

Informe final publicable de proyecto

Anillos de crecimiento anual como un bioindicador de la variabilidad histórica del clima y caudales en subcuencas del Río Uruguay

Código de proyecto ANII: FCE_1_2019_1_155963

Fecha de cierre de proyecto: 01/11/2023

LUCAS, Christine Marie (Responsable Técnico - Científico)

FERRERO, Maria Eugenia (Investigador)

FERRERO, Maria Eugenia (Investigador)

BERRIEL, Verónica (Investigador)

GAMAZO RUSNAC, Pablo Andrés (Investigador)

MUÑOZ NAVARRO, Ariel (Investigador)

AGUILERA BETTI, Isabella (Investigador)

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. CENTRO UNIVERSITARIO REGIÓN LITORAL NORTE (Institución Proponente) \\\

INSTITUTO ARGENTINO DE NIVOLÓGÍA, GLACIOLOGÍA Y CIENCIAS AMBIENTALES (IANIGLA) - CONICET \\\

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO (PUCV) \\\

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE AGRONOMÍA \\\

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. CENTRO UNIVERSITARIO REGIÓN LITORAL NORTE

Resumen del proyecto

Comprender las condiciones ambientales históricas es fundamental para predecir cambios ambientales futuros. Entre las múltiples disciplinas que contribuyen a esta área global de investigación, la ciencia de los anillos de los árboles proporciona un indicador biológico del clima histórico y la variabilidad del caudal a escalas anuales.

Desarrollamos tres cronologías de anillos de árboles basadas en el ancho de los anillos utilizando especies emblemáticas y longevas, *Prosopis affinis* y *Prosopis nigra* (mezquite) en el oeste de Uruguay. Exploramos la relación entre los factores climáticos relacionados con el agua (precipitaciones, índices de sequía y El Niño 3.4 SST), el caudal de los principales ríos de la región y el crecimiento anual de los anillos de los árboles para evaluar cómo las especies de árboles nativos responden a la variabilidad estacional y anual en la disponibilidad de agua en el sureste de Sudamérica. Utilizamos una serie de herramientas de procesamiento de datos en dendrocronología y análisis de regresión para evaluar el crecimiento de los anillos de los árboles de *Prosopis* como indicador del clima y la hidrología históricos a escala local y regional, con un enfoque en la frecuencia y gravedad de los eventos en períodos con escasez de datos, de 1900 a 2020. También desarrollamos una reconstrucción del caudal de los ríos Negro y Tacuarembó con base en 29 cronologías de ancho de anillo de Chile Central durante el siglo pasado. Esta investigación aporta: 1) datos de referencia sobre el crecimiento leñoso anual de *Prosopis* spp, especies focales para la conservación y el manejo en el Litoral de Uruguay, 2) datos biológicos aproximados para el clima e hidrología históricos en el sureste de América del Sur en el siglo pasado, 3) evidencia de la variabilidad en respuesta a la disponibilidad de agua dependiendo de las características del sitio. Este estudio proporciona la base para la evaluación de isótopos de carbono estables en especies leñosas nativas como indicador del déficit hídrico histórico en la región.

Ciencias Naturales y Exactas / Ciencias Biológicas / Ecología / Dendrocronología

Palabras clave: dendrocronología / Hidrología / Variabilidad climática /

Introducción

La variación en la disponibilidad de agua debido al cambio climático y las perturbaciones humanas es un foco importante de investigación a nivel mundial. Entre las múltiples disciplinas que están abordando este dilema, la ciencia de los anillos de los árboles – dendrocronología – ha proporcionado información a escala anual sobre el clima histórico, que se extienden hasta 10.000 años en el pasado en el hemisferio norte (Lawson et al. 2007) y hasta 3.620 años en América del Sur (Lara y Villalba 1993). Estos registros históricos son relativamente cortos en climas tropicales y subtropicales debido a la menor disponibilidad de árboles longevos en estos climas. No obstante, existe un esfuerzo integrado en las últimas décadas para aportar cronologías en base de anillos a la base de datos dendrocronológicos globales, siendo una contribución para comprender cómo la disponibilidad de agua (a través de las precipitaciones y el caudal) ha cambiado con el tiempo y brindando un contexto para hacer decisiones sobre la gestión del agua.

Los modelos hidrológicos a escala global sugieren tendencias divergentes en las precipitaciones y la escurrimiento en diferentes regiones de América del Sur (Milly et al. 2005). Si bien las regiones del Pacífico sudamericano experimentan sequías severas en las últimas décadas (González-Reyes y Muñoz 2013, Boisier et al. 2016), las precipitaciones en gran parte del sureste de Sudamérica (SESA) han aumentado desde la década de 1970 (Pérez et al. 2011). Este aumento de las precipitaciones, junto con factores climáticos como El Niño Oscilación Sur (ENOS), han resultado en un aumento del caudal de los ríos y eventos de inundaciones severas en SESA (Genta et al. 1998, Barros et al. 2008). Se espera que estas tendencias continúen en los futuros escenarios de cambio climático del IPCC (IPCC 2014). Existe un esfuerzo concertado en el Cono Sur para mejorar los datos climáticos históricos para comprender la frecuencia y severidad de las sequías, las lluvias extremas y los incendios durante largos períodos de tiempo (Aravena et al. 2003, Minetti y otros 2003). Los registros indirectos de coros de sedimentos, coros de hielo y anillos anuales de árboles han contribuido a la reconstrucción de datos históricos sobre la frecuencia y gravedad de eventos extremos y sus impactos en los ecosistemas locales (Mann 2002, Perez et al. 2016). Además, estas reconstrucciones pueden aportar al establecer regulaciones de gestión del agua basadas en datos de descarga de largo plazo (Fernández et al. 2018, Barria et al. 2019).

El sureste de América del Sur, incluido Uruguay, representa una brecha regional importante en la base de datos internacional de anillos de árboles (ITRDB) para América del Sur. Más de 300 cronologías de más de 10 especies

conforman el registro cronológico de América del Sur (Boninsegna et al. 2009). Muchos de estos registros dendrocronológicos ocurren en zonas de gran altitud donde el clima permite la clara formación de anillos anuales (Koch y Kilian 2002, Mundo et al. 2012, Muñoz et al. 2014). Sin embargo, hay datos dendrocronológicos de las tierras bajas en zonas tropicales y subtropicales, incluida la cuenca del Amazonas y el bioma de la Pampa (Boninsegna et al. 2009). Existen cronologías de las tierras altas circundantes en el sur de Brasil (Oliveira et al., 2010) o del borde occidental de las Pampas en Argentina (Bogino y Jobbágy 2011), pero los datos sobre los anillos de los árboles del ecoregion Campos en Uruguay son escasos (Lucas et al. 2018). Dada su dominancia en climas tropicales y subtropicales, las angiospermas leñosas de bosques de altura y sabanas (Villalba y Boninsegna 1989, Morales et al. 2004, Gigantemasi et al. 2009), los Yungas montanos húmedos (Grau et al. 2003), el Chaco y Cerrado de América del Sur (Ferrero y Villalba 2009, López y Villalba 2016) y las llanuras aluviales de la cuenca del Amazonas (Schöngart et al. 2004, Schöngart et al. 2005) han proporcionado datos importantes sobre la variabilidad ambiental histórica y su efecto sobre el crecimiento de los árboles en estas regiones. Los datos de los anillos de los árboles en el bioma de la Pampa han sido una herramienta valiosa para evaluar los cambios históricos en el clima en el sureste de América del Sur y la cuenca del Río de la Plata (Bogino y Jobbágy 2011, Lucas et al. 2018).

Además de la evaluación del ancho de anillo, el análisis de isótopos de carbono ha proporcionado una técnica novedosa para evaluar la relación entre el déficit hídrico y los anillos de los árboles. Debido a los vínculos directos entre las relaciones hídricas de las plantas y la producción de carbono, las estrategias hidráulicas de las plantas afectan directamente los ciclos de nutrientes y carbono de las plantas (McDowell 2011; Mencuccini 2003). Los rasgos funcionales relacionados con las estrategias hidráulicas de las plantas se estudian cada vez más, ya que integran características cruciales del árbol y el ecosistema (Brodribb 2017; Choat et al. 2012). Ciertos rasgos hidráulicos de las plantas, en particular la resistencia de la xilema a la embolia, tienen una capacidad única para explicar la función del ecosistema y la vulnerabilidad al estrés climático, en particular la sequía (Brodribb 2017; Choat et al. 2012; Rowland et al. 2015). En este sentido, los estudios dendroecológicos basados en la fisiología y anatomía de los anillos de los árboles pueden complementarse con análisis de isótopos estables de carbono (^{13}C), con el objetivo de estimar la eficiencia en el uso del agua (WUE) en los árboles, que es una medida de la ganancia de carbono por unidad de agua perdida (McCarroll y Loader, 2004). Los estudios dendroecológicos e isotópicos en bosques construirán registros históricos del crecimiento y la variación de WUE, y evaluarán su respuesta al aumento de las condiciones de sequía. Estas técnicas revelarían si el aumento de CO_2 y el estrés hídrico modifican la estructura celular de las hojas, afectando la captura de carbono y la transpiración de las plantas, y por ende, si se alteraría la dinámica de crecimiento del bosque uruguayo.

Metodología/diseño del estudio

Utilizando métodos internacionales estándar para el desarrollo de cronologías de anillos de árboles, desarrollaremos tres cronologías basadas en *Prosopis affinis* y *Prosopis nigra*, especies arbórea característica del Litoral occidental de Uruguay (Brussa y Grela 2007, Fagundez 2015).

Sitios de estudio: Se recolectarán muestras de madera para dendrocronología de *Prosopis affinis* y *Prosopis nigra* en tres sitios del Litoral Uruguayo en los departamentos de Río Negro, Paysandú y Salto dentro de las cuencas de los ríos Queguay, Arapey y Uruguay. Las muestras se recolectan tanto en terrenos privados con planes de manejo aprobados por la DGF-MGAP como en el Área Protegida “Montes del Queguay”, esta última de madera muerta cortada antes de 2003. Los sitios fueron seleccionados de acuerdo con los tipos de suelo del CONEAT, la extensión y supuesta edad de los rodales de *Prosopis* (algarrobales) y disposición de los dueños a participar en el estudio.

Muestreo de árboles: Colectamos muestras de 20-40 árboles por especie por sitio, un número estándar para desarrollar una cronología maestra que refleje la variabilidad del crecimiento a escala poblacional (Speer 2010). Se recolectaron muestras de madera como secciones transversales radiales o discos para los árboles muertos y algunos árboles vivos en cada sitio. También colectamos muestras de árboles vivos utilizando un taladro Pressler de 5,15 mm de diámetro. Se utilizan árboles vivos para garantizar datos recientes hasta el presente. Las muestras se pulen con papel de lija de grano sucesivamente creciente de 60 a 2000 g cm⁻².

Los anillos se identificaron visualmente en una escala microscópica (10-100x), contando los anillos en 3-4 radios (*series*) por sección transversal para identificar anillos falsos. El ancho del anillo se mide usando un sistema de mesa VELMEX Unislide (Velmex, NY), conectado a un contador digital. El control de calidad y corrección de las series fechadas se realiza

mediante COFECHA (Holmes 1983). Este programa compara la correlación de segmentos fechados en cada serie con una cronología promedio o "maestra" basada en todas las series. Usamos este programa para identificar anillos faltantes y falsos, basándonos en el supuesto de que todas las series deben compartir una señal de crecimiento común. Las cronologías maestras se desarrollan en el programa ARSTAN, aplicando filtros para eliminar la variabilidad a largo plazo (Cook y Holmes 1996).

Datos climáticos: Los datos de series temporales de precipitación mensual, temperatura máxima, mínima y media, el Índice de El Niño 3.4 SST (Temperatura de la Superficie del Mar) y el Índice de Sequía de Palmer (PDSI) se obtuvieron de la Unidad de Investigación Climática (CRU) desde 1910 hasta el presente. También utilizamos datos de lluvia de INIA e InUMet.

Datos hidrológicos: Los datos de caudal (Q) mensual basados en regresiones (curvas de aforo) para cada estación hidrométrica del Queguay, Daymán y el Uruguay se obtuvieron de la Dirección Nacional de Agua (DINAGUA). Los datos faltantes se completaron mediante un modelo de media móvil integrada autorregresiva (ARIMA) con variables exógenas (Tencaliec et al. 2015), transformando el Q en una variable gaussiana mediante una transformación cuantil-cuantil. ARIMA captura la estructura temporal en la serie temporal y las variables exógenas tienen en cuenta la correlación entre estaciones de aforo. Las transformaciones gaussianas del caudal se utilizan para alcanzar la normalidad, según las pruebas de Shapiro-Wilk, para probar la correlación entre el caudal, la precipitación y el crecimiento de los árboles.

Análisis de isótopos: En cuanto al ^{13}C , la variación isotópica de los isótopos de carbono estables en los anillos de crecimiento se utilizará para evaluar cambios en la respuesta ecofisiológica de *Prosopis* a la disponibilidad de agua (McCarroll y Loader 2004) y para calibrar y verificar la variabilidad climática en la región. Se seleccionaron 5 árboles por especie para el análisis de la composición isotópica del carbono ^{13}C (Lévesque et al. 2014). Los siguientes criterios para el análisis de isótopos de los anillos de los árboles son (McCarroll y Loader 2004): (i) el árbol necesita tener anillos suficientemente anchos para que el peso de la muestra de madera sea suficiente para el análisis isotópico y (ii) seleccionar los árboles que tengan radios (serie de crecimiento radial) con mayor correlación con la cronología maestra creada y validada por el software COFECHA. El estudio de isótopos se centra en el periodo 1940-2020, por lo que el análisis de una especie utilizando cinco árboles. A partir de los valores de ^{13}C se determinará la concentración de CO_2 en el mesófilo foliar y la eficiencia en el uso del agua (UE), utilizando metodología convencional (McCarroll y Loader 2004).

Análisis de datos: Desarrollamos una serie de métodos de procesamiento de datos en ARSTAN para crear la cronología maestra, análisis de series de tiempo tanto de datos de anillos de árboles como de variables climáticas, y luego una serie de análisis de regresión para probar la correlación temporal entre los anillos de árboles. índices (ancho y ^{13}C) y datos climáticos locales y regionales (índices de temperatura, precipitación y sequía) y globales (ENSO y Oscilación Antártica). Además del análisis en el software R, utilizamos QGIS y KNMI Climate Explorer (KNMI - Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut - www.knmi.nl/) para ver la distribución espacial de las relaciones clima-crecimiento (Trouet y Van Oldenborgh 2013).

Reconstrucción del flujo de corriente: Seleccionamos cronologías potenciales como parámetros del modelo en función de su correlación positiva tanto con ENSO como con Q (Tabla 2); Antes de seleccionar el conjunto final de parámetros, los modelos a priori con múltiples especies seleccionaron consecutivamente las cronologías de *Cryptocarya alba* como las más fuertes estadísticamente. La reconstrucción se truncó en 2009 debido a cambios en la doble curva de masa de la precipitación Q posterior a 2009, potencialmente relacionados con los efectos de los recientes aumentos en el área de forestación en la cuenca del río Tacuarembó en Uruguay, así como con severas caídas del crecimiento en el centro de Chile. árboles relacionados con la megasequía en Chile en el siglo XXI (Venegas-González et al., 2019; Matskovsky et al., 2021). La verificación del modelo para el período de calibración (1957-2009) se realizó utilizando el R^2 y el R^2 ajustado para evaluar la varianza explicada entre los valores observados y predichos, este último ajustado por pérdida de grados de libertad; el estadístico F para probar la precisión del modelo de regresión; y la estadística de reducción del error (RE) para tener en cuenta la relación entre el valor real y la estimación. La robustez de la reconstrucción se evaluó mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el Error de Reducción (RE) y la prueba de Durbin-Watson (DW) (Fernández et al., 2018; Muñoz et al., 2020). Evaluamos la correlación lineal entre la reconstrucción y los datos históricos del hidroclima de la cuenca superior del río Negro, incluida la precipitación anual CRU 4.03, el SPEI de 1 mes del CSCI y el índice de gravedad de sequía de Palmer autocalibrado anual (scPDSI) disponible en el SADA Explorer (Morales et al. 2020). También comparamos la reconstrucción con el Índice El Niño 3.4 de 1901-2017 y el Q anual (junio-mayo) del río Uruguay en

Concordia (31°24'S, 58°2'W) de 1898-2005 (datos no publicados; CTM, 2020), uno de los medidores de nivel de ríos más antiguos de la cuenca baja del R. Uruguay. Finalmente, la periodicidad de la reconstrucción se evaluó mediante análisis wavelet utilizando la función morlet en la biblioteca dplR y gráficos de violín. Se utilizó un análisis de wavelets tanto en ENOS como en Q reconstruido para determinar si se esperaban periodicidades significativas si ENSO fuera un impulsor de Q histórico y del clima en Uruguay. La frecuencia de eventos extremos (>95% y <5% de superación) se evaluó en el paquete de hidrostatos versión 0.2.6 (Bond, 2018), incluida una lista de años muy húmedos y secos antes y después del salto climático de la década de 1960. en el caudal de los ríos en el SESA (Mechoso e Iribarren, 1992).

Resultados, análisis y discusión

Los resultados de este estudio muestran el potencial de la dendrocronología -la ciencia de la datación de los anillos de los árboles- en los ecosistemas de Uruguay. En general, desarrollamos tres cronologías de anillos de árboles, duplicando el tamaño de muestra de las cronologías en Uruguay y llenando un vacío geográfico importante en el registro de anillos de árboles en el sureste de América del Sur. También demostramos la utilidad de estas especies como indicadores históricos de sequías históricas a escala regional y períodos de estiaje durante el siglo pasado.

Prosopis L. ha jugado un papel importante en el desarrollo de la investigación de anillos de árboles para evaluar diferentes aspectos de la hidrología en ecorregiones áridas y semiáridas de América del Sur. Dada la distribución de *Prosopis* a lo largo de un amplio gradiente hidrológico y su papel único como freatofito en estas regiones, la relación entre el crecimiento de las especies de *Prosopis*, la anatomía del sistema hidráulico y el agua ha sido un tema recurrente durante el último siglo. Dado el estado crítico de los recursos hídricos a nivel mundial y los cambios regionales en el clima y la hidrología en las Américas, revisamos trabajos anteriores sobre el papel de *Prosopis* como indicador de los parámetros hidrológicos regionales, incluidas las precipitaciones, las aguas subterráneas y las descargas. Esta investigación recopila información de 40 publicaciones, evaluando 11 especies de *Prosopis* entre 4 condados, desde 4°-35°S de latitud, 38°-81°W de longitud, 30-3500 m.s.n.m. y 0-730 mm de precipitación. Revisamos los hallazgos sobre la relación entre *Prosopis* spp y la hidrología (precipitación, niveles de agua subterránea, humedad del suelo) dentro de las subdisciplinas de anatomía de la madera, dendroclimatología, dendrohidrología y dendroecología. La revisión destaca las afinidades únicas de *Prosopis* con las condiciones áridas, así como los valores de los anillos de sus árboles como indicador de sequías históricas y variabilidad en los niveles freáticos, dependiendo del clima, la elevación y las condiciones promedio de humedad del suelo entre los lugares de estudio. Esta revisión también destaca oportunidades para ampliar la investigación futura de *Prosopis* en climas húmedos e incorporar técnicas novedosas como isótopos estables y anatomía de la madera para aumentar aún más la comprensión del papel que desempeña este género en el seguimiento de los cambios hidrológicos en América del Sur (Resultados completos disponibles en Ambite et. al 2022).

Identificación de anillos anuales y desarrollo de cronologías. La identificación de los anillos de crecimiento en *P. affinis* y *P. nigra* se vio facilitada por el uso de discos enteros en lugar de tapones y la calidad del lijado previo a la medición. Los anillos de crecimiento se identificaron por la presencia de una fina línea continua de células terminales del parénquima, precedida por una línea de vasos más grandes a medida que comenzaba un nuevo anillo. Se obtuvo una cronología para cada uno de los tres sitios. Una cronología con *P. affinis* obtenida del sitio DAG, basada en 15 series y 9 árboles, que abarcan el período 1897-1981, con el mayor número de réplicas (N de series>6) de 1925. Una cronología con *P. affinis* de la LBU sitio, basado en 31 series de 16 árboles, que cubren el período entre 1923-2002, siendo bien replicado (N de series>6) entre 1929-1997. Una cronología de *P. nigra* del sitio DRQ, basada en 32 series y 17 árboles, que cubre el período entre 1900-2009, siendo bien replicada (N de series>6) entre 1908-2008. El ancho de los anillos de crecimiento para ambas especies fue altamente variable, con alta sensibilidad y baja correlación interanual entre anillos. El sitio DAG presentó la mayor sensibilidad (0,352), seguido de DRQ (0,339) y LBU (0,334). La inter-correlación entre ejecuciones fue mayor en el sitio LBU que la observada en DAG para *P. affinis* (0,509 frente a 0,433), lo que sugiere una señal de población ligeramente mayor en LBU. Para *P. nigra* en el sitio DRQ, la inter-correlación entre series fue de 0,426. Si bien las cronologías se analizaron por separado, al juntar las correspondientes a *P. affinis* (LBU y DAG) la inter-correlación entre series fue de 0,426, sugiriendo la presencia de una señal regional para esta especie (Ambite, 2022).

Correlaciones climáticas y eventos extremos

Las cronologías detectaron algunos eventos extremos históricos (>1,-1 anomalía), como la sequía de 2009 en el sitio DRQ; la sequía de 1916-17 en los sitios DAG y DRQ, respectivamente, la sequía de 1942-43 y 1964-65 en los sitios DAG y LBU, la sequía de 1988-89 en el sitio LBU y la sequía de 2009 en el sitio DRQ (SINAE MIDES 2020). Las cronologías muestran otras anomalías significativas, marcadas por anillos estrechos (>-1 anomalía) y anchos (>1 anomalía). Encontramos dos casos

opuestos en las relaciones crecimiento-clima de los sitios analizados. En los sitios DAG y LBU, el ancho de los anillos de crecimiento se explica principalmente por las precipitaciones que ocurren al inicio y durante la temporada de crecimiento, al final del invierno, durante la primavera y el verano (agosto, diciembre-enero, respectivamente), presentando una correlación positiva con el crecimiento (Ambite, 2022).

Los resultados de tres cronologías de anillos de árboles reflejan el potencial dendrocronológico del género *Prosopis* en Uruguay, con una Señal Poblacional Expresada (EPS) $>0,80$ para los tres sitios, estando entre las pocas cronologías de ancho de anillos disponibles para el sureste de Sudamérica. Estas cronologías fueron datadas con dos especies de árboles nativos, lo que demuestra la conexión entre el crecimiento anual de estos árboles y las variables climáticas locales y globales. Entre las variables destaca la relación de la variabilidad de las precipitaciones en correlación con anomalías en el ancho del anillo anual. En segundo lugar, la temperatura se presenta como un factor que regula la disponibilidad de agua a través de la evapotranspiración (Boninsegna et al. 2009). Un posible factor que influya en las diferencias en la respuesta del crecimiento a la variabilidad climática encontradas entre sitios podrían ser las características de cada especie (*P. affinis* vs. *P. nigra*), aunque parece más probable que se deba a las características topográficas del lugar. Lugares donde se encuentra cada especie (*P. nigra* solo habita en suelos halomorfos, en esta investigación se muestreó en lugares con alta influencia del río, *P. affinis* habita en diferentes tipos de suelo, en esta investigación se muestreó en lugares con una alta influencia de sabanas boscosas; Ambite 2022).

Cronologías de Uruguay y Chile como sustitutos del hidroclima:

Finalmente, la integración de cronologías de anillos de árboles de Uruguay y Chile central demuestra cómo las grandes redes de anillos de árboles son críticas para la reconstrucción de la variabilidad histórica en hidrología y clima. Las teleconexiones regionales permiten la modelización transcontinental del hidroclima en todo el mundo. Los anillos de los árboles son un buen indicador hidroclimático utilizado para reconstruir la sequía y el caudal de los ríos en regiones que responden a forzamientos globales comunes. Utilizamos un conjunto de datos de múltiples especies de 32 cronologías de ancho de anillos de árboles de Chile y Uruguay como indicador climático para inferir la variabilidad del caudal anual (Q) en la cuenca del río Negro, una cuenca hidrográfica dominada por pastizales en las tierras bajas del sureste de América del Sur. Una correlación lineal positiva entre las cronologías de los anillos de los árboles de Chile central y el caudal instrumental anual del río Negro entre 1957 y 2012 indicó una teleconexión transcontinental entre la variabilidad hidroclimática en el centro de Chile y el noreste de Uruguay. Esta relación fue mediada en parte por la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO), por la cual el Índice El Niño 3.4 se correlacionó positivamente con las precipitaciones regionales, el crecimiento anual de los árboles y las anomalías Q. A pesar de la proximidad de las cronologías de anillos de árboles uruguayas a las estaciones hidrométricas del río Negro, las cronologías de anillos de árboles de Chile predijeron mejor el caudal anual. Por lo tanto, utilizando datos de anillos de árboles de cuatro cronologías de largo plazo sensibles a la humedad de la especie *Cryptocarya alba* en Chile Central (32-34°S), presentamos la primera reconstrucción del flujo fluvial (1890-2009) en la Cuenca Inferior del Plata. La reconstrucción respalda la evidencia regional de una frecuencia cada vez mayor de años de inundaciones extremas durante el siglo pasado en Uruguay. Demostramos cómo las teleconexiones climáticas que median en la variabilidad del hidroclima local permiten la reconstrucción transcontinental del flujo fluvial, llenando una brecha geográfica importante en los indicadores históricos de inundaciones y sequías en biomas de pastizales del hemisferio sur (Lucas et al., 2022).

Conclusiones y recomendaciones

La investigación dendrocronológica en Uruguay tiene el potencial de fortalecer las brechas de información sobre la variabilidad climática histórica en el bioma de pastizales más grande de América del Sur. Este trabajo proporciona la primera fuente de datos dendrocronológicos utilizando el género *Prosopis* en Uruguay y contribuye a las pocas cronologías de anillos de árboles disponibles para el sureste de América del Sur. Confirmamos a través de esta investigación que las especies *Prosopis affinis* y *Prosopis nigra* forman anillos de crecimiento anuales en Uruguay.

La revisión recopila investigaciones sobre al menos 11 especies de *Prosopis*, lo que sugiere que las 29 especies restantes en las Américas también tienen el potencial de proporcionar datos históricos sobre sequías, disponibilidad de agua en el suelo, tendencias de precipitación, así como niveles freáticos. Las especies de *Prosopis* también están presentes y se utilizan para investigaciones dendrocronológicas en Asia, África, América del Norte y Central (Cangiano et al 2018). Investigaciones anteriores sobre la distribución nativa del género en las Américas destacan la relación entre *Prosopis* y la hidrología, incluida la profundidad del nivel freático y la interceptación de la precipitación (Hennessy et al 1985, Navar y Bryan 1990, Navar 1993, Stromberg et al 1993, González -Sosa 2010). Cuando *Prosopis* es una especie invasora

problemática, comprender la distribución espacial de la especie hasta los niveles freáticos y cómo la especie amenaza la disponibilidad de agua en estas regiones es un hilo central de la investigación en África y en otras regiones (Shiferaw et al 2021). Debido a que la escasez de agua dulce es un problema mundial, *Prosopis* puede contribuir a comprender el ciclo hidrológico en muchos países.

Se evaluaron tres cronologías de ancho de anillo de tres sitios en la cuenca del río Uruguay en el litoral de Uruguay para determinar su correlación con el clima y la hidrología fluvial durante varias décadas desde la década de 1910 hasta la década de 2000. La variabilidad del ancho del anillo se correlacionó principalmente con la disponibilidad de agua (precipitaciones, humedad del suelo e índices de sequía) y en segundo lugar con la temperatura media mensual. Las diferencias topográficas entre los sitios de baja y alta elevación probablemente influyeron en la respuesta de las cronologías al régimen de lluvias, promoviendo el crecimiento en sitios de alta elevación con buen drenaje, dificultando el crecimiento en los sitios de baja elevación con parches de suelo halomorfos, susceptibles a niveles más altos de agua. mesas durante las inundaciones.

La dendrocronología representa una herramienta importante para el estudio de la variabilidad climática histórica y la respuesta de los bosques a ella; Llenar los vacíos de información en regiones donde esta herramienta está poco desarrollada, como el sureste de América del Sur, apoya la formación de una base de datos más rica y eficiente a la hora de predecir los efectos de la variabilidad climática en las formaciones vegetales. América del Sur es un continente biodiverso con una amplia gama de climas y ecosistemas, cuya distribución está relacionada en parte con la disponibilidad de agua y el hidroclima. La investigación dendrocronológica sobre especies leñosas en los trópicos y subtropicales de América del Sur está proporcionando información a largo plazo sobre cómo los ambientes áridos y semiáridos responden a los cambios en el clima y el uso de la tierra.

Recomendaciones:

Recomendamos seguir investigando el crecimiento leñoso en los árboles de América del Sur, particularmente en los biomas de pastizales y sabanas y en regiones con pocos datos, como Uruguay. Será importante integrar isótopos de carbono estables para probar cómo se compara esta firma química en los anillos con el ancho de los anillos en términos de capturar la variabilidad climática histórica.

Referencias bibliográficas

- Aravena, J. C., C. LeQuesne, H. Jiménez, A. Lara, and J. J. Armesto. 2003. Fire history in central Chile: Tree-ring evidence and modern records. Pages 343-356 *Fire and climatic change in temperate ecosystems of the Western Americas*. Springer.
- Aubert, D., C. Loumagne, and L. Oudin. 2003. Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* 280:145-161.
- Ballesteros-Cánovas, J., M. Stoffel, S. St George, and K. Hirschboeck. 2015. A review of flood records from tree rings. *Progress in Physical Geography* 39:794-816.
- Barria, P., M. Rojas, P. Moraga, A. Muñoz, D. Bozkurt, and C. Alvarez-Garretón. 2019. Anthropocene and streamflow: Long-term perspective of streamflow variability and water rights. *Elem Sci Anth* 7.
- Barros, V. R., M. E. Doyle, and I. A. Camilloni. 2008. Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theoretical and Applied Climatology* 93:19-33.
- Berriel, V. 2018. Carbon stable-isotope and physicochemical data as a possible tool to differentiate between honey-production environments in Uruguay. *Foods* 7:86.
- Berriel, V., C. Mori, and C. Perdomo. 2014. Water status and ^{13}C isotope discrimination in two conventional pastures of Uruguay. *Agrociencia (Montevideo)* 18:1-13.
- Berriel, V., and C. H. Perdomo. 2019. Differentiating pasture honey from eucalyptus honey based on carbon isotopic data in Uruguay. *Heliyon* 5:e01228.
- Bogino, S. M., and E. G. Jobbágy. 2011. Climate and groundwater effects on the establishment, growth and death of *Prosopis caldenia* trees in the Pampas (Argentina). *Forest Ecology and Management* 262:1766-1774.
- Boisier, J. P., R. Rondanelli, R. D. Garreaud, and F. Muñoz. 2016. Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters* 43:413-421.
- Boninsegna, J. A., J. Argollo, J. Aravena, J. Barichivich, D. Christie, M. Ferrero, A. Lara, C. Le Quesne, B. Luckman, and M. Masiokas. 2009. Dendroclimatological reconstructions in South America: a review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281:210-228.
- Brussa, C. A., and I. A. Grela. 2007. *Flora Arbórea del Uruguay: Con énfasis en las especies de Rivera y Tacuarembó*. COFUSA, Montevideo.
- Burghardt, A. D., and S. M. Espert. 2007. Phylogeny of *Prosopis* (Leguminosae) as shown by morphological and biochemical evidence. *Australian Systematic Botany* 20:332-339.
- Burkart, A. 1976. A monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae subfam. Mimosoideae). *Journal of the Arnold Arboretum*:450-525.
- Chávez, R. O., J. G. Clevers, M. Herold, M. Ortiz, and E. Acevedo. 2013. Modelling the spectral response of the desert tree *Prosopis tamarugo* to water stress. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21:53-65.
- Chen, B., and J. M. Chen. 2007. Diurnal, seasonal and interannual variability of carbon isotope discrimination at the canopy level in response to environmental factors in a boreal forest ecosystem. *Plant, cell & environment* 30:1223-1239.
- Cook, E. R., and R. L. Holmes. 1996. *Users Manual for Program ARSTAN*. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, USA.
- Cook, E. R., and P. J. Krusic. 2003. The North American Drought Atlas. in AGU Fall Meeting Abstracts.
- Dawson, T. E., S. Mambelli, A. H. Plamboeck, P. H. Templer, and K. P. Tu. 2002. Stable isotopes in plant ecology. *Annual review of ecology and systematics* 33:507-559.
- Fagundez, C. 2015. *Patrones de Distribucion del Genero Prosopis L. (Leguminosae): Los Algarrobos de Uruguay*. UdelaR.
- Fernández, A., A. Muñoz, Á. González-Reyes, I. Aguilera-Betti, I. Toledo, P. Puchi, D. Sauchyn, S. Crespo, C. Frene, and I. Mundo. 2018. Dendrohydrology and water resources management in south-central Chile: lessons from the Río Imperial streamflow reconstruction. *Hydrology and Earth System Sciences* 22:2921-2935.
- Ferrero, M. E., and R. Villalba. 2009. Potential of *Schinopsis lorentzii* for dendrochronological studies in subtropical dry Chaco forests of South America. *Trees* 23:1275.
- Genta, J., G. Perez-Iribarren, and C. R. Mechoso. 1998. A recent increasing trend in the streamflow of rivers in southeastern South America. *Journal of Climate* 11:2858-2862.
- Giantomasi, M. A., F. A. R. Junent, P. E. Villagra, and A. M. Srur. 2009. Annual variation and influence of climate on the ring width and wood hydrosystem of *Prosopis flexuosa* DC trees using image analysis. *Trees* 23:117-126.
- Gonzalez-Reyes, A., and A. A. Munoz. 2013. Precipitation changes of Valdivia city (Chile) during the past 150 years. *Bosque*

- Grau, H. R., T. A. Easdale, and L. Paolini. 2003. Subtropical dendroecology—dating disturbances and forest dynamics in northwestern Argentina montane ecosystems. *Forest Ecology and Management* 177:131-143.
- Holmes, R. 1983. Program COFECHA user's manual. Laboratory of Tree-Ring Research, The University of Arizona, Tucson.
- IPCC. 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC.
- Koch, J., and R. Kilian. 2002. Dendroecological potential of common tree species along a transect across the southernmost Andes, Chile (53°S). *Anales del Instituto de la Patagonia Serie Ciencias Naturales* 30:123-132.
- Lara, A., and R. Villalba. 1993. A 3620-year temperature record from Fitzroya cupressoides tree rings in southern South America. *Science* 260:1104-1106.
- Lawson, D., G. Wiles, and D. Finnegan. 2007. A dendroclimatic record of Paleoclimate of the last 10,000 years, Glacier Bay National Park and Preserve: progress understanding climate change in southeast Alaska. *US Army Research*:22.
- Lévesque, M., R. Siegwolf, M. Saurer, B. Eilmann, and A. Rigling. 2014. Increased water?use efficiency does not lead to enhanced tree growth under xeric and mesic conditions. *New Phytologist* 203:94-109.
- Lopez, B. C., R. Rodriguez, C. A. Gracia, and S. Sabate. 2006. Climatic signals in growth and its relation to ENSO events of two Prosopis species following a latitudinal gradient in South America. *Global Change Biology* 12:897-906.
- López, L., and R. Villalba. 2016. An assessment of Schinopsis brasiliensis Engler (Anacardiaceae) for dendroclimatological applications in the tropical Cerrado and Chaco forests, Bolivia. *Dendrochronologia* 40:85-92.
- Lucas, C., M. Ceroni, S. Baeza, A. A. Muñoz, and A. Brazeiro. 2017. Sensitivity of subtropical forest and savanna productivity to climate variability in South America, Uruguay. *Journal of Vegetation Science* 28:192-205.
- Lucas, C., P. Puchi, L. Profumo, A. Ferreira, and A. Muñoz. 2018. Effect of climate on tree growth in the Pampa biome of Southeastern South America: First tree-ring chronologies from Uruguay. *Dendrochronologia* 52:113-122.
- Mann, M. E. 2002. The value of multiple proxies. *Science* 297:1481-1482.
- Maxwell, R. S., G. L. Harley, J. T. Maxwell, S. A. Rayback, N. Pederson, E. R. Cook, D. J. Barclay, W. Li, and J. A. Rayburn. 2017. An interbasin comparison of tree?ring reconstructed streamflow in the eastern United States. *Hydrological processes* 31:2381-2394.
- McCarroll, D., and N. J. Loader. 2004. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews* 23:771-801.
- Milly, P. C., K. A. Dunne, and A. V. Vecchia. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature* 438:347.
- Minetti, J. L., W. M. Vargas, A. Poblete, L. Acuña, and G. Casagrande. 2003. Non-linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. *Atmósfera* 16:119-135.
- Morales, M. S., R. Villalba, H. R. Grau, and L. Paolini. 2004. Rainfall?controlled tree growth in high?elevation subtropical treelines. *Ecology* 85:3080-3089.
- Mundo, I. A., F. A. Roig Junent, R. Villalba, T. Kitzberger, and M. D. Barrera. 2012. Araucaria araucana tree-ring chronologies in Argentina: spatial growth variations and climate influences. *Trees-Structure and Function* 26:443-458.
- Muñoz, A. A., J. Barichivich, D. A. Christie, W. Dorigo, D. Sauchyn, A. Gonzalez-Reyes, R. Villalba, A. Lara, N. Riquelme, and M. E. Gonzalez. 2014. Patterns and drivers of Araucaria araucana forest growth along a biophysical gradient in the northern Patagonian Andes: Linking tree rings with satellite observations of soil moisture. *Austral Ecology* 39:158-169.
- Perez, L., F. García-Rodríguez, and T. J. Hanebuth. 2016. Variability in terrigenous sediment supply offshore of the Río de la Plata (Uruguay) recording the continental climatic history over the past 1200 years. *Climate of the Past* 12:623-634.
- Pérez, S., E. Sierra, E. López, G. Nizzero, F. Momo, and M. Massobrio. 2011. Abrupt changes in rainfall in the Eastern area of La Pampa Province, Argentina. *Theoretical and Applied Climatology* 103:159-165.
- Profumo, L. 2010. Estudo de anéis de crescimento de espécies arbóreas de ambientes fluviais da bacia do rio Tacuarembó, Uruguai. UFPR, Curitiba.
- Sapriza-Azuri, G., J. Jódar, J. Carrera, and H. V. Gupta. 2015. Toward a comprehensive assessment of the combined impacts of climate change and groundwater pumping on catchment dynamics. *Journal of Hydrology* 529:1701-1712.
- Sapriza?Azuri, G., J. Jódar, V. Navarro, L. J. Slooten, J. Carrera, and H. V. Gupta. 2015. Impacts of rainfall spatial variability on hydrogeological response. *Water Resources Research* 51:1300-1314.
- Schlesinger, W. H., and E. S. Bernhardt. 2013. Biogeochemistry: an analysis of global change. Academic press.
- Schöngart, J., W. J. Junk, M. T. F. Piedade, J. M. Ayres, A. Huttermann, and M. Worbes. 2004. Teleconnection between tree growth in the Amazonian floodplains and the El Niño-Southern Oscillation effect. *Global Change Biology* 10:683-692.
- Schöngart, J., M. T. F. Piedade, F. Wittmann, W. J. Junk, and M. Worbes. 2005. Wood growth patterns of Macrolobium acaciifolium (Benth.) Benth. (Fabaceae) in Amazonian black-water and white-water floodplain forests. *Oecologia* 145:454-461.

- Speer, J. H. 2010. Fundamentals of Tree-ring Research. University of Arizona Press, Tucson,.
- Stewart, G. R., M. H. Turnbull, S. Schmidt, and P. D. Erskine. 1995. 13C natural abundance in plant communities along a rainfall gradient: a biological integrator of water availability. *Functional Plant Biology* 22:51-55.
- Tencaliec, P., A. C. Favre, C. Prieur, and T. Mathevet. 2015. Reconstruction of missing daily streamflow data using dynamic regression models. *Water Resources Research* 51:9447-9463.
- Toranza, C., C. Lucas, and M. Ceroni. 2019. Spatial distribution and tree cover of hillside and ravine forests in Uruguay: the challenges of mapping patchy ecosystems. *Agrociencia Uruguay* Accepted 10 Mayo 2019. In press.
- Trouet, V., and G. J. Van Oldenborgh. 2013. KNMI Climate Explorer: a web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. *Tree-Ring Research* 69:3-14.
- Tucci, C. E., and R. T. Clarke. 1998. Environmental issues in the la Plata basin. *International Journal of Water Resources Development* 14:157-173.
- Villagra, P. E., A. Vilela, C. Giordano, and J. A. Alvarez. 2010. Ecophysiology of *Prosopis* species from the arid lands of Argentina: What do we know about adaptation to stressful environments? Pages 321-340 *Desert Plants*. Springer.
- Villalba, R., and J. Boninsegna. 1989. Dendrochronological Studies on *Prosopis flexuosa* DC. *IAWA journal* 10:155-160.

Licenciamiento

Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. (CC BY-NC-ND)