

---

# PREDICCIÓN BAYESIANA DEL COMPORTAMIENTO POBLACIONAL DE *Eucalyptus cladocalyx* PARA CARACTERÍSTICAS BINARIAS DE COMPONENTES DE FLORECIMIENTO Y SUPERVIVENCIA EN ZONAS ÁRIDAS DE CHILE

RODRIGO CONTRERAS-SOTO, FREDDY MORA, SANDRA PERRET, FELIPE VARGAS-REEVE y CAMILA CANÉ-RETAMALES

---

## RESUMEN

Los componentes del florecimiento y la supervivencia son importantes características para la especie *Eucalyptus cladocalyx*, en las zonas áridas de Chile. El objetivo del presente estudio fue examinar la variabilidad poblacional en componentes del florecimiento y supervivencia en árboles de ocho años de edad, cultivados en dos sitios del sur del desierto de Atacama, Chile. Se utilizó un modelo lineal generalizado bayesiano en el análisis de datos, implementado por medio del algoritmo de cadenas de independencia. El criterio de información de desviación ( $\Delta DIC$ ), implementado por medio del algoritmo de Gibbs, evidenció diferencias significativas para el efecto poblacional ( $\Delta DIC > 5$ ) en cada variable binaria analizada. El efecto de interacción población-sitio fue significativo ( $\Delta DIC > 5$ ) para las variables presencia/ausencia de máxima intensidad de

florecimiento (MI) y presencia/ausencia de flores o yemas florales (FOY) en el inicio de la temporada 2009/2010. Para las variables presencia/ausencia de cualquier evento floral (EF) y supervivencia, la interacción no fue significativa ( $\Delta DIC < 5$ ). Los resultados destacan la importancia de la selección de la fuente de semilla; por ejemplo, 45% de los árboles provenientes de Cowell, Australia, presentaron máxima intensidad de florecimiento en un sitio determinado, en tanto que árboles provenientes de Flinders Chase, Australia, presentaron sólo un 3%. La información de la variabilidad inter-poblacional podría ser usada para mejorar características de interés en *E. cladocalyx*, aunque la interacción genotipo-ambiente debería ser considerada para algunos componentes de florecimiento.

El establecimiento de ensayos de procedencia y progeñe es habitualmente la primera etapa en los programas de mejoramiento genético de árboles forestales, ya que permiten la identificación de los mejores recursos para rehabilitación de suelos y/o producción agroforestal (Moura *et al.*, 1998; Mora *et al.*, 2009). El objetivo

central de estos ensayos es estudiar la variabilidad genética existente para obtener productos específicos en determinados ambientes. Se han realizado diversos estudios basados en el análisis de procedencias con el fin de evaluar características cuantitativas como el crecimiento y características de calidad (Hodge *et al.*, 2002; Wightman *et al.*, 2008). La fuente de semilla o mate-

rial vegetal puede tener profundas implicancias para el éxito de un programa de reforestación porque la mayoría de las especies exhiben variación genética adaptativa en su desarrollo (O'Brien *et al.*, 2007; Santelices *et al.*, 2009). Ensayos de procedencias de diversas especies del género *Eucalyptus*, por ejemplo, han posibilitado la comparación genotípica en diferentes si-

---

**PALABRAS CLAVE / Algoritmo de Cadenas de Independencia / Algoritmo de Gibbs / DIC / *Eucalyptus cladocalyx* / Predicción Bayesiana / Zonas Áridas /**

Recibido: 28/05/2010. Modificado: 08/08/2011. Aceptado: 09/08/2011.

**Rodrigo Contreras-Soto.** Ingeniero en Biotecnología Vegetal, Universidad de Concepción (UdeC), Chile. Candidato a M.Sc., UdeC, Chile. Co-investigador Proyecto FONDECYT 11090129, Facultad de Ciencias Forestales (FCF), UdeC, Chile.

**Freddy Mora.** Ingeniero Forestal, Universidad de Talca, Chile. M.Sc., Universidad de La Serena, Chile. Doctor en Genética y Mejoramiento, Universidade Estadual de Maringá, Brasil. Post-doctorado, Science University of Malaysia. Profesor, UdeC, Chile. Dirección: Facultad de Ciencias Forestales, UdeC. Victoria 631, Barrio Universitario, Concepción, Chile. e-mail: freddymora@udec.cl

**Sandra Perret.** Ingeniera Forestal, UdeC, Chile. Investigadora, Instituto de Investigación Forestal, La Serena, Chile.

**Felipe Vargas-Reeve.** Ingeniero en Biotecnología Vegetal, UdeC, Chile. Candidato a M.Sc., UdeC, Chile. Co-investigador Proyecto FONDECYT 11090129, FCF-UdeC, Chile.

**Camila Cané-Retamales.** Ingeniera en Biotecnología Vegetal, UdeC, Chile. Co-investigadora Proyecto FONDECYT 11090129, FCF- UdeC, Chile.

tios y para diferentes características de interés, y han permitido seleccionar materiales específicos para determinados ambientes (Miranda *et al.*, 2001; Carnegie *et al.*, 2004; Varghese *et al.*, 2008).

En la parte sur del desierto de Atacama, norte de Chile, se han emprendido diversos estudios con el objetivo de desarrollar germoplasma útil para regiones con déficit hídrico (Mora *et al.*, 2009, 2010; Tapia *et al.*, 2009). En este contexto, la especie *Eucalyptus cladocalyx* F. Muell., ha sido seleccionada debido al potencial productivo mostrado en la región, ya sea en plantaciones puras o consorciadas. Entre los propósitos de interés de una plantación con *E. cladocalyx* destaca principalmente el uso de sus flores para la producción de miel (Manikis y Thrasivoulou, 2001; Mora *et al.*, 2009), por lo que los componentes del florecimiento se han transformado en una característica importante para la especie.

*E. cladocalyx* es un árbol con una distribución restringida en la parte sur de Australia, específicamente en la región de Southern Flinders Ranges (Ruthrof *et al.*, 2003). Especies de árboles forestales con una amplia distribución geográfica generalmente exhiben una significativa variación en características anatómicas, morfológicas, y fisiológicas (O'Brien *et al.*, 2007), por lo que una distribución restringida podría estar asociada a una reducida variabilidad genética, como el caso de *E. cladocalyx*. La variabilidad en genotipos de la especie es considerada como un factor clave para mejorar la productividad en componentes del florecimiento y la supervivencia de las plantas en los períodos de sequía. Las plantaciones establecidas en una región usualmente buscan altas productividades en biomasa combinando tasas de crecimiento y supervivencia aceptables (Mora *et al.*, 2009).

El tiempo del primer florecimiento (o florecimiento precoz) ha sido el primer componente del florecimiento estudiado en los programas de mejoramiento de *E. cladocalyx* conducidos en el norte de Chile (Mora *et al.*, 2009), y ha mostrado ser una característica cuantitativa altamente heredable; los resultados de ese estudio fueron coincidentes con los encontrados en otras especies del mismo género, tales como *E. globulus* Labill (Chambers *et al.*, 1997).

Los componentes del florecimiento pueden ser medidos como variables dicotómicas (categóricas o binarias), las cuales se determinan visualmente como la presencia o ausencia (éxito o fracaso) de determinadas estructuras reproductivas tales como flores o yemas (Chambers *et al.*, 1997; Jordan *et al.*, 1999; Ming *et al.*, 2002; Parra-Tabla y Vargas, 2007; Mora *et al.*, 2009). Específicamente, un agricultor puede estar interesado en predecir si un genotipo específico de *E. cladocalyx* presentará o no al-

gún tipo de componente del florecimiento frente a un conjunto de condiciones ambientales específicas, ya que las variables asociadas a esta característica podrían jugar un rol importante en el sistema de producción agrícola del norte de Chile. El análisis de tales variables de interés puede ser realizado usando regresión logística (Parra-Tabla y Vargas, 2007) o, de una forma más amplia, por medio de modelos lineales generalizados (Myers *et al.*, 2002). Las respuestas de tipo binaria también pueden ser analizadas usando modelos generalizados pero en un contexto bayesiano (Gonçalves-Vidigal *et al.*, 2008; Mora *et al.*, 2009).

La supervivencia de los árboles de *E. cladocalyx* es también un importante elemento de estudio, considerando que las zonas áridas y semiáridas de Chile comprenden cerca de  $\sim 30 \times 10^6$  ha, o 40% del área total del país (Ormazábal, 1991). Esta variable es una característica importante para los sistemas agroforestales con déficit hídrico, y las altas tasas de supervivencia encontradas en árboles de *E. cladocalyx* de cinco años de edad confirman su idoneidad para las condiciones ambientales de la región sur del desierto de Atacama (Mora *et al.*, 2007). La supervivencia se mide usualmente como una característica de tipo binario, donde un valor de 0 es atribuido a aquellas plantas que no sobrevivieron a los factores ambientales, y valores de 1 a aquellas que sobreviven. En este sentido, el agricultor podría estar interesado en predecir si un genotipo específico sobrevive a un conjunto de condiciones ambientales específicas (Rodvalho *et al.*, 2008).

El objetivo analítico del presente estudio fue examinar la variabilidad poblacional en componentes del florecimiento y supervivencia de árboles de *E. cladocalyx* de ocho años de edad, en dos ensayos establecidos bajo las condiciones áridas del sur del desierto de Atacama, norte de Chile. En el análisis de datos de respuesta binaria, se utilizó un modelo lineal generalizado, usando un enfoque bayesiano con el algoritmo de cadenas de independencia; una variante de los algoritmos basados en los métodos de Monte Carlo-Cadenas de Markov (MCMC).

## Material y Métodos

Árboles de *Eucalyptus cladocalyx* de ocho años de edad, provenientes de seis poblaciones de la especie, fueron evaluados en dos ensayos establecidos en el norte de Chile, en la región administrativa de Coquimbo: 1) Comunidad agrícola Tunga Norte, 31°38'S, 71°19'O, 297msnm, 243,7mm de precipitación anual promedio y 15°C de temperatura anual promedio; y 2) Hacienda Agrícola Caracas, 31°55'S, 71°27'O, 167msnm, 201,1mm de

precipitación anual promedio y 14,1°C de temperatura anual promedio (Mora *et al.*, 2009). Un número variable de árboles (106-880) de cada procedencia fueron evaluados en función de componentes de florecimiento, en diciembre de 2009, usando un diseño de bloques completos al azar. Los ensayos se establecieron en junio 2001, y forman parte de un programa de mejoramiento de la especie establecido en el norte de Chile (Mora *et al.*, 2009; Cané-Retamales *et al.*, 2011).

Las poblaciones de la especie son originarias de Australia (cinco procedencias) y Chile (una población). Las procedencias Australianas se obtuvieron del CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*), Australia, en el 2000, y son originarias de las siguientes localidades: Mt. Remarkable (P1), Cowell (P2), Marble Range (P3), Warrabara State Forest (P4), y Flinders Chase National Park (P5). La población de origen chileno proviene de plantaciones previamente establecidas en la Provincia de Choapa (P6).

Las poblaciones se evaluaron en términos de las siguientes variables:

*Presencia o ausencia de intensidad máxima de eventos florales* (MI). Característica medida en cada árbol como una variable binaria o dicotómica, tomando un valor 1, cuando sobre el 50% de la copa del árbol presenta eventos florales, y 0 en caso contrario. Se denomina evento floral a la presencia de flores, brotes florales y/o cápsulas, de acuerdo con Chambers *et al.* (1997) y Mora *et al.* (2009).

*Presencia o ausencia de evento floral* (EF) independiente de su intensidad. Variable binaria que consiste en valor 1 cuando presenta cualquier evento floral, y 0 en caso contrario, considerando todo el período de vida de los árboles (ocho años).

*Presencia de flores o yemas florales* (FOY) en el inicio de la temporada 2009/2010 (medida en diciembre 2009). Variable de tipo binario, tomando un valor 1 cuando presenta flor o yema floral, y 0 en el caso de no presentar flor o yema floral en la temporada de medición (árboles de ocho años de edad).

*Supervivencia* (SURV) de los árboles ocho años después de la plantación.

Estadísticamente, se asumió que las variables relacionadas a los componentes de florecimiento y supervivencia tienen distribución binomial, y los modelos se formularon con funciones de enlace canónico (logit). La función de probabilidad para las variables discretas relacionadas a los componentes del florecimiento y supervivencia, puede ser expresada como

$$f(y) = \binom{n}{x} \mu^x (1-\mu)^{n-x} \quad (1)$$

donde x: número de ensayos que dan como resultado un éxito ( $\mu$ ); y n: número de datos (Montgomery y Runger, 2003).

El modelo lineal generalizado que representa a los experimentos en conjunto es

$$\text{logit}(\mu) = \ln\left(\frac{\mu}{1-\mu}\right) = X\beta \quad (2)$$

donde  $\text{logit}(\mu)$ : función de enlace canónico para datos con distribución binomial,  $\mu$ : valor de la probabilidad de que un árbol reciba un score= 1 (presencia de un evento), X: matriz de diseño, y  $\beta$ : parámetros desconocidos del modelo (intercepto, efecto debido al bloque, población, sitio e interacción población-sitio). Se consideró una distribución *a priori* uniforme (*flat*) para los parámetros  $\beta$  del modelo.

El análisis de datos se realizó por medio de un modelo lineal generalizado bayesiano. Para establecer la significación del efecto de interacción población-sitio, y los factores principales del modelo, se utilizó el criterio de información de desviación (DIC, de *deviance information criterion*), según Spiegelhalter *et al.* (2002):

$$\text{DIC} = \bar{D} + pD \quad (3)$$

donde  $\bar{D}$ : media *a posteriori* de la desviación, y pD: número de parámetros efectivos del modelo. Este criterio de información es una extensión de los criterios de Akaike y criterio de información bayesiano de Schwartz (Carrero *et al.*, 2008), y corresponde a un método bayesiano de comparación de modelos cuyo desarrollo teórico, realizado por Spiegelhalter *et al.* (2002), se basó esencialmente en la comparación de éste tipo de modelos.

Se consideró una interacción población-sitio significativa, cuando la diferencia entre los valores de DIC del modelo de la Ec. 2 y el modelo que no incluye el efecto de interacción, fue superior a 5 ( $\Delta\text{DIC} > 5$ ). Los valores DIC se computaron usando el software WinBUGS (Lunn *et al.*, 2000), el cual utiliza el algoritmo de Gibbs como método MCMC. Se usaron un millón de iteraciones en total, con 100000 como período de descarte.

Los efectos principales del modelo de la Ec. 2 se determinaron en función de los valores de DIC, siguiendo el mismo procedimiento mencionado anteriormente, comparándolos con el modelo nulo.

Se utilizó la macro %GLIMMIX (SAS, 2002) para la estimación de los parámetros de cada modelo. Las muestras *a posteriori* de las estimaciones de los parámetros de interés se originaron por medio del algoritmo de cadenas de independencia (IC, de *independence chain algorithm*). Cada muestra se

TABLA I  
ANÁLISIS DE SIGNIFICANCIA REALIZADO POR MEDIO DEL CRITERIO DE INFORMACIÓN DE DESVIACIÓN (DIC), ENFOQUE BAYESIANO

Fuente de variación	MI		EF		FOY		SURV	
	pD	$\Delta\text{DIC}$	pD	$\Delta\text{DIC}$	pD	$\Delta\text{DIC}$	pD	$\Delta\text{DIC}$
Sitio (S)	2,07	2661*	2,03	3479*	2,00	3597*	2,01	1579*
Población (P)	5,81	2634*	5,68	3450*	6,14	3566*	5,99	1552*
Interacción P×S	40,93	7*	40,96	4 ns	41,23	17*	40,41	0,3 ns

\*Fuente de variación significativa; ns: fuente de variación no significativa. pD: corresponde al número de parámetros efectivo del modelo.

caracterizó por medio de la media, mediana, moda e intervalos de credibilidad bayesianos (ICB) usando el procedimiento UNIVARIATE de SAS. El valor de la moda de cada distribución *a posteriori* de las estimaciones de parámetros se determinó de acuerdo al procedimiento de densidad de Kernel, calculada con SAS/INSIGHT (SAS, 2002). Las diferencias entre las poblaciones se determinaron mediante los ICB.

## Resultados y Discusión

En la Tabla I se muestra el análisis de significancia de los factores del experimento, realizado por medio del criterio de información de desviación (DIC). En el presente estudio, la utilización de DIC en los modelos lineales generalizados con datos de variables dicotómicas, permitió la evaluación de la significancia estadística de los factores de interés (Lunn *et al.*, 2000).

TABLA II  
RESULTADOS DEL ANÁLISIS BAYESIANO DE LAS VARIABLES QUE PRESENTARON INTERACCIÓN POBLACIÓN-SITIO SIGNIFICATIVA DE ACUERDO AL CRITERIO DE INFORMACIÓN DE DESVIACIÓN\*

VAR (Sitio)	PAR	Estimadores puntuales bayesianos			IC (95%)		Promedio en % **
		Media	Mediana	Moda	LI	LS	
MI (Illapel)	p2	0,389	0,388	0,384	0,246	0,550	44,7 a
	p4	0,305	0,304	0,299	0,185	0,460	36,2 a
	p6	0,299	0,298	0,300	0,161	0,488	35,3 ab
	p1	0,258	0,256	0,250	0,154	0,398	31,3 ab
	p3	0,169	0,169	0,172	0,088	0,300	21,4 b
	p5	0,024	0,024	0,023	0,010	0,058	3,4 c
MI (Los Vilos)	VR	1,019	1,019	1,021	0,041	0,954	-
	p6	0,398	0,397	0,404	0,218	0,612	21,8 a
	p2	0,370	0,370	0,370	0,224	0,542	20,4 a
	p3	0,365	0,366	0,369	0,204	0,563	19,8 a
	p4	0,272	0,271	0,259	0,153	0,433	13,9 ab
	p1	0,162	0,161	0,156	0,087	0,283	7,9 b
FOY (Illapel)	p5	0,031	0,031	0,032	0,010	0,096	1,4 c
	VR	1,052	1,052	1,056	0,042	0,985	-
	p2	0,609	0,609	0,611	0,463	0,736	73,0 a
	p4	0,544	0,544	0,532	0,400	0,682	67,2 ab
	p1	0,473	0,471	0,464	0,338	0,611	61,2 abc
	p6	0,419	0,418	0,420	0,257	0,599	56,0 bc
FOY (Los Vilos)	p3	0,369	0,370	0,374	0,236	0,525	50,6 c
	p5	0,216	0,215	0,212	0,131	0,334	33,3 d
	VR	1,031	1,031	1,033	0,042	1,100	-
	p3	0,759	0,759	0,764	0,619	0,859	64,9 a
	p2	0,708	0,707	0,707	0,572	0,813	58,5 ab
	p6	0,648	0,648	0,654	0,473	0,792	51,9 abc
FOY (Los Vilos)	p4	0,601	0,600	0,590	0,456	0,730	47,5 bc
	p1	0,484	0,482	0,475	0,348	0,622	36,5 c
	p5	0,331	0,330	0,326	0,213	0,475	23,3 d
	VR	1,026	1,026	1,030	0,041	0,960	-

\* Estimadores puntuales de los parámetros poblacionales (poblaciones P1, P2, P3, P4, P5 y P6) e intervalo de credibilidad (IC; 95% de probabilidad) obtenidos a partir de la transformación logit inversa

\*\*Letras distintas indican diferencias significativas entre procedencias de acuerdo a los intervalos de credibilidad Bayesianos (95% de probabilidad).

VR: varianza residual del modelo; MI: presencia o ausencia de intensidad máxima de eventos florales; FOY: presencia de flores o yemas florales en la presente temporada; PAR: parámetros.

TABLA III  
 RESULTADOS DEL ANÁLISIS BAYESIANO DE LAS VARIABLES QUE NO PRESENTARON INTERACCIÓN POBLACIÓN-SITIO SIGNIFICATIVA DE ACUERDO AL CRITERIO DE INFORMACIÓN DE DESVIANZA: ESTIMADORES PUNTUALES DE LOS PARÁMETROS POBLACIONALES (POBLACIONES P1, P2, P3, P4, P5 Y P6) E INTERVALO DE CREDIBILIDAD (IC; 95% DE PROBABILIDAD) OBTENIDOS A PARTIR DE LA TRANSFORMACIÓN LOGIT INVERSA

Variable	PAR	Estimadores puntuales bayesianos			IC (95%)		Promedio en % *
		Media	Mediana	Moda	LI	LS	
Supervivencia	p4	0,926	0,926	0,926	0,872	0,959	96,5 a
	p1	0,881	0,881	0,885	0,811	0,927	94,2 ab
	p6	0,817	0,817	0,816	0,683	0,902	90,8 bc
	p2	0,812	0,812	0,814	0,716	0,882	90,5 bc
	p5	0,784	0,784	0,783	0,678	0,864	88,9 c
	p3	0,760	0,760	0,762	0,653	0,853	87,5 c
	VR	1,044	1,043	1,045	0,028	0,999	-
EF	p6	0,807	0,806	0,803	0,698	0,883	81,1 a
	p2	0,755	0,755	0,757	0,664	0,830	76,5 ab
	p4	0,671	0,670	0,670	0,566	0,762	68,6 bc
	p3	0,661	0,661	0,662	0,542	0,764	67,8 bc
	p1	0,574	0,574	0,582	0,466	0,675	59,3 c
	p5	0,289	0,289	0,285	0,205	0,392	31,4 d
	VR	1,015	1,015	1,017	0,028	0,970	-

\* Letras distintas indican diferencias significativas entre procedencias de acuerdo a los intervalos de credibilidad bayesianos (95% de probabilidad). EF: presencia o ausencia de evento floral, VR: varianza residual del modelo, PAR: parámetros.

Basado en estos resultados, el efecto debido a la población presentó diferencias significativas ( $\Delta DIC > 5$ ) para cada variable analizada. La variabilidad inter-poblacional confirma altas posibilidades para mejorar características de florecimiento y supervivencia. Tal información es muy útil para el inicio del programa de mejoramiento con *Eucalyptus*, considerando las poblaciones estudiadas. El efecto del sitio también fue significativo, para cada variable estudiada. Comparativamente, las variables relacionadas a los componentes de florecimiento respondieron mejor en el sitio de Illapel.

El efecto de interacción población-sitio fue significativo ( $\Delta DIC > 5$ ) para las variables MI y FOY, en tanto que para EF y supervivencia los valores diferenciales de DIC de los modelos generalizados Bayesianos no superaron el valor mínimo considerado en el presente estudio ( $\Delta DIC < 5$ ). Para el caso de EF, el  $\Delta DIC = 4$  (Tabla I) entregó un valor de probabilidad de  $\chi^2$  equivalente a  $P = 0,02$  (enfoque clásico usando un análisis de desviación, ANODEV1, del inglés *analysis of deviance*), indicando la rigurosidad del valor de  $\Delta DIC$  adoptado en el presente estudio.

En la Tabla II se observan los resultados del análisis bayesiano (algoritmo de cadenas de independencia) de las variables que presentaron interacción población-

sitio significativa de acuerdo al DIC (Tabla I). Se muestran, además, los promedios de cada población (según el sitio) en la escala observada (binaria) y las diferencias significativas entre poblaciones considerando el intervalo de credibilidad bayesiano (95% de probabilidad).

La Tabla III muestra los resultados de la predicción Bayesiana de las

variables que no presentaron interacción población-sitio significativa. Además, se presentan los valores promedios observados (escala binaria) con su respectivo análisis comparativo de acuerdo a los intervalos de credibilidad bayesianos.

Las distribuciones *a posteriori* para los estimadores paramétricos de las poblaciones P2, P4, P5 y P6 de *E. cladocalyx* se muestran en la Figura 1. Las estimaciones de la media, mediana y moda *a posteriori* (Tabla II y III), son coincidentes con la simetría mostrada en las distribuciones. En el contexto bayesiano, la distribución *a posteriori* de los parámetros genéticos puede ser caracterizada a través del promedio, mediana y moda, los cuales son vistos como valores de tendencia central, y son potenciales estimadores de punto (Mora *et al.*, 2010). Las iteraciones del algoritmo de cadenas de independencia (Figura 1) muestran la estacionalidad propia de este algoritmo (Wolfinger y Kass, 2000).

En Illapel, los árboles provenientes de P2 mostraron mayor presencia de máxima intensidad de florecimiento (44,7%), pero de acuerdo al intervalo de credibilidad bayesiano, este valor no fue significativamente diferente de los observados en las poblaciones P1, P4 y P6. La población P2 mostró ser una población relativamente estable, ya que presentó altos índices de componentes de florecimiento en ambos sitios; sin embargo, su supervivencia (90,8%) a pesar de ser alta, fue significativamente inferior que la de las poblaciones P1 (94,2%) y P4 (96,5%). En general, las procedencias respondieron bien en supervi-

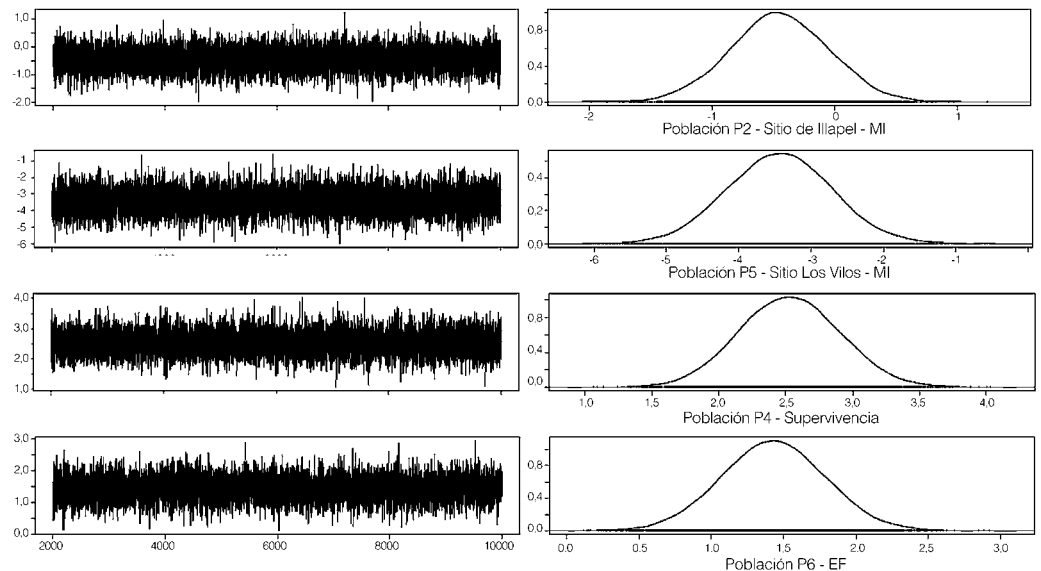


Figura 1. Distribuciones marginales *a posteriori* (derecha) para el estimador paramétrico de cuatro casos. MI: presencia o ausencia de intensidad máxima de eventos florales; EF: presencia o ausencia de evento floral. La población P2 es de procedencia australiana (Marble Range), P5 es de procedencia australiana (Flinders Chase National Park) P4 es de procedencia australiana (Wirrabara State Forest) y P6 es de semilla nacional chilena. En el lado izquierdo se muestran las respectivas iteraciones del algoritmo de cadenas de independencia.

vencia ocho años después de la plantación, confirmando el potencial de la especie para la zona árida de Chile. Los resultados de este estudio poblacional para la variable supervivencia están en concordancia con Mora *et al.* (2009) quienes encontraron que la supervivencia (medida como una respuesta binaria en árboles de cinco años de edad) fue la característica más consistente, presentando la menor magnitud de las diferencias entre respuestas extremas.

La magnitud entre la peor y la mejor población para los componentes del florecimiento fue sustancialmente mayor que para la supervivencia de los árboles. Por ejemplo, 44,7% de los árboles provenientes de Cowell (P2) presentaron máxima intensidad de florecimiento en el sitio de Illapel, en tanto que sólo un 3,4% de las plantas provenientes de Flinders Chase National Park (P5) mostraron máxima intensidad de eventos florales. Esta misma procedencia Australiana evidenció un 31% de casos con eventos florales, siendo estadísticamente diferente de la fuente de semilla local (P6) con un 81%, y de la procedencia de Cowell (P2) con un 77% de los árboles con presencia de eventos florales. Este resultado es coincidente con Mora *et al.* (2009) quienes encontraron un 82% de diferencia entre la mejor y la peor población para el florecimiento precoz en *E. cladocalyx*, medido en árboles de tres años de edad.

Los componentes del florecimiento en especies de *Eucalyptus* han sido ampliamente estudiados para determinar, por ejemplo, la importancia de auto-incompatibilidad, tiempo floral y abundancia floral en *E. globulus* (Patterson *et al.*, 2004; McGowen *et al.*, 2010), para determinar el control genético del florecimiento precoz en diversas especies del género (Chambers *et al.*, 1997; Wiltshire *et al.*, 1998; Mora *et al.*, 2007, 2009), y en estudios de relación entre abundancia floral y producción de miel en *Eucalyptus sideroxylon* A. Cunn. ex Woolls (Porter, 1978). En el presente estudio, los resultados de la evaluación de poblaciones en cuanto a los componentes de florecimiento indicaron que la selección genotípica sería ventajosa y propiciaría un mayor rendimiento de las plantaciones en la parte sur del desierto de Atacama (Ormazábal, 1991; Mora *et al.*, 2009, 2010) ya que la producción de miel de abejas alimentadas con néctar de flores de árboles de *E. cladocalyx* representa una fuente de ingreso adicional para los agricultores de la región (Montenegro *et al.*, 2003). En regiones áridas la producción de miel depende, entre otros factores, de la abundancia floral existente y de la distribución de ésta a través del año (Porter, 1978; Mora *et al.*, 2009; Cané-Retamales *et al.*, 2011). Por ello, es posible complementar al valioso recurso na-

tivo existente en la región por medio de la implementación de programas de plantación que consideren alternativas forestales de comprobada aptitud melífera, como *E. cladocalyx* (Manikis y Thrasivoulou, 2001; Cané-Retamales *et al.*, 2011).

Otro resultado de interés del presente estudio se observó en los componentes de florecimiento en el sitio Illapel (MI y FOY), donde se destacan las diferencias entre las procedencias Australianas de Cowell y Flinders Chase. Este resultado es coincidente con lo encontrado por Mora *et al.* (2007), quienes compararon la precocidad del florecimiento entre poblaciones de la especie, y encontraron que el 32,6% de las plantas de Cowell florecieron precozmente, y que sólo un 5,24% de los árboles provenientes de Flinders Chase presentaron esta característica. Esto puede otorgar un aspecto predictivo de interés para la especie, ya que poblaciones de árboles de *E. cladocalyx* que florecen precozmente (medido en árboles de 30 meses de edad) podrían presentar máxima intensidad de florecimiento en el tiempo y evidenciar máxima cantidad de flores y/o yemas florales en temporadas posteriores (en este caso en el comienzo de la temporada 2009/2010).

## Conclusiones

La variabilidad inter-poblacional confirma altas posibilidades para mejorar características de florecimiento y supervivencia, pero debe considerarse la interacción genotipo-ambiente en algunas características de interés. La selección de poblaciones para los componentes de florecimiento tales como la presencia/ausencia de máxima intensidad de florecimiento y presencia/ausencia de flores o yemas florales, dependerá de la optimización de estas características de interés por medio de la selección de genotipos que responden bien en un sitio en particular. Los resultados son de interés desde el punto de vista de la utilización y exploración de la variabilidad genotípica en poblaciones de *Eucalyptus cladocalyx* en las zonas áridas del norte de Chile.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por el proyecto N°11090129 del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT), Chile.

## REFERENCIAS

Cané-Retamales C, Mora F, Vargas-Reeve F, Perret S, Contreras-Soto R (2011) Bayesian threshold analysis of breeding values, genetic correlation and heritability of flowering intensity in *Eucalyptus cladocalyx* under arid conditions. *Euphytica* 178: 177-183.

Carnegie AJ, Johnson IG, Henson M (2004) Variation among provenances and families of blackbutt (*Eucalyptus pilularis*) in early growth and susceptibility to damage from leaf spot fungi. *Can. J. For. Res.* 34: 2314-2326.

Carrero O, Jerez M, Macchiavelli R, Orlandoni G, Stock J (2008) Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. *Interciencia* 33: 265-272.

Chambers PGS, Potts BM, Tilyard PA (1997) The genetic control of flowering precocity in *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*. *Silv. Genet.* 46: 207-214.

Gonçalves-Vidal MC, Mora F, Bignotto TS, Ferreira Munhoz RE, de Souza LD (2008) Heritability of quantitative traits in segregating common bean families using a Bayesian approach. *Euphytica* 164: 551-556.

Hodge GR, Dvorak WS, Uruña H, Rosales L (2002) Growth, provenances effects and genetic variation of *Bombacopsis quinata* in field test in Venezuela and Colombia. *For. Ecol. Manag.* 158: 273-289.

Jordan GJ, Potts BM, Wiltshire RJE (1999) Strong, independent, quantitative genetic control of the timing of vegetative phase change and first flowering in *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* (Tasmanian Blue Gum). *Heredity* 83: 179-187.

Lunn DJ, Thomas A, Best N, Spiegelhalter D (2000) WinBUGS - a Bayesian modelling framework: concepts, structure, and extensibility. *Stat. Comput.* 10: 325-337.

Manikis I, Thrasivoulou A (2001) The relation of physicochemical characteristics of honey and the crystallization sensitive parameters. *Apicula* 36: 106-112.

McGowen MH, Vaillancourt RE, Pilbeam DJ, Potts BM (2010) Sources of variation in self-incompatibility in the Australian forest tree, *Eucalyptus globulus*. *Ann. Bot.* 105: 737-745.

Ming R, Del Monte TA, Hernández E, Moore PH, Irvine JE, Paterson AH (2002) Comparative analysis of QTLs affecting plant height and flowering among closely-related diploid and polyploid genomes. *Genome* 45: 794-803.

Miranda I, Almeida MH, Pereira H (2001) Influence of provenance, subspecies and site on wood density in *Eucalyptus globulus* Labill. *Wood Fiber Sci.* 3: 9-15.

Montenegro G, Pizarro R, Ávila G, Castro R, Ríos C, Muñoz O, Bas F, Gómez M (2003) Origen botánico y propiedades químicas de las mieles de la región mediterránea árida de Chile. *Cienc. Inv. Agr.* 30: 161-174.

Montgomery D, Runger G (2003) *Applied Statistics and Probability for Engineers* Wiley. Nueva York, EEUU. 706 pp.

Mora F, Perret S, Scapim CA, Martins EN, Molina MP (2007) Source-dependent blooming variability of *Eucalyptus cladocalyx* in the Region of Coquimbo, Chile. *Cienc. Inv. Agr.* 34: 99-106.

Mora F, Gleadow R, Perret S, Scapim CA (2009) Genetic variation for early flowering, survival and growth in sugar gum (*Eucalyptus cladocalyx* F. Muell) in southern Atacama Desert. *Euphytica* 169: 335-344.

Mora F, Perret S, Scapim CA, Arnhold E (2010) Genetic parameters for growth and survival in *Acacia saligna* shrubs. *Cienc. Inv. Agr.* 37: 5-14.

Moura VPG, Dvorak WS, Hodge GR (1998) Provenance and family variation of *Pinus oocarpa*

- grown in the Brazilian cerrado. *For. Ecol. Manag.* 109: 315-322.
- Myers RH, Montgomery DC, Vining GG (2002) *Generalized Linear Models, with Applications in Engineering and the Sciences*. Wiley. Nueva York, EEUU. 342 pp.
- O'Brien EK, Mazanec RA, Krauss SL (2007) Provenance variation of ecologically important traits of forest trees: implications for restoration. *J. Appl. Ecol.* 44: 583-593.
- Ormazábal CS (1991) Silvopastoral systems in arid and semiarid zones of northern Chile. *Agrofor. Syst.* 14: 207-217.
- Parra-Tabla V, Vargas CF (2007) Flowering synchrony and floral display size affect pollination success in a deceit-pollinated tropical orchid. *Acta Oecol.* 32: 26-35.
- Patterson B, Vaillancourt RE, Pilbeam DJ, Potts BM (2004) Factors affecting variation in outcrossing rate in *Eucalyptus globulus*. *Austr. J. Bot.* 52: 773-780.
- Porter JW (1978) Relationships between flowering and honey production of red ironbark, *Eucalyptus sideroxylon* (A. Cunn.) Benth., and climate in the Bendigo district of Victoria. *Austr. J. Agric. Res.* 29: 815-829.
- Rodvalho M, Mora F, Mendes dos Santos E, Scapim CA, Arnhold E (2008) Survival heritability in 169 families of white grain popcorn: A Bayesian approach. *Cienc. Inv. Agr.* 35: 255-260.
- Ruthrof KX, Loneragan WA, Yates CJ (2003) Comparative population dynamics of *Eucalyptus cladocalyx* in its native habitat and as an invasive species in an urban bushland in south-western Australia. *Div. Distrib.* 9: 469-483.
- Santelices R, Navarro RM, Drake F (2009) Caracterización del material forestal de reproducción de cinco procedencias de *Nothofagus alessandrii* Espinosa, una especie en peligro de extinción. *Interciencia* 34: 113-120.
- SAS (2002) SAS/STAT Versión 9.0 SAS Institute Inc. Cary, NC, EEUU.
- Spiegelhalter DJ, Best NG, Carlin BP, Van der Linde A (2002) Bayesian Measures of Model Complexity and Fit (with Discussion). *J. Roy. Stat. Soc. Ser. B* 64: 583-616.
- Tapia CF, Mora F, Santos AI (2009) Preliminary evaluation of 29 Olive (*Olea europaea* L.) cultivars for production and alternate bearing, in the Huasco Valley, northern Chile. *Chil. J. Agric. Res.* 69: 325-330.
- Varghese MC, Hardwood E, Hedge R, Ravi N (2008) Evaluation of Provenances of *Eucalyptus camaldulensis* and Clones of *E. camaldulensis* and *E. tereticornis* at Contrasting Sites in Southern India. *Silv. Genet.* 57: 170-179.
- Wightman KE, Ward SE, Haggard JP, Santiago BR, Cornelius JP (2008) Performance and genetic variation of big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King) in provenance and progeny trials in the Yucatan Peninsula of Mexico. *For. Ecol. Manag.* 225: 346-355.
- Wiltshire RJE, Reid JB, Potts BM (1998) Genetic control of reproductive and vegetative phase change in the *Eucalyptus risdonii*-*E. tenuiramis* complex. *Austr. J. Bot.* 46: 45-63.
- Wolfinger RD, Kass RE (2000) Non-conjugate Bayesian analysis of variance component models. *Biometrics* 56: 768-774.

## BAYESIAN PREDICTION OF POPULATION PERFORMANCE OF *Eucalyptus cladocalyx* FOR BINARY TRAITS OF FLOWERING COMPONENTS AND SURVIVAL IN ARID ZONES OF CHILE

Rodrigo Contreras-Soto, Freddy Mora, Sandra Perret, Felipe Vargas-Reeve and Camila Cané-Retamales

### SUMMARY

Flowering components and survival are particularly important to *Eucalyptus cladocalyx* in the arid zones of Chile. The aim of this study was to examine the population variability for flowering components and survival in eight year old trees grown in two sites of the southern Atacama Desert, Chile. A Bayesian generalized lineal modeling approach (implemented using an independence chain algorithm) was used in data analysis. The deviance information criterion (ADIC), implemented using Gibbs sampling, evidenced significant differences (ADIC > 5) for population effect, for each binary trait analyzed. The population-site interaction effect was significant (ADIC > 5) for the variables: presence/absence of maximum flowering in-

tensity (MI) and presence/absence of flowers or flower buds (FOY) in the beginning of growing season 2009/2010. This interaction was not statistically significant (ADIC < 5) for presence/absence of capsules and/or flower (or buds) (EF) and survival. The results of this study emphasize the importance of the seed source selection. For example, 45% of the trees from Cowell, Australia, evidenced maximum flowering intensity in a determined site, while the trees from Flinders Chase, Australia, evidenced only about 3%. Information generated on inter-population variability could be used to improve traits of interest, although the genotype-environment interaction should be regarded for some flowering components.

## PREDIÇÃO BAYESIANA DO COMPORTAMENTO POPULACIONAL DE EUCALYPTUS CLADOCALYX PARA CARACTERÍSTICAS BINÁRIAS DE COMPONENTES DE FLORESCIMENTO E SOBREVIVÊNCIA EM ÁREAS ÁRIDAS DO CHILE

Rodrigo Contreras-Soto, Freddy Mora, Sandra Perret, Felipe Vargas-Reeve e Camila Cané-Retamales

### RESUMO

Os componentes do florescimento e a sobrevivência são importantes características para a espécie *Eucalyptus cladocalyx*, nas áreas áridas do Chile. O objetivo do presente estudo foi examinar a variabilidade populacional em componentes do florescimento e sobrevivência em árvores de oito anos de idade, cultivadas em dois locais no sul do deserto de Atacama, Chile. Utilizou-se um modelo linear generalizado bayesiano na análise de dados, implementado por meio do algoritmo de cadeias de independência. O critério de informação de desviação (ADIC), implementado por meio do algoritmo de Gibbs, evidenciou diferenças significativas para o efeito populacional (>5) em cada variável binária analisada. O efeito de interação população-local foi significativo (>5) para as variáveis presença/ausência

de máxima intensidade de florescimento (MI) e presença/ausência de flores ou gemas florais (FOG) no início da temporada 2009/2010. Para as variáveis presença/ausência de qualquer evento floral (EF) e sobrevivência, a interação não foi significativa (<5). Os resultados destacam a importância da seleção da fonte de semente; por exemplo, 45% das árvores provenientes de Cowell, Austrália, apresentaram máxima intensidade de florescimento em um sítio determinado, em tanto que árvores provenientes de Flinders Chase, Austrália, apresentaram somente 3%. A informação da variabilidade interpopulacional poderia ser usada para melhorar características de interesse em *E. cladocalyx*, ainda que a interação genótipo-ambiente deveria ser considerada para alguns componentes de florescimento.