

El cambio climático y la conservación de *Araucaria angustifolia* en Brasil

M. Silveira Wrege, R.C.V. Higa, R. Miranda Britez, M. Cordeiro Garrastazu, V.A. de Sousa, P.H. Caramori, B. Radin y H.J. Braga

La cartografía de la vulnerabilidad climática permite predecir las zonas donde el cambio climático tendrá repercusiones drásticas en determinadas especies o poblaciones de árboles, y asignar a éstas un lugar prioritario en las actividades de conservación.

El bosque mixto ombrófilo (tolerante a precipitaciones intensas) en Brasil meridional, que ostenta un dosel en el que predomina el pino Paraná (*Araucaria angustifolia*), se conoce también como bosque de araucaria (Veloso, Rangel Filho y Lima, 1991). La composición de la vegetación de este bosque varía sin embargo significativamente en función de la latitud, la altitud, el suelo y el microclima (Reitz y Klein, 1966). Este tipo de bosque se encuentra solo en el neotrópico y es típico de la altiplanicie meridional.

Los bosques de *Araucaria angustifolia* están hoy sometidos a grandes presiones debido a que se localizan por lo general en zonas densamente pobladas. Los cambios en el clima, recientes o pronosticados, conllevarán probablemente nuevas dificultades para la supervivencia de estas poblaciones arbóreas. El presente artículo describe el origen del bosque de araucaria y esboza las modificaciones sufridas por el bosque a lo largo del cenozoico —la era geológica más reciente y aún no conclusa— de resultados del cambio climático. Se ponen de relieve algunas de las insuficiencias de la moderna cartografía de la vulnerabilidad climática respecto a las poblaciones descritas, así como la importancia de mantener su variabilidad genética y de permitir su adaptación a un clima cambiante, y, en consecuencia, su conservación.

ACERCA DEL BOSQUE DE ARAUCARIA Y A. ANGUSTIFOLIA

En Brasil, los bosques de araucaria están al sur del trópico de Capricornio, entre altitudes comprendidas entre 50 y 1 800 m, y más frecuentemente entre 500 y 1 200 m, y se encuentran rodeados de bosque subtropical húmedo. También existen poblaciones fragmentadas de *A. angustifolia* en

Argentina nororiental y Brasil sudoriental (Hueck, 1953). El bosque de araucaria cubre una superficie de 177 600 km² en Brasil (Leite y Klein, 1990) y de 2 100 km² en Argentina (Giraud et al., 2003).

La presencia de *A. angustifolia* en Brasil se debe a la deriva continental, que ha ocasionado la dispersión de los ancestros de la araucaria y de otros individuos vegetales. Los fósiles de araucaria se encuentran distribuidos en todo el mundo, pero las especies supervivientes solo están en Australia (siete especies) y América del Sur (dos especies). Esto explica que sea incierta la región de Brasil meridional de la que es oriunda *A. angustifolia*. La elevación de la plataforma continental durante el pleistoceno tardío (una época geológica que comienza hace 1,8 millones de años y finaliza 10 000 años antes del presente), hasta alcanzar altitudes que permitieron que el clima lluvioso fuese idóneo para *A. angustifolia*, determinó la formación, en esta latitud, de un núcleo ombrófilo o población fundadora. A causa de fenómenos geológicos ulteriores, este núcleo registró expansiones y contracciones a lo largo del tiempo, llegando, durante su fase de expansión máxima, al nororiente de Brasil (Veloso, Rangel Filho y Lima, 1991; Leite, 1994).

Araucaria angustifolia crece de forma natural en muchos tipos de suelos: desde los poco profundos hasta los profundos, y desde los húmedos hasta los adecuadamente drenados. La presencia de escarcha permite a la especie, en las elevadas altitudes donde prospera, manifestar un comportamiento que le confiere superioridad respecto a otros árboles con los que compete; es esta una de las principales características medioambientales que determinan su distribución y por ende su susceptibilidad al cambio climático.

La especie ha sido explotada abundan-

Marcos Silveira Wrege, Rosana Clara Victoria Higa, Marilice Cordeiro Garrastazu y Valderês Aparecida de Sousa trabajan en Embrapa Florestas, dependencia forestal de la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA), Colombo (Brasil). **Ricardo Miranda Britez** trabaja en la Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental (Sociedad de Investigación en Vida Silvestre y Educación Ambiental, SPVS), Curitiba (Brasil). **Paulo Henrique Caramori** trabaja en el Instituto Agrônomo do Paraná (Instituto Agronómico de Paraná, IAPAR), Londrina (Brasil). **Bernadete Radin** trabaja en la Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (Fundación Estatal de Investigaciones Agropecuarias, FEPAGRO), Porto Alegre (Brasil). **Hugo José Braga** trabaja en el Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia (Centro de Informaciones sobre Recursos Ambientales e Hidrometeorología, EPAGRI/CIRAM), Florianópolis (Brasil).



Araucaria angustifolia domina el dosel del bosque en el valle de Itaimbezinho, estado de Rio Grande do Sul (Brasil)

temente por su madera, y la expansión agrícola ha reducido también la superficie ocupada por los bosques de araucaria. Pese a que hoy en día *A. angustifolia* es una especie protegida y la cosecha de su madera en Brasil está prohibida por la ley, las áreas de distribución natural que aún quedan están fragmentadas y son dispersas, y las grandes poblaciones remanentes son escasas. La situación de conservación de este tipo de bosque es considerada crítica. Además, la distribución etaria de las poblaciones remanentes está sesgada hacia las clases más viejas.

UNA HISTORIA QUE SE ENTRETEJE CON EL CAMBIO CLIMÁTICO

Los estudios paleontológicos han intentado correlacionar, en la altiplanicie meridional de Brasil, el clima pasado con la vegetación actual, partiendo del supuesto de que la distribución y composición de la vegetación ha sido sufriendo la influencia de tres o cuatro períodos de fluctuaciones climáticas severas durante el cenozoico. Han tenido lugar dos períodos secos: un episodio de sequía drástica durante el pleistoceno, y uno más clemente durante el holoceno subsiguiente (que comenzó 10 000 años antes del presente) (Klein, 1984).

Durante el período seco y frío que precedió a la última glaciación máxima, hace 50 000 años, los pastos y arbustos dominaban la vegetación, mientras que los bosques se encontraban tan sólo en refugios formados por valles profundos (Ledru *et al.*, 1996). Entre 45 000 y 33 000 años antes del presente, la humedad aumentó, y existen indicios de la existencia de

A. angustifolia, *Drymis brasiliensis* y *Cyathea* sp. Los bosques ombrófilos no crecían en la altiplanicie, sino que solo había poblaciones pequeñas en áreas refugio más húmedas de pendientes costeras y valles de ríos (Ledru *et al.*, 1994). Es posible que, entre 17 000 y 8 500 años antes del presente, la región haya experimentado una serie de fluctuaciones climáticas dominadas por tiempo frío y húmedo, interrumpidas, entre 13 000 y 11 000 años antes del presente, por un período más húmedo. Alrededor de 8 500 años antes del presente, con unas temperaturas que seguían siendo bajas, pero gracias al retorno progresivo de la humedad, la presencia de *Araucaria*, asociada con especies de los géneros *Symplocos*, *Drimys*, *Lithraea*, *Podocarpus*, *Myrsine* y *Alchornea*, fue más abundante, (Ledru, 1993).

Las condiciones de humedad que se observan en la actualidad volvieron a manifestarse desde alrededor de 4 300 años antes del presente (Behling, 2005). A medida que el clima se volvía con regularidad más húmedo, el bosque de araucaria se expandió, llegando, tal como había sucedido en épocas anteriores, a los pastizales subtropicales de altitudes más elevadas. El bosque ombrófilo se ha expandido considerablemente durante los últimos 1 000 años en el estado de Pará, y durante los últimos 1 500 años en el de Santa Catarina.

CARTOGRAFÍA DE LA VULNERABILIDAD CLIMÁTICA

En el presente estudio se utilizaron dos modelos para predecir las diferentes hipótesis del impacto del cambio climático en la distribución de *A. angustifolia*.

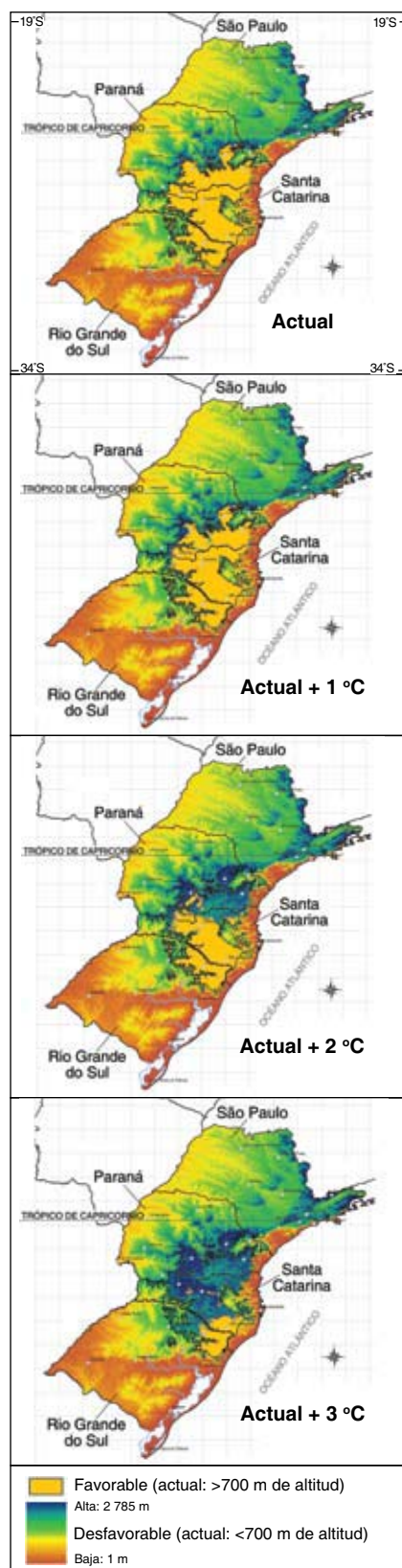
Primeramente, para determinar la gama de condiciones climáticas favorables para

el desarrollo de *A. angustifolia*, se utilizó un modelo de envoltura basado en una serie climática de 30 años de la región de Brasil meridional. La cartografía de vulnerabilidad climática permitió predecir el efecto de unos aumentos de temperatura de 1°, 2° y 3 °C en la distribución natural actual de *A. angustifolia*. Los mapas se basaron en una regresión lineal de latitud, longitud y altitud relativa a las zonas potencialmente idóneas para las especies, con arreglo a las hipótesis formuladas. Los mapas predicen una reducción significativa de la superficie idónea para la especie, lo que indica que, cuando la temperatura registra un aumento de 3 °C, solo una pequeña parte de la altiplanicie más alta de Brasil meridional sería favorable para el desarrollo de la especie (Figura 1).

En segundo lugar, se utilizó un modelo de circulación regional, diseñado por el Instituto Brasileño de Investigaciones Espaciales (INEP), para generar las hipótesis referidas a los años 2010, 2030 y 2050, que se basan en cambios de la circulación atmosférica según pronósticos del IPCC (2007). Para cartografiar las zonas idóneas para *A. angustifolia* se utilizaron datos de temperatura. Los mapas se diseñaron con arreglo al programa de geolaboración ArcGIS9. Como en el caso del primer modelo, la correlación entre temperatura y latitud, y entre longitud y altitud se realizó por regresión lineal. El pronóstico arrojado por esta segunda simulación indicó una reducción menor del área de distribución de la especie (Figura 2).

VARIACIÓN GENÉTICA Y CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

Para el diseño de los programas de conservación, es importante comprender qué



factores pueden afectar a la distribución pasada y presente de una especie. Las respuestas de las especies arbóreas al cambio ambiental son complejas. Su supervivencia dependerá en último término de las pautas de diseminación y de su capacidad de

reproducción. La vulnerabilidad se suele manifestar a través de cambios en la floración y germinación de semillas, merma de la regeneración y tasas reducidas de crecimiento, y puede a menudo verse agravada por efectos perturbadores tales como el fuego y los insectos y la presencia de una vegetación competidora o exótica (introducida). La interacción entre los diferentes factores de estrés no es fácil de predecir. En el caso de *A. angustifolia*, los factores estresantes principales son el déficit hídrico y las altas temperaturas.

La variabilidad genética de las características de adaptación es necesaria para que una especie o una población de árboles puedan soportar las condiciones ambientales adversas. El mantenimiento de la diversidad genética determina por tanto la capacidad de adaptación a un entorno nuevo. La genética molecular aplicada al estudio de la variabilidad de las poblaciones permite actualmente comprender mejor la situación de diversidad genética de las principales especies y poblaciones de árboles. En el caso de *A. angustifolia*, la variación genética existe tanto entre poblaciones (Kageyama y Jacob, 1980; Shimizu e Higa, 1980; de Sousa, 2000) como dentro de las distintas poblaciones (de Sousa, 2000; de Sousa *et al.*, 2005; Stefenon, Gailing y Finkeldey, 2008). La diseminación es limitada, pero la zona de dispersión del polen es amplia (Bittencourt y Sebbenn, 2007). Aunque se ha informado que, en la mayor parte de las zonas estudiadas, la regeneración natural de las especies de *Araucaria* ha sido escasa, se considera que los niveles de diversidad registrados en las áreas de regeneración son suficientes para asegurar la supervivencia futura de la especie (de Sousa *et al.*, 2005; Stefenon, Gailing y Finkeldey, 2008).

Dado que el ciclo vital de los árboles es comparativamente más largo, el proceso de adaptación a condiciones ambientales cambiantes será probablemente más lento que el ritmo pronosticado del cambio climático mundial (Hamrick, 2004). Se espera que la mayor parte de los efectos genéticos negativos causados por la decadencia y la fragmentación de las poblaciones recién se habrán manifestado al cabo de varias generaciones de árboles (de Sousa, 2000).

CONCLUSIONES

La variación genética es indispensable para la adaptación de las especies y poblaciones de árboles a los cambios ambientales, y es asimismo la condición previa de la conservación. Solo será posible implantar unas estrategias más eficientes de conservación, ya sean éstas *in situ* o *ex situ*, si éstas se fundan en el conocimiento de los requisitos ambientales y en las pautas de variabilidad de las especies y tipos de bosque objetivo, en combinación con las hipótesis de los cambios climáticos futuros.

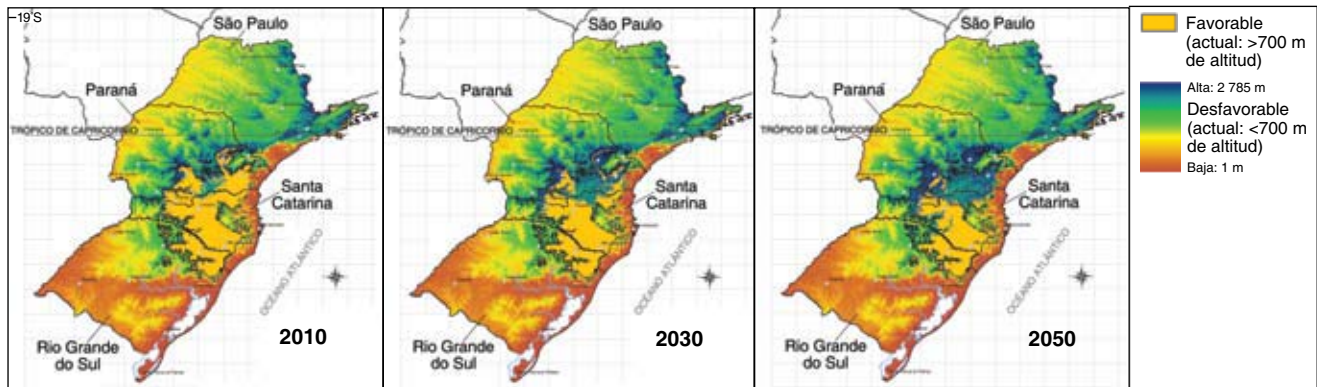
Gracias a la cartografía de la vulnerabilidad es posible predecir en qué zonas y en qué especies o poblaciones de árboles se harán sentir más drásticamente los efectos del cambio climático, y ello permitirá asignarles un lugar prioritario en las actividades de recolección de germoplasma y de conservación genética *ex situ*. Con el objeto de afinar el trazado de mapas futuros, conviene eso sí hacer uso de un número mayor de variables climáticas y de diferentes modelos climáticos.

Los programas de conservación de *Araucaria* podrían ser robustecidos si se coteja la información sobre variabilidad genética de especies y poblaciones de árboles con los mapas climáticos. Para predecir con mayor precisión la respuesta de las especies al cambio climático, se necesitará realizar programas de seguimiento específicos y llevar a cabo investigaciones más acuciosas de fisiología fundamental. ♦



Bibliografía

- Behling, H. 2005. Late quaternary vegetation dynamics in southern and southeastern Brazil with a special focus on the *Araucaria* forests. En *Resumos do 56º Congresso Nacional de Botânica*. Curitiba, Brasil, Congresso Nacional de Botânica.
- Bittencourt, J.V.M. y Sebbenn, A.M. 2007. Patterns of pollen and seed dispersal in a small, fragmented population of the wind-pollinated tree *Araucaria angustifolia* in southern Brazil. *Heredity*, 99: 580–591.
- de Sousa, V.A. 2000. *Population genetic studies in Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze*. Göttingen, Alemania, Cuvillier Verlag Göttingen.
- de Sousa, V.A., Sebben, A.M., Hartmer,



2

Distribución geográfica de *Araucaria angustifolia* en Brasil meridional, con arreglo a diferentes hipótesis basadas en modelos climáticos mundiales

- H.H. Y Zihe, M. 2005. Correlated mating in populations of a dioecious Brazilian conifer, *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. *Forest Genetics*, 12(2): 107–119.
- Giraud, A.R., Povedano, H., Belgrano, M.J., Krauczuk, E., Pardiñas, U., Miquelarena, A., Ligier, D., Baldo, D. y Castellino, M. 2003. Biodiversity status of the interior Atlantic forest of Argentina. En C. Galindo-Leal y I.G. Câmara, eds. *The Atlantic forest of South America: biodiversity status, threats, and outlook*, pp. 160–180. Washington, DC, EE.UU., Island Press.
- Hamrick, J.L. 2004. Response of forest trees to global environmental changes. *Forest Ecology and Management*, 197: 323–335.
- Hueck, K. 1953. Distribuição e habitat natural do Pinheiro-do-Paraná (*Araucaria angustifolia*). *Boletim Faculdade de Filosofia, Ciencias e Letras da Universidade de Sao Paulo – Botânica*, 10: 1–24.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2007. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, Reino Unido, Cambridge University Press.
- Kageyama, P.Y. y Jacob, W.S. 1980. Variação genética entre e dentro de progênies de uma população de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. En *Forestry problems of the genus Araucaria*, pp. 83–86. Proceedings of the IUFRO Meeting on Forestry Problems of the Genus *Araucaria*, Curitiba, Brasil, 21–28 de octubre de 1979. Curitiba, Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná (FUEF).
- Klein, R.M. 1984. Aspectos dinâmicos da vegetação do sul do Brasil. *Sellowia*, 36: 5–54.
- Ledru, M.P. 1993. Late quaternary environmental and climatic changes in central Brazil. *Quaternary Research*, 39: 90–98.
- Ledru, M.P., Behling, H., Fournier, M., Martin, L. y Servant, M. 1994. Localisation de la forêt d'*Araucaria* du Brésil au cours de l'holocène – implications paléoclimatiques. *Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, Série III, Sciences de la vie*, 317: 517–521.
- Ledru, M.P., Braga, P.I.S., Soubies, F., Fournier, M., Martin, L., Suguio, K. y Tuerc, Q. 1996. The last 50,000 years in the Neotropics (southern Brazil): evolution of vegetation and climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 123: 239–257.
- Leite, P.F. 1994. *As diferentes unidades fitoecológicas da região sul do Brasil – proposta de classificação*. Tesis de licenciatura, Universidad Federal de Paraná, Curitiba, Brasil.
- Leite, P.F., Klein, R.M. 1990. Vegetação. In *Geografia do Brasil*, Vol. 2, *Região Sul*, pp. 113–150. Rio de Janeiro, Brasil, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).
- Reitz, R. y Klein, R.M. 1966. *Araucariáceas*. Itajaí, Brasil, Herbário Barbosa Rodrigues.
- Shimizu, J.Y. y Higa, A.R. 1980. Variação genética entre procedências de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. En *Forestry problems of the genus Araucaria*, pp. 78–82. Proceedings of the IUFRO Meeting on Forestry Problems of the Genus *Araucaria*, Curitiba, Brasil, 21–28 de octubre de 1979. Curitiba, FUEF.
- Stefenon, V.M., Gailing, O. y Finkeldey, R. 2008. Genetic structure of plantations and the conservation of genetic resources of Brazilian pine (*Araucaria angustifolia*). *Forest Ecology and Management*, 255: 2718–2725.
- Veloso, H.P., Rangel Filho, A.L.R. y Lima, J.C.A. 1991. *Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal*. Rio de Janeiro, Brasil, IBGE. ♦