

PORTAINJERTOS DE DURAZNO EN DÉFICIT HÍDRICO Y SU CARACTERIZACIÓN CON BASE A VARIABLES FISIOLÓGICAS Y ANATÓMICAS

Juan Aguilar-Moreno¹, Alejandro F. Barrientos-Priego¹, Juan E. Rodríguez-Pérez¹
y Gustavo Almaguer-Vargas¹

RESUMEN

La falta de agua se ha vuelto un problema mundial para la producción de los cultivos. El conocer las relaciones de los factores intrínsecos de cómo los portainjertos pueden soportar la escasez de agua es de gran importancia para su posible selección hacia la tolerancia a sequía. Se caracterizaron aspectos anatómicos y fisiológicos de siete genotipos de durazno utilizados como portainjertos en los siguientes estados de México: Puebla (Zautla), Tlaxcala (Blanco y Amarillo), Veracruz (Jalacingo), Oaxaca (Oaxaca), Estado de México (Enano), Zacatecas (Zacatecas), así como el portainjerto Nemaguard. Se evaluaron plantas de un año y medio de edad mediante dieciocho características en condiciones de riego o sequía, y analizadas por métodos multivariados. Los portainjertos Nemaguard y Jalacingo no mostraron diferencias significativas entre sí bajo condiciones de sequía, mientras que los demás portainjertos se agruparon de acuerdo con el lugar de procedencia y la condición de riego evaluada. El análisis de componentes principales logró explicar el 83,813 % de la varianza total con tres componentes principales. El primer componente agrupó variables anatómicas (área, perímetro, longitud del eje mayor, longitud del eje menor y diámetro Feret del elemento de vaso de xilema, además de la conductividad relativa del brote); el segundo componente agrupó variables fisiológicas (tasa de asimilación de CO₂, tasa de transpiración y conductancia estomática). Mediante el análisis discriminante canónico se agruparon los portainjertos evaluados, uniéndose Puebla (Zautla) con Estado de México (Enano), así como Zacatecas con Oaxaca; estas dos últimas se corresponden con zonas templadas y poca disponibilidad de agua. De acuerdo con variables fisiológicas y anatómicas se pudo agrupar los portainjertos según su comportamiento en riego y sequía.

Palabras clave adicionales: Análisis multivariado, *Prunus persica*, tasa de asimilación, xilema

ABSTRACT

Peach rootstocks under water deficit and their characterization based on anatomical and physiological variables

The lack of water is a global problem for the culture of crops. Knowing relations among intrinsic factors of how rootstocks can withstand water deficiency is important for their selection towards drought tolerance. Physiological and morphological aspects were characterized in seven genotypes of peach used as rootstocks at the following states of Mexico: Puebla (Zautla), Tlaxcala (Blanco y Amarillo), Veracruz (Jalacingo), Oaxaca (Oaxaca), State of México (Enano), Zacatecas (Zacatecas), along with the rootstock Nemaguard. One year and a half old plants were evaluated by eighteen characteristics under irrigation and drought, and analyzed by multivariable methods. The Nemaguard and Jalacingo rootstocks showed no significant differences with each other under drought conditions, while the other rootstocks were grouped according to place of origin and the irrigation condition. The principal component analysis explained 83.813 % of the total variance with three main components. The first component grouped anatomic variables (area, perimeter, major axis length, minor axis length and Feret diameter of the xylem vessels, as well as the relative conductivity of the shoot); the second component grouped physiological variables (CO₂ assimilation rate, transpiration rate and stomatal conductance). By canonical discriminant analysis the evaluated rootstocks grouped Puebla (Zautla) with State of Mexico (Enano), and Zacatecas with Oaxaca, the latter two corresponding to temperate zones with low water availability. Within physiological and anatomical variables, it was possible to group the rootstocks according to their behavior under irrigation and drought.

Additional key words: Assimilation rate, *Prunus persica*, multivariate analysis, xylem

INTRODUCCIÓN

La sequía es el principal factor limitante en la

producción e impacta severamente en algunas funciones, procesos fisiológicos, metabólicos, la productividad y sostenibilidad de los cultivos. Los

Recibido: Julio 4, 2018

Aceptado: Marzo 28, 2019

¹ Dpto. de Fitotecnia, Posgrado en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. C.P. 56230.
e-mail: aguilar.m.juan@gmail.com; abarrien@correo.chapingo.mx (autor de correspondencia);
erodriguezx@yahoo.com.mx; gustavoalmaguervargas@gmail.com

efectos que provoca el déficit hídrico dependerán de su intensidad y duración, así como de la capacidad de las plantas para evitarlo, evadirlo y/o tolerarlo (Taiz y Zeiger, 2010).

Información sobre el comportamiento del agua en la planta se puede obtener mediante indicadores fisiológicos, entre los que el potencial hídrico representa la principal variable, seguida por el movimiento estomático (Ortuño et al., 2006). Al respecto, Tombesi et al. (2011) indicaron que el potencial hídrico está altamente correlacionado al vigor de los portainjertos de durazno. El potencial hídrico puede ser afectado por el portainjerto y las características anatómicas de sus raíces, así como lesiones en el xilema por embolia y cavitación (Taiz y Zeiger, 2010).

Indicadores anatómicos, como el xilema, un tejido compuesto por traqueidas o elementos de vaso y fibras (Carlsbecker y Helariutta, 2005) determinan la cantidad de agua que puede ser transportada, así como la vulnerabilidad de la planta a sufrir embolias y cavitación, asociada a factores de sequía (Loepfe et al., 2007). El xilema mantiene una relación directa con la conductancia estomática para soportar cambios en la conductividad hidráulica y el potencial hídrico (Meinzer et al., 2009). Los vasos de diámetro pequeño implican una mayor posibilidad de sobrevivir en condiciones de sequía ya que dificultan la formación de embolismos y cavitación, y se ha encontrado que plantas sometidas a restricción de riego pueden reducir los diámetros de los elementos de vaso de xilema como una adaptación para sobrevivir en esas condiciones (Pire et al., 2007).

Weibel (2003) sugirió que deben estudiarse los portainjertos de durazno debido a que pueden afectar la cantidad de agua y reguladores de crecimiento transportados. Dado que el uso de ellos es muy común y que pocas veces se pone énfasis en su caracterización en cuanto al comportamiento fisiológico que pudiera limitar la productividad de la plantación (Rieger, 1992; Tombesi et al., 2011), se planteó la presente investigación para determinar las relaciones que tienen algunos portainjertos en conformación de grupos, siendo éstos de diferente origen y estando sometidos a condiciones de estrés hídrico, mediante el estudio de variables e índices fisiológicos y anatómicos en la planta.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en un invernadero de la Universidad Autónoma Chapingo localizado a 19°29' N y 98°53' W a una altitud de 2240 m. Se evaluaron siete portainjertos obtenidos a partir de semilla de los estados mexicanos de Puebla (Zautla), Tlaxcala (Blanco y Amarillo), Veracruz (Jalacingo), Oaxaca (Oaxaca), Estado de México (Enano) y Zacatecas (Zacatecas). A diferencia del Jalacingo, que proviene de una zona de alta pluviometría (1740 mm), el resto de portainjertos tienen origen en zonas donde las precipitaciones son bajas a moderadas (330-670 mm). Adicionalmente, se evaluó el portainjerto Nemaguard (*Prunus persica* x *P. davidiana*), de origen californiano. Las plantas utilizadas en la investigación fueron de un año y medio de edad, plantadas en bolsas de 40 x 30 cm, con un sustrato de textura franca con capacidad de retención de agua de 32 % con base al peso seco.

Se aplicaron dos tratamientos, con riego y sin riego, durante los 12 días que duró el experimento. Las plantas con riego recibieron agua cada tercer día a capacidad del contenedor. Se consideró una planta como unidad experimental con seis repeticiones. El diseño de tratamientos fue completamente al azar.

Las variables evaluadas relacionadas con intercambio de gases, es decir, la tasa de asimilación de CO₂, conductancia estomática, tasa de transpiración, radiación fotosintéticamente activa y concentración interna de CO₂, se cuantificaron mediante un analizador infrarrojo de CO₂ portátil (CI-340 CID) utilizando la sección lateral-central de cinco hojas nuevas completamente desarrolladas y fotosintéticamente activas. Estas variables fueron evaluadas en el día 12. El potencial hídrico antes del amanecer se evaluó en la misma fecha en brotes jóvenes del tallo principal empleando una bomba de Scholander (Soilmoisture modelo 3000).

Para evaluar las variables anatómicas se hicieron cortes transversales de los tallos a 10 cm del suelo de cada portainjerto con riego y sin él. Los cortes fueron cuantificados en diez campos por planta, basándose en el estudio de Sperry y Saliendra (1994) quienes realizaron conteos cada 90°, por lo que se decidió hacer conteos cada 45° en los elementos de vaso del xilema para determinar el área, perímetro, longitud de eje

mayor, longitud del eje menor, índice de redondez, índice de alargamiento, diámetro Feret $[(4 \cdot \text{área}/\pi)^{0.5}]$, número de vasos por campo y número de vasos por mm^2 a 400X, utilizando un microscopio Leica Galean III.

Se calculó la conductividad relativa del brote utilizando la fórmula Poiseuille modificada por Fahn et al. (1986): $CR = (R^4) (FRE)$, donde CR es la conductividad relativa, R es el radio del vaso en mm y FRE es el número de vasos por mm^2 . También se calculó el índice de vulnerabilidad de Carlquist (1977): $V = DV/FRE$, donde V es la vulnerabilidad, DV es el diámetro del vaso en mm y FRE es el número de vasos por mm^2 .

Los datos obtenidos fueron estudiados mediante un análisis de componentes principales (ACP) para observar la dispersión de los materiales evaluados en un espacio tridimensional, proyectados en los tres primeros componentes que explicaron la mayor variabilidad (Johnson, 1998). Con este análisis se trató de representar la variación existente entre los diferentes portainjertos evaluados mediante la agrupación de las variables estudiadas. Así, fue posible observar la similitud de los individuos de acuerdo con su cercanía o a la formación de grupos (Durán y Sahagún, 1992). La variabilidad se determinó al obtener el centroide (coordenadas medias de los componentes principales) de los materiales y al calcular la distancia euclídea cuadrada de cada individuo, con respecto a su centroide, y comparar el promedio de sus distancias (Núñez y Barrientos, 2004).

También se realizó un análisis discriminante canónico para comparar los portainjertos y obtener las funciones canónicas que explican la variabilidad entre ellos, y una vez seleccionadas las variables discriminantes se valoró la significación estadística de las funciones obtenidas, mediante el estadístico Lambda de Wilks. Con los datos que se ajustaron al modelo, se determinó la función discriminante y la clasificación. Por otra parte, se realizó un análisis de conglomerados jerárquicos mediante el método de vinculación inter-grupo a través del cálculo de la distancia euclídea al cuadrado para determinar si existían diferencias entre los portainjertos estudiados representados en un dendrograma (Johnson, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De manera general, tanto las variables

fisiológicas y anatómicas como los índices de conducción de agua contribuyeron a explicar el sistema que las plantas tienen para su desempeño en condiciones de déficit hídrico y existieron muchos factores que afectan dichas variables. En los Cuadros 1 y 2 se indican los valores máximos y mínimos obtenidos para la variación existente entre portainjertos y en la condición de riego y sequía. Al constituir un sistema complejo, las variables fisiológicas se ven afectadas por la cantidad de agua disponible y la manera en que la planta la utiliza, lo que indica que el estudio de caracterización de materiales vegetales debe incluir la mayor cantidad de variables posibles para lograr una explicación de la varianza tal como fue señalado por Bänziger et al. (2012).

Los tres primeros componentes principales explicaron el 83,813 % de la varianza total, con valores propios de 10,462, 2,806 y 1,819, respectivamente (Cuadro 3). Las variables agrupadas con valores altos en el componente 1 fueron el área de elementos de vaso (EV), perímetro de EV, longitud del eje mayor de EV, longitud del eje menor de EV, diámetro Feret de EV, conductividad relativa del brote e índice de vulnerabilidad (Cuadro 4), todos ellos positivos, lo que indica mayores valores en dichas variables, mientras que la variable de número de EV fue negativa, denotando un valor menor. Para el componente 2 fueron la radiación fotosintéticamente activa, tasa de asimilación de CO_2 , tasa de transpiración y conductancia estomática; para el componente 3 fueron la concentración interna de CO_2 y el índice de redondez (Cuadro 4).

Los resultados obtenidos para el primer componente principal indicaron que las características anatómicas de xilema tienen información que permite explicar la variabilidad entre los genotipos estudiados y que son los que contribuyen más a la separación de grupos. Al respecto Tombesi et al. (2011) sugirieron que las características del xilema determinan el comportamiento del sistema de conducción de agua y su estudio fue útil para caracterizar y describir fenotípicamente nuevos portainjertos de durazno y puede contribuir a la selección temprana de materiales dentro de un programa de mejoramiento, por lo que la caracterización anatómica a través de xilema resulta útil para estudios de este tipo.

Cuadro 1. Máximos (Máx) y mínimos (Mín) de variables fisiológicas en portainjertos de durazno de diferentes procedencias en condiciones de riego (R) o sequía (SR)

Portainjerto	A CO ₂ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		TT ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		CE ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		CI CO ₂ (ppm)		Ψ (-MPa)	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Zautla (R)	4,14	3,99	1,63	1,54	41,07	34,59	263,6	250,6	1,84	1,60
Zautla (SR)	0,13	0,04	0,35	0,26	7,32	3,84	462,0	453,0	4,00	4,00
Blanco (R)	0,94	0,86	1,29	1,20	50,67	44,39	427,6	417,6	1,56	1,46
Blanco (SR)	0,36	0,30	0,27	0,18	7,86	5,98	383,4	374,4	3,98	3,91
Amarillo (R)	0,64	0,53	1,17	1,08	44,77	39,21	436,7	428,7	1,54	1,46
Amarillo (SR)	0,54	0,45	0,93	0,84	37,33	27,76	433,5	426,5	3,24	2,82
Jalacingo (R)	8,45	8,32	4,86	4,77	189,13	183,95	364,9	352,9	1,60	1,50
Jalacingo (SR)	2,18	2,06	0,69	0,6	16,11	8,55	147,0	136,0	2,98	2,34
Oaxaca (R)	7,23	7,10	2,22	2,13	49,34	44,86	191,7	178,7	2,04	1,80
Oaxaca (SR)	0,35	0,26	0,30	0,21	5,76	3,19	325,4	312,4	4,00	4,00
Enano (R)	0,59	0,46	1,76	1,67	81,8	71,74	445,9	437,9	1,48	1,32
Enano (SR)	0,24	0,16	0,29	0,20	8,41	6,52	500,8	491,8	4,00	4,00
Zacatecas (R)	3,00	2,91	1,09	1,00	24,98	19,81	223,0	213,0	1,62	1,38
Zacatecas (SR)	1,75	1,64	0,86	0,77	18,07	14,68	270,4	258,4	4,00	4,00
Nemaguard (R)	3,41	3,29	3,58	3,49	93,26	85,17	382,2	367,2	1,64	1,56
Nemaguard (SR)	0,91	0,84	0,39	0,30	10,82	10,73	330,5	317,5	4,00	3,96

A CO₂: tasa de asimilación de CO₂; TT: Tasa de transpiración; CE: conductancia estomática; Ψ : potencial hídrico; CI CO₂: concentración interna de CO₂ (la concentración dentro del invernadero fue alta, cercana a 1000 ppm); La temperatura promedio del aire fue de $29,7 \pm 0,33$ °C

Cuadro 2. Máximos (Máx) y mínimos (Mín) de variables anatómicas del xilema en portainjertos de durazno de diferentes procedencias en condiciones de riego (R) o sequía (SR)

Portainjerto	AEV (mm ²)		PEV (mm)		LEMA (mm)		LEME (mm)		IA		IR		DF		NEV		EV·mm ²		CRB (x10 ⁻⁸)		IVC (x10 ⁻⁸)	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Zautla (R)	0,34	0,23	0,067	0,054	0,023	0,018	0,016	0,0137	1,53	1,33	0,91	0,77	0,019	0,016	183	122	420	280	439	235	761	412
Zautla (SR)	0,35	0,22	0,078	0,051	0,024	0,017	0,018	0,0132	1,47	1,29	0,92	0,64	0,020	0,015	149	111	341	255	799	128	847	565
Blanco (R)	0,42	0,20	0,068	0,050	0,024	0,017	0,016	0,0125	1,75	1,52	0,94	0,88	0,020	0,014	192	139	441	319	445	133	681	372
Blanco (SR)	0,51	0,32	0,080	0,063	0,028	0,022	0,019	0,0155	1,92	1,53	0,90	0,86	0,023	0,018	153	123	350	282	922	342	838	569
Amarillo (R)	0,35	0,26	0,065	0,055	0,023	0,019	0,016	0,0144	1,89	1,34	0,94	0,87	0,019	0,016	196	117	450	268	310	229	769	390
Amarillo (SR)	0,48	0,20	0,074	0,048	0,026	0,016	0,018	0,0123	1,80	1,58	0,93	0,88	0,021	0,014	226	138	518	315	610	138	748	295
Jalacingo (R)	0,28	0,16	0,058	0,043	0,020	0,015	0,014	0,0109	1,94	1,53	0,92	0,89	0,017	0,013	185	121	424	278	246	940	622	333
Jalacingo (SR)	0,51	0,26	0,082	0,056	0,029	0,019	0,020	0,0144	183	1,43	0,94	0,85	0,024	0,016	171	101	392	232	678	210	1126	499
Oaxaca (R)	0,39	0,25	0,068	0,055	0,024	0,019	0,016	0,0136	1,75	1,51	0,88	0,84	0,019	0,016	180	130	412	299	437	219	692	438
Oaxaca (SR)	0,55	0,29	0,083	0,057	0,028	0,019	0,021	0,0146	2,01	1,52	0,90	0,85	0,024	0,016	143	106	328	243	726	200	1083	599
Enano (R)	0,35	0,17	0,065	0,045	0,022	0,015	0,016	0,0114	1,58	1,44	0,91	0,89	0,019	0,013	260	119	595	273	381	115	640	265
Enano (SR)	0,33	0,24	0,063	0,055	0,022	0,019	0,016	0,0136	1,75	1,42	0,90	0,87	0,018	0,016	168	110	385	251	277	149	747	478
Zacatecas (R)	0,37	0,15	0,069	0,042	0,024	0,014	0,017	0,0109	1,71	1,40	0,93	0,89	0,020	0,012	196	114	450	262	447	91	698	298
Zacatecas (SR)	0,50	0,32	0,082	0,066	0,029	0,023	0,019	0,0161	1,94	1,45	0,90	0,83	0,023	0,019	126	88	289	202	628	330	1198	778
Nemaguard (R)	0,43	0,22	0,074	0,051	0,025	0,017	0,018	0,0131	1,83	1,46	0,91	0,87	0,021	0,015	153	108	351	247	574	152	803	462
Nemaguard (SR)	0,60	0,22	0,087	0,052	0,030	0,018	0,021	0,0121	2,13	1,54	0,94	0,87	0,025	0,015	183	107	419	245	102	194	989	393

AEV: Área de elemento de vaso; PEV: perímetro de elemento de vaso; LEMA: longitud del eje mayor; LEME: longitud del eje menor; IA: índice de alargamiento; IR: índice de redondez; DF: diámetro Feret; NEV: número de vasos por corte; EV·mm²: elementos de vaso por mm²; CRB: conductividad relativa de brote; IVC: índice de vulnerabilidad de Carlquis

Cuadro 3. Varianza total explicada de cada uno de los componentes principales de portainjertos de durazno de diferentes procedencias en condiciones de riego y sequía

Componente	Autovalores iniciales		
	Total	Varianza (%)	Acumulado (%)
1	10,462	58,120	58,120
2	2,806	15,588	73,709
3	1,819	10,105	83,813
4	1,029	5,717	89,531

Se encontró que el portainjerto de Veracruz (Jalacingo) en condición de suelo húmedo se presenta alejado de los demás portainjertos (Figura 1), posición obtenida por sus características anatómicas principalmente, aunque fuertemente influida por la condición de riego. Como ya se señaló, el Jalacingo proviene de una zona con alta precipitación lo que sugiere que la diferencia entre genotipos también puede estar influida por su lugar de origen, tal como lo encontraron Núñez et al. (2006) en duraznos de diferentes procedencias.

Cuadro 4. Valores con los que contribuyen las variables evaluadas a cada componente principal de portainjertos de durazno de diferentes procedencias en condiciones de riego y sequía. Los valores resaltados en negritas corresponden a las variables con valores más altos en valor absoluto entre las tres componentes principales

Variable	Componente			
	1	2	3	4
Radiación fotosintéticamente activa	0,108	0,818	-0,231	-0,014
Tasa de asimilación de CO ₂	-0,436	0,744	0,337	-0,154
Tasa de transpiración	-0,570	0,695	0,278	0,316
Conductancia estomática	-0,645	0,529	0,241	0,432
Concentración interna de CO ₂	-0,174	-0,388	-0,494	0,712
Potencial hídrico	0,788	-0,239	-0,281	0,108
Área de elemento de vaso (EV)	0,921	-0,123	0,339	0,058
Perímetro de EV	0,972	0,025	0,175	-0,011
Longitud del eje mayor de EV	0,959	-0,001	0,240	0,031
Longitud del eje menor de EV	0,964	0,051	0,158	0,006
Índice de redondez de EV	0,446	-0,221	0,607	0,385
Índice de alargamiento de EV	-0,549	-0,268	0,430	0,144
Diámetro Feret de EV	0,968	0,038	0,202	0,016
Número de EV por mm ²	-0,837	-0,368	0,283	-0,084
Conductividad relativa de brote	0,883	-0,109	0,354	-0,028
Índice de vulnerabilidad	0,953	0,234	-0,080	0,063

Solo el portainjerto Nemaguard mostró una susceptibilidad cercana a la del portainjerto Jalacingo en condiciones de suelo húmedo (Figura 1). Basile et al. (2003) indicaron que, dada la evidencia del potencial hídrico antes de amanecer, el portainjerto Nemaguard probablemente tiene un consumo alto de agua, lo cual lo puede hacer más susceptible a la falta de humedad en el suelo. Por su parte, Núñez et al. (2006) indicaron que Nemaguard presentó diferencias significativas en características anatómicas de brote y hoja con los otros grupos de

durazno, excepto con los grupos de zonas más húmedas, como Jalacingo y Misantla, por lo que puede compartir la susceptibilidad a sequía que presentan éstos.

El análisis discriminante mostró dos funciones canónicas (FC) que explican el 99,3 % de la varianza acumulada (Cuadro 5). El autovalor mostrado en la función 1 indica la gran variación debida a las diferencias entre los grupos, mientras que la correlación canónica, la cual define la asociación entre la combinación lineal de las variables independientes y una

combinación lineal de variables indicadoras, mostró que las variables discriminantes permiten

diferenciar entre grupos de manera muy significativa.

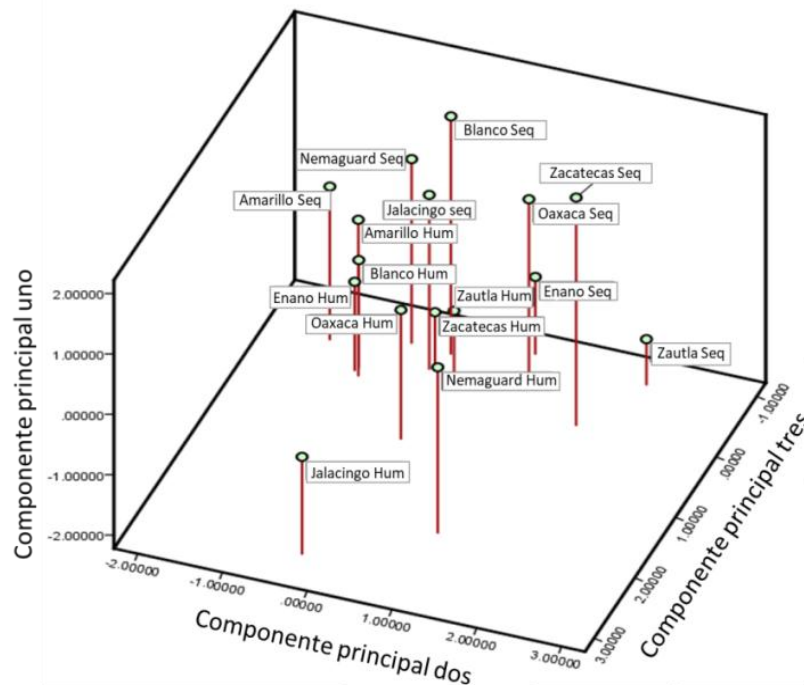


Figura 1. Proyección de cada portainjerto de durazno, de diferente procedencia, en condiciones de riego (Hum) o sequía (Seq), de acuerdo con los tres primeros componentes principales

Los valores de Lambda obtenidos en los contrastes de las funciones mostraron que no hubo solapamiento entre los grupos analizados, sustentado por el valor transformado de lambda (χ^2 -cuadrada = 68,596) que muestra una significancia muy alta ($P \leq 0,001$), por lo que se puede rechazar la hipótesis de que los grupos comparados tienen promedios iguales en las variables discriminantes (Cuadro 6).

Cuadro 5. Valores propios del análisis discriminante canónico de variables fisiológicas y anatómicas del tallo de portainjertos de durazno de diferentes procedencias en condiciones de riego y sequía

Función	Autovalor	Autovalores		
		Varianza (%)	Acumulado (%)	Correlación canónica
1	175,418	97,2	97,2	0,997
2	3,929	2,2	99,3	0,893
3	1,088	0,6	99,9	0,722
4	0,125	0,1	100,0	0,333

La estructura canónica mostrada en el Cuadro

7 contiene los valores contrastados entre cada variable y la función discriminante, en los que se observan las variables que componen las cuatro FC. En la primera función (FC1), en términos absolutos, el mayor valor se observó en la radiación fotosintéticamente activa; sin embargo, esta variable no se empleó en el análisis por presentar colinealidad con la tasa de asimilación de CO_2 . Similar situación ocurrió con otras variables, por lo que FC1 agrupó principalmente a los índices de alargamiento y de redondez de EV, así como la asimilación de CO_2 . Estas variables pueden estar asociadas a la tolerancia a sequía que manifiesta cada portainjerto evaluado. Rieger (1992) indicó que las características anatómicas de la hoja y el intercambio de gases afectan la respuesta a distintos potenciales de agua cuando son sometidos a estrés hídrico, lo cual limita la productividad de cultivares de durazno.

La segunda función canónica (FC2) fue asociada al índice de redondez de EV y al número de EV. Estas variables pueden estar vinculadas al lugar de origen de los portainjertos y la capacidad

de conducción de agua, así como a la posibilidad de sufrir cavitación y embolia, por lo que las plantas sometidas a sequía en nuestro estudio pudieron presentar este fenómeno y reducir la asimilación de CO_2 ya que esta variable presentó un valor negativo en la FC2. El portainjerto Jalacingo, proveniente de zonas húmedas, muestra un valor alto en esta función canónica lo que sugiere que es capaz de transportar alto volumen de agua por su sistema de conducción, a diferencia de los genotipos con bajos valores (Oaxaca y Zacatecas), que corresponden a materiales adaptados a zonas con déficit hídrico tal como lo indicaron Vilagrosa et al. (2010).

Cuadro 6. Valores de Lambda de Wilks del análisis discriminante canónico de las variables fisiológicas y anatómicas de tallo de ocho portainjertos de durazno de diferentes procedencias en condiciones de riego y sequía

Lambda de Wilks				
Contraste de las funciones	Lambda de Wilks	Chi-cuadrada	Grados de libertad	Significancia
1 a la 4	0,000	68,596	28	0,000
2 a la 4	0,086	22,041	18	0,230
3 a la 4	0,426	7,684	10	0,660
4	0,889	1,057	4	0,901

Cuadro 7. Matriz de estructura canónica total del análisis discriminante canónico de características anatómicas de xilema y variables fisiológicas de ocho portainjertos de durazno de diferentes procedencias en condiciones de riego y sequía

Matriz de estructura				
Variables	Función canónica (FC)			
	1	2	3	4
Índice de alargamiento de EV	0,081	-0,099	-0,953*	0,275
Índice de redondez de EV	0,143	0,492	0,626*	-0,588
Radiación fotosintéticamente activa ^Z	-0,639*	0,214	0,027	0,415
Concentración interna de CO_2 ^Z	-0,002	0,806*	-0,318	0,499
Tasa de asimilación de CO_2	0,020	-0,353	0,267	0,897*
Número de EV por mm^2	0,005	0,181	-0,472	0,863*
Índice de vulnerabilidad ^Z	0,052	0,081	0,535	-0,803*
Longitud del eje menor de EV ^Z	0,188	0,233	0,402	-0,743*
Potencial hídrico ^Z	0,080	0,132	0,248	-0,742*
Tasa de transpiración ^Z	-0,295	-0,432	0,211	0,721*
Diámetro Feret de EV ^Z	0,215	0,243	0,456	-0,705*
Conductancia estomática ^Z	-0,465	-0,326	0,175	0,703*
Perímetro de EV ^Z	0,224	0,259	0,462	-0,700*
Área de EV ^Z	0,250	0,320	0,368	-0,668*
Longitud del eje mayor de EV ^Z	0,230	0,279	0,504	-0,662*
Conductividad relativa de brote ^Z	0,288	0,353	0,415	-0,549*

* Mayor valor absoluto para cada variable en cualquier función discriminante

^Z Esta variable no se empleó en el análisis por presentar colinealidad

Dado que las variables que componen cada FC están representadas por datos brutos (Cuadro 7), en el Cuadro 8 se muestran los coeficientes estandarizados, que corresponden a los que permitieron valorar la contribución neta de cada variable a la FC. De acuerdo con estos coeficientes se puede observar que para la FC1 los índices de alargamiento y de redondez de los EV, así como la tasa de asimilación de CO_2 son los que

contribuyen para separar a los grupos, mientras que para la FC2 bastó el número de EV para diferenciarlos.

Al proyectar los portainjertos evaluados en las dos funciones canónicas (FC) se obtuvo que el portainjerto de Puebla (Zautla) y el de Veracruz (Jalacingo) se ubicaron en los extremos opuestos de la FC1 (Figura 2), mientras que para la FC2 los portainjertos más distantes fueron Amarillo y

Jalacingo. Los demás portainjertos se agruparon hacia el centro de ambas FC.

Si se considera que el portainjerto Nemaguard es muy sensible a la falta de agua (Basile et al., 2003) y está en promedio localizado hacia altos valores de asimilación de CO_2 , índice de redondez y alargamiento de EV para la FC1 y en nivel medio de número de EV para la FC2 (Figura 2), se puede sugerir que el comportamiento de los portainjertos Zautla, Enano y Zacatecas será de tolerancia a la falta de agua debido a los menores

valores medios en que se clasifica conforme al eje de la FC1, y en especial, Zautla y Zacatecas que también son separados del resto en la FC2. Lo anterior se puede relacionar con una menor asimilación de CO_2 , variable asociada con una menor conductancia estomática y ahorro de agua, lo cual es el caso contrario del portainjerto Nemaguard (Basile et al., 2003). Esta separación de genotipos coincide en parte a lo encontrado por Núñez et al. (2006) y se puede indicar que con ambas FC se pueden separar los genotipos evaluados.

Cuadro 8. Coeficientes estandarizados de las funciones discriminantes canónicas de las variables que las componen de ocho portainjertos de durazno de diferentes procedencias en condiciones de riego y sequía

Variable	Función canónica			
	FC1	FC2	FC3	FC4
Tasa de asimilación de CO_2	3,243	-1,031	0,523	0,482
Índice de redondez de elemento de vaso (EV)	4,014	0,521	0,296	0,028
Índice de alargamiento de EV	4,579	-0,777	-0,641	-0,216
Número de EV por mm^2	-2,092	1,675	-0,137	0,746

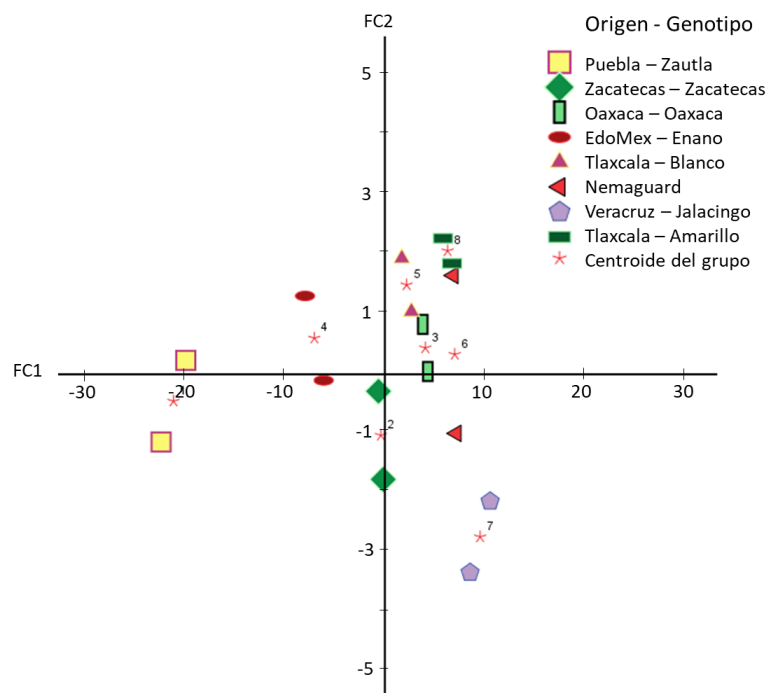


Figura 2. Dispersión de variables fisiológicas y anatómicas de ocho portainjertos de durazno de diferentes procedencias en condiciones de riego y sequía. En el eje X se muestra la primera función canónica (FC1) del análisis discriminante, donde la característica índice de alargamiento, redondez de elementos de vaso (EV) y tasa de asimilación de CO_2 fueron las más influyentes, mientras que en el eje Y se muestra la FC2 donde el número de EV por mm^2 fue la principal característica discriminante. Cada portainjerto está representado por su valor máximo y mínimo

La primera FC logró separar los portainjertos por los índices de alargamiento y redondez de EV, y la asimilación de CO₂. Estas variables son relevantes debido a que están altamente correlacionadas con otras variables que afectan el intercambio gaseoso, tales como la concentración interna de CO₂, así como la apertura y cierre de estomas, que de manera general contribuyen al desarrollo y crecimiento de las plantas y que también presentan diferencias en presencia de sequía (Centritto et al., 1999).

En la segunda FC está el número de EV. La presencia de mayor densidad de elementos de vaso, pero de menor área transversal del elemento, están asociados a genotipos con tolerancia a sequía, mientras que una mayor cantidad de EV y vasos con mayor área transversal del elemento de vaso sugieren que el material proviene de zonas con mayor humedad y que en algún momento pueden presentar embolia y cavitación

(Valladares, 2004). Se podría indicar que conforme a lo anterior el genotipo Zacatecas, el cual proviene de una zona muy seca, presentaría una mayor tolerancia a la falta de humedad en el suelo. Por su parte, el genotipo Jalacingo, que proviene de zona con mayor presencia de lluvias, presenta mayor asimilación de CO₂ y tiene el menor valor en la FC2 (Figura 2), lo que denota mayor intercambio de gases y mayor pérdida de humedad, tal como el caso de Nemaguard (Basile et al., 2003).

En el dendrograma generado a partir de la matriz de distancia euclídeana se puede observar que los portainjertos se agruparon, en lo general, de acuerdo con el régimen de humedad al que fueron sometidos (Figura 3). El estado hídrico que se provocó entre los portainjertos muy probablemente afectó el intercambio de gases (Cuadro 4, componente 2), lo que se reflejó en la conformación de diferentes grupos.

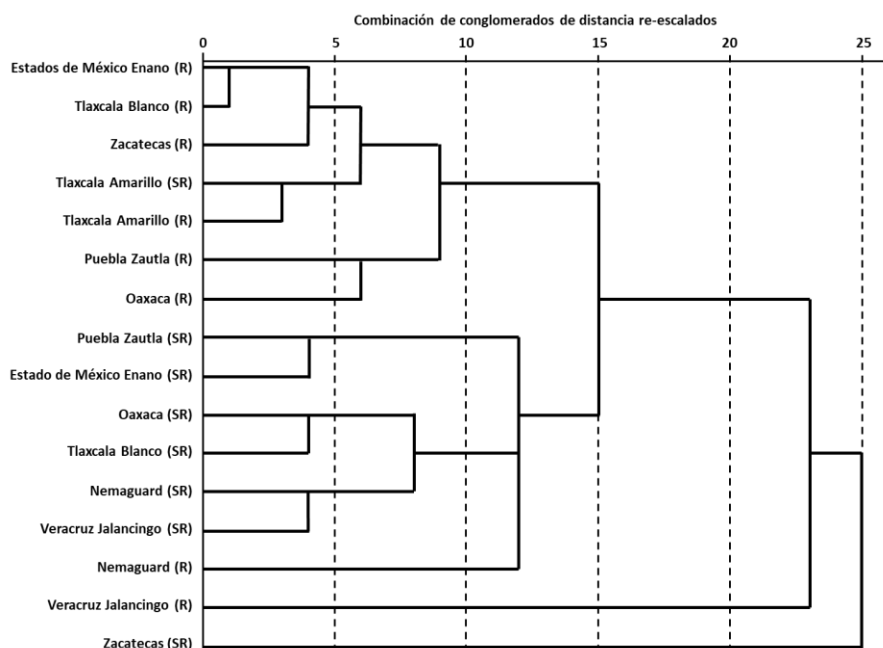


Figura 3. Dendrograma de ocho portainjertos de durazno, procedentes de distintas regiones de México, en condiciones de riego (R) o sequía (SR), a partir del método de conglomeración vinculación intergrupos de acuerdo con algunas variables fisiológicas y anatómicas

El portainjerto Jalacingo bajo riego presentó la máxima distancia entre los demás portainjertos bajo la misma condición; como ya se señaló, éste proviene de una zona húmeda, mientras que los demás portainjertos provienen de zonas

intermedias y secas, por lo que puede considerarse que el primero es menos tolerante a sequía. Lo anterior puede confirmarse por el número de elementos de vaso que lo hacen más eficiente en el transporte de agua y permiten una mayor

transpiración, lo que implicaría que se agote más rápidamente el agua del suelo, tal como ha sido indicado por Basile et al. (2003). Para el caso del genotipo Amarillo, respecto a las condiciones de riego y sin riego, presentó una baja distancia euclídea (3) y ambos se ubicaron en el conglomerado que agrupó a los portainjertos con riego, lo cual indicó que sus características no variaron mucho bajo las dos condiciones, mientras que el genotipo Zacatecas tuvo la mayor distancia (21) entre riego y sin riego, seguido de Jalacingo (19).

Dentro del grupo sin riego, los portainjertos Zautla y Enano mostraron la menor distancia, y al igual que Oaxaca y Blanco, no presentaron diferencias entre sí, atribuido a que las condiciones ambientales de las que provienen son similares.

Las agrupaciones coinciden en el lugar de procedencia de los portainjertos, así como en las características evaluadas (Figura 2). El portainjerto Nemaguard, al ser un híbrido interespecífico, comparte características con los portainjertos de durazno y sirve como un punto de referencia para determinar el comportamiento del resto de los materiales (Weibel, 2003). Este portainjerto mostró mayor variabilidad entre las condiciones de riego y sin riego, y aún con riego se ubicó en el grupo de los genotipos sometidos a sequía (Figura 3); esto denota que puede presentar características de condiciones de sequía, aun estando en condiciones de riego, confirmando su susceptibilidad a la falta de agua en el suelo (Basile et al., 2003).

Los portainjertos Jalacingo con riego y Zacatecas sin riego mostraron una separación completa de los grupos donde se ubicaron los genotipos en condiciones sin riego o los grupos en condiciones con riego (Figura 3), lo que indica que tienen características completamente contrastantes con los demás genotipos, entre las que se encuentra la tasa de asimilación de CO_2 . El intercambio de gases fue mayor para Jalacingo con riego, tal como encontraron Basile et al. (2003), quienes señalaron que los materiales más susceptibles, con mayor intercambio de gases, agotaron el agua del suelo haciéndolos más sensibles a la sequía, mientras que el portainjerto Zacatecas, con menor asimilación de CO_2 que Jalacingo, se comportaría más tolerante a la sequía.

El potencial hídrico de brotes fue otra variable que mostró mayor contraste entre los portainjertos Jalacingo y Zacatecas, y fue menor para este último. Se ha encontrado que el potencial hídrico en árboles de durazno tiene un efecto significativo en la regulación de la conductancia foliar para el intercambio de gases (Solari et al., 2006), la cual, al disminuir, reduce la asimilación de CO_2 ; sin embargo, estos mismos autores encontraron que en algunos casos los menores potenciales hídricos en las hojas se correspondieron con mayor intercambio de gases, tal como ocurrió con el portainjerto Jalacingo. Esto implicaría cierta dificultad para minimizar el impacto del descenso de contenido hídrico en el suelo y la planta, ya que aparentemente al tener estomas abiertos presentaría mayor pérdida de agua y mayor posibilidad de deshidratarse rápidamente, atribuible a un sistema de conducción eficiente de agua.

Los resultados anteriores pueden contribuir a la comprensión del comportamiento de las diferentes variables y las relaciones hídricas en plantas de durazno. Igualmente, las variables que agruparon los portainjertos pueden servir como indicadores de la intensidad progresiva del estrés hídrico (Ortuño et al., 2006), por lo que se presume que las mismas fueron útiles para determinar objetivamente diferencias entre los genotipos.

Por otra parte, se demostró que tanto las variables fisiológicas como anatómicas de los portainjertos estudiados contribuirían a caracterizar exitosamente otros materiales mediante el análisis multivariado. Por ejemplo, resultaría útil considerar estudios donde se determinen las relaciones existentes entre la parte aérea (injerto) y raíz (portainjertos) dependiendo del origen de la planta.

CONCLUSIONES

La variable fisiológica tasa de asimilación de CO_2 y las variables anatómicas número de elementos de vaso, índice de alargamiento de elementos de vaso e índice de redondez de elementos de vaso permitieron agrupar los portainjertos evaluados de acuerdo con su comportamiento en riego y sequía.

Se formaron grupos geográficos de acuerdo con las variables y, la condición de riego o sin riego del portainjerto, entre los que Puebla y

Estado de México se mantuvieron más cercanos, así como también Zacatecas con Oaxaca; éstas últimas correspondientes a zonas templadas y poca disponibilidad de agua.

Según el conglomerado jerárquico, la mayoría de los portainjertos se agruparon respecto a la condición de riego y sequía, excepto Amarillo y Nemaguard, mientras que Jalacingo y Zacatecas se separaron de esos grupos. Los portainjertos Jalacingo y Nemaguard se mostraron sensibles y presentaron un comportamiento similar bajo condiciones de sequía.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, México) por la concesión de la beca de posgrado y a la Dirección General de Investigación y Posgrado de la Universidad Autónoma Chapingo por el financiamiento parcial del estudio.

LITERATURA CITADA

1. Bänziger, M., G. Edmeades, D. Beck y M. Bellon. 2012. Mejoramiento para aumentar la tolerancia a sequía y a deficiencia de nitrógeno en el maíz: De la teoría a la práctica. CIMMYT. D.F., México. 68 p.
2. Basile, B., J. Marsal y T. Dejong. 2003. Daily shoot extension growth of peach trees growing on rootstocks that reduce scion growth is related to daily dynamics of stem water potential. *Tree Physiology* 23: 695-704.
3. Carlquist, S. 1977. Ecological factors in wood evolution: a floristic approach. *American Journal of Botany* 64: 887-896.
4. Carlsbecker, A. y Y. Helariutta. 2005. Phloem and xylem specifications: Pieces of the puzzle emerge. *Current Opinion in Plant Biology* 8: 512-517.
5. Centritto, M., F. Magnani, H. Lee y P. Jarvis. 1999. Interactive effects of elevated [CO₂] and drought on cherry (*Prunus avium*) seedlings. II. Photosynthetic capacity and water relations. *New Phytologist* 141(1): 141-153.
6. Durán R., R. y J. Sahagún Castellanos. 1992. La interacción genético-ambiental en la genotecnología vegetal. *Revista Chapingo* 16: 79-80.
7. Fahn, A., E. Werker y P. Baas. 1986. Wood anatomy and identification of trees and shrubs from Israel and adjacent regions. Israel Academy of Sciences and Humanities. Jerusalem, Israel. 221 p.
8. Johnson, D.E. 1998. Métodos Multivariados Aplicados al Análisis de Datos. International Thomson. D.F., México. 566 p.
9. Loepfe, L., J. Martínez V., J. Piñol y M. Mencuccini. 2007. The relevance of xylem network structure for plant hydraulic efficiency and safety. *Journal of Theoretical Biology* 247: 788-803.
10. Meinzer, F., D. Johnson, B. Lachenbruch, K. McCulloh y D. Woodruff. 2009. Xylem hydraulic safety margins in woody plants: Coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. *Functional Ecology* 23: 922-930.
11. Núñez-Colín., C. y A. Barrientos-Priego, 2004. Variabilidad interna, un uso alternativo del análisis en componentes principales. *Proceedings of the Interamerican Society for Tropical Horticulture* 48: 203-207.
12. Núñez-Colín., C., A. Barrientos-Priego, J. Rodríguez-Pérez y R. Nieto-Ángel. 2006. Variabilidad anatómica de los sistemas de conducción y estomático de genotipos de *Prunus* spp. de diferentes orígenes. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 41(2): 233-241.
13. Ortuño, M., Y. García, W. Conejero, M. Ruiz, J. Alarcon y A. Torrecillas. 2006. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees* 20: 1-8.
14. Pire, R., M. Sanabria, A. Pereira y J. Díez. 2007. Conductividad hidráulica y grosor de los vasos del xilema en cinco materiales de vid sometidos a déficit hídrico. *Interciencia* 32(1): 35-40.
15. Rieger, M. 1992. Growth, gas exchange, water uptake, and drought response of seedling and cutting propagated peach and citrus rootstocks. *Journal of American Society of Horticultural Science* 117(5): 834-840.
16. Solari, L., S. Johnson y T. Dejong. 2006. Relationship of water status to vegetative growth and leaf gas exchange of peach (*Prunus persica*) trees on different rootstocks. *Tree*

- Physiology 26: 1333-1341.
17. Taiz, L. y E. Zeiger. 2010. Plant Physiology. Sinauer Associates. Sunderland, MA, USA.
18. Tombesi, S., A. Almehdi y T. Dejong. 2011. Phenotyping vigour control capacity of new peach rootstocks by xylem vessel analysis. *Scientia Horticulturae* 127: 353-357.
19. Valladares, F. (ed). 2004. Ecología del Bosque Mediterráneo en un Mundo Cambiante. Organismo Autónomo de Parques Naturales, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España.
20. Vilagrosa, A., F. Morales, F. Abadía, J. Bellot, H. Cochard y E. Gil P. 2010. Are symplast tolerance to intense drought conditions and xylem vulnerability to cavitation coordinated? An integrated analysis of photosynthetic, hydraulic and leaf level processes in two Mediterranean drought-resistant species. *Environmental and Experimental Botany* 69: 233-242.
21. Weibel, A. 2003. Comparative vegetative growth responses of two peach cultivars grown on size-controlling versus standard rootstocks. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 128(4): 463-471.