



DOI: 10.29298/rmcf.v14i80.1395

Artículo de Investigación

Fenología de estructuras reproductivas de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Phenology of reproductive structures of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco

Sara Irene Velasco-Hernández¹, Liliana Muñoz-Gutierrez^{2*}, J. Jesús Vargas-Hernández³, Mario Castelán-Lorenzo⁴

Fecha de recepción/Reception date: 11 de mayo de 2023.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 17 de octubre de 2023.

¹Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. México.

²INIFAP, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales. México.

³Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado Forestal. México.

⁴Universidad Autónoma Chapingo, Preparatoria Agrícola, Área de agronomía. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: gutierrez.liliana@inifap.gob.mx

*Corresponding autor; e-mail: gutierrez.liliana@inifap.gob.mx

Resumen

Conocer el inicio, el fin y la duración de la receptividad femenina y de la dispersión de polen permite generar información para el establecimiento de programas para la producción y manejo de semillas, así como de mejoramiento genético. El objetivo de este estudio fue determinar los periodos de receptividad de los estróbilos femeninos y la dispersión de polen en una plantación de árboles jóvenes de *Pseudotsuga menziesii* que se han tratado con ácido giberélico ($AG_{4/7}$ y AG_3) para promover la floración temprana. Se dio seguimiento a 12 árboles con estructuras reproductivas femeninas y masculinas. Se definieron las fechas de inicio, fin y duración de cada una de las etapas fenológicas de la floración con el macro *SYNCHRO* de SAS. El periodo de receptividad de las estructuras femeninas fue, en promedio, de 14 días, mientras que la dispersión de polen duró entre cinco y seis días. Las etapas de receptividad femenina y la dispersión de polen presentaron alta sincronización ($PO=0.60$ y 0.64), los coeficientes de correlación entre los eventos fenológicos fueron altos, positivos ($r=0.87$) y significativos ($p\leq 0.001$). Se concluye que la dispersión de polen y la receptividad femenina están sincronizados y no son independientes, por lo que existe la probabilidad de cruzamiento entre los árboles.

Palabras clave: Ácido giberélico, dispersión de polen, inducción floral, manejo de semillas, receptividad femenina, sincronización fenológica.

Abstract

Determining the beginning, the end, and the time length of each reproductive stage in ovule receptivity as well as in pollen dispersal allows to generate information for a genetic improvement program. The general goal was to determine the period for the receptivity of female strobili and pollen dispersal on a young tree plantation of *Pseudotsuga menziesii* treated with gibberellic acid ($GA_{4/7}$ and GA_3) to promote flowering. Twelve trees with reproductive structures were monitored; three branches with female strobili and three branches with male

structures were marked in each tree. The initial and end dates and time length of each of the phenological stages of flowering were registered and determined with the SYNCHRO macro using SAS software. The receptivity period of female strobili lasted on average 14 days, while pollen dispersal lasted between five and six days. The female receptivity periods and pollen dispersal showed high synchronization ($P=0.60$ and 0.64), while the correlation coefficients between phenological events are high and positive ($r=0.87$), in addition to being significant values ($p\leq 0.001$). Thus, the phenological events of pollen dispersal and female receptivity are highly synchronized and are not independent, so there is the probability of crossing between the trees.

Key words: Gibberellic acid, pollen dispersal, floral induction, seed management, female receptiveness, phenological synchronization.

Introducción

El género *Pseudotsuga* (Pinaceae) conocido como pinabete o abeto *Douglas* se distribuye en el oeste de Norteamérica y el sureste asiático (Farjon, 1990). *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco se desarrolla en ambientes variados y su distribución geográfica es amplia, forma bosques naturales extensos en el oeste de Estados Unidos de América y Canadá (Hermann y Lavender, 1999).

En México, la distribución natural de *P. menziesii* es geográficamente extensa, aunque se encuentra en poblaciones pequeñas o manchones aislados a lo largo de la Sierra Madre Occidental y en la parte norte de la Sierra Madre Oriental y de la Sierra de Querétaro (Rzedowski, 1978). Además, forma pequeños rodales a lo largo del Eje Neovolcánico en el centro del país (Villagómez y Bello, 2015), en Tlaxcala y Puebla (Domínguez *et al.*, 2004). También se citan dos poblaciones en el estado de Oaxaca: una en Santa Catarina Ixtepeji (Debreczy y Rácz, 1995) y otra en la Sierra Madre del Sur, ambas representan el límite natural austral de la especie (Del Castillo *et al.*, 2004).

En el territorio nacional, *P. menziesii* es muy apreciada por su potencial como árbol de Navidad, por ello se requiere de germoplasma para establecer plantaciones

forestales comerciales (PFC) y al mismo tiempo para conservar la especie en sus poblaciones naturales.

Actualmente, los plantadores demandan gran cantidad de semillas para las PFC de árboles de Navidad, principalmente en la zona centro del país (Puebla, Estado de México y Tlaxcala). Algunas alternativas para resolver este problema de abasto consisten en tener un mejor conocimiento de los factores que regulan la floración y producción de semillas en los árboles; para ello, existen prácticas y tratamientos de cultivo que se han utilizado con éxito para acelerar la producción de conos y semillas en árboles juveniles a partir de prácticas como el anillado del tronco y la aplicación de reguladores de crecimiento, poda de raíz, estrés por temperatura y fertilización (Ross y Bower, 1989; Cherry *et al.*, 2007; Muñoz-Gutiérrez *et al.*, 2010).

La inducción floral mediante la adición de reguladores de crecimiento que aceleran la producción de conos y semillas en una amplia gama de coníferas es bien conocida, particularmente con ácido giberélico (AG). La combinación de AG₄ y AG₇ (AG_{4/7}) es la más efectiva y se utiliza en la inducción de estructuras reproductivas en diferentes especies de coníferas (Ross, 1983; Greenwood, 1987; Owens *et al.*, 2001; Aderkas *et al.*, 2004; Cherry *et al.*, 2007). Sin embargo, estos tratamientos, además de promover la formación de estructuras reproductivas, es posible que modifiquen los periodos de receptividad y dispersión del polen (Vargas-Hernández y Vargas-Abonce, 2016), modificación que puede reducir o eliminar la contribución de algunos individuos en la producción de semillas (Muñoz-Gutiérrez *et al.*, 2010). Lo anterior se debe a la falta de sincronía fenológica entre individuos de una misma plantación, lo que incrementa la probabilidad de endogamia y, por ende, la cantidad de semillas vanas (Burczyk y Chalupka, 1997).

A pesar de que ya se tienen antecedentes en México sobre trabajos de inducción floral en *P. menziesii* (Muñoz-Gutiérrez *et al.*, 2010), no existen estudios sobre su fenología reproductiva en poblaciones naturales ni en plantaciones de árboles de

Navidad con árboles jóvenes tratados para estimular la floración temprana. Por ello, el objetivo general del presente trabajo fue determinar los periodos de receptividad de los estróbilos femeninos y la dispersión del polen en una plantación de árboles jóvenes de *P. menziesii* que fueron tratados con ácido giberélico (AG_{4/7}) para inducir la formación de estructuras reproductivas. Se trabajó con dos grupos de árboles con diferente nivel de respuesta a la formación de estructuras reproductivas femeninas y masculinas; en particular, se planteó analizar las diferencias entre grupos de árboles en cuanto al inicio, el fin y la duración de la receptividad de los estróbilos femeninos y de la dispersión del polen, además de su relación con la acumulación de grados-día, y determinar el grado de sincronización fenológica entre los individuos de la misma plantación. La hipótesis planteada es que la sincronía entre la receptividad femenina y la dispersión de polen es diferente entre dos grupos de árboles jóvenes de *P. menziesii* debido a la respuesta diferenciada a la formación de estructuras reproductivas masculinas y femeninas.

Materiales y Métodos

Localización de la plantación

La plantación de árboles de Navidad de *P. menziesii* se ubica en el Parque Ecoturístico Bosque Esmeralda, perteneciente al ejido Emiliano Zapata, municipio Amecameca, Estado de México, en las coordenadas 19°07'14" N y -98°44'06" O, a 2 640 msnm (SBE, 2020).

Ensayos de inducción floral

En una sección de las plantaciones de *P. menziesii* del parque se seleccionaron 12 árboles jóvenes con edades entre siete y ocho años, con una altura de 1.60 a 2.60 m y diámetro del tronco de 5.20 a 9.50 cm, todos en condición de luz solar plena. En los árboles se aplicaron dos tratamientos para inducir la floración:

Tratamiento 1. Anillado en el tronco y aplicación de una sola dosis de ácido giberélico AG_{4/7} (*Green Import Solutions*[®], Japón) (2.55 mg cm⁻² de área basal) en un solo evento, pero en diferentes fechas entre los meses de marzo a abril de 2021 con intervalos de siete días.

Tratamiento 2. Anillado en el tronco y una sola aplicación (8 de marzo de 2021) de AG_{4/7} (*Green Import Solutions*[®], Japón) (2.55 mg cm⁻² de área basal). El anillado es un bloqueo parcial del floema para promover una mayor disponibilidad de carbohidratos y de otras sustancias promotoras del crecimiento (Ross y Bower, 1989), el cual consistió en realizar dos cortes transversales al tronco en forma de medialuna con un serrucho, el primer corte se realizó a 50 cm del suelo y el segundo a una distancia de 1.5 veces el diámetro del tronco, después del primer corte (Muñoz-Gutiérrez *et al.*, 2010).

Fenología de estructuras reproductivas

Se llevó a cabo el seguimiento a 12 árboles con formación de estructuras reproductivas femeninas y masculinas durante los meses de febrero y marzo de 2022, independientemente del tipo de tratamiento. Por cada árbol se marcaron tres ramas ubicadas entre la parte media y alta de la copa, ya que es la sección con mayor presencia de estructuras reproductivas femeninas, y tres ramas para el seguimiento de las estructuras masculinas, las cuales se localizaron entre la parte media y baja de la copa, donde se desarrollan los estróbilos masculinos, principalmente.

Las observaciones del avance fenológico se realizaron con una frecuencia de cuatro a cinco días desde el momento en que se visualizaron las estructuras reproductivas en las yemas, hasta que las estructuras femeninas dejaron de estar receptivas, y cuando finalizó la dispersión del polen en los estróbilos masculinos.

Para determinar las etapas fenológicas se siguió la metodología descrita por Webber y Painter (1996). Para los estróbilos femeninos se definieron cinco etapas: (E1) se distinguen las estructuras reproductivas femeninas, aún sin emerger en la yema; (E2) alargamiento del estróbilo, yema reventada y se visualizan las brácteas de la estructura reproductiva; (E3) de 30 a 40 % de las brácteas están expuestas, la estructura femenina ya es receptiva; (E4) receptividad máxima; y (E5) formación y alargamiento del estróbilo femenino (Figura 1).

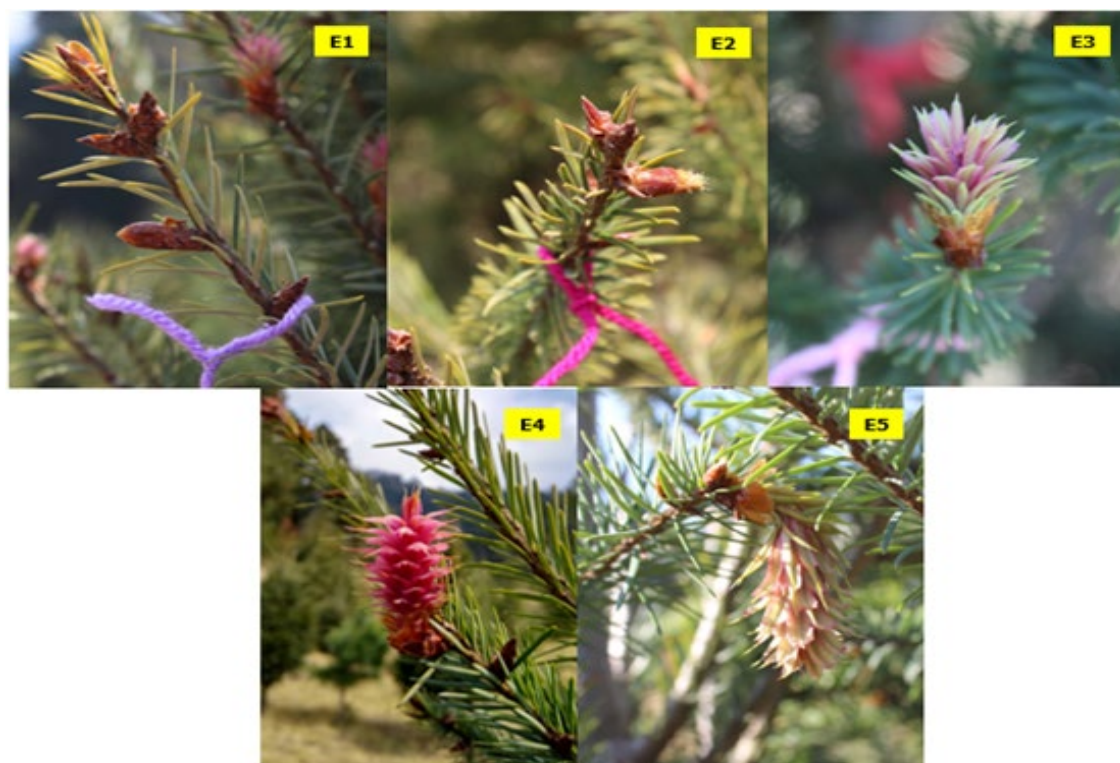


Figura 1. Etapas fenológicas de estróbilos femeninos de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

Para los estróbilos masculinos, también se consideraron cinco etapas: (E1) se distinguen las estructuras reproductivas masculinas, aún sin emerger en las yemas; (E2) las yemas se hinchan y se visualizan los sacos polínicos; (E3) alargamiento del estróbilo, rompe las escamas de la yema; (E4) el estróbilo alcanza el máximo tamaño y maduración, fase en la que se dispersa el polen; y (E5) finaliza la dispersión y comienza a secarse el estróbilo (Figura 2).



Figura 2. Etapas fenológicas de estróbilos masculinos de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

A partir de los datos fenológicos de cada rama muestreada se determinó la fecha de inicio y fin en días Julianos (número de días a partir del 1 de enero), así como la duración del periodo de receptividad de las estructuras femeninas y de dispersión del polen.

Conformación de grupos de estudio

Para esta investigación, los árboles evaluados se conformaron en dos grupos. En el Grupo 1 se incluyeron aquellos árboles que formaron estructuras reproductivas con todos los tratamientos, pero no necesariamente con presencia de ambos tipos de

estróbilos dentro del mismo árbol debido a que los tratamientos de inducción floral no siempre promueven la formación de los dos sexos. En el segundo, solo se integraron datos de cinco árboles procedentes del primer tratamiento, porque tuvieron estructuras femeninas y masculinas en el mismo árbol (Grupo 2), además de que completaron todas las etapas.

Análisis de datos

Para determinar las fechas de inicio, fin y duración de cada una de las etapas fenológicas se empleó el macro *SYNCHRO* (Zas *et al.*, 2003) del programa de análisis estadístico *SAS*[®] (SAS, 2013), con el cual se obtuvieron los índices de sincronización fenológica (*PO*). También se correlacionaron las fechas del inicio, fin y duración de la receptividad femenina y la dispersión de polen entre todos los árboles mediante coeficientes de correlación de *Spearman* (*r*) (de Winter *et al.*, 2016).

Con la finalidad de determinar la relación de los eventos fenológicos de la floración de ambos tipos de estructuras con la temperatura ambiental, se utilizaron las temperaturas máximas y mínimas registradas para el municipio Amecameca en el sitio web *AccuWeather* (2022) durante el periodo de estudio (enero-marzo de 2022) para calcular los grados-día (*GD*) acumulados a partir del primer día de enero hasta finalizar el periodo de receptividad de las estructuras femeninas; se empleó la siguiente ecuación:

$$GD = \left[\frac{T^{\circ} \text{máx} + T^{\circ} \text{mín}}{2} \right] - T^{\circ} \text{umbral}$$

Donde:

GD = Grados-día

$T^{\circ} \text{máx}$ = Temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$)

$T^{\circ} \text{min}$ = Temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$)

$T^{\circ} \text{umbral}$ = Temperatura umbral inferior de la especie ($^{\circ}\text{C}$)

Con base en los trabajos de Ebell y Schmidt (1964) se determinó que la temperatura umbral de *P. menziesii* es de 10 $^{\circ}\text{C}$ en poblaciones naturales de Columbia Británica, Canadá.

Resultados

Variación en la fenología reproductiva

El periodo de receptividad de las estructuras reproductivas femeninas entre todos los árboles de los grupos estudiados fue el mismo, con duración promedio de 14 días (Cuadro 1). La fecha promedio de inicio de la receptividad (E3) se registró el día 57 (26 de febrero) y finalizó el día 70 (11 de marzo). El periodo de máxima receptividad individual varió de 6 a 21 días (Cuadro 1, E4).

Cuadro 1. Número de días a partir del primero de enero en que ocurrió la receptividad femenina y dispersión del polen en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

		Grupo 1			Grupo 2		
		Fecha mínima	Fecha máxima	Media	Fecha mínima	Fecha máxima	Media
Receptividad femenina	Inicio	52.5	60.5	56.5	52.5	60.5	56.5
	Fin	66.5	73.5	70	66.5	73.5	70
	Duración (días)	6	21	14	6	21	14
Dispersión de polen	Inicio	52.5	64.5	58.5	60.5	60.5	60.5
	Fin	60.5	66.5	63.5	66.5	66.5	66.5
	Duración (días)	6	6	6	6	6	6

El periodo de dispersión del polen de árboles de los grupos duró seis días en promedio (Cuadro 1). El inicio del periodo de dispersión del polen (E4) en el Grupo 1 ocurrió el día 59 (28 de febrero), mientras que en el Grupo 2 se presentó dos días después (2 de marzo). El fin de esta etapa (E4) fue el 5 de marzo en el Grupo 1, y en el Grupo 2 un par de días después.

Relación de los eventos fenológicos de la floración con la acumulación de grados-día

El inicio de la receptividad femenina media (E3 y E4) ocurrió cuando se acumularon en promedio 335 *GD* (Cuadro 2), mientras que la dispersión media del polen (E4) sucedió al acumularse 348 *GD* (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores promedio, máximo y mínimo de grados-día acumulados para la receptividad femenina media (E3 y E4) y dispersión del polen (E4) de *Pseudotsuga menziesii* en Amecameca, Estado de México.

		GD mínimo	GD máximo	GD media
Receptividad femenina	Inicio	304.0	361.5	335.0
	Fin	412.5	468.0	436.5
Dispersión de polen	Inicio	304.0	392.5	348.0
	Fin	361.5	412.5	384.0

La dispersión del polen en ambos grupos de árboles inició en promedio dos días después que la receptividad femenina y se prolongó por seis días. El hecho de que la receptividad femenina tenga mayor duración se debe a que se consideró desde la E3 como receptiva, esto es porque entre 30 y 40 % de los estróbilos pueden estar receptivos.

Sincronización fenológica

La receptividad de los estróbilos femeninos inició el día 52 (21 de febrero) en 20 % de los árboles; para el día 61, 80 % de los individuos presentaban su máxima receptividad (E4) durante un lapso aproximadamente de una semana, al mismo tiempo que 50 % de los árboles estaban dispersando el polen (Figura 3). Se observó que los periodos de máxima receptividad femenina y máxima dispersión de polen coincidieron fenológicamente por un periodo de seis días, aproximadamente.

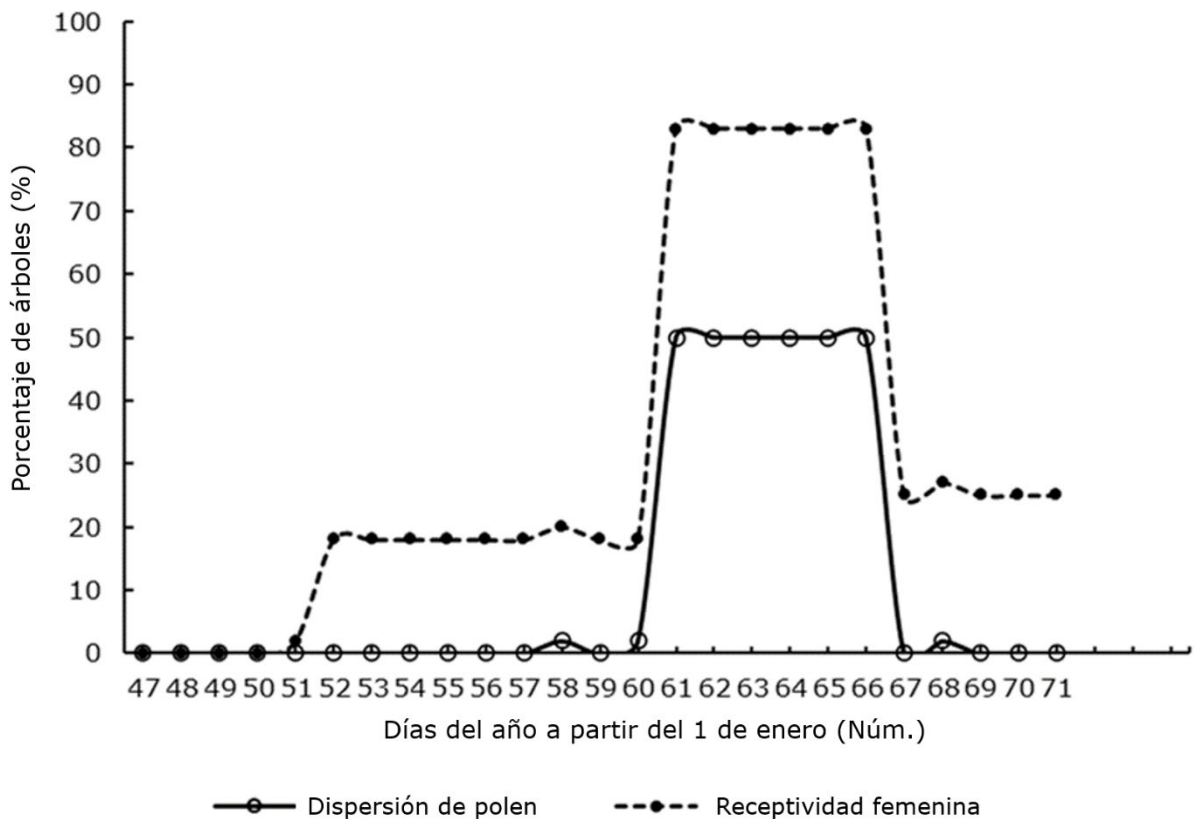


Figura 3. Sincronización fenológica de los eventos de receptividad femenina y dispersión de polen.

Índice de sincronización fenológica (*PO*)

El *PO* promedio varió de 0.60 a 0.64 en el Grupo 1 y Grupo 2, respectivamente, valores muy similares y de moderada a alta sincronización. Dentro del Grupo 1, el Índice de Sincronización Fenológica promedio a nivel individual de los dos tipos de estructuras fue 0.60, con valores mínimos de 0.38 y máximos de 0.71 para estructuras femeninas; mientras que para las estructuras masculinas fueron de 0.0

a 1.0. Para el Grupo 2, el Índice de Sincronización Fenológica promedio a nivel individual para las estructuras femeninas fue de 0.64 (0.27 a 0.88), y para las estructuras masculinas de 0.64 (0.24 a 0.83) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Índice de sincronización fenológica (*PO*) entre la receptividad femenina y la dispersión del polen en árboles de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

Número del árbol	Grupo 1		Grupo 2	
	<i>PO</i> femenino promedio	<i>PO</i> masculino promedio	<i>PO</i> femenino promedio	<i>PO</i> masculino promedio
1	0.38	1.00	-	-
3	0.50	0.67	0.27	0.83
10	0.68	0.61	0.83	0.66
18	0.64	0.39	0.60	0.73
19	0.55	1.00	-	-
27	0.43	1.00	-	-
34	0.60	0.67	0.60	0.73
43	0.58	0.63	-	-
48	0.70	0.00	-	-
55	0.70	0.00	-	-
56	0.67	-	0.88	0.24
69	0.71	0.26	-	-
General	0.60	0.60	0.64	0.64

Las correlaciones entre los periodos de receptividad femenina y la dispersión del polen fueron altas, positivas y significativas ($p \leq 0.001$) para las fechas de inicio, fin y duración de los periodos (Cuadro 4). Sin embargo, estos resultados pueden estar sobreestimados debido al número reducido de árboles empleados para los análisis, ya que no todos formaron estructuras reproductivas, o bien no terminaron su desarrollo.

Cuadro 4. Coeficiente de correlación de *Spearman* (valores de *p*) entre la receptividad femenina y la dispersión del polen de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

		<i>Dispersión del polen</i>		
		<i>Inicio</i>	<i>Fin</i>	<i>Duración</i>
<i>Receptividad femenina</i>	<i>Inicio</i>	0.879 (0.001)	0.879 (0.001)	0.858 (0.003)
	<i>Fin</i>	0.879 (0.001)	0.879 (0.001)	0.858 (0.003)
	<i>Duración</i>	0.817 (0.007)	0.817 (0.007)	0.796 (0.010)

Discusión

No hubo diferencias entre grupos de árboles respecto a los periodos de receptividad y dispersión del polen, pero esta última fue de menor duración. Posiblemente, las condiciones de estrés provocadas por el anillado del tronco afectaron los periodos de diferenciación de las yemas florales, inicio y posterior desarrollo de los estróbilos masculinos (Webber, 2004).

De acuerdo con los resultados, la receptividad femenina inicia antes que la dispersión del polen en un mismo árbol, al igual que en *Pinus patula* Schltldl. & Cham. (Hernández *et al.*, 2016), *P. radiata* D. Don (Griffin, 1984; Kang *et al.*, 2001) y *P. sylvestris* L. (Burczyk y Chalupka, 1997; Sarvas, 1962). Este comportamiento se conoce como "metándria" (Pulkkinen, 1994), el cual es común en especies del género *Pinus*. La duración media de la receptividad de los estróbilos femeninos de *Pseudotsuga menzeisii* en los dos grupos fue de 14 días, menor que la registrada por

El-Kassaby (1989) para la misma especie en árboles sexualmente maduros y en producción presentes en un huerto semillero, quien documentó una duración de 24.3 días en condiciones naturales y 17.3 días en árboles que estuvieron bajo tratamiento de enfriamiento. Sin embargo, es menor que la duración señalada por Owens *et al.* (1981), cuyos valores para la receptividad femenina varió entre cuatro y seis días.

Para la dispersión del polen, en el mismo estudio (El-Kassaby, 1989) se documentó que en condiciones naturales y a nivel poblacional, esta fase duró 27.7 días a 18.3 días en árboles bajo tratamiento de enfriamiento. Los pocos registros existentes indican que la duración óptima del periodo de dispersión del polen es de tres a cinco días (Barner y Christiansen, 1962; El-Kassaby, 1989).

En especies como *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. (Ruiz-Farfán *et al.*, 2015) y *P. nigra* J. F. Arnold (Alizoti *et al.*, 2010) se registró un desfase de los picos máximos de ambos eventos fenológicos, pero los periodos de dispersión fueron menores que los de la receptividad. La duración de la dispersión del polen puede acortarse por exceso de humedad debido a periodos continuos o sucesos cortos de lluvia abundante, lo cual provoca la compactación del polen dentro del estróbilo y que rápidamente este pierda viabilidad. Por el contrario, con las sequías la dispersión del polen es más rápida (Ruiz-Farfán *et al.*, 2015).

La duración del periodo de dispersión del polen en *Pseudotsuga menziesii* (Erickson y Adams, 1989) y en *Pinus radiata* (Codesido *et al.*, 2005) depende de la humedad, la temperatura y los *GD* acumulados durante el proceso de diferenciación y desarrollo posterior de las estructuras reproductivas (Huusko y Hicks, 2009). Para *P. menziesii* se requieren entre 800 y 900 *GD* por arriba de 10 °C para que inicie la dispersión a una altitud de 305 m, mientras que en altitudes entre 762 y 1 067 m se necesitan de 400 *GD* (Ebell y Schmidt, 1964). Sin embargo, en este estudio se acumularon 348 *GD*. La menor cantidad de grados-día requeridos en la plantación que se ubica a mayor altitud (2 640 m) sugiere un valor adaptativo de la especie para iniciar los procesos de floración.

Por otra parte, no todos los árboles del Grupo 1 desarrollaron ambos tipos de estructuras reproductivas en el mismo árbol; todos presentaron estróbilos femeninos, pero solo en 50 % se observaron estróbilos masculinos; por lo tanto, la participación de no todos los individuos en la formación de estróbilos masculinos y dispersión del polen es una limitante para la producción de semillas viables, ya que solo pocos árboles actúan como polinizadores o dispersores del polen. Por el contrario, en el Grupo 2 en el cual los árboles desarrollaron estróbilos femeninos y masculinos en el mismo árbol, tuvieron la posibilidad de cruzarse entre sí, con valores ligeramente mayores en cuanto al Índice de Sincronización Fenológica promedio ($PO=0.64$).

El PO promedio entre la receptividad femenina y la dispersión de polen en ambos grupos fue de 0.60 y 0.64, lo cual se interpreta como sincronización de moderada a alta. Esto se explica, posiblemente, por la poca variabilidad en los periodos de receptividad y dispersión del polen; sin embargo, el polen proveniente de los árboles del Grupo 2 tuvieron mayor probabilidad de polinizar a todos los individuos. Esos valores son mayores a los registrados en otras coníferas como *P. patula* y *P. greggii* en el 2012, los cuales fueron de 0.48 y 0.57, respectivamente (Ruiz-Farfán *et al.*, 2015; Hernández *et al.*, 2016).

Las correlaciones entre los periodos de receptividad femenina y de dispersión del polen ($0.79 \leq r \leq 0.87$) indican que los eventos fenológicos no son independientes, pues probablemente existen efectos asociados a los tratamientos para promover la floración temprana que afectan su posterior desarrollo; no obstante, en la misma plantación se observó la formación de estructuras reproductivas en árboles sin tratamiento y de la misma edad. En la literatura se registran valores inferiores en *Pseudotsuga menziesii* (El-Kassaby *et al.*, 1984), *Pinus patula* (Muñoz-Gutiérrez *et al.*, 2019) y *P. taeda* L. (Askew, 1988) con correlaciones positivas entre 0.45 a 0.67. El hecho de que los eventos fenológicos no sean independientes favorece la autofecundación, lo cual afecta de manera negativa la producción de semillas (Muñoz-Gutiérrez *et al.*, 2019).

La variación en la producción de estróbilos y en la sincronización se ha observado en especies del género *Pinus* y otras coníferas regularmente a edades tempranas, y en huertos semilleros de primera generación (El-Kassaby *et al.*, 1988; Matziris, 1994). En estos casos, el empleo de reguladores de crecimiento y de cruas controladas son alternativas para maximizar la participación de los individuos de interés.

Conclusiones

No se observan amplias diferencias en la fenología reproductiva entre grupos de árboles, particularmente, la cantidad y maduración de estróbilos masculinos no son iguales. Este hecho da oportunidad para que un grupo de árboles polinice varios árboles con receptividad variada, ya que están moderadamente sincronizados a pesar de que la etapa de receptividad femenina (E3) inicia antes y tiene mayor duración que la dispersión del polen (E4).

Los *PO* y los valores de correlación entre los eventos fenológicos del desarrollo de ambas estructuras reproductivas en los grupos estudiados, son altos si se considera el origen del material de la plantación (semilla).

El uso de reguladores del crecimiento y prácticas culturales para promover la floración temprana en árboles jóvenes son técnicas útiles para reducir los tiempos de producción de semillas, y sí favorecen la sincronización fenológica de las estructuras reproductivas entre árboles. No obstante, se detectaron árboles dentro de la misma plantación, no incluidos en la presente investigación, con cierta precocidad a la formación de estructuras reproductivas femeninas y masculinas,

similar a los grupos evaluados; por lo tanto, de manera operativa, se requieren actividades de manejo complementarias como la polinización artificial.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal que labora en el Parque Ecoturístico Bosque Esmeralda, perteneciente al ejido Emiliano Zapata, Amecameca, Estado de México, por el financiamiento de este trabajo a través del proyecto Núm. 10423435495: Inducción de estructuras reproductivas en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no existen conflictos de interés. La Dra. Liliana Muñoz-Gutiérrez declara no haber participado en el proceso editorial del presente manuscrito.

Contribución por autor

Sara Irene Velasco-Hernández: toma de datos en campo, análisis estadístico e interpretación de resultados y redacción del manuscrito; Liliana Muñoz-Gutiérrez: ejecución y supervisión de la investigación, análisis estadístico e interpretación de resultados y corrección del manuscrito; J. Jesús Vargas-Hernández y Mario Castelán-Lorenzo: revisión, complemento y corrección del manuscrito.

Referencias

- AccuWeather. 2022. Amecameca de Juárez, México. <https://www.accuweather.com/es/mx/amecameca-de-ju%C3%A1rez/233924/january-weather/233924?year=2021>. (28 de mayo de 2022).
- Aderkas, P., L. Kong, S. Abrams, I. Zaharia, S. Owens and B. Porter. 2004. Flower induction methods for lodgepole pine and Douglas-fir. Centre for Forest Biology and University of Victoria. Victoria, BC, Canada. 59 p.
- Alizoti, P. G., K. Kilimis and P. Gallios. 2010. Temporal and spatial variation on flowering among *Pinus nigra* Arn. clones under changing climatic conditions. *Forest Ecology and Management* 259(4):786-797 Doi: [10.1016/j.foreco.2009.06.029](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.029).
- Askew, G. R. 1988. Estimation of gamete pool compositions in clonal seed orchards. *Silvae Genetica* 37(5-6):227-232. [https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae Genetica/1988/Vol. 37 Hef t 5-6/37 5-6 227.pdf](https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1988/Vol.37_Hef_t_5-6/37_5-6_227.pdf). (20 de junio de 2022).
- Barner, H. and H. Christiansen. 1962. The formation of pollen, the pollination mechanism, and the determination of the most favorable time for controlled pollination in *Pseudotsuga menziesii*. *Silvae Genetica* 11:89-102. [https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae Genetica/1962/Vol. 11 Hef t 4/11 4 89.pdf](https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1962/Vol.11_Hef_t_4/11_4_89.pdf). (20 de junio de 2022).
- Burczyk, J. and W. Chalupka. 1997. Flowering and cone production variability and its effects on parental balance in a Scots pine clonal seed orchard. *Annals of Forest Science* 54(2):129-144. Doi: [10.1051/forest:19970201](https://doi.org/10.1051/forest:19970201).
- Cherry, M. L., T. S. Anekonda, M. J. Albrecht and G. T. Howe. 2007. Flower stimulation in young miniaturized seed orchards of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Canadian Journal of Forest Research* 37(1):1-10. Doi: [10.1139/x06-199](https://doi.org/10.1139/x06-199).
- Codesido, V., E. Merlo and J. Fernández-López. 2005. Variation in reproductive phenology in a *Pinus radiata* D. Don seed orchard in Northern Spain. *Silvae Genetica* 54(4):246-256. Doi: [10.1515/sg-2005-0035](https://doi.org/10.1515/sg-2005-0035).

de Winter, J. C. F., S. D. Gosling and J. Potter. 2016. Comparing the Pearson and Spearman correlation coefficients across distributions and sample sizes: A tutorial using simulations and empirical data. *Psychological Methods* 21(3):273-290. Doi: [10.1037/met0000079](https://doi.org/10.1037/met0000079).

Debreczy, Z. and I. Rácz. 1995. New species and varieties of conifers from México. *Phytologia* 78:217-243. Doi: [10.5962/bhl.part.11916](https://doi.org/10.5962/bhl.part.11916).

Del Castillo, R. F., J. A. Pérez de la Rosa, G. Vargas A. y R. Rivera G. 2004. Coníferas. In: García-Mendoza, A. J., M. de J. Ordóñez D. y M. Briones-Salas (Coords.). Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza y World Wildlife Fund. Coyoacán, México D. F., México. pp. 141-158.

Domínguez Á., F. A., J. J. Vargas H., J. López U., P. Ramírez V. y E. Guízar N. 2004. Aspectos ecológicos de *Pseudotsuga menziesii* en el ejido La Barranca, Pinal de Amoles, Querétaro. *Anales del Instituto de Biología Serie Botánica* 75(2):191-203. <https://www.redalyc.org/pdf/400/40075202.pdf>. (26 de mayo de 2022).

Ebell, L. F. and R. L. Schmidt. 1964. Meteorological factors affecting conifer pollen dispersal on Vancouver Island. Government of Canada, Department of Forestry, Forest Entomology and Pathology Branch. Ottawa, ON, Canada. 34 p.

El-Kassaby, Y. A. 1989. Genetics of Douglas-fir seed orchards: Expectations and realities. In: Southern Forest Tree Improvement Conference, Westvaco Corporation and Clemson University. 20th Southern Forest Tree Improvement Conference. Charleston, SC, United States of America. pp. 87-109. <https://rngr.net/publications/tree-improvement-proceedings/southern/1989/genetics-of-douglas-fir-seed-orchards-expectations-and-realities/?searchterm=None>. (30 de octubre de 2022).

El-Kassaby, Y. A., A. M. K. Fashler and O. Sziklai. 1984. Reproductive phenology and its impact on genetically improved seed production in a Douglas-fir seed orchard. *Silvae Genetica* 33(4-5):120-125.

[https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae Genetica/1984/Vol. 33 Heft 4-5/33 4-5 120.pdf](https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1984/Vol.33_Heft_4-5/33_4-5_120.pdf). (30 de octubre de 2022).

El-Kassaby, Y. A., K. Ritland, A. M. K. Fashler and W. J. B. Devitt. 1988. The role of reproductive phenology upon mating system of a Douglas fir seed orchard. *Silvae Genetica* 37(2):76-82. [https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae Genetica/1988/Vol. 37 Heft 2/37 2 76.pdf](https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1988/Vol.37_Heft_2/37_2_76.pdf). (30 de octubre de 2022).

Erickson, V. J. and W. T. Adams. 1989. Mating success in a coastal Douglas-fir seed orchard as affected by distance and floral phenology. *Canadian Journal of Forest Research* 19(10):1248-1255. Doi: [10.1139/x89-190](https://doi.org/10.1139/x89-190).

Farjon, A. 1990. *Pinaceae: Drawings and descriptions of the genera Abies, Cedrus, Pseudolarix, Keteleeria, Nothotsuga, Tsuga, Cathaya, Pseudotsuga, Larix and Picea*. Koeltz Scientific Books. Königstein, HE, Germany. 330 p.

Greenwood, M. S. 1987. Rejuvenation of forest trees. *Plant Growth Regulation* 6(1):1-12. Doi: [10.1007/BF00043947](https://doi.org/10.1007/BF00043947).

Griffin, A. R. 1984. Clonal variation in radiata pine seed orchards. II: Flowering phenology. *Australian Forest Research* 14(4):271-281. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=9264944>. (21 de mayo de 2023).

Hermann, R. K. and D. P. Lavender. 1999. Douglas-fir planted forest. *New Forests* 17:53-70. Doi: [10.1023/A:1006581028080](https://doi.org/10.1023/A:1006581028080).

Hernández Z., O., J. López U., J. J. Vargas H. y M. Jiménez C. 2016. Variación clonal de la fenología reproductiva en un huerto semillero de *Pinus patula*. *Bosque* 37(2):255-264. Doi: [10.4067/S0717-92002016000200004](https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000200004).

Huusko, A. and S. Hicks. 2009. Conifer pollen abundance provides a proxy for summer temperatura: evidence from the latitudinal forest limit in Finland. *Journal of Quaternary Science* 24(5):522-528. Doi: [10.1002/jqs.1250](https://doi.org/10.1002/jqs.1250).

- Kang, K. S., D. Lindgren and T. J. Mullin. 2001. Prediction of genetic gain and gene diversity in seed orchards crops under alternative management strategies. *Theoretical and Applied Genetics* 103(6):1099-1107. Doi: [10.1007/s001220100700](https://doi.org/10.1007/s001220100700).
- Matziris, D. I. 1994. Genetic variation in the phenology of flowering in black pine. *Silvae Genetica* 43(5-6):321-328. [https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1994/Vol. 43 Hef t 5-6/43_5-6_321.pdf](https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1994/Vol.43_Hef t_5-6/43_5-6_321.pdf). (30 de octubre de 2022).
- Muñoz-Gutiérrez, L., J. J. Vargas-Hernández, J. López-Upton y N. Gutiérrez-Rangel. 2010. Inducción de estructuras reproductivas en *Pseudotsuga menziesii*. *Agrociencia* 44(7):435-847. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952010000700009&lng=es&tlng=es. (21 de mayo de 2022).
- Muñoz-Gutiérrez, L., J. J. Vargas-Hernández, J. López-Upton, C. Ramírez-Herrera, M. Jiménez-Casas and A. Aldrete. 2019. Variation in reproductive phenology in a *Pinus patula* seed orchard and risk of genetic contamination from nearby natural stands. *New Forests* 50(6):1027-1041. Doi: [10.1007/s11056-019-09712-1](https://doi.org/10.1007/s11056-019-09712-1).
- Owens, J. N., L. M. Chandler, J. S. Bennett and T. J. Crowder. 2001. Cone enhancement in *Abies amabilis* using GA_{4/7}, fertilizer, girdling and tenting. *Forest Ecology and Management* 154(1-2):227-236. Doi: [10.1016/S0378-1127\(00\)00629-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00629-0).
- Owens, J. N., S. J. Simpson and M. Molder. 1981. The pollination mechanism and the optimal time of pollination in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Canadian Journal of Forest Research* 11(1):36-50. Doi: [10.1139/x81-006](https://doi.org/10.1139/x81-006).
- Pulkkinen, P. 1994. Aerobiology of pine pollen: dispersal of pollen from non-uniform sources and impact on Scots pine seed orchard. *Reports from the foundation for forest tree breeding* 8:1-23. https://belinra.inrae.fr/index.php?lvl=notice_display&id=258636. (21 de mayo de 2022).
- Ross, S. D. 1983. Enhancement of shoot elongation in Douglas-fir by gibberellins A_{4/7} and its relation to the hormonal promotion of flowering. *Canadian Journal of Forest Research* 13(5):986-994. Doi: [10.1139/x83-131](https://doi.org/10.1139/x83-131).

- Ross, S. D. and R. C. Bower. 1989. Cost-effective promotion of flowering in a Douglas-fir seed orchard by girdling and pulsed stem injection of Gibberellin A_{4/7}. *Silvae Genetica* 38(5-6):189-195. [https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1989/Vol. 38 Hef t 5-6/38 5-6 189.pdf](https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1989/Vol.38_Hef_t_5-6/38_5-6_189.pdf). (30 de mayo de 2022).
- Ruiz-Farfán, D. de G., J. López-Upton, C. Ramírez-Herrera y D. A. Rodríguez-Trejo. 2015. Fenología reproductiva en un ensayo de Progenies de *Pinus greggii* var. *australis*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38(3):285-296. Doi: [10.35196/rfm.2015.3.285](https://doi.org/10.35196/rfm.2015.3.285).
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa S. A. Tlalpan, México D. F., México. 432 p.
- Santuario Bosque Esmeralda (SBE). 2020. *Bosque Esmeralda: Nuestra historia*. https://bosqueesmeralda.com.mx/nuestra_historia.php#:~:text=Se%20encuentra%20en%20el%20%C3%A1rea,y%20generalmente%20nevadas%20en%20invierno. (28 de mayo de 2022).
- Sarvas, R. 1962. Investigation on the flowering and seed crop in *Pinus sylvestris*. Valtion painatuskeskus. Helsinki, HEL, Finland. 198 p.
- Statistical Analysis Software (SAS). 2013. User's Guide Statistics Version 9.4. SAS Institute Inc. Cary, NC, United States of America. 5136 p.
- Vargas-Hernández, J. J. and J. I. Vargas-Abonce. 2016. Effect of gibberellin acid (GA_{4/7}) and partial stem girdling on induction of reproductive structures in *Pinus patula*. *Forest Systems* 25(2):e063. Doi: [10.5424/fs/2016252-09254](https://doi.org/10.5424/fs/2016252-09254).
- Villagómez L., M. A. y M. Á. Bello G. 2015. *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *glauca* (Beissn.) Franco: nuevo registro para Guanajuato. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6(30):66-73. Doi: [10.29298/rmcf.v6i30.208](https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i30.208).
- Webber, J. 2004. Physiology of sexual reproduction in trees. In: Evans, J., J. Burley and J. A. Youngquist (Edits.). *Encyclopedia of Forest Sciences*. Elsevier. Victoria, BC, Canada. pp. 1639-1644.

Webber, J. E. and R. A. Painter. 1996. Douglas-fir Pollen Management Manual. British Columbia and Ministry of Forests Research Program. Victoria, BC, Canada. 91 p. <https://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/wp/wp02.pdf>. (16 de mayo de 2022).

Zas A., R., E. Merlo and J. Fernández L. 2003. SYNCHRO: A SAS program for analysing the floral phenological synchronization in seed orchards. *Silvae Genetica* 52(5-6):212-215. <http://hdl.handle.net/10261/101387>. (16 de mayo de 2022).



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.