los cuerpos emiten radiación termal (E_{obj}) en función de su temperatura. Se describe como la densidad de flujo radiante termal emitido por unidad de área (R) de una superficie y es equivalente a la suma de la radiación termal emitida (R_e) por el follaje y la radiación termal reflejada (R_r) debido a otros cuerpos calientes (Jones, 2004a), como:

$$R = R_r + R_e = (1 - \epsilon)\sigma T_{ref}^4 + \epsilon\sigma T^4 \quad (2.9)$$

Siendo T_{ref} es la temperatura efectiva (o aparente reflejada) de un cuerpo negro ($\epsilon = 1$, emisor perfecto), σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) y ϵ conocido como emisividad (valores entre 0 y 1) y es introducido para tener en cuenta superficies más reales que no son emisores perfectos de radiación termal. La Figura 4 muestra una representación esquemática de la medición de la temperatura radiométrica, indicando los principales factores que involucran.

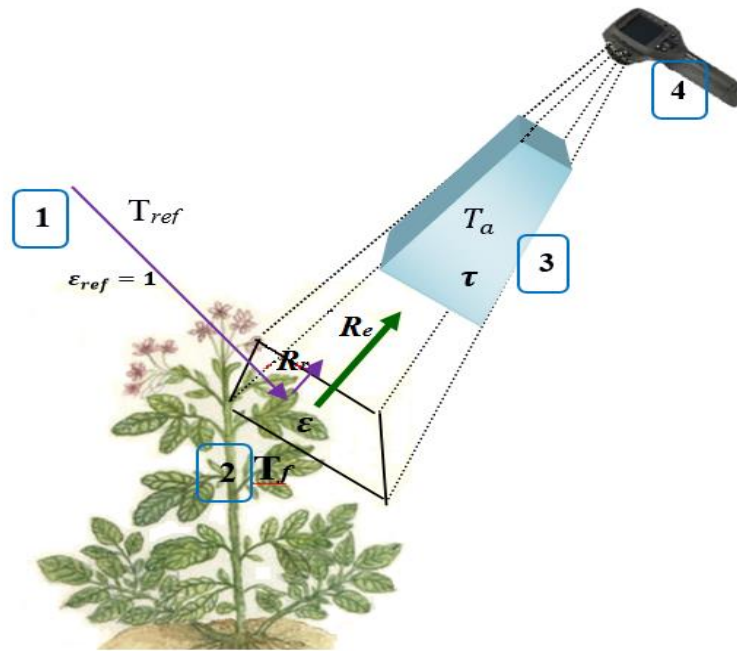


Figura 4: Representación esquemática de los principales factores que intervienen en la medición de la T_f con una cámara térmica (o con termómetro infrarrojo). 1: Entorno (cuerpos calientes), 2: Planta, 3: Atmósfera y 4: Cámara térmica. Donde T_{ref} es la temperatura aparente reflejada (determinada por una superficie de cartón), ϵ es la emisividad del cultivo, T_a es la temperatura del aire, T_f es la temperatura de follaje y τ es la transmisividad de la atmósfera. FUENTE: FLIR (2016).

Si R_r es despreciable se obtiene:

$$R = \epsilon\sigma T^4 \quad (2.10)$$

Por lo tanto, la estimación de temperatura radiométrica de una superficie T (en nuestro caso T_f) radica en la medición de R y al despejar T de la ecuación 2.9; como esta cantidad es muy pequeña es necesario sensores muy sensibles. Actualmente se dispone principalmente de sensores de tipo bolómetro que se basan en elementos sensibles que cambian su resistencia al detectar la energía termal (Jones, 2004a).

La radiación emitida por la superficie del follaje del cultivo es atenuada por la distancia al equipo de medición (d), y por las condiciones ambientales como la temperatura (T_a) y humedad relativa (HR) del aire, esta última muy relacionada a la transmisividad de la atmósfera (τ). Por lo que para medir T_f con mucha precisión y con este principio (sea por termometría o imágenes infrarrojas) se debe considerar las ya mencionadas líneas arriba y además compensar la ϵ y T_{ref} (FLIR, 2016).

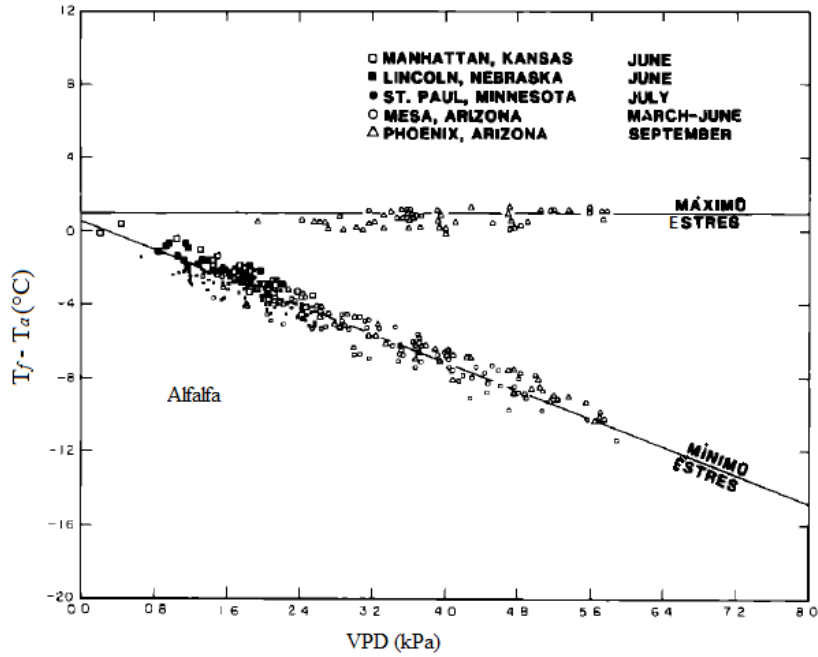


Figura 5: Relación entre $(T_f - T_a)$ y VPD para condiciones bien regadas y máximo estrés en variedad de alfalfa en diferentes ciudades de Estados Unidos. FUENTE: Idso et al. (1981).

2.4. Índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)

Es un índice normalizado bajo condiciones ambientales propuesto por Idso et al. (1981), está basado de la relación lineal entre el VPD y $T_f - T_a$ (Figura 5 y 6) y con la definición de dos umbrales de temperatura. Uno de dichos umbrales se obtiene bajo condiciones de cultivo bien regado (línea de base de no estrés hídrico) denominado T_{base} y el otro que se obtiene en condiciones de cultivo en estrés (límite superior, cuando los estomas están completamente cerrados) denominado T_{max} (Jones, 2014).

Teniendo en cuenta la Figura 6, este índice se puede expresar como el cociente entre el término “x” o $(T_f - T_{base})$ y el término “y” o $(T_{max} - T_{base})$, en la siguiente expresión:

$$CWSI = \frac{T_f - T_{base}}{T_{max} - T_{base}} \quad (2.11)$$

Encontrándose entre los valores de 0 a 1, cercano a 0 indica condición de no estrés hídrico y valores próximos a 1 condición de estrés hídrico del cultivo.

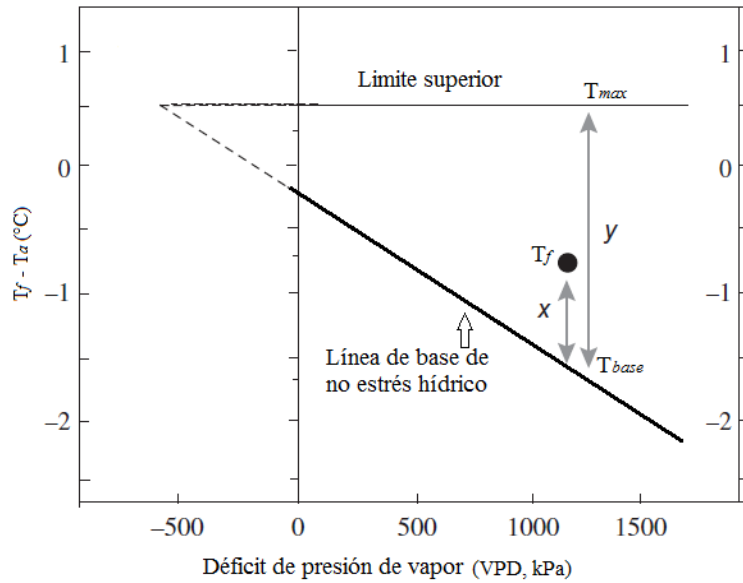


Figura 6: Esquema ilustrativo para la definición del CWSI (Índice de estrés hídrico del cultivo), obtenido de la razón entre los términos “x” e “y”, tal como fue propuesto por Idso. FUENTE: Jones (2014).

Jones (1999) reformula el CWSI para superficies de referencias, como una alternativa de “imitación” para superficies de referencia de hoja (seca y húmeda). En condiciones de cultivo bien regados (no estresada) y estresada, comparado con la superficie húmeda y seca respectivamente siendo:

$$I_{CWSI} = \frac{T_f - T_{sh}}{T_s - T_{sh}} \quad (2.12)$$

Donde T_{sh} es la temperatura de una superficie húmeda (T_{base} de Idso) y obtenida en hojas que han sido rociados con agua, cuya resistencia de la superficie al vapor de agua (r_h) resulta cero. Además, T_s es la temperatura de una superficie seca (T_{max} de Idso) y es obtenida cubriendo con vaselina (Petroleum Jelly), donde se simula que la transpiración de la hoja se ha detenido ($r_h = \infty$)(Jones, 2014). Además, Jones (1999) propone ecuaciones para estimar T_s y T_{sh} en función a los términos del balance de energía desarrollados en el ítem 2.2. Por otro lado, Moller et al. (2006) describen un método empírico para determinar T_{sh} con una superficie de referencia húmeda (bandeja húmeda), en tanto para encontrar T_s se ha propuesto en papa como 7°C sobre la temperatura del aire (Ramírez et al., 2016a; Rud et al., 2014). En el cuadro 1, se muestra las principales formas de calcular el CWSI.

Cuadro 1: Principales formas de estimación de las temperaturas umbrales (seca y húmeda) para la obtención del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) por los métodos empírico, estadístico y teórico.

Método	Temperatura seca (T_s)	Temperatura húmeda (T_h)
Empírico	Cubrir con vaselina a las hojas de las plantas ($r_h = \infty$). (Jones, 1999).	Rociado de agua a las hojas de las plantas ($r_h = 0$). (Jones, 1999) -Paño húmedo (Moller et al., 2006)
Estadístico	Promedio de valores superiores al percentil 95th. ($T_a + 7$ °C) y que cumpla con la relación de $T_a - 10$ °C < $T_f < T_a + 7$ en el caso del cultivo de papa (Rud et al., 2014). $T_a + 5$ °C: Uva, aceitunas, algodón (Moller et al., 2006). $T_a + 2$ °C: Ciruelo y $T_a + 4$ °C: Cítrico (Gonzalez-Dugo et al., 2014)	Promedio de los valores inferiores al 5% de la temperatura del follaje. (Rud et al., 2014)
Teórico	De la ecuación 2.7 ($T_s = T_f - T_a$) del balance de energía. (Jones, 1999)	De la ecuación 2.8 ($T_{sh} = T_f - T_a$) del balance de energía. (Jones, 1999)

2.5. Alcances ecofisiológicos para la determinación del estatus hídrico en el cultivo de papa.

Uno de los alcances más importantes de la Ecofisiología Vegetal, es que provee de técnicas mediciones muy precisas para entender los procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas bajo contraste del medioambiente (Percy et al., 1989; Reigosa et al., 2003). Es conocido que el estatus hídrico del cultivo en general, ha sido definido en términos del contenido de agua o del potencial hídrico (Kramer, 1988). Estando este contenido de agua en los tejidos muy relacionado con las reacciones bioquímicas en las células (Reigosa et al., 2003) y siendo reportado como una de las principales propiedades fisiológicas de las plantas (Jones, 2004). Por lo que las mediciones de las variables ecofisiológicas proporcionan una ventaja en la determinación del estatus hídrico.

El cierre prematuro de los estomas es considerado como un indicador temprano del desarrollo del estatus hídrico (Flexas et al., 2004; Kramer, 1988; Ramírez et al., 2016a) y se

ha propuesto a la conductancia estomática como la variable fisiológica de medición por excelencia, especialmente la conductancia en luz saturada, máxima o a media mañana (g_{s_max}) como el rasgo fisiológico más pertinente para caracterizar el estatus hídrico (Flexas et al., 2004; Medrano et al., 2002). Ramírez et al. (2016a) proponen un umbral de severidad de g_{s_max} $0.05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ durante la etapa temprana de desarrollo en papa. La recuperación de la fotosíntesis después del riego es otro de los descriptores fisiológicos que han sido propuestos para monitorear el estatus hídrico de cultivo (Flexas et al., 2004; Ramírez et al., 2016a). La recuperación de fotosíntesis promedio (A_{recup} , %) ha sido propuesto como la tasa de fotosíntesis neta promedio (A_n) con la fotosíntesis neta máxima promedio (A_{max}) obtenida en condición de control (Ramírez et al., 2015, 2016a), descrito por:

$$A_{recup} = \left(\frac{A_n}{A_{max}} \right) \times 100 \quad (2.13)$$

Por otro lado, se ha probado en papa que la discriminación de isótopos de carbono medido en tubérculo (Δ_{tuber}) y hoja (Δ_{hoja}) como un rasgo integrativo que refleja el balance del carbono fotosintético en el tiempo (Ramírez et al., 2015) constituye otra herramienta referente para la evaluación del estatus hídrico en este cultivo.

La desviación de las muestras de composición isotópicas ^{13}C de la referencia reportada ($\delta^{13}\text{C}$) con una precisión de $\pm 0.2 \text{ ‰}$.

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = \left(\frac{R_{muestra}}{R_{referencia}} - 1 \right) \times 1000 \quad (2.14)$$

Donde $R_{muestra}$ y $R_{referencia}$ son la tasa isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de la muestra y la referencia Pee Dee Belemnite standard (0.011237) respectivamente. La discriminación isotópica ^{13}C (Δ) fue calculada como:

$$\Delta (\text{‰}) = \left(\frac{\delta_{atm} - \delta_{muestra}}{1 + \delta_{muestra}} \right) \times 1000 \quad (2.15)$$

Donde: δ_{atm} y $\delta_{muestra}$ corresponde a los valores de $\delta^{13}\text{C}$ de la atmosfera (-8‰) y la muestra respectivamente.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del lugar de estudio

En este estudio se usó el cultivo de papa variedad UNICA y se llevaron a cabo dos experimentos. El primero fue realizado en macetas en el Laboratorio de Ecofisiología de cultivo y Modelación (CEM) y el segundo realizado en un campo experimental. Ambos ubicados en el Centro Internacional de la Papa (CIP), localizado en 12.08 °S, 76.95 °W y 244 m.s.n.m. en la costa central del Perú. Esta última, se caracteriza por un clima desértico árido-sub tropical, con presencia de cielo nuboso en otoño e invierno (nublado en las primeras horas y despejándose al mediodía) y escasa o nula precipitación, con una temperatura media anual de 18.5 °C (SENAMHI, 2018).

3.2. Condiciones experimentales y mediciones ecofisiológicas.

3.2.1. Experimento realizado en macetas

Veinte semillas de papa UNICA fueron sembradas el 8 de abril del 2016 en macetas de plástico con dimensiones de 0.25, 0.19, 0.2 m de diámetro superior, diámetro de la base y de altura respectivamente (capacidad de 6.4 L). Cada maceta fue abastecida aproximadamente con 6.5 kg, de una mezcla formada por arena y sustrato orgánico SOGEMIX (PRO-MIX, Premier Tech Horticulture, Canadá) en una proporción 2:1. Fue adicionado 500 g. en la labor cultural de aporque ocurrido a 21 días después de la siembra (DDS). Cada maceta fue fertilizada con 4.9 g, 2.1 ml y 12.5 g de NH_4NO_3 (31 %N), H_3PO_3 (53% P_2O_5) y KNO_3 (13% de N y 46% K_2O) respectivamente, distribuidos en 9 semanas. El control de plagas se llevó a cabo cada semana con un atomizador con 5 mL L^{-1} de aceite vegetal (AGRO OIL-EC Garden, Agrocol S.A., Colombia). Las macetas fueron regadas a capacidad de campo (CC) hasta 41 DDS (19 de mayo), a partir de aquí se agruparon en 2 tratamientos de régimen de riego (10 macetas por tratamiento, ver Figura 7), uno a CC (0.32 v v^{-1}) y otro a una reducción media de agua de 50 % CC.

Las macetas fueron pesadas a diario y repuesto el agua perdida por evapotranspiración, calculado gravimétricamente usando el protocolo de medición de Rolando et al. (2015). Para la obtención de la humedad gravimétrica (u) a CC, se saturó el sustrato en cada maceta. Posteriormente, se cubrió con plástico para evitar pérdida por evaporación y solo exista drenaje libre por gravedad durante tres días consecutivos. Se obtuvieron muestras de suelo (colocadas en una placa de Petri) de cada una de las macetas (W_{sh} , peso de suelo húmedo) y secado posteriormente en un horno microondas (Modelo CQ1570, Samsung, Tailandia) durante 5 minutos. Se pesaron estas muestras (W_{ss} , peso de suelo seco) y finalmente se determinó la humedad gravimétrica (u) con la siguiente relación:

$$u = \frac{(W_{sh} - W_{ss}) \times 100}{W_{ss}} \quad (3.1)$$

Con la ayuda de una estación meteorológica automática (HOBO U30, Onset Computer Corporation, Bourne, USA), se registraron cada 5 minutos la temperatura del aire (T_a), humedad relativa (HR), radiación solar (R_s), velocidad y dirección del viento (V_v). La cosecha fue llevada a cabo a los 88 DDS (5 de julio), en la cual todos los tubérculos fueron pesados por planta.



Figura 7: Imagen que muestra las macetas con plantas con tratamiento de control (capacidad de campo, CC) y de restricción hídrica (50 % CC).

3.2.2. Experimento realizado en campo

Llevado entre el 3 de octubre del 2016 al 16 de enero del 2017 en el campo experimental del CIP caracterizado por un suelo franco arenoso con 54, 29 y 17 % de arena, limo y arcilla respectivamente. Además, con un contenido de materia orgánica, u_{cc} , densidad aparente (ρ), pH y conductividad eléctrica de 1.03 %, 18.5 %, 1.5 g cm^{-3} , 7.4 y 2.8 dS m^{-1} respectivamente. Estos resultados fueron obtenidos del análisis de suelo en el Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente – Departamento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina (Anexo 5 y 6) y en el laboratorio CEM. Para obtener θ_{cc} y ρ , dos semanas antes de la fecha de siembra se realizaron dos calicatas con dimensiones de $1 \times 1.2 \text{ m}^2$ (Anexo 7), previamente saturadas con agua y cubierta con plástico durante 7 días. Se extrajeron muestras de suelo con cilindros muestreadores en los niveles de 0, 0.1, 0.25 y 0.4 m en dos perfiles de suelo por calicata, para ser luego rotulados y envueltos en papel aluminio. Se pesaron de inmediato las muestras para obtener el peso fresco y posteriormente fueron secadas a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 72 horas, con la finalidad de llevarlas a peso constante y calculadas según García (1992).

Cuadro 2: Características del campo experimental llevadas a cabo bajo riego por goteo, entre el 3 de octubre del 2016 al 16 de enero del 2017.

Característica del campo	
Tipo de riego	Goteo
Dimensiones	$19 \times 21.9 \text{ m}^2$
Número de parcelas	12
Número de plantas	720
Número de plantas por parcela	60
Dimensiones de parcela	$3.6 \times 5 \text{ m}^2$

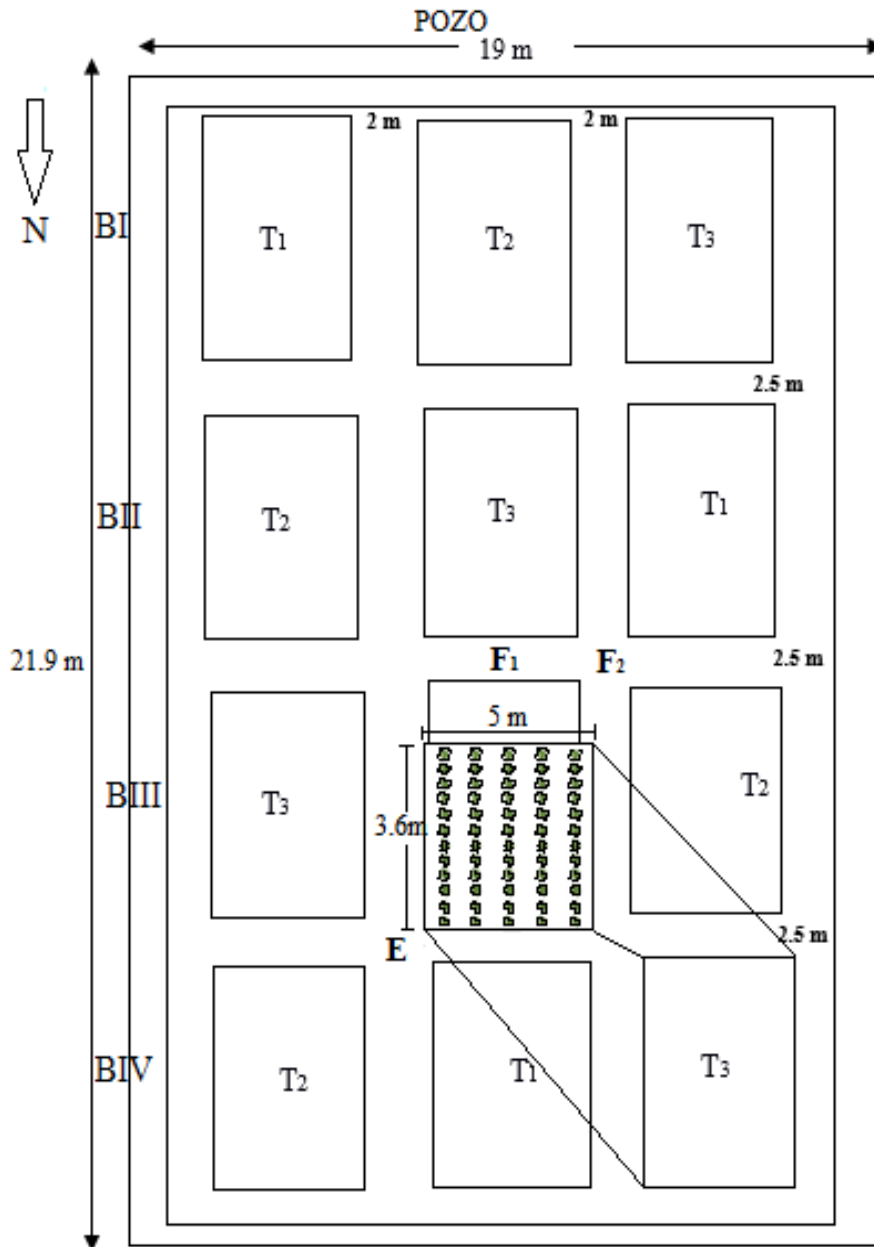


Figura 8: Diseño de la parcela experimental con un área de 416.1 m², donde se testaron tres tratamientos de riego distribuidos al azar y repetidos en cuatro bloques bajo sistema de riego por goteo. El primer tratamiento fue a capacidad de campo o control (T₁) y los otros dos bajo condición de restricción de agua con un umbral preestablecido de conductancia estomática máxima (g_{s_max}) de 0.15 y 0.050 mol H₂O m⁻² s⁻¹ para T₂ y T₃ respectivamente. Este experimento se llevó a cabo entre 3 de octubre del 2016 al 16 de enero del 2017. E, es la ubicación de la estación meteorológica y F₁ y F₂ son las estaciones de monitoreo de temperatura del aire, radiación neta, temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco.

El diseño experimental fue por bloques completamente al azar, en un área total de 416.1 m² (Figura 8) la cual fue dividida en 12 parcelas (3.6x5 m² cada una) distribuidos al azar en 4 bloques (Cuadro 2). Los tres tratamientos de riego consistieron en: riego a capacidad de campo (control, T₁) con un equivalente en potencial mátrico del suelo (Ψ_m) superior a -35 kPa aproximadamente, medido con tensiómetros (model R, Irrrometer Company Inc., Calif., USA) y colocados a 0.3 m de profundidad. Los otros dos tratamientos a cada una de las parcelas fueron regados en base a g_{s_max} manteniéndola a valores inferiores de 0.15 (T₂) y 0.05 (T₃) mol H₂O m⁻² s⁻¹. Para esto, g_{s_max} fue monitoreado 3 a 4 veces por semana en cada una de las parcelas, en 4 plantas centrales entre las 7:00 y 9:00 h siguiendo el protocolo de medición usado por Rolando et al. (2015). Los parámetros que se fijaron en el equipo fueron de 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de radiación fotosintéticamente activa (PAR) de saturación de luz (medido para esta estación a través de curvas de luz), 400 ppm de CO₂, conductancia de capa límite de 9.29 mol m⁻² s⁻¹ y tasa de flujo de aire de 300 $\mu\text{mol s}^{-1}$. Una vez definido el momento de riego para cualquier parcela, se regó usando un sistema de riego por goteo. Para ello se extrajeron 4 muestras aleatorias por parcela de hasta 0 - 0.3 m de profundidad (Z) con un muestreador sacabocado. Estas muestras fueron pesadas de inmediato para obtener peso fresco (W_{sh}) y luego fueron secadas (W_{ss}) en un horno microonda (Modelo CQ1570, Samsung, Thailandia) en un tiempo de 25 min y con ello determinar la humedad gravimétrica (u) de acuerdo a la ecuación 3.1. Se determinó la humedad volumétrica del suelo (θ) usando la relación $\theta = \rho \cdot u$ y el tiempo de riego (T_r) por parcela:

$$T_r = \frac{V_{sr} \times (\theta_{cc} - \theta)}{Q_s} \quad (3.2)$$

Donde:

V_{sr} : Es el volumen de suelo a regar por surco (ver Figura 9), obtenido de $A \times Z \times L$ (A es el ancho del surco a regar, igual a la distancia entre cintas de riego fijadas a 0.35 m, Z es la profundidad de la zona radicular variable según la etapa de desarrollo del cultivo y L es la longitud de surco de 4.5 m).

θ_{cc} : Determinado 2 semanas antes de la siembra, resultando 27.5 %

Q_s : Es el caudal de riego por surco, resulta de multiplicar el caudal de gotero (1.32 L hr⁻¹) con el número de goteros por surco (40) como se muestra en el Anexo 10a.

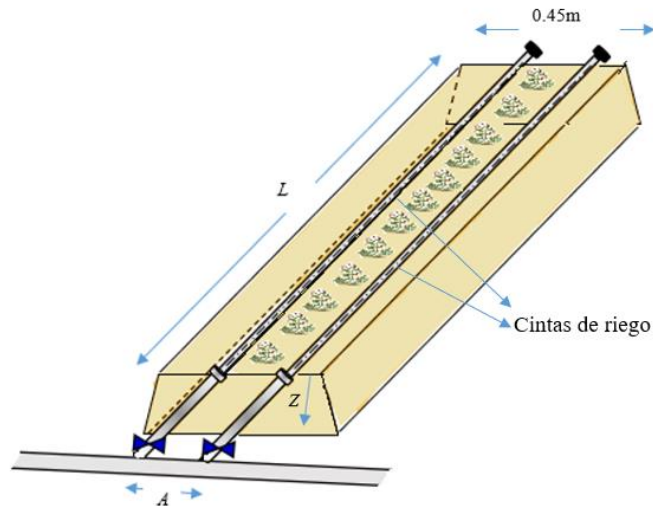


Figura 9: Dimensiones del volumen de suelo regado por surco en el sistema de riego por goteo, con A (0.35 m) x L (4.5 m) x Z . Donde A ancho del surco a regar y L es la longitud de surco. Z es la profundidad del sistema radicular del cultivo.

Siete riegos por surco fueron realizados en los primeros 30 días después de la siembra (0, 4, 7, 11, 17, 22 y 30 DDS) con una lámina de riego por parcela de 78.7 mm cada uno aproximadamente. Posteriormente fue instalado un sistema de riego por goteo independientemente por parcela, con 2 cintas de goteo por surco distanciado 0.35 m. El espaciado entre goteros, caudal de gotero y presión fueron de 0.2 m, 1.32 L h⁻¹ y 0.5 MPa respectivamente, la presión del agua fue suministrada por una bomba (1hp, Venus 33M, ESPA, España) conectada a un tanque de 5000 L de capacidad. La dosis de fertilización consistió de 180:120:160 kg ha⁻¹ de N:P₂O₅:K₂O usando NH₄NO₃, (NH₄)₂HPO₄ y K₂SO₄ de fertilizante aplicado en la siembra y en el aporque ocurrido a los 30 DDS. El control de plagas y enfermedades fue incorporado en un programa de manejo integrado de plagas que incluye la rotación de productos con diferentes mecanismos de acción, tales como: Movento (Bayer AG, Monheim am Rhein, Alemania), Vertimec (Syngenta Crop Protección AG, Basilea, Suiza) y Evisetc-S (Arysta Life Science, USA). Estos, fueron rotados semanalmente entre los 15 a 45 DDS, usando una dosis de 0.5 L ha⁻¹, 0.5 L ha⁻¹ y 600 g ha⁻¹ respectivamente.

Las evaluaciones de las variables del estatus hídrico de la planta fueron realizadas el 37, 43, 51, 57, 64, 71 y 78 DDS en 4 plantas ubicadas en el centro de cada parcela realizados entre las 7:00 a 10:00 am. Se midió $g_{s,max}$ y fotosíntesis neta (A_n) con un Sistema de Fotosíntesis Portátil (LI-6400XT, LI-COR, USA) de manera similar al usado en el monitoreo. Se evaluó

la recuperación de fotosíntesis (A_{recup}) a través de A_n en -1, 1, 4 y 7 días desde la aplicación del riego y calculados según ecuación 2.13. Un A_n máximo (A_{max}) en promedio de $36.3 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, fue encontrado.

Se midió el potencial hídrico de hoja (Ψ_{Hoja}), con una cámara de presión (Modelo 80325, Labconco, Kansas, USA) siguiendo el procedimiento de Byrd et al. (2014). Para ello, 4 hojas por parcela fueron encerradas con bolsas plásticas negras 1 hora antes de la medición. Con las muestras de hojas extraídas para la medición de Ψ_{Hoja} , se guardaron y se utilizaron para el análisis de isotopos estables de carbono en hojas (Δ_{hoja}). Para dicho fin, fueron secadas las muestras de hojas por parcela a 60°C durante 4 días y molidas con un molino de bolas (BMIX-100, MRC, Israel), posteriormente se empaquetaron en cápsulas de estaño entre 15 a 20 mg (Ramírez et al., 2015, 2016a) y enviadas al Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad California-Davis para el análisis de discriminación isotópica de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$). En la etapa de cosecha final similarmente se prepararon 4 muestras de tubérculos entre 28 a 30 mg por parcela y enviadas para el análisis de isotopos estables de carbono de tubérculo (Δ_{tuber}). Δ_{hoja} y Δ_{tuber} fueron calculadas según la ecuación 2.15 donde δ_{muestra} es la $\delta^{13}\text{C}$ de la muestra que nos proporciona el laboratorio.



Figura 10: Imagen que muestra las parcelas regadas con el sistema de riego por goteo del experimento realizado en campo.

Se instaló dos estaciones de monitoreo de temperatura de hoja (T_h) F_1 y F_2 , implementadas con una plataforma colectora de datos CR1000 y CR800 respectivamente, de la marca Campbell Scientific (USA) (ver Figura 8). La misma, que se configuró con un tiempo de registro de cada 5 minutos, especificados de la siguiente manera: En F_1 y F_2 se midió la temperatura de hoja con 4 termocuplas cada una (TT-T-36, OMEGA, UK) en una hoja por planta correspondiente a la parcela BIIT₁ y BIIT₃ respectivamente, instaladas en el foliolo terminal de la tercera hoja desde ápice, expandida y expuesta al sol. En F_1 registró también radiación neta (NR-LITE2, Keep&Zonen, Alemania) colocada a 0.5 m sobre el nivel del follaje del cultivo. También se midió temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo, preparados en base a termistores (NTC, ver ecuaciones de calibración en Anexo 8.1) e instalados en una caseta meteorológica a 1.5 m sobre la superficie del suelo.

Se evaluó el comportamiento temporal correspondiente a los días de medición de las variables fisiológicas g_{s_max} , Δ_{tuber} y Ψ_{Hoja} en cada uno de los tratamientos y teniendo como referencia las mediciones en el tratamiento de control.

La temperatura del aire (T_a), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (V_v), se registraron a través de la estación meteorológica (HOBO U12, Onset Computer Corporation, Bourne, MA, USA) a un 1.5 m sobre el nivel del suelo. Dicha estación fue ubicada en el centro del campo experimental (ver Figura 10) con un registro de cada 5 minutos.

3.3. Métodos

3.3.1 Identificación en qué momento del día la diferencia de temperatura de hoja y el aire (dT) y la conductancia estomática máxima (g_{s_max}) reflejan mejor el estatus hídrico de la planta.

La diferencia entre la temperatura de hoja y la temperatura del aire (dT), fue calculada en base a las mediciones de temperatura de hoja (T_h) y la temperatura del aire registrada en la estación meteorológica instalada en campo. Las mediciones de temperatura de hoja (T_h) fueron realizadas a los 28, 35, 42, 48, 55 y 62 DDS, cada dos horas entre las 6:00 a.m. y 6:00 p.m. Siendo, T_h medida en una hoja joven, expandida y expuesta al sol con un termómetro infrarrojo (Modelo DT-882, CEM, China) con una emisividad fija de 0.95 (más detalles en Anexo 4), a 0.1 m de distancia perpendicular a la superficie de la hoja y siguiendo las recomendaciones de Gardner et al. (1992). Además, dT ha sido reconocido como un índice de estrés hídrico del cultivo que depende de las condiciones medioambientales como el déficit de presión de vapor principalmente (Idso, 1981; Jackson et al., 1977; Stark et al., 1991; Jones, 1999) y donde un incremento significativo de dT es un indicativo del cierre estomático y del estrés hídrico de la planta (Jones, 2004b). También, fue medida la conductancia estomática en luz saturada o máxima (g_{s_max}) inmediatamente después de T_h y en el foliolo terminal de la misma hoja elegida para T_h (Anexo 1) con un Sistema de Fotosíntesis Portátil (LI-6400XT, LI-COR, USA). Los parámetros fijados en la cámara del equipo se basaron según Rolando et al. (2015) y fueron de $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de radiación fotosintéticamente activa de luz de saturación, 400 ppm de concentración de CO_2 , conductancia de la capa límite de $9.3 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y déficit de presión de vapor de 1.1 - 1.3 kPa.

La identificación en qué momento del día dT y g_{s_max} reflejan mejor el estatus hídrico en el cultivo de papa bajo las condiciones meteorológicas reinantes fueron analizados; en el caso de dT fue identificado después de un incremento significativo y en el caso de g_{s_max} antes de una disminución. Además, se aplicó la prueba de T pareada (usada para variables que pertenecen a un mismo individuo), con la finalidad de evaluar si el promedio de las diferencias en dT y g_{s_max} medidas en el tiempo en plantas de control y de restricción hídrica fueron significativamente diferente de cero y evaluadas con un nivel de significancia $p < 0.05$.

En este experimento, también se realizaron mediciones continuas de temperatura de hoja con 6 termocuplas (TT-T-36, OMEGA, UK), considerando 3 de ellas en plantas con tratamiento de control y 3 en restricción hídrica (un foliolo por planta) con la finalidad de conocer su comportamiento de T_h a lo largo de todo el día y sirva de soporte a los resultados encontrados con las mediciones con el termómetro infrarrojo. Además, fueron instaladas en condiciones similares a las medidas en g_{s_max} y adheridas con pedazos de cinta adhesiva (“masking tape”), siguiendo las sugerencias de Pearcy et al. (1989). Estos datos se registraron cada minuto en una plataforma colectora de datos (CR 1000, Campbell, USA) conjuntamente con las lecturas de un radiómetro neto (NR-LI2, Kipp & Zonen, Holanda). Por último, dT fue relacionado con el déficit de presión de vapor (VPD), este último calculado con los datos de la estación meteorológica según Allen et al. (2006).

3.3.2. Determinación de umbrales de riego con el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI).

El índice de estrés del cultivo (CWSI) fue calculado por el método empírico de superficie de referencia (Maes et al., 2016; Meron et al., 2010; Moller et al., 2006b; Ramírez et al., 2016b; Rud et al., 2014) y en base a la temperatura radiométrica del follaje (T_f) obtenida por imágenes térmicas por parcela (Ver Anexo 9a). Para ello, en 4 plantas localizadas en el centro de cada parcela entre las 10 a.m. y 2 p.m. (después de las mediciones de g_{s_max}) fueron tomadas las imágenes térmicas con una cámara FLIR (E60, FLIR Systems Inc., USA). Con características de un campo de visión de 25°, resolución de 320x240 pixeles de sensores microbolómetros, rango espectral de 7.5 – 15 μm y una cámara visible integrada de 3.1 Mpixeles (más detalles en Anexo 4).

La cámara térmica fue configurada con una emisividad (ϵ) de 0.96, una temperatura aparente reflejada de cartón (T_{ref}) medida cada 6 imágenes usando el método directo según FLIR (2016) y tomada a 3 m de distancia del cultivo en una posición opuesta al sol (Jones et al., 2009; Kirkham, 2014). También se configuró los parámetros meteorológicos, como la temperatura del aire y la humedad relativa registrada por la estación meteorológica automática HOBO instalada en campo.

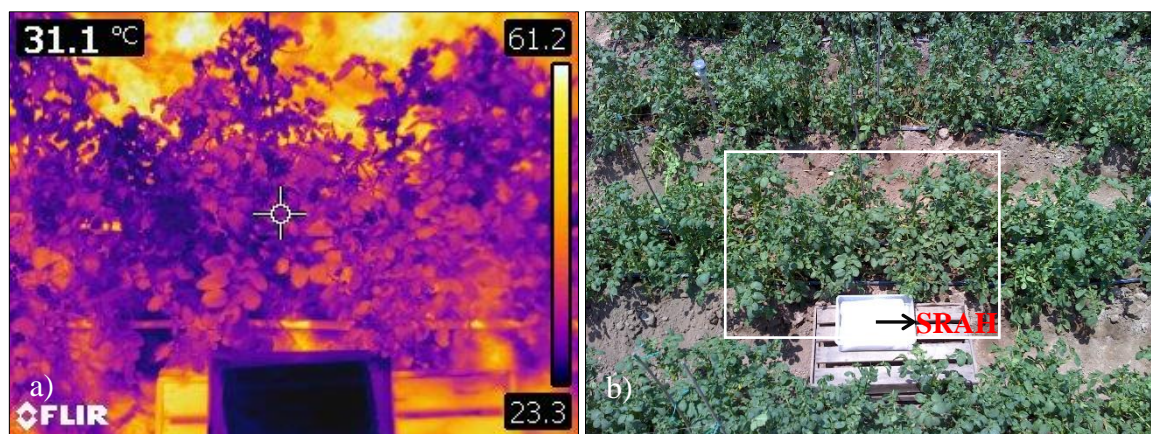


Figura 11: Imagen térmica (a) y visible (b) tomada en campo de cultivo de papa, en el segundo experimento. SRAH es la superficie de referencia artificial húmeda.

Con la finalidad de determinar la temperatura de follaje, se procesaron las imágenes térmicas y visibles (Figura 11) con un programa automatizado de alineación de estas imágenes implementado en Matlab (R2012a, Mathworks Inc., USA) por la División de Intensificación de Sistemas de Cultivos y Cambio Climático del CIP. Una transformación de matrices fue aplicada a la imagen visible (móvil) y a la imagen térmica de referencia fija en un proceso de optimización basado en la intensidad en las escalas de grises para encontrar su similitud (máscara) y coordenadas de origen común. La alineación de estas imágenes fue realizada con las funciones *imregconfig* y *imregister*, donde la imagen alineada fue convertida a una imagen binaria con el umbral lógico de 1 (negro) para el follaje y el resto cero (blanco), con la primera se obtuvo la máscara de follaje para obtener T_f de cada imagen. El CWSI fue determinado usando la ecuación 2.12 (Figura 12), donde T_{sh} es la temperatura medida de una superficie de referencia artificial húmeda (SRAH) obtenida de cada imagen con el software FLIR Tools (Versión 6.3, FLIR Systems). T_s fue de 13 °C por encima de la temperatura del aire, propuesto en este experimento y obtenido de las máximas diferencias de dT en plantas en restricción de agua (Anexo 8.11b, Anexo 11). La SRAH fue construida según Moller et al. (2006), con una tela blanca doblada de algodón de 1 mm de espesor usada como material absorbente, que envuelve a un pedazo de poliestireno (“tecnopor”) que flota en una bandeja con agua de $0.32 \times 0.22 \times 0.10 \text{ m}^3$ (Figura 11b). También, se encontró la relación entre $(T_f - T_a)$ con el VPD en parcelas bien regadas (T_1) y en estrés severo (T_3), el VPD fue considerado como el promedio de los valores instantáneos y calculados según Allen et al. (2006), en base a los sensores de temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}) y seco (T_{bs}) instalados según ítem 3.2.2.

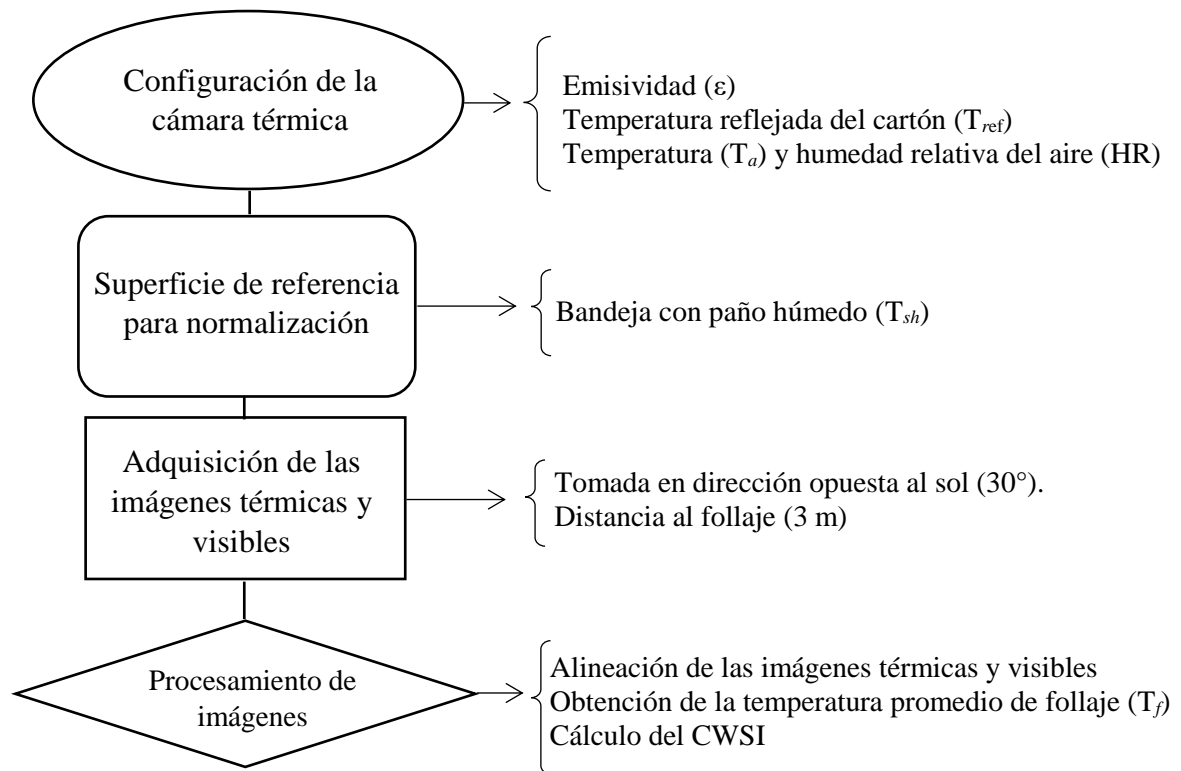


Figura 12: Diagrama ilustrativo del proceso de adquisición y procesamiento de imágenes térmicas y visibles, para la obtención de la temperatura radiométrica promedio del follaje (T_f) y del cálculo del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI).

La determinación de umbrales de riego con el CWSI se realizó relacionando linealmente las principales variables ecofisiológicas, como el g_{s_max} , Δ_{tuber} y el rendimiento de biomasa seca de tubérculo (BST) usando el programa Sigmaplot (Versión 11.0, Systat Software INC., Alemania) correspondientes a todos los tratamientos de restricción hídrica. Un ANOVA de una vía fue usado para comparar el BST entre cada uno de los tratamientos, usando el programa RStudio (v.1.1.383, RStudio Inc.).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Momento del día donde la diferencia de temperatura de hoja y el aire (dT) y la conductancia estomática máxima (g_{s_max}) reflejan mejor el estatus hídrico de cultivo.

Los valores máximos de g_{s_max} observados en la Figura 13, oscilaron entre 0.11 - 0.34 y 0.08 - 0.29 mol de H₂O m⁻² s⁻¹ correspondientes a las plantas de control y de restricción hídrica respectivamente, medidas entre las 7:00 y 11:00 h (valores más significativos). A excepción del 13 de mayo (Figura 13b) donde muestra valores muy altos de g_{s_max} en condición de control, probablemente las condiciones atmosféricas muy húmedas de ese día hayan ocasionado fallas en el equipo. Por otro lado, un momento antes del mediodía, que en lo sucesivo se denominará como caída brusca de la conductancia estomática ($g_s \downarrow$), se observó un incremento de radiación global (R_s) y el VPD con valores $> 300 \text{ W m}^{-2}$ y $\geq 0.5 \text{ kPa}$, respectivamente (Anexo 2 y 3). Asimismo, las máximas diferencias significativas en promedio de g_{s_max} entre ambos tratamientos de restricción hídrica ocurrieron principalmente entre las 7:00 a 8:00 h en la mayoría de las evaluaciones, excepto el 9 de junio (62 DDS) donde hubo una diferencia importante justo antes del mediodía. También se puede decir, que la $g_s \downarrow$ está influenciada por el cambio de las condiciones de cielo nublado a despejado observado en la mayoría, con un VPD y R_s superiores a 0.5 kPa y 500 W m⁻² principalmente (Anexo 3).

En efecto, un componente de alta radiación difusa, causada por la presencia de nubes o contenido de aerosoles en la atmósfera, induce un incremento en la eficiencia de asimilación de carbono en las plantas (Bunce, 1984) promoviendo un aumento en la productividad del ecosistema terrestre (Huang et al., 2014). En un estudio reciente, Quiroz et al. (2017) reportan los mayores valores de eficiencia de uso de la luz de 5.4 g MJ⁻¹, mostrando mayor respuesta de este cultivo en un ambiente con elevada nubosidad. También Huang et al., (2014) encontraron valores entre 0 – 2 g MJ⁻¹ incrementándose significativamente con el aumento de la radiación difusa y destacándose la alta capacidad de la papa para optimizar la asimilación de carbono (A_c) (Haverkot y Struik, 2015).

Así también en el mismo ecosistema, y después de evaluar A_c máximo (altamente correlacionado con g_{s_max} , Ramírez et al., 2016a) a lo largo del día, Ramírez et al. (2016b) reportan un pico en el intercambio de gases a primera hora de la mañana con una importante reducción al mediodía que concuerda con otros estudios en papa (Dwelle et al., 1981).

La papa ha sido tipificada como un cultivo isohídrico (Obidiegwu et al., 2015; Topbjerg et al., 2015) debido a su disminución del potencial hídrico del suelo y de la conductancia estomática g_s (Vos y Oyarzún, 1987), manteniendo el potencial hídrico de hoja a similares valores en condiciones no estresadas mediante la mediación de la hormona ácido abscísico (Liu et al., 2005). Una fuerte característica al cierre estomático (disminución de g_s), reportada para ambientes despejados, ha sido utilizada como propuesta en este cultivo para el monitoreo de hoja comúnmente medido al amanecer (Byrd et al., 2014; Zakaluk y Sri Ranjan, 2008, 2007) o el potencial hídrico de la rama al mediodía (o cerca de este momento). Sin embargo, en ambientes húmedos con bajo VPD, el cierre estomático máximo durante el día depende principalmente de los incrementos de radiación y VPD, (Anexo 2 y 3). La intensidad de la relación inversa entre la conductancia estomática y el VPD varía entre diferentes especies de plantas (Jones, 2014; Turner et al., 1984). En ambientes con VPD bajo, se ha reportado que la sensibilidad del cierre estomático se incrementa cuando el VPD aumenta (Cunningham, 2004), coherente con este hallazgo, los resultados que se muestran en este estudio sugieren que en ambientes con VPD bajo (rango 0.1-1.2 kPa para esta estación del año, Anexo 2 y 3) la papa presenta una aguda sensibilidad al cierre estomático a incrementos en esta variable, así como a la radiación. En este tipo de entornos, la evaluación de g_{s_max} durante las primeras horas de la mañana antes de $g_s \downarrow$ o del cambio de condiciones de cielo nublado a despejado, facilita la detección de diferencias entre tratamientos bajo restricción hídrica en papa, por lo que se recomienda este momento para su evaluación. Durante este experimento el promedio de T_a , HR y R_s fueron de 19.3 ± 0.24 °C, 83.2 ± 0.58 % y 12.9 ± 0.54 MJ m⁻² dia⁻¹ respectivamente.

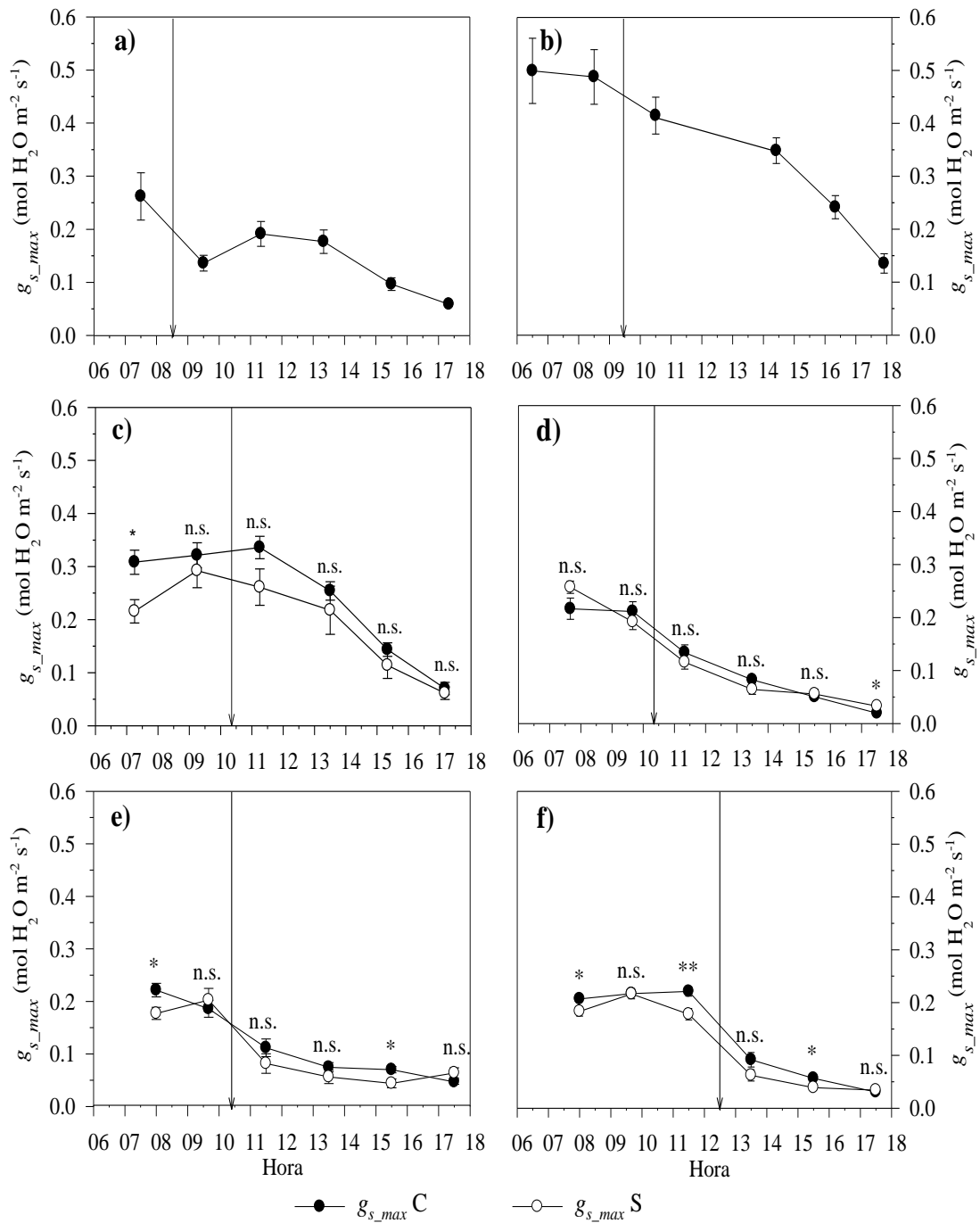


Figura 13: Comportamiento diurno (promedio y error estándar) de la conductancia estomática en luz saturada o máxima (g_{s_max}). Las mediciones fueron realizadas los días 6 (a), 13 (b), 20 (c) y 26 (d) de mayo y días 2 (e) y 9 (f) de junio de 2016, correspondiente a 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra (DSS) respectivamente. Los tratamientos de control (C) y de restricción hídrica (S) están representados en círculo negro y blanco respectivamente (** $p < 0.01$, * $p < 0.05$ y $n.s. > 0.05$ no significativo).

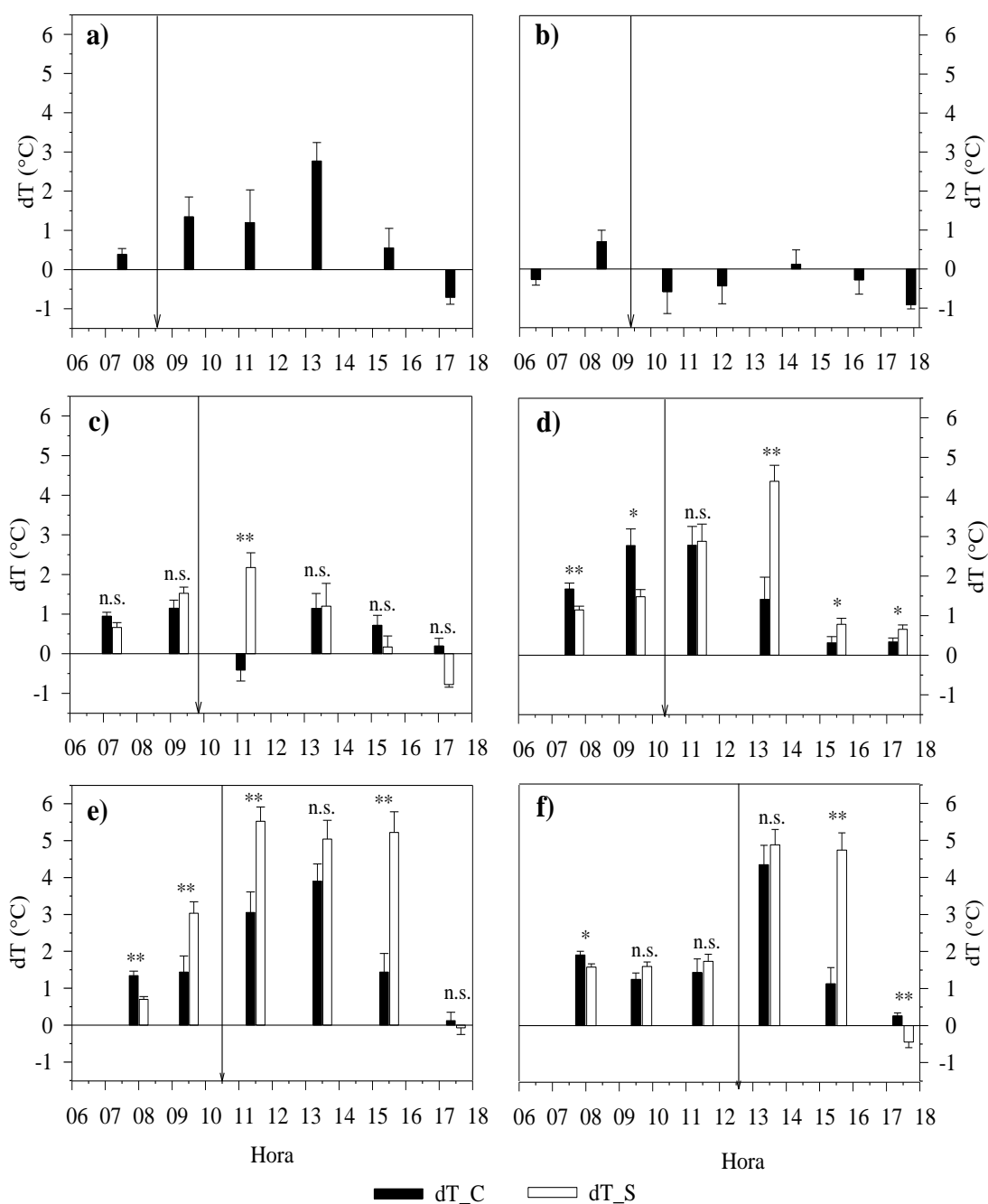


Figura 14: Comportamiento diurno (promedio \pm error estándar) de la diferencia de temperatura de hoja y el aire (dT). Las mediciones se realizaron los días 06 (a), 13 (b), 20 (c) y 26 (d) de mayo y los días 2 (e) y 09 (f) de junio de 2016 correspondientes a 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra (DSS) respectivamente. Los tratamientos de control (C) y de restricción hídrica (S) se muestran en barra negra y blanca respectivamente (** $p < 0.01$, * $p < 0.05$ y $n.s. > 0.05$ no significativo).

Por otro lado, después de $g_s \downarrow$, dT tomó valores máximos (rango entre 0.3 - 4.3 y 0.8 - 5.5 °C correspondientes a plantas de control y de restricción hídrica respectivamente) entre las 11:00 - 16:00 h (Figura 14). Además, las máximas diferencias significativas de dT entre ambos tratamientos fueron observadas principalmente entre las 11:00 y 16:00 h (Figura 14), excepto una diferencia importante durante las primeras horas de medición a los 55 DDS (Figura 14e). Los valores más altos registrados para dT mostraron una relación lineal inversa con g_{s_max} consideradas hasta las 16:00 h (los valores posteriores no se consideraron por ser muy pequeños), ajustándose la siguiente función: $g_{s_max} = -0.062dT + 0.333$ ($R^2 = 0.60$). Además, se ha reportado en otros estudios que dT se caracteriza por presentar valores negativos en plantas bien regadas, mostrando una correlación negativa con los incrementos de VPD en algunos cultivos (Amani et al., 1996; Idso, 1982; Idso et al., 1981; Sepaskhah y Ilampour, 1996; Sezen et al., 2014) incluyendo en papa (Stark y Wright, 1985). La relación entre dT y VPD en este estudio fue positiva (Figura 15), ajustándose una función lineal de $dT = 2.30 VPD + 0.64$ a diferencia de lo encontrado por Idso (1982) y Erdem et al. (2010) en papa de $dT = -1.8 VPD + 1.17$ ($R^2 = 0.85$) y $dT = -1.84 VPD + 1.75$ ($R^2 = 0.69$) respectivamente. En un estudio llevado a cabo en un ambiente con bajos valores de VPD (0.1 - 1.1 kPa) en Dundee-Scotland, Prashar et al. (2013) reportaron temperaturas de follaje (entre ≈ 15 °C a ≈ 22 °C) más altas que la temperatura del aire (rango de 12.5 a 13.8 °C) evaluadas en 188 genotipos de papa, lo cual apoya la evidencia de que este cultivo puede mostrar valores dT positivos en plantas bien regadas. Así también, en un estudio con la variedad UNICA en un ambiente seco como en el sur de Perú (con 4.4 kPa de VPD máximo promedio) Ramírez et al. (2016a) detectaron valores promedio de dT de 2.5 a 9.8 °C para las plantas bien regadas o bajo restricción severa de agua, respectivamente. Los hallazgos controvertidos sobre los valores de dT en este cultivo invitan a realizar más investigaciones sobre la sensibilidad estomática y su relación con su temperatura. En este estudio, la alta intensidad del cierre estomático coherente con un comportamiento isohídrico, y la sensibilidad al cierre estomático bajo un ambiente húmedo o VPD bajos promueve mayores emisiones térmicas lo cual a su vez incrementa dT .

Coherente con la literatura (Gonzalez-Dugo et al., 2014; Jones, 1999; Jackson, 1977), la T_h medida con termocuplas mostró valores más altos después del medio día y con mayor intensidad en plantas bajo condición de restricción hídrica y en condiciones de cielo despejado (Figura 16). Siendo, la radiación neta (R_n) una variable que describe muy bien las condiciones de cielo despejado y nublado como se observa en la Figura 16(a) y Figura 16(f)

respectivamente. Con estos valores de T_h se calcularon los dT , las mismas que oscilaron entre 0.8 – 4.3 y 1.9 – 7.0 °C en plantas en control y de restricción hídrica respectivamente, además observándose los máximos valores entre la 13:00 h y 15:00 h (Figura 17, marcado en el rectángulo celeste). También se ha observado en este periodo los máximos valores de dT , a excepción de los días 26 de mayo y 2 de junio donde se presentaron máximos valores antes del mediodía en plantas en condición de restricción hídrica, esto probablemente haya sido ocasionado por un desprendimiento de las termocuplas. Por lo que se puede decir que T_h esta muy influenciado por las condiciones meteorológicas, principalmente la radiación solar y VPD, debido a que entre las 15:00-16:00 h ocurre una disminución muy marcada de hasta 200 W m⁻² y 0.3 kPa respectivamente (Anexo 2 y 3). Por lo que podemos proponer la hora de medición de T_h pueden llevarse a cabo alrededor de las 14:00 h y al parecer es el momento donde mejor se determina al estatus hídrico en papa al utilizar la termometría infrarroja.

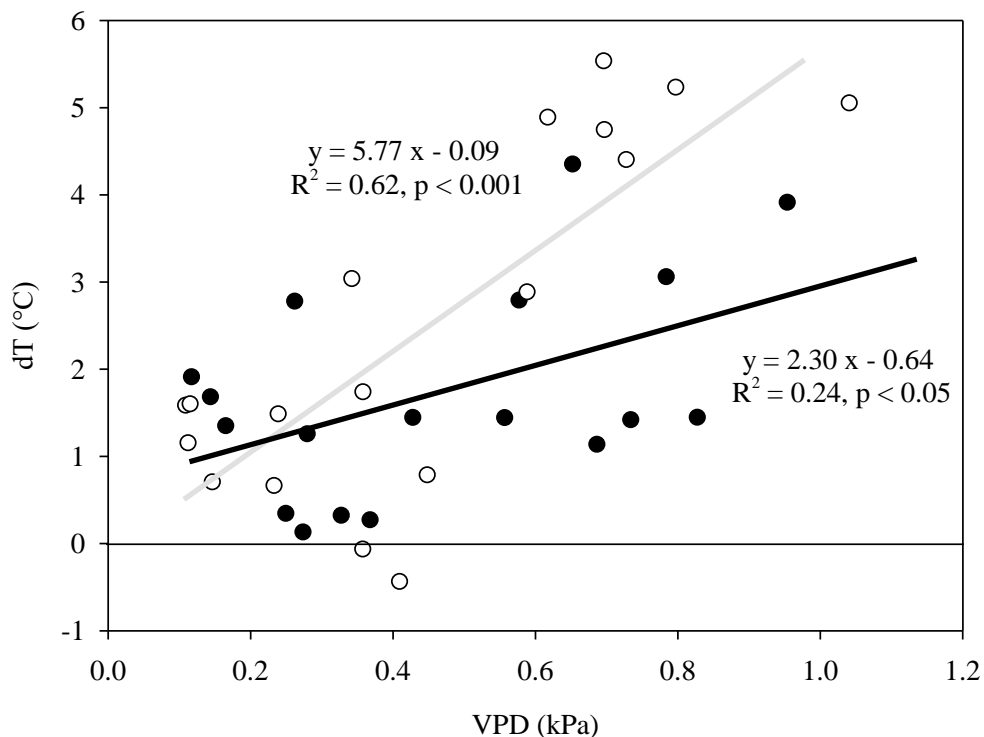


Figura 15: Diagrama de dispersión entre la diferencia de temperatura de la hoja y el aire (dT) y déficit de presión de vapor (VPD), en plantas en tratamiento de control (círculo negro) y de restricción hídrica (círculo blanco).

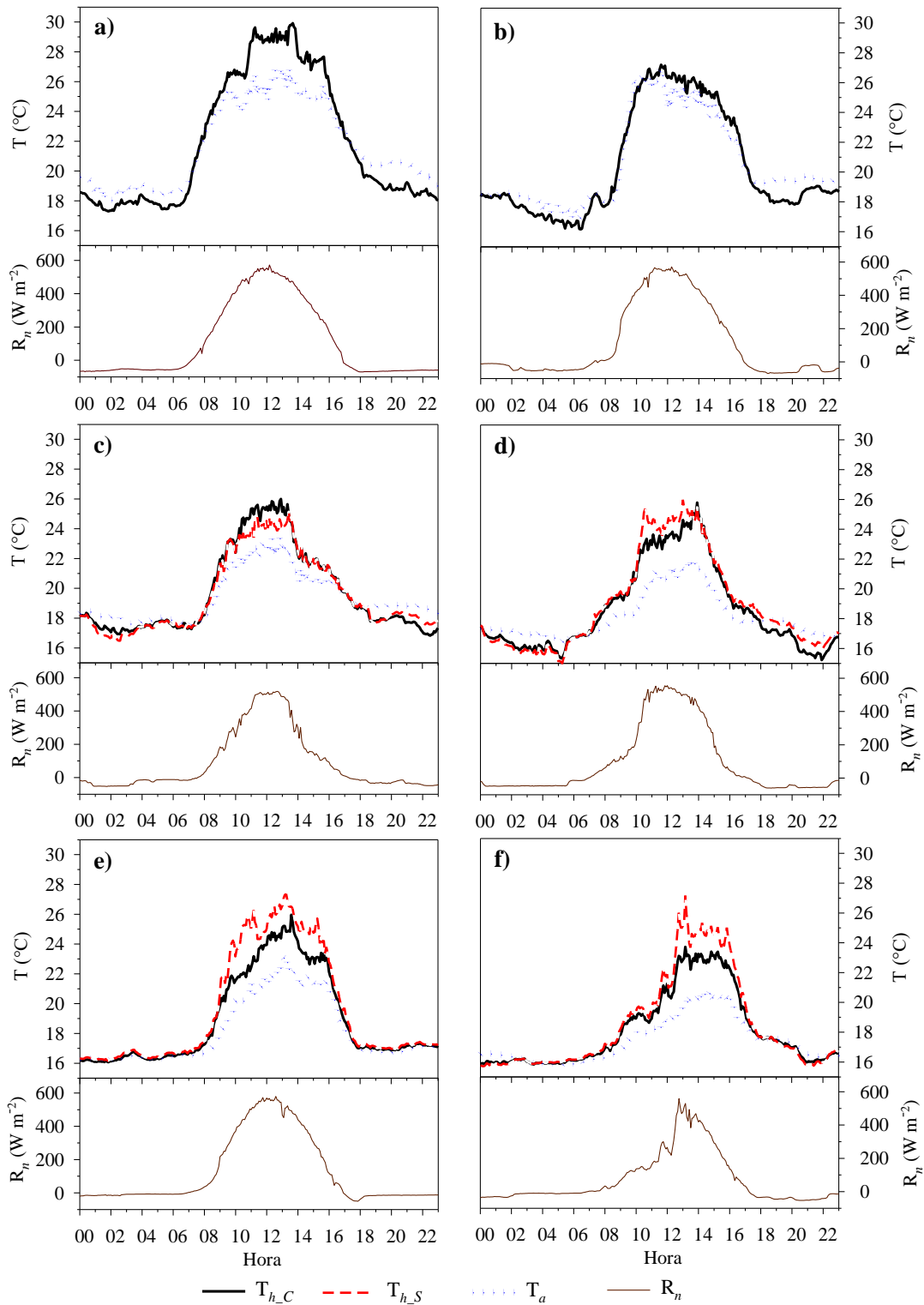


Figura 16: Comportamiento diurno de la temperatura de hoja (T_h) bajo tratamiento de control (C) y de restricción hídrica (S). Las mediciones de la temperatura del aire (T_a) y radiación neta (R_n) fueron realizadas los días 06 (a), 13 (b), 20 (c) y 26 (d) de mayo y los días 2 (e) y 9 (f) de junio de 2016, correspondiente a 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra (DSS) respectivamente.

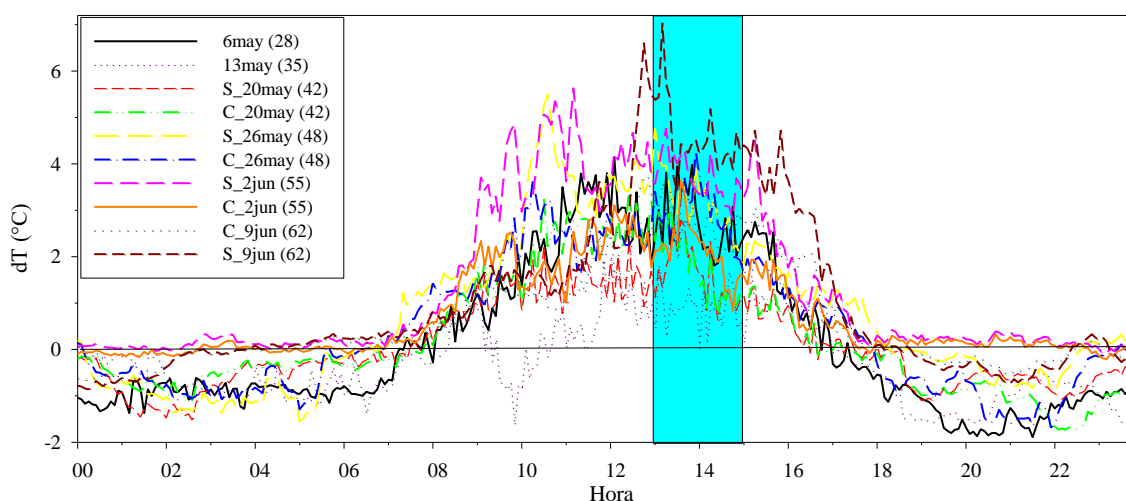


Figura 17: Variación horaria de la diferencia de temperatura de hoja (medida con termocuplas) y el aire (dT), realizados los días 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra, bajo tratamiento de control (C) y de restricción hídrica (S). El rectángulo celeste corresponde al periodo donde ocurre las máximas dT en plantas en condición de restricción hídrica.

4.2 Umbrales de riego con el índice de estrés hídrico del cultivo.

Las evaluaciones del CWSI mostraron valores promedio de 0.434 ± 0.02 , 0.511 ± 0.02 y 0.560 ± 0.02 para los tratamientos T₁, T₂ y T₃ respectivamente (Figura 18). Se pudo observar que el CWSI se incrementa con el estrés hídrico de la planta (días después de iniciado el tratamiento). Por otro lado, el CWSI disminuyó linealmente con g_{s_max} ($R^2 = 0.82$), Δ_{tuber} ($R^2 = 0.55$) y la biomasa seca de tubérculo (BST, $R^2 = 0.82$) (ver Figura 19). BST se vio significativamente afectado por los tratamientos de riego en sincronización con el riego ($F = 15.7$, $p < 0.05$), con una reducción en promedio en relación con el control de -35.8 ± 9.7 y -64.4 ± 7.0 % para T₂ y T₃, respectivamente (Figura 19).

La alta correlación encontrada entre el CWSI y g_{s_max} , Δ_{tuber} y BST (Figura 19 y Cuadro 4) sugiere que el CWSI podría usarse como una herramienta importante para definir el momento de riego en condiciones húmedas; siendo considerados g_{s_max} , Δ_{tuber} y BST como rasgos altamente relacionados con el estatus hídrico del cultivo de papa (Ramírez et al., 2015, 2016a; Rud et al., 2014; Erdem et al., 2005). Ramírez et al. (2016a) propusieron un valor de CWSI de 0.4 como un umbral conservador para el riego de papa en ambientes secos con cielo despejado.

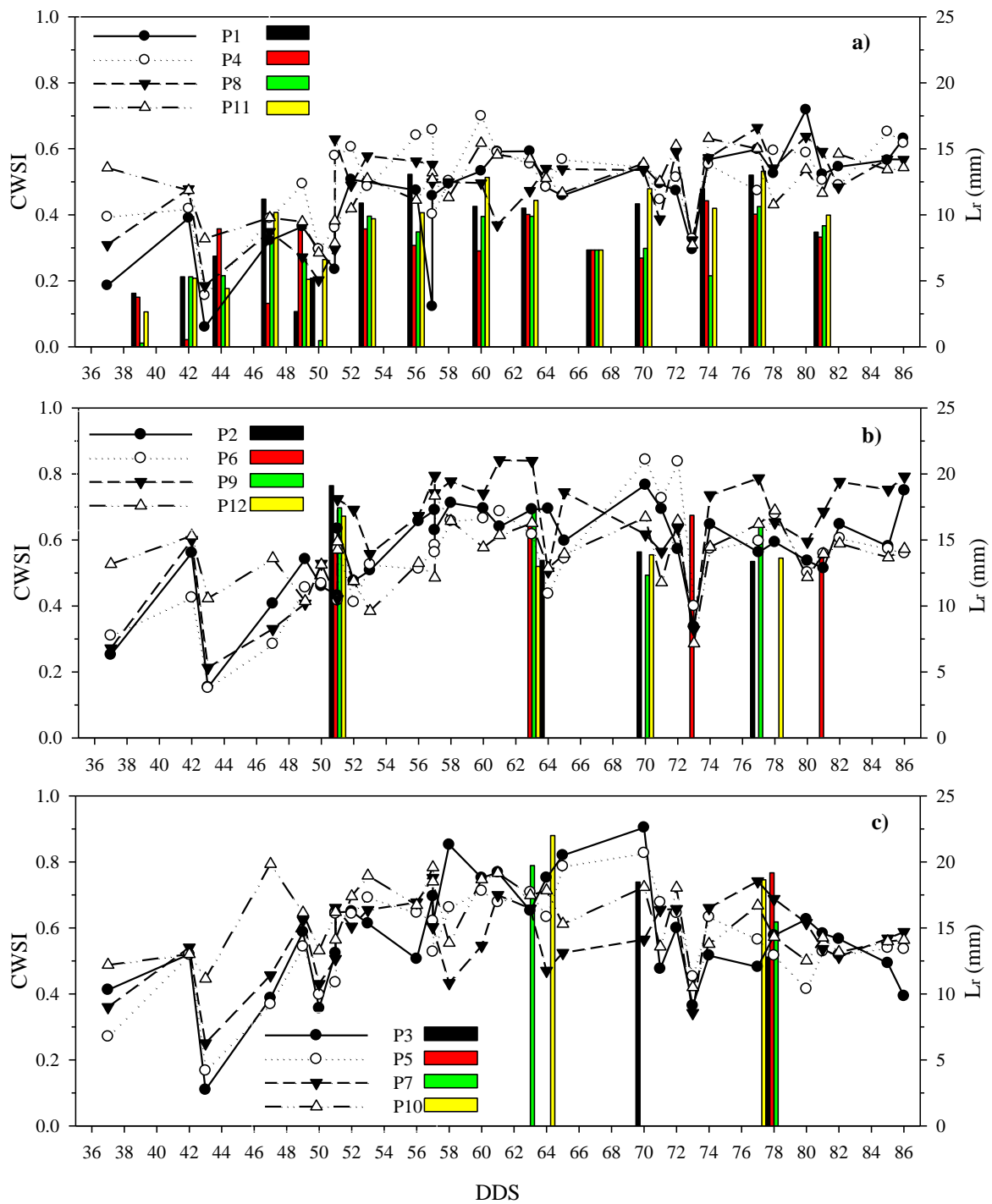


Figura 18: Comportamiento del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) a lo largo de la etapa de crecimiento del cultivo, obtenidos para 12 parcelas en las cuales se testaron tres tratamientos de riego por goteo: T₁ capacidad de campo o control en P₁, P₄, P₈ y P₁₁(a), T₂ con un g_{s_max} de $0.15 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en las parcelas P₂, P₆, P₉ y en P₁₂(b) y T₃ con un umbral de g_{s_max} de $0.05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en P₃, P₅, P₇ y P₁₀ (c). L_r, lámina de riego aplicado y DDS, días después de la siembra.

En este estudio también se observa (Figura 19) que este umbral de CWSI corresponde aproximadamente a $0.4 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ de g_{s_max} , resultando ser más del doble del valor propuesto por Flexas et al. (2004; 2006) para un riego óptimo. De acuerdo con esta observación, nuestro tratamiento con umbral de riego de $0.15 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ mostró una importante reducción del rendimiento en relación con el control (Figura 19), por lo que se sugiere que la papa debe regarse con umbrales de CWSI inferiores a 0.4, correspondientes a valores aproximadamente de g_{s_max} superiores a $0.3 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Anexo 8.4 y 8.5).

Respecto al comportamiento de g_{s_max} durante el periodo vegetativo del cultivo en los tratamientos testados, se observó en todas las parcelas una tendencia a disminuir a partir de un valor inicial en promedio de $0.369 \pm 0.09 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (antes de inicio de restricción de agua a los 38 DDS, Anexo 8.3). En las parcelas con tratamiento T₂ y T₃, se mantuvieron aproximadamente superior a 0.15 y $0.05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente (Anexo 8.3 b y c). Por otro lado, se encontró que las parcelas en tratamiento de control (a excepción de P₄) mantuvieron valores altos de g_{s_max} por encima de $0.374 \pm 0.03 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Anexo 8.3) durante este periodo (37 a 81 DDS). Además, se observó una disminución en la etapa final hasta de $0.269 \pm 0.04 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (70 DSS) en g_{s_max} , probablemente debido a los efectos de los daños ocasionados por la *Prodiplosis longifila* y de manifestación temprana de la senescencia. Además, se encontró en estas parcelas control un rendimiento promedio de $14.0 \pm 0.42 \text{ Mg ha}^{-1}$ (P₄ obtuvo 8.0 Mg ha^{-1}). Asimismo, en las parcelas con tratamiento de restricción de agua, en especial T₃ ($4.6 \pm 0.84 \text{ Mg ha}^{-1}$) mostraron un comportamiento a disminución de g_{s_max} a lo largo del periodo de evaluación (Anexo 8.3c), siguiendo un modelo cuadrático ($y = 3.08 \cdot 10^{-4} x^2 - 4.24 \cdot 10^{-2} x + 1.55$, $R^2 = 0.86$) a partir de un valor promedio de $0.369 \pm 0.04 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y hasta de $0.056 \pm 0.01 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ alcanzado a los 78 DDS. Asimismo, se observó una recuperación de g_{s_max} después del riego y detectándose una mayor intensidad de esta recuperación en las parcelas con tratamiento T₂ (quien obtuvo un rendimiento promedio de $8.7 \pm 1.51 \text{ Mg ha}^{-1}$) a los 51 y 63 DDS (Anexo 8.3b). En cambio, en T₃ se encontró una leve recuperación de g_{s_max} a los 64 y 70 DDS, por lo que estas plantas con restricción de agua fueron sometidas a daños fisiológicos severos sin opción a una posterior recuperación. También, se hicieron mediciones de T_f con un termómetro infrarrojo (Modelo DT-882, CEM, China) como se muestra en Anexo 9b, cuyos resultados en campo fueron muy variables, debido a que no corrige los factores medioambientales por lo que no fueron considerados en los resultados.

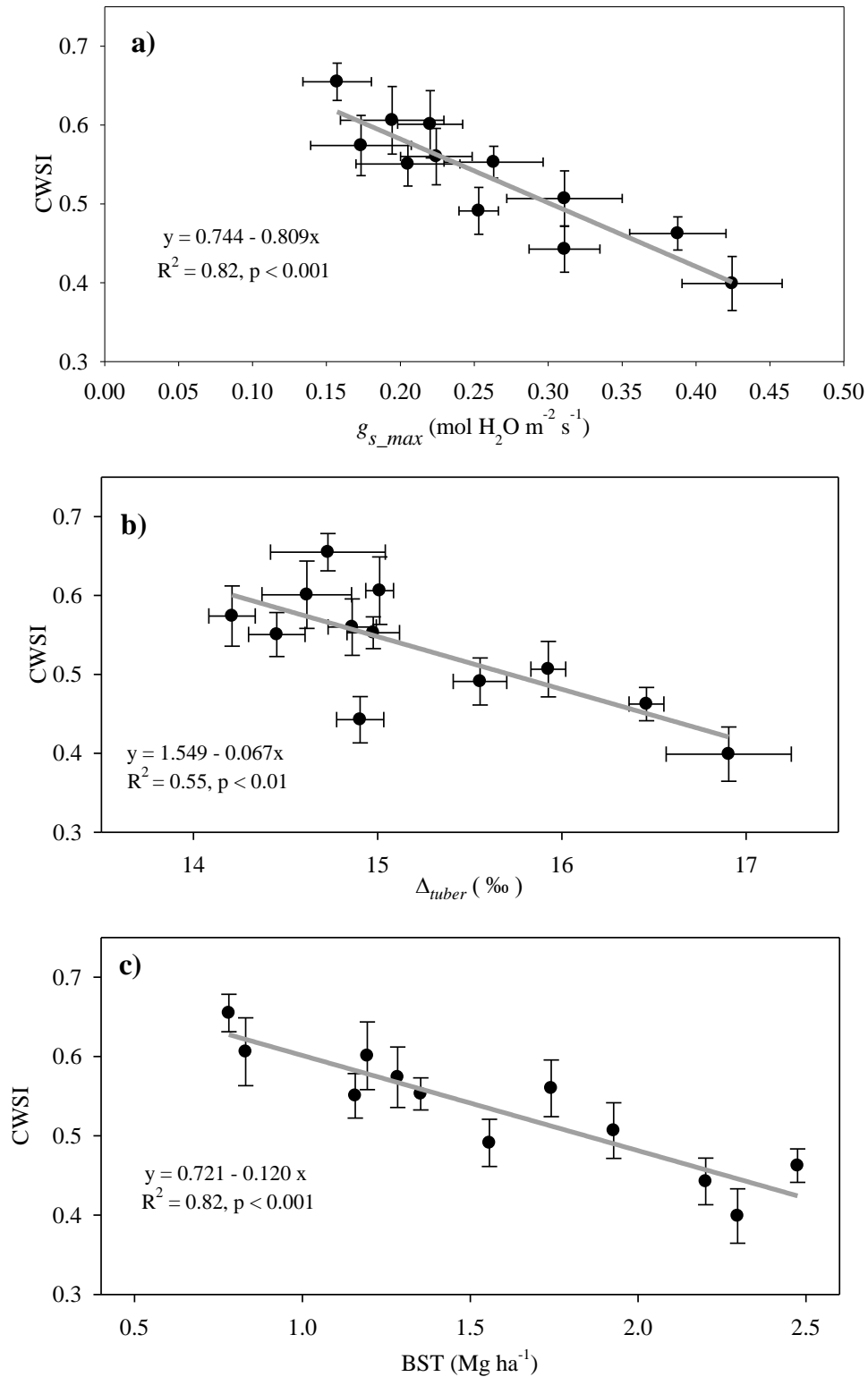


Figura 19: Gráfico de dispersión de los valores promedio del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) con la conductancia estomática máxima (g_{s_max} , a), la discriminación isotópica de carbono de tubérculos (Δ_{tuber} , b) y biomasa seca de tubérculo (BST, c) con su respectiva regresión lineal.

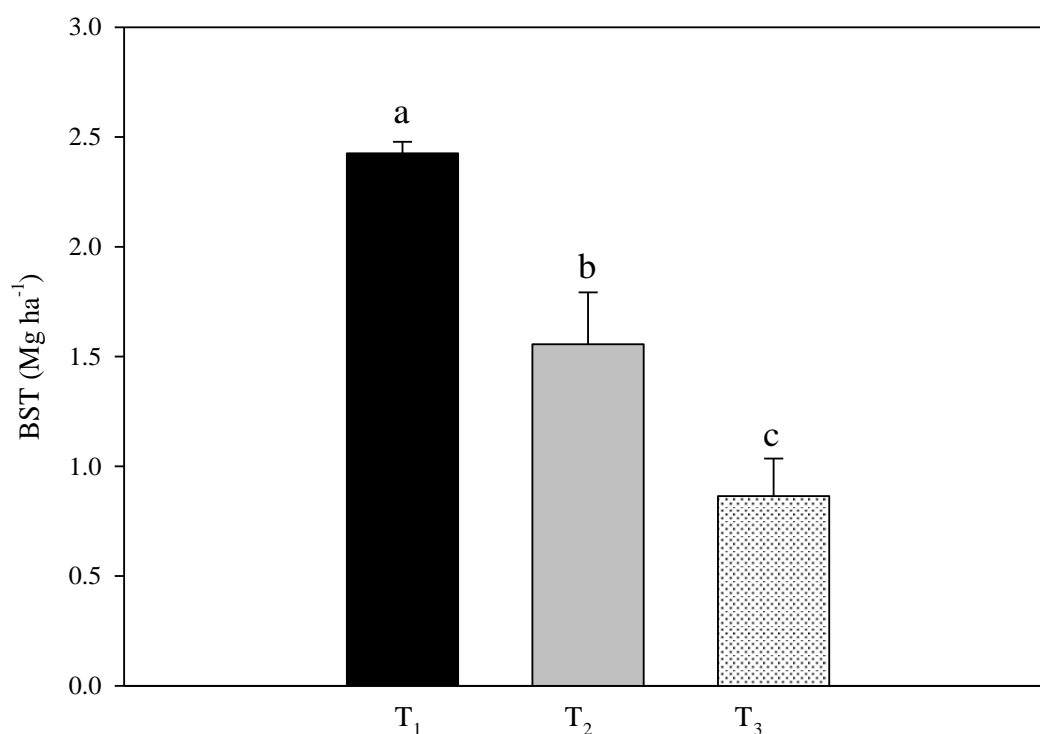


Figura 20: La biomasa promedio de tubérculo seco (\pm error estándar) en relación a la respuesta al control (T₁) y otros dos tratamientos de riego con umbrales de riego de valor promedio de conductancia estomática máxima de 0.15 (T₂) y 0.05 (T₃) mol H₂O m⁻² s⁻¹. Diferentes letras significan diferencias significativas (en $p < 0.05$) detectadas por ANOVA de una vía.

Por otro lado, como lo han reportado Ramírez et al. (2016a) en papa, el nivel de recuperación de fotosíntesis (A_{Recup}) después del riego depende de la intensidad y duración de la restricción hídrica, además reportaron un A_{Recup} por encima de 40% luego de 15 días en los tratamientos de restricción de agua. En este estudio, se observó en T₂ y a dos días después del riego un A_{Recup} de 85.4 ± 4.2 , 78.7 ± 1.9 y $65.9 \pm 3.0\%$ correspondientes a los pulsos de riego a los 51, 63 y 70 DDS respectivamente (Anexo 8.6a). En las parcelas T₃ se observaron A_{Recup} más bajos que T₂ hasta de 61.7, 59.8, 50.1 y 67.7% ocurridos en los pulsos de riego a los 63 (P₇), 64 (P₁₀), 70 (P₃) y 77 (P₅) DDS respectivamente (Anexo 8.6b). Esto probablemente debido al efecto de riegos más distantes, llegando inclusive a regar P₅ una sola vez y al final de la etapa fenológica del cultivo. Los valores mínimos de A_{Recup} fueron de 19.4 y 10.4 % encontrados en los tratamientos T₂ (P₉) y T₃ (P₁₀) respectivamente.

Cuadro 3: Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables de respuesta evaluadas: índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), conductancia estomática máxima (g_{s_max}), biomasa seca de tubérculo (BST), potencial hídrico de hoja (Ψ_{Hoja}), potencial mátrico del suelo (Ψ_m), discriminación de isótopos de carbono de tubérculos (Δ_{tuber}) y de hoja (Δ_{hoja}) evaluadas en promedio para toda las evaluaciones realizadas en el cultivo.

	CWSI					
g_{s_max}	-0.90	g_{s_max}				
BST	-0.91	0.91	BST			
Ψ_{Hoja}	-0.87	0.80	0.89	Ψ_{Hoja}		
Δ_{hoja}	-0.81	0.81	0.89	0.87	Δ_{hoja}	
Δ_{tuber}	-0.74	0.90	0.73	0.65	0.61	Δ_{tuber}
Ψ_m	0.36	-0.32	-0.24	-0.13	-0.02	0.21

Con respecto al potencial hídrico de hoja (Ψ_{Hoja}) medido a través de una cámara de presión, equipo ampliamente usado para medir el potencial hídrico de la planta (Kirkham, 2014), se encontraron valores medios de -0.26 ± 0.009 , -0.30 ± 0.007 y -0.30 ± 0.009 MPa correspondientes a los tratamientos T₁, T₂ y T₃ respectivamente (Anexo 8.8). Valores más negativos de Ψ_{Hoja} corresponden a plantas más estresadas (Kirkham, 2014; Kramer, 1988, 1983), los cuales fueron detectados en las parcelas P₄ y P₁₂ con valores medios de -0.38 MPa (64 DDS) y -0.43 MPa (51 DDS) respectivamente. Además, se ha observado una reducción de 41.6 % en las plantas con tratamiento T₃ desde inicio de la restricción hídrica (-0.27 ± 0.007 MPa) hasta los 71 DDS (Anexo 8.8c). Los valores encontrados de Ψ_{Hoja} en plantas de restricción hídrica fueron más del doble comparado con lo reportado por Ramirez et al. (2016) de -0.60 MPa en la misma variedad de papa y en el caso de las plantas en control fueron muy similares (-0.24 MPa).

También se encontró en la discriminación de isotopos de carbono de hoja (Δ_{hoja}) un valor promedio de 19.69 ± 0.10 ‰ en plantas de tratamiento control (T₁) y con una reducción en los tratamientos T₂ y T₃ comparado con el control de 1.0 - 9.6 % y 1.2 - 11.2 % respectivamente. Además, durante el periodo evaluado el comportamiento de Δ_{hoja} en T₂ y T₃ mostraron una tendencia a disminución, llegando a un mínimo valor a los 57 y 64 DDS

respectivamente (Anexo 8.9 b y c). Las plantas de control han estado sometidas a un estrés térmico y no han permanecido en el óptimo fisiológico (Flexas et al., 2004), debido a que las condiciones medioambientales no han sido favorables (días con radiación solar intensa). Tal como se observa en los bajos rendimientos ($14.0 \pm 0.42 \text{ Mg ha}^{-1}$) encontrados (Anexo 8.12) comparado con los valores de 40 Mg ha^{-1} reportados por Gutierrez et al. (2007) de esta variedad sembrada en la misma época del año. Además, teniendo en cuenta los bajos valores de Δ_{hoja} (Anexo 8.10a) comparado con lo reportado por Ramirez et al. (2015) de 22.54 % en plantas bien regadas. Siendo más intenso en la P₄, probablemente esté relacionado por el alto nivel de salinidad ($CE = 4.81 \text{ dS m}^{-1}$) detectado en esa área, tal como se observó en la evaluación de caracterización de suelo al inicio de la campaña (Anexo 7.1). Correspondiéndose con los valores bajos encontrados de g_{s_max} (Anexo 8.3a), Ψ_{Hoja} (Anexo 8.8a), BST (Anexo 8.12) y Δ_{hoja} (Anexo 8.9a) en relación a las demás parcelas de control. La discriminación de isótopos de carbono medidos en tubérculo (Δ_{tuber}) mostró una relación lineal positiva ($R^2 = 0.53$) con la BST (Anexo 8.10b). Las parcelas P₁₀ y P₃ mostraron los valores de BST más bajos de 0.78 y 0.83 Mg ha^{-1} respectivamente, lo mismos que se observó en el comportamiento de bajos valores de Δ_{hoja} (Anexo 8.9c, 8.10a) a lo largo de del periodo evaluado (37 a 78 DDS).

Por otro lado, respecto a las variables del estatus hídrico del suelo, como el promedio de la humedad volumétrica del suelo (θ , v v^{-1}), lámina de riego total (L_r , mm) y potencial mátrico del suelo promedio (Ψ_m , kPa) durante el periodo evaluado (39 al 81 DDS) se muestra en el Cuadro 4. Respecto a θ , las parcelas bien regadas (control o T₁) se mantuvieron a capacidad de campo (27.5 v v^{-1}) con valores superiores en promedio de $21.41 \pm 0.46 \text{ v v}^{-1}$. Las parcelas en tratamiento T₂ y T₃ mostraron una disminución de θ comparado con el control, en promedio de 34.5 % y 42.0 % respectivamente. El Ψ_m en las parcelas control (T₁), mostró en promedio de $-29.95 \pm 4.26 \text{ kPa}$. A diferencia de los tratamientos T₂ y T₃, mostraron un comportamiento variable a partir de una semana de iniciado el tratamiento, en promedio de $-60.44 \pm 10.33 \text{ kPa}$ y $-66.13 \pm 9.47 \text{ kPa}$ respectivamente (Anexo 8.7). Además, en todas las parcelas se observó un valor inicial (36 DDS) en promedio de $-15.7 \pm 1.47 \text{ kPa}$ y a partir de allí se siguió una disminución hasta antes de la aplicación del primer riego, en promedio de $-65.0 \pm 10.7 \text{ kPa}$ y $-82.7 \pm 2.0 \text{ kPa}$ en las parcelas con tratamiento T₂ y T₃ respectivamente (Anexo 8.7 b y c).

Cuadro 4: Promedio de la humedad volumétrica del suelo (θ), lámina de riego total (L_r) y potencial mátrico del suelo (Ψ_m), medidos entre el 11 de noviembre al 23 de diciembre del 2016.

Tratamiento	Parcela	θ (v v ⁻¹)	L_r (mm)	Ψ_m (kPa)
T ₁	P ₁	*	132.2	-38.6
	P ₄	*	102.8	-18.3
	P ₈	*	104.4	-32.4
	P ₁₁	*	131.0	-30.5
T ₂	P ₂	18.4	60.0	-59.7
	P ₆	18.1	61.9	-78.5
	P ₉	17.5	63.3	-31.8
	P ₁₂	18.1	57.3	-71.8
T ₃	P ₃	16.8	31.3	-64.9
	P ₅	16.0	19.2	-84.5
	P ₇	16.8	35.2	-40.4
	P ₁₀	14.2	40.7	-74.7

(*) Valores de humedad volumétrica a capacidad de campo, $\theta_{cc}=27.5 \text{ v v}^{-1}$

Respecto a la diferencia de temperatura de hoja medida con termocuplas (T_h) y la temperatura del aire ($T_h - T_a$) con el VPD, se observó una relación lineal positiva ($T_h - T_a = -0.98 + 0.55 \text{ VPD}$, $R^2 = 0.77$) para una parcela bien regada (control) y evaluadas durante las 24 horas (Anexo 8.11a). Detectándose, un máximo valor promedio de ($T_h - T_a$) de $6.2 \text{ }^\circ\text{C}$ alcanzado en horas próximas al mediodía y un mínimo de -0.5°C ocurrido en horas de la noche. También se ha observado un incremento de ($T_h - T_a$) en las mañanas a medida que aumenta el VPD y por el contrario una disminución por la tarde. Respecto a la relación entre la diferencia de temperatura del follaje (medida con la cámara térmica) y el aire ($T_f - T_a$) con el VPD en parcelas bien regadas y en restricción de agua fueron de ($T_f - T_a = -0.69 + 9.13\text{VPD}$ ($R^2 = 0.78$) y ($T_f - T_a = -0.53 + 7.39\text{VPD}$ ($R^2 = 0.77$) respectivamente (Anexo 8.11b). La relación de ($T_f - T_a$) con el VPD, es muy similar a la encontrada con ($T_h - T_a$) (Anexo 8.11a) para una parcela bien regada, por lo que podríamos decir que este comportamiento es propio del lugar de estudio (VPD bajos). Muy diferente a la relación lineal negativa reportado por Idso et al. (1981), para ambientes secos con VPD altos (hasta

60 kPa). En la literatura se menciona a T_h o T_f , como un buen indicador de las principales funciones fisiológicas, especialmente relacionados a la tasa de transpiración, como la apertura y cierre de los estomas (Jones, 2004b). Por tanto, en este estudio que $(T_f - T_a)$ se incrementa por las mañanas, alcanzando su máximo valor mayormente en horas próximas al mediodía, siendo más intenso en plantas sometidas a restricción de agua (Anexo 8.11b). El máximo valor promedio de $(T_f - T_a)$ fue de 10.5 °C (en datos puntuales llegó cerca de 12 °C) y 8.7 °C en plantas con restricción de agua y con un buen riego respectivamente. Con los datos de $(T_f - T_a)$ en plantas en restricción hídrica, se puede sustentar al valor usado en el cálculo de CWSI en la temperatura seca (T_s) de 13 °C (Anexo 11).

Con los resultados encontrados en esta investigación, se propone el umbral de 0.4 de CWSI para establecer el momento adecuado para el riego óptimo y valores superiores a 0.6 de CWSI como umbrales de riego de severidad en papa y con evaluaciones tomadas alrededor de las 14:00 horas. Siendo, este momento el que permite una detección apropiada de las emisiones térmicas en condiciones particulares del lugar de estudio.

Finalmente, durante el periodo de estudio la temperatura máxima y mínima diaria fueron de 24.8 ± 0.26 °C y 17.4 ± 0.19 °C respectivamente y la humedad relativa (HR) se mantuvo en el rango de 91.0 ± 0.31 % y 57.5 ± 0.65 %. El promedio de la radiación global diaria (LI200X model, Licor, USA) y déficit de presión de vapor (VPD) fueron de 17.7 ± 0.44 MJ m⁻² día⁻¹ y 0.6 ± 0.02 kPa respectivamente (Anexo 8.2). En el anexo 12 se muestra el promedio mensual de la temperatura del aire (T_a), HR y VPD_{max} (VPD máximo) para el año 2016, 2017 y 2013-2017. Con esto se puede mencionar, que el comportamiento de estas variables meteorológicas durante la campaña experimental fueron diferentes a años anteriores. Este último, debido a que el año 2016 ha sido reportado por la Organización Mundial de Meteorología (OMM) uno de los años más cálidos que se tiene registrado.

V. CONCLUSIONES

En ambientes húmedos, caracterizados por bajos valores de VPD (déficit de presión de vapor) y cambios abruptos en la intensidad de la radiación solar, la papa muestra una gran sensibilidad estomática con un cierre severo después de la caída de g_{s_max} ($g_s \downarrow$) y acompañado de un incremento de la emisión térmica. Esta característica es muy importante para definir los horarios apropiados, dentro de un día, para medir g_{s_max} y T_h (temperatura de hoja medida con el termómetro infrarrojo) como indicadores del déficit hídrico del cultivo. En el presente estudio se ha determinado las horas de la mañana hasta antes de la intensificación de las condiciones meteorológicas (cielo nublado a despejado) y cerca de las 14:00 h como los momentos más adecuados para la caracterización del estatus hídrico para g_{s_max} y T_h , respectivamente.

Con las escalas espaciales consideradas en el cultivo, el CWSI (evaluado a partir de la temperatura de follaje medido con una cámara térmica) se considera como una variable más adecuada para la definición de su estatus hídrico, lo que permite establecer el momento adecuado para el riego. En base a este estudio se sugiere valores 0.4 como umbrales para este propósito, lo que permite mantener valores de g_{s_max} superiores a $0.3 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y garantizar el mayor rendimiento de tubérculos.

VI. RECOMENDACIONES

Verificar la relación dT con el VPD con otros experimentos, los cuales sean a cabo en zonas secas (VPD altos) y condiciones de cielo despejado (estación de verano).

Llevar a cabo experimentos donde se propongan umbrales de 0.4 y 0.6 de CWSI para condiciones óptimas de riego y de restricción hídrica en papa en un ambiente húmedo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadi, S.H., Andersen, M.N., Plauborg, F., Poulsen, R.T., Jensen, C.R., Sepaskhah, A.R., Hansen, S. 2010. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Yield and water productivity. *Agric. Water Manag.* 97, 1923–1930.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Estudio FAO Riego y Drenaje. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. 323p.
- Amani, I., Fischer, R.A., Reynolds, M.P., 1996. Canopy Temperature Depression Association with Yield of Irrigated Spring Wheat Cultivars in a Hot Climate. *J. Agron. Crop Sci.* 176, 119–129. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1996.tb00454.x>
- Bunce, J.A., 1984. Effects of Humidity on Photosynthesis. *J. Exp. Bot.* 35, 1245–1251. <https://doi.org/10.1093/jxb/35.9.1245>
- Byrd, S.A., Rowland, D.L., Bennett, J., Zotarelli, L., Wright, D., Alva, A., Nordgaard, J. 2014. Reductions in a Commercial Potato Irrigation Schedule during Tuber Bulking in Florida: Physiological, Yield, and Quality Effects. *J. Crop Improv.* 28, 660–679.
- Campbell, G. S. & Norman, J. 1998. *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer, Second edition, New York, 294p.
- CIP. 2016. Annual Report 2015. Res. Program Roots Tubers Banan.
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y., Tsipris, J., 2005. Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *J. Exp. Bot.* 56, 1843–1852. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri174>
- Cunningham, S., 2004. Stomatal sensitivity to vapour pressure deficit of temperate and tropical evergreen rainforest trees of Australia. *Trees* 18. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0318-y>
- Dwelle, R.B., Kleinkopf, G.E., Pavek, J.J., 1981. Stomatal conductance and gross photosynthesis of potato (*Solanum tuberosum* L.) as influenced by irradiance,

- temperature, and growth stage. *Potato Res.* 24, 49–59. <https://doi.org/10.1007/BF02362016>
- Erdem, Y., Arin, L., Erdem, T., Polat, S., Deveci, M., Okursoy, H., Gültaş, H.T., 2010. Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*). *Agric. Water Manag.* 98, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.013>
- FAO. 2018. Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division (FAOSTAT). <http://www.fao.org/faostat/en/> (accesido 28.03.18)
- FAO. 2012. Crop yield response to water, FAO irrigation and drainage paper N°66. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 505p.
- Flexas, J., Bota, J., Cifre, J., Escalona M., Galmes, J., Gulias, J., Lefi, E.-K., Martínez-Canellas F., S., Moreno M., Ribas-Carbo, M., Riera, D., Sampol, B., Medrano, H. 2004. Understanding down-regulation of photosynthesis under water stress: future prospects and searching for physiological tools for irrigation management. *Ann. Appl. Biol.* 144, 273–283.
- FLIR. 2016. User's manual FLIR Exx series, 178p.
- García, J. 1992. Agrometeorología: Energía y Agua en la Agricultura. UNALM, 174p.
- Gardner, B.R., Nielsen, D.C., Shock, C.C., 1992. Infrared thermometry and Crop Water Stress Index. II. Sampling Procedures and Interpretation. *J Prod Agric* 5, 466–475.
- Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P.J., Fereres, E., 2014. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. *Agric. For. Meteorol.* 198–199, 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.003>.
- Gómez-Bellot, M.J., Nortes, P.A., Sánchez-Blanco, M.J., Ortuño, M.F. 2015. Sensitivity of thermal imaging and infrared thermometry to detect water status changes in *Euonymus japonica* plants irrigated with saline reclaimed water. *Biosyst. Eng.* 133, 21–32.
- Gutiérrez, R., Espinoza, J., Bonierbale, M., 2007. UNICA: Variedad Peruana para mercado fresco y papa frita con tolerancia y resistencia para condiciones climáticas adversas. *Rev. Latinoam. Papa*, 14, 41–50.
- Harris, P. M. 1992. *The Potato Crop*. Dordrecht: Springer Netherlands. 496p.
- Huang, K., Wang, S., Zhou, L., Wang, H., Zhang, J., Yan, J., Zhao, L., Wang, Y., Shi, P., 2014. Impacts of Diffuse Radiation on Light Use Efficiency across Terrestrial Ecosystems Based on Eddy Covariance Observation in China. *PLoS ONE* 9, e110988. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110988>

- Idso, S. B. 1982. Non-water-stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol*, 27(1-2), 59-70.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24, 45–55.
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Wat. Resour Resea*, 17(4), 1133-1138.
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., Idso, S.B., 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resour. Res.* 13, 651–656. <https://doi.org/10.1029/WR013i003p00651>
- Jones, H.G. 2014. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*, Third edition. ed. Cambridge University Press, Cambridge; New York. 428p.
- Jones, H.G. 2004a. Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology, in: *Adv. in Botan Res.* Elsevier, pp. 107–163.
- Jones, H.G. 2004b. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *J. Exp. Bot.* 55, 2427–2436.
- Jones, H. G. 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agric. and Forest Meteorol.*, 95(3), 139-149.
- Jones, H.G., Serraj, R., Loveys, B.R., Xiong, L., Wheaton, A., Price, A.H., 2009. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Funct. Plant Biol.* 36, 978. <https://doi.org/10.1071/FP09123>
- Kirkham, M. B. 2014. Introduction. *En Principles of Soil and Plant Water Relations*, 572p.
- Kramer, P.J. 1988. Measurement of Plant Water Status: Historical Perspectives and Current Concerns. *Irrig. Sci.* 9, 275–287.
- Kramer, P.J. 1983. *Water relations of plants*. Academic Press, New York, 493p.
- Liu, F., Jensen, C.R., Shahanzari, A., Andersen, M.N., Jacobsen, S.-E., 2005. ABA regulated stomatal control and photosynthetic water use efficiency of potato (*Solanum tuberosum* L.) during progressive soil drying. *Plant Sci.* 168, 831–836. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.10.016>
- Maes, W.H., Baert, A., Huete, A.R., Minchin, P.E.H., Snelgar, W.P., Steppe, K., 2016. A new wet reference target method for continuous infrared thermography of

- vegetations. *Agric. For. Meteorol.* 226–227, 119–131.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.021>
- Medrano, H., Escalona, J., Bota, J., Gulías, J., Flexas, J. 2002. Regulation of Photosynthesis of C3 Plants in Response to Progressive Drought: Stomatal Conductance as a Reference Parameter. *Ann. Bot.* 89, 895–905.
- Meron, M., Tsipris, J., Orlov, V., Alchanatis, V., & Cohen, Y. 2010. Crop water stress mapping for site-specific irrigation by thermal imagery and artificial reference surfaces. *Preci. Agric.*, 11(2), 148-162.
- Moller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Cohen, S. 2006. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Jour. of Exper Botan*, 58(4), 827-838.
- Monneveux, P., Ramírez, D.A., Pino, M.-T., 2013. Drought tolerance in potato (*S. tuberosum* L.). *Plant Sci.* 205–206, 76–86.
- Norman, J.M., Becker, F. 1995. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. *Agric. For. Meteorol.* 77, 153–166.
- Obidiegwu, J.E., Bryan, G., Jones, H.G., Prashar, A., 2015. Coping with drought: stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement. *Front. Plant Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00542>
- Pearcy, R.W., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Rundel, P.W. 1989. *Plant Physiological Ecology: Field methods and instrumentation.* Chapman and Hall, New York, 457p.
- Prashar, A., Yildiz, J., McNicol, J. W., Bryan, G. J., & Jones, H. G. 2013. Infra-red Thermography for High Throughput Field Phenotyping in *Solanum tuberosum*. *Plos. One*, 8(6).
- Quiroz, R., Loayza, H., Barreda, C., Gavilán, C., Posadas, A., Ramírez, D.A., 2017. Linking process-based potato models with light reflectance data: Does model complexity enhance yield prediction accuracy? *Eur. J. Agron.* 82, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.10.008>
- Ramírez, D.A., Monneveux, P., Quiroz, R., 2016b. Mitigando los efectos de la sequía en papa: Algunos alcances y retos, in: *Estrés hídrico y térmico en papa, avances y protocolos.* INIA N° 331, Chile, pp. 115–129.
- Ramírez, D.A., Rolando, J.L., Yactayo, W., Monneveux, P., Quiroz, R. 2015. Is Discrimination of ^{13}C in Potato Leaflets and Tubers an Appropriate Trait to Describe Genotype Responses to Restrictive and Well-Watered Conditions? *J. Agron. Crop Sci.* 201, 410–418.

- Ramírez, D.A., Yactayo, W., Gutiérrez, R., Mares, V., De Mendiburu, F., Posadas, A., Quiroz, R. 2014. Chlorophyll concentration in leaves is an indicator of potato tuber yield in water-shortage conditions. *Sci. Hortic.* 168, 202–209.
- Ramírez, D.A., Yactayo, W., Rens, L.R., Rolando, J.L., Palacios, S., Mendiburu, F.D., Mares, V., Barreda, C., Loayza, H., Monneveux, P., Zotarelli, L., Khan, A., Quiroz, R. 2016a. Defining biological thresholds associated to plant water status for monitoring water restriction effects: Stomatal conductance and photosynthesis recovery as key indicators in potato. *Agric. Water Manag.* 177, 369-378.
- Reigosa, M.J., Pedrol, N., Sánchez, A. 2003. *La ecofisiología vegetal: una ciencia de síntesis.* Thomson-Paraninfo, Madrid. 1216p.
- Rolando, J.L., Ramírez, D.A., Yactayo, W., Monneveux, P., Quiroz, R. 2015. Leaf greenness as a drought tolerance related trait in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Environ. Exp. Bot.* 110, 27–35.
- Rud, R., Cohen, Y., Alchanatis, V., Levi, A., Brikman, R., Shenderoy, C., Nigon, T. 2014. Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Preci. Agric.*, 15(3), 273-289.
- SENAMHI, 2018. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. <http://www.senamhi.gob.pe> (Accedido 16.03.18)
- Sepaskhah, A.R., Ilampour, S., 1996. Relationships between yield, crop water stress index (CWSI) and transpiration of cowpea (*Vigna sinensis* L). *Agronomie* 16, 269–279. <https://doi.org/10.1051/agro:19960501>
- Sezen, S.M., Yazar, A., Daşgan, Y., Yucel, S., Akyıldız, A., Tekin, S., Akhoundnejad, Y., 2014. Evaluation of crop water stress index (CWSI) for red pepper with drip and furrow irrigation under varying irrigation regimes. *Agric. Water Manag.* 143, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.06.008>
- Stark, J., Pavek, J., McCann, I. 1991. Using Canopy Temperature Measurements to Evaluate Drought Tolerance of Potato Genotypes. *J Amer Soc Hort Sci* 116, 412–41
- Stark, J., Wright, J. 1985. Relationship between foliage temperature and water stress in potatoes. *Am. Potato J.* 62, 57–68.
- Topbjerg, H.B., Kaminski, K.P., Kørup, K., Nielsen, K.L., Kirk, H.G., Andersen, M.N., Liu, F., 2015. Screening for intrinsic water use efficiency in a potato dihaploid mapping population under progressive drought conditions. *Acta Agric. Scand. Sect. B — Soil Plant Sci.* 65, 400–411. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1015439>

- Turner, N.C., Schulze, E.-D., Gollan, T., 1984. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content: I. Species comparisons at high soil water contents. *Oecologia* 63, 338–342. <https://doi.org/10.1007/BF00390662>
- Van Loon, C.D. 1981. The effect of water stress on potato growth, development, and yield. *Am. Potato J.* 58, 51–69.
- Vos, J., Oyarzún, P.J., 1987. Photosynthesis and stomatal conductance of potato leaves? effects of leaf age, irradiance, and leaf water potential. *Photosynth. Res.* 11, 253–264. <https://doi.org/10.1007/BF00055065>
- Yactayo, W., Ramírez, D. A., Gutiérrez, R., Mares, V., Posadas, A., & Quiroz, R. 2013. Effect of partial root-zone drying irrigation timing on potato tuber yield and water use efficiency. *Agri. Wat Manag.* 123, 65-70.
- Zakaluk, R., Sri Ranjan, R., 2008. Predicting the leaf water potential of potato plants using RGB reflectance. *Can. Biosyst. Eng. Genie Biosyst. Au Can.* 50.
- Zakaluk, R., Sri Ranjan, R., 2007. Artificial Neural Network Modelling of Leaf Water Potential for Potatoes Using RGB Digital Images: A Greenhouse Study. *Potato Res.* 49, 255–272. <https://doi.org/10.1007/s11540-007-9021-x>

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Fotos de evaluaciones de g_{s_max} con el equipo de medición de fotosíntesis portátil (LI-6400) (a) y el termómetro infrarrojo (DT-882, CEM) (b) en el experimento llevado a cabo en macetas en el laboratorio del CIP.



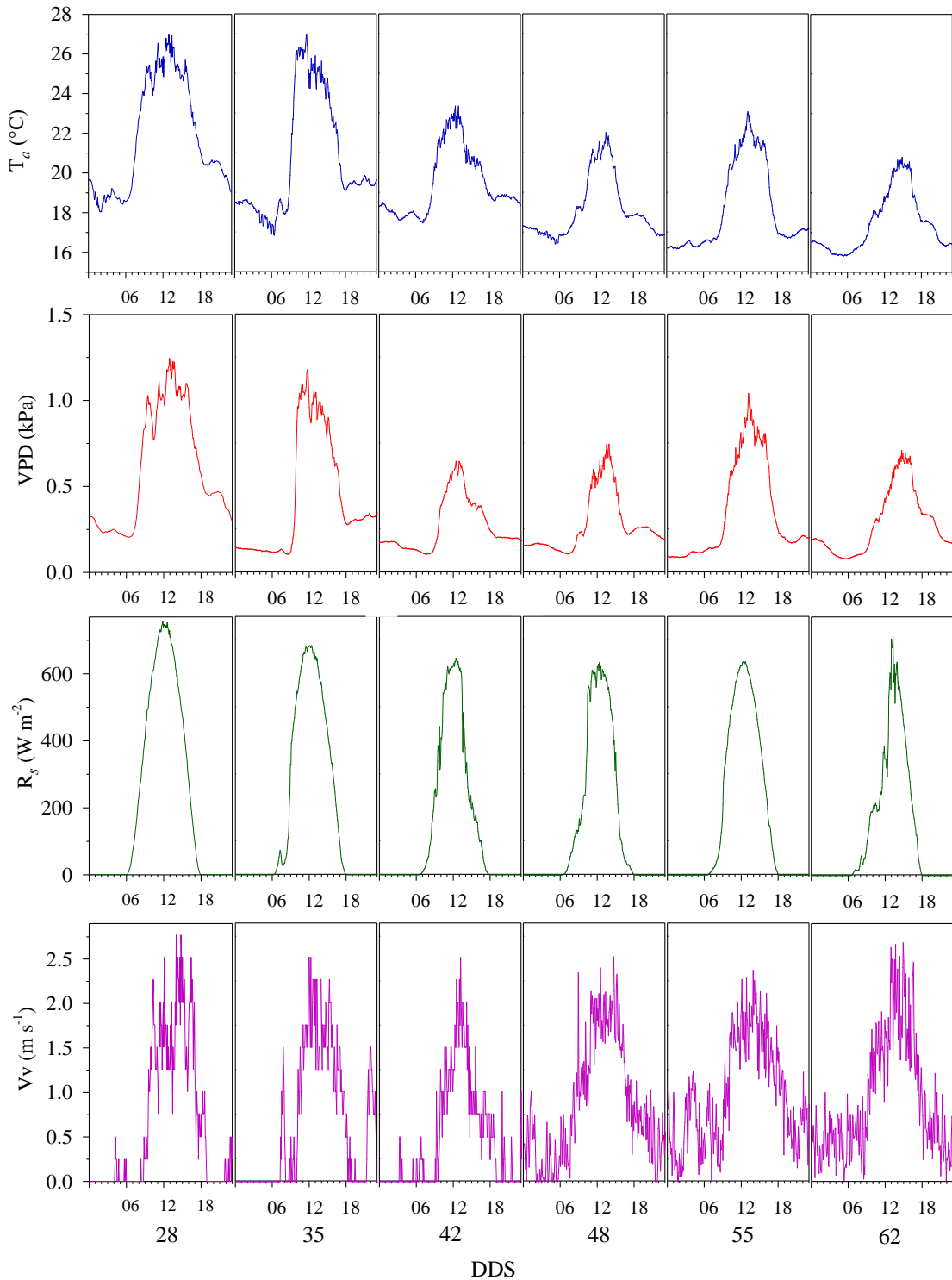
ANEXO 2: Datos horarios promedios de temperatura del aire (T_a), humedad relativa (HR), radiación solar global (R_s) y déficit de presión de vapor (VPD) durante las evaluaciones de T_h y g_{s_max} correspondiente a los días 06 (a), 13 (b), 20 (c) y 26 (d) de mayo y los días 2 (e) y 9 (f) de junio de 2016 o 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra (DSS) respectivamente (primer ensayo). En gris el cambio más intenso durante el día en las condiciones meteorológicas.

Fecha/DDS	Hora	T_a (°C)	HR (%)	VPD (kPa)	R_s (W m ⁻²)
6 mayo / 28	7 - 8	20.9 ± 0.29	87.5 ± 0.71	0.3 ± 0.02	139.0 ± 15.31
	8 - 9	23.4 ± 0.16	76.0 ± 0.99	0.7 ± 0.03	320.8 ± 16.20
	9 - 10	25.0 ± 0.11	69.9 ± 0.36	1.0 ± 0.02	503.2 ± 14.47
	10 - 11	24.7 ± 0.16	72.4 ± 0.43	0.9 ± 0.02	635.3 ± 9.79
	11 - 12	25.7 ± 0.13	68.8 ± 0.21	1.0 ± 0.01	728.9 ± 4.97
	12 - 13	26.2 ± 0.16	67.1 ± 0.54	1.1 ± 0.03	737.0 ± 3.50
	13 - 14	26.1 ± 0.14	65.5 ± 0.27	1.2 ± 0.02	665.5 ± 9.30
	14 - 15	25.2 ± 0.08	67.3 ± 0.14	1.0 ± 0.01	540.2 ± 12.41
	15 - 16	25.0 ± 0.08	66.8 ± 0.18	1.1 ± 0.01	381.9 ± 17.12
	16 - 17	23.4 ± 0.20	70.5 ± 0.58	0.9 ± 0.03	185.3 ± 16.84
17 - 18	21.8 ± 0.15	75.0 ± 0.41	0.7 ± 0.02	33.9 ± 9.05	
13 mayo / 35	7 - 8	18.3 ± 0.07	94.0 ± 0.07	0.1 ± 0.00	44.7 ± 4.05
	8 - 9	18.6 ± 0.23	94.7 ± 0.06	0.1 ± 0.00	165.5 ± 33.84
	9 - 10	23.6 ± 0.54	86.2 ± 2.21	0.4 ± 0.08	473.9 ± 14.71
	10 - 11	26.1 ± 0.06	69.6 ± 0.36	1.0 ± 0.01	604.9 ± 10.65
	11 - 12	26.0 ± 0.20	68.4 ± 0.36	1.1 ± 0.02	674.1 ± 2.51
	12 - 13	25.2 ± 0.14	69.5 ± 0.44	1.0 ± 0.02	666.4 ± 4.10
	13 - 14	25.1 ± 0.13	69.8 ± 0.27	1.0 ± 0.01	600.2 ± 9.59
	14 - 15	24.6 ± 0.13	71.5 ± 0.31	0.9 ± 0.01	476.9 ± 11.68
	15 - 16	23.3 ± 0.20	74.0 ± 0.54	0.7 ± 0.02	338.5 ± 13.08
16 - 17	21.7 ± 0.22	78.2 ± 0.56	0.6 ± 0.02	163.0 ± 17.24	
17 - 18	19.6 ± 0.13	85.2 ± 0.51	0.3 ± 0.01	22.6 ± 5.94	
20 mayo / 42	7 - 8	17.7 ± 0.05	94.7 ± 0.03	0.1 ± 0.00	33.4 ± 5.23
	8 - 9	19.1 ± 0.21	94.3 ± 0.16	0.1 ± 0.01	162.6 ± 18.01
	9 - 10	21.1 ± 0.17	89.0 ± 0.89	0.3 ± 0.02	337.0 ± 20.31
	10 - 11	22.0 ± 0.10	83.0 ± 0.29	0.5 ± 0.01	538.4 ± 18.6
	11 - 12	22.6 ± 0.07	79.8 ± 0.24	0.6 ± 0.01	616.9 ± 2.28
	12 - 13	22.8 ± 0.11	78.0 ± 0.21	0.6 ± 0.01	630.5 ± 3.10
	13 - 14	22.0 ± 0.19	79.0 ± 0.43	0.6 ± 0.02	462.1 ± 32.4
	14 - 15	20.7 ± 0.08	83.0 ± 0.20	0.4 ± 0.01	244.2 ± 12.9
	15 - 16	20.6 ± 0.06	84.0 ± 0.13	0.4 ± 0.00	167.9 ± 7.10
16 - 17	20.2 ± 0.09	84.6 ± 0.20	0.4 ± 0.01	79.2 ± 8.53	
17 - 18	19.2 ± 0.08	87.5 ± 0.29	0.3 ± 0.01	8.3 ± 2.52	

<<continuación>>

26 mayo / 48	7 - 8	17.2 ± 0.05	94.2 ± 0.08	0.1 ± 0.00	47.7 ± 6.42
	8 - 9	17.9 ± 0.09	91.1 ± 0.46	0.2 ± 0.01	125.2 ± 5.71
	9 - 10	18.3 ± 0.05	89.0 ± 0.13	0.2 ± 0.00	201.3 ± 10.19
	10 - 11	19.7 ± 0.21	83.1 ± 0.94	0.4 ± 0.03	482.1 ± 32.41
	11 - 12	20.8 ± 0.06	77.8 ± 0.31	0.5 ± 0.01	598.1 ± 4.72
	12 - 13	21.1 ± 0.07	76.2 ± 0.33	0.6 ± 0.01	611.9 ± 4.24
	13 - 14	21.6 ± 0.07	73.3 ± 0.36	0.7 ± 0.01	568.7 ± 6.88
	14 - 15	20.7 ± 0.13	76.1 ± 0.45	0.6 ± 0.02	419.5 ± 20.87
	15 - 16	19.0 ± 0.14	82.8 ± 0.68	0.4 ± 0.02	163.0 ± 20.01
	16 - 17	17.9 ± 0.04	88.2 ± 0.23	0.2 ± 0.01	44.5 ± 4.22
17 - 18	17.9 ± 0.01	88.5 ± 0.12	0.2 ± 0.00	13.5 ± 3.04	
2 junio / 55	7 - 8	16.6 ± 0.02	92.4 ± 0.03	0.1 ± 0.00	23.9 ± 3.21
	8 - 9	17.1 ± 0.11	91.0 ± 0.35	0.2 ± 0.01	116.1 ± 18.7
	9 - 10	18.9 ± 0.20	82.8 ± 1.02	0.4 ± 0.03	367.8 ± 15.7
	10 - 11	20.5 ± 0.09	75.1 ± 0.37	0.6 ± 0.01	513.9 ± 10.5
	11 - 12	21.1 ± 0.10	71.9 ± 0.48	0.7 ± 0.02	605.2 ± 5.12
	12 - 13	22 ± 0.13	67.8 ± 0.51	0.9 ± 0.02	627.5 ± 2.73
	13 - 14	22.4 ± 0.12	65.9 ± 0.43	0.9 ± 0.02	569.7 ± 7.66
	14 - 15	21.6 ± 0.05	69.4 ± 0.26	0.8 ± 0.01	462.5 ± 12.0
	15 - 16	21.4 ± 0.05	69.9 ± 0.25	0.8 ± 0.01	314.0 ± 14.4
	16 - 17	19.7 ± 0.26	76.4 ± 0.98	0.5 ± 0.03	149.0 ± 13.9
17 - 18	17.5 ± 0.12	84.9 ± 0.58	0.3 ± 0.01	27.4 ± 6.75	
9 junio / 62	7 - 8	16.3 ± 0.02	94.3 ± 0.05	0.1 ± 0.00	23.3 ± 3.80
	8 - 9	16.5 ± 0.05	93.5 ± 0.14	0.1 ± 0.00	58.6 ± 6.01
	9 - 10	17.4 ± 0.10	89.7 ± 0.56	0.2 ± 0.01	165.6 ± 9.55
	10 - 11	18.0 ± 0.03	85.3 ± 0.18	0.3 ± 0.00	203.8 ± 2.61
	11 - 12	18.4 ± 0.08	82.2 ± 0.44	0.4 ± 0.01	302.5 ± 16.7
	12 - 13	19.1 ± 0.09	78.3 ± 0.30	0.5 ± 0.01	484.7 ± 40.6
	13 - 14	20.1 ± 0.06	74.4 ± 0.26	0.6 ± 0.01	614.7 ± 15.2
	14 - 15	20.5 ± 0.06	72.5 ± 0.21	0.7 ± 0.01	514.7 ± 12.9
	15 - 16	20.4 ± 0.03	72.5 ± 0.17	0.7 ± 0.00	350.2 ± 16.1
	16 - 17	19.3 ± 0.18	76.5 ± 0.63	0.5 ± 0.02	183.5 ± 12.6

ANEXO 3: Condiciones meteorológicas reinantes (cada 5 minutos) correspondientes a las evaluaciones de T_h y g_{s_max} del primer experimento realizado el 28, 35, 42, 48, 55 y 62 días después de la siembra (DDS). Temperatura del aire (T_a), déficit de presión de vapor (VPD), radiación solar (R_s) y velocidad del viento (V_v) medio a 2m de altura sobre el nivel del suelo.



ANEXO 4: Características técnicas de la cámara térmica (FLIR, E60) y del termómetro infrarrojo (CEM DT-8865) usado en los 2 experimentos realizados.

Características técnicas	FLIR E60	CEM DT-882
Resolución de IR	320 x 240 pixeles	1 pixel
Sensibilidad térmica	< 0.05°C a +30°C / 50 mK	
Campo de visión	25° x 19°	8:1 distancia al tamaño del objeto
Distancia mínima de enfoque	0.4 m	
Tiempo de respuesta	60 Hz de frecuencia de imagen	Menor a 1 segundo
Tipo de detector	Microbolómetro no refrigerado (cambio de	Termopila (cambio de voltaje)
Rango espectral	7.5 - 13µm	8 - 14µm
Rango de temperatura de objetos	-20°C a +120°C	-50°C a +700°C
Precisión	±2°C o ±2% de lectura para temperatura ambiente	±2°C o ±2% de lectura
Corrección de emisividad	Variable de 0.01 a 1.0	Fijo en 0.95
Correcciones de medición	Temperatura reflejada, transmisión de la óptica y	
Cámara digital integrada	3.1Mpixeles /lente de 53°	
Tipo de laser	Diodo láser semiconductor de AlGainP	Diodo laser
Batería	Recargable de ion litio, 4 hora de duración	Batería de 9V
Rango de temperatura / humedad de funcionamiento	-15°C a +50°C / IEC 60068-2-30/24 h 95%, +25°C a +40°C / 2 ciclos	0 a 50°C / 10 a 90 %
Rango de temperatura / humedad de almacenamiento	-40°C a +70°C / IEC 60068-2-30/24 h 95%, +25°C a +40°C	-10 a 60°C / < 80%
Peso con batería	0.825 kg	0.177 kg
Dimensiones (Longitud x Ancho x Alto)	246 × 97 × 184 mm	160 x 42 x 82 mm

ANEXO 5: Obtención de muestras superficiales de suelo en la parcela experimental (a) y su posterior análisis en el laboratorio (b y c) de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente – Departamento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina.



ANEXO 6: Caracterización espacial del suelo superficial del campo experimental (Campo 2 del CIP), las muestras fueron extraídas el 30 de setiembre del 2016 y analizadas en el Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente – Departamento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina.

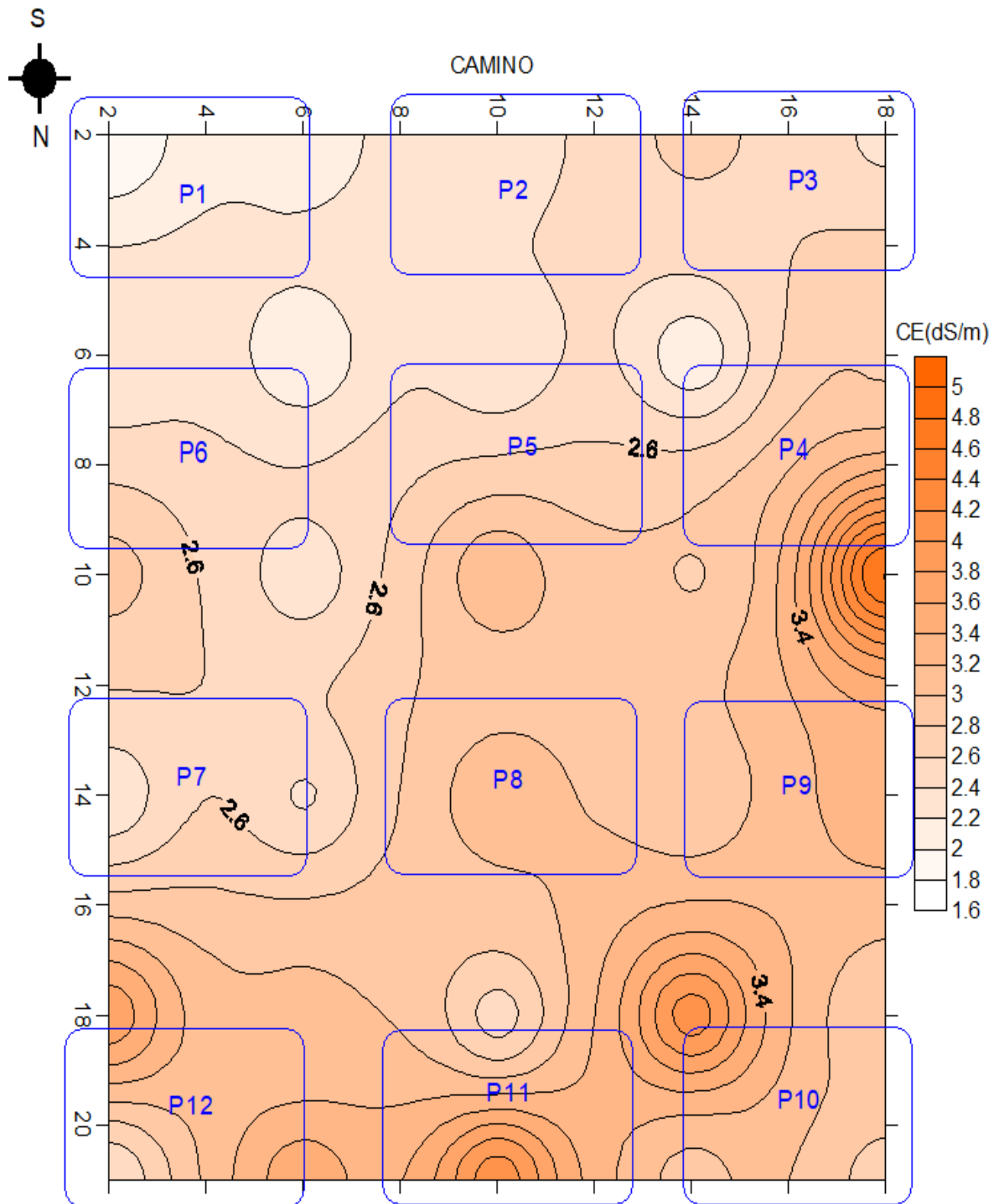
ANEXO 6.1: Conductividad eléctrica CE (dS m^{-1} medido con relación 1:1)

ANEXO 6.2: Materia orgánica MO (%)

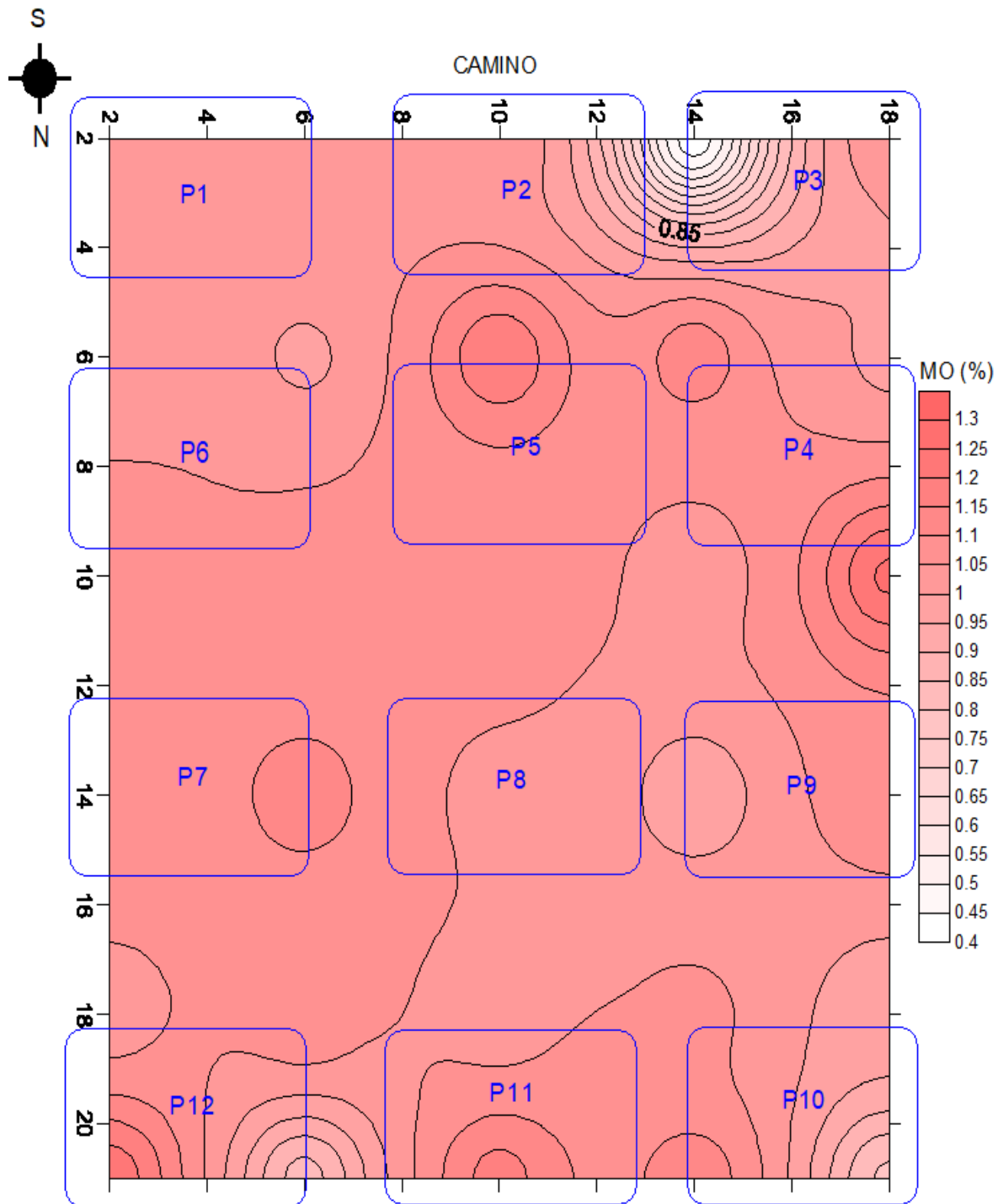
ANEXO 6.3: Potasio

ANEXO 6.4: Fósforo

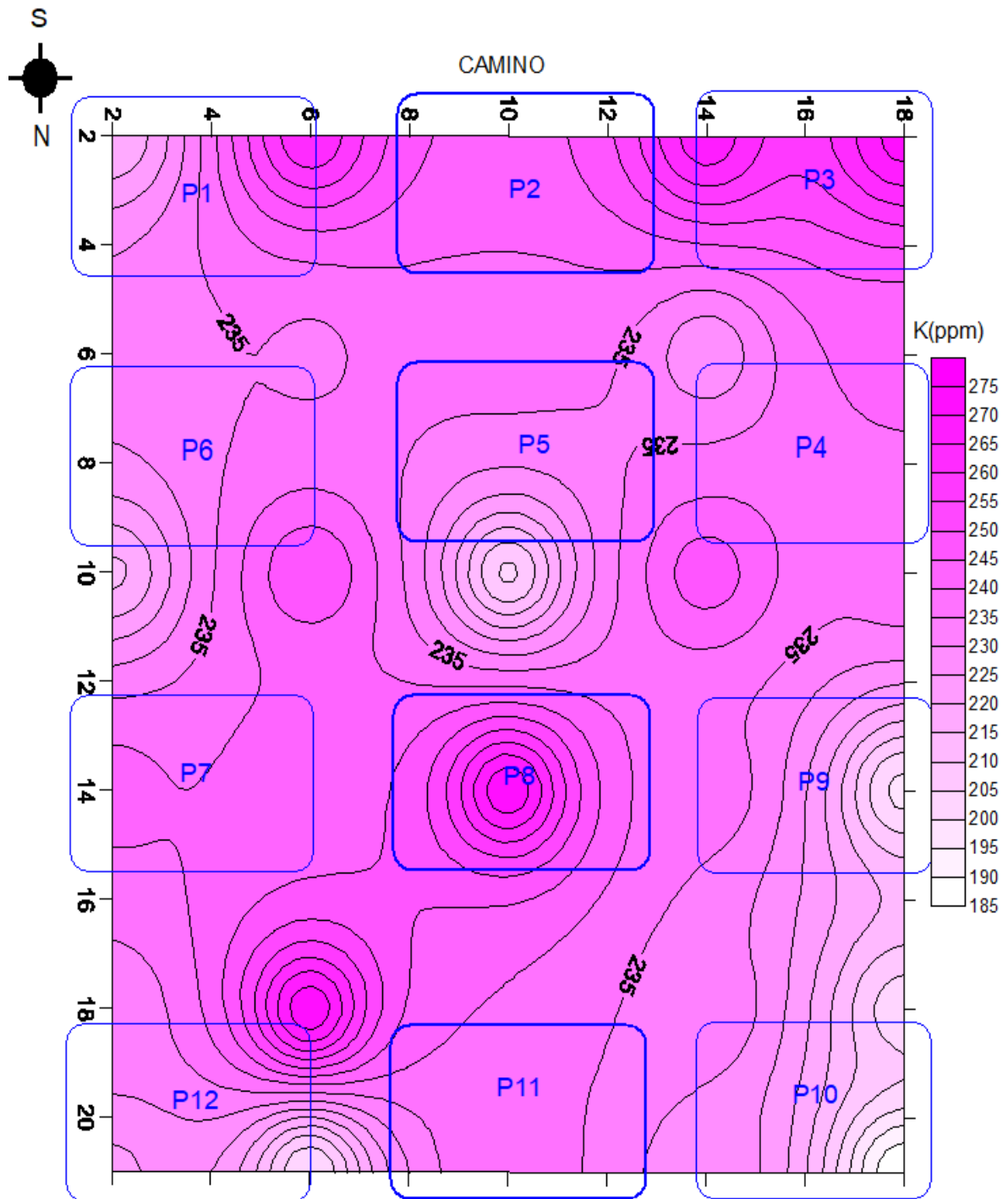
ANEXO 6.1: Conductividad eléctrica CE (dS m⁻¹ medido con relación 1:1)



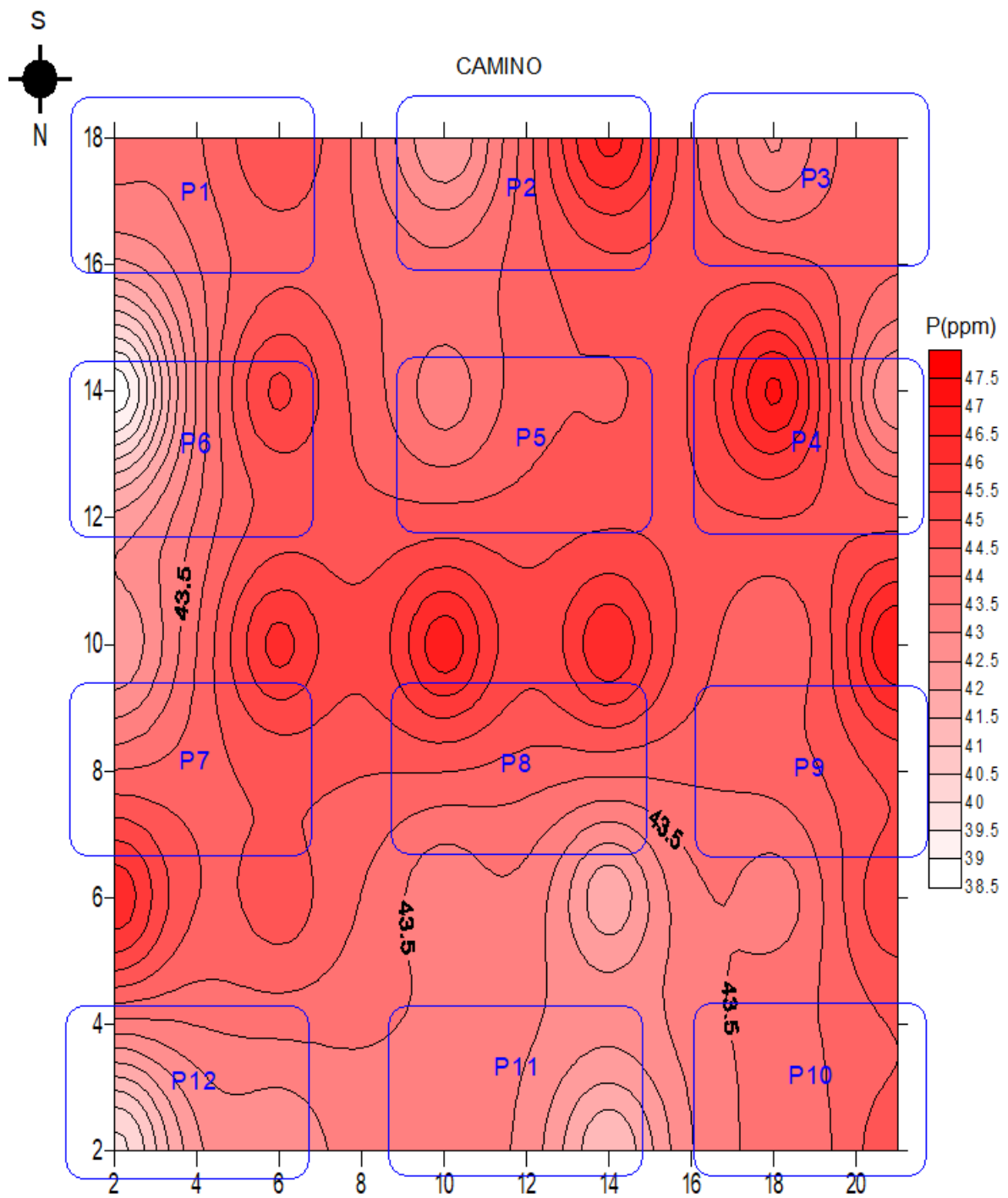
ANEXO 6.2: Materia orgánica, MO (%)



ANEXO 6.3: Potasio, K (ppm)



ANEXO 6.4: Fósforo, P (ppm)



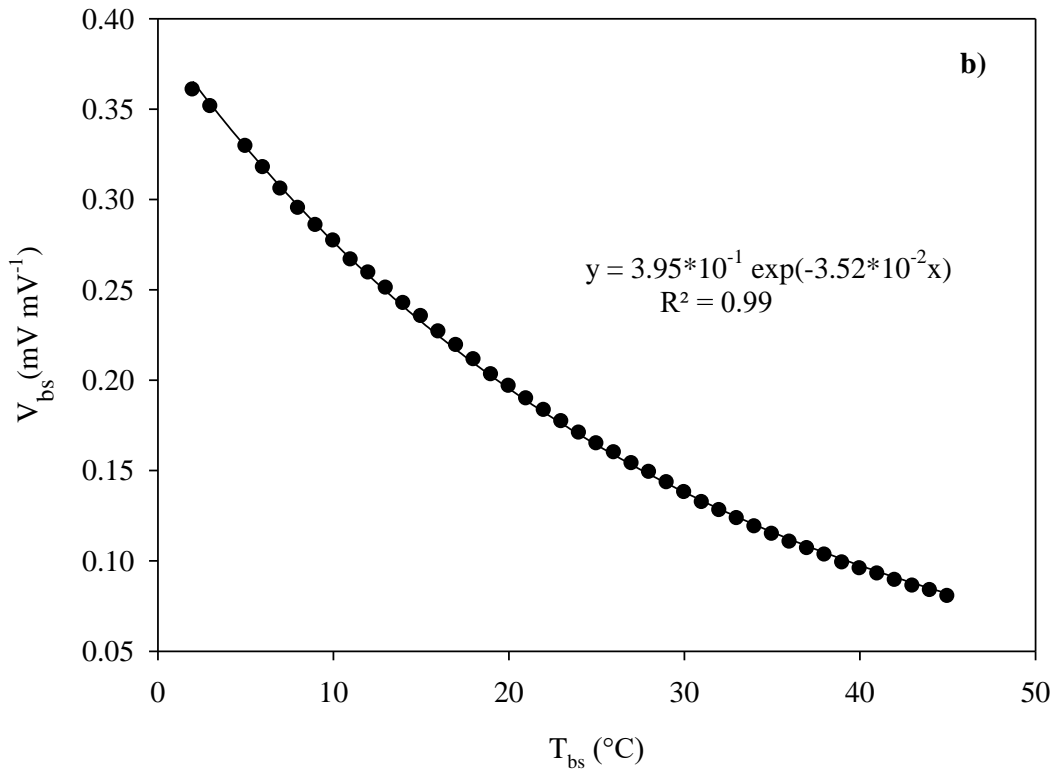
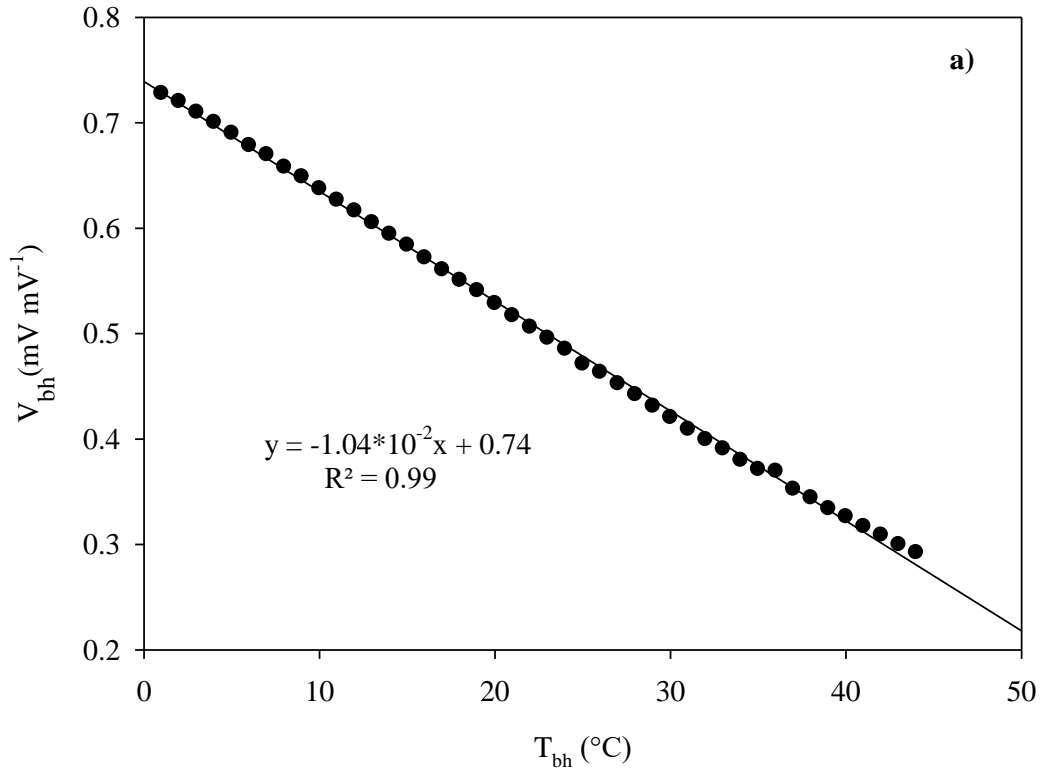
ANEXO 7: Preparación del área inundada ($1.2 \times 1 \text{ m}^2$) y su cubrimiento con plástico (a), para la realización de una calicata de 0.5 m de profundidad (b) para la obtención de muestras de suelo en un cilindro muestreador para la evaluación de las propiedades físicas del suelo (humedad volumétrica a capacidad de campo y densidad aparente) en los niveles de 0, 0.1, 0.25 y 0.4 m. en la parcela experimental.



- ANEXO 8:** Principales resultados obtenidos en el experimento de campo llevado a cabo entre octubre de 2016 a enero de 2017.
- ANEXO 8.1: Ecuaciones de calibración de los sensores de temperatura de bulbo húmedo (a) y seco (b), preparados en base a termistores de $2\text{ k}\Omega$ ($1/4\text{ W}$). Con una configuración *Half Bridge* en la plataforma colectora de datos de marca Campbell, modelo CR 1000.
- ANEXO 8.2: Condiciones meteorológicas reinantes en el experimento. Promedio \pm error estándar. VPD: Déficit de presión de vapor.
- ANEXO 8.3: Comportamiento de la conductancia estomática máxima (g_{s_max}) a lo largo de la etapa de crecimiento del cultivo de papa, obtenidos para 12 parcelas bajo tres tratamientos de riego por goteo: T₁ control (a), T₂ ($0.150\text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{ s}^{-1}$) (b) y T₃ ($0.050\text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{ s}^{-1}$) (c). Lr, láminas de riego aplicado y DDS, días después de la siembra.
- ANEXO 8.4: Diagrama de cajas de la conductancia estomática máxima (g_{s_max}) y del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), medida en las 12 parcelas desde a los 39 al 81 días después de la siembra.
- ANEXO 8.5: Relación entre la conductancia estomática máximas (g_{s_max}) y el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) para el cultivo de papa, realizadas en 6 evaluaciones correspondientes a los 37, 43, 51, 57, 64 y 78 días después de la siembra.
- ANEXO 8.6: Recuperación de fotosíntesis (A_{Recup}) para cada una de las parcelas, en dos tratamientos de restricción de agua T₂ correspondiente a los pulsos de agua de 51, 63 y 70 DDS (a) y T₃ a los pulsos de agua en los 63, 64, 70, 77 y 78 DDS (b).
- ANEXO 8.7: Comportamiento del potencial mátrico del suelo (Ψ_m) a lo largo de la etapa de crecimiento del cultivo de papa, obtenidos para 12 parcelas. DDS: Días después de la siembra.
- ANEXO 8.8: Comportamiento del potencial hídrico de la hoja (Ψ_{Hoja}) a lo largo de la etapa de crecimiento del cultivo, obtenidos para 12 parcelas en las cuales se testaron tres tratamiento de riego por goteo: T₁ capacidad de campo o control (a), T₂ con un g_{s_max} de $0.15\text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ (b) y T₃ con un umbral de g_{s_max} de $0.05\text{ mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ (c). Lr, láminas de riego aplicado y DDS, días después de la siembra.

- ANEXO 8.9: Comportamiento de la discriminación de isótopos de carbono de hoja (Δ_{hoja}) a lo largo de la etapa de crecimiento del cultivo de papa, obtenidos en 12 parcelas en las cuales se testaron tres tratamientos de riego por goteo: T₁ capacidad de campo o control (a), T₂ con un g_{s_max} de 0.15 mol H₂O m⁻² s⁻¹ (b) y T₃ con un umbral de g_{s_max} de 0.05 mol H₂O m⁻² s⁻¹ (c). Láminas de riego aplicado (Lr) y DDS, días después de la siembra.
- ANEXO 8.10: Discriminación de isótopos estables de carbono de hoja (Δ_{hoja}) correspondiente a las 7 evaluaciones desde 37 a 78 días después de la siembra (DDS) evaluado por parcela (a) y diagrama de dispersión entre la evaluación de isótopos de carbono de tubérculo (Δ_{tuberc}) con el rendimiento de biomasa seca de tubérculo (BST) evaluados por parcela (b).
- ANEXO 8.11: Relación lineal entre la diferencia de temperatura promedio de hoja y el aire ($T_h - T_a$) con el déficit de presión de vapor (kPa), durante las 24 horas en un intervalo de cinco minutos, correspondiente a los 51, 57, 64 y 71 DDS (a). Relación lineal entre la diferencia de temperatura de follaje y el aire ($T_f - T_a$) con el déficit de presión de vapor (VPD) en parcelas con riego óptimo o a capacidad de campo (control, T₁) y en condición de restricción de agua (sequía, T₃), correspondiente.
- ANEXO 8.12: Rendimiento por peso fresco y otras variables recogidas en la cosecha de la campaña experimental de octubre de 2016 a enero de 2017, donde: Biomasa seca de tubérculo (BST), Porcentaje de biomasa seca de tubérculo (BS) y rendimiento en peso fresco (Ypf).

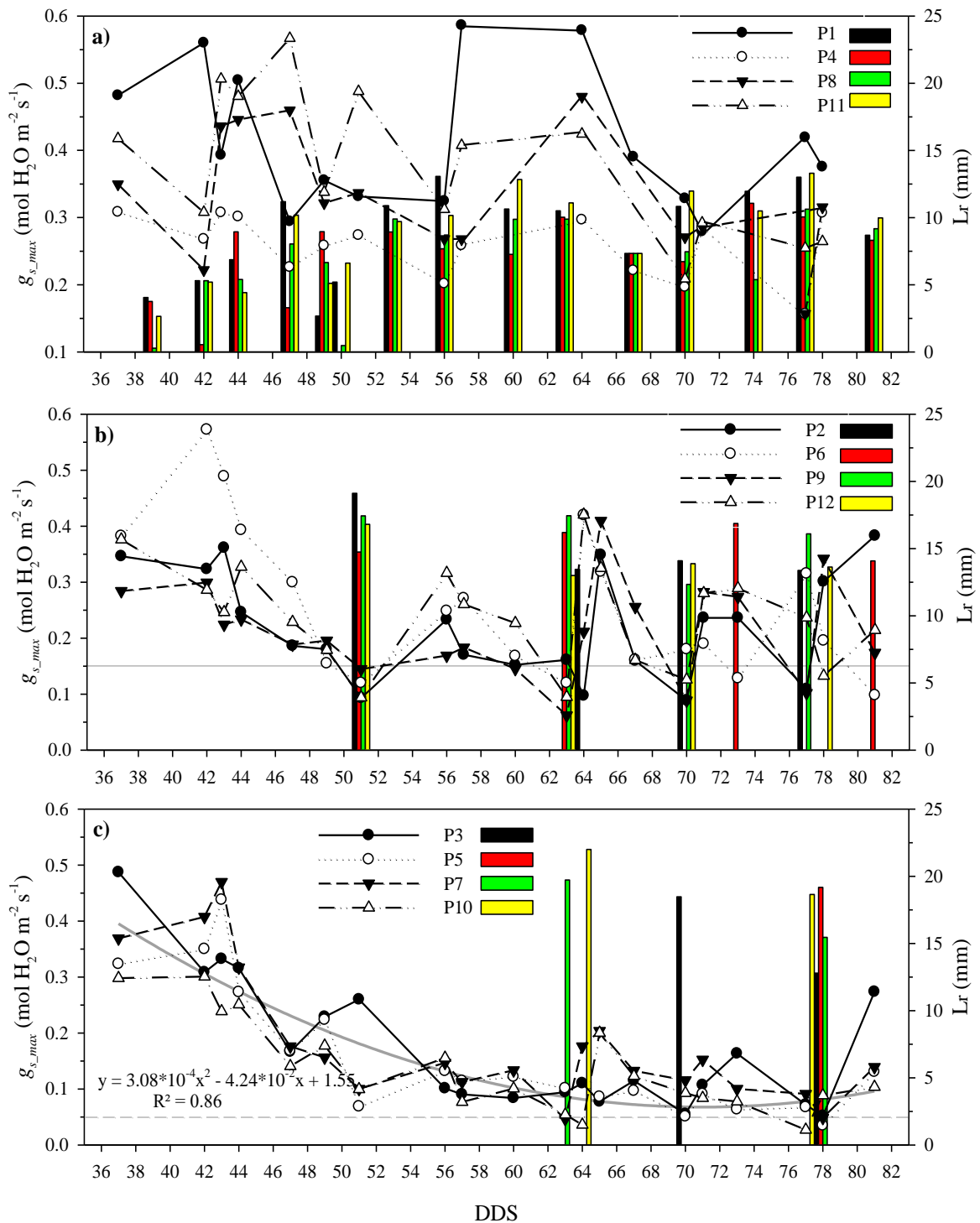
ANEXO 8.1: Ecuaciones de calibración de los sensores de temperatura de bulbo húmedo (a) y seco (b), preparados en base a termistores de 2 k Ω (1/4 W). Con una configuración Half Bridge en la plataforma colectora de datos de marca Campbell, modelo CR 1000.



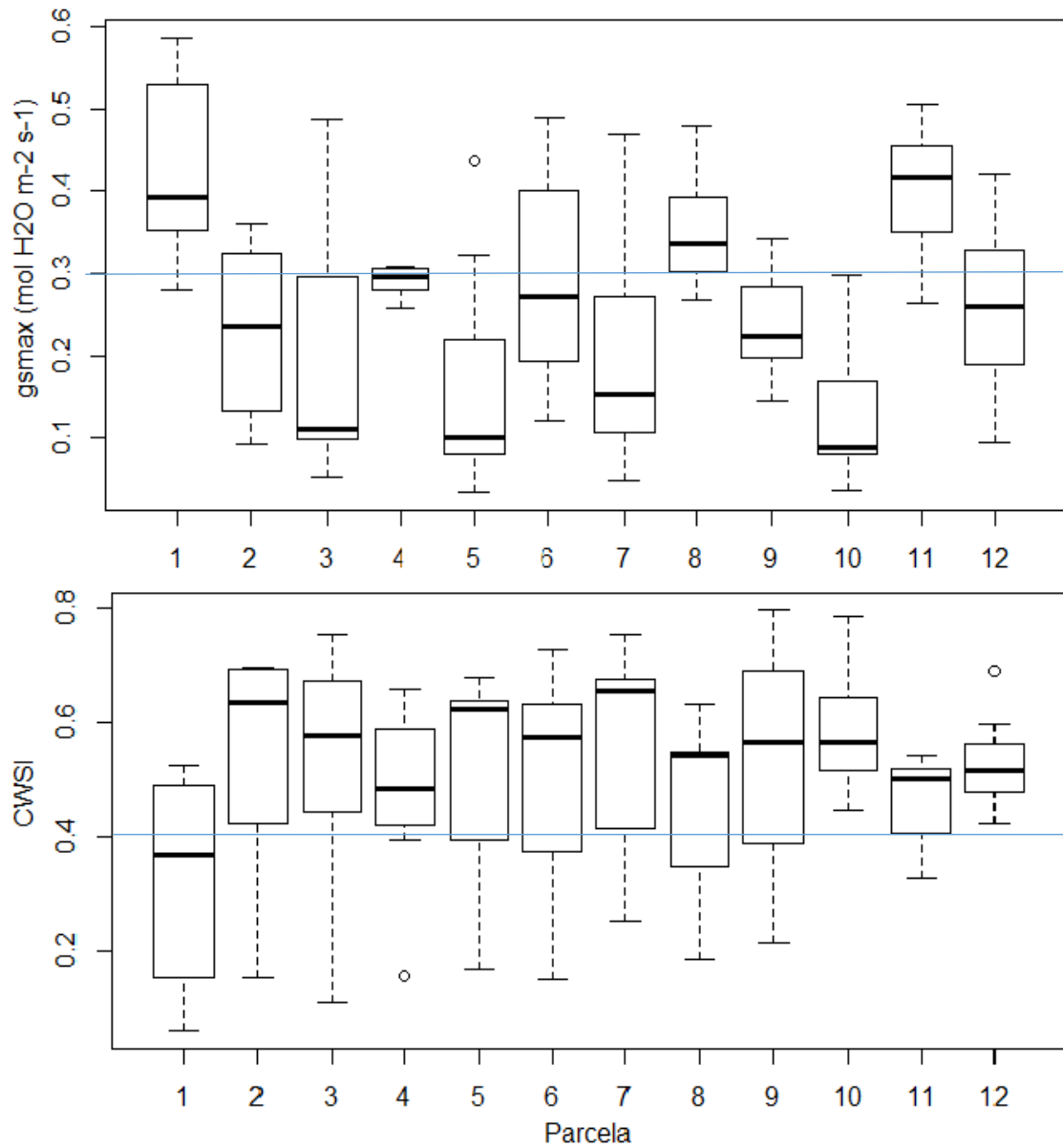
ANEXO 8.2: Condiciones meteorológicas reinantes en el experimento. Promedio \pm error estándar. VPD: Déficit de presión de vapor.

	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
Temperatura mínima (°C)	15.7 \pm 0.08	16.3 \pm 0.19	18.4 \pm 0.15	20.7 \pm 0.26
Temperatura máxima (°C)	22.0 \pm 0.25	24.1 \pm 0.25	26.3 \pm 0.22	28.7 \pm 0.46
Humedad relativa (%)	81.4 \pm 0.64	78.0 \pm 0.48	77.3 \pm 0.43	72.0 \pm 1.68
Radiación solar global (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	13.0 \pm 0.73	19.8 \pm 0.66	19.8 \pm 0.59	18.3 \pm 0.62
VPD promedio (kPa)	0.4 \pm 0.02	0.5 \pm 0.01	0.6 \pm 0.02	0.9 \pm 0.07
VPD máximo (kPa)	0.9 \pm 0.03	1.1 \pm 0.03	1.4 \pm 0.04	1.8 \pm 0.12

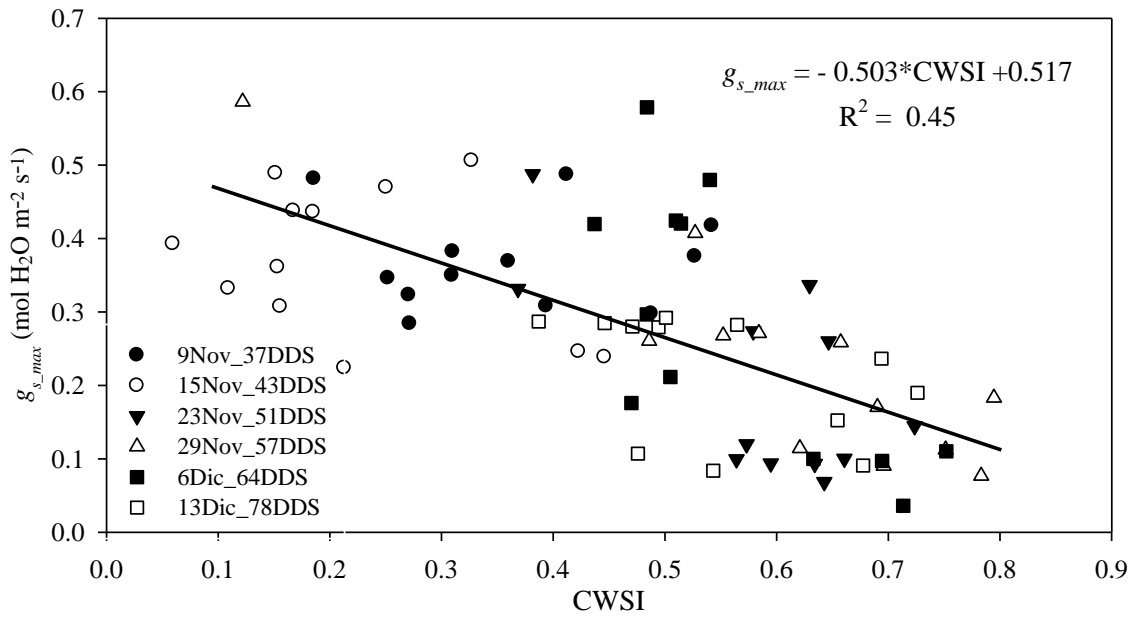
ANEXO 8.3: Comportamiento de la conductancia estomática máxima (g_{s_max}) a lo largo de la etapa de crecimiento del cultivo de papa, obtenidos para 12 parcelas bajo tres tratamientos de riego por goteo: T₁ control (a), T₂ (0.150 mol H₂O m⁻² s⁻¹) (b) y T₃ (0.050 mol H₂O m⁻² s⁻¹) (c). L_r, láminas de riego aplicado y DDS, días después de la siembra.



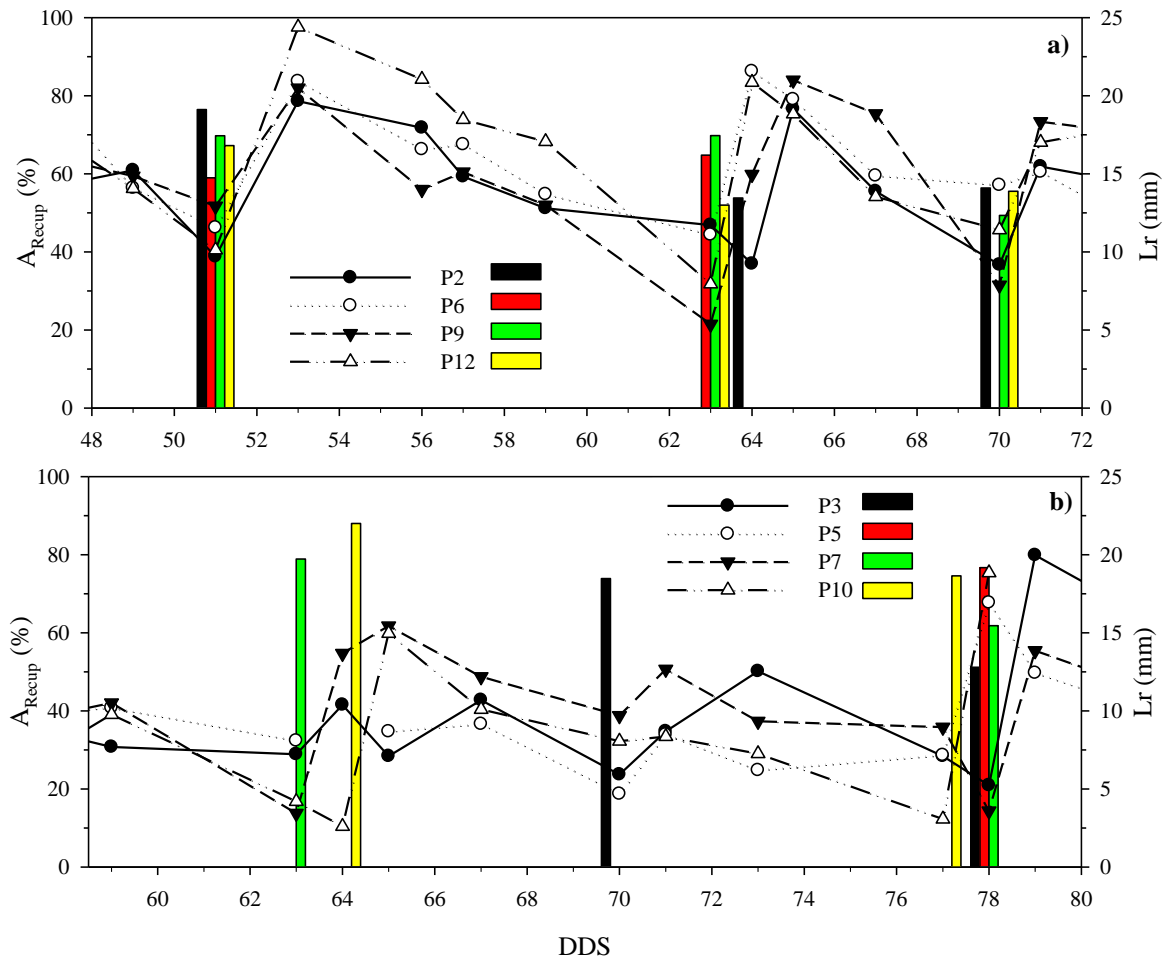
ANEXO 8.4: Diagrama de cajas de la conductancia estomática máxima (g_{s_max}) y del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), medida en las 12 parcelas desde el 39 a los 81 días después de la siembra.



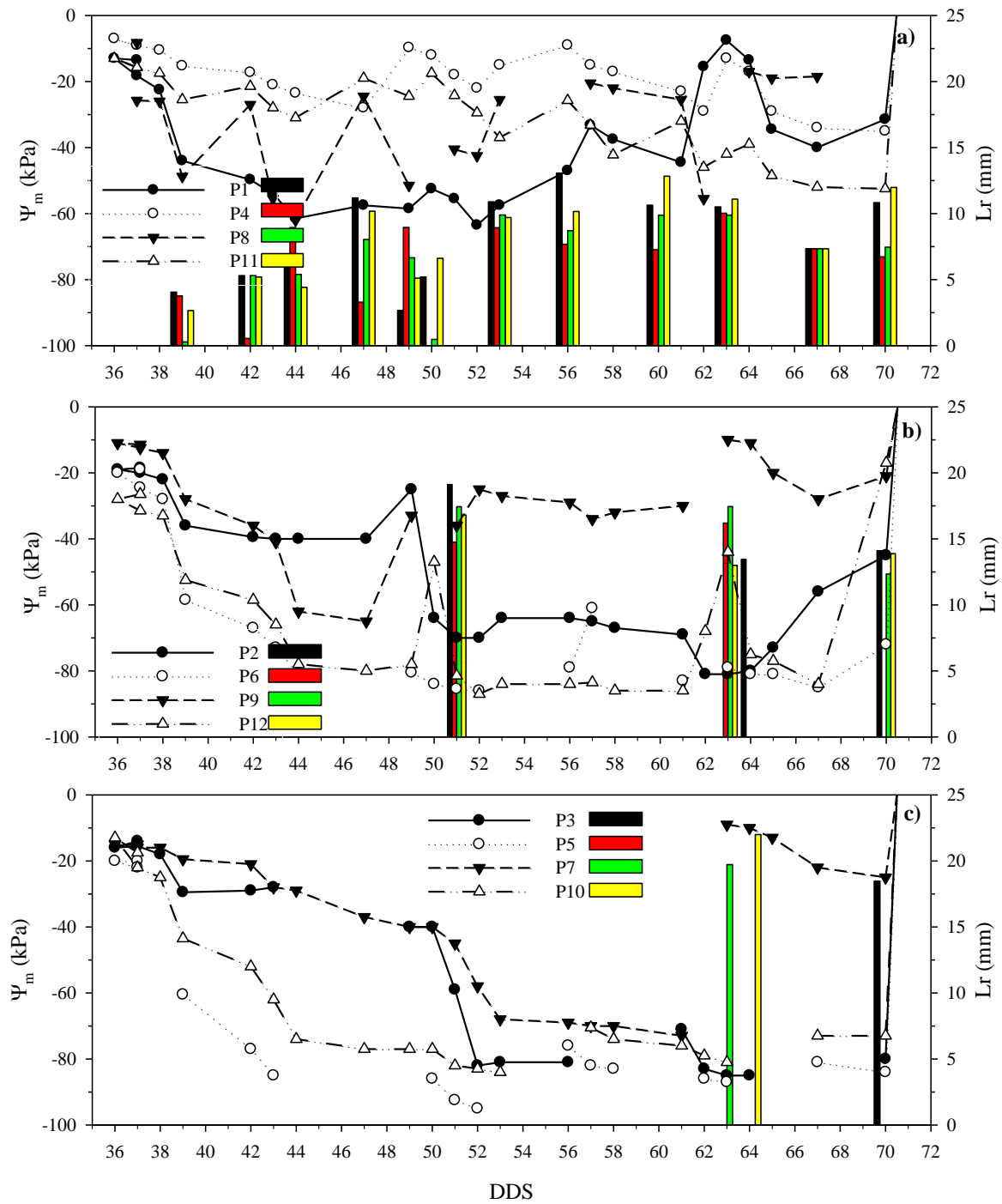
ANEXO 8.5: Relación entre la conductancia estomática máximas (g_{s_max}) y el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) para el cultivo de papa, realizadas en 6 evaluaciones correspondientes a los 37, 43, 51, 57, 64 y 78 días después de la siembra.



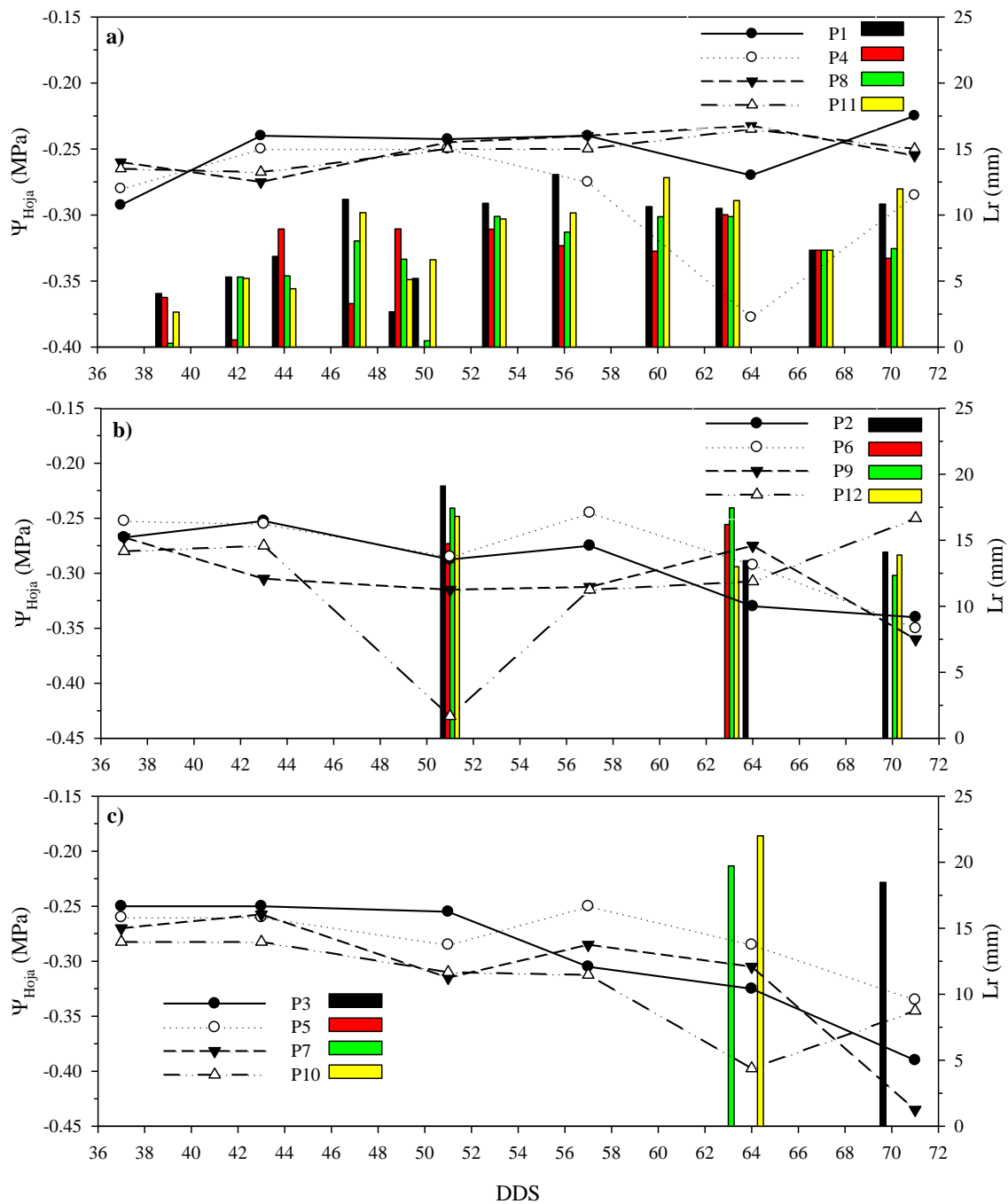
ANEXO 8.6: Recuperación de fotosíntesis (A_{Recup}) para cada una de las parcelas, en dos tratamientos de restricción de agua T₂ correspondiente a los pulsos de agua de 51, 63 y 70 DDS (a) y T₃ a los pulsos de agua en los 63, 64, 70, 77 y 78 DDS (b).



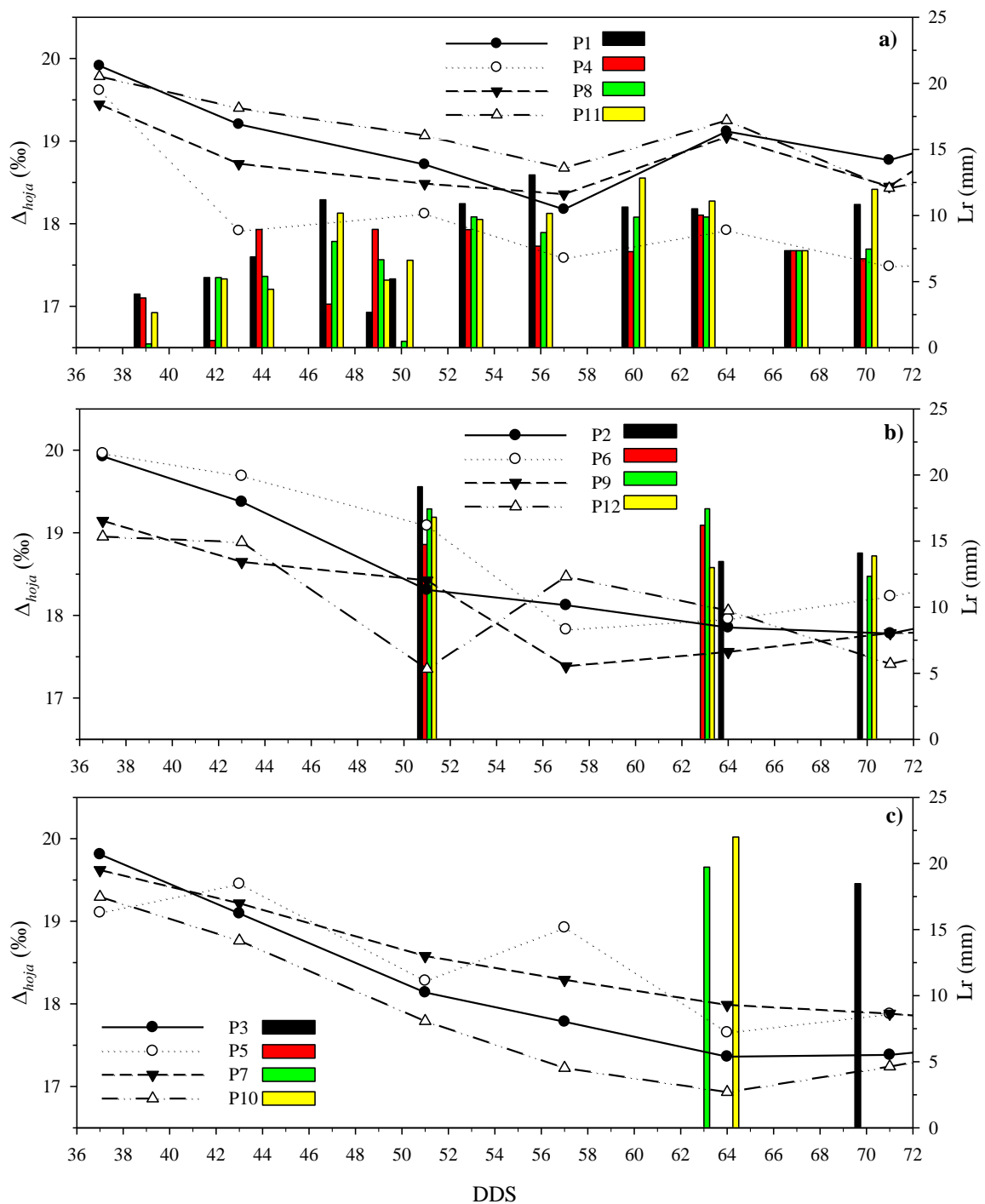
ANEXO 8.7: Comportamiento del potencial mátrico del suelo (Ψ_m) a lo largo de la etapa de crecimiento del cultivo de papa, obtenidos para 12 parcelas. DDS: Días después de la siembra.



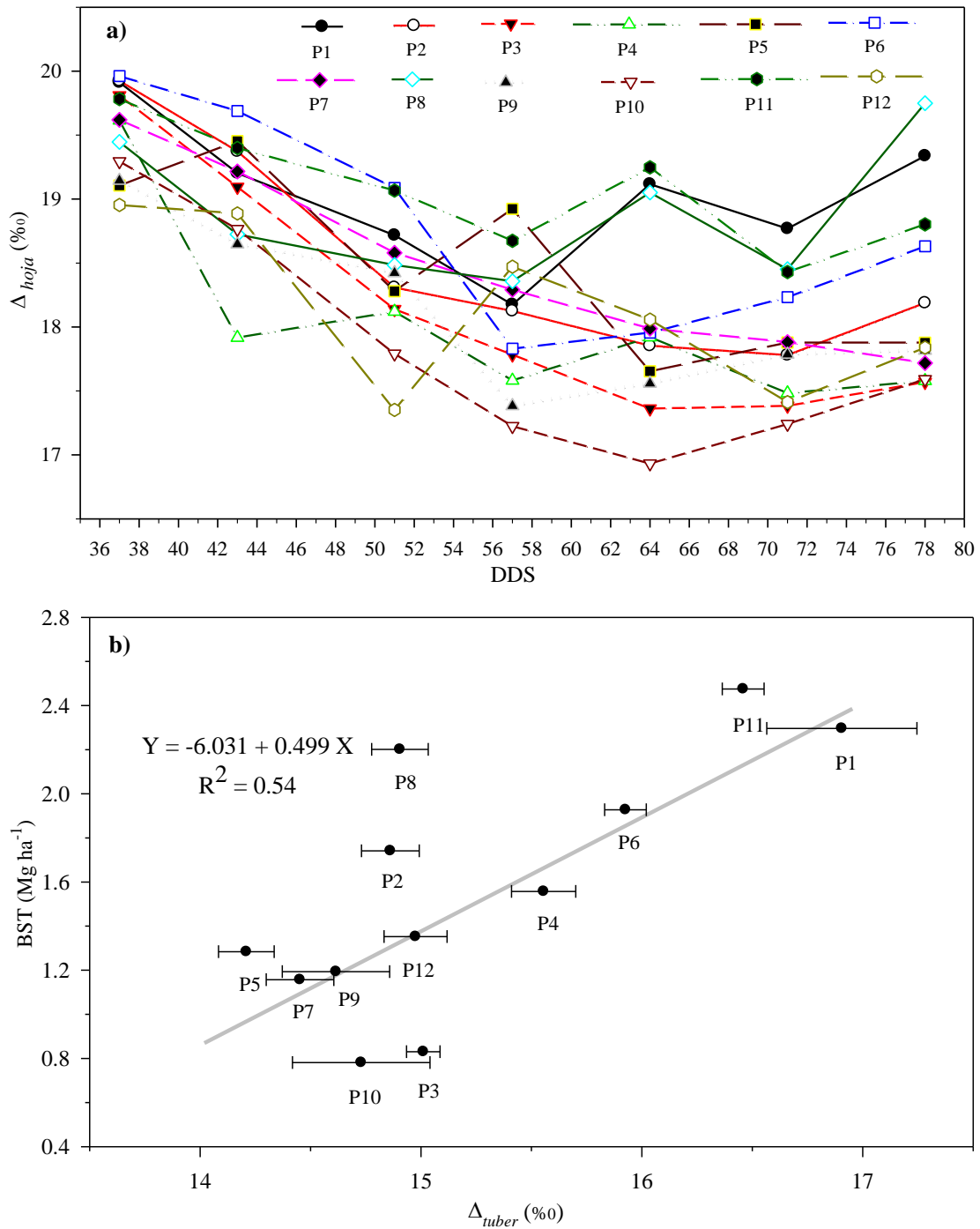
ANEXO 8.8: Comportamiento del potencial hídrico de la hoja (Ψ_{Hoja}) a lo largo de la etapa de crecimiento del cultivo, obtenidos para 12 parcelas en las cuales se testaron tres tratamiento de riego por goteo: T₁ capacidad de campo o control (a), T₂ con un g_{s_max} de $0.15 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (b) y T₃ con un umbral de g_{s_max} de $0.05 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (c). Lr, láminas de riego aplicado y DDS, días después de la siembra.



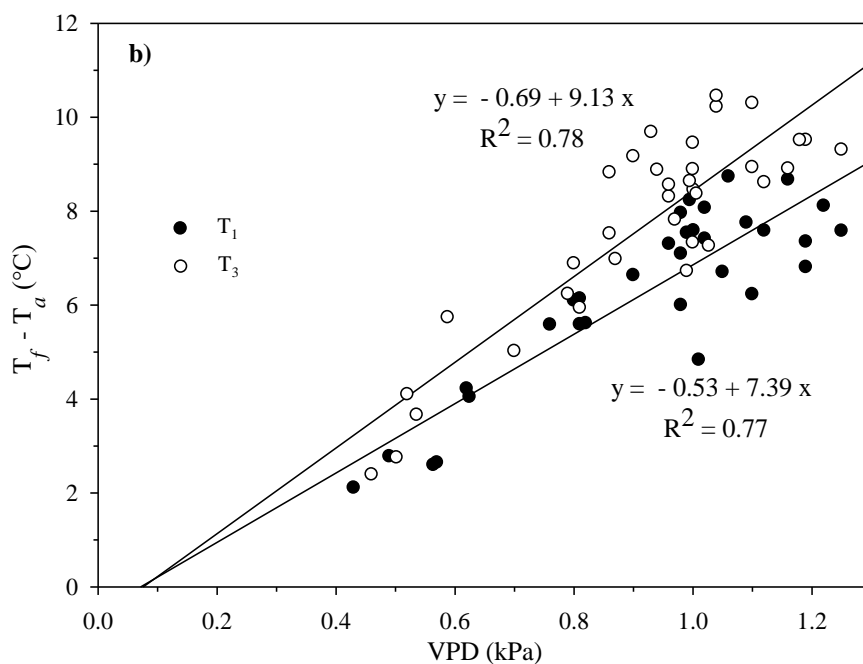
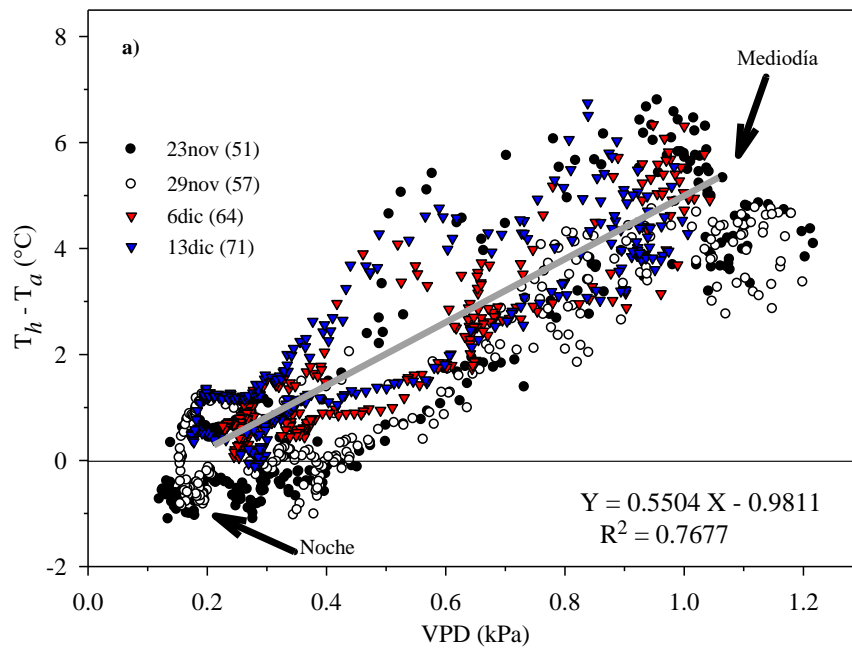
ANEXO 8.9: Comportamiento de la discriminación de isótopos de carbono de hoja (Δ_{hoja}) a lo largo de la etapa de crecimiento del cultivo de papa, obtenidos en 12 parcelas en las cuales se testaron tres tratamiento de riego por goteo: T₁ capacidad de campo o control (a), T₂ con un g_{s_max} de 0.15 mol H₂O m⁻² s⁻¹ (b) y T₃ con un umbral de g_{s_max} de 0.05 mol H₂O m⁻² s⁻¹ (c). Láminas de riego aplicado (Lr) y DDS, días después de la siembra.



ANEXO 8.10: Discriminación de isótopos estables de carbono de hoja (Δ_{hoja}) correspondiente a las 7 evaluaciones desde 37 a 78 días después de la siembra (DDS) evaluado por parcela (a) y diagrama de dispersión entre la evaluación de isótopos de carbono de tubérculo (Δ_{tuber}) con el rendimiento de biomasa seca de tubérculo (BST) evaluados por parcela (b).



ANEXO 8.11: Relación lineal entre la diferencia de temperatura promedio de hoja (medido con termocuplas) y el aire ($T_h - T_a$) con el déficit de presión de vapor (kPa), durante las 24 horas en un intervalo de cinco minutos para los 51, 57, 64 y 71 DDS (a). Relación lineal entre la diferencia de temperatura de follaje (medido con la cámara térmica) y el aire ($T_f - T_a$) con el déficit de presión de vapor (VPD) en parcelas a capacidad de campo (control, T_1) y en condición de restricción de agua (sequía, T_3) (b).



ANEXO 8.12: Rendimiento por peso fresco y otras variables recogidas en la cosecha de la campaña experimental de octubre de 2016 a enero de 2017, donde: Biomasa seca de tubérculo (BST), Porcentaje de biomasa seca de tubérculo (BS) y rendimiento en peso fresco (Ypf).

Parcela	Tratamiento	BST (Mg ha ⁻¹)	BS (%)	Peso Fresco (kg)	Ypf (Mg ha ⁻¹)	# tubérculo	Diámetro tuber (cm)	# tuber. con gusano (%)	# tuber en pudrición (%)	# Plantas sin cosechar (%)
11	T1BIV	2.48	19.1	23.33	13.0	279	3.9	11	0	1
1	T1BI	2.30	16.2	25.46	14.1	544	4.0	40	1	0
8	T1BIII	2.20	16.8	23.54	13.1	376	3.7	9	2	2
6	T2BII	1.93	18.5	18.76	10.4	338	3.4	3	0	3
2	T2BI	1.74	16.1	19.42	10.8	636	3.5	12	3	1
4	T1BII	1.56	17.1	16.38	9.1	226	3.4	8	14	4
12	T2BIV	1.35	20.3	11.99	6.7	192	3.2	0	0	5
5	T3BII	1.28	20.0	11.54	6.4	313	3.1	1	2	0
9	T2BIII	1.19	18.0	11.97	6.6	286	2.8	5	0	3
7	T3BIII	1.16	17.9	11.66	6.5	298	2.9	0	0	1
3	T3BI	0.83	17.5	8.56	4.8	379	2.5	4	0	13
10	T3BIV	0.78	18.8	7.47	4.1	166	2.3	1	0	5

ANEXO 9: Adquisición de imágenes térmicas de follaje (a) y medición de la temperatura de follaje con el termómetro infrarrojo CEM DT-8865 (b), realizado en el campo experimental de la campaña de octubre de 2016 a enero de 2017.



ANEXO 10: Prueba de uniformidad de presión y determinación del caudal de gotero del sistema de riego por goteo (a) y evaluación con el medidor de fotosíntesis portátil LI-6400 (b) en la parcela experimental de la campaña de octubre de 2016 a enero de 2017.



ANEXO 11: Comunicación por correo electrónico (h.g.jones@dundee.ac.uk) sobre la estimación de T_s ($T_{dry} = T_a + 13$) y de la sensibilidad del CWSI con Hamlyn G. Jones, profesor Emérito de Ecología Vegetal de la División de Ciencias de las Plantas de la Universidad de Dundee (móvil: 07749 880650) y Profesor Adjunto de la Escuela de Agricultura y Medio Ambiente de la Universidad Western Australia.

Sábado, 25 de noviembre de 2017 04:15 a.m.

Setting T_{dry} as $T_{air} + 13$ is certainly extreme in my experience – but it is possible for a very high radiation environment with very low windspeed and very large leaves. The standard is to assume $T_{air} + 5C$ (Irmak et al 2000 AgronJ Determination of crop water stress index for irrigation in corn) - though this is not very good for many crops. Your choice of 13C seems sensible if leaves can get 12C hotter than the air in your environment. It is worth noting that CWSI can indicate stress in well watered plants at midday with a very dry environment.

Domingo, 26 de noviembre de 2017 05:16 a.m.

These results show rather little difference between the treatment in CWSI – with none of the treatments being particularly stressed. Was this correct? If the plants were severely stressed I would have expected higher CWSI values. The fact that high CWSI values were not observed could also have arisen from a too high a temperature for the dry reference.

Domingo 26 de noviembre de 2017 04:39 p.m

It is also worth checking that the references are mimicking the canopy well (i.e. That they have the same solar absorptance – by checking against the vaseline-covered leaves). It seems that the treatment effects are not very large, presumably because the crop is getting water from deep in the soil, which takes some time to dry out.

ANEXO 12: Condiciones meteorológicas reinantes registradas por la estación meteorológica del CIP correspondiente al año 2016, 2017 y el periodo 2013-2017. Temperatura del aire (T_a), humedad relativa (HR), déficit de presión de vapor máximo (VPD_{max}).

