

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE POSGRADO**

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

“MAGÍSTER EN ESTADÍSTICA APLICADA”

TEMA:

RECONSTRUCCIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS A
TRAVÉS DE LA DENDROCRONOLOGÍA EN EL SUR DEL
ECUADOR

AUTOR:

KELLY YOHANNA PEÑA MORENO

Guayaquil - Ecuador

2022

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue reconstruir los datos del clima e hidrológicos a través de métodos dendrocronológicos; con el fin de identificar su variabilidad a lo largo de la historia. El enfoque de esta investigación fue cuantitativo e histórico predictivo. Los anillos de los árboles se midieron utilizando el lintab 6, la cronología se construyó utilizando el paquete dplR en R. Para la imputación multivariante de datos climáticos e hidrológicos, se aplicó un modelo de regresión lineal. La cronología mostró un alto valor en la Señal de la Población Expresada y en la Sensibilidad media. En la reconstrucción de datos climáticos respecto a temperatura se obtuvo una correlación media y la cronología, la cronología obtuvo un coeficiente de determinación y un valor p aceptable. En la reconstrucción de datos hidrológicos, los estadísticos calculados no cumplieron con los supuestos del modelo para ser aceptado. En la propuesta de creación de un paquete hidrológico, se propuso el paquete Treestreamflow en el software R. La investigación permite concluir que hay relación entre la temperatura y la cronología. Por otro lado, la reconstrucción de datos hidrológicos y la cronología de los árboles no mostró relación. En la reconstrucción de datos del clima se puede evidenciar periodos de sequía y altas precipitaciones, donde lo asociamos a la migración masiva de aquella época y en los noventa a la presencia de El Niño.

Palabras claves: Anillos de los árboles, dendrocronología, reconstrucción de clima, modelo de regresión lineal.

ABSTRACT

The objective of this research was to reconstruct climate and hydrological data through dendrochronological methods; in order to identify its variability throughout history. The focus of this research was quantitative and historical predictive Tree rings were measured using lintab 6, the chronology was built using the dplR package in R. For the multivariate imputation of climatic and hydrological data, a linear regression model was applied. The chronology showed a high value in the Signal of the Expressed Population and in the average Sensitivity. In the reconstruction of climatic data with respect to temperature, an average correlation and chronology were obtained, the chronology obtained a coefficient of determination and an acceptable p-value. In the reconstruction of hydrological data, the calculated statistics did not meet the assumptions of the model to be accepted. In the proposal to create a hydrological package, the Treestreamflow package was proposed in the R software. The research allows to conclude that there is a relationship between temperature and chronology. On the other hand, in the reconstruction of hydrological data and the chronology of the trees did not show relationship. In the reconstruction of climate data, periods of drought and high rainfall can be evidenced, where we associate it with the massive migration of that time in the sixties decade and in the nineties the presence of El Niño.

Keywords: Tree rings, dendrochronology, climate reconstruction, linear regression model.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios y a mi familia.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento está dedicado a mi familia, a mis profesores de la universidad. Agradezco a mi tutora por haberme guiado, por su paciencia en este trabajo investigativo. Le doy las gracias al INAMHI por facilitarnos la información climática e hidrológica para llevar a cabo la investigación. Finalmente agradezco a los directivos de la Reserva Natural Laipuna por permitirme coleccionar los datos.

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Titulación, me corresponde exclusivamente y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría. El patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.



Firmado electrónicamente por:
KELLY
PENASHELMADEEGMAIL
COM MORENO

Kelly Yohanna Peña Moreno

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Omar Honorio Ruiz Barzola PhD
PRESIDENTE

Mariela González Narváez
TUTOR

Francisco Antonio Moreira Villegas Master
DOCENTE EVALUADOR

ABREVIATURAS O SIGLAS

AC1	Autocorrelación de primer orden
CE	Coefficiente de Error
ENSO	Oscilación del Sur de El Niño
DAP	Diámetro a la altura de pecho
F	Estadístico F
DW	Durbin - Watson
INAMHI	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
RE	Error de reducción
r ²	Varianza explicada
RWI	Índice del ancho de los anillos
DPLR	Dendrochronological program in R
EPS	Expressed population signal
Glk	Gleichlaufigkeit
IPCC	Intergovernmental Panel On Climate Change
Ms	Mean sensitivity
Rbar	Correlation between trees
RWI	Ring Width Index

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Descripción del problema.....	2
1.3. Objetivos	4
1.4. Alcance.....	4
CAPÍTULO 2	5
2. MARCO TEÓRICO	5
CAPÍTULO 3	14
3. METODOLOGÍA.....	14
3.1. Área de estudio.....	15
3.1.1. Selección, preparación de la muestra y medición de los anillos	16
3.1.2. Construcción de las cronologías	16
3.2. Métodos multivariante en la reconstrucción climática e hidrológica.....	17
3.2.1. Reconstrucción de datos climáticos.....	17
3.2.2. Reconstrucción de datos del caudal.....	17
3.3. Desarrollo del paquete treestreamflow.....	18
CAPÍTULO 4	20
4. RESULTADOS	20
CAPÍTULO 5	33
5. CONCLUSIONES.....	33
6. RECOMENDACIONES	33
7. Referencias.....	38

LISTADO DE FIGURAS

3.1.	Diagrama de la metodología	14
4.2.	Cronología master de <i>H. crisanthus</i>	21
4.3.	Temperatura regional de Macará	22
4.4.	Precipitación regional en Macará	23
4.5.	Correlación de precipitación y temperatura con cronología por dcc	24
4.6.	Reconstrucción de temperatura 1785-2022.....	27
4.7.	Serie regional del caudal de Macará	28
4.8.	Correlación de caudales con cronología master	29
4.9.	Reconstrucción de datos hidrológicos en Macará	30

LISTADO DE TABLAS

4.1.	Reporte de series anuales de los anillos de los árboles	20
4.2.	Estadísticos de la cronología master de <i>H. crisanthus</i>	21
4.3.	Estadísticos de series regionales de temperatura y precipitación.....	22
4.4.	Estadísticos de calibración y habilidad de la cronología y temperatura....	24
4.5.	Estadísticos de calibración y habilidad de la cronología y precipitación ...	25
4.6.	Estadísticos del modelo en la reconstrucción temperatura	26
4.7.	Estadísticos de serie regional del caudal de Macará	28
4.8.	Estadísticos de la reconstrucción de datos hidrológicos.....	30

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El cambio climático se ve reflejado en el crecimiento radial de los bosques del hemisferio norte y sur, por la sensibilidad que muestran en su dinámica de crecimiento (Cullen et al., 2001). El cambio del clima en los trópicos y subtropicos ha incrementado en la última década (Deb et al., 2018). Según Locosselli et al. (2020) las altas temperaturas sobre los 25,4°C reducen la longevidad del recurso forestal en los trópicos, en cambio en las zonas templadas los árboles crecen más. Los bosques tropicales cumplen un papel importante ante el cambio del clima y en la dinámica de los caudales (Amankwah, 2019). Según Galleguillos et al. (2021) indican que en una investigación en Chile determinaron que plantaciones con especies nativas incrementan el rendimiento hídrico del caudal y por ende mitigan los efectos del cambio climático. El cambio climático afecta el nivel de escorrentía en los caudales (Ndhlovu & Woyessa, 2021). En Brasil, medidas como la restauración de los bosques e hidrológica han ayudado al mantenimiento hidrológico del suelo (Pereira et al., 2021). El número limitado de investigaciones dificultan una buena gestión hídrica, motivo por el cual no se puede hacer predicciones a escala regional en el Ecuador. Crespo et al. (2011) en su estudio muestra que hay una estrecha relación en las respuestas de lluvia-escorrentía con patrones de suelo clima y vegetación. Con el desarrollo de una cronología maestra de 254 años se pudo determinar la sensibilidad del crecimiento de los árboles frente las precipitaciones y a los periodos de sequías (Chen et al., 2021). Los árboles presentan estrategias de supervivencia frente a los efectos del cambio climático, Butz et al. (2017) en su estudio determinaron que los árboles de Laipuna-Macará mostraron cambios en su anatomía de la madera y la fenología de las hojas por la presencia de la precipitación y la sequía. Pucha-Cofrep (2015a) realizó una reconstrucción climática de 203 años en la especie *B. graveolens*, en la Reserva Natural Laipuna en el sur del Ecuador. El desarrollo de reconstrucciones climáticas es posible aplicando un modelo de regresión lineal

simple (Álvarez et al., 2021), regresión de componentes principales (Fletcher et al., 2019), modelo de regresión lineal stepwise (Bukhary et al., 2021). Por otro lado, las reconstrucciones hidrológicas lo hacen a partir de una regresión lineal simple, múltiple stepwise (Anderson et al., 2019), técnica de estimación no simétrica Bootstrap (Amoroso et al., 2018) y por algoritmos de aprendizaje inteligente bosque aleatorio (Li et al., 2019). Los estadísticos dendrocronológicos más usuales son: Señal de la población expresada (EPS), sensibilidad media (Ms), correlación entre árboles y dentro del árbol (Rbar) (Pucha-Cofrep et al., 2015). Finalmente, este estudio reconstruirá el clima y el caudal a través de datos predictivos que serán imputados por modelos predictivos.

1.2. Descripción del problema

Las cronologías a través de los anillos de los árboles sirven para realizar diferentes tipos de reconstrucciones ambientales y poder conocer patrones históricos (Pearl et al., 2020). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) considera a los anillos de árboles como registros pre-instrumentales, que son claves para diferentes tipos de reconstrucciones históricas (Babst et al., 2017). Estudios dendrocronológicos permiten conocer la dinámica de crecimiento en el bosque (Anderson-Teixeira et al., 2022). Según Liu et al. (2022) manifiestan que a través de las reconstrucciones de hidrológicas, se puede conocer como el cambio climático está afectando gravemente este recurso y que estos hallazgos contribuyen para que haya una buena gestión de los recursos hídricos. La fisiología de los árboles se ve afectado por los efectos del cambio de clima, los anillos en su estructura interna revelan estos efectos y por ende esto induce a que se pierda información histórica (Marqués et al., 2022). A través de métodos predictivos se puede conocer la relación del recurso forestal con los factores climáticos (Anderson-Teixeira et al., 2022). Los trópicos albergan abundante biodiversidad, misma que está siendo afectada Surayothee et al. (2021), indica que hay pocas investigaciones sobre el potencial dendrocronológico en los trópicos. Los efectos del cambio del clima afectan el flujo hídrico y estos a su vez la dinámica ecológica en las especies endémicas de la Reserva Natural Laipuna (Gebauer et al., 2020). La Reserva Natural Laipuna es un bosque seco tumbesino que se caracteriza por tener dos estaciones marcadas, una seca y una

húmeda (Haug et al., 2021), la cual colinda con el Río Catamayo en el cantón Macará (Pucha-Cofrep et al., 2015). En el bosque seco de Laipuna se estudió la estructura anatómica de la especie *H. chrysanthus*, donde se determinó que su diámetro radial es muy sensible frente a los factores climáticos (Volland-Voigt et al., 2011). Según Raffelsbauer et al. (2019) manifestaron que realizaron un monitoreo del crecimiento radial en las especies *H. chrysanthus* y *Cedrela montana* para determinar el estrés frente a la sequía por efectos del cambio climático. Según Bendix y Beck (2016) mencionan que a través del planteamiento de estrategias ambientales, se puede mitigar la presión que sufren los bosques en la Reserva Natural Laipuna. En este sentido, las reconstrucciones a partir de los anillos de los árboles son usadas para poder identificar episodios de inundaciones y de extensos periodos de sequías a través de la correlación de cronologías de los árboles con datos climáticos (Macedo et al., 2021) y de escurrimiento de caudales (Lucas et al., 2022). Teniendo en consideración que el clima y los afluentes de ríos cambian, por actividades antropogénicas, cambio de usos de la tierra y el impacto ambiental al ecosistema, nos vemos incentivados en conocer la historia del recurso hídrico, la variabilidad climática, con la ayuda de la ciencia dendroclimatología y dendrohidrología (Bukhary et al., 2021). A través de la reconstrucción climática e hidrológica en Laipuna – Macará se podrá conocer la variabilidad a larga escala. Además, las cuencas guardan historia de las sequías, y es importante proteger estas fuentes hídricas (Bukhary et al., 2021). Paquetes estadísticos en el software libre R permiten alcanzar este tipo de reconstrucción de datos climáticos a través del paquete TreeClim (Zang & Biondi, 2015), el paquete BootRes (Zang & Biondi, 2013) y para reconstrucción de datos de caudal usan la función de correlación y luego se modela por regresión lineal simple (Nicault et al., 2014). Los paquetes estadísticos en el software libre R se caracterizan por cumplir criterios formales de calidad (Theußl et al., 2011). Por consiguiente, para llevar a cabo este trabajo de investigación nos guiaremos en la siguiente pregunta de investigación.

1. ¿Cómo a través de la modelación de la reconstrucción de datos del clima e hidrológica se podrá conocer la variabilidad a larga escala?

1.3. Objetivos

1. Objetivo General

- Reconstruir los datos del clima e hidrológicos a través de métodos dendrocronológicos; con el fin de identificar su variabilidad a lo largo de la historia.

2. Objetivos específicos

- Medir los anillos de los árboles en la mesa de medición Lintab 6 para construir una cronología de la especie *Handroanthus chrysanthus* (Jacq.)
- Aplicar métodos de imputación multivariante dendrocronológicos en la reconstrucción de datos climáticos e hidrológicos
- Proponer un paquete estadístico para modelar la reconstrucción de datos hidrológicos

1.4. Alcance

Este estudio se enfoca en el análisis de la variabilidad de los datos climáticos e hidrológicos a larga escala, a través de una reconstrucción histórica en la Reserva Natural "Laipuna" en el Cantón Macará en el sur del Ecuador, para el período de 1785 al 2022. Para ello, se usó núcleos de madera de la especie *H. chrysanthus* para la construcción de series dendrocronológicas. Los datos climáticos e hidrológicos fueron provistos por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Una vez que se construye la cronología master se realiza una correlación con las variables de clima e hidrológicos. Después de calcular los estadísticos de correlación se corre un modelo de regresión lineal simple para obtener los datos predictivos. La investigación se desarrolló en un periodo de 5 meses y a continuación se presenta la metodología y todo el proceso de desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Dendrocronología en los trópicos

Especies forestales cercanas al Ecuador son más vulnerables frente a la variabilidad del cambio climático en relación con las especies del norte (Camarero et al., 2021). Estudios realizados a través de los anillos de los árboles, revelan que los efectos de la temperatura influyen en la longevidad de las especies tropicales (Locosselli et al., 2020), los trópicos son vulnerables frente a las sequías (Raffelsbauer et al., 2019). Los anillos de los árboles muestran su dinámica de crecimiento frente a factores ambientales, los anillos se caracterizan por ser distintivos o visibles, estos se forman anualmente y está asociado al parénquima marginal formado (Worbes et al., 2017). Los árboles que crecen en las zonas templadas se caracterizan por tener anillos distintos o visibles y los árboles que crecen en los trópicos presentan anillos menos visibles e incluso mayor cantidad de anillos falsos, debido a la fluctuación climática (Rozendaal & Zuidema, 2011). Las características anatómicas de la madera muestran una alta sensibilidad frente a las severas sequías (Islam et al., 2019). Según Gebrekirstos et al. (2014) explicaron que los anillos de los árboles registran la historia ambiental en los trópicos. Los estudios relacionados a los anillos de los árboles en los trópicos se les considera un gran desafío y las investigaciones en este campo son limitadas (Surayothee et al., 2021). En Chile, se utilizan los anillos de los árboles para realizar estudios dendroquímicos que ayudan a conocer la historia de las erupciones volcánicas a larga escala (Bertin et al., 2021). Los anillos de los árboles registran historia del estrés causado por las sequías, esto se ve reflejado en la fisiología de las hojas (Barichivich et al., 2021). Según Bukhary et al. (2021) manifiestan que con las series temporales de cronologías fue posible reconstruir la historia hidrológica de los caudales, capa de nieves y precipitación. Según Granato-Souza et al. (2020) construyeron una cronología de 246 años desde la especie *C. odorata*, donde lograron realizar una reconstrucción hidrológica en la Amazonía ecuatorial en Brasil. A través de la relación de las cronologías y datos

de clima referente a temperatura Lara et al. (2020), manifestaron que en su estudio se pudo reconstruir 5680 años de temperatura en Chile. Las especies forestales *B. graveolens* y *Prosopis sp.* mostraron potencial dendroclimático en el norte del Perú (Rodríguez et al., 2005). Pucha-Cofrep (2015) desarrolló una reconstrucción de precipitación de más de un siglo en la especie *B. graveolens* y *M. tintoria* en Macará en el sur del Ecuador. Los anillos de los árboles son muy sensibles frente a los factores climáticos Raffelsbauer et al. (2019), en su estudio determinaron que la especie *H. chrysanthus* mostró variabilidad en el crecimiento radial.

2.2. Desarrollo de las cronologías

Según Marqués et al. (2022) manifestaron que los núcleos colectados fueron a partir de 22 árboles al azar, y la colección de la muestra se la hace utilizando un taladro incremental de Pressler de 5mm de diámetro (Pucha-Cofrep et al., 2015b). La colección de los núcleos de los árboles se la hace en dos direcciones transversales del árbol de norte a sur (Lara et al., 2020). Normalmente, se colecta dos núcleos por árbol (Camarero et al., 2021). Las muestras se colectan a la altura de pecho de 1.30 m, luego se los coloca en soporte plásticos para ser trasladados al laboratorio, luego montarlos en canaletas de maderas y ser lijados por finas lijas (Islam et al., 2019). Según Maes et al. (2017) indicaron que los núcleos de madera se proceden a ser lijados con diferentes números de lijas para poder delimitar claramente los anillos de los árboles. La visualización de los anillos de los árboles también lo hacen a través de microscopios de escáner laser confocal (Balzano et al., 2019). Usualmente, para medir los anillos de los árboles, se utiliza la mesa de medición Lintab, misma que provee mediciones en crecimiento radial, de anillos por anillo (Brienen et al., 2021). La mesa de medición Lintab tiene una precisión de 0.001 mm (Surayothee et al., 2021). Para la observación de los anillos de los árboles se usa un microscopio binocular Leica (Worbes et al., 2017). A continuación, a través de métodos dendrocronológicos se realiza la estandarización de la serie temporal de la cronología (Álvarez et al., 2021). Con la especie *Austrocedrus chilensis*, Amoroso et al. (2018) construyeron una cronología a través de análisis estadísticos en el programa ARSTAN. En el desarrollo de la cronología master en la especie *Pinus ponderosa*, la verificación y

la precisión de las mediciones realizadas fue a través del uso del software COFECHA (Fletcher et al., 2019). El procesamiento de las mediciones de los anillos de los árboles fue utilizando el paquete de dendrocronología DplR en el software libre estadístico R (Marqués et al., 2022).

2.3. *Handroantus chrysanthus*

H. chrysanthus es una especie forestal en estado de conservación crítico, debido a la sobreexplotación y al mal manejo forestal por parte de las comunidades (Medina Arroyo et al., 2020). *H. chrysanthus* es una especie forestal nativa de Ecuador, de alto valor maderero y de sucesión ecológica media (Schüßler et al., 2016). El recurso forestal tumbesino del suroeste del Ecuador se encuentra en peligro de extinción, Espinosa et al. (2018) a través de los análisis dendrocronológicos determinaron que *H. chrysanthus* muestra una alta relación positiva frente a la precipitación. *H. chrysanthus*, se caracteriza por ser caducifolio de hoja ancha de bosques secos, mientras que Volland-Voigt et al. (2011) indicaron que en relación al análisis de anatomía de la madera, se muestran los anillos de los árboles anuales bien definidos. *H. chrysanthus* es una especie de la familia Bignoniaceae de hoja caduca y presentó sensibilidad en el crecimiento radial frente a los efectos de la sequía (Raffelsbauer et al., 2019).

2.4. Estadísticos de las cronologías

La datación cruzada se la hace de una forma visual usando el software TSAP-Wing y Cofecha (Surayothee et al., 2021). Por otro lado, a través el programa ARSTAN se puede conocer la consistencia interna de la cronología master siguiendo una serie de procesos (Granato-Souza et al., 2019; Li et al., 2019). En este sentido, se aplica un método de detrending para eliminar tendencias causada por la edad o por procesos ontogénicos que pasaron los árboles (Brienen et al., 2021). Por lo tanto, el detrending nos orienta a conocer la magnitud de la tendencia de la cronología de los anillos de los árboles y mejorar la señal climática (Amoroso et al., 2018). La aplicación de los métodos de detrending nos da como resultado la presencia de las variables más predictoras (Anderson-Teixeira et al., 2022). Además, la estandarización de las cronologías de los anillos de los árboles es posible usando un spline de suavizado cúbico en el paquete

DplR (Surayothee et al., 2021). Otro método de detrending muy común en la dendrocronología es el de curva exponencial negativa en el programa ARSTAN (Macedo et al., 2020). La aplicación de estos suavizados eliminan tendencias no climáticas, que son causadas por la edad y por la dinámica de crecimiento del recurso forestal (Fletcher et al., 2019). Los estadísticos que miden la calidad de la cronología son: correlación media entre series individuales (R_{bar}), señal de la población expresada (EPS) (Camarero et al., 2021), sensibilidad media (M_s) (Surayothee et al., 2021; Chen et al., 2021; Ferrero et al., 2015)

2.5. Series temporales de clima hidrológicos en la dendrocronología

Para el desarrollo de una reconstrucción de clima, los datos climáticos son colectados desde estaciones nacionales de meteorología, normalmente estos datos presentan datos perdidos, después son imputados desde otras estaciones meteorológicas aplicando un modelo de regresión lineal (Crispín-DelaCruz et al., 2022). Los datos climáticos de precipitación y temperatura mensuales y anuales, se los obtiene de estaciones meteorológicas Landshuter et al. (2020) que en ocasiones muestran datos faltantes, los cuales se llenan a través de valores promedios de otros años. Las series anuales de caudales se colectan desde redes de datos hidroclimáticos nacionales para luego ser correlacionadas con las cronologías de los anillos de los árboles, ya que la escala de los datos hidrológicos son anuales como las cronologías (Patskoski & Sankarasubramanian, 2018). Según Formetta et al. (2021) mencionaron que los anillos de los árboles son considerados indicadores de reconstrucción hidrológica. Las estaciones hidrológicas no colectan información de los caudales a larga escala, es aquí donde las cronologías cumplen un rol importante en el desarrollo de la reconstrucción de la esorrentía de los caudales (Anderson et al., 2019). Según Galleguillos et al. (2021) determinaron que los caudales disminuyen su disponibilidad de agua por efectos del cambio climático en las cronologías de *Pinus radiata*. Las series mensuales estacionales de los caudales se comparan con la cronología master para poder conocer la relación que presentan entre sí (Ferrero et al., 2015).

2.6. Oscilación del Sur de El Niño (ENSO) en la dendrocronología

La variabilidad del clima está dada por la Oscilación del Sur de El Niño (ENSO por sus siglas en inglés), estos episodios históricos quedan registrados en reconstrucciones climáticas, donde se determina la relación que existe entre las variables climáticas y las cronologías de los anillos de los árboles (Pompa-García & Némiga, 2015). En las regiones tropicales, el ENSO influye en el crecimiento radial de los árboles, en la variabilidad del clima y en las anomalías en el flujo de la escorrentía (Coulthard et al., 2021). Los datos obtenidos en reconstrucciones climáticas muestran una relación con la variabilidad climática del ENSO en el Pacífico (Lara et al., 2020). La señal ENSO, se vio registrada en los anillos de los árboles de Brasil y Chile (Rigozo et al., 2004). En Perú, a través de una cronología de 400 años, se encontró una fuerte relación positiva en los anillos de los árboles y el ENSO en el año actual (Crispín-DelaCruz et al., 2022). A través de las cronologías de *B. graveolens* y *M. tintoria*, se determinó que el ENSO muestra una periodicidad de 2-4 años presente en el pacífico sur (Pucha-Cofrep et al., 2015a). La variabilidad de la precipitación en el bosque seco de Laipuna esta influenciada por la presencia del fenómeno del ENSO (Landshuter et al., 2020).

2.7. Reconstrucción climática

La correlación de las cronologías de los anillos de los árboles y la variable climática temperatura, mostró valores significativos, con los que fue posible realizar una reconstrucción climática de 5680 años (Lara et al., 2020). En Sudamérica, en Perú a través de la especie *Polylepis tarapacana* se desarrolló una reconstrucción de precipitación con la finalidad de conocer la sensibilidad de crecimiento de los anillos radiales frente a la variable clima (Crispín-DelaCruz et al., 2022). En el desarrollo de una reconstrucción de nieve, se determinó que las cronologías alcanzaron correlaciones positivas con la precipitación en la estación fría (Coulthard et al., 2021). Según Pompa-García & Némiga (2015) analizaron que los anillos de los árboles presentaron un alto grado de sensibilidad en el crecimiento frente a la variabilidad de la precipitación. Fletcher et al. (2019) en su estudio realizaron dos reconstrucciones de precipitación regionales en la especie *Pinus ponderosa* de 600 años, donde se determinó la correlación positiva de precipitación con las cronologías de los anillos. La temperatura media anual y la

topografía del sitio (pedregosidad) influyen en el crecimiento radial de las especies (Cueva Ortiz et al., 2019).

2.8. Reconstrucción de caudal

Las reconstrucciones hidrológicas son usadas para conocer la variabilidad anual o estacional de la esorrentía a larga escala (Lucas et al., 2022). Las cronologías que se usaron para desarrollar la reconstrucción hidrológica, estaban dentro de los 200 km a la redonda del caudal (Patskoski & Sankarasubramanian, 2018). El coeficiente de correlación de la cronología y los datos hidrológicos fue significativo (Formetta et al., 2021). Las reconstrucciones hidrológicas son importantes ya que a través de esta información se puede conocer la variabilidad del suministro de agua a lo largo de la historia (Bukhary et al., 2021). Con el uso de cronologías fue posible reconstruir dos siglos de la esorrentía del caudal, donde los datos antes del periodo instrumental mostraron variabilidad en el volumen del agua en Canadá (Nicault et al., 2014). Según Lucas et al. (2022), en su estudio lograron reconstruir 115 años de datos hidrológicos a través de los anillos de los árboles, donde pudieron evidenciar episodios de inundaciones extremas por la presencia de El Niño en la década de los 70 en Chile.

2.8.1. Estadísticos para la reconstrucción de clima e hidrológicos

Para poder conocer la relación entre la cronología de los anillos de los árboles y la variable climática o la variable hidrológica, se lo realiza a través de la correlación de Pearson. La fórmula del coeficiente de correlación de Pearson (r), está representada por la siguiente formula:

$$r = \frac{\sum(x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_t - \bar{x})^2 \sum(y_t - \bar{y})^2}}$$

x_t = Índice del ancho de los anillos (RWI)

y_t = Temperatura (mm), precipitación (mm) o caudal m³/seg

Donde x_t está representado por el índice del ancho de los anillos desde la cronología master en un tiempo t , y_t representa a la variable climática precipitación, temperatura o caudal en un año t . Según Cleaveland & Stahle

(2004), mencionaron que \bar{x} e \bar{y} representan los promedios de los anillos de los árboles y la variable clima o caudal. Por consiguiente, cuando queremos conocer la relación de la cronología de los anillos de los árboles entre los datos de la serie del caudal también aplicamos correlación de Pearson. De acuerdo a la reconstrucción climática, los estadísticos calculados para el periodo de verificación, al aplicar el modelo de regresión lineal son los siguientes estadísticos: Error de reducción (RE), Coeficiente de error (CE), mismos que se utilizan para medir la habilidad de la cronología (Fletcher et al., 2019). Además, en el proceso de calibración se calculan los siguientes estadísticos: Valor-F (F), varianza explicada (R^2), varianza explicada ajustada por pérdida de grados de libertad (R^2) y Durbin–Watson (DW) (Pucha-Cofrep et al., 2015). En el desarrollo de la reconstrucción de caudal, se aplica el modelo de regresión lineal simple, mismo que se caracteriza por presentar los estadísticos de p-valor y el nivel F (Anderson et al., 2019). Por otro lado, Muñoz et al. (2020) calcularon los valores observados y predictivos en la reconstrucción de caudal en Chile y fueron evaluados a partir de los siguientes estadísticos: Coeficiente de determinación, reducción de error, la prueba de Durbin–Watson (DW).

2.8.1. Modelos de reconstrucción climática e hidrológica

Según Lara et al. (2020) para conocer la influencia de la temperatura como principal impulsor climático en el crecimiento radial de los anillos de los árboles, aplicaron una ecuación de reconstrucción, modelada a través de una regresión lineal simple, misma que está conformada con las variables de temperatura y anillos de los árboles. Por otro lado, para conocer la relación que existe en el clima y los anillos de los árboles, calculan el coeficiente de correlación en softwares de dendrocronología (Pompa-García & Némiga, 2015). A través del modelo de regresión lineal simple, se pudo estimar la variable de respuesta o dependiente y a partir de la variable predictora o independiente x . La regresión lineal estima la máxima verosimilitud (Bürger et al., 2006).

$$\hat{y}_t = \beta_0 + \beta_1 x_t$$

\hat{y}_t = Valor predicho de la variable temperatura en un año t

β_0 = Intersección de la recta con el mejor ajuste

β_1 = Pendiente de la recta por la variable del anillo de árbol en el mismo año t

La calibración de la cronología de los anillos de los árboles con la serie temporal de temperatura o precipitación, está dada de la siguiente forma: la variable y es la serie temporal de temperatura o precipitación provista por un instituto hidrológico y la variable x es la cronología master de los anillos de los árboles. A partir de esta ecuación de regresión lineal simple se obtienen los valores cuantitativos predictivos del clima en función de la cronología de los anillos de los árboles (Cleaveland & Stahle, 2004). Para modelar la reconstrucción de datos hidrológicos, se lo realiza a través del modelo de regresión lineal simple, donde la serie temporal hidrológica es la variable dependiente y la cronología de los anillos de los árboles es la variable independiente (Anderson et al., 2019; Muñoz et al., 2020). Por otro lado, Ferrero et al. (2015) manifestaron que aplicaron una regresión de componentes principales con la variable hidrológica y la variable cronológica, en la reconstrucción de caudal del río Bermejo en Argentina. A través de técnicas de estimación de Kernel, utilizando una función Gaussiana en el software R, se pudo determinar los cambios de la escorrentía a lo largo del tiempo, se analizaron la frecuencia de sequías y los eventos de precipitaciones (Muñoz et al., 2020). En otros casos, en las reconstrucciones de datos hidrológicos también aplican técnicas no paramétricas a través del modelo de regresión Random Forest, mismo que se caracteriza por el análisis de la función de clasificación y de regresión (Li et al., 2019). Finalmente, en este estudio de reconstrucción de caudal se aplicó un modelo predictivo de regresión lineal simple, entre la variable hidrológica y cronología de los anillos de los árboles. En este sentido, y viene a ser la variable dependiente o respuesta (caudal) y la variable x o independiente viene a ser la cronología de los anillos de los árboles.

$$\hat{y}_t = \beta_0 + \beta_1 x_t$$

\hat{y}_t = Valor predicho de la variable caudal en un año t

β_0 = Intersección de la recta con el mejor ajuste

β_1 = Pendiente de la recta por la variable del anillo de árbol en el mismo año

2.9. Paquetes estadísticos de reconstrucción de datos climáticos e hidrológicos

Para llevar a cabo una reconstrucción climática a larga escala a través de los anillos de los árboles, se utiliza el paquete TreeClim que es un paquete climático en el software R (Zang & Biondi, 2015). Según Zang & Biondi (2013), para poder conocer la correlación existente de las cronologías con los factores ambientales utilizó en paquete BootRes en el software R. Por otro lado, para lograr una reconstrucción de caudal (Nicault et al., 2014) aplicaron un análisis de correlación y luego un modelo de regresión lineal simple en el software libre R. La aplicación de estos paquetes estadísticos de reconstrucción determinan la sensibilidad que presentan los anillos de los árboles frente al estrés por calor y humedad (Chhin et al., 2008), y además están caracterizados por cumplir criterios estadísticos de calidad (Theußl et al., 2011).

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

En el siguiente diagrama se detalla los pasos a seguir en todo el proceso de la reconstrucción de datos climáticos e hidrológicos (Figura 1)

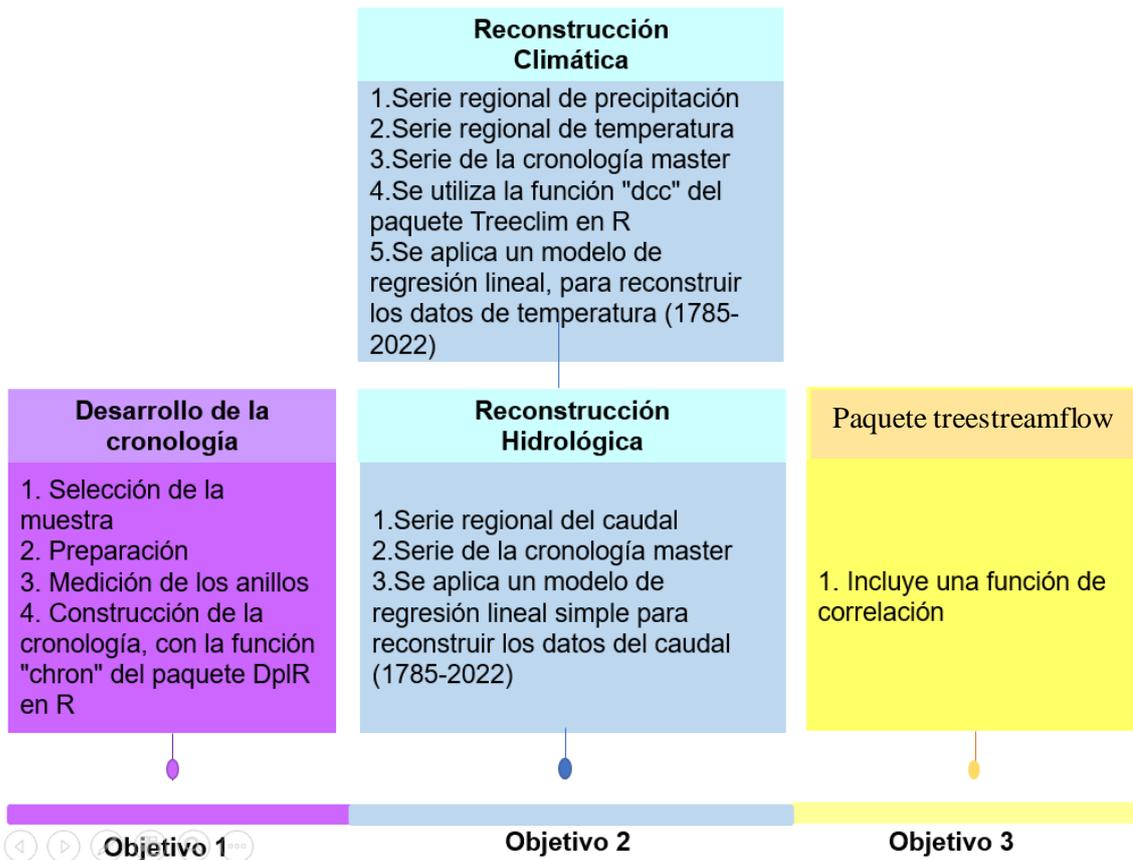


Figura 1. Diagrama de la metodología para alcanzar los objetivos

3.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la reserva Natural “Laipuna”, la misma que se caracteriza por ser un bosque seco tropical premontano y se ubica en las siguientes coordenadas geográficas (4° 22' S–79° 90' W) en el cantón Macará al sur del Ecuador (Haug et al., 2021). La Reserva Natural Laipuna colinda con el río Catamayo (Spannl et al., 2016). Laipuna cuenta con una topografía montañosa que oscila entre los 600 y 1450 msnm, la presencia de precipitación aumenta según la altitud y por ende la humedad (Butz et al., 2017). Laipuna presenta una precipitación anual de 350 a 800 mm y una temperatura media anual de 23.7 °C (Butz et al., 2017). Varios estudios relacionados al análisis de los anillos de los árboles como indicadores climáticos se llevan a cabo en la Reserva Natural Laipuna (Pucha-Cofrep et al., 2015b; Raffelsbauer et al., 2019; Volland-Voigt et al., 2011). En los meses de enero hasta abril se la considera como la estación lluviosa y los meses de mayo a diciembre como la estación seca de Laipuna (Landshuter et al., 2020). Las especies forestales que pertenecen a este ecosistema son: *Loxopterygium huasango* (Spannl et al., 2016), *B. graveolens* y *M. tintoria* (Pucha-Cofrep et al., 2015b), *Eriotheca ruizii*, *Ceiba trichistandra*, *Erythrina velutina* (Butz et al., 2017) , *C. odorata* y *H. chrysanthus* (Raffelsbauer et al., 2019). Según Bendix, J. and Beck (2016) manifestaron que este bosque seco tumbesino, está afectado por las acciones antropogénicas que realizan las comunidades y que a través de políticas como incentivos económicos protegerían el bosque. Las actividades antrópicas afectan la estructura y composición de bosque en la Reserva Natural Laipuna (Cueva Ortiz et al., 2019).

3.1.1. Selección, preparación de la muestra y medición de los anillos

La selección de la muestra se la realizó en 22 árboles en pie de la especie *H. chrysanthus*, a la altura de diámetro del pecho (1.30 m DAP). La extracción de la muestra fue con un barreno de incremento Pressler (Haglöf Sweden), de 5 mm de diámetro (Surayothee et al., 2021). La colección de la muestra fue en enero del año 2022. Un total de 44 núcleos fueron colectados desde árboles vigorosos, en dos direcciones norte y sur. Una vez colectados los núcleos de madera, se los colocó en finos soportes para poder trasladarlos. A continuación, se procedió a secar al aire libre, para luego pegarlos con goma en finas canaletas de madera (Camarero et al., 2021). Una vez montados los núcleos, se lijó con diferente tamaño de lijas, empezando desde la más gruesa a la más fina, con un tamaño de grano de 80-5000 (Macedo et al., 2020). Una vez visibles los anillos de los árboles al estereoscopio, se realizó las mediciones a cada uno de los núcleos. Las mediciones de los anillos de los árboles, se realizaron utilizando la mesa de medición LIMTAB 6, a través del software TSAP-Win con una precisión de medición de 0.001 mm (Chen et al., 2021).

3.1.2. Construcción de las cronologías

Se utilizó el paquete DplR para conocer la calidad del crossdating de las series temporales de los anillos de árboles (Pucha-Cofrep et al., 2015b). Además, se utilizó la función "corr.rwl.seg ()" para conocer la correlación de cada una de las series de los anillos de los árboles (Bunn, 2010). A continuación, se aplicó un método de detrending de Spline de suavizado cúbico a todas las series de los anillos de los árboles (Lucas et al., 2022). Los estadísticos que nos ayudaron a verificar la calidad de la cronología fueron: Señal de la Población Expresada (EPS), Correlación entre árboles (R_{bar} bt), Sincronía de crecimiento Gleichläufigkeit (glk), Autocorrelación de primer orden (AC1) (Islam et al., 2019). Finalmente, se construye la cronología master utilizando la función chron del paquete DplR en el software libre R (Hauray, 2021).

3.2. Aplicación de métodos de imputación multivariante dendrocronológicos en la reconstrucción climática e hidrológica

3.2.1. Reconstrucción de datos climáticos

La serie regional de temperatura y de precipitación se desarrolló a partir de un valor promedio de todas las series climáticas. Los datos climáticos fueron provistos por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Se generó una sola serie regional climática de temperatura y de precipitación a partir de 9 estaciones climáticas de Macará para el periodo 1964-2015. Las series climáticas pertenecen a las siguientes estaciones meteorológicas: Macará, Zapotillo, Saucillo, Alamor, Utuana, Sabiango, Catacocha, El Limo y Celica. Para conocer la relación de la cronología de los anillos de los árboles con las series climáticas, se utilizó el paquete TreeClim en el software R, a través de la función estadística de correlación dcc que determina la correlación entre el clima y la cronología (Zang & Biondi, 2015). A continuación, se utiliza la función skill, misma que determina la habilidad de la reconstrucción climática (Zang & Biondi, 2015). El modelo de regresión lineal simple aplicado en la reconstrucción climática fue validado a través de los siguientes estadísticos: Error de reducción (RE) y Coeficiencia de eficiencia (CE), mismos que al ser valores positivos indican la validez del modelo (Chen et al., 2021). Además, para concluir con la calidad de la reconstrucción climática se calcularon los estadísticos: Valor-F (F), varianza explicada (R^2), varianza explicada ajustada por pérdida de grados de libertad (R^2) y Durbin–Watson (DW) (Pucha-Cofrep et al., 2015a).

3.2.2. Reconstrucción de datos del caudal

Las cuatro series hidrológicas fueron promediadas con la finalidad de crear una sola serie hidrológica y así poder correlacionar la serie hidrológica con la serie de cronología de *H. chrysanthus*. Los registros hidrológicos de los caudales se los obtuvo desde el INAMHI, para los periodos 1964-2015. Las series hidrológicas colectadas fueron de cuatro ríos cercanos a la reserva Laipuna. Para la reconstrucción de los datos hidrológicos aplicamos un modelo de regresión lineal

simple (Muñoz et al., 2020), con el cual se consiguió hacer la imputación de datos hidrológicos a larga escala. La variable predictora o regresora fue la cronología de los anillos de los árboles de *H. chrysanthus* y la variable respuesta fue la serie regional hidro climática. Los estadísticos que nos ayudaron a determinar la calidad de la reconstrucción climática a partir del modelo de regresión simple fueron: Coeficiente de determinación, p-valor, estadístico F (Muñoz et al., 2020).

3.3. Desarrollo del paquete **treestreamflow**

El paquete estadístico de reconstrucción de datos hidrológicos presenta una función que sigue criterios formales de calidad (Theußl et al., 2011). El paquete se caracteriza por tener la siguiente estructura:

Nombre del paquete (treestreamflow)

Proceso para crear el paquete

- Hace clic en file
- Selecciona nuevo directorio
- En tipo de proyecto escoge paquete de R
- Finalmente, se dio un nombre al paquete (treestreamflow)

Siguiendo este proceso a través de RStudio, el resultado está compuesto por tres elementos:

- R/directory
- DESCRIPTION
- NAMESPACE

El paquete también incluirá un archivo de proyecto de RStudio `pkgnam.Rproj.`, mismo que hace que facilite su uso (Varela, 2015). Por otro lado, el archivo llamado **DESCRIPTION** cuenta con al menos el siguiente texto:

- Package: treestreamflow
- version: 0.1
- encoding: UTF-8 (García-Callejas & de la Cruz Rot, 2020)

Añadiendo y documentando el código

En el siguiente apartado se presentan los pasos para la ejecución del código que realiza el cálculo del coeficiente de correlación entre los anillos de los árboles y la variable hidrológica. La documentación del código se la realizó a través de

roxygen2, estos archivos documentados se los muestra en el capítulo de resultados (García-Callejas & de la Cruz Rot, 2020). La documentación está formada por caracteres especiales al inicio de las líneas:

(#)	Coeficiente de correlación (Título de la función)
@param	Argumento de la función
@return	Devuelve la función de correlación
@export	La función se podrá utilizar
@examples	Aquí se incluye ejemplos

Con las funciones ya documentadas, se procede a realizar la documentación con `devtools::document()` (García-Callejas & de la Cruz Rot, 2020). Posteriormente, se genera un nuevo archivo que se guarda en **NAMESPACE**, de la misma forma crea un archivo en formato `.Rd` el que se crea dentro de la subcarpeta **man** (Chambers, 2008).

Creando el paquete

Para la creación del paquete `treestreamflow` se teclea la siguiente instrucción:

- `dev::build()`

Para instalar el paquete `treestramflow` usamos el comando:

- `devtools::install()` (García-Callejas & de la Cruz Rot, 2020)

Para corroborar que nuestro paquete se ha instalado correctamente, corremos la función de correlación y digitamos ayuda de la siguiente forma:

- `library(treestreamflow)`
- `treestreamflow`
- `? treestreamflow`

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1. Medición de los anillos de los árboles y construcción de la cronología de la especie *H. chrysanthus* (Jacq.)

El reporte de los anillos de los árboles generó un total de 238 anillos, al que se le denomina rango según el paquete DplR, esto significa que al construir la cronología master en la siguiente etapa de construcción se contará con una cronología de 238 años, misma que abarca el periodo 1785-2022. El núcleo mas pequeño y con menor cantidad de años en relación al mas grande fue de 133 años y el núcleo más grande o con mayor cantidad de anillos fue de 237 años. El total de anillos medidos en la mesa de medición LIMTAB 6 fue de 9224 anillos a partir de los 44 núcleos. La longitud promedio de los anillos de los árboles fue de 209.63 μ . La Intercorrelación entre las series fue de 0.34. El valor de autocorrelación de primer orden fue de 0.31. Respecto a anillos ausentes no se registró alguno.

Tabla 1

Reporte de las series anuales de los anillos de los árboles

Número de árboles	22
Número de las series datadas	44
Número de mediciones	9224
Promedio de la longitud de las series	209.63
Rango	237
Periodo	1785-2022
Intercorrelación media de las series	0.34
AR1	0.31
Anillos ausentes	-

En la reproducción de datos de la cronología en la especie *H. chrysanthus* para el periodo 1785-2022, el método que más aportó fue detrending Spline de suavizado cúbico. Los estadísticos de la cronología muestran que la sensibilidad de la cronología fue 0.62, el Glk fue 0.54, los resultados para el Rbar.wt y Rbar.bt

fueron 0.49 y 0.11 respectivamente. Finalmente, el valor del EPS en la cronología fue de 0.8 (Tabla 2).

Tabla 2

Estadísticos de la cronología de los anillos de los árboles de *H. chrysanthus*

Ms	0.62
Glk	0.54
Rbar.wt	0.49
Rbar.bt	0.11
EPS	0.8

Nota: Ms (sensibilidad media), Glk (sincronía de crecimiento Gleichläufigkeit), Rbar.wt (correlación dentro del mismo árbol), Rbar.bt (correlación entre los árboles) y EPS (señal de la población expresada), todos los estadísticos se calcularon después de la eliminación de las tendencias de crecimiento a través del detrending (Surayothee et al., 2021).

La construcción de la cronología master a partir de los anillos de los árboles abarca el periodo 1785-2022 y se muestra en color azul, lo cual significa que 237 años se utilizarán para realizar la reconstrucción climática y de caudal. El total de las muestras colectadas son de 44, por la cantidad de núcleos que fueron colectados. El índice del ancho de los anillos (RWI) significa que las mediciones de los anillos de los árboles fueron transformados a índices una vez realizada la cronología. El detrending de Spline suavizado cúbico se presenta a lo largo de toda la cronología en color verde (Figura 2).

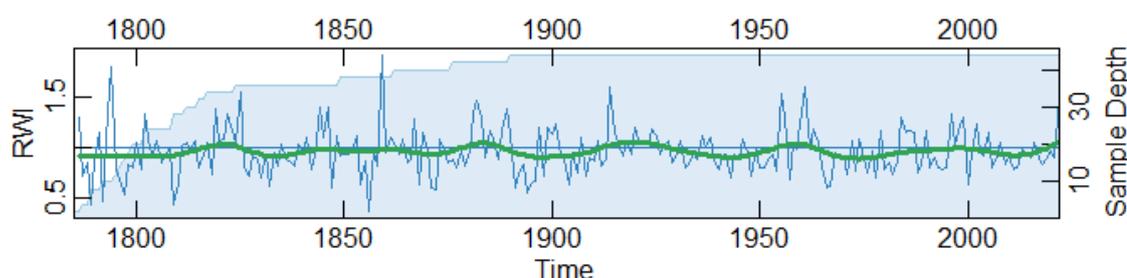


Figura 2. Cronología master de *H. chrysanthus* en el periodo 1785-2022

Nota: La línea de color azul es la serie de la cronología de los anillos de los árboles 237 años

4.2. Aplicación de métodos de imputación multivariante dendrocronológicos en la reconstrucción de datos climáticos e hidrológicos

4.2.1. Series regionales de temperatura y precipitación de Macará

Las series climáticas regionales de temperatura y precipitación mostraron las siguientes características que se detallan a continuación.

Tabla 3.

Estadísticos de las series regionales de temperatura y precipitación

Año		Mes		Temperatura		Precipitación	
Min.	1964	Min.	1.00	Min.	13.90	Min.	0.00
1st Qu.	1977	1st Qu.	3.75	1st Qu.	16.14	1st Qu.	3.20
Median	1990	Median	6.50	Median	17.52	Median	25.43
Mean	1990	Mean	6.50	Mean	18.63	Mean	82.68
3rd Qu.	2002	3rd Qu.	9.25	3rd Qu.	20.80	3rd Qu.	107.59
Max.	2015	Max.	12.00	Max.	27.10	Max.	752.40

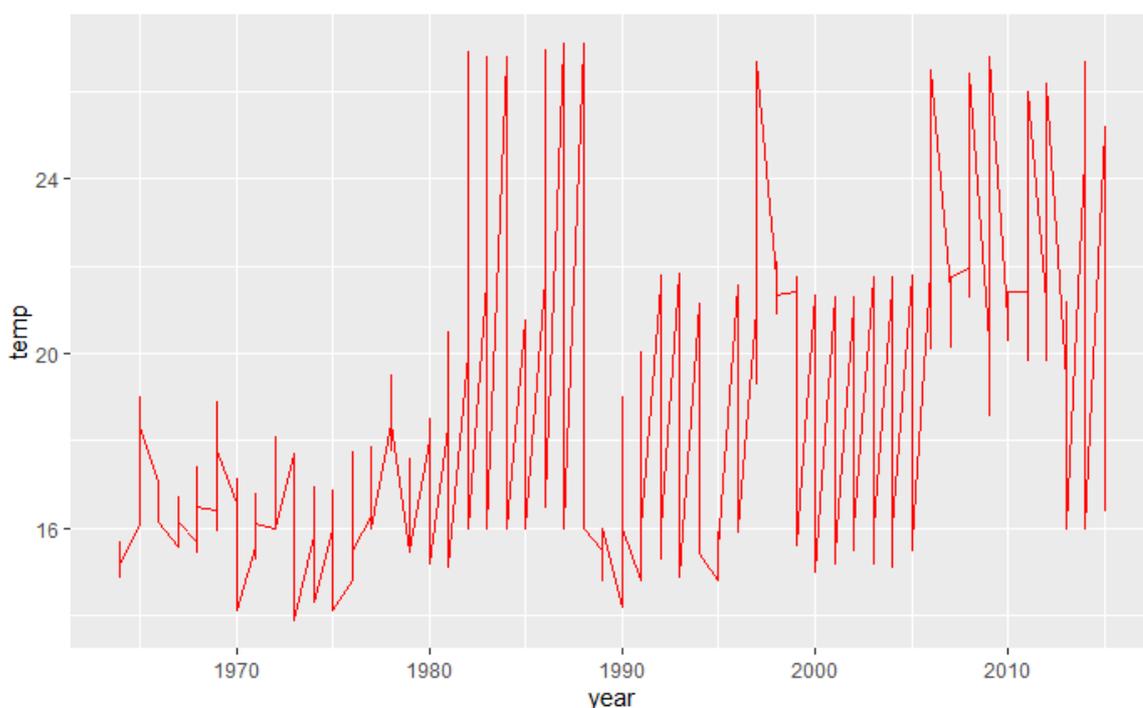


Figura 3. Temperatura regional del cantón Macará (1964-2015)

La serie regional de temperatura del cantón Macará abarca el periodo 1964 hasta el año 2015 (Serie final imputada). La temperatura mensual mínima fue de 13.90

°C, la temperatura mensual media fue de 18.63 °C y la temperatura mensual máxima fue de 27.10 °C (Tabla 3; Figura 3).

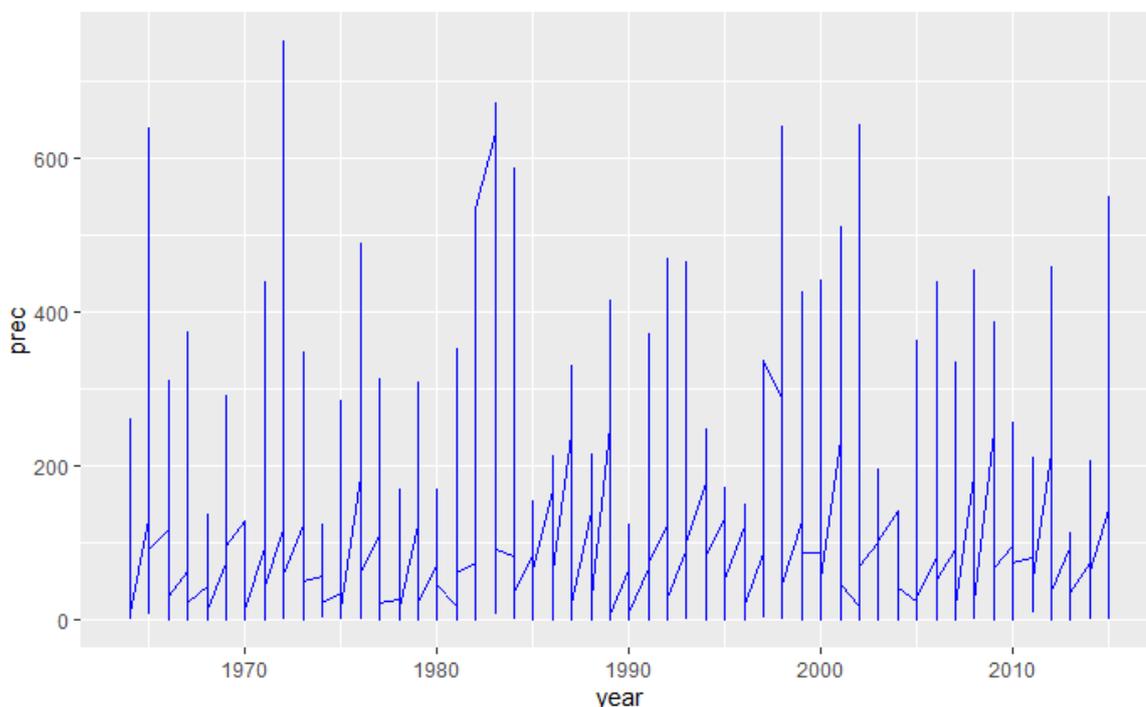


Figura 4. Precipitación regional del cantón Macará (1964-2015)

La serie regional de precipitación en el cantón Macará abarca el periodo 1964 hasta el 2015 (Serie final imputada). Los valores de la precipitación mensual mínima fueron de 0.00 mm, el valor obtenido de la precipitación mensual media fue de 82.68 mm y la precipitación mensual máxima fue de 752.40 mm (Tabla 3; Figura 4).

4.2.2. Reconstrucción de datos climáticos

4.2.2.1. Función dcc

Los valores obtenidos aplicando la función dcc del paquete TreeClim mostraron que la temperatura en los meses de enero, marzo y mayo están correlacionados con el crecimiento de los árboles con los siguientes valores 0.3, 0.3 y 0.3 respectivamente. La correlación de la temperatura y los anillos de los árboles para los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre fue de 0.2, 0.1, 0.1, 0.1 y 0.2 respectivamente (Figura 5). La correlación entre la precipitación y los anillos de los árboles no fue estadísticamente significativa, su valor p .0639 fue mayor a 0.05.

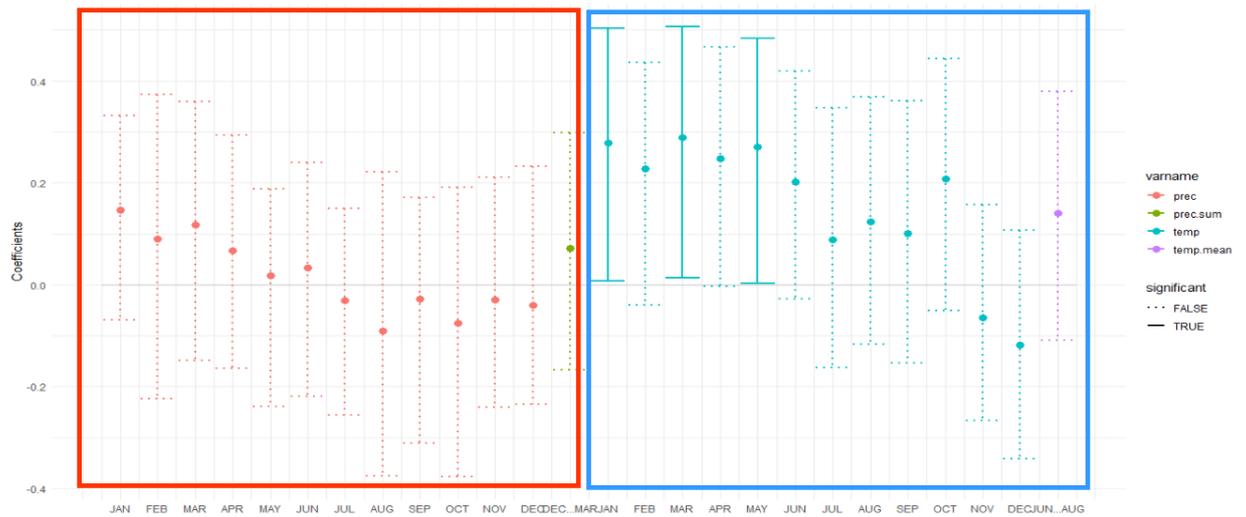


Figura 5. Coeficiente de correlación entre los anillos de los árboles y las variables climáticas: precipitación (color rojo) y temperatura (color azul), a través de la función dcc

Nota: El apartado de color rojo refiere a la correlación verdadera o falsa de precipitación y anillos de los árboles. Por otro lado, el apartado de color azul refiere a la correlación verdadera o falsa de la temperatura y los anillos de los árboles. Las líneas continuas significan una correlación lineal verdadera (significativa) y las líneas entrecortadas significan una correlación lineal falsa (no significativa).

4.2.2.2. Habilidad de la cronología

Los resultados que se obtuvieron en la habilidad de la cronología con respecto a temperatura se detallan a continuación (Tabla 4).

Tabla 4.

Estadísticos de calibración y habilidad de la cronología respecto a temperatura

Periodo de calibración (1965-2003)			
r	p-valor	DW	
0.371	0.029	1.27	
Estadísticos de verificación (1965-2003)			
r	p-valor	RE	CE
0.319	0.019	0.151	-0.116

En el periodo de calibración se obtuvo un $r = 0.37$, lo que nos indica que los datos de los anillos de los árboles están influenciados un 37% por los efectos de la variable temperatura para el periodo de 1965-2003, donde mejor correlación mostró. Respecto al p-valor 0.029 y el valor de DW 1.27, si fueron significativos porque el p-valor es menor de 0.05 y el resultado obtenido de DW es cercano a dos. Por otro lado, los resultados obtenidos en la verificación para el periodo de 1965-2003, los tres estadísticos tienen valores significativos, el $r = 0.319$, lo que significa que mientras más se acerque a uno habrá una mejor correlación entre los anillos de los árboles y los datos de temperatura. El p-valor 0.019 es menor de 0.05 y los valores de RE y CE son 0.151 y -0.116 respectivamente. Por consiguiente, esto significa que la calidad de la cronología de los anillos de los árboles (r , p-valor y el RE) es confiable para utilizarla en la reconstrucción de datos históricos a través del modelo de regresión lineal simple, en los pasos posteriores (Arsalani et al., 2015).

Los resultados que se obtuvieron en la habilidad de la cronología referente a la precipitación se detallan a continuación (Tabla 5).

Tabla 5.

Estadísticos de calibración y habilidad de la cronología respecto a precipitación

Periodo de calibración (1964-2005)			
r	p-valor	DW	
0.372	0.109	1.27	
Estadísticos de verificación (1964-2005)			
r	p-valor	RE	CE
0.319	0.079	0.151	-0.116

Los resultados obtenidos referente a calibración: $r = 0.37$, p-valor 0.109, DW = 1.27 no fueron significativos, ya que el p-valor fue mayor a 0.05, el estadístico DW es menor de 2. De los tres resultados, el estadístico que impide la utilización de la cronología para fines de reconstrucción de precipitación es el p-valor por ser mayor de 0.05. Por consiguiente, nos encontramos con el mismo caso en los resultados obtenidos en el proceso de verificación, ya que el p-valor 0.079 es mayor a 0.05 (Arsalani et al., 2015).

La modelación de la reconstrucción climática se la hizo referente a temperatura, ya que fue la que mejor estadísticos arrojó. En este sentido, los estadísticos obtenidos al aplicar el modelo de regresión lineal simple se detallan a continuación (Tabla 6).

Tabla 6

Estadísticos del modelo reconstrucción de temperatura

Cronologías	Estadísticos del modelo de reconstrucción de temperatura					
	r^2	r^2 ajustado	p-valor	Contraste F	(β_0) Intercepto	(β_1)
1785-2022	0.1	0.1	0.04	4.222	0.1330	0.0452*

La predicción de los datos de temperatura abarca el periodo de 1785 hasta el 2022 (Figura 6).

Los resultados obtenidos fueron los siguientes: un r^2 de 0.1, un p-valor de 0.04, un estadístico F de 4.222, el intercepto β_0 con un valor de 0.1330 y el β_1 con un valor de 0.0452. Por lo tanto, esto significa que, en la aplicación del modelo de regresión lineal simple, se cumple con los supuestos del modelo en lo que respecta al p-valor ya que es menor de 0.05 y el valor de β_1 también es menor de 0.05.

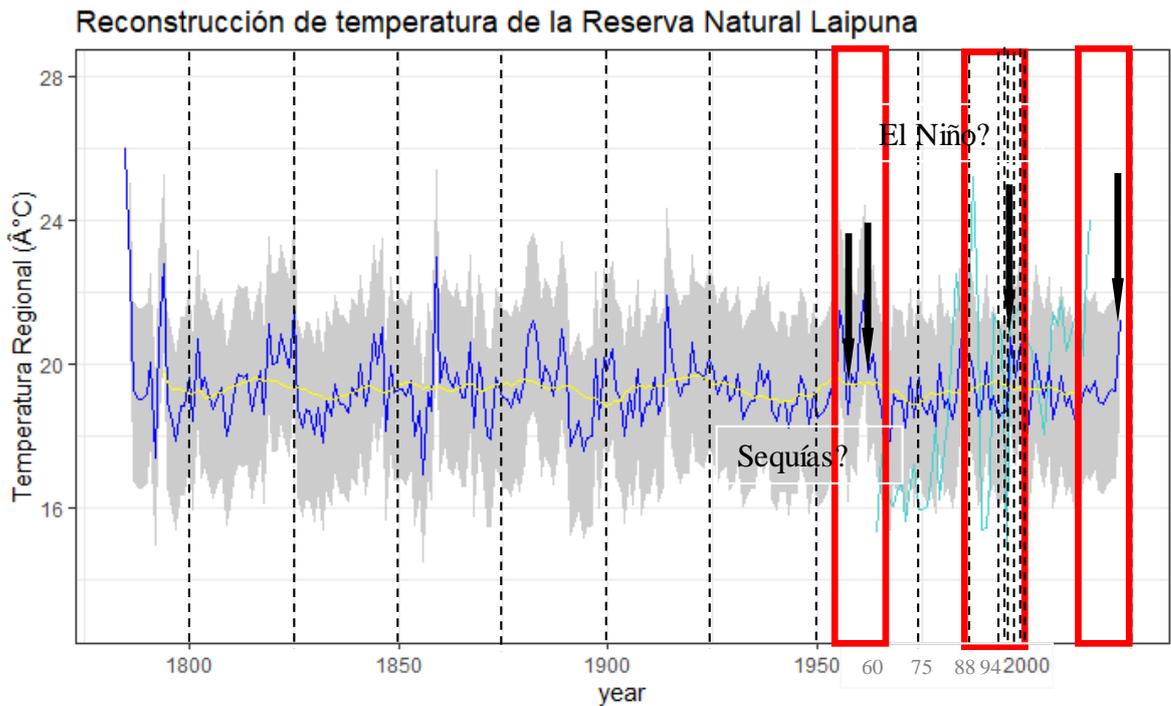


Figura 6. Reconstrucción de datos de temperatura de la Reserva Natural Laipuna

Nota: La línea de color turquesa representa la serie temporal de temperatura provista por el INAMHI para el periodo 1964-2015. La línea de color azul significa los 237 años de temperatura reconstruidos a partir de la cronología. La línea de color amarillo indica el suavizado de los datos por el método detrending. Finalmente, la línea de color gris representa el coeficiente de eficiencia.

En la década de los 60 se puede observar que hubieron periodos de sequías (Figura 6), Pucha-Cofrep et al. (2015) sugiere que en el año 1964 se presentó una migración masiva de la población a diferentes sectores del país por la sequía que atravesó la provincia de Loja. Por otro lado, en los resultados se puede observar que en la década de los 90, en el año 97 y 98 (Figura 6) hubo la presencia de fuertes precipitaciones, Rob Vos et al. (1999) manifestaron que el fenómeno de El Niño fue evidente en el 97 y 98, mismo que causó efectos sociales y económicos como daños en la agricultura por las inundaciones que se presentaron en esa década. En el año 2022 se puede determinar que hubo la presencia de precipitaciones en el cantón Macará (Figura 6). En una investigación realizada en el norte de Perú manifiesta que los anillos de los árboles presentaron una fuerte relación con el fenómeno de El Niño (Crispín-DelaCruz et al., 2022). Los efectos

de la variabilidad del clima están presentes en los anillos de los árboles, el cambio climático influencia la ecología de los bosques (Shah & Shah, 2015).

4.2.3. Reconstrucción de datos del caudal

La reconstrucción de caudal esta dada por dos series temporales: la serie hidrológica y la serie de cronología master. La serie temporal hidrológica se obtuvo a partir de un promedio de cuatro series temporales de caudales, denominándola como serie temporal regional del caudal de Macará (Tabla 7; figura 7). Los cuatro caudales que se consideraron para crear la serie regional de caudal son los siguientes: río Alamor (Código H0616), río Arenal en Pte. Boquerón (Código H0617), río Mercadillo (Código H0625) y el río Catamayo en Pte. Vicin (Código H1142). Los datos de los caudales medios mensuales en m³/seg se colectaron desde estaciones hidrológicas, mismos que fueron provistos por el INAMHI para el periodo 1964-2015.

Tabla 7. Estadísticos de la serie temporal regional de caudal de Macará

Año		Mes		Caudal m³/seg	
Min.	1964	Min.	1.00	Min.	1.00
1st Qu.	1977	1st Qu.	3.75	1st Qu.	5.10
Median	1990	Median	6.50	Median	11.25
Mean	1990	Mean	6.50	Mean	13.72
3rd Qu.	2002	3rd Qu.	9.25	3rd Qu.	18.00
Max.	2015	Max.	12.00	Max.	74.00

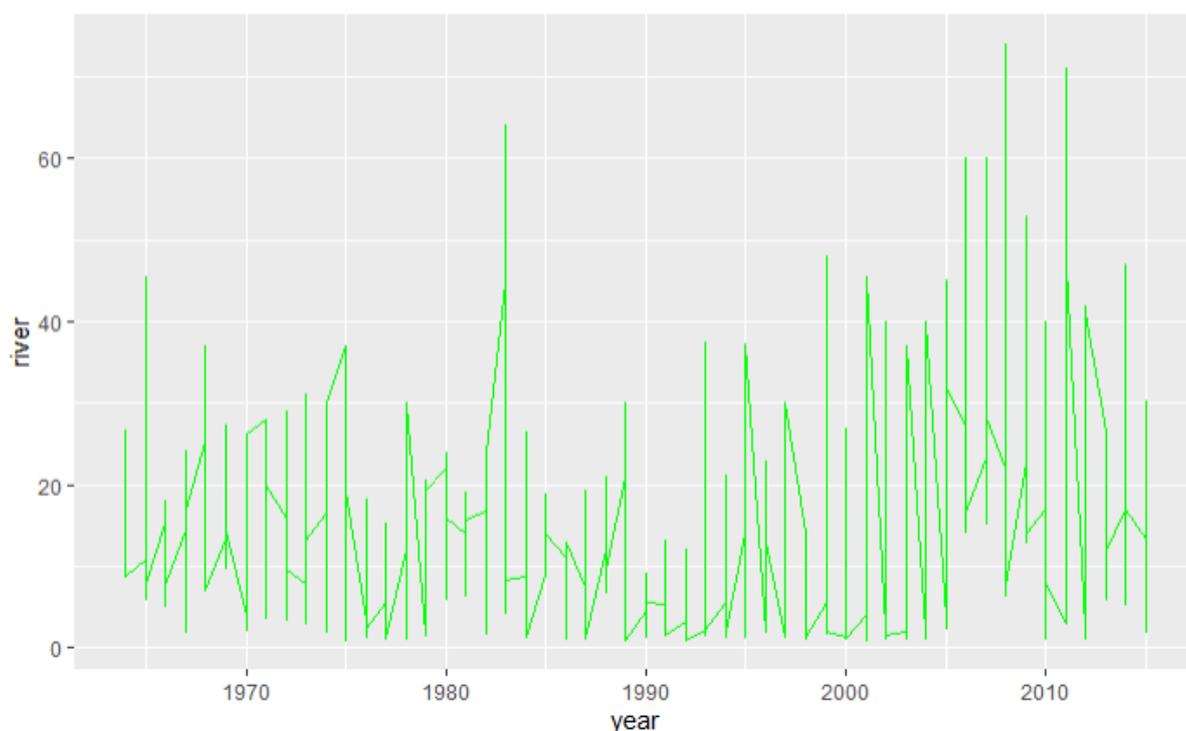


Figura 7. Serie temporal hidrológica del caudal en el cantón Macará

La serie regional del caudal en el cantón Macará abarca el periodo 1964 hasta el 2015 (serie final imputada). Los valores hidrológicos mensuales fueron los siguientes: mínimo de 1.00 m³/seg, el valor medio fue de 13.72 m³/seg y el valor máximo fue de 74.00 m³/seg (Tabla 7; Figura 7).

4.2.3.1. Correlación de la serie de la cronología y caudal

La correlación se desarrolló a partir de la serie de la cronología master de los anillos de los árboles con cada una de las series hidrológicas. Se analizó la relación existente entre los cuatro caudales (rio Catamayo, rio Arenal, rio Alamor y el rio Mercadillo) y la cronología master

	F	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Catamayo	-0.25	-0.19	-0.07	-0.17	-0.20	-0.14	-0.23	-0.27	-0.17	-0.26	-0.09	-0.19
Arenal	-0.21	-0.28	0.00	-0.09	-0.06	-0.08	-0.15	-0.23	-0.17	-0.16	-0.07	-0.17
Alamor	0.21	0.15	0.18	-0.12	0.07	0.03	-0.01	0.05	0.08	0.05	0.15	0.14
Mercadillo	-0.08	-0.13	-0.05	-0.06	-0.16	0.00	-0.10	-0.18	-0.11	-0.08	-0.04	-0.15

Figura 8. Coeficientes de correlación mensual entre cronología y las cuatro series hidrológicas

El análisis de correlación entre datos hidrológicos y cronología de los anillos de los árboles fue realizado para los doce meses del año, durante el periodo 1964-2015. En el análisis de correlación se puede observar que existe una correlación positiva baja entre la cronología master y el caudal Alamor con el valor de 0.2 para los meses de enero, febrero, marzo y noviembre. Esto quiere decir que a medida que aumenta la escorrentía, crecen los anillos de los árboles. Por otro lado, se puede observar que hay una correlación negativa en la cronología master con el caudal Catamayo, Arenal y Mercadillo (Figura 8).

4.2.3.2. Reconstrucción del caudal de Macará

La reconstrucción de datos hidrológicos se dio a través de la aplicación de un modelo de regresión lineal simple. La estimación de la variable respuesta o dependiente (caudal), se dio en función de la variable independiente o predictora (cronología de los anillos de los árboles) (Bürger et al., 2006).

Tabla 8

Estadísticos del modelo reconstrucción hidrológica

Cronologías			Estadísticos del modelo de reconstrucción del caudal			
	r^2	r^2 ajustado	p-valor	Contraste F	(β_0) Intercepto	(β_1)
1785-2022	0.02	-0.002	0.359	4.22	0.1330	0.359926

La predicción de los datos de caudal abarca el periodo de 1785 hasta el 2022 (Figura. 9).

Al aplicar el modelo de regresión lineal simple para la imputación de los 237 años de datos hidrológicos, se obtuvieron los siguientes resultados: El r^2 dio un valor de 0.02, el p-valor generó un valor de 0.359, el estadístico F, dio un valor de 4.22, el β_0 igual a 0.1330 y el β_1 fue igual a 0.359. Por lo tanto, significa que por la correlación negativa que anteriormente se encontró, al aplicar el modelo de regresión lineal ninguno de los estadísticos cumple los supuestos del modelo. El p-valor y el β_1 son mayores a 0.05 donde debería haber sido menor de 0.05 para cumplir con los supuestos del modelo.

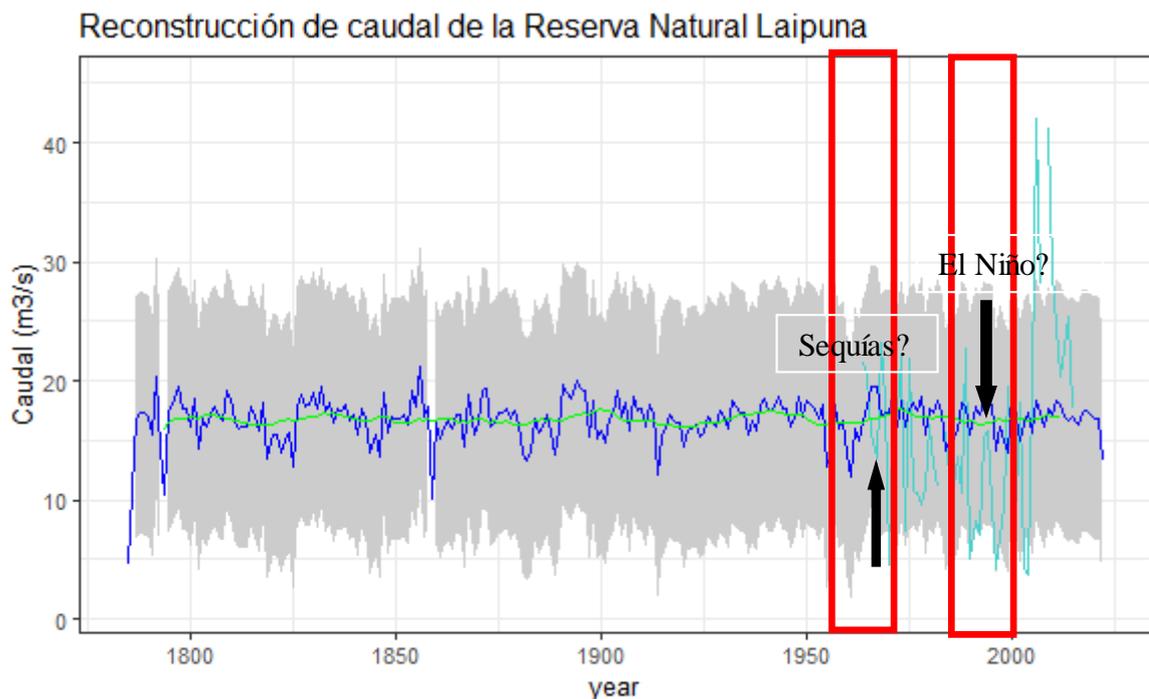


Figura 9. Reconstrucción de datos hidrológicos de la Reserva Natural Laipuna

En la serie regional del caudal de Macará provista por el INAMHI en la década de los 90, se puede observar que hubo mayor cantidad de escorrentía, esto lo asociamos a las fuertes precipitaciones ocurridas en el 92, 97 y 98, Trenberth (2019) sugiere que el evento del Niño en el año 1997-98 se usa como indicador climático, mismo que archiva información de la variabilidad del clima en el Pacífico tropical en esa época. Los datos históricos climáticos de toda la región de los Andes ecuatorianos en la década de los 60 se los considera como indicadores climáticos de sequía (Domínguez-Castro et al., 2018). En los resultados obtenidos referente a la serie regional de caudal provista por el INAMHI, se puede constatar que en la década de los 60 hubo presencia de periodos de sequía en Macará (Figura 9).

4.3. Propuesta paquete estadístico “Treestreamflow”

Estructura del paquete

La función *tsf* (treestreamflow) determina la correlación que existe entre la cronología de los anillos de los árboles y los datos mensuales de la escorrentía. La función calcula el coeficiente de correlación entre la cronología y los datos

mensuales hidrológicos (Zang & Biondi, 2015). La cronología es un dataframe que se construyó usando el paquete DplR del software libre R, conformada por los anillos de los árboles y corresponden a cada año (rownames). Por otro lado, los datos climáticos están dados en dataframe, misma que está conformada por tres filas siguiendo el siguiente orden años, mes y datos de escorrentía (Zang & Biondi, 2013). La prueba de significancia de la correlación está dada por el coeficiente de correlación de Pearson (Zang & Biondi, 2013).

Los archivos documentados de la función tienen la siguiente forma:

```
##' @param chrono \codigo{data.frame} contiene la cronología de los anillos de
los árboles (Zang & Biondi, 2013).
##' cronología master, e.g. se obtuvo \codigo{chron} del paquete dplR.
##' @param serie del caudal \codigo{data.frame} en datos mensuales y anuales
##' el parámetro caudal es dado en columnas, así se podrá conocer la relación
con la función de correlación (Zang & Biondi, 2013).
##' @param var_names \codigo{character} es un vector que muestra el nombre
de las variables. Por defecto reconoce el nombre de la columna \code{streamflow}
##' @param ci \codigo{numerical} Se valora la prueba de significancia (valores
0.01, 0.05 y 0.1) (Zang & Biondi, 2013).
##' @return 'tsf' retorna un 'object' de clase "'tc_tsf"'.
##' @examples
##' \dontrun{
##' ts_resp <- tsf(chronology_tree, macara_streamflow)
##' }
##' @author Kelly Pena
```

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES

5.1. Medición los anillos de los árboles en la mesa de medición Lintab 6 para construir una cronología de la especie *Handroanthus chrysanthus* (Jacq.)

- La cronología master cuenta con un total de 238 anillos esto quiere decir que se dispone de un total de 237 años del pasado. El periodo de la cronología master de los anillos de árboles es de 1785-2022
- Se puede concluir que los datos obtenidos en La Señal de Población Expresada y Sensibilidad media, son aptos para llevar una cronología master de los anillos de los árboles.
- La cronología de los anillos de los árboles de 237 años en la especie *H. chrysanthus* fue utilizada para realizar la imputación de datos históricos relacionados al clima y al caudal.

5.2. Aplicación de métodos de imputación multivariante dendrocronológicos en la reconstrucción climática e hidrológica

5.2.1. Reconstrucción de datos climáticos

- A partir de las series climáticas de las 9 estaciones meteorológicas, se creó una sola serie climática a través de promedios para la precipitación como para la temperatura. Una vez que contamos con las series climáticas de precipitación y de temperatura, se procedió a utilizar el paquete TreeClim en R. En este sentido, el primer estadístico que se calculó fue el coeficiente de correlación de Pearson, el mismo que mostró correlación positiva para temperatura y para precipitación no mostró correlación.
- La reconstrucción de los datos de temperatura se realizó aplicando un modelo de regresión lineal simple, donde se pudo reconstruir 237 años de temperatura.

- Una vez realizada la imputación de los 237 años de temperatura, llámese reconstrucción climática, se determinó que en la década de los 60, hubo presencia de sequía en el sur del Ecuador, misma que se puede relacionar con la migración que ocurrió en el año de 1964 por los extensos periodos de sequía que se presentaron en la provincia de Loja, Ecuador. Por otro lado, en la década de los 90 también se puede apreciar que hubo presencia de fuertes precipitaciones, esto lo asociamos a la presencia del fenómeno de El Niño en el año de 1997 y que ocasionó muchos daños en el sector Agrícola a causa de las inundaciones

5.2.2. Reconstrucción de datos del caudal

- Se puede concluir que a partir de las cuatro series regionales de los cuatro caudales (rio Catamayo, rio Arenal, rio Amor y el rio Mercadillo) se obtuvo una sola serie regional de caudal o hidrológica. Antes, se calculó la correlación de Pearson entre cada uno de los cuatro caudales con la variable cronología master, donde solo el caudal Amor mostró correlación para el mes de enero en la época lluviosa y con los caudales Catamayo, Arenal y Mercadillo mostraron una correlación negativa. Esto quiere decir, que en el análisis de correlación se puede observar que existe una correlación positiva entre la cronología master y los datos hidrológicos del rio Amor y que a medida que aumenta la escorrentía, crecen los anillos de los árboles en poca proporción. Por otro lado, con los caudales que presentaron correlación negativa, muestran que los anillos no crecen con la presencia de aumento del caudal (aumento de precipitación) sino que crecen por factores que no son los hidrológicos.
- En lo que respecta a la reconstrucción de los datos hidrológicos, a través de los anillos de los árboles, no mostraron correlación positiva con la serie regional hidrológica. Esto quiere decir que la imputación de los datos del caudal se la realizó con la finalidad de presentar el proceso a seguir en la reconstrucción del caudal.
- En la serie regional del caudal para el periodo 1964-2015 provista por el INAMHI se puede corroborar que, en la década de los años 60, hubo presencia de poca escorrentía en el caudal, esto lo relacionamos con la

sequía que se presentó en la década del año 64, estos datos históricos de los Andes ecuatorianos se los utilizan como indicadores. Por otro lado, en la misma serie regional de caudal provista por el INAMHI, se puede evidenciar que en la década de los 90 presentó mayor cantidad de escorrentía en los caudales y lo podemos asociar a la presencia del fenómeno de El Niño en esa época. En la serie de la reconstrucción de datos históricos del caudal de 237 años, no podemos hacer un análisis porque al correr el modelo nos arrojó estadísticos que no cumplen con los supuestos del modelo, mismo que lo escribimos anteriormente y que solo se modeló con fines pedagógicos para quien interese.

5.3. Paquete estadístico “Treestreamflow”

- La propuesta del paquete Treestreamflow, cuenta con la estructura básica de un paquete estadístico en R. La función `tsf` (`treestreamflow`) servirá para poder calcular la correlación entre la serie del caudal y la serie de los anillos de los árboles.

CAPITULO 6

6. RECOMENDACIONES

6.1. Medición los anillos de los árboles en la mesa de medición Lintab 6 para construir una cronología de la especie *Handroanthus chrysanthus* (Jacq.)

- Se recomienda que se trabaje con un mayor número de muestras, con la finalidad de mejorar los resultados en los estadísticos de la construcción de la cronología.
- Construir cronologías de los anillos a partir de otras especies forestales con potencial dendrocronológico.
- Que las universidades que ofertan carreras de medio ambiente, forestal y cambio climático, incluyan en el pensum académico la asignatura de dendrocronología para poder conocer la influencia de los factores ambientales en los anillos de los árboles.

6.2. Aplicación de métodos de imputación multivariante dendrocronológicos en la reconstrucción climática e hidrológica

6.2.1. Reconstrucción climática

- Se recomienda aplicar otros métodos de imputación multivariante como por ejemplo Random forest por el método de regresión y así poder comparar los resultados con otras técnicas de modelación.
- Que estos métodos de imputación de datos históricos a larga escala se los realicen con especies forestales que registren mayor número de años.

6.2.2. Reconstrucción del caudal

- Se recomienda que la imputación de los datos históricos a larga escala de caudales, sea modelada por otro tipo de métodos predictivos y así mejorar los resultados obtenidos en los supuestos del modelo.
- Las muestras colectadas de los anillos de los árboles se encuentren más cercanas a los caudales para mejorar los valores de sus estadísticos.

6.3. Paquete estadístico “Treestreamflow”

- Se recomienda que el paquete Treestreamflow cuente con una función que incluya más de una serie temporal hidrológica, ya que el paquete está documentado únicamente para una serie temporal hidrológica regional y una serie temporal de anillos de los árboles.

7. Referencias

- Álvarez, C., Le Quesne, C., Rojas-Badilla, M., Rozas, V., & González-Reyes, Á. (2021). Dendrochronological potential of *Prumnopitys andina* (Podocarpaceae) at the southern limit of its range in the Chilean Andes. *New Zealand Journal of Botany*, *59*(4), 423–439. <https://doi.org/10.1080/0028825X.2021.1877158>
- Amankwah, E. (2019). Tropical Forest: A Potential Resource for Climate Change Mitigation in Ghana. *International Journal of Environment and Climate Change*, August, 435–442. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2019/v9i830128>
- Amoroso, M. M., Speer, J. H., Daniels, L. D., Villalba, R., Cook, E., Stahle, D., Srur, A., Tardif, J., Conciatori, F., Aciar, E., Arco, J., Bonada, A., Coulthard, B., Haney, J., Isaac-Renton, M., Magalhães, J., Marcotti, E., Meglioli, P., Montepeluso, M. S., ... Young, A. (2018). South American dendroecological fieldweek 2016: Exploring dendrochronological research in Northern Patagonia. *Tree-Ring Research*, *74*(1), 120–131. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-74.1.120>
- Anderson-Teixeira, K. J., Herrmann, V., Rollinson, C. R., Gonzalez, B., Gonzalez-Akre, E. B., Pederson, N., Alexander, M. R., Allen, C. D., Alfaro-Sánchez, R., Awada, T., Baltzer, J. L., Baker, P. J., Birch, J. D., Bunyavejchewin, S., Cherubini, P., Davies, S. J., Dow, C., Helcoski, R., Kašpar, J., ... Zuidema, P. A. (2022). Joint effects of climate, tree size, and year on annual tree growth derived from tree-ring records of ten globally distributed forests. *Global Change Biology*, *28*(1), 245–266. <https://doi.org/10.1111/gcb.15934>
- Anderson, S. R., Ogle, R., Tootle, G., & Oubeidillah, A. (2019). Tree-ring reconstructions of streamflow for the Tennessee Valley. *Hydrology*, *6*(2), 1–11. <https://doi.org/10.3390/hydrology6020034>
- Arsalani, M., Azizi, G., & Bräuning, A. (2015). Dendroclimatic reconstruction of May-June maximum temperatures in the central Zagros Mountains, western Iran. *International Journal of Climatology*, *35*(3), 408–416. <https://doi.org/10.1002/joc.3988>
- Babst, F., Poulter, B., Bodesheim, P., Mahecha, M. D., & Frank, D. C. (2017). Improved tree-ring archives will support earth-system science. *Nature Ecology and Evolution*, *1*(2), 1–2. <https://doi.org/10.1038/s41559-016-0008>
- Balzano, A., Novak, K., Humar, M., & Čufar, K. (2019). Application of confocal laser scanning microscopy in dendrochronology. *Les/Wood*, *68*(2), 5–17. <https://doi.org/10.26614/les-wood.2019.v68n02a01>
- Barichivich, J., Peylin, P., Launois, T., Daux, V., Risi, C., Jeong, J., & Luyssaert, S. (2021). A triple tree-ring constraint for tree growth and physiology in a global land surface model. *Biogeosciences*, *18*(12), 3781–3803. <https://doi.org/10.5194/bg-18-3781-2021>
- Bendix, J. and Beck, E. (2016). Environmental change and its impacts in a biodiversity hotspot of the south Ecuadorian Andes – monitoring and mitigation strategies HOTSPOT OF THE SOUTH ECUADORIAN ANDES – MONITORING. *Erdkunde*, *70* (April), 1–4. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2016.01.01>
- Bertin, L. J., Christie, D. A., Sheppard, P. R., Muñoz, A. A., Lara, A., & Alvarez, C. (2021). Chemical signals in tree rings from northern patagonia as indicators of calbuco volcano eruptions since the 16th century. *Forests*, *12*(10).

- <https://doi.org/10.3390/f12101305>
- Brienen, R., Helle, G., Pons, T., Boom, A., Gloor, M., Groenendijk, P., Clerici, S., Leng, M., & Jones, C. (2021). Paired analysis of tree ring width and carbon isotopes indicates when controls on tropical tree growth change from light to water limitations. *Tree Physiology*, *October*.
<https://doi.org/10.1093/treephys/tpab142>
- Bukhary, S., Kalra, A., & Ahmad, S. (2021). Incorporating pacific ocean climate information to enhance the tree-ring-based streamflow reconstruction skill. *Journal of Water and Climate Change*, *12*(5), 1891–1909.
<https://doi.org/10.2166/wcc.2020.336>
- Bunn, A. G. (2010). Statistical and visual crossdating in R using the dplR library. *Dendrochronologia*, *28*(4), 251–258.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.12.001>
- Bürger, G., Fast, I., & Cubasch, U. (2006). Climate reconstruction by regression - 32 variations on a theme. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, *58*(2), 227–235. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00164.x>
- Butz, P., Raffelsbauer, V., Graefe, S., Peters, T., Cueva, E., Hölscher, D., & Bräuning, A. (2017). Tree responses to moisture fluctuations in a neotropical dry forest as potential climate change indicators. *Ecological Indicators*, *83*, 559–571. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.021>
- Camarero, J. J., Gazol, A., Sangüesa-Barreda, G., Vergarechea, M., Alfaro-Sánchez, R., Cattaneo, N., & Vicente-Serrano, S. M. (2021). Tree growth is more limited by drought in rear-edge forests most of the times. *Forest Ecosystems*, *8*(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00303-1>
- Chambers, J. (2008). R Packages. *Statistics and Computing*, *4*, 79–110.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-75936-4_4
- Chen, Y., Chen, F., & Zhang, H. (2021). A tree-ring-based precipitation reconstruction since 1760 CE from Northeastern Tibetan plateau, China. *Atmosphere*, *12*(4). <https://doi.org/10.3390/atmos12040416>
- Chhin, S., Hogg, E. H. (Ted.), Lieffers, V. J., & Huang, S. (2008). Potential effects of climate change on the growth of lodgepole pine across diameter size classes and ecological regions. *Forest Ecology and Management*, *256*(10), 1692–1703. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.02.046>
- Cleaveland, M. K., & Stahle, D. W. (2004). FOR 496 / 796 Introduction to Dendrochronology Lab exercise #4: Tree-ring Reconstruction of Precipitation. In U. of Arkansas (Ed.), *Introduction to Dendrochronology Lab exercise* (pp. 1–14).
- Coulthard, B. L., Anchukaitis, K. J., Pederson, G. T., Cook, E., Littell, J., & Smith, D. J. (2021). Snowpack signals in North American tree rings. *Environmental Research Letters*, *16*(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd5de>
- Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H. G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, *407*(1–4), 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Crispín-DelaCruz, D. B., Morales, M. S., Andreu-Hayles, L., Christie, D. A., Guerra, A., & Requena-Rojas, E. J. (2022). High ENSO sensitivity in tree rings from a northern population of *Polylepis tarapacana* in the Peruvian Andes. *Dendrochronologia*, *71*(January), 125902.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125902>

- Cueva Ortiz, J., Espinosa, C. I., Dahik, C. Q., Mendoza, Z. A., Ortiz, E. C., Gusmán, E., Weber, M., & Hildebrandt, P. (2019). Influence of anthropogenic factors on the diversity and structure of a dry forest in the central part of the Tumbesian region (Ecuador-Perú). *Forests*, *10*(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/f10010031>
- Cullen, L. E., Palmer, J. G., Duncan, R. P., & Stewart, G. H. (2001). Climate change and tree-ring relationships of *Nothofagus menziesii* tree-line forests. *Canadian Journal of Forest Research*, *31*(11), 1981–1991. <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-11-1981>
- Deb, J. C., Phinn, S., Butt, N., & McAlpine, C. A. (2018). Climate change impacts on tropical forests: Identifying risks for tropical Asia. *Journal of Tropical Forest Science*, *30*(2), 182–194. <https://doi.org/10.26525/jtfs2018.30.2.182194>
- Domínguez-Castro, F., García-Herrera, R., & Vicente-Serrano, S. M. (2018). Wet and dry extremes in Quito (Ecuador) since the 17th century. *International Journal of Climatology*, *38*(4), 2006–2014. <https://doi.org/10.1002/joc.5312>
- Espinosa, C. I., Camarero, J. J., & Gusmán, A. A. (2018). Site-dependent growth responses to climate in two major tree species from tropical dry forests of southwest Ecuador. *Dendrochronologia*, *52*, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.09.004>
- Ferrero, M. E., Villalba, R., De Membiela, M., Ferri Hidalgo, L., & Luckman, B. H. (2015). Tree-ring based reconstruction of Río Bermejo streamflow in subtropical South America. *Journal of Hydrology*, *525*, 572–584. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.004>
- Fletcher, T., Fletcher, T., Touchan, R., Lepley, K., Rouini, N., Bloye, R., Tremarelli, T. S., Peña, K., & Meko, D. M. (2019). TWO RECONSTRUCTIONS of AUGUST-JULY PRECIPITATION for CENTRAL NORTHERN ARIZONA from TREE RINGS. *Tree-Ring Research*, *75*(2), 116–126. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-75.2.116>
- Formetta, G., Tootle, G., & Bertoldi, G. (2021). Streamflow Reconstructions Using Tree-Ring Based Paleo Proxies for the Upper Adige River Basin (Italy). *Hydrology*, *9*(1), 8. <https://doi.org/10.3390/hydrology9010008>
- Galleguillos, M., Gimeno, F., Puelma, C., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., & Rojas, M. (2021). Disentangling the effect of future land use strategies and climate change on streamflow in a Mediterranean catchment dominated by tree plantations. *Journal of Hydrology*, *595*(February). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126047>
- García-Callejas, D., & de la Cruz Rot, M. (2020). Cómo crear paquetes de R. *Ecosistemas*, *29*(1), 27–30. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1948>
- Gebauer, A., Ellinger, M., Brito Gomez, V., & Ließ, M. (2020). Development of pedotransfer functions for water retention in tropical mountain soil landscapes: Spotlight on parameter tuning in machine learning. *Soil*, *6*(1), 215–229. <https://doi.org/10.5194/soil-6-215-2020>
- Gebrekirstos, A., Bräuning, A., Sass-Klassen, U., & Mbow, C. (2014). Opportunities and applications of dendrochronology in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *6*(1), 48–53. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.011>
- Girardin, M. P., Guo, X. J., Metsaranta, J., Gervais, D., Campbell, E., Arsenault, A., Isaac-Renton, M., Harvey, J. E., Bhatti, J., & Hogg, E. H. (2021). A national tree-ring data repository for canadian forests (Cfs-trend): Structure, synthesis, and applications. *Environmental Reviews*, *29*(2), 225–241.

<https://doi.org/10.1139/er-2020-0099>

- Granato-Souza, D., Stahle, D. W., Barbosa, A. C., Feng, S., Torbenson, M. C. A., de Assis Pereira, G., Schöngart, J., Barbosa, J. P., & Griffin, D. (2019). Tree rings and rainfall in the equatorial Amazon. *Climate Dynamics*, 52(3–4), 1857–1869. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4227-y>
- Granato-Souza, D., Stahle, D. W., Torbenson, M. C. A., Howard, I. M., Barbosa, A. C., Feng, S., Fernandes, K., & Schöngart, J. (2020). Multidecadal Changes in Wet Season Precipitation Totals Over the Eastern Amazon. *Geophysical Research Letters*, 47(8), 1–9. <https://doi.org/10.1029/2020GL087478>
- Haug, I., Setaro, S., & Suárez, J. P. (2021). Global AM fungi are dominating mycorrhizal communities in a tropical premontane dry forest in Laipuna, South Ecuador. *Mycological Progress*, 20(6), 837–845. <https://doi.org/10.1007/s11557-021-01699-4>
- Haury, E. W. (2021). Chronology Building in dplR. *R Version 4.0.3*, 3, 325–340. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1mgmcjv.19>
- Islam, M., Rahman, M., & Bräuning, A. (2019). Impact of extreme drought on tree-ring width and vessel anatomical features of *Chukrasia tabularis*. *Dendrochronologia*, 53(September 2018), 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.11.007>
- Landshuter, N., Mölg, T., Griesinger, J., Bräuning, A., & Peters, T. (2020). 10-year Characteristics of Moisture Source Regions and Their Potential Effect on Seasonal Isotopic Signatures of $\delta^{18}\text{O}$ in Tropical Trees of Southern Ecuador. *Frontiers in Earth Science*, 8(December), 1–22. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.604804>
- Lara, A., Villalba, R., Urrutia-Jalabert, R., González-Reyes, A., Aravena, J. C., Luckman, B. H., Cuq, E., Rodríguez, C., & Wolodarsky-Franke, A. (2020). +A 5680-year tree-ring temperature record for southern South America. *Quaternary Science Reviews*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106087>
- Li, J., Wang, Z., Lai, C., & Zhang, Z. (2019). Tree-ring-width based streamflow reconstruction based on the random forest algorithm for the source region of the Yangtze River, China. *Catena*, 183(August), 104216. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104216>
- Liu, X., Qin, D., Shao, X., Chen, T., & Ren, J. (2005). Temperature variations recovered from tree-rings in the middle Qilian Mountain over the last millennium. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 48(4), 521–529. <https://doi.org/10.1360/03yd0063>
- Liu, Z., Wang, T., Han, J., Yang, W., & Yang, H. (2022). Decreases in Mean Annual Streamflow and Interannual Streamflow Variability Across Snow-Affected Catchments Under a Warming Climate. *Geophysical Research Letters*, 49(3). <https://doi.org/10.1029/2021gl097442>
- Locosselli, G. M., Brien, R. J. W., de Souza Leite, M., Gloor, M., Krottenthaler, S., de Oliveira, A. A., Barichivich, J., Anhof, D., Ceccantini, G., Schöngart, J., & Buckeridge, M. (2020). Global tree-ring analysis reveals rapid decrease in tropical tree longevity with temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(52), 33358–33364. <https://doi.org/10.1073/PNAS.2003873117>
- Lucas, C., Aguilera-Betti, I., Muñoz, A. A., Puchi, P., Sapriza, G., Profumo, L., Maxwell, R. S., & Venegas-González, A. (2022). Cross-continental hydroclimate proxies: Tree-rings in Central Chile reconstruct historical

- streamflow in Southeastern South American rivers. *Progress in Physical Geography*, January. <https://doi.org/10.1177/030913332111067466>
- Macedo, T. M., Barros, C. F., de Lima, H. C., Brandes, A. F. das N., da Costa, W. S., Costa, C. G., & Roig, F. (2020). Climate signals in tree rings of *Paubrasilia echinata* (Leguminosae-Caesalpinioidea) from the Atlantic Forest of Brazil. *Trees - Structure and Function*, *34*(2), 337–347. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01919-1>
- Macedo, T. M., Costa, W. S. da, Brandes, A. F. das N., Valladares, F., & Barros, C. F. (2021). Diversity of growth responses to recent droughts reveals the capacity of Atlantic Forest trees to cope well with current climatic variability. *Forest Ecology and Management*, *480*(June 2020). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118656>
- Maes, S. L., Vannoppen, A., Altman, J., Van den Bulcke, J., Decocq, G., De Mil, T., Depauw, L., Landuyt, D., Perring, M. P., Van Acker, J., Vanhellefont, M., & Verheyen, K. (2017). Evaluating the robustness of three ring-width measurement methods for growth release reconstruction. *Dendrochronologia*, *46*(September), 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.10.005>
- Marqués, L., Ogle, K., Peltier, D. M. P., & Camarero, J. J. (2022). Altered climate memory characterizes tree growth during forest dieback. *Agricultural and Forest Meteorology*, *314*(March), 108787. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108787>
- Medina Arroyo, H. H., Torres Torres, J. J., Palacios Palacios, C. A., Ruiz Blandón, B. A., Martínez Guardia, M., & Rengifo Murillo, L. (2020). Germination and growth of the tree *Handroanthus chrysanthus* (Bignoniaceae) under nursery conditions. *UNED Research Journal*, *12*(2), e3175. <https://doi.org/10.22458/urj.v12i2.3175>
- Muñoz, A. A., Klock-Barría, K., Alvarez-Garreton, C., Aguilera-Betti, I., González-Reyes, Á., Lastra, J. A., Chávez, R. O., Barría, P., Christie, D., Rojas-Badilla, M., & Lequesne, C. (2020). Water crisis in petorca basin, Chile: The combined effects of a mega-drought and water management. *Water (Switzerland)*, *12*(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w12030648>
- Ndhlovu, G. Z., & Woyessa, Y. E. (2021). Evaluation of streamflow under climate change in the zambezi river basin of Southern Africa. *Water (Switzerland)*, *13*(21). <https://doi.org/10.3390/w13213114>
- Nicault, A., Boucher, E., Bégin, C., Guiot, J., Marion, J., Perreault, L., Roy, R., Savard, M. M., & Bégin, Y. (2014). Hydrological reconstruction from tree-ring multi-proxies over the last two centuries at the Caniapiscou Reservoir, northern Québec, Canada. *Journal of Hydrology*, *513*, 435–445. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.054>
- Patskoski, J., & Sankarasubramanian, A. (2018). Reducing uncertainty in stochastic streamflow generation and reservoir sizing by combining observed, reconstructed and projected streamflow. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *32*(4), 1065–1083. <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1456-2>
- Pearl, J. K., Keck, J. R., Tintor, W., Siekacz, L., Herrick, H. M., Meko, M. D., & Pearson, C. L. (2020). New frontiers in tree-ring research. *Holocene*, *30*(6), 923–941. <https://doi.org/10.1177/0959683620902230>
- Pereira, L. C., Balbinot, L., Matus, G. N., Dias, H. C. T., & Tonello, K. C. (2021). Aspects of forest restoration and hydrology: linking passive restoration and soil–water recovery in Brazilian Cerrado. *Journal of Forestry Research*, *32*(6),

- 2301–2311. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01301-3>
- Pompa-García, M., & Némiga, X. A. (2015). ENSO index teleconnection with seasonal precipitation in a temperate ecosystem of northern Mexico. *Atmosfera*, 28(1), 43–50. <https://doi.org/10.20937/ATM.2015.28.01.04>
- Pucha-Cofrep, D., Peters, T., & Bräuning, A. (2015a). Wet season precipitation during the past century reconstructed from tree-rings of a tropical dry forest in Southern Ecuador. *Global and Planetary Change*, 133(July 2016), 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.08.003>
- Pucha-Cofrep, D., Peters, T., & Bräuning, A. (2015b). Wet season precipitation during the past century reconstructed from tree-rings of a tropical dry forest in Southern Ecuador. *Global and Planetary Change*, 133(September 2018), 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.08.003>
- Pucha-Cofrep, D., Peters, T., & Bräuning, A. (2015c). Wet season precipitation during the past century reconstructed from tree-rings of a tropical dry forest in Southern Ecuador. *Global and Planetary Change*, 133, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.08.003>
- Raffelsbauer, V., Spann, S., Peña, K., Pucha-Cofrep, D., Steppe, K., & Bräuning, A. (2019). Tree circumference changes and species-specific growth recovery after extreme dry events in a montane rainforest in southern Ecuador. *Frontiers in Plant Science*, 10, 342. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00342>
- Rigozo, N. R., Nordemann, D. J. R., Echer, E., & Antunes Vieira, L. E. (2004). ENSO influence on tree ring data from Chile and Brazil. *Geofísica Internacional*, 43(2), 287–294. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2004.43.2.181>
- Rodríguez, R., Mabres, A., Luckman, B., Evans, M., Masiokas, M., & Ektvedt, T. M. (2005). “El Niño” events recorded in dry-forest species of the lowlands of northwest Peru. *Dendrochronologia*, 22(3), 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2005.05.002>
- Rozendaal, D. M. A., & Zuidema, P. A. (2011). Dendroecology in the tropics: A review. *Trees - Structure and Function*, 25(1), 3–16. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0480-3>
- Schüßler, A., Krüger, C., & Urgiles, N. (2016). Phylogenetically diverse AM fungi from Ecuador strongly improve seedling growth of native potential crop trees. *Mycorrhiza*, 26(3), 199–207. <https://doi.org/10.1007/s00572-015-0659-y>
- Shah, S., & Shah, C. (2015). Tree rings for the assessment of the potential impact of climate change on forest growth. *Applied Ecology and Environmental Research*, 13(1), 277–288. https://doi.org/10.15666/aeer/1301_277288
- Shi, Z., Xu, L., Dong, L., Gao, J., Yang, X., Lü, S., Feng, C., Shang, J., Song, A., Guo, H., & Zhang, X. (2015). Growth-climate response and drought reconstruction from tree-ring of Mongolian pine in Hulunbuir, Northeast China. *Journal of Plant Ecology*, 9(1), 51–60. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtv029>
- Spann, S., Volland, F., Pucha, D., Peters, T., Cueva, E., & Bräuning, A. (2016). Climate variability, tree increment patterns and ENSO-related carbon sequestration reduction of the tropical dry forest species *Loxopterygium huasango* of Southern Ecuador. *Trees - Structure and Function*, 30(4), 1245–1258. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1362-0>
- Surayothee, W., Buajan, S., Fu, P., Pumijumnong, N., Fan, Z., Panthi, S., Finnegan, P. M., Zhang, Y., Chen, Y., Tor-Ngern, P., Chanthorn, W., Nathalang, A., & Brockelman, W. Y. (2021). Growth-climate relationships and long-term growth trends of the tropical forest tree *Choerospondias axillaris*

- (Anacardiaceae) in east-central Thailand. *Forests*, 12(12), 1–13.
<https://doi.org/10.3390/f12121655>
- Theußl, S., Ligges, U., & Hornik, K. (2011). Prospects and challenges in R package development. *Computational Statistics*, 26(3), 395–404.
<https://doi.org/10.1007/s00180-010-0205-5>
- Trenberth, K. E. (2019). El Niño southern oscillation (ENSO). In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (Issue November 2012). Elsevier Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.04082-3>
- Varela, S. (2015). “R packages. Organize, test, document, and share your code”, de Hadley Wickham. In *Ecosistemas* (Vol. 24, Issue 3).
- Volland-Voigt, F., Bräuning, A., Ganzhi, O., Peters, T., & Maza, H. (2011). Radial stem variations of *Tabebuia chrysantha* (Bignoniaceae) in different tropical forest ecosystems of southern Ecuador. *Trees - Structure and Function*, 25(1), 39–48. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0461-6>
- Vos, R., Velasco, M., & Labastida, E. (1999). Economic and social effects of “El Niño” in Ecuador, 1997-8. *ISS Working Paper Series/General Series*, 292(October 1999), 1–55.
<http://repub.eur.nl/res/pub/19037/wp292.pdf> <http://repub.eur.nl/pub/19037/wp292.pdf>
- Worbes, M., Herawati, H., & Martius, C. (2017). Tree growth rings in tropical peat swamp forests of Kalimantan, Indonesia. *Forests*, 8(9), 1–15.
<https://doi.org/10.3390/f8090336>
- Zang, C., & Biondi, F. (2013). Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia*, 31(1), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.08.001>
- Zang, C., & Biondi, F. (2015). Treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431–436.
<https://doi.org/10.1111/ecog.01335>