

# Especiación ecológica y el rol de la hibridación y la poliploidización en la divergencia de Cupresáceas de Patagonia

Doctoranda: Lic. Dayana Diaz

Directora: Dra. Paula Mathiasen

Co-directora: Dra. Andrea Premoli

Universidad Nacional del Comahue

Año: 2026

## Resumen

La heterogeneidad ambiental y los gradientes físicos impulsan la diferenciación genética y la adaptación local, procesos evolutivos que pueden conducir a la divergencia intra e interespecífica y, eventualmente, a la especiación y que dejan huellas detectables en el genoma de especies longevas. En este sentido, los paisajes complejos y diversos de la Patagonia argentina constituyen un escenario natural ideal, ya que sus marcadas diferencias climáticas y edáficas ejercen distintas presiones de selección sobre las poblaciones de árboles. Por ello, investigar la divergencia adaptativa en especies leñosas nativas como las Cupresáceas es esencial para comprender cómo la biodiversidad evoluciona y persiste en entornos heterogéneos.

La presente investigación se centra en dos especies endémicas de la Patagonia: *Fitzroya cupressoides* (alerce) y *Pilgerodendron uviferum* (ciprés de las Guaitecas), de acá en más mencionadas como *Fitzroya* y *Pilgerodendron*. Estas coníferas longevas y relictas comparten el mismo tipo de polen y coexisten en determinadas zonas de los bosques templados de Sudamérica. En este contexto, se destaca la importancia de investigar fenómenos como la hibridación interespecífica y la poliploidía, esta última, una condición genética rara en gimnospermas, pero presente en *Fitzroya*, que es tetraploide, generan variabilidad genética y resiliencia ante la constante amenaza del cambio climático y las actividades humanas.

Al evaluar la estructura genética mediante secuenciación de nueva generación que permite analizar a nivel genómico señales neutrales producto de procesos aleatorios sobre el genoma como el aislamiento y la deriva genética y, por otro lado, las adaptativas que resultan de la influencia de la selección natural, se encontraron respuestas evolutivas contrastantes en *Fitzroya* y *Pilgerodendron*. Mientras que los marcadores neutrales reflejan principalmente la historia demográfica y el aislamiento por distancia, ambas especies sufrieron marcados declives poblacionales históricos; sin embargo, *Fitzroya* muestra una retracción continua desde hace unos 2000 años, mientras que *Pilgerodendron* experimentó un cuello de botella hace unos 6000 años seguido de una recuperación. Al

analizar los marcadores adaptativos, se comprobó que la selección natural ha moldeado la variación genómica en respuesta a gradientes ambientales, aunque de manera distinta: en *Pilgerodendron*, la alta fragmentación de su hábitat acentuó la divergencia adaptativa vinculada a la temperatura invernal y la estacionalidad de las precipitaciones, mientras que en *Fitzroya*, la señal adaptativa fue más débil, lo cual se atribuye a que su extrema longevidad, pudiendo alcanzar más de 3000 años, su rango acotado y su genoma tetraploide amortiguan las respuestas genéticas frente a los cambios climáticos recientes. La diversidad genómica resultó mayor en la poliploide *Fitzroya* que en la diploide *Pilgerodendron* tanto en marcadores de polimorfismo único (SNPs) neutrales ( $HE = 0.288$  vs.  $0.073$ ) como adaptativos. ( $HE = 0.396$  vs.  $0.176$ ). El resultado para SNP neutrales es similar a lo indicado en estudios previos usando marcadores moleculares neutrales; mientras que los SNP adaptativos no solamente mostraron índices de diversidad consistentemente más altos que los neutrales en ambas especies sino también una estructura significativa. Esto indicaría que la selección natural ha contribuido de manera significativa a estructurar la variación genómica en relación con entornos heterogéneos a pesar del alto potencial de flujo génico característico de las coníferas longevas, que no ha sido suficiente para eliminar las señales de adaptación local

A pesar de hallazgos morfológicos y genéticos previos que sugerían la presencia de híbridos, los múltiples análisis genómicos en zonas de contacto evidenciaron una diferenciación profunda y efectiva entre *Fitzroya* y *Pilgerodendron* como así también con *Austrocedrus chilensis* de acá en más mencionada como *Austrocedrus*. Las tres especies representan géneros monotípicos de Cupresáceas de Patagonia. La total ausencia de genotipos intermedios demuestra la existencia de fuertes barreras reproductivas, probablemente sostenidas por asincronías en la producción de conos e incompatibilidades genómicas severas dadas por las diferencias en la ploidía. No obstante, se detectó que cerca de un 7 % del genoma se comparte entre los linajes en loci que regulan funciones biológicas fundamentales, sugiriendo la retención de alelos ancestrales esenciales para la supervivencia en la Patagonia. Esta arquitectura genómica se refleja también en el tamaño del genoma (valor C), donde se confirmaron diferencias marcadas: *Austrocedrus* y *Pilgerodendron*, ambos diploides, presentaron tamaños típicos de 18,3 pg y 27,3 pg, respectivamente, mientras que el de *Fitzroya* duplicó estos valores alcanzando los 34,8 pg. En *Fitzroya*, el tamaño genómico mostró una asociación significativa con la estacionalidad de las precipitaciones, lo que sugiere que su redundancia genómica le otorga una plasticidad necesaria para acoplar su arquitectura celular a las fluctuaciones hídricas extremas.

Finalmente, el modelado de nicho ecológico proyectado hacia el pasado, presente y futuro confirmó que *Fitzroya* y *Pilgerodendron* ocupan nichos climáticos muy diferenciados. Mientras *Fitzroya* es una especie especialista que requiere humedad constante, *Pilgerodendron* es capaz de tolerar un rango ambiental más amplio. En el caso particular de *Pilgerodendron*, se encontró una marcada diferenciación ecológica latitudinal que presentan nichos ambientales distintos y refuerza la idea de que podrían constituir unidades evolutivas diferentes. Las proyecciones hacia finales del siglo XXI bajo escenarios de altas emisiones pronostican un futuro alarmante, donde *Fitzroya* sufriría una contracción drástica de hasta el 67 % de su hábitat adecuado. Por el contrario, *Pilgerodendron* parece mostrar una mayor resiliencia en los escenarios futuros, con una relativa estabilidad en su distribución potencial y la posibilidad de expandirse hacia nuevas áreas climáticamente adecuadas en el sur.

Al integrar estas líneas de evidencia, se confirma que la diferenciación ecológica fue el verdadero motor evolutivo de estos linajes. Dado que la altísima especialización de estas coníferas representa hoy su mayor vulnerabilidad y, en áreas sujetas a impactos cada vez más frecuentes, como los incendios, las estrategias de conservación no solo deben proteger reservas geográficas, sino también incluir la conservación *ex situ* y la migración asistida para resguardar las variantes genéticas adaptativas cruciales para su persistencia. Además de medidas de conservación *in situ*, dentro y fuera de áreas protegidas, consideramos que sería necesario recolectar semillas de un gran número de poblaciones y producir banco de plántulas y/o mediante esquejes controlando por genotipo con fines de restauración ya que se trata de especies de lento crecimiento pero que se propagan vegetativamente de manera natural.