

# Ciencia e Investigación

Primera revista argentina de información científica / Fundada en enero de 1945



## DIMENSIÓN CROMOSÓMICA

- Ana Isabel Honfi,  
Alejandro Daniel Bolzán y  
Julio Rubén Daviña

## CONTRIBUCIÓN DE ESTUDIOS GENÉTICO POBLACIONALES A LA CONSERVACIÓN DE ESPECIES NATIVAS DE ARGENTINA DE INTERÉS FORESTAL

- Cecilia F. Bessega,  
Carolina L. Pometti,  
Beatriz O. Saidman y  
Juan C. Vilardi

## ALCANCES, IMPLICANCIAS Y APORTES DE LA DISCIPLINA GENÉTICA VEGETAL EN ARGENTINA Y SU RELACIÓN CON LA SOCIEDAD ARGENTINA DE GENÉTICA (SAG)

- Pedro Rimieri

## LOS PASOS DE LA GENÉTICA ANIMAL EN EL SIGLO XXI

- Liliana Amelia Picardi

## LA CONSULTA GENÉTICA: ¿POR QUÉ Y CUÁNDO?

- María Inés Echeverría

# COMPROMISO

con el bienestar de todos

## HACEMOS ENERGÍA NUCLEAR



NUCLEOELÉCTRICA ARGENTINA S.A.

ATUCHA I / ATUCHA II / EMBALSE

Despejá tus dudas sobre la energía nuclear en: [www.na-sa.com.ar](http://www.na-sa.com.ar)



Ministerio de  
Planificación Federal,  
Inversión Pública y Servicios  
Presidencia de la Nación

**EDITOR RESPONSABLE**

Asociación Argentina para el  
Progreso de las Ciencias (AAPC)

**COMITÉ EDITORIAL**

**Editora**

Dra. Nidia Basso

**Editores asociados**

Dr. Gerardo Castro

Dra. Lidia Herrera

Dr. Roberto Mercader

Dra. Alicia Sarce

Dr. Juan R. de Xammar Oro

Dr. Norberto Zwirner

**CIENCIA E**

**INVESTIGACIÓN**

Primera Revista Argentina  
de información científica.

Fundada en Enero de 1945.

Es el órgano oficial de difusión de  
La Asociación Argentina para el  
Progreso de las Ciencias.

A partir de 2012 se publica en dos  
series, Ciencia e Investigación  
y Ciencia e Investigación Reseñas.

Av. Alvear 1711, 4° piso,  
(C1014AAE) Ciudad Autónoma  
de Buenos Aires, Argentina.  
Teléfono: (+54) (11) 4811-2998  
Registro Nacional de la  
Propiedad Intelectual  
N° 82.657. ISSN-0009-6733.

Lo expresado por los autores o  
anunciantes, en los artículos o  
en los avisos publicados es de  
exclusiva responsabilidad de los  
mismos.

Ciencia e Investigación se  
edita on line en la página web  
de la Asociación Argentina  
para el Progreso de las  
Ciencias (AAPC)  
[www.aargentinpicias.org](http://www.aargentinpicias.org)



## SUMARIO

### EDITORIAL

La importancia de la genética en la vida  
**Juan Carlos Salerno** ..... 3

### ARTÍCULOS

Dimensión cromosómica  
**Ana Isabel Honfi, Alejandro Daniel Bolzán y  
Julio Rubén Daviña,** ..... 5

Contribución de estudios genético poblacionales a la  
conservación de especies nativas de Argentina de  
interés forestal  
**Cecilia F. Bessega, Carolina L. Pometti, Beatriz O. Saidman y  
Juan C. Vilardi** ..... 25

Alcances, implicancias y aportes de la disciplina genética  
vegetal en argentina y su relación con la Sociedad Argentina  
de Genética (SAG)  
**Pedro Rimieri** ..... 36

Los pasos de la genética animal en el siglo XXI  
**Liliana Amelia Picardi** ..... 43

La consulta genética: ¿por qué y cuándo?  
**Echeverría, MI** ..... 49

INSTRUCCIONES PARA AUTORES ..... 57

*... La revista aspira a ser un vínculo de unión entre  
los trabajadores científicos que cultivan disciplinas  
diversas y órgano de expresión de todos aquellos que  
sientan la inquietud del progreso científico y de su  
aplicación para el bien.*

**Bernardo A. Houssay**

# Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias

## COLEGIADO DIRECTIVO

Presidente  
Dr. Miguel Ángel Blesa\*

Vicepresidente  
Dra. Susana Hernández

Secretaria  
Dra. Alicia Sarce

Tesorero  
Dra. Lidia Herrera

Protesorero  
Dr. Gerardo Castro

Miembros Titulares  
Ing. Juan Carlos Almagro  
Dr. Alberto Baldi  
Dra Nidia Basso  
Dra. María Cristina Cambiaggio  
Dr. Eduardo Hernán Charreau  
Dra. Alicia Fernández Cirelli  
Dr. Alberto Pochettino  
Dr. Carlos Alberto Rinaldi  
Dr. Marcelo Jorge Vernengo  
Dr. Juan Roberto de Xammar Oro

Miembros Institucionales:  
Sociedad Argentina de Farmacología Experimental:  
Dra. Graciela Noemí Balerio.  
Sociedad Argentina de Hipertensión Arterial:  
Dra. Ana María Puyó  
Sociedad Argentina de Investigaciones Bioquímicas:  
Dr. Luis Alberto Quesada Allué  
Sociedad Argentina de Microscopía:  
Dr. Raúl Antonio Versaci  
Unión Matemática Argentina:  
Dra. Ursula María Molter

Miembros Fundadores  
Dr. Bernardo A. Houssay – Dr. Juan Bacigalupo – Ing. Enrique Butty  
Dr. Horacio Damianovich – Dr. Venancio Deulofeu – Dr. Pedro I. Elizalde  
Ing. Lorenzo Parodi – Sr. Carlos A. Silva – Dr. Alfredo Sordelli – Dr. Juan C. Vignaux – Dr.  
Adolfo T. Williams – Dr. Enrique V. Zappi

AAPC  
Avenida Alvear 1711 – 4º Piso  
(C1014AAE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires – Argentina  
[www.aargentinapciencias.org](http://www.aargentinapciencias.org)

\* En uso de licencia

# CONTRIBUCIÓN DE ESTUDIOS GENÉTICO POBLACIONALES A LA CONSERVACIÓN DE ESPECIES NATIVAS DE ARGENTINA DE INTERÉS FORESTAL

Palabras clave: marcadores moleculares, poblaciones naturales, estructura genética.  
Key words: molecular markers, natural populations, genetic structure.

La genética de poblaciones puede definirse como una extensión de la genética mendeliana a conjuntos de familias que constituyen poblaciones y los resultados de los estudios en este campo pueden aportar resultados muy valiosos para establecer estrategias de conservación y planes de manejo de especies nativas. Existen factores naturales y antrópicos que ponen en peligro a las poblaciones naturales pues la falta de continuidad en los espacios habitados por las poblaciones da lugar a la aparición de parches más o menos aislados que conduce a la ocurrencia de barreras físicas que impiden o reducen significativamente la posibilidad de reproducción entre los individuos que sobreviven en diferentes parches. La consecuencia del aislamiento total o parcial entre los parches puede llevar a la pérdida de variación genética y aumento de la *endogamia* que pueden determinar la extinción de poblaciones locales.

Aquí se presentan tres ejemplos donde los estudios genéticos

poblacionales y de genética del paisaje basados en marcadores moleculares resultan en aportes significativos en la conservación de especies leñosas nativas de las regiones Chaqueña y del Monte de los géneros *Prosopis* y *Acacia*. Los estudios de identificación de unidades de manejo, del sistema de fecundación y del sistema de dispersión de polen en estas especies nativas valiosas para la Argentina permiten proponer recomendaciones para ser consideradas al momento de establecerse las estrategias de conservación de los recursos.

Population genetics can be defined as an extension of the Mendelian laws to a group of families that constitute populations and the results in this field can yield valuable results in order to propose strategies of conservation and management plans in natives species. Natural and anthropic factors may affect natural populations due to the lack of continuity in the areas where populations inhabit, producing a patchy distribution that causes the occurrence of physical barriers that reduce the probability of intercrossing between individuals inhabiting different patches. The main consequences of total or partial isolation among patches are genetic variation loss and endogamy increase which might determine the extinction of local populations.

Here, we present three examples where population and landscape genetic studies based on molecular markers are useful for conservation of native woody species from Chaqueña and Monte regions of the genera *Prosopis* and *Acacia*. The research on identification of management units, mating and pollen dispersal system in these important native Argentine species allows to produce recommendations to be considered in order to establish conservation strategies of these resources.

■ Cecilia F. Bessega<sup>1\*</sup>, Carolina L. Pometti<sup>1\*</sup>, Beatriz O. Saidman<sup>1\*</sup>, Juan C. Vilardi<sup>1,2\*</sup>

\*Los autores se listan por orden alfabético ya que contribuyeron de igual manera en la realización del presente trabajo

<sup>1</sup> Universidad de Buenos Aires. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Instituto de Ecología, Genética y Evolución (IEGE-BA). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento Ecología, Genética y Evolución. Buenos Aires, Argentina.  
E-mail: <sup>2</sup> vilardi@ege.fcen.uba.ar

Los mecanismos de transmisión de los genes muestran una alta regu-

laridad, con fuertes matices geométricos y algebraicos, observada en

los históricos trabajos de Gregor Mendel (1866). Esta regularidad,

que permite realizar predicciones acerca de la distribución esperada de rasgos discretos en familias provenientes de cruzamientos controlados, fue observada mucho antes del descubrimiento de los cromosomas como portadores de los genes y del reconocimiento del ADN como la molécula capaz de contener la información genética.

La genética de poblaciones puede definirse básicamente como la extensión de la genética mendeliana a conjuntos de familias que constituyen poblaciones y como tal, es el área de la biología con aplicación más exitosa de la matemática. Esta disciplina nace en 1908 con los trabajos de G. H. Hardy en Inglaterra y W. Weinberg en Alemania, quienes observan que la distribución de frecuencias de los genotipos para "loci mendelianos simples" puede predecirse como una combinación aleatoria de los alelos presentes en las poblaciones, lo que formalmente se describe como la ley de Hardy-Weinberg.

Las observaciones de Mendel y las de Hardy y Weinberg comparan el hecho que la demostración del comportamiento de los genes durante su transmisión entre generaciones se basa en consideraciones estadísticas y no en el estudio de la naturaleza del material hereditario en sí. En su formulación elemental, los métodos estadísticos necesarios para poner a prueba estos principios hoy en día parecen simples pero sentaron las bases para desarrollos teóricos muy complejos. Sin embargo, los contrastes estadísticos de muchas de las hipótesis emergentes de tales desarrollos requirieron de la disponibilidad de marcadores genéticos cuyo desarrollo debió esperar más de seis décadas. La Genética del Paisaje es una disciplina de desarrollo relativamente reciente que incorpora los estudios genético po-

blacionales dentro de un contexto ecológico y aporta desarrollos teóricos que contribuyen a la comprensión de los mecanismos evolutivos y consecuencias de factores de origen antrópico sobre las propiedades genéticas y demográficas de las poblaciones.

Los estudios genético poblacionales pueden aportar resultados muy valiosos para establecer estrategias de conservación y planes de manejo de especies nativas. La conservación de los recursos puede ser pensada desde dos miradas. Por un lado, la conservación *ex-situ* a través de la preservación de germoplasma en bancos de semillas o *in-situ* mediante la identificación y protección de las *unidades operativas de manejo* en los ambientes naturales. Diferentes factores afectan de manera significativa las poblaciones de especies leñosas como el algarrobo, espinillo y viscote nativas de nuestro país. Existen factores naturales y antrópicos como las lluvias estacionales que conducen a inundaciones, los incendios forestales naturales o provocados, la deforestación sin planes de reforestación y el avance de la frontera agrícola-ganadera que ponen en peligro a las poblaciones naturales. La pérdida de hábitat es la razón más importante para la extinción de especies en los últimos tiempos. Al verse disminuido el hábitat, ocurre una falta de continuidad en los espacios habitados por las poblaciones dando lugar a parches más o menos aislados, proceso conocido como *fragmentación* de las poblaciones, que conduce a la ocurrencia de barreras físicas que impiden o reducen significativamente la posibilidad de reproducción entre los individuos que sobreviven en diferentes parches. Esta nueva estructura poblacional discontinua e inestable conformada por núcleos o *demos* remanentes semi-aislados se suele denominar *metapoblación*. La con-

secuencia del aislamiento total o parcial entre los *demos* de pequeño tamaño es la ocurrencia de un fenómeno conocido como *cuello de botella*, que puede llevar a la pérdida de variación genética dentro de los *demos* y aumento de la *endogamia* que pueden determinar la extinción de poblaciones locales. Para lograr que el *acervo genético* de los recursos biológicos sea conservado de manera efectiva los programas de protección ambiental deben incluir estudios genéticos utilizando *marcadores genéticos* que permitan monitorear la ocurrencia de estos procesos y aportar criterios de decisión al momento de proponer estrategias de conservación adecuadas.

Los marcadores genéticos se definen como cualquier característica o rasgo cualitativo que tenga base genética, presente variación y el genotipo correspondiente de cualquier individuo pueda identificarse inequívocamente. Bajo esta definición se incluyen tanto rasgos morfológicos que pueden detectarse a simple vista, como loci que pueden analizarse por medio de estudios bioquímicos o técnicas moleculares (*marcadores moleculares*). Hasta 1960 la disponibilidad de marcadores genéticos era muy escasa, pero a partir de la década del 70 los avances en el desarrollo de técnicas bioquímicas y moleculares permitieron el crecimiento exponencial de las herramientas para cuantificar la cantidad y distribución de la variación genética en las poblaciones.

En este sentido presentaremos a continuación tres ejemplos en donde los estudios genéticos poblacionales y de genética del paisaje, basados en marcadores moleculares, resultan en aportes significativos en la conservación de especies leñosas nativas de las regiones Chaqueña y del Monte de los géneros *Prosopis* y *Acacia*.

*Prosopis* y *Acacia* pertenecen a la familia de las Leguminosas. El primero incluye 44 especies distribuidas en zonas áridas y semiáridas de Asia, África y América; en este último continente se encuentra el mayor número de especies, con un importante centro de polimorfismo morfológico en la Argentina. *Acacia* es un género de distribución pantropical, con aproximadamente 1450 especies (Guinet y Vassal 1978; Ross 1981) que habitan regiones tropicales y subtropicales de América, Australia, África y sur de Asia. En el norte y centro de Argentina está representado por 21 especies, incluidas en dos subgéneros: *Acacia* y *Aculeiferum* (Cialdella 1984; Cialdella 1997). Algunas especies de ambos géneros resultan muy importantes desde el punto de vista económico y ecológico dado que son capaces de proveer leña, carbón, madera, forraje, frutos con posibilidad de aprovechamiento en la industria y contribuyen en la fijación de los suelos. Son especies muy valiosas en los ambientes áridos y semiáridos de la Argentina cuyas poblaciones naturales comienzan a verse afectadas por procesos de desertificación debidos a las actividades antrópicas y a los cambios climáticos. Existe una gran necesidad de trabajo para su conservación y el empleo de buenas prácticas de manejo para el aprovechamiento sustentable de estos recursos hacia el futuro.

Entre las especies de estos géneros *A. caven* está ya siendo utilizada en prácticas de conservación de suelos y control de erosión. Esta especie es muy resistente a la sequía, con gran capacidad de rebrote que le permite recuperarse rápidamente luego de incendios o ramoneos (Karlin y col. 1997). Además, su regeneración natural por semillas es abundante y el ganado cumple una función esencial en la dispersión de las mismas (Gutiérrez y Armesto

1981). Otra especie de importancia es *A. visco*; las características de dureza y durabilidad de su madera la hacen muy útil para carpintería, carrocerías y parquets, pero su escaso diámetro restringe su uso en algunas actividades, por lo cual en cambio ha sido utilizada en mayor escala para postes, varillas y como combustible (Tortorelli 1956).

Dentro del género *Prosopis*, *P. alba*, incluida en la sección Algarobia (Burkart 1976), es un recurso nativo muy importante en la Región Chaqueña en el Norte de Argentina. Puede llegar a medir 18 m de alto y 70 a 150 cm de diámetro a la base del árbol. Es útil como fijadora de nitrógeno, provee leña y carbón, madera útil para pisos y muebles y sus frutos, de sabor agradable, poseen alto contenido de azúcar y son usados como forraje y para alimentación humana. Por ser una especie tan valiosa sus poblaciones naturales han sido sobre-explotadas y la tasa de deforestación resulta mayor que la tasa de crecimiento y regeneración, por lo cual sus poblaciones muestran una marcada disminución.

#### ■ IDENTIFICACIÓN DE UNIDADES DE MANEJO – GENÉTICA DEL PAISAJE EN EL VISCOTE ACACIA VISCO Y EN EL ESPINILLO A. CAVEN

La genética del paisaje evalúa cómo los factores ambientales afectan la distribución de la variación genética y el flujo génico en las especies que habitan los ambientes naturales remanentes luego de ser sometidos a perturbaciones naturales o antrópicas. Además, intenta evaluar de qué manera factores ambientales como la temperatura o las precipitaciones, pueden afectar la variación genética adaptativa. El modo de realizar dichos estudios implica la caracterización, a través de marcadores moleculares, de la

distribución de la variación genética a diferentes niveles jerárquicos o escalas espaciales, tales como regiones, poblaciones dentro de cada región, individuos dentro de cada población. Para ello es necesario evaluar una gran cantidad de loci (marcadores) en individuos de poblaciones situadas en diferentes ambientes de interés. A partir de la georreferenciación de cada sitio de muestreo y el *genotipo multilocus* de cada individuo es posible evaluar efectos a nivel poblacional sobre la dispersión y el flujo génico (o migración efectiva), así como también la interacción ambiente-variación genética adaptativa. Un enfoque ya tradicional es el análisis de la varianza molecular (AMOVA por su sigla en inglés) que provee información sobre la distribución de la variabilidad, es decir la proporción de la variación genética presente en cada nivel jerárquico considerado. Una aproximación complementaria a este método, implica la identificación de grupos de poblaciones y las barreras o discontinuidades genéticas, a través de aproximaciones estadísticas bayesianas implementadas en distintos programas computacionales (STRUCTURE, GENELAND, etc.) que pueden prescindir o utilizar la información de las coordenadas geográficas de los sitios de muestreo (Guillot y col. 2005; Pritchard y col. 2009).

Estudios basados en polimorfismos para la longitud de fragmentos de ADN amplificados (o marcadores AFLP por su sigla en inglés) en poblaciones argentinas de *Acacia caven* y *A. visco* (Fig. 1), permitieron demostrar que la mayor parte de los sitios de muestreo considerados representaban diferentes grupos genéticos. En el caso de *A. caven* pudieron reconocerse 11 grupos y 6 en el caso de *A. visco* (Fig. 2) (Pometti y col. 2012, Pometti y col. 2016). Estos estudios demostraron además



**Figura 1:** Mapa de Argentina mostrando los sitios de colección para *Acacia cavem* y *A. visco*. Abreviaturas de las poblaciones para *A. visco*: AM: Amaicha, CA: Cachi, PH: Posta de los Hornillos, QI: Quilmes, TI: Ruta a Ticucho, TA: Tapia, TC: Ticucho. Abreviaturas de las poblaciones para *A. cavem*: CI: Coiruro; CQ: Campo Quijano; CS: Costanera Sur; EC: El Carril; FS: Formosa; GY: Gualeguaychú; IB: Iberá; LG: Las Gemelas; PA: Pan de Azúcar; R9: Ruta 9; TO: Tolombón; VA: Vaquerías; VF: Vivero Forestal; VH: Valle Hermoso.

que en ambas especies la mayor proporción de la variación genética ocurre dentro de las poblaciones. La diferenciación entre poblaciones de diferentes ecorregiones es relativamente baja en relación con la variación genética total (8.8% en *A. cavem* y 2.1% en *A. visco*). Sin embargo, estas diferencias entre ecorregiones son altamente significativas.

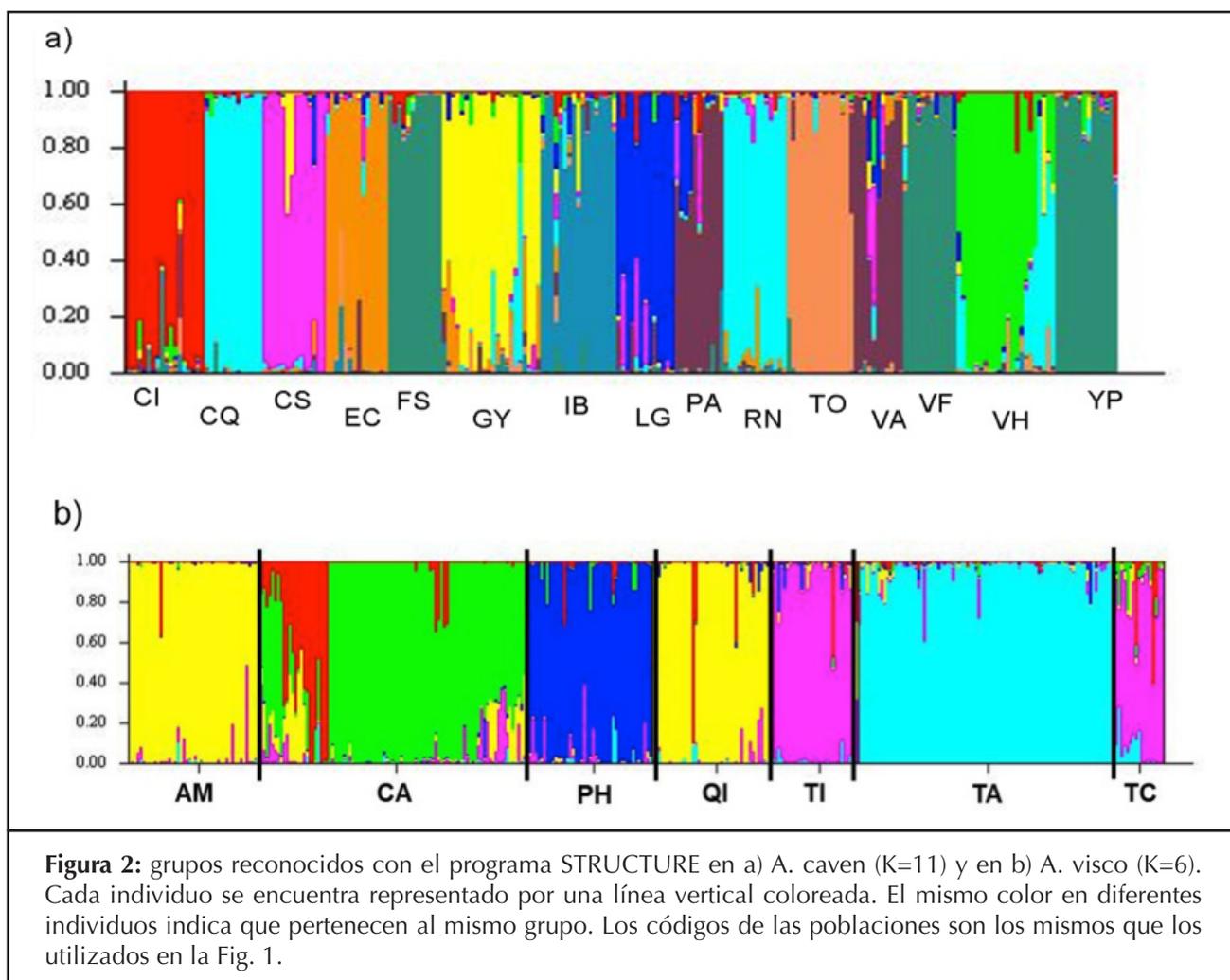
Los resultados obtenidos sugieren que una estrategia adecuada para utilizar ambas especies en planes de reforestación debería focalizarse en el muestreo de semillas de un alto número de individuos (árboles o arbustos) dentro de cada población debido a que la variación genética dentro de las poblaciones

es muy alta pero, dada la diferenciación significativa entre ecorregiones, es necesario además asegurar una amplia cobertura de la distribución ecológica de ambas especies. Los ecosistemas naturales de Argentina han demostrado ser frágiles y fácilmente dañados por el manejo no sustentable por parte del hombre. Todos los ecosistemas de Argentina actualmente están experimentando algún tipo de desertificación o deterioro. Por lo tanto, es importante que un plan de manejo y conservación sea puesto en marcha para las especies de *Acacia* con el objeto de mitigar el abuso de la industria ganadera, basada en el pastoreo de la vegetación natural, sin considerar los potenciales impactos ambientales o técnicas de manejo ecológico

(Fernández y Russo 1997).

#### ■ PARÁMETROS DEL SISTEMA DE FECUNDACIÓN EN EL ALGARROBO BLANCO (*PROSOPIS ALBA*), EL ESPINILLO (*ACACIA CAVEN*) Y EL VISCOTE (*A. VISCO*)

La fragmentación del hábitat afecta parámetros del sistema de fecundación de las poblaciones remanentes, tales como la cantidad de polinizadores por planta madre, la proporción de cruzamientos entre individuos emparentados y la distancia de dispersión del polen entre otros. Esto es consecuencia del aislamiento geográfico entre los demos, la reducción de su tamaño poblacional efectivo y la alteración de los patrones de dispersión del polen. A su vez, el aislamiento reproductivo y la



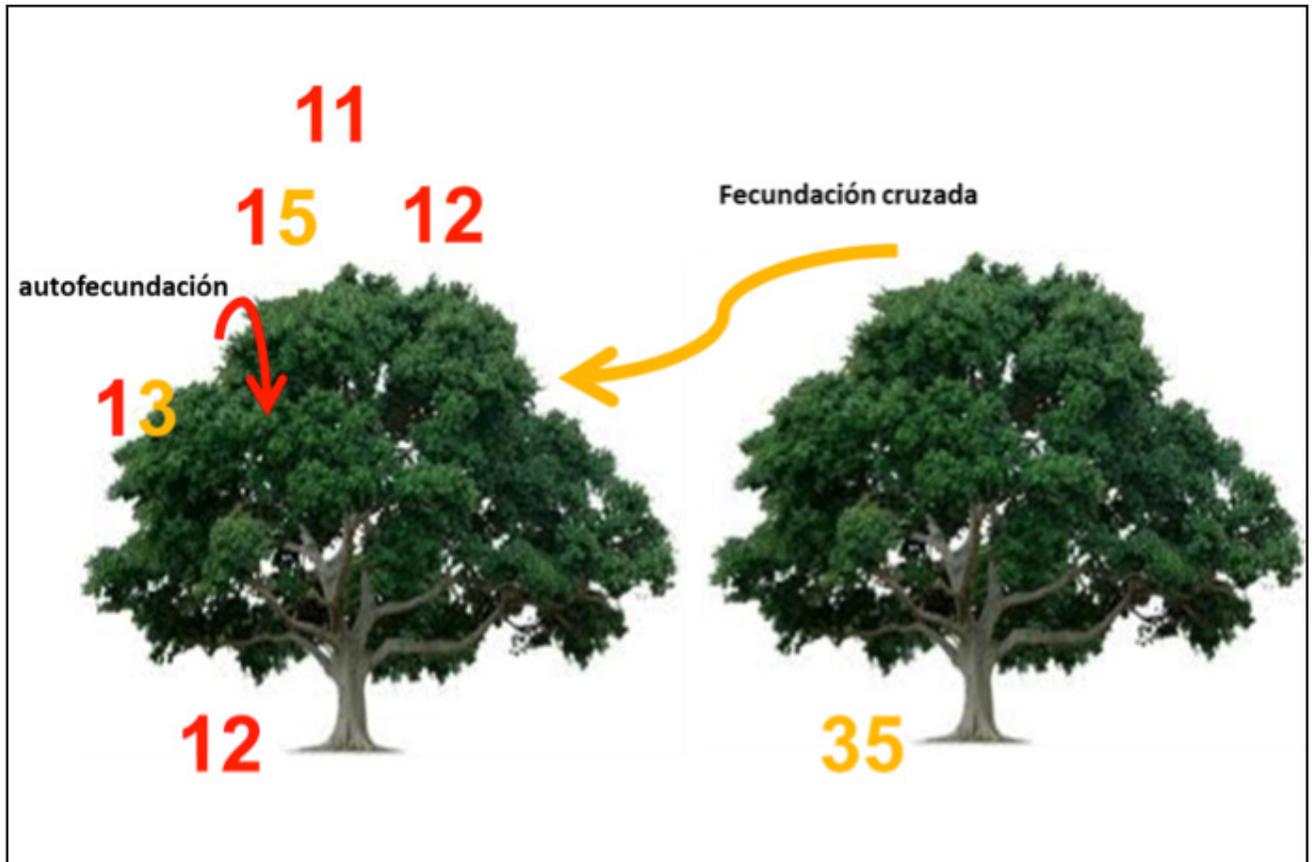
**Figura 2:** grupos reconocidos con el programa STRUCTURE en a) *A. caven* (K=11) y en b) *A. visco* (K=6). Cada individuo se encuentra representado por una línea vertical coloreada. El mismo color en diferentes individuos indica que pertenecen al mismo grupo. Los códigos de las poblaciones son los mismos que los utilizados en la Fig. 1.

pérdida de la variabilidad genética, causadas por la deriva y el cruzamiento entre individuos emparentados, podría provocar un aumento en la endogamia con las consecuencias negativas mencionadas anteriormente. Los parámetros del sistema de fecundación y la endogamia en las poblaciones de una especie pueden ser evaluados indirectamente a través de estudios basados en marcadores moleculares. Un método eficiente se basa en el modelo de apareamiento mixto multilocus, cuya estimación puede realizarse a través de programas computacionales como MLTR (Ritland 2002). Este método requiere el agrupamiento de las muestras poblacionales en familias (semillas colectadas de un mismo árbol) y la genotipificación multilocus de dichos individuos. La comparación de las frecuencias alélicas en la nube de polen que asiste

a cada planta madre (Fig. 3) permite, entre otros parámetros, establecer las tasas de fecundación cruzada ( $t$ ), autofecundación ( $s$ ), cruzamiento entre parientes y número de dadores de polen por planta madre ( $Np$ ).

En Argentina se encuentran dos grupos de algarrobos que están diferenciados por su utilidad, el nivel de conservación y la distribución geográfica. Los grupos son fácilmente reconocibles por el color y la forma de sus vainas como "algarrobo blanco" (*Prosopis alba* y *P. chilensis*) y "algarrobo negro" (*P. flexuosa* y *P. nigra*). Los algarrobos negros están ampliamente distribuidos mientras que los blancos se encuentran en áreas más húmedas y se comportan como especies freatófitas. Los primeros son más susceptibles a ser atacados por insectos y suelen ser

descartados para la industria mueblera restringiendo su aplicación a postes y leña. Los segundos se prefieren para la construcción de muebles porque su madera es de mejor calidad (Pometti y col. 2009; 2010), y representan un recurso muy desgastado y reducido a unos pocos bosques en diferentes zonas de Argentina. En particular, hemos visto que en la zona Machagai–Quitilipi, en la provincia de Chaco, que solía ser un polo de actividad de construcción de muebles se ha frenado su trabajo como consecuencia de la extinción del recurso. En Santiago del Estero, los bosques que podrían haber sido útiles para esta industria pueden considerarse prácticamente desaparecidos principalmente por la acción antrópica y también por causas naturales.



**Figura 3:** Estimación de la nube de polen que asiste a cada planta madre a través de la comparación de los genotipos de las semillas colectadas en cada planta madre y el genotipo materno considerando la ocurrencia de autofecundación o fecundación cruzada.

Nota: El árbol de la izquierda es heterocigoto para los alelos 1 y 2, mientras que el de la derecha es heterocigoto 3-5. En la planta de la izquierda se ilustran los genotipos de las semillas evaluadas (recogidas de dicho árbol). Se ejemplifica la presencia del alelo 3 y 5 provenientes de la fecundación cruzada.

Hoy en día, los algarrobos están restringidos a pequeñas áreas (protegidas entre los ríos), a los lados de los caminos, o mantenidos como pequeños parches a fin de proveer sombra al ganado.

En particular, en una población fragmentada de *P. alba* en Fernández, Santiago del Estero, un estudio basado en polimorfismos para repeticiones de secuencias simples de ADN (SSR por sus siglas en inglés, llamados también microsatélites) mostró exclusivamente fecundación cruzada ( $t=1$ ). Sin embargo, también se comprobó que en esta población puede haber endogamia como consecuencia de cruzamientos entre in-

dividuos emparentados que ocurren en frecuencia baja pero significativa. Los resultados mostraron también que el número de dadores de polen por planta madre (que corresponde al número de árboles que actúan como progenitores masculinos de cada familia) fue en promedio de 6 individuos.

El estudio del sistema de fecundación en cuatro poblaciones de *A. caven* realizado a partir de datos provenientes de electroforesis de isoenzimas, indicó que esta especie es predominantemente alógama con una tasa de exocruza mayor al 96% y el análisis de estructura genética dentro de cada población indicó

que las diferencias en las frecuencias alélicas entre familias es altamente significativa (Pometti y col. 2011). En un estudio mediante la técnica de AFLP en *A. visco* se mostró que la tasa de exocruza es del 100% y se ve levemente afectada por el tamaño poblacional (Pometti y col. 2013). El mayor número de dadores de polen estimado fue entre 11 y 71 por planta madre. Los parámetros estimados en estos estudios son similares a los registrados en la bibliografía para especies leñosas, de ciclo de vida largo y cuya dispersión es endozooica (Hamrick y Godt 1996; Nybom 2004). La diferencia estimada en el número de dadores de polen entre las especies de am-

bos géneros, podría explicarse por los diferentes polinizadores específicos de especies correspondientes. Mientras que para *Prosopis* los polinizadores más comunes son abejas de los géneros *Apis*, *Xylocopa* y *Caupolicana*, para el género *Acacia*, se registraron pequeños escarabajos de la especie *Actylus trifaciatus*.

Además de los parámetros mencionados fue posible realizar estudios que evaluaron la constitución interna de cada familia, definida como el conjunto de semillas coleccionadas de una planta madre. Esto equivale a determinar la proporción de *medios hermanos* y *hermanos enteros* en cada grupo fraterno en forma global y considerando semillas del mismo o diferente fruto (vaina). En este caso el grado de parentesco se estimó en función de la proporción de alelos compartidos entre todos los pares de individuos de cada grupo fraterno. De esta forma, se pudo establecer que la proporción de hermanos enteros en *P. alba* es del 64% para semillas provenientes del mismo fruto, mientras que dicha proporción baja al 10% cuando se comparan semillas de diferentes frutos. Esta información pudo ser interpretada sobre la base de la conducta de los polinizadores y la anatomía de la inflorescencia. Los insectos polinizadores asociados a esta especie usualmente focalizan sus esfuerzos en las plantas con mayor densidad floral y limitan su movimiento entre plantas a los vecinos más cercanos. Como consecuencia, cada evento de polinización involucra el polen de un solo o unos pocos dadores de polen fertilizando cada inflorescencia favoreciendo la ocurrencia de hermanos completos en cada fruto (Bessega y col. 2011).

La información acerca de la estructura poblacional y el sistema de fecundación es primordial para el desarrollo de estrategias para el uso

racional y los programas de conservación de especies nativas, ya que ellos contribuyen a definir las unidades de manejo en la naturaleza.

Los resultados que se obtienen resultan importantes y útiles para ser tenidos en cuenta al momento de proponer estrategias de conservación *ex situ* para el mejoramiento genético forestal y la reforestación.

En el caso del algarrobo blanco, es necesario considerar que las semillas que se obtienen de cada planta madre deberían ser tomadas de diferentes frutos para reducir la proporción de hermanos enteros en la muestra. Con estos resultados es posible estimar también cuantas plantas madres deben ser cosechadas con el propósito de conservar *ex situ* un número determinado de genotipos (ver Sebben 2006, para una descripción detallada). Sobre la base del tamaño efectivo de la población, dispersión del polen y sistema de fecundación de esta población de *P. alba*, pudimos calcular que para conservar al menos 100 genotipos diferentes deberían muestrearse semillas de al menos 38 plantas madres diferentes.

Aplicando el mismo método en el caso de las especies de *Acacia*, estimamos que para retener un tamaño efectivo de 100 para conservación *ex situ*, se deben coleccionar semillas de al menos 25-29 árboles por población. Asimismo, el muestreo de una mayor cantidad de frutos por árbol, resultará en una muestra genéticamente diversa como consecuencia de las altas tasas de fecundación cruzada. Tanto en *P. alba* como en las especies de *Acacia* estudiadas, la presencia de estructura genética interna en las poblaciones sugiere que las semillas deben ser colectadas de árboles separados espacialmente para evitar duplicaciones de las muestras asociadas a

la colección de semillas de plantas madres emparentadas.

#### ■ SISTEMA DE DISPERSIÓN DE POLEN EN ALGARROBO BLANCO (*P. ALBA*)

La capacidad de dispersión de una especie forestal depende de los mecanismos de dispersión del polen y las semillas y del sistema de fecundación. Como se mencionó más arriba, en el algarrobo blanco la dispersión del polen es mediada por insectos que en general se desplazan a distancias relativamente cortas. Las semillas son transportadas por los animales que se alimentan de sus frutos (dispersión endozoica) y depositan en sus heces grupos de semillas, habitualmente de una o unas pocas plantas madres. Este medio favorece la rápida germinación de las semillas en un medio rico en nutrientes y tienden a producirse parches de renovals formados por individuos emparentados.

Como se describió anteriormente la fragmentación por diferentes causas reduce la continuidad de los bosques reduciéndolos a parches remanentes donde disminuye el tamaño efectivo de las poblaciones (Cascante y col. 2002), interrumpe la posibilidad de que ocurra flujo génico (Jump y Penuelas 2006) y como consecuencia las poblaciones aisladas pueden perder variación genética y corren el riesgo de no poder sobrevivir a largo plazo (Sork y Smouse 2006). Fenómenos como la pérdida de alelos por la reducción de la población, aumento de la endogamia, aumento de la diferenciación entre las poblaciones y reducción de la variabilidad dentro de los parches pueden ser interpretados como las primeras consecuencias visibles de estos procesos. Sin embargo la longevidad de los árboles y la dispersión efectiva del polen y de las semillas pueden aumentar la

tolerancia a los efectos negativos que produce la fragmentación de los bosques (Hamrick 2004; Jump y Penuelas 2006). De hecho los factores ecológicos tales como la habilidad para dispersarse y las características de los agentes dispersores del polen y de los vectores encargados de la dispersión de semillas resultan importantes en la predicción de los efectos genéticos y destinos de las poblaciones perturbadas (Kramer y col. 2008).

En este sentido se evaluó indirectamente, utilizando datos genéticos, la distancia (en metros) que se dispersa el polen en la población de algarrobo blanco antes descrita de la localidad de Fernández (Santiago del Estero). A partir de los genotipos identificados para las plantas madres y las semillas provenientes de los frutos cosechados de cada una de ellas es posible estimar la composición de la nube de polen y estimar indirectamente los parámetros de dispersión de polen utilizando el programa computacional POLDISP 1.0 (Robledo-Arnuncio y col. 2007), aplicando dos algoritmos diferentes: TwoGener (Smouse et al. 2001; Aus-

terlitz and Smouse 2002) y KinDist (Robledo-Arnuncio y col. 2006).

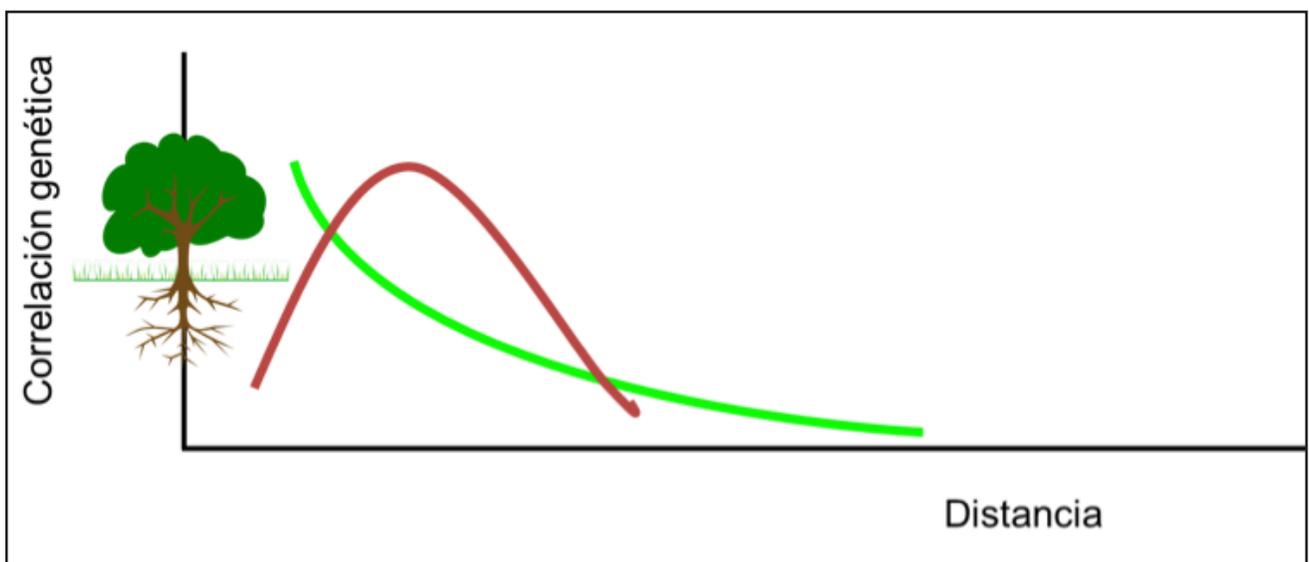
Ambos métodos se basan en la relación que se espera entre la distancia física que hay entre las plantas madres muestreadas y la correlación genética interclase ( $\Phi_{FT}$ ) entre pares de individuos (semillas) para el conjunto de polen muestreado en cada madre (Fig. 4). El coeficiente  $\Phi_{FT}$  puede considerarse un estimador del parentesco y se espera que el parentesco entre los descendientes de distintas plantas madres sea inversamente proporcional a la distancia que las separa y directamente proporcional a la capacidad de dispersión del polen. La diferencia entre las estimaciones generadas por los dos algoritmos utilizados tienen que ver con parámetros adicionales que requiere el método, como por ejemplo la densidad de la zona de estudio que en un caso es predicha y en el otro tiene que ser provista por el investigador, y algunos supuestos como ser la asincronía floral, la uniformidad en las tasas de fecundidad masculina, etc. (ver Austerlitz y Smouse, 2002, para una descripción detallada).

Nuestros análisis permitieron describir que la distancia de dispersión de polen promedio es de entre 5 y 31 m usando los algoritmos KinDist y TwoGener y cada planta madre recibiría polen de aproximadamente siete progenitores masculinos distintos.

La estima indirecta en el algarrobo blanco señala que la dispersión del polen y de las semillas sería limitada y esto plantea la necesidad de conservar in situ pequeños parches a tal distancia que se eviten los efectos de la endogamia y la deriva genética dentro de las poblaciones como una consecuencia de la utilización intensiva de este recurso.

## ■ CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Los efectos de la perturbación de hábitat sobre las propiedades genéticas de las poblaciones son muy dependientes del sistema de fecundación y los mecanismos de dispersión de las distintas especies. La distancia de desplazamiento del polen es un determinante significativo del tamaño efectivo del área de polinización



**Figura 4:** Relación entre la distancia física y la correlación genética ( $\Phi_{FT}$ ) entre plantas madres utilizando diferentes curvas posibles de dispersión, a fin de estimar la distancia de dispersión de polen mediante el programa POLDISP.

para una especie determinada, que resulta especialmente importante para calcular cuántos árboles semilleros son necesarios para ser coleccionados en planes de conservación *ex situ* y programas de reforestación.

Los estudios de dispersión de los genes resultan entonces valiosos para la conservación de especies nativas afectadas por actividades antrópicas, ya que proporcionan medidas precisas sobre los efectos reales de la fragmentación, además de describir cómo se distribuye la diversidad genética dentro y entre las poblaciones. Esta información es importante para la identificación de las unidades de conservación.

El cambio climático global, que es una alteración a nivel mundial de los paisajes naturales y los cambios climáticos veloces, demandan un conocimiento profundo acerca de la habilidad de migrar de las especies así como el potencial para adaptarse a nuevos ambientes alterados por el hombre. La genética del paisaje, es idealmente adecuada para proveer dicha evidencia a partir de datos reales. Para que esta tarea pueda ser llevada a cabo, los investigadores tienen que hacer uso total de la genética del paisaje existente y de la metodología recientemente utilizada basada en marcadores moleculares, especialmente en plantas.

## ■ GLOSARIO

**Acervo genético:** *el acervo genético de una especie o población es el grupo completo de alelos únicos presentes en el material genético de la totalidad de los individuos existentes en dicha población.*

**Conservación *ex situ*:** *La conservación *ex situ* consiste en el mantenimiento de algunos componentes de la biodiversidad fuera de sus hábitats naturales. Este tipo de conservación*

*incluye el almacenamiento de los recursos genéticos en bancos de germoplasma.*

**Conservación *in situ*:** *La conservación *in situ* es el proceso de proteger una especie en su hábitat natural, actuando o no sobre el hábitat en sí mismo, o defendiendo a esa especie de sus predadores. Involucra la protección de los hábitats y el tamaño poblacional a conservar debe ser lo suficientemente grande como para reunir la variabilidad genética suficiente para que las subpoblaciones puedan sobrevivir. El tamaño de reserva puede calcularse para la especie en cuestión examinando la densidad poblacional en situaciones naturales y debe ser bien protegida de destrucción antrópica u otras catástrofes.*

**Hermanos enteros:** *se consideran hermanos enteros a aquellos individuos que comparten tanto el progenitor masculino como el femenino.*

**Fragmentación poblacional:** *proceso que surge como consecuencia del aislamiento de hábitat que se da por causas naturales o antrópicas que lleva a la aparición de parches en lugar de una única población de distribución originalmente uniforme.*

**Cuello de botella:** *se dice que una población ha sufrido un cuello de botella cuando ha experimentado un drástico descenso en el número de individuos en algún momento del pasado, llegando en algunos casos a estar al borde de la extinción.*

**Endogamia:** *se dice que una población es endogámica cuando existen en ella cruzamientos entre individuos emparentados en mayor frecuencia que lo esperado por azar.*

**Marcadores Moleculares:** *son regiones del ADN de fácil identificación que permiten evidenciar polimorfis-*

*mo o variación entre individuos y funcionan como señaladores de diferentes regiones del genoma.*

**Medios Hermanos:** *se consideran medios hermanos a aquellos individuos que comparten uno de los progenitores (masculino o femenino).*

## ■ BIBLIOGRAFÍA

- Austerlitz F., Smouse P.E. (2001) Two-generation analysis of pollen flow across a landscape. II. Relation between FFT, pollen dispersal and interfemale distance. *Genetics* 157: 851–857.
- Besega C., Pometti C.L., Ewens M., Saidman B.O., Vilardi J.C. (2011) Strategies for conservation for disturbed *Prosopis alba* (Leguminosae, Mimosoidae) forests based on mating system and pollen dispersal parameters. *Tree Genet Genomes* 8: 277–288.
- Burkart A., (1976). A monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae subfam. Mimosoidae). *Journal. Arnold Arboretum* 57: 219-249.
- Cascante A., Quesada M., Lobo J.J., Fuchs E.A. (2002) Effects of dry forest fragmentation on the reproductive success and genetic structure of the tree *Samanea saman*. *Conservation Biology* 16: 137–147.
- Cialdella A.M. 1984. El género *Acacia* (Leguminosae) en la Argentina. *Darwiniana*, 25: 59-111, f. 1-8.
- Cialdella A.M. (1997) *Acacia*. En Hunziker, A.T. (ed.). *Flora Fanerogámica Argentina* 35: 3-21.
- Fernández O.A., Busso C.A. (1997) Arid and semi-arid rangelands: two thirds of Argentina. *RALA Report*: 200.

- Guillot G., Mortier F., Estoup A. (2005) GENELAND: a computer package for landscape genetics. *Molecular Ecology Notes* 5, 712–715.
- Guinet P., Vassal J. (1978) Hypotheses on the differentiation of the major groups in the genus *Acacia* (Leguminosae). *Kew Bulletin*, 32: 509-527.
- Gutiérrez J., Armesto J. J. (1981) El rol del ganado en la dispersión de *Acacia caven* (Leguminosae). Santiago, Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, 8: 3-8.
- Hamrick J.L. (2004) Response of forest tree to global environmental changes. *Forest Ecol and Manag.* 197: 323–335.
- Hamrick J.L., Godt M.J.W. (1996) Conservation genetics of endemic plant species. In: Avise J.C., Hamrick J.L. (eds) *Conservation genetics*. Chapman & Hall, New York, pp 281–304.
- Hardy, G. H. (1908) Mendelian proportions in a mixed population. *Science* 28: 49–50.
- Jump AS, Penuelas J (2006) Genetic effects of chronic hábitat fragmentation in a wind-pollinated tree. *Proc Natl Acad Sci USA* 103: 8096–8100.
- Karlin O.U., Coirini R.O., Catalan L., Zapata R. (1997) *Acacia caven*. En: Oficina Regional de la FAO para América Latina y El Caribe (eds). *Especies arbóreas y arbustivas para las zonas áridas y semiáridas de América Latina*. Pág. 159-165. Zonas áridas y Semiáridas, 12. FAO/PNU-MA, Santiago. Chile.
- Kramer A.T., Ison J.L., Ashley M.V., Howe H.F. (2008) The paradox of forest fragmentation genetics. *Conserv Biol* 22: 878–885.
- Mendel G. (1866) Versuche über Pflanzenhybriden. *Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn*, Bd. IV für das Jahr 1865, *Abhandlungen*, 3–47.
- Nybom H. (2004) Comparison of different nuclear DNA markers for estimating intraspecific genetic diversity in plants. *Molec Ecol* 13: 1143–1155. doi:10.1111/j.1365-294X.2004.02141.x
- Pometti C.L., Pizzo B., Brunetti M., Macchioni N., Ewens M., Saidman B.O. (2009) Argentinean native wood species: physical and mechanical characterization of some *Prosopis* species and *Acacia aroma* (Leguminosae; Mimosoideae). *Bioresour Technol* 100:1999–2004.
- Pometti C.L., Palanti S., Pizzo B., Charpentier J.P., Boizot N., Resio C. Saidman B.O. (2010) Durability of five native Argentine wood species of the genera *Prosopis* and *Acacia* decayed by rot fungi and its relationship with extractive content. *Biodegradation* 21: 753–760.
- Pometti C., Vilardi J.C., Saidman B.O. (2011) Mating system parameters and genetic structure in Argentinean populations of *Acacia caven* (Leguminosae, Mimosoideae). *Plant Systematics and Evolution*, 292: 25-32, DOI: 10.1007/s00606-010-0389-8.
- Pometti C.L., Bessega C.F., Vilardi J.C., Saidman B.O. (2012) Landscape genetic structure of natural populations of *Acacia caven* in Argentina. *Tree Genetics & Genomes*, Vol. 8, 911-924, DOI 10.1007/s11295-012-0479-6.
- Pometti C.L., Bessega C.F., Vilardi J.C., Saidman B.O. (2013) Comparison of mating system parameters and genetic structure in three natural scenarios of *Acacia visco* (Leguminosae, Mimosoideae). *Plant Systematics and Evolution*, 299: 761-771.
- Pometti C.L., Bessega C.F., Vilardi J.C., Ewens M., Saidman B.O. (2016) Genetic variation in natural populations of *Acacia visco* (Fabaceae) belonging to two sub-regions of Argentina using AFLP. *Plant Systematics and Evolution*, DOI 10.1007/s00606-016-1306-6.
- Pritchard J. K., Wen X., Falush D. (2009) STRUCTURE ver. 2.3. University of Chicago, Chicago, USA. <http://pritch.bsd.uchicago.edu/>
- Ritland K (2002) Extensions of models for the estimation of mating systems using an independent loci. *Heredity* 88: 221–228.
- Robledo-Arnuncio J.J., Austerlitz F., Smouse P.E. (2006) A new indirect method of estimating the pollen dispersal curve, independently of effective density. *Genetics* 173: 1033–1045.
- Robledo-Arnuncio J.J., Austerlitz F., Smouse P.E. (2007) POLDISP: a software package for indirect estimation of contemporary pollen dispersal. *Mol Ecol Notes* 7:763–766.
- Ross J.H. (1981) An analysis of the African *Acacia* species: their distribution, possible origins and relationships. *Bothalia*, 3 y 4: 389-413.
- Sebben A.M. (2006) Sistema de reproducción en especies arbóreas tropicales e suas implicancacoes para la selecao de arvores matrizadas para reforestamentos am-

- bientais. In: Higa AR, Silva LD (eds) Pomares de sementes en especies forestais nativas. FUPEF, Curitiba, Brasil, pp 93–138.
- Sork V.L., Smouse P.E. (2006) Genetic analysis of landscape connectivity in tree populations. *Landscape Ecol* 21: 821–836.
- Tortorelli L.A. (1956) Maderas y Bosques Argentinos. ACME, Buenos Aires VII-XXVII, 1-910.
- Weinberg W. (1908) On the detection of heredity in man (German). *Jahreshefte des Vereins für Vaterländische Naturkunde in Württemberg* 64: 368–382.