

# Integrar disciplinas para el estudio de la respuesta adaptativa de los bosques al cambio climático

Anne-Sophie Sergent<sup>1</sup>, Guillermina Dalla-Salda<sup>2</sup>, Santiago Bellon<sup>3</sup>, Juan Pablo Diez<sup>4</sup>,  
María Elena Fernández<sup>5</sup>, Nicolas Martin-StPaul<sup>6</sup>, Annabel Porté<sup>7</sup>, Cyrille Rathgeber<sup>8</sup>,  
Philippe Rozenberg<sup>9</sup>, Alejandro Martinez-Meier<sup>10</sup>

**Palabras claves:** interdisciplinariedad, mortalidad, bosques Andino-Patagónicos

## Cambio climático, decaimiento y bosques del norte de la Patagonia andina

El cambio climático representa una amenaza creciente para la mayoría de los bosques alrededor del mundo (Anderegg et al. 2022). Eventos de decaimiento y de mortalidad de los bosques asociados con procesos fisiológicos de estrés como consecuencia de elevadas temperaturas y/o déficit hídrico (Senf et al. 2020; Hammond et al. 2022) han sido ampliamente registrados estos últimos años al nivel mundial (Allen et al. 2010; Anderegg et al. 2016; Hartmann et al. 2018). Dichos reportes indican que no existe tipo forestal o zona climática que no sea vulnerable al cambio climático, inclusive en ambientes no considerados limitantes desde el punto de vista hídrico para el crecimiento de los árboles. La capacidad de respuesta de los bosques a la sequía está siendo llevada hacia sus límites de aclimatación (Choat et al. 2012; Forzieri et al. 2022), afectando la provisión de servicios ecosistémicos y exacerbando la pérdida de biodiversidad y las perturbaciones como los incendios (Carnicer et al. 2011; Seidl et al. 2017).

En la región de los bosques andino-patagónicos existen numerosas evidencias de decaimiento en especies emblemáticas de los bosques de montaña. Tanto Mundo et al. (2010) como El Mujtar et al. (2012) demostraron que existe en el ciprés de la cordillera (*Aus-*

*trocedrus chilensis*) una disminución del crecimiento, producto de eventos climáticos extremos de sequía. Suarez et al. (2004) reportaron la mortalidad del coihue (*Nothofagus dombeyi*), mientras que en lenga (*N. pumilio*), recientes estudios revelan procesos de decaimiento seguido de muerte (Rodríguez-Catón et al. 2019) como consecuencia de sucesivos eventos climáticos de estrés hídrico. El pewen (*Araucaria araucana*) se suma a la lista de especies que han mostrado signos de decaimiento a través de un amarronamiento y desecación inusual del follaje (Velez et al. 2018). Sequías y olas de calor como las ocurridas estos últimos años, se constituyen, por lo tanto, en un componente de cambio rápido y direccional hacia nuevas condiciones climáticas, las cuales afectan la sobrevivencia de los bosques. Villalba et al. (2012) brindan evidencias sobre los cambios observados en el clima en el hemisferio sur en las últimas décadas. Resaltan que la disminución de las precipitaciones en Patagonia norte generaría un impacto negativo con serias consecuencias a escala regional para los bosques de la región. En este contexto, el objetivo general de esta ponencia es presentar cómo la integración de distintas disciplinas puede contribuir a dilucidar el potencial de adaptación de los bosques y los riesgos de mortalidad asociados al cambio climático, tomando como caso de estudio el ciprés de la cordillera.

1 IFAB (INTA-CONICET), EEA Bariloche, Grupo de Ecología Forestal, Bariloche, Argentina. Laboratorio Internacional Asociado (LIA) FORESTIA, INTA - INRAE - UNAH. Contacto: sergent.annesophie@inta.gob.ar

2 INTA EEA Bariloche, - Laboratorio de Ecología, Ecofisiología y Madera (LEEMA), Bariloche, Argentina. IFAB (INTA-CONICET), EEA Bariloche, Grupo de Ecología Forestal, Bariloche, Argentina. Laboratorio Internacional Asociado (LIA) FORESTIA, INTA - INRAE - UNAH.

3 IFAB (INTA-CONICET), EEA Bariloche, Grupo de Ecología Forestal, Bariloche, Argentina. Laboratorio Internacional Asociado (LIA) FORESTIA, INTA - INRAE - UNAH.

4 INTA EEA Bariloche, - Laboratorio de Ecología, Ecofisiología y Madera (LEEMA), Bariloche, Argentina. IFAB (INTA-CONICET), EEA Bariloche, Grupo de Ecología Forestal, Bariloche, Argentina. Laboratorio Internacional Asociado (LIA) FORESTIA, INTA - INRAE - UNAH.

5 IPADS (INTA-CONICET), Grupo Forestal, Tandil, Argentina. Laboratorio Internacional Asociado (LIA) FORESTIA, INTA - INRAE - UNAH.

6 INRAE, URFM, Avignon, Francia. Laboratorio Internacional Asociado (LIA) FORESTIA, INTA - INRAE - UNAH.

7 INRAE - Univ. Bordeaux, UMR BIOGECO, Cestas, Francia. Laboratorio Internacional Asociado (LIA) FORESTIA, INTA - INRAE - UNAH.

8 INRAE - Univ. de Lorraine - AgroParis Tech, UMR Silva Nancy, Francia.

9 INRAE-ONF, UMR BioForA, Orléans, Francia. Laboratorio Internacional Asociado (LIA) FORESTIA, INTA - INRAE - UNAH.

10 INTA EEA Bariloche, - Laboratorio de Ecología, Ecofisiología y Madera (LEEMA), Bariloche, Argentina. IFAB (INTA-CONICET), EEA Bariloche, Grupo de Ecología Forestal, Bariloche, Argentina. 8Laboratorio Internacional Asociado (LIA) FORESTIA, INTA - INRAE - UNAH.

### De las diferencias estadísticas a la comprensión de los mecanismos implicados en la adaptabilidad de los árboles: el aporte del estudio de la madera

Durante los últimos años, la comunidad científica realizó un importante esfuerzo para conceptualizar los procesos y conocer los mecanismos de mortalidad inducidos por eventos de sequías y olas de calor (McDowell et al. 2008 y 2022; Choat et al. 2018). El concepto propuesto se basa en dos mecanismos fisiológicos no exclusivos y probablemente interdependientes: la falta de carbono y la falla hidráulica. Entre los mecanismos involucrados en la mortalidad de árboles, los procesos hidráulicos parecen jugar un papel clave (Brodrribb et al. 2010; Adams et al. 2017).

Ciertas propiedades de la madera emergentes de sus características anatómicas se relacionan con las propiedades hidráulicas del xilema. Dilucidar estas relaciones permite inferir respecto de su rol funcional al mismo tiempo que indagar cuáles son los mecanismos que los árboles disponen para hacer frente a condiciones climáticas adversas. Para ello es preciso conocer las características diferenciales de los elementos de conducción (vasos o traqueidas), así como de otros tipos celulares, implicados en la eficiencia de conducción de agua y en la seguridad del sistema ante la cavitación o ruptura de la columna de agua.

Por otro lado, la fenología de formación de la madera y el monitoreo del crecimiento mediante instrumentos de alta resolución, como los dendrómetros automáticos, permiten comprender cómo es afectado el crecimiento de los árboles y la anatomía de la madera por las variaciones de la disponibilidad de agua a lo largo de la estación de crecimiento. La xilogénesis aborda el estudio de la relación específica entre el crecimiento y la formación de la madera de los árboles y el clima. Permite determinar como el déficit hídrico afecta el proceso de división celular, crecimiento y deposición de elementos constitutivos de las paredes celular. Los dendrómetros posibilitan monitorear el crecimiento de los árboles a una alta resolución temporal. Ambas aproximaciones de estudio permiten identificar eventos de sequía y calor que más influyen sobre el crecimiento de los árboles, identificar si las respuestas están sincronizadas, asociadas a las variaciones del clima de la estación de crecimiento o si las condiciones de micro-sitio juegan un rol mayor que el clima a escala regional (Deslauriers et al. 2007).

La mayor parte de nuestra comprensión actual sobre la variabilidad y la interacción de estos mecanismos proviene de estudios a nivel inter-específico. Mayores

esfuerzos deben ser focalizados hacia la caracterización de la variación intra-específica. Nuevos métodos, directos e indirectos como la utilización de la espectroscopia en el infrarrojo cercano (NIRs, de su sigla en inglés Near Infrared spectroscopy) o los perfiles de microdensidad, se presentan como proxys que alientan la posibilidad de incrementar la capacidad de fenotipado. Esto brinda la posibilidad de realizar estimaciones precisas y confiables de los componentes de la varianza intra-específica, así como de parámetros genéticos para la evaluación y selección de individuos con características deseables.

**Avances logrados:** valor funcional de la madera del ciprés y su relación con la capacidad de sobrevivencia a condiciones desfavorables de crecimiento

Diferencias significativas en caracteres que describen la arquitectura foliar (regulación de las pérdidas de agua) y la resistencia a la cavitación en poblaciones naturales de ciprés de la cordillera (Sergent et al. 2020a, b) demuestran que existe un potencial de aclimatación a las condiciones ambientales actuales. La variación de la resistencia a la cavitación a nivel intra-poblacional es relativamente alta respecto del punto de pérdida de turgencia y el cierre estomático (Sergent et al 2017). Esto determina un margen de seguridad hidráulica variable entre poblaciones como así también intra-poblacional. Individuos con baja densidad de la madera disponen de un xilema altamente eficiente en la conducción de agua y mayor resistencia a la cavitación (Sergent et al 2018), contrariamente a lo generalmente postulado en otras especies. El crecimiento está positivamente relacionado con la resistencia a la cavitación en esta especie, lo que nos permite plantear como hipótesis respecto de las diferencias significativas establecidas entre árboles vivos y muertos en un mismo rodal (Sergent et al 2013), que la densidad de la madera de la porción conductiva del xilema es un carácter de valor funcional, relevante para su capacidad de sobrevivencia a eventos climáticos extremos como los ocurridos estos últimos años en la Patagonia. La existencia de variación genética significativa para caracteres involucrados en la resistencia a la sequía demuestra que sería posible la adaptación natural y/o con intervención humana en el ciprés de la cordillera.

## Integraciones de disciplinas hacia la modelización del riesgo de mortalidad asociado a las sequías

Las diferentes herramientas metodológicas y disciplinas presentadas (ecofisiología, xilogénesis, anatomía de la madera, dendro-ecología, estudios de la madera) permiten generar información para el desarrollo y validación de modelos funcionales (Sperry et al. 2019; Cochard et al. 2021). De manera particular, los modelos hidráulicos, como por ejemplo SurEau, que se aplica a nivel de planta (Cochard et al. 2021) o a nivel de rodal (Sureau ecos, Ruffault et al. 2022) permiten modelizar el riesgo de mortalidad actual y futuro. Se simulan los flujos de agua de la planta desde el suelo a la atmósfera, así como la dinámica del contenido de agua de la planta y los procesos de cavitación considerando las variaciones climáticas y las condiciones edáficas. La selección de rasgos de resistencia a la sequía y/o la selección de condiciones de sitio y de rodal contribuyen de manera significativa a reducir los riesgos de mortalidad. Su parametrización y validación en desarrollo para el caso del ciprés de la cordillera constituyen una herramienta para la toma de decisiones, permitiendo diseñar programas de conservación y uso in situ o ex situ, desafíos mayores a los que se enfrentan los tomadores de decisión ante los nuevos escenarios climáticos que afronta la región andino-patagónica.

## Bibliografía

- Adams HD, Zeppel MJB, Anderegg WRL, et al. 2017. A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nat Ecol Evol* 1: 1285–91.
- Allen CD, Macalady AK, Chenchouni H, et al. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For Ecol Manag* 259: 660–84.
- Anderegg WRL, Klein T, Bartlett M, et al. 2016. Meta-analysis reveals that hydraulic traits explain cross-species patterns of drought-induced tree mortality across the globe. *Proc Natl Acad Sci* 113: 5024–9.
- Anderegg WRL, Wu C, Acil N, et al. 2022. A climate risk analysis of Earth's forests in the 21st century. *Science*.
- Brodribb TJ, Bowman DJ, Nichols S, et al. 2010. Xylem function and growth rate interact to determine recovery rates after exposure to extreme water deficit. *New Phytol* 188: 533–42.
- Carnicer J, Coll M, Ninyerola M, et al. 2011. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proc Natl Acad Sci* 108: 1474–8.
- Choat B, Brodribb TJ, Brodersen CR, et al. 2018. Triggers of tree mortality under drought. *Nature* 558: 531–9.
- Choat B, Jansen S, Brodribb TJ, et al. 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491: 752–5.
- Cochard H, Pimont F, Ruffault J, and Martin-StPaul N. 2021. SurEau: a mechanistic model of plant water relations under extreme drought. *Ann For Sci* 78: 55.
- Deslauriers A, Rossi S, and Anfodillo T. 2007. Dendrometer and intra-annual tree growth: What kind of information can be inferred? *Dendrochronologia* 25: 113–24.
- El Mujtar VA, Perdomo MH, Gallo LA, and Grau O. 2012. Susceptibilidad diferencial al mal del ciprés entre sexos de *Austrocedrus chilensis* en la Patagonia (Argentina). *Bosque Valdivia* 33: 221–6.
- Forzieri G, Dakos V, McDowell NG, et al. 2022. Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature* 608: 534–9.
- Hammond WM, Williams AP, Abatzoglou JT, et al. 2022. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nat Commun* 13: 1761.
- Hartmann H, Schuldt B, Sanders TGM, et al. 2018. Monitoring global tree mortality patterns and trends. Report from the VW symposium "Crossing scales and disciplines to identify global trends of tree mortality as indicators of forest health." *New Phytol* 217: 984–7.
- Martin-StPaul N. and Cochard H. 2019. Predicting hydraulic failure with SurEau: description of the model and applications. In: CAQSI 2019, 26-28 March 2019, IRSTEA Recover, Aix-en-Provence, France.
- McDowell NG. 2011. Mechanisms Linking Drought, Hydraulics, Carbon Metabolism, and Vegetation Mortality. *Plant Physiol* 155: 1051–9.
- McDowell N, Pockman WT, Allen CD, et al. 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytol* 178: 719–39.
- McDowell NG, Sapes G, Pivovarovoff A, et al. 2022. Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO<sub>2</sub> and vapour pressure deficit. *Nat Rev Earth Environ* 1–15.
- Mundo IA, Mujtar VAE, Perdomo MH, et al. 2010. *Austrocedrus chilensis* growth decline in relation to drought events in northern Patagonia, Argentina. *Trees* 24: 561–70.

- Saavedra A and Willhite E. 2017. Observations and Recommendations Regarding *Araucaria araucana* Branch and Foliage Mortality (Daño Foliar de la *Araucaria*) in the National Parks of South-Central Chile.
- Seidl R, Thom D, Kautz M, et al. 2017. Forest disturbances under climate change. *Nat Clim Change* 7: 395–402.
- Senf C, Buras A, Zang CS, et al. 2020. Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nat Commun* 11: 1–8.
- Sergent AS, Segura V, Charpentier JP, et al. 2020a. Assessment of resistance to xylem cavitation in cordilleran cypress using near-infrared spectroscopy. *For Ecol Manag* 462: 117943.
- Sergent AS, Varela SA, Barigah TS, et al. 2020b. A comparison of five methods to assess embolism resistance in trees. *For Ecol Manag* 468: 118175.
- Sergent AS, Dalla-Salda G, Fernández ME, et al. 2018. Ecophysiological and Wood density studies to elucidate Cordilleran cypress's response to drought. Wood formation and tree adaptation to climate conference, Orléans, France
- Sergent AS, Martin-StPaul NK, Fernández ME, et al. 2017. Intra-specific variations of embolism resistance and water loss regulation in response to drought: A Case study on the Cordilleran cypress. Xylem International Meeting, Bordeaux, France
- Sergent A.S., Dalla-Salda G, Rozenberg P. and Martinez-Meier A. 2013 La impronta en la madera de la capacidad de sobrevivencia de los árboles a los eventos climáticos extremos. IV Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano, Iguazu, Argentine
- Sperry JS, Venturas MD, Todd HN, et al. 2019. The impact of rising CO<sub>2</sub> and acclimation on the response of US forests to global warming. *Proc Natl Acad Sci* 116: 25734–44.
- Suarez ML, Ghermandi L, and Kitzberger T. 2004. Factors Predisposing Episodic Drought-Induced Tree Mortality in *Nothofagus*: Site, Climatic Sensitivity and Growth Trends. *J Ecol* 92: 954–66.
- Urli M, Porté AJ, Cochard H, et al. 2013. Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees. *Tree Physiol* 33: 672–83.
- Velez ML, Salgado Salomón ME, Marfetan A, et al. 2018. Caracterización desecación del dosel y sanidad de *Araucaria araucana* en Argentina. (J Sanguinetti, Ed).
- Villalba R, Lara A, Masiokas MH, et al. 2012. Unusual Southern Hemisphere tree growth patterns induced by changes in the Southern Annular Mode. *Nat Geosci* 5: 793–8.