



Universidad Metropolitana de Ciencias de la Educación
Facultad de Ciencias Básicas
Departamento de Biología

Caracterización de la respuesta electrofisiológica en *Lycopersicon esculentum* sometida a estrés hídrico

MEMORIA DE TÍTULO PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIATURA EN
EDUCACIÓN EN BIOLOGÍA Y PEDAGOGÍA EN BIOLOGÍA CON MENCIÓN EN
CIENCIAS NATURALES

CLAUDIA ACOSTA RIQUELME

CONSTANZA CALFUÑANCO GODOY

PROFESOR GUÍA: DR. RICARDO PIÑA MUÑOZ

PROFESOR CO-TUTOR: DR. PATRICIO ROJAS MONTECINOS

Santiago-Chile

2024

Caracterización de la respuesta electrofisiológica en *Lycopersicon esculentum* sometida a estrés hídrico.

MEMORIA DE TÍTULO PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIATURA EN
EDUCACIÓN EN BIOLOGÍA Y PEDAGOGÍA EN BIOLOGÍA CON MENCIÓN EN
CIENCIAS NATURALES

CLAUDIA ACOSTA RIQUELME

CONSTANZA CALFUÑANCO GODOY

PROFESOR GUÍA: DR. RICARDO PIÑA MUÑOZ

PROFESOR CO-TUTOR: DR. PATRICIO ROJAS MONTECINOS

Aprobada:

Profesor/a guía : _____

Profesor/a corrector : _____

Profesor/a corrector : _____

Aprobada:

**Director/a del
Departamento de Biología** : _____

Fecha : _____

Fecha : _____

Fecha : _____

Fecha : _____

Agradecimientos

Agradecemos a nuestras familias quienes nos apoyaron a lo largo de nuestra formación académica, siempre con amor y comprensión.

A nuestras amistades, por su incondicionalidad, compañerismo y profesionalismo compartido durante la carrera.

A nuestras parejas, que con su amor, nos sostuvieron cuando se presentaron dificultades, otorgando un apoyo cálido e incondicional.

A nuestro profesor guía Ricardo Piña quien nos acompañó, guió y aconsejó en este proceso de finalización.

A nuestro profesor co-autor Dr. Patricio Montecinos por contribuir al análisis y desarrollo de nuestro trabajo experimental.

A Timothy Marzullo por darnos a conocer su software y línea de investigación.

A nuestra directora de carrera la Dr. Catalina Sabando por la paciencia, comprensión y cariño.

Por último, a FONDECYT iniciación 11230488 por fomentar y promover el desarrollo científico y tecnológico.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	3
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE GRÁFICOS.....	7
RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	14
1.1 Planteamiento del problema.....	14
1.2 Justificación de la investigación.....	15
1.3 Pregunta de investigación.....	15
1.4 Objetivo(s) de la investigación.....	16
1.4.1 Objetivo(s) generales	16
1.4.2 Objetivo(s) específicos.....	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 Antecedentes.....	17
2.2 La señalización eléctrica en plantas.....	17
2.3 Fisiología del estrés en plantas.....	22
2.3.1 Estrés hídrico.....	24
2.4 Sistema de medición.....	25
2.5 La elección de la planta de tomate para nuestro modelo experimental.....	26

2.5.1 Temperaturas críticas para el cultivo de tomate.....	27
2.5.2 Demanda de agua en el cultivo de tomate.....	27
2.5.3 Periodos fenológicos críticos de riego.....	28
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	29
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....	35
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN.....	40
CAPÍTULO VI. CONCLUSIÓN.....	42
BIBLIOGRAFÍA.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	26
Figura 2.	27
Figura 3.	29
Figura 4.	30
Figura 5.	31
Figura 6.	31
Figura 7.	32
Figura 8.	33
Figura 9.	33
Figura 10.	33
Figura 11.	33
Figura 12.	34
Figura 13.	34
Figura 14.	34
Figura 15.	35
Figura 16.	37

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1	12
Gráfico 2.	36
Gráfico 3.	37
Gráfico 4.	38
Gráfico 5.	39

ABSTRACT

Hydration is a basic need for living beings because it participates in all their biological processes; therefore, water deficiency can cause great damage at a physiological level. For example, in plant organisms, the lack of water reduces the growth of new outbreaks and causes the stem to be more susceptible to mechanical damage. These alterations that arise in response to water stress may be associated with changes in the electrical response. In particular, in plants, a type of electrical signal known as systemic potential has been described, which is characterized by being of long-lasting (seconds to minutes) and capable of propagating over long distances, mainly through vascular elements of the phloem. These systemic potentials influence key processes within plants such as growth, gas exchange, perspiration, changes in gene expression, etc. In recent years, the measurement of these electrical signals has allowed them to be used as indicators of the physiological state of the organism, however, most of these reports have been made with electrodes implanted in the plant, which generates additional stress and can alter these measurements. According to the above, we developed an experimental model in which we subjected tomato plants (*Lycopersicon esculentum*) to water stress to characterize the changes in the generation of systemic potentials through a simple non-invasive registration system. The results of this research can provide tools for the country's agriculture, being able to prevent early damage associated with water stress in this and other plants, thus improving the yield and quality of crops of commercial interest, generating economic savings in agricultural activity.

RESUMEN

La hidratación es una necesidad básica para los seres vivos, debido a que participa en todos los procesos biológicos de estos, una deficiencia de agua puede causar un gran daño a nivel fisiológico. En este contexto, en organismos vegetales, la falta de agua reduce el crecimiento de nuevos brotes y causa que el tallo sea más susceptible a daños mecánicos. Estas alteraciones surgidas en respuesta al estrés hídrico pueden estar asociadas a cambios en la respuesta eléctrica. En particular, en plantas, se ha descrito un tipo de señal eléctrica conocida como potencial sistémico el cual se caracteriza por ser de larga duración (segundos a minutos) y con capacidad de propagarse a largas distancias, principalmente a través de elementos vasculares del floema. Estos potenciales sistémicos influyen en procesos clave dentro de las plantas tales como crecimiento, intercambio gaseoso, transpiración o cambios en expresión génica. Durante los últimos años, la medición de estas señales eléctricas ha permitido usarlas como indicadores del estado fisiológico del organismo, sin embargo, la mayoría de estos reportes han sido efectuados con electrodos implantados en la planta, lo cual genera un estrés adicional pudiendo alterar dichas mediciones. Según lo anterior, desarrollamos un modelo experimental en donde sometimos a estrés hídrico a plantas de tomates (*Lycopersicon esculentum*), para caracterizar los cambios en la generación de potenciales sistémicos mediante un sencillo sistema de registro no invasivo. Los resultados de esta investigación pueden brindar herramientas para la agricultura del país pudiendo prevenir tempranamente daños asociados al estrés hídrico en esta y otras plantas mejorando así el rendimiento y calidad de los cultivos de interés comercial generando un ahorro económico en la actividad agrícola.

Palabras clave: Estrés hídrico, potenciales eléctricos, tomate, agricultura.

INTRODUCCIÓN

En este estudio realizaremos una caracterización electrofisiológica de la planta *Lycopersicon esculentum* comúnmente conocida como planta de tomate. *Lycopersicon esculentum* pertenece al reino Plantae cuyo subreino es Traqueobionta (plantas vasculares) de la superdivisión Spermatophyta (plantas con semillas) división Magnoliophyta (plantas con flor) de clase Magnoliopsida (dicotiledóneas) subclase Asteridae de la orden Solanales. *Lycopersicon esculentum* es una planta dicotiledónea, herbácea y perenne (cultivada como anual) que pertenece a la familia botánica Solanaceae. En esta familia se encuentran otras plantas cultivadas como el pimiento, el ají dulce, la berenjena, la papa, el tomatillo, el tabaco y la petunia (Megias, et al, 2020).

La planta de tomate *Lycopersicon esculentum*, es una de las especies más importantes debido a su extensión, demanda y formas de consumo. En relación a su larga extensión mundial existe una alta diversidad en el germoplasma, adaptándose a diferentes climas, condiciones de suelos, por lo que su mejoramiento genético ha sido un blanco para ser estudiado. En su cultivo puede generar alto nivel de cambios de temperatura, humedad o daños producidos por lluvias, debido a esto existe un alto crecimiento en la producción de plantas y por consecuencias diversas especies.

Uno de los hechos más relevantes en la evolución de las plantas terrestres es la aparición de un sistema vascular capaz de comunicar todos los órganos del cuerpo de la planta. El sistema vascular está formado por dos tejidos: xilema, que conduce mayormente agua, y floema, que conduce principalmente sustancias orgánicas en solución. Solo hablamos de verdaderos tejidos conductores en las plantas vasculares (Megias, M & Molist, P. 2020). El sistema vascular para las plantas es muy importante ya que permite la comunicación entre diferentes partes de la planta, gracias a que son vías por las que se distribuyen las señales tales como las hormonas.

Podemos describir *Lycopersicon esculentum* como una planta con crecimiento del tallo principal usualmente puede alcanzar una altura de 30 a 60cm, dependiendo del tipo de cultivo. El porte puede ser inicialmente erecto o rastrero, desarrollándose posteriormente a uno más o menos postrado. Entre los cultivos de tomate se observan diferencias en cuanto a las características del crecimiento de la planta. El crecimiento varía desde uno de tipo indeterminado o ilimitado (donde se mantiene la dominancia de una yema vegetativa en el ápice

de las ramas) hasta uno altamente determinado o compacto (donde eventualmente en el ápice de las ramas se emite una inflorescencia terminal) (Megias, M & Molist, P. 2020).

La estructura de las hojas es pinnada compuesta de tamaño variable a las condiciones ambientales, está dividida en dos a 12 pares de segmentos o folíolos de diferentes tamaños. Las hojas son dentadas, y frecuentemente rizadas, pero también pueden ser lisas (Megias, M & Molist, P. 2020).

La planta del tomate posee una raíz pivotal fuerte, la cual frecuentemente se afecta durante la producción de plántulas para trasplante. En siembra directa, el sistema de raíces del tomate posee el potencial de alcanzar profundidades de más de 48 pulgadas, en algunos casos de hasta 120 pulgadas, cuando las condiciones del suelo le son favorables para su desarrollo (Megias, M & Molist, P. 2020).

Las ramas del tallo con crecimiento limitado y portadoras de flores o llamadas ramas inflorescentes se caracterizan por tener una cima racimosa que está compuesta usualmente de dos a 12 flores perfectas (hermafroditas), pero algunos cultivares de frutas bien pequeñas pueden producir 30 flores o más. Las inflorescencias brotan opuestas y entre las hojas. En las plantas de los cultivos de crecimiento indeterminado se mantiene de forma continua un patrón de crecimiento donde después de cada tres hojas brota una inflorescencia (Megias, M & Molist, P. 2020).

En cada inflorescencia las flores se abren sucesivamente, por lo que se podrían encontrar tanto flores como frutas en diferentes etapas de desarrollo en una misma inflorescencia. Su cáliz verde y persistente está compuesto en la mayoría de los casos de seis lóbulos o segmentos lanceolados (sépalos), pubescentes en el lado externo. La flor posee una corola amarilla en forma de estrella con seis pétalos (Megias, M & Molist, P. 2020).

Cada fruta contiene muchas semillas, las cuales son velludas, de forma achatada y ovalada, y de un color crema a marrón claro. La semilla usualmente tiene una longitud de 1/16 a 1/8 pulgadas. En cuanto a su peso, una onza de semilla puede contener de 7,000 a 12,000 semillas (Megias, M & Molist, P. 2020).

La reproducción de la planta consiste en que cuando la antesis o apertura total de la flor ocurre durante el día, comúnmente en la mañana, y 24 horas después se inicia la salida del polen. Este aparece en el lado interno de las anteras y por la posición pendiente de la flor el polen cae

directamente sobre la superficie del estigma. Después de abrir, las flores están receptivas a la polinización durante cuatro a ocho días (Megias, M & Molist, P. 2020).

La auto-polinización es la norma en los tomates cultivados. En la mayoría de los cultivares las anteras recubren el estigma del pistilo, asegurando así la auto-polinización. La polinización cruzada debido a insectos ocurre en aproximadamente un 5%, aunque en las regiones tropicales se han observado valores de 15 a 25%.

Para que se realice una polinización efectiva es preciso tener en consideración algunas variables ambientales como la temperatura que pueden influir en el éxito en la reproducción de *Lycopersicon esculentum*, como dice Megias, M & Molist, P, en el 2020, a temperaturas bajas, de 15° C o menos, la formación y función del polen es grandemente inhibida y también se puede afectar la viabilidad del óvulo. Las temperaturas altas interfieren con la producción de polen viable y su posterior dispersión, afectando también la viabilidad del óvulo. Efectos similares a éstos también pueden ser causados en un momento dado por vientos calientes y secos. Dependiendo de la temperatura, la fertilización del óvulo ocurre dentro de las primeras 48 horas después de la polinización (Megias, M & Molist, P. 2020).

Por otro lado, la planta *Lycopersicon esculentum* es actualmente uno de los principales cultivos en Chile, se siembra en plantaciones comerciales y familiares (Flaño, A. 2013), debido a su impacto en la agricultura del país y su interesante fisiología, llevaremos a cabo una investigación para observar las diferencias de potencial eléctrico en las membranas de las células luego de generar estrés hídrico, con el fin de poder anticipar algún periodo de deshidratación o sequía.

En Chile, las hectáreas plantadas oscilan entre los 13.070 en el año 2020 y los 9.302 en el año 2021. (Gráfico 1)

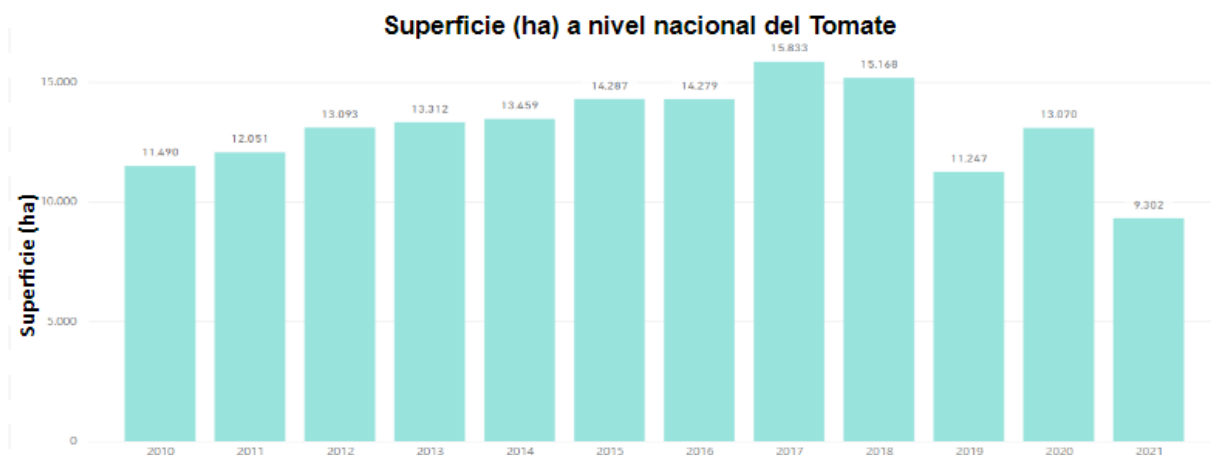


Gráfico 1

Fuente: Elaborado por Odepa con información del INE.

En nuestro país, la mayoría de las regiones son productoras de tomates, sin embargo, la región de O'Higgins y del Maule son las que tienen la mayor superficie plantada. Luego vienen regiones como la Metropolitana, Valparaíso y la región de Arica y Parinacota, entre otras.

En relación a los precios, en lo que va del año 2023 ha habido una notable disminución en ferias libres, variando entre 916 pesos por kilogramo en enero a 737 pesos en marzo, llegando a los 825 pesos en abril de este año.

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El estrés en plantas ocurre debido a factores externos bióticos como lo son los microorganismos, insectos y factores abióticos como la disponibilidad de agua, salinidad, humedad, temperatura, entre otros. Como consecuencia de este estrés, tendremos por ejemplo la disminución de la cosecha, de su calidad y cantidad. En Chile la actividad agrícola depende de muchos factores, una de ellas es la disponibilidad de agua. Al ser un país con una extensa longitud, Chile tiene diversos climas. En la zona central y norte, las condiciones climáticas son óptimas para la actividad agrícola, sin embargo, la disponibilidad de agua es escasa, por otro lado, en la zona sur del país, la disponibilidad de agua es mayor pero las condiciones climáticas no son las más óptimas para la actividad agrícola (ODEPA, 2017). Estas variaciones térmicas son producidas por un estrés hídrico. Desde el punto de vista biológico, el estrés hídrico influye en la mayoría de los procesos de la planta, es decir, si hay una disminución de agua y con esto un estrés hídrico, llevará a la planta a un estrés por calor, debido a que se dificulta la evaporación y con esto la disminución de la temperatura de la planta. Junto a lo anterior es importante mencionar que un grado moderado de estrés térmico reduce el crecimiento de toda la planta (Taiz, L et al., 2006).

Debido a lo mencionado anteriormente, es importante detectar tempranamente estas variaciones hídricas en tomates y que desencadenan el desequilibrio de la planta a nivel electrofisiológico, para obtener una caracterización en tiempo real de la planta según sus condiciones hídricas y atmosféricas. Teniendo en cuenta estos antecedentes nosotros planteamos la siguiente hipótesis: **Las plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum*) sometidas a estrés hídrico presentan cambios en su potencial sistémico en respuesta a estímulos de calor.**

1.2 Justificación de la investigación

El tomate, está dentro de las tres frutas y hortalizas con más peso en todo el mundo (FAOSTAT, 2019), tiene una alta cantidad de utilidades, demanda y valor nutricional y además es fácil de cultivar. A nivel nacional y desde el punto de vista de la alimentación de la familia chilena, el tomate se considera la hortaliza más importante, ocupando el primer lugar dentro de las hortalizas de la canasta (ponderación de 0,32%), lo que significa que es la hortaliza a la que los hogares destinan más recursos, de acuerdo a los datos entregados por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE). En relación a la situación económica-agrícola de nuestro país, el cultivo de tomate ha tenido en los últimos años un desarrollo tecnológico importante, por ejemplo, la creación de gran cantidad de variedades y de portainjertos, lo anterior gracias a la rentabilidad del tomate que permite su avance (Flaño, A. 2013).

Debido a todas las evidencias mencionadas, se implementará un modelo innovador de registro electrofisiológico sencillo, de fácil uso y no invasivo para estudiar las señales eléctricas en plantas evaluando el estado fisiológico en condiciones de estrés hídrico, esto puede ser una herramienta útil para el estudio del estrés en general, así como para un monitoreo en tiempo real en condiciones de producción.

1.3 Pregunta de investigación.

¿Cómo varían los potenciales sistémicos en respuesta a un estímulo térmico en plantas de tomate sometidas a estrés hídrico?

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

- Caracterizar las alteraciones de la respuesta eléctrica en plantas de tomate asociadas al estrés hídrico.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Establecer un modelo de estrés hídrico en plantas de tomate.
2. Estudiar la incidencia de los potenciales sistémicos entre plantas de tomate control y sometidas a estrés hídrico.
3. Caracterizar los potenciales sistémicos en plantas de tomate en condiciones control y bajo estrés hídrico.

CAPÍTULO II:

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

En las plantas se pueden observar cambios a causa de la exposición al ambiente y a factores, lo que genera una respuesta fisiológica que genera un cambio en la expresión de genes, alteraciones en el metabolismo y fisiología. Estos factores ambientales estresantes son externos y pueden ser bióticos o abióticos, tales como temperatura, salinidad, humedad ambiental, humedad del suelo o estrés mecánico. Dependiendo del tipo de estrés, la planta puede demorar entre minutos a semanas en generar cambios fisiológicos. El concepto de estrés está íntimamente asociado con la tolerancia a este, generando respuestas fisiológicas rápidas que implican variaciones en los flujos de iones en las membranas de las células, y que, además pueden conllevar a una regulación génica. (Taiz et al., 2006). Todos estos factores que producen un desbalance en la planta pueden ser registrados mediante señales electrofisiológicas, al igual que todas las especies de seres vivos las plantas tienen un sistema de señalización eléctrica donde profundizaremos a continuación:

2.2 La señalización eléctrica en plantas.

- **La anatomía de la planta y el funcionamiento de los sistemas vasculares.**

Mediante diversos estudios podemos identificar funciones específicas de ciertas estructuras, como el xilema y el floema encargadas del transporte de agua, minerales y nutrientes además de estar involucradas en la respuesta y regulación electrofisiológica, así también los tubos cribosos que funcionan como una vía de transmisión de señales eléctricas, entregando sustento a la visión de que cumplen un rol importante en la señalización entre raíces y brotes de plantas con estrés hídrico (Tran, D et al., (2019).

El xilema es una estructura que transporta agua y minerales hacia arriba de la planta, mientras que el floema transporta bidireccionalmente, hacia arriba y hacia abajo, incluida la savia de la fotosíntesis (Megias, M & Molist, P. 2020). El floema está formado por más tipos celulares que el xilema. Se compone de dos tipos de células: los elementos conductores y los no conductores. Los elementos conductores son los tubos o elementos cribosos y las células cribosas (Megias, M & Molist, P. 2020). Los tubos cribosos son típicos de las angiospermas. Son células

individuales achatadas que se disponen en filas longitudinales y que se comunican entre sí mediante placas cribosas, localizadas en sus paredes transversales o terminales. Las placas cribosas contienen poros de gran tamaño que comunican los citoplasmas de las células vecinas. Además, poseen áreas cribosas en las paredes laterales que son depresiones en la pared primaria con poros que atraviesan la pared completamente. Estas sirven para comunicarse con otros tubos cribosos contiguos y con las células parenquimáticas especializadas que los acompañan llamadas células acompañantes o anexas. Los tubos cribosos constituyen el elemento conductor mayoritario en angiospermas (Taiz, L et al., 2006).

La finalidad de conocer cómo se comunican las plantas y cómo transmiten su información a través de ella, nos aporta antecedentes para poder realizar una caracterización de la planta y conocer su comportamiento ante diferentes requerimientos. Se ha propuesto una modalidad de variación diferente, con el mismo principio de movimientos de iones, pero con características hiperpolarizantes y capaz de comunicar con toda la planta, es decir, el potencial de sistema descrito más adelante. Para poder profundizar en el potencial de sistema, necesitamos conocer el mecanismo de señalización que genera la comunicación entre las hojas. Como se demostró recientemente (Felle & Zimmermann, 2007), la liberación y propagación de potenciales de acción está relacionada con los movimientos de cationes inorgánicos (Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , y Mg^{2+}) debido a la activación selectiva de los canales H^+ -ATPasa.

- **¿Dónde se produce la señalización?**

Se ha considerado que los cambios transitorios rápidos son señales eléctricas de larga distancia y que las ondas lentas son las ondas sobrantes de las señales químicas que se mueven en el xilema (Pikards, 1963, como se citó en Taiz et al., 2006). Además, se ha demostrado por medio de experimentos realizados los movimientos de las hojas de mimosa pudica, los resultados por Samejima y Sibaoka en 1993, mencionado por Tran & Camps, 2019 indica que mediante la utilización de un colorante fluorescente se identifican las células del peciolo que estaban implicadas en la transmisión de la señal eléctrica entre los folíolos y el pulvino. Lo anterior nos dio a conocer que tanto el parénquima del floema como del xilema producen potenciales de acción cuando se estimulaba el peciolo con agua helada (Rhodes, J et al., 1996). Las membranas plasmáticas de las células del parénquima xilemático contienen bombas de protones, canales de

agua y una serie de canales iónicos especializados en la entrada y la salida de sustancias (Taiz, L et al., 2006).

Según los resultados expuestos en el estudio que realizó Jeremy Rhodes en el año 1996 con plántulas de tomates, concluye que cuando se produce una herida, los potenciales eléctricos se propagan a lo largo de los tubos cribosos del floema y sus células asociadas en el pecíolo. Los elementos del tubo criboso y las células acompañantes están estrechamente relacionados y comparten muchas conexiones plasmodesmáticas (Rhodes, 1996).

- **¿Cómo se propaga la señalización eléctrica en plantas?**

Las moléculas de agua se encuentran en un movimiento continuo al azar. Como resultado de este movimiento migran las moléculas por difusión. La difusión es un proceso muy importante para los organismos vivos, por ejemplo, la fotosíntesis depende de la difusión de CO₂. La absorción de los minerales de la solución del suelo por las raíces en parte depende de la difusión; así mismo todos los procesos químicos, incluyendo los catalizados por enzimas que dependen de colisiones producidas por moléculas que se difunden (Squeo, F & Cardemil, L. 2007). Como ya se ha mencionado, las plantas vasculares están compuestas por diversos tejidos, entre ellos, la hoja, tallo, raíz, tejido vascular llamado xilema y floema (encargadas de transportar agua, iones y nutrientes respectivamente). La mayoría de las paredes celulares y las membranas biológicas poseen alta permeabilidad al agua, lo que resulta en una fase líquida relativamente continua que permite el transporte de los solutos hacia distintos puntos de la planta (Squeo, F & Cardemil, L. 2007).

En relación a lo anterior, nos detendremos en el transporte de iones para poder comprender este modelo de señalización.

- **Tipos de señales eléctricas**

Potencial de acción

Los potenciales de acción son señales eléctricas de rápida propagación que son mayormente conocidos en animales y en algunas especies de algas. Se mueven a lo largo de los axones del sistema nervioso y sobre la superficie de algunas células musculares y glandulares. En los axones son breves (en el rango de ms), viajan a velocidad constante y mantienen una amplitud constante (Fromm & Lautner, 2006). Tienen un carácter de todo o nada, es decir, se produce después de que un estímulo alcanza un cierto umbral (lo que conduce a la despolarización de la membrana).

El mecanismo fisiológico de la propagación de la respuesta electrofisiológica, se debe a la estimulación de la membrana plasmática H^+ -ATPasa, noción apoyada por la acción de la fusicoccina, que también provoca la aparición de estos cambios transitorios de tensión en la hoja (Zimmermann, M et al., 2009).

Las plantas con el potencial de acción mejor estudiado se encuentran en las algas verdes *Chara* y *Nitella* y en sus células intermodales gigantes. Tales células tienen una corriente protoplásmica que es detenida por los potenciales de acción que se propagan a una velocidad de 10-20 mm s⁻¹ (Fromm & Lautner, 2006).

Potencial de variación

Los potenciales de onda lenta son señales eléctricas de propagación que consisten en un cambio transitorio en el potencial de membrana (despolarización y posterior repolarización). La principal diferencia con los potenciales de acción, radica en repolarizaciones más largas, retardadas y un amplio rango de variación. Esta señal varía con la intensidad del estímulo, es decir, que no se mantiene constante, va cambiando en respuesta a una onda de presión hidráulica o productos químicos transmitidos en el xilema. Este potencial se puede generar por heridas o escisión de órganos. Lo anterior se pudo estudiar en numerosas especies de plantas como plántulas de pepino y guisante (Fromm & Lautner, 2006).

El potencial de variación se caracteriza por amplitudes y velocidades que disminuyen con el aumento de la distancia desde el sitio lesionado, por su capacidad para pasar regiones muertas de tejido y su dependencia de la tensión del xilema (Fromm & Lautner, 2006).

Potencial de Sistema

La polaridad inicial de la respuesta electrofisiológica de estos voltajes transitorios es hiperpolarizante; no obedecen la regla de todo o nada sino que dependen tanto de la concentración como del tipo de sustancia añadida y se propagan a una distancia de 5 a 10 cm. (Zimmermann, M et al., 2009), lo anterior quiere decir que la respuesta va a ser en relación a la magnitud del estímulo, dado que la dirección inicial de la señal es hiperpolarizante (con respecto al interior de la célula), no califica para un potencial de variación en el sentido clásico (Stahlberg & Cosgrove, 1997, como se citó en Fromm & Lautner, 2006).

Es así, que Zimmermann en el 2009, propuso la existencia de un nuevo tipo de señal eléctrica, denominada “potencial del sistema”, esta señal actúa estimulando la membrana plasmática H^+ -ATPasa, transportando información sistémicamente dentro de toda la planta o al menos en partes de la planta.

El mecanismo de acción de la enzima H^+ -ATPasa es generar un gradiente electroquímico transmembrana H^+ y mantener una rotación constante de H^+ , ambos necesarios para los procesos de transporte transmembrana. La membrana no perturbada establece un equilibrio dinámico (p. ej., un potencial de membrana estable), gradientes de iones transmembrana y flujos iónicos. Tan pronto como este equilibrio es alterado, por ejemplo, por una despolarización de cualquier tipo, la H^+ -ATPasa responderá con mayor actividad con el fin de restaurar el estado de reposo del potencial de la membrana. Este efecto, una repolarización (parcial o total), es bastante común y sigue la adición de cationes o sustratos co-transportados a la fase externa de la membrana plasmática (Zimmermann, M et al., 2009).

La importancia de la diferenciación de conceptos radica en que este proyecto investigativo tiene como objetivo secundario crear un material pedagógico para los estudiantes a partir del modelo experimental propuesto, para favorecer la comprensión del mecanismo de señalización

electrofisiológica en plantas y hacer la distinción entre los tipos de señales eléctricas descritos por la literatura.

Es relevante conocer el mecanismo de propagación de las señales eléctricas a larga distancia y sus potenciales de sistema, ya que, nos dará un indicador de la casi totalidad de la planta , recordando que nuestro objetivo es conocer el estado general de la planta para fines agrícolas y prevenir las pérdidas en la cosecha por el poco manejo de las variables.

2.3 Fisiología del estrés en plantas

Las plantas tanto en condiciones naturales como en cultivos están expuestas constantemente al estrés. El estrés se define normalmente como un factor externo que ejerce una influencia negativa sobre la planta (Taiz, L et al., 2006). Existen diversas maneras de generar estrés en las plantas, por ejemplo, patógenos, insectos, depredadores, descritos cómo algunos factores bióticos, por otro lado, existen factores abióticos tales como condiciones climáticas y condiciones del suelo (deficiencia de minerales, deficiencia o exceso de agua, entre otros). El estudio del estrés tiene un papel fundamental en la comprensión de la distribución de las especies vegetales, ya que el suelo y el clima van a limitar su crecimiento en ciertos espacios donde las condiciones son favorables.

La planta desarrolla diferentes procesos fisiológicos para adaptarse a alguna condición desfavorable, por ejemplo, la transpiración en caso de un estrés por calor y la reducción del tamaño celular, la relajación de las paredes, en el caso de un estrés hídrico, es importante conocerlos para el campo de la agricultura y para el medio ambiente (Taiz, L et al., 2006).

En muchos casos, el estrés se mide con relación a la supervivencia de la planta, el rendimiento del cultivo, el crecimiento (acumulación de biomasa) o los procesos de asimilación primaria (incorporación de CO₂ y minerales) que están relacionados con el crecimiento (Taiz, L et al., 2006).

La adaptación y la aclimatación a los ambientes estresantes es consecuencia de diversos acontecimientos que se producen en los organismos a todos los niveles, desde el anatómico y morfológico, pasando por el nivel celular, bioquímico y molecular. Por ejemplo, el

marchitamiento de las hojas en respuesta al déficit hídrico reduce las pérdidas de agua por la hoja y su exposición a la luz incidente (Taiz, L et al., 2006).

Las rutas de transducción de señales descritas en la literatura están ligadas a los mecanismos de señalización de ABA, hormona presente en todas las plantas vasculares y que participa en el cierre de los estomas en respuesta al estrés hídrico. Los estudios genéticos han demostrado que existen muchos componentes en la señalización, comunes en respuestas largas y cortas. El receptor de ABA es una proteína, pero no está identificada hasta la fecha. El ABA es transportado por los tejidos vasculares: xilema y floema, pero se transporta más abundantemente en la savia del floema, al ser sintetizado en las raíces, también puede ser transportado al tallo a través del xilema. La concentración de ABA en la savia del xilema de plantas de girasol bien regadas está entre 1,0 y 15,0 nM, mientras que la concentración de ABA en plantas de girasol estresada aumenta hasta 3.000 nM (Taiz, L et al., 2006).

Se demostró que los conjugados impermeables de ABA-proteína inducen la actividad de los canales iónicos y la expresión génica (Taiz, L et al., 2006). Uno de los experimentos analizados en la literatura nos entrega como conclusión que, el ABA aportado directa y continuamente al citosol mediante la técnica de “*patch pipette*”, inhibe los canales de entrada de K^+ , que son necesarias para la apertura estomática (Taiz, L et al., 2006). De manera conjunta, los resultados de los diferentes experimentos indican que la percepción extracelular del ABA puede impedir la apertura estomática y regular la expresión génica, mientras que el ABA intracelular puede inducir en el cierre estomático e inhibir la corriente de entrada de K^+ necesaria para su apertura. Al parecer existen receptores de ABA tanto extracelulares como intracelulares, no obstante, ninguno de estos receptores se ha identificado o localizado todavía (Taiz, L et al., 2009). A medida que el estrés hídrico aumenta, las raíces que están en contacto directo con el suelo seco sintetizan ABA y lo envían a la parte aérea vía xilema. Como este transporte se puede producir antes de que el bajo potencial hídrico del suelo produzca cualquier cambio cuantificable con el estado hídrico de las hojas, se cree que el ABA es una señal radical que ayuda a reducir la velocidad de transpiración, cerrando las estomas en las hojas (Taiz, L et al., 2009). La alcalinización inducida por estrés del apoplasto favorece la síntesis de las formas disociadas del ácido abscísico, ABA, que no atraviesa fácilmente la membrana. Por tanto, entra menos ABA a las células del mesófilo y entra más a las células acompañantes a través de la corriente de

transpiración. Nótese que el ABA es re-distribuido en la hoja por esta ruta sin un aumento del nivel total de ABA. El aumento del pH en la savia del xilema puede funcionar como una señal radical que promueve el cierre temprano de estomas (Taiz, L et al., 2009).

En esta investigación, nos centraremos en el estudio y replicación del modelo de estrés hídrico, debido a que el control de la absorción de agua y el mantenimiento del estado del agua son importantes para la supervivencia y el crecimiento de las plantas, además los factores ambientales como la radiación, la temperatura del aire, las lluvias y la humedad tienen un alto impacto en los balances hídricos de las plantas (Taiz, L et al., 2009).

2.3.1 Estrés hídrico

A medida que el contenido hídrico de la planta disminuye, las células se encogen y las paredes celulares se relajan, esta reducción de volumen celular da lugar a una menor presión de turgencia y a la consiguiente concentración de los solutos en las células. La membrana plasmática se hace cada vez más gruesa y más comprimida, la pérdida de turgencia que es el efecto biofísico significativo del estrés hídrico, la expansión foliar y elongación radicular son las más sensibles a las diferencias hídricas ya que dependen de la turgencia (Taiz, L et al., 2009). En un experimento realizado en plantas de girasol (*Helianthus annuus*), se cultivaron con agua abundante o limitando el agua del suelo para producir estrés hídrico. En los resultados se obtuvo que este estrés hídrico resultó en una disminución de turgencia en la planta lo que produjo una disminución en la tasa de crecimiento, por lo que se ve limitada la capacidad de la hoja para crecer tras haber estado expuesta a estrés (Taiz, L et al., 2006).

La pérdida de solutos desde las células acompañantes puede activarse por un descenso del contenido hídrico de la hoja, en donde, el ácido abscísico (ABA) desempeña un papel importante en este proceso. El ácido abscísico se sintetiza continuamente a una tasa baja en las células de mesófilo y tiende a acumularse mayoritariamente en los cloroplastos. Cuando el mesófilo está ligeramente deshidratado ocurren dos cosas:

1. Parte del ABA almacenado en los cloroplastos se libera al apoplasto (el espacio de la pared celular) de las células del mesófilo. La redistribución del ABA depende de los gradientes de pH en la hoja, de las propiedades ligeramente ácidas de la molécula de

ABA y de las propiedades de permeabilidad de las membranas celulares (Taiz, L et al., 2009).

2. El ABA se sintetiza a mayor velocidad y se acumula en el apoplasto de la hoja. Las mayores concentraciones de ABA que resultan de mayores velocidades de síntesis parecen aumentar o prolongar el efecto inicial debido al ABA almacenado (Taiz, L et al., 2009).

2.4 Sistema de medición

Un modelo de experimentación realizado para evaluar el comportamiento electrofisiológico en plantas sometidas a estrés hídrico, nos permitiría la detección temprana y la dinámica de recuperación de las condiciones de estrés hídrico, a su vez, se pueden monitorear con estos sensores de electrofisiología, que permiten mediciones continuas y no destructivas para una programación de riego eficiente durante todo el año (Ríos, L et al., 2014). Gracias al amplificador, medimos potenciales eléctricos de las respuestas a las heridas por estímulo de calor, este dispositivo no invasivo nos permite tener un monitoreo de la señal en tiempo real. Unos de los beneficios al utilizar el *SpikerBox* es que es de fácil uso, no se necesitan grandes estudios de este, junto a esto, al no ser invasiva, no se hace daño a la planta por lo que no tendremos otro factor que controlar o que influya en la toma de datos. Por otro lado, tenemos algunas desventajas con el amplificador y es que puede haber diversas señales que influyen en esta toma de muestras que no necesariamente vengan de la planta en cuestión.



Figura 1. Plant spikerbox

En nuestra propuesta de modelo experimental usaremos el sistema de medición utilizado comúnmente en modelos con *Mimosa pudica*, siendo apta para utilizarla en diferentes tipos de plantas.

2.5 La elección de la planta de tomate para nuestro modelo experimental

La planta del tomate se utiliza y cultiva debido a sus grandes usos y beneficios para la humanidad, las frutas del tomate son consumidas de diversas formas, como sopas, jugos o salsas. Las hojas, flores y frutas de la planta, tienen propiedades medicinales además de ser considerada una buena fuente de vitamina A, C y poseer un antioxidante beneficioso para la salud (Fornaris, G. 2007).

El ciclo de vida del tomate es corto lo que lo hace un excelente modelo de estudio, además mencionar que posee la característica de autopolinizarse (Saavedra, G. SF).

Sus requerimientos edafoclimáticos son bastante básicos, en relación al suelo, no es muy exigente, pero es óptimo un buen drenaje por lo que necesita alto contenido de materia orgánica, en cuanto al pH debe oscilar entre 6 y 6,5 para que la planta se desarrolle adecuadamente aun así es posible manejar suelos con pH de 8 en regiones del norte (Guzmán, A et al., 2017).

Respecto al clima, prospera mejor en climas secos con temperaturas que varían entre los 18 y 30°C. Las temperaturas extremas en la planta del tomate pueden provocar trastornos en su maduración, precocidad y color, cuando hay temperaturas bajo los 10°C las flores se ven perjudicadas, pudiendo generar deformidades en el desarrollo de la planta y los frutos, por otro lado, cuando las temperaturas son mayores a 35°C se ve afectada la fructificación (Guzmán, A et al., 2017).

2.5.1 Temperaturas críticas para el cultivo de tomate

Se hiela la planta		-2°C
Detiene su desarrollo		10-12°C
Desarrollo normal de la planta		18-25°C
Mayor desarrollo de la planta		21-24°C
Germinación óptima		25-30°C
Temperaturas óptimas		
Desarrollo	Diurna	23-26°C
	Nocturna	13-16°C
Floración	Diurna	23-26°C
	Nocturna	15-18°C
Maduración		15-22°C

Fuente: Manual de cultivo del Tomate al aire libre

Figura 2. Temperaturas críticas para el cultivo de tomate.

En relación a la luminosidad que necesita el cultivo de tomate, son mínimo 6 horas diarias de luz directa, sin embargo, si la radiación es muy alta, se producen golpes de sol, partiduras y coloración irregular (Guzmán, A et al., 2017).

2.5.2 Demanda de agua en el cultivo de tomate

El agua en el cultivo de plantas, determina la producción y calidad de la cosecha del fruto, al momento de suministrar agua, la cantidad de agua que necesita la planta, dependerá de las condiciones meteorológicas, del suelo y del riego (Guzmán, A et al., 2017).

El agua que se utiliza para regar, puede contener cationes como el calcio o aniones como el cloruro, estos elementos se van acumulando en el suelo contribuyendo a la salinización del suelo y en consecuencia la disminución de la productividad del cultivo. La salinización del suelo influirá en este, dificultando la absorción del agua a través de las raíces de la planta (Guzmán, A et al., 2017). La cantidad de agua que necesita el cultivo de tomate dependerá del suelo, las precipitaciones y la tasa de evapotranspiración, es decir, la evaporación del suelo y la transpiración de las hojas de las plantas en el huerto (Guzmán, A et al., 2017). El tomate es altamente sensible al estrés hídrico, la calidad y el rendimiento del cultivo se verá afectado si la oportunidad de riego se retrasa o si la humedad en el suelo cae a valores muy bajos (Guzmán, A et al., 2017). La señal más notoria del estrés hídrico será la reducción del número y el tamaño de los frutos de tomate dificultando su venta.

2.5.3 Periodos fenológicos críticos de riego

Como mencionamos anteriormente, el cultivo de tomate es muy sensible al estrés hídrico, sin embargo, se pueden definir periodos críticos en que la falta de agua determinará fuertes pérdidas (Guzmán, A et al., 2017).

- Pre-plantación a pre-floración: El requerimiento de evapotranspiración es bajo y trata de la evaporación directa del suelo (Guzmán, A et al., 2017).
- Floración a cuaja de frutos: El requerimiento de agua es reducido al inicio de esta etapa, aumenta para llegar al máximo al finalizar el periodo. La capacidad de campo (contenido de agua que es retenida en el suelo luego de que se regó y se dejó de drenar libremente por un lapso de 24 a 48 horas), debe mantenerse de 10 a 15 cb de tensión, en los primeros 50 cm de profundidad del suelo (Guzmán, A et al., 2017).

CAPÍTULO III:

METODOLOGÍA

- **Montaje experimental y material vegetal**

El presente experimento se llevó a cabo en una sala adaptada del laboratorio de fisiología celular del departamento de Biología de la Universidad Metropolitana de Ciencias de La Educación en Santiago de Chile. Utilizamos 6 plantas de tomate de 2 semanas aproximadamente, en donde se distinguieron dos grupos, el grupo control y el grupo sometido a estrés hídrico.

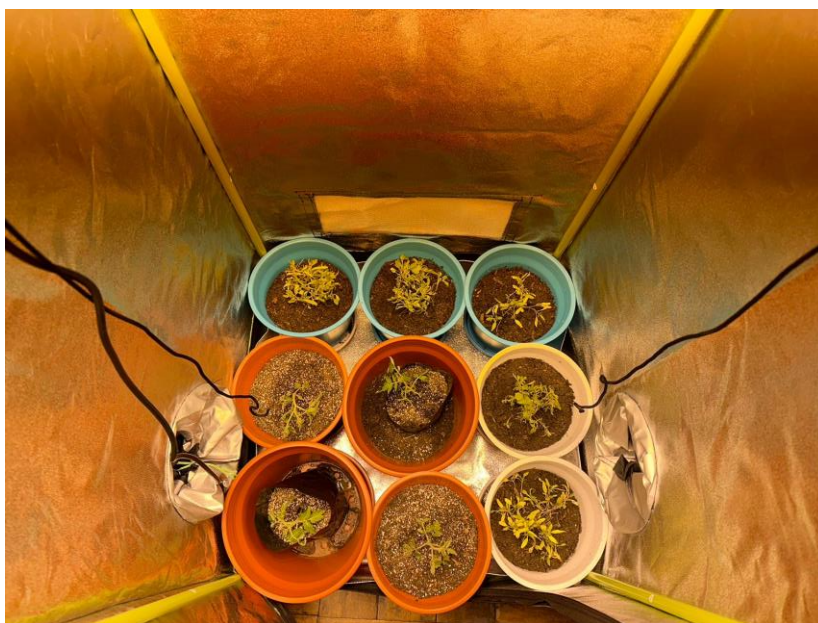


Figura 3. Plantas de tomate en sistema de cultivo *indoor* en condiciones ideales.

Para administrar el agua se utilizó un sistema de riego en donde, el suministro en promedio fue de 300 ml en condiciones normales y en condiciones de estrés hídrico fue de 150 ml, ambas con un periodo de luz de 12 horas y de oscuridad de 12 horas con temperaturas entre los 18°C y 25°C.

El déficit hídrico suministrado en el grupo G o estresado fue con una disminución total del agua durante una semana y luego con una disminución del 50% de disponibilidad hídrica.



Figura 4. Plantas del grupo control y estresadas de 22 centímetros aprox. de alto.

- **Procedimientos**

Las señales de estrés se amplificaron con un *Plant SpikerBox* conectado a computadoras portátiles HP y ASUS. El software se grabó con el programa *SpikeRecorder* de Backyard Brains como archivos .wav. Junto a lo anterior se utilizaron programas para grabar la pantalla del *SpikeRecorder*.

Estos registros se realizaron de 2 a 5 veces por semana en donde tuvimos dos grupos, un grupo control denominado grupo C y un grupo G estresado con 3 plantas cada una. Al comienzo de cada sesión, seleccionamos las hojas con las que trabajamos, conociendo sus medidas y registrándose en una ficha diaria de control de parámetros tales como las medidas de las hojas, la temperatura y humedad.

El *spikerbox* posee dos cables con electrodos, uno conectado a la parte superior de la planta y otro que va directamente a la tierra, para comenzar a tomar muestras administramos gel conductor y conectamos un electrodo en la zona del peciolo, luego se conecta el otro electrodo a tierra y se enciende el *spikerbox*.



Figura 5. Montaje de *spikerbox* conectado a planta de tomate con electrodos, cable negro a tierra y cable rojo en peciolo.

El uso del gel conductor es una parte importante dentro del procedimiento, mejora la transmisión de la señal y por tanto la precisión de los resultados obtenidos.



Figura 6. Electrodo instalado en planta de tomate con gel aislante.

Para realizar la visualización de señal utilizamos el programa *SpikeRecorder* que se descarga de manera libre y sencilla.

El registro de señal se visualiza una vez estabilizada la señal para luego comenzar con el estímulo de calor en la hoja seleccionada con intervalos de 5 segundos durante un minuto aproximadamente. Las hojas seleccionadas no deben medir menos de 2 cm de largo x 1 cm de ancho, dejando así, madurar a las hojas más jóvenes.



Figura 7. Estímulo de calor sobre hoja de planta de tomate.

La semana del 6 de noviembre se suspendieron la toma de muestras debido a un fallo en el amplificador de señales, al parecer hubo una falla en la placa del *plant spikerbox*, por lo que durante dos semanas no hubo registro alguno. Aun así, se siguieron haciendo mediciones de humedad, temperatura, riego y de altura de la planta, ésta última una vez por semana.



Figura 8. Plantas del grupo control con fecha del 13 de noviembre del 2023, alcanzando un promedio de 54 centímetros de altura.



Figura 9. Plantas del grupo estresado con fecha del 13 de noviembre del 2023, alcanzando en promedio 48 centímetros de altura.

Por último, mencionamos que se tomaron fotos para poder ver el crecimiento y desarrollo de las plantas como se muestra a continuación.



Figura 10. Plantas en vivero con fecha 01 de Septiembre.



Figura 11. Plantas con fecha 08 de Septiembre.



Figura 12. Plantas con fecha del 06 de Octubre.



Figura 13. Plantas con fecha del 04 de Noviembre.



Figura 14. Plantas con fecha del 25 de Noviembre.

- **Análisis de datos**

Los resultados se reportan como promedio $\pm$ el error estándar de la media (SEM). Para evaluar diferencias estadísticamente significativas se usaron las pruebas de t de Student y F de Fisher.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

A lo largo del procedimiento experimental, logramos observar el proceso de la planta *Lycopersicon esculentum* conocida comúnmente como tomate, en un periodo de aproximadamente 3 meses. En relación a su aspecto macroscópico (biomasa) (Figura 15), pudimos observar que terminaron siendo más frondosas y con mayor número de hojas, las plantas del grupo control no así las plantas del grupo estresado, debido a que las plantas control no fueron sometidas a estrés hídrico, pero si al estímulo de calor.



Figura 15. Biomasa de plantas al terminar la investigación de grupo control y grupo estresado respectivamente.

Según el estudio realizado por Madariaga, D et al., en el 2023, hay un número cercano al 60% de supuesta respuesta en diversas plantas a estímulos de calor o tacto. Este porcentaje de respuesta se debe a diversos factores bióticos o abióticos como por ejemplo la disponibilidad de agua en el suelo de estas. En relación a los resultados de nuestra investigación con un total de 306 hojas analizadas nos dio como respuesta un 62,4% (191/306) con un 37,6% (115/306) de las plantas sin respuesta.

Junto a lo anterior, obtuvimos resultados diferenciados en las respuestas del grupo control y el grupo sometido a estrés hídrico, se puede observar que, en el grupo control la respuesta fue de un 65,1 % (125/192) y un 34,9 % (67/192) no respondió al estímulo.

Incidencia de respuesta eléctrica (control)

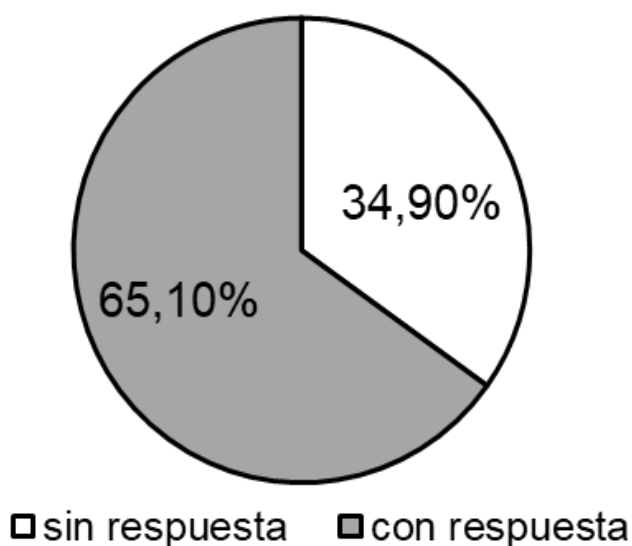


Gráfico 2. Respuesta en el grupo control, el cual fue de un 65,1 % (125/192) de respuesta al estímulo y de un 34,9 % (67/192) de no respuesta al estímulo de calor.

Asimismo, la respuesta del grupo sometido a estrés hídrico, tuvo una respuesta de un 57,9 % (66/114) y un 34,9 % (67/192) de no respuesta al estímulo de calor. Sometimos a comparación los porcentajes de respuesta para evaluar si existían diferencias entre los grupos control (65,1%) y estresados (57,9%), sin embargo, no hallamos diferencias estadísticamente significativas (prueba F de Fisher, $p=0,22$)

Incidencia de respuesta eléctrica (estresados)

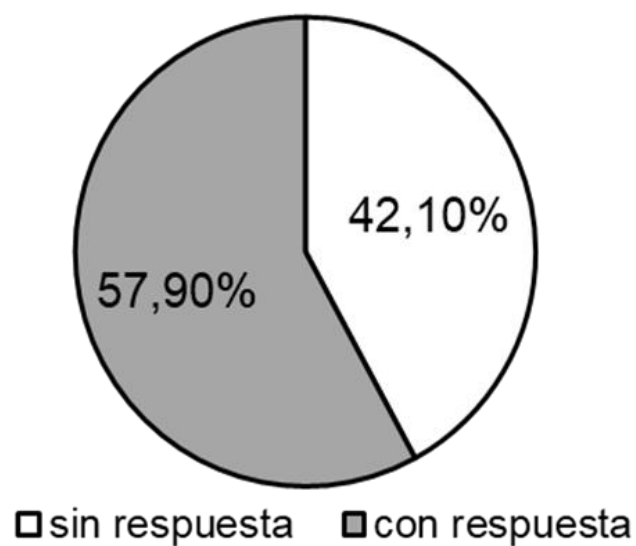


Gráfico 3. Respuesta en el grupo estresado, el cual fue de un 57,9 % de respuesta al estímulo y un 34,9 % de no respuesta al estímulo de calor.

En lo que respecta a la respuesta electrofisiológica de las hojas de la planta de tomate se pudieron observar algunas diferencias entre los grupos estresado y control.

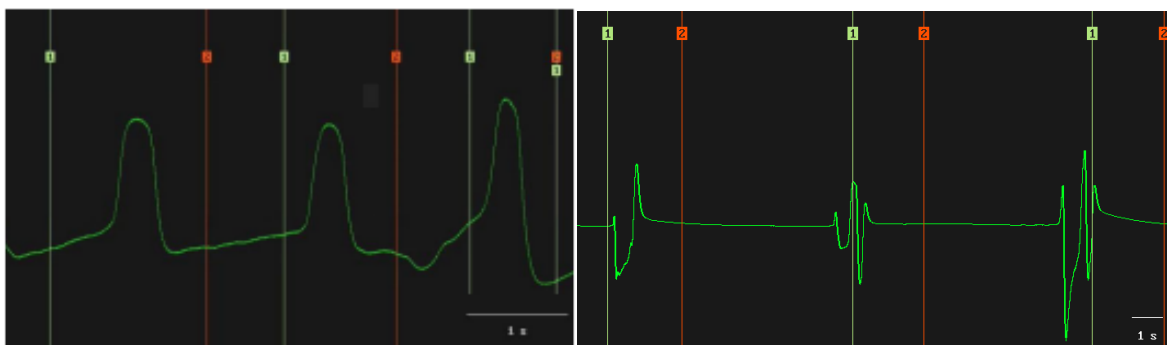


Figura 16. Ejemplo de respuesta electrofisiológica sobre un estímulo de calor en *Lycopersicon esculentum* en el grupo control y estresado respectivamente.

Según los análisis estadísticos, se pudo evidenciar que existen diferencias significativas en la velocidad de conducción entre el grupo control ($0,52 \pm 0,06$ ms) y estresado ($0,31 \pm 0,04$ ms), siendo la respuesta del grupo estresado más lenta en comparación al grupo control (gráfico 5).

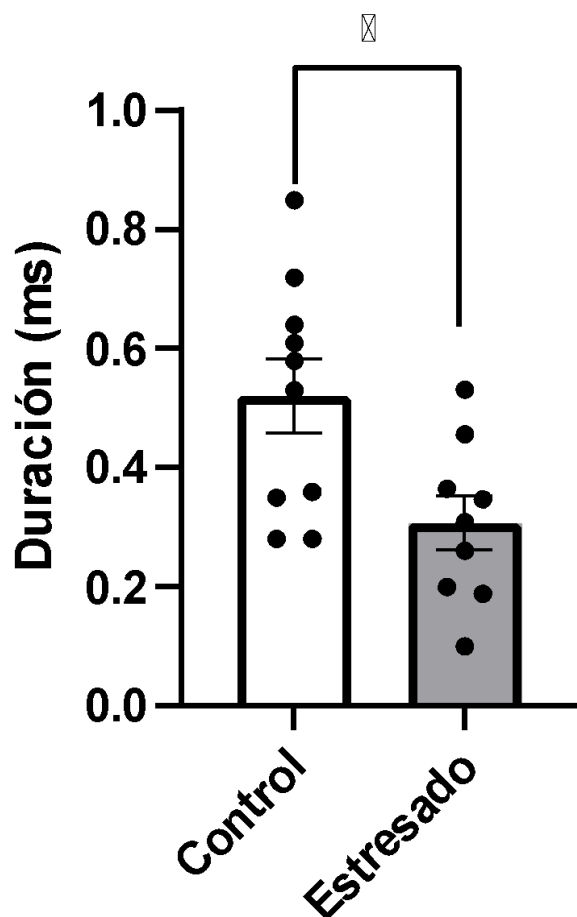


Gráfico 4. Los resultados experimentales sobre la velocidad de conducción nos indican que el grupo control $0,52 \pm 0,06$ ms y grupo estresado $0,31 \pm 0,04$ ms (* $p=0,01$)

En relación a la amplitud de las respuestas no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la amplitud de la respuesta electrofisiológica entre el grupo control ($2182,8 \pm 412,3$ u.a.) y el grupo estresado ($1640,6 \pm 350,1$ u.a.)

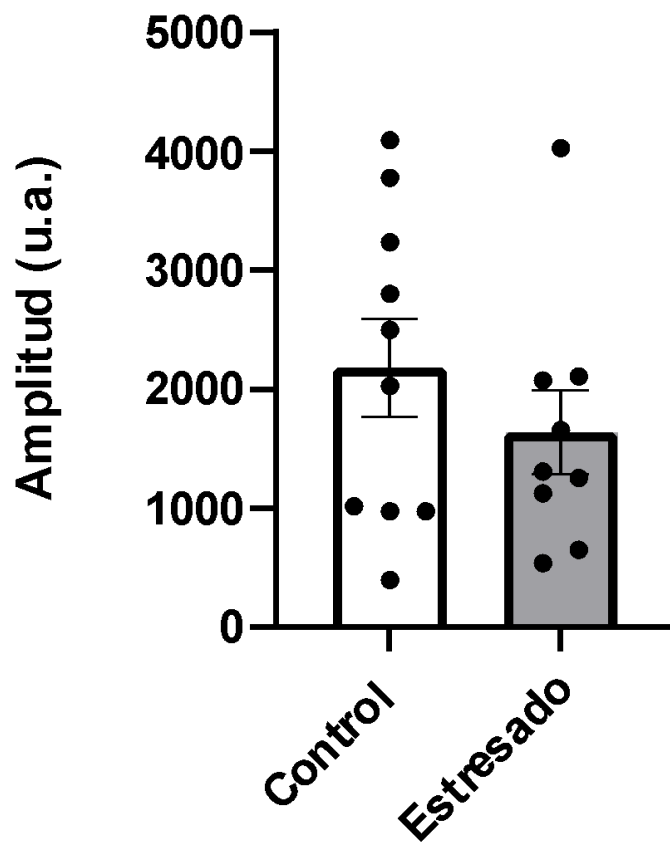


Gráfico 5. En las pruebas experimentales de amplitud en la respuesta al estímulo, el grupo control obtuvo un valor promedio de $2182,8 \pm 412,3$ u.a. y el grupo estresado obtuvo un valor promedio de $1640,6 \pm 350,1$ u.a. (* $p=0,33$).

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

Este estudio es una colaboración de observaciones adicionales al campo de la investigación en la electrofisiología en plantas, aportando con la caracterización de la especie *Licopersicum esculentum*.

Los estudios que llevamos a cabo durante el proceso de investigación, son fácilmente reproducibles, lo que nos da la facilidad para validar los datos y, además, debido al fácil uso del amplificador es posible crear una herramienta pedagógica reproducible al aula contribuyendo con el aprendizaje transversal y multidisciplinario abordando el método experimental y sus procesos, junto con el análisis de variables y observar cómo se comportan. El estudio de los sistemas electrofisiológicos de plantas con un gran valor agrícola como por ejemplo el tomate, tienen una importancia significativa ya que estos estudios son de gran ayuda para la agricultura, la producción y cosecha de estos, reduciendo costos, aumentando ingresos y en este caso la detección prematura de una posible deshidratación, sequía o amenazas causada por insectos.

Asimismo, contamos con desventajas, como por ejemplo que los resultados no siempre son observables a simple vista por lo que muchas veces se deben interpretar los datos y poder diferenciar los que son relevantes y reales de los que no, además de que nuestra interfaz es sensible a ruidos ambientales.

A lo largo de la investigación nos enfrentamos con dificultades en el monitoreo de la respuesta eléctrica en donde las plantas de tomate, las cuales estaban bajo las mismas condiciones ambientales, tenían respuestas variadas, una planta reaccionaba con una amplitud mayor a otra siendo del mismo grupo control o al contrario del grupo estresado e incluso, tuvimos días en que plantas no reaccionaron al estímulo de calor. Este comportamiento se vio anteriormente en un estudio en donde nos menciona similitudes en plantas de menta, donde a veces, en condiciones iguales, se mostraban respuestas diversas, muy robustas o por el contrario una nula reacción al estímulo de calor. (Madariaga, D et al., 2023). Actualmente no hay estudios suficientes que puedan explicar esta variabilidad en las respuestas eléctricas registradas.

En nuestra investigación, pudimos observar que el 62,4% de las plantas tuvieron respuestas eléctricas al estímulo de calor siendo un 37,6% de las plantas que no reaccionaron a este estímulo, porcentaje de respuesta similar a los reportados previamente en otras especies de plantas (Madariaga et al 2023). En relación a las plantas en donde no se vio respuesta, nos surgió la duda de si realmente no reaccionaron o si el equipo de registro no fue capaz de detectarlas. Según lo anterior podemos discutir que la capacidad de respuesta de una planta incluye tanto el estado de latencia como la salud de la planta, además, pudiendo incluso influir lesiones del tejido vegetal, en respuesta a variables exógenas, en la ausencia de señal (Madariaga, D et al., 2023).

En la búsqueda de la caracterización de la respuesta eléctrica podemos señalar que nuestros datos sugieren que esta puede variar en condiciones de estrés hídrico disminuyendo la velocidad de conducción del potencial sistémico. Lo anterior podría atribuirse a modificaciones en el crecimiento, el desarrollo del metabolismo, cierre de estomas y cambios en la expresión de genes, incluyendo los que codifican proteínas potencialmente protectoras, enzimas clave en la vía de síntesis de osmolitos, enzimas antioxidantes y factores de transcripción, que regulan la expresión de genes inducida por el estrés. No obstante, aún se requieren más estudios para comprender completamente este fenómeno relacionado con la generación de potenciales sistémicos en plantas.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIÓN

En respuesta a nuestra pregunta de investigación, ¿Cómo varían los potenciales sistémicos en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum*) sometidas al estrés hídrico?, podemos decir que si existe una variación en los potenciales sistémicos en plantas sometidas a estrés hídrico considerando la reducción del 50% de su riego, obteniendo una disminución en la velocidad de conducción de los potenciales sistémicos en las plantas de tomate asociadas al estrés hídrico, por lo tanto, se acepta nuestra hipótesis.

En el estudio de la respuesta eléctrica en las plantas de tomate en condiciones ideales, pudimos caracterizar su respuesta conociendo los potenciales sistémicos, obteniendo un 65,1% de respuesta ante el estímulo de calor, con un valor promedio de $0,52 \pm 0,06$ ms en la velocidad de conducción y un valor promedio de $2182,8 \pm 412,3$ u.a. en la amplitud del potencial de sistema.

En los resultados para el grupo sometido a estrés hídrico tenemos un 57,9 % de respuesta ante el estímulo de calor, obteniendo un valor promedio de $0,31 \pm 0,04$ ms en la velocidad de conducción y un valor promedio de $1640,6 \pm 350,1$ u.a. en la amplitud del potencial de sistema. Teniendo en cuenta lo antes discutido, podemos aceptar nuestra hipótesis de trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Albiac, J. (2003). Los instrumentos económicos en la gestión del agua en la agricultura. *Fondo Europeo de Orientación de Garantía Agrícola*. Madrid, Barcelona.
- Álvarez, M et al., (2003). Análisis de la diversidad genética en tomate (*Solanum L.* Sección *Lycopersicon* subsección *Lycopersicon*) utilizando AFLP. *Redalyc.org*
- Dell'Amico, J et al., (2006). Respuestas adaptativas a la sequía en el tomate inducidas por osmocondicionamiento de plántulas. *Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas*.
- FAOSTAT (2019). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Felle, H & Zimmermann, M (2007). Systemic signalling in barley through action potentials. *PubMed*.
- Flaño, A. (Agosto 2013). Situación del tomate para consumo fresco. *Oficina de estudios y políticas agrarias*.
- Fornaris, G. (2007). Conjunto tecnológico para la producción de Tomate. *Estación Experimental Agrícola*.
- Fromm, J & Lautner, S. (2006). Electrical signals and their physiological significance in plants. *Plant, cell & Environment*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x>
- Guzmán, A et al., (2017). Manual de cultivo del Tomate al aire libre . *INIA La Cruz*.
- Madariaga, D et al., (2023) A Library of Electrophysiological Responses in Plants - A Model of Transversal Education and Open Science.
- Megias, M & Molist, P. (2020). Tejidos vasculares vegetales. *Atlas de histología vegetal y animal*.
- Morales, P. (2021). Escasez hídrica en Chile y las proyecciones del recurso. *Biblioteca del congreso nacional de Chile*.

- Muñoz, M. (26 de Mayo de 2023). Boletín de hortalizas, mayo 2023. Odepa. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiOGFmMWYxZWQtZGY5OS00NjBILTgzZGMtMTQzYzBhMDU5MDIiIiwidCI6IjMzYjdmNzA3LTZlNmYtNDJkMi04ZDZmLTk4YmZmOWZiNWZhMCIsImMiOiR9>
- Muñoz, M. (26 de Mayo de 2023). Boletín de hortalizas, mayo 2023. Odepa. <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-de-hortalizas-mayo-2023#:~:text=De%20los%20productos%20de%20la,0%2C6%25%20en%20supermercados%20esto>
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias- ODEPA, (2017). El cambio climático y los recursos hídricos de Chile.
- Rhodes, J et al., (1996). The pathway for systemic electrical signal conduction in the wounded tomato plant. *Planta*, 200, 50-57.
- Ríos, L et al., (2014). Electrophysiological assessment of water stress in fruit-bearing woody plants. *Journal of Plant Physiology*, 171, 799–806.
- Saavedra, G (Sin fecha). Tomate. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA / MINISTERIO DE AGRICULTURA*.
- Shin, J et al., (2021). Authentic research investigations of a controversial question: Can plants learn?. *The American Biology Teacher*, 83(4), 219–235.
- Squeo, F & Cardemil, L. (2007). Fisiología Vegetal. *Ediciones Universidad de La Serena*.
- Taiz, L & Zeiger, E. (2006). Ácido abscísico: Una señal de maduración de la semilla y antiestrés. *Fisiología vegetal* (pp. 1047-1058)
- Taiz, L & Zeiger, E. (2006). Fisiología del estrés. *Fisiología vegetal*.(pp. 1129-1150)
- Tran, D et al., (2019). Electrophysiological assessment of plant status outside a Faraday cage using supervised machine learning. *Nature*, 9 (17073), 1-9.
- Tran, D., & Camps, C. (2021). Early diagnosis of iron deficiency in commercial tomato crop using electrical signals. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5 (631519), 1-6. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6818/Capitulo%201.%20Tomate.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

- Zimmermann, M et al., (2009). System potentials, a novel electrical long-distance apoplastic signal in plants, induced by wounding. *American Society of Plant Biologists*, 149, 1593-1600.