https://doi.org./10.17163/abyaups.95.731

Capítulo 2

La influencia de El Niño-Oscilación del Sur en el crecimiento de especies forestales al sur de Ecuador

Darwin Pucha
Fridrich Alexander Universität, Erlangen-Nürnberg, Alemania /
Universidad Nacional de Loja, Ecuador
darwin.pucha@unl.edu.ec
https://orcid.org/0000-0003-3212-1184

Wilson Zúñiga-Sarango
Universidad Nacional de Loja
wilson.zuniga@unl.edu.ec
https://orcid.org/0000-0003-4610-7789

Introducción

El fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) involucra una compleja interacción entre la atmósfera y el océano Pacífico tropical, caracterizada por anomalías en la temperatura superficial del mar (TSM) y en los patrones de circulación atmosférica (Wang *et al.,* 2017). ENOS consiste en dos fases: El Niño, asociada al calentamiento anómalo del Pacífico central y oriental, y La Niña, caracterizada por un enfriamiento anómalo de estas regiones (Liguori *et al.*, 2022). Este fenómeno natural presenta variaciones irregulares en su intensidad y periodicidad, las cuales tienen una amplia influencia en el clima y los ecosistemas de diversas regiones del mundo (Bendix *et al.,* 2008). Por su alta influencia que tiene a

lo largo del Pacífico central el ENOS tiene cuatro regiones bien definidas, la 1+2, 3, 3.4, y 4 (Wang *et al.,* 2017; Wang y Lui, 2021). Si bien ENOS ha sido extensamente estudiado durante décadas, su comportamiento aún no se comprende en su totalidad y persiste incertidumbre sobre cómo este fenómeno podría modularse en el futuro ante el cambio climático global (Misra, 2023; Cai *et al.,* 2014). En particular, se requiere investigar con mayor profundidad cómo ENOS impacta en el crecimiento, productividad y distribución de las especies forestales en diferentes áreas tropicales y subtropicales (Lara *et al.,* 2020, Feeley *et al.,* 2012).

Los registros históricos contenidos en los anillos de crecimiento de los árboles han demostrado la influencia de ENOS en zonas próximas al océano Pacífico, tanto en el sur de Sudamérica (Lara *et al.,* 2020) como en el norte de México (Villanueva Díaz *et al.*, 2018). Sin embargo, en América del Sur esta relación climática entre ENOS y el crecimiento forestal se ve modulada por la acción de otros factores, como la Oscilación de Madden-Julian (MJO) y los complejos patrones de circulación atmosférica sobre la extensa cuenca amazónica (Shimizu y Ambrizzi, 2016; Recalde-Coronel *et al.,* 2020).

La MJO es un modo de variabilidad climática intraestacional, que consiste en la propagación de zonas organizadas de convección profunda y precipitaciones intensas, desde el océano Índico hacia el Pacífico tropical (Zhang, 2005). Cuando la MJO se encuentra activa en su fase convectiva, aumenta la probabilidad de ocurrencia de eventos climáticos extremos asociados a ENOS en gran parte de América del Sur, resultando en inundaciones, deslizamientos y otros impactos (Carvalho *et al.,* 2002; Mayta *et al.,* 2019).

Por otra parte, el cambio climático global (CC) también está modificando los patrones espaciales y temporales de ENOS en las últimas décadas, a través de alteraciones en los gradientes de temperatura superficial marina y en los flujos de circulación atmosférica tropical (Cai *et al.,* 2014; Collins *et al.*, 2010). A su vez, el CC está afectando la distribución, composición, funcionalidad y resiliencia de numerosos ecosistemas y especies forestales alrededor del mundo, particularmente su crecimiento

anual, el cual puede registrarse en los anillos de crecimiento de los árboles (Guan *et al.,* 2012; Wu *et al.,* 2015, Pucha *et al.,* 2015).

Las emisiones de gases de efecto invernadero por actividades humanas, los cambios en el uso y cobertura del suelo, y la variabilidad climática interna, actúan en conjunto modulando al CC global (Karl y Trenberth, 2003). Ante este contexto dinámico, resulta fundamental abordar la interrogante: ¿cómo es la influencia diferenciada de ENOS en el crecimiento de distintas especies forestales ubicadas en distintos ecosistemas al sur de Ecuador?

Profundizar en dar respuestas a esta pregunta permitiría mejorar considerablemente los modelos climáticos regionales y los pronósticos ante diversos escenarios de cambio climático, con importantes implicaciones para el diseño de estrategias de adaptación, mitigación y gestión sostenible de los recursos forestales, hídricos y la biodiversidad. Asimismo, aportaría información valiosa para el desarrollo de actividades productivas como la silvicultura y la agricultura, posibilitando anticipar y mitigar los impactos de sequías y estrés hídrico severo sobre las plantaciones forestales, sistemas agroforestales y cultivos leñosos de la región, asociados a distintas fases de ENOS (Sánchez y Reyes, 2015).

Por ello, este estudio tuvo como objetivo analizar la influencia de ENOS en el crecimiento radial anual de siete importantes especies forestales, ubicadas en tres zonas contrastantes (zona de tierras bajas o bosque seco, zona andina, y zona amazónica) al sur de Ecuador.

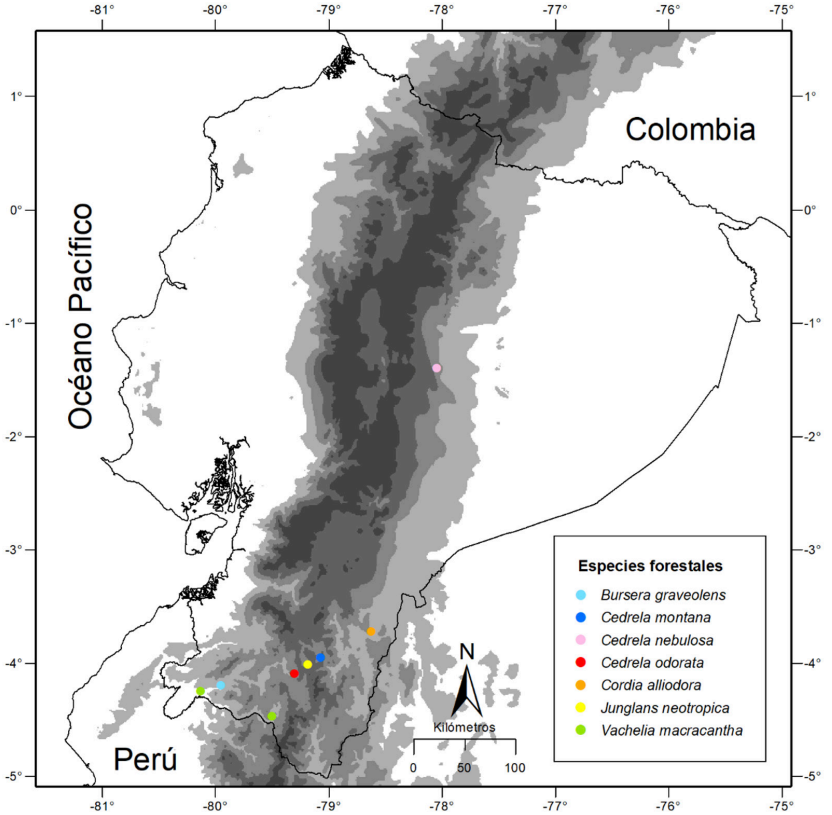
Metodología

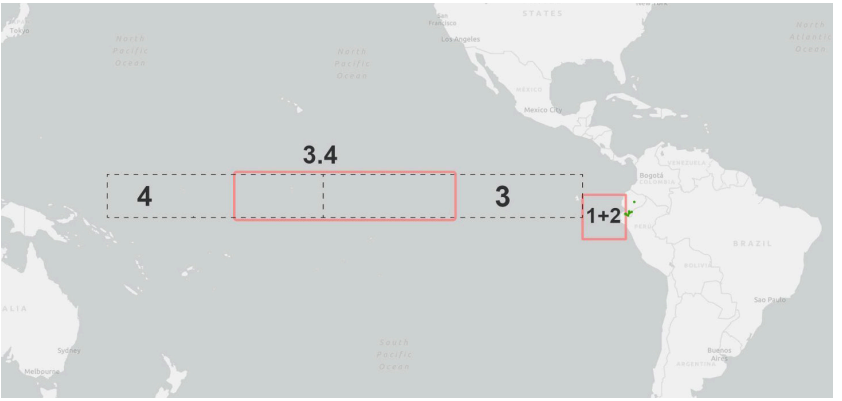
Área de estudio

Este estudio se realizó con base en mediciones anuales del ancho de anillos de crecimiento al sur de Ecuador, en siete especies forestales distribuidas en ocho sitios en ecosistemas de bosque seco, andino, y amazónico. En la parte andina se colectaron núcleos de madera en

cinco localidades de la provincia de Loja, en la parte Amazónica en dos localidades en la provincia de Zamora Chinchipe, y una localidad en la provincia de Pastaza (figura 1).

Figura 1
Mapa de la ubicación de las especies forestales estudiadas al sur de Ecuador y regiones del ENOS





Nota. Panel superior muestra las especies forestales que corresponden a los siguientes sitios: *Bursera graveolens*- Laipuna, *Cedrela montana*-parroquia Sabanilla, *Cedrela nebulosa*-parroquia Mera, *Cedrela odorata*-parroquia El Tambo, *Cordia alliodora*-parroquia Los Encuentros, *Juglans Neotropica*- parroquia San Sebastián, y *Vachelia macracantha*-parroquia Zapotillo y Bellavista. Panel inferior muestra a lo largo del Pacífico central las regiones del ENOS donde se resaltan las 1+2 y 3.4 analizadas en este estudio.

Las especies forestales muestreadas en bosque seco fueron *Vachellia macracantha* (Faique) a 338 m s.n.m, ecosistema vegetal clasificado según MAE (2012) como Bosque deciduo de tierras bajas del Jama-Zapotillo-BdTc01, y *Bursera graveolens* (incienso o palo santo) a 648 m s. n. m en el ecosistema Bosque semideciduo piemontano del Catamayo-Alamor-BmPn01. En la parte andina, se muestreó *Cedrela odorata (Cedro)* a 1 477 m s. n. m. en el Bosque y Arbustal semideciduo del Sur de los Valles-BmBn02, *Juglans neotropica (Nogal)* a 2 216 m s. n. m en el Bosque siempreverde montano del Sur de la cordillera Oriental de los Andes-BsMn02, *y Vachellia macracantha* (Faique) a 1336 m s. n. m. en el Bosque semideciduo piemontano del Catamayo-Alamor-BmPn01. En la parte amazónica, en la provincia de Zamora Chinchipe se muestreó *Cedrela montana (Cedro)* a 1974 m s. n. m. en el Bosque siempreverde montano bajo del sur de la cordillera Oriental de los Andes- BsBn02, y *Cordia alliodora (Laurel costeño)* a 901 m s. n. m. en el Bosque siempreverde piemontano de las cordilleras del Cóndor-Kutukú-BsPa02. Además, en dirección norte en la provincia de Pastaza se mues-

treó *Cedrela nebulosa (Cedro)* a 1 209 m s. n. m en el Bosque siempreverde piemontano del Norte de la cordillera Oriental de los Andes-BsPn03. Los detalles biogeográficos de cada sitio se muestran en la tabla 1.

La caracterización biogeográfica de cada ecosistema es de la siguiente manera: el BmPn01 va desde los 400 hasta los 1600 m s. n. m., tiene un clima termotropical, con una temperatura anual de 23^{0}C y precipitación anual de 412 mm (MAE, 2012). BmBn02 va desde los 1200 hasta los 2000 m s.n.m, tiene un clima mesotropical, con una temperatura anual de 23 ^{0}C y precipitación anual de 414 mm (MAE, 2012). BsMn02 va desde los 2200 hasta los 3000 m s. n. m., tiene un clima mesotropical inferior y superior, una temperatura anual de 11 ^{0}C y precipitación anual de 2894 mm (MAE, 2012). BdTc01 va desde los 0 hasta los 400 m s. n. m., tiene un clima infra-tropical, con una temperatura anual de 26 ^{0}C y precipitación anual de 702 mm (MAE, 2012). BsBn02 va desde los 1600 hasta los 2200 m s. n. m, tiene un clima termotropical superior, una temperatura anual de 19 ^{0}C y precipitación anual de 2245 mm (MAE, 2012). BsPa02 va desde los 350 hasta los 1400 m s. n. m., tiene un clima termotropical inferior, con una temperatura anual de 24 ^{0}C y precipitación anual de hasta 3730 mm (MAE, 2012).

Tabla 1
Información *biogeográfica de las especies forestales en estudio*

Especie (Nombre científico-clasificador)	Provincia-Cantón-Parroquia	Latitud	Longitud	Altitud (m s. n. m.)	Ecosistema vegetal (MAE, 2012)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
Bursera graveolens - (Kunth) Triana & Planch.	Loja - Macará - Laipuna	-4,183	-79,920	648	BmPn01	23	412
Cedrela montana - Moritz ex Turcz.	Zamora Chinchipe - Zamora - Sabanilla	-3,973	-79,071	1974	BsBn02	19	2245
Cedrela nebulosa - T.D.Penn. & Daza	Pastaza - Mera - Mera	-1,405	-78,052	1209	BsPn03	22	2203

Especie (Nombre científico-clasificador)	Provincia-Cantón-Parroquia	Latitud	Longitud	Altitud (m s. n. m.)	Ecosistema vegetal (MAE, 2012)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)
Cedrela odorata - Linnaeus, Carl von	Loja - Catamayo - El Tambo	-4,113	-79,312	1477	BmBn02	23	414
Cordia alliodora - (Ruiz & Pav.) Oken	Zamora Chinchipe - Yantzaza - Los Encuentros	-3,734	-78,618	901	BsPa02	24	3730
Juglans neotropica - Diels	Loja - Loja - San Sebastián	-4,035	-79,196	2216	BsMn02	11	2894
Vachellia macracantha - (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Seigler & Ebinger	Loja - Zapotillo - Zapotillo	-4,256	-80,141	338	BdTc01	26	702
Vachellia macracantha - (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Seigler & Ebinger	Loja - Espíndola - Bellavista	-4,503	-79,495	1336	BmPn01	23	412

Obtención de datos

Series temporales del ancho de los anillos de crecimiento (dendrocronología)

La obtención de datos de ancho de anillos de crecimiento anual de las siete especies forestales (tabla 1), se obtuvo desde la base de datos del Laboratorio de Dendrocronología de la Universidad Nacional de Loja, Ecuador. Para ello se utilizó métodos dendrocronológicos estandarizados para especies tropicales. Primero, se realizó un proceso de selección de individuos en campo, tomando en cuenta las mejores características fisonómicas del diámetro con fustes cilíndricos, buen estado fitosanitario

y proximidad entre individuos. De cada individuo se extrajeron de dos a cuatro núcleos de madera con un barreno de Pressler. En cada sitio de muestreo, se seleccionaron de 15 a 30 individuos, hasta alcanzar un tamaño de muestra mínimo confiable de 0.85 como lo establece el estadístico de población Expressed Population Signal (EPS). En cada sitio se seleccionó un individuo de referencia del cual se extrajo al menos una muestra de todos sus radios N, S, E, O o de ser posible una sección transversal completa (disco o rodaja) de 3 cm a 5 cm de ancho. Las muestras fueron etiquetadas, montadas, y lijadas en su plano transversal con lijas desde un grano número 60 aumentando progresivamente hasta llegar al grano número 4000, dejando toda la superficie pulida y con una alta visibilidad de su estructura anatómica. Finalmente se realizó la identificación, conteo, y medición de anillos verdaderos en cada especie con la ayuda del sistema de medición de anillos Lintab 6 Pro con el software TsapWin 4.x.

El Niño-Oscilación del Sur

Los datos climáticos de los índices oceánicos de ENOS 1+2 y ENOS 3.4 de 1850 a 2022 fueron obtenidos de la página web de Physical science laboratory NOAA (Rayner *et al.*, 2003; Reynolds *et al.,* 2002) en formato estándar PSL. Se utilizaron únicamente datos de estas dos regiones porque son las más representativas a lo largo del Pacífico Central.

Análisis de datos

Los análisis y modelos de datos se realizaron en el entorno de desarrollo integrado RStudio (RStudio Team, 2022). Para el análisis de datos dendrocronológicos, se usaron series temporales anuales del ancho de anillos de crecimiento de cada sitio (tabla 2). Por cada sitio se creó una cronología basada en mediciones del ancho de anillos de distintos individuos. Para ello, primero se realizó un proceso de eliminación de tendencias biológicas por la edad de cada árbol, usando el método *Detrending* del paquete especializado en dendrocronología *dplR{}* de Bunn (2008). Con ello se creó una cronología o serie temporal por sitio que fue

utilizada para medir el grado de correlación entre el crecimiento anual de cada especie forestal con las variaciones del ENOS 1+2 y ENOS 3.4.

Tabla 2
Tamaño de las cronologías basadas en el ancho de anillos de crecimiento por especie y sitio

Especie	Año		Cronología (años)
	Inicio	Fin	
Bursera graveolens (Kunth) Triana & Planch	1900	2 011	112
Cedrela montana Moritz ex Turcz.	1949	2 018	70
Cedrela nebulosa T.D. Penn. & Daza	1900	2 019	120
Cedrela odorata Linnaeus, Carl von	1946	2 019	74
Cordia alliodora Ruiz & Pav.	1987	2 017	31
Juglans neotropica Diels	1954	2 018	65
Vachellia macracantha (Bellavista) Humb. & Bonpl. ex Willd.	1980	2 019	40
Vachellia macracantha (Zapotillo) Humb. & Bonpl. ex Willd.	1997	2 019	23

Nota. Para la selección de modelos se utilizó el criterio de información de Akaike aplicando la función *AIC()* del paquete *stats{}* (R Core Team and contributors worldwide, 2023), tomando como criterio de selección el modelo con menor AIC y el criterio de no complejidad entre modelos con variación de hasta dos unidades.

Para establecer estas relaciones se utilizó el test de correlación con el método de Pearson aplicando la función *cor.test()* del paquete *stats{}* (R Core Team and contributors worldwide, 2023), y modelos GAM y GLM para verificar cuál tiene mayor ajuste con las variaciones de las series temporales del ancho de los anillos de crecimiento. Los modelos utilizados fueron:

Modelo lineal generalizado (GLM) con la función *glm()* y el argumento familia = "quasipoisson" del paquete *stats{}* (R Core Team and contributors worldwide, 2023).

Modelo aditivo generalizado (GAM) con la función *gam()* del paquete *mgcv{}* (Wood, 2017), y el Modelo aditivo generalizado (GAM) con el método de estimación de máxima verosimilitud restringida (REML) aplicando la función *gam()* con base = "cr" del paquete *mgcv{}* (Wood, 2017).

Se utilizaron estos modelos por su flexibilidad y por su rango de distribución de datos para el análisis de series temporales, así como lo recomiendan varios autores como Araújo y Luoto (2007), Hijmans y Graham (2006), Jeschke y Strayer (2008) y Ravindra *et al.* (2019). Para el nivel de significancia de cada modelo se usó un $p < 0.05$ (van Oijen, 2020).

Resultados

Los resultados mostraron que ENOS 1+2 tuvo mayor influencia significativa con las especies de bosque seco que son las más cercanas a la región del Pacifico. A diferencia de ENOS 3.4 que mostró mayor influencia significativa en las especies de la región Amazónica en BsPa02 (*). Sin embargo, tanto ENOS 1+2 y ENOS 3.4 no tuvieron influencia significativa sobre *las especies que crecen* en la zona media y alta de la cordillera andina (tabla 3).

Influencia de ENOS 1+2 sobre el crecimiento de las especies forestales

La influencia de ENOS 1+2 fue más fuerte en las especies cercanas al Pacífico como *B. graveolens* y *V. macracantha* (sitio-Zapotillo) con un nivel de significancia de $p < 0{,}001$**. En menor grado también se encontró una correlación significativa de $p < 0{,}032$, $< 0{,}033$, y $< 0{,}016$* en *C. odorata* en BmBn02, *C. nebulosa* BsPn03, *y C. alliodora* en BsPa02 respectivamente () (tabla 3 y figura 2).

Se encontró que el mejor modelo para analizar la relación entre el ancho de anillo y ENOS 1+2 fue el GAM, con un valor *p* significativo similar al test de correlación de Pearson.

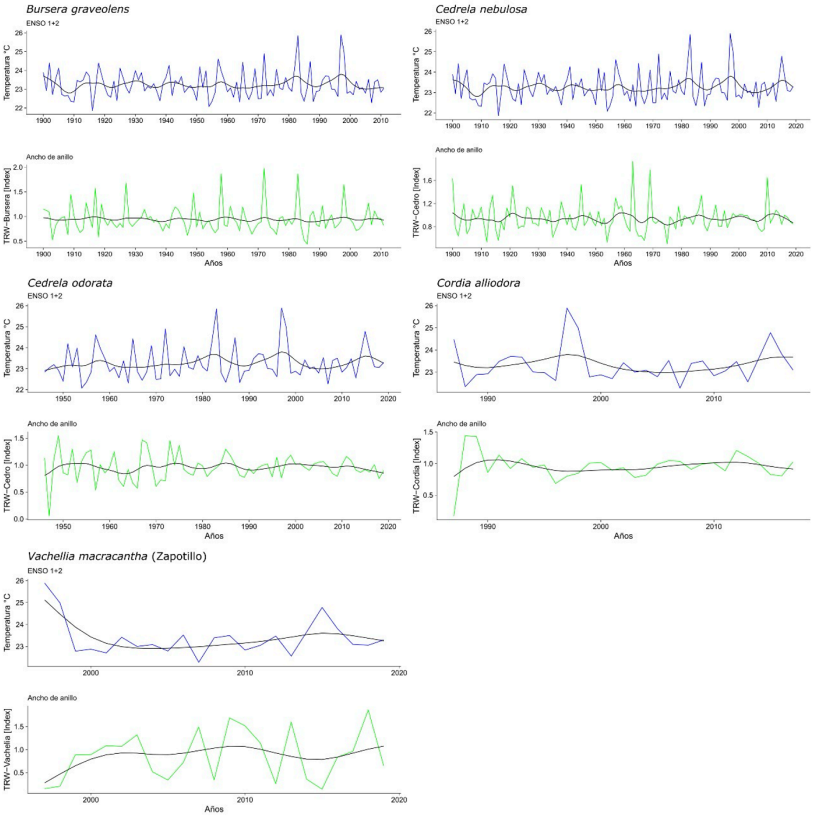
Tabla 3

Análisis de significancia entre el crecimiento anual de los árboles y el ENOS 1+2 y ENOS 3.4 con distintos modelos generalizados

Especie	ENOS 1+2					ENOS 3.4				
	GLM p	GAM p	GAM (REML) p	p	r	GLM p	GAM p	GAM (REML) p	p	r
Bursera graveolens	0.000222	0,0003***	0.000891	0,0003***	0,3343	0.129	0,131	0.131	0,131	0,144
Cedrela montana	0.805	0,8050	0.805	0,8055	0,0300	0.566	0,567	0.567	0,567	0,070
Cedrela nebulosa	0.0333	0,0351*	0.0351	0,0338*	0,1940	0.0386	0,039*	0.0393	0,039*	0,188
Cedrela odorata	0.0307	0,0321*	0.0321	0,0321*	-0,2494	0.00968	0,010*	0.0104	0,010*	-0,296
Cordia alliodora	0.0183	0,0168*	0.0168	0,0168*	-0,4263	0.00345	0,003**	0.00265	0,003**	-0,521
Juglans neotropica	0.495	0,4940	0.529	0,4941	0,0863	0.254	0,254	0.254	0,254	0,143
Vachellia macracantha (Bellavista)	0.114	0,1092	0.109	0,1092	-0,2572	0.154	0,145	0.218	0,145	-0,235
Vachellia macracantha (Zapotillo)	0.00185	0,0018**	1.81E-03	0,0018**	-0,6146	0.113	0,102	0.16	0,102	-0,350

Nota. La tabla muestra al Modelo lineal generalizado (GLM); Modelo aditivo generalizado (GAM); GAM *con m*étodo de ajuste de máxima verosimilitud residual de modelos lineales mixtos (GAM-REML). Se aplicó el Criterio de información de Akaike (AIC), y se obtuvo el Valor de significancia de la prueba (p); y el Valor de relación entre variables (r). En negrita se muestran los valores significativos de los modelos ($p < 0,05$).

Figura 2
Relación entre series temporales del ancho de anillo (TRW) y ENOS 1+2 en las especies forestales más influenciadas



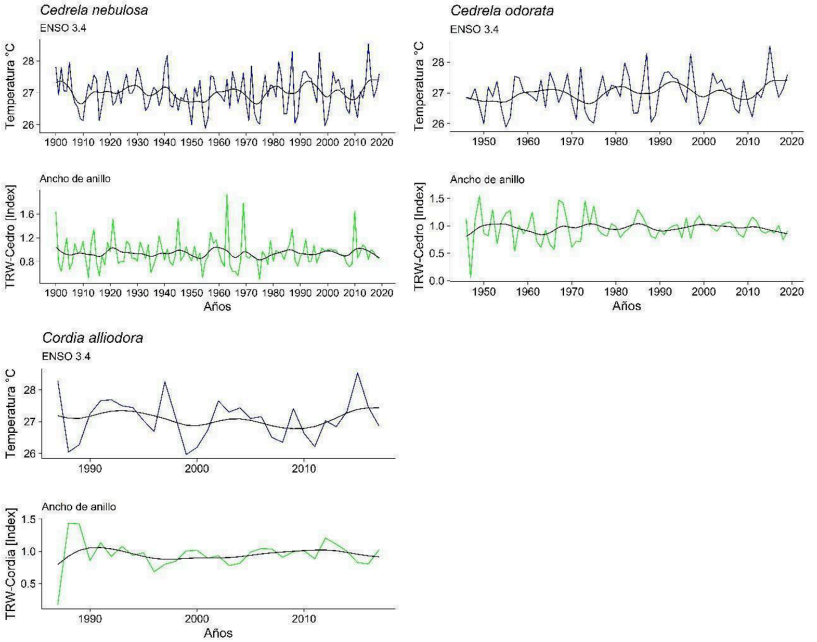
Influencia de ENOS 3.4 sobre el crecimiento de las especies forestales

La influencia de ENOS 3.4 fue más significativa sobre el crecimiento de las especies que crecen en la parte amazónica como *C. nebulosa* en BsPn03 (p = 0,039*), *y C. alliodora* BsPa02 (p = 0,003**), así como *C.*

odorata en BmBn02 (p = 0,01*) de la zona intermedia de la cordillera (tabla 3 y figura 3).

Así mismo, se encontró que el mejor modelo para analizar la relación entre el ancho de anillo y ENOS 3.4 fue el GAM, donde se obtuvo un valor de p similar al test de correlación de Pearson.

Figura 3
Relación del ancho de anillo (TRW) y ENOS 3.4 en especies forestales influenciadas



Discusión

La alta variabilidad de los eventos ENOS en cada región del Pacífico aumenta la complejidad para determinar la intensidad de su ocurrencia debido a la interacción con otros fenómenos naturales, especialmente en

el Pacífico central donde su influencia en el crecimiento de los árboles ha sido poco explorada (Pucha-Cofrep *et al.,* 2015). Por ello, este estudio demostró la sensibilidad del crecimiento de los ecosistemas forestales de Ecuador con las anomalías ENOS 1+2 y ENOS 3.4 sobre diferentes áreas terrestres de las tierras bajas donde están los bosques secos, la región interandina, y la región amazónica. Los resultados mostraron que ENOS 1+2, que es la región más cercana a las costas del Ecuador y Perú (Diaz y Markgraf, 2001), influyó de manera más significativa con las especies B. graveolens y V. macracantha, esto se debe a su ubicación geográfica ya que se encuentran más cercanas a la región litoral del Pacífico en las zonas bajas de la cordillera andina (figura 1).

Sin embargo, en las zonas andinas medias y bajas de la cordillera, no es muy clara la influencia de ningún tipo de ENOS, pero se muestra una leve dependencia entre las variables de acuerdo con lo explicado por los modelos GAM aplicados en este estudio. El modelo aditivo generalizado (GAM) fue seleccionado como el más óptimo mediante el criterio de información de Akaike (AIC) por su mayor flexibilidad frente a modelos lineales, para el análisis de series climáticas y series temporales de crecimiento forestal (Verbyla, 2019). Los GAM permiten estimaciones iterativas con splines suavizantes, mejorando el ajuste (Murase *et al.,* 2009; Dominici *et al.*, 2022). Dada su versatilidad, los modelos GAM y AIC se aplican en estudios de modelamiento climático y ecológico (Araújo y Luoto, 2007; Ravindra *et al.*, 2019). Sin embargo, en los árboles que crecen en estos sitios no se encontró ninguna relación ENOS-crecimiento, por lo cual es importante seguir testeando nuevos modelos que permitan encontrar estas señales climáticas de manera más clara en estos ecosistemas forestales.

Hay que recalcar que esta zona Andina está en un sitio de convergencia climática donde se mezclan las corrientes del Pacífico y del Amazonas por consecuencia de la depresión andina de Huancamamba que es como una puerta de entrada para estas corrientes climáticas. La depresión de Huancabamba comienza en la región sur de Ecuador en la provincia de Loja y se extiende hasta la cordillera de los Andes. Es un área de los

Andes que no está bien explorada y tiene una importante importancia biogeográfica para la región, especialmente por la complejidad de las variaciones climáticas que se dan en este sitio (Richter y Moreira, 2005).

Al contrario del ENOS 1+2, es interesante ver cómo ENOS 3.4 solamente muestra una influencia significativa con las especies *Cedrela nebulosa, Cedrela odorata* y *Cordia alliodora* ubicadas en la región amazónica, en su zonas media y baja, y no influye de manera significativa con las especies cercanas a las zonas costeras del Pacífico. En un estudio de Pompa-García y Jurado (2014) se encontró un resultado similar, en el cual ENOS 3.4 ejerce también una gran influencia sobre el crecimiento de Pinus en México que crecen en la parte alta de la cordillera de Sierra Madre Occidental que está lejos de las zonas costeras. Al parecer, el ENOS 3.4 no tiene ninguna influencia en las zonas costeras del Pacífico.

Sin embargo, Mundo *et al.* (2012) en Argentina y Venegas-González *et al.* (2016) en Brasil encontraron que ENOS 3.4 influye positivamente en el crecimiento de ciertas especies, e inclusive Fichtler *et al.* (2004) notó que en Namibia ENOS 3.4 tuvo una influencia positiva en el crecimiento de dos especies arbóreas de ecosistemas semiáridos. Según Venegas-González *et al.* (2016) esto se debe a las características de transición entre signos opuestos en el norte/noreste y el sur, pero Mundo *et al.* (2012) plantea que esto se debe a la diferencia altitudinal o distribución geográfica de las especies.

En un estudio de *C. odorata* de Nunes Menezes *et al.* (2022) se encontró que esta especie solamente responde positivamente a la precipitación más no a la temperatura. Por lo tanto, se requieren más estudios para entender la compleja interacción entre el clima, la fisiología de las especies y su distribución geográfica, a fin de modelar mejor el impacto del ENOS en los distintos ecosistemas forestales (Rojas-Soto *et al.,* 2012).

Además, es importante considerar el efecto de otros fenómenos climáticos globales como el Dipolo del Océano Índico (DOI) y su interacción con ENOS, ya que pueden modular conjuntamente el clima en Sudamérica (Kayano y Andreoli, 2007). Se ha encontrado que el DOI

negativo puede exacerbar los efectos de El Niño, mientras que el DOI positivo puede contrarrestarlos (Abram *et al.*, 2020). Por lo tanto, se requieren análisis multivariados para desentrañar estos efectos complejos sobre el crecimiento forestal en Ecuador y la región.

Finalmente, a medida que el cambio climático altera los patrones de ENOS y otros fenómenos (Cai *et al.,* 2014), es esencial desarrollar modelos predictivos del crecimiento arbóreo ante distintos escenarios climáticos futuros. Esto permitirá generar estrategias de adaptación y conservación de los bosques tropicales frente al calentamiento global (Sánchez y Reyes, 2015). En conclusión, este estudio sentó las bases para futuras investigaciones interdisciplinarias sobre las teleconexiones climáticas y su impacto en la ecología y el manejo sostenible de los bosques tropicales.

Conclusiones

Este estudio demuestra que el crecimiento de las especies forestales en el sur de Ecuador es altamente sensible a las anomalías climáticas del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), específicamente ENOS 1+2 en las zonas más cercanas al litoral del Pacífico, y ENOS 3.4 en la zona amazónica, mientras que las especies interandinas no evidenciaron impactos significativos con ningún ENOS. La influencia diferenciada se debe a la ubicación geográfica y cercanía de las distintas especies a los ecosistemas costeros o amazónicos. Por ello, se requiere investigar más a fondo la interacción compleja entre variables climáticas, fisiología de las especies y su distribución, para mejorar los modelos predictivos ante escenarios de cambio climático, considerando además el efecto combinado de ENOS y otros fenómenos globales mediante análisis multivariados. El uso de modelos flexibles como GAM permite un mejor ajuste para el análisis de series climáticas y forestales. Es así que este estudio sienta las bases para futuras investigaciones interdisciplinarias sobre teleconexiones y su efecto en el crecimiento de bosques tropicales, por lo que se insta a seguir desarrollando modelos predictivos mejorados ante el calentamiento global.

Referencias bibliográficas

Abram, N. J., Ummenhofer, C. C., Kiladis, G. N., Sen Gupta, A., England, M. H., McPhaden, M. J.,... y Diaz, H. F. (2020). Coupling of Indo-Pacific climate variability over the last millennium. *Nature, 579*(7799), 385-392. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2084-4

Araújo, M. B. y Luoto, M. (2007). The importance of biotic interactions for modelling species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, *16*, 743-753. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00359.x

Bendix, J., Rollenbeck, R., Fabian, P., Emck, P., Richter, M. y Beck, E. (2008). Climate variability. In *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador* (pp. 281-290). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-540-73526-7_27

Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, *26*(2), 115–124. https://doi.org/10.1016/J.DENDRO.2008.01.002

Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., Van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., England, M., Wang, G., Guilyardi, E. y Jin, F. F. (2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature climate change, 4*(2), 111-116. https://doi.org/10.1038/nclimate2100

Carvalho, L. M., Jones, C. y Liebmann, B. (2002). Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. *Journal of Climate*, *15*(17), 2377-2394. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015%3C2377:EPEISS%3E2.0.CO;2

Collins, M., An, S. I., Cai, W., Ganachaud, A., Guilyardi, E., Jin, F. F., Jochum, M., Lengaigne, M., Power, S., Timmermann, A., Vecchi, G. y Wittenberg, A. (2010). The impact of global warming on the tropical Pacific ocean and El Niño. *Nature Geoscience, 3*(6), 391-397. https://doi.org/10.1038/ngeo868

Diaz, H. F. y Markgraf, V. (eds.) (2000). *El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale variability and global and regional impacts.* Cambridge University Press.

Dominici, F., Mcdermott, A., Zeger, S. L. y Samet, J. M. (2022). On the use of generalized additive models in time-series studies of air pollution and health. *American Journal of EPIDEMIOLOGY*, *156*(3), 193-203. https://doi.org/10.1093/aje/kwf062

Feeley, K. J., Rehm, E. M. and Machovina, B. (2012). Perspective: the responses of tropical forest species to global climate change: acclimate, adapt, migrate, or go extinct? *Frontiers of biogeography*, *4*(2).

Fichtler, E., Trouet, V., Beeckman, H., Coppin, P. y Worbes, M. (2004). Climatic signals in tree rings of Burkea africana and Pterocarpus angolensis from semiarid forests in Namibia. *Trees- Structure and Function*, *18*(4), 442-451. https://doi.org/10.1007/s00468-004-0324-0

Guan, B. T., Wright, W. E., Chung, C. H. y Chang, S. T. (2012). ENSO and PDO strongly influence Taiwan spruce height growth. *Forest Ecology and Management*, *267*, 50–57. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.028

Hijmans, R. J. y Graham, C. H. (2006). The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global Change Biology*, *12*, 2272-2281. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01256.x

Jeschke, J. M. y Strayer, D. L. (2008). Usefulness of bioclimatic models for studying climate change and invasive species. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1134*, 1-24. https://doi.org/10.1196/annals.1439.002

Karl, T. R. y Trenberth, K. E. (2003). Modern Global Climate Change. *Science*, *302*(5651), 1719-1723. https://doi.org/10.1126/science.1090228

Kayano, M. T. y Andreoli, R. V. (2007). Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation. *International Journal of Climatology, 27*(4), 531-540. https://doi.org/10.1002/joc.1417

Lara, A., Villalba, R., Urrutia-Jalabert, R., González-Reyes, A., Aravena, J. C., Luckman, B. H., Cuq, E., Rodríguez, C. y Wolodarsky-Franke, A. (2020). + A 5680-year tree-ring temperature record for southern South America. *Quaternary Science Reviews*, *228*, 106087. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106087

Liguori, G., McGregor, S., Singh, M., Arblaster, J. y Di Lorenzo, E. (2022). Revisiting ENSO and IOD contributions to australian precipitation. In *Geophysical Research Letters* (Vol. 49, Issue 1). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1029/2021GL094295

MAE. (2012). *Sistema de clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental*. https://bit.ly/3zPcBRN

Mayta, V. C., Ambrizzi, T., Espinoza, J. C. y Silva Dias, P. L. (2019). The role of the Madden-Julian oscillation on the Amazon Basin intraseasonal rainfall variability. *International Journal of Climatology*, *39*(1), 343-360. https://doi.org/10.1002/joc.5810

Misra, V. (2023). *El Niño and the Southern Oscillation. In: An Introduction to Large-Scale Tropical Meteorology. Springer Atmospheric Sciences*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12887-5_7

Mundo, I. A., Roig Juñent, F. A., Villalba, R., Kitzberger, T. y Barrera, M. D. (2012). Araucaria araucana tree-ring chronologies in Argentina: spatial growth variations and climate influences. *Trees*, *26*(2), 443-458. https://doi.org/10.1007/s00468-011-0605-3

Murase, H., Nagashima, H., Yonezaki, S., Matsukura, R. y Kitakado, T. (2009). Application of a generalized additive model (GAM) to reveal relationships between environmental factors and distributions of pelagic fish and krill: a case study in Sendai Bay, Japan. *ICES Journal of Marine Science*, *66*(6), 1417-1424. https://doi.org/10.1093/icesjms/fsp105

Nunes Menezes, I. R., Vieira Aragão, J. R., Pagotto, M. A. y Lisi, C. S. (2022). Teleconnections and edaphoclimatic effects on tree growth of Cedrela odorata L. in a seasonally dry tropical forest in Brazil. *Dendrochronologia*, *72*. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125923

Pompa-García, M. y Jurado, E. (2014). Seasonal precipitation reconstruction and teleconnections with ENSO based on tree ring analysis of Pinus cooperi. *Theoretical and Applied Climatology*, *117*(3-4), 495-500. https://doi.org/10.1007/s00704-013-1018-6

Pucha-Cofrep, D., Peters, T. y Bräuning, A. (2015). 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

R Core Team and contributors worldwide. (2023). *The R stats package*. https://bit.ly/3NsVPuW

Ravindra, K., Rattan, P., Mor, S. y Aggarwal, A. N. (2019). Generalized additive models: Building evidence of air pollution, climate change and human health. *Environment International*, *132*. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104987

Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E. B., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D. P., Kent, E. C. y Kaplan, A. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, *108*(D14), 4407. https://doi.org/10.1029/2002jd002670

Recalde-Coronel, G. C., Zaitchik, B. y Pan, W. K. (2020). Madden–Julian oscillation influence on sub-seasonal rainfall variability on the west of South America. *Climate dynamics*, *54*, 2167-2185. https://doi.org/10.1007%2Fs00382-019-05107-2

Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C. y Wang, W. (2002). An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Clima-

te. *Journal of Clima*, *15*(13), 1609-1625. https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2

Richter, M. y Moreira-Muñoz, A. (2005). Heterogeneidad climática y diversidad de la vegetación en el sur de Ecuador: un método de fitoindicación. *Revista Peruana de Biología, 12*(2), 217-238. https://bit.ly/3BKnXXLs

Rojas-Soto, O. R., Sosa, V. J. y Ornelas, J. F. (2012). Forecasting cloud forest in eastern and southern Mexico: conservation insights under future climate change scenarios. *Biodiversity and Conservation, 21*(9), 2671-2690. https://doi.org/10.1007/s10531-012-0322-y

RStudio Team. (2022). *Integrated Development for R*. RStudio. https://www.rstudio.com/

Sánchez, L. y Reyes, O. (2015). Medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático en América Latina y el Caribe: Una revisión general. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://bit.ly/4f220Sk

Shimizu, M. H. y Ambrizzi, T. (2016). MJO influence on ENSO effects in precipitation and temperature over South America. *Theoretical and Applied Climatology*, *124*(1-2), 291-301. https://doi.org/10.1007/s00704-015-1421-2

van Oijen, M. (2020). Linear Modelling: LM, GLM, GAM and Mixed Models. In *Bayesian Compendium*. Springer International Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-55897-0_19

Venegas-González, A., Chagas, M. P., Anholetto Júnior, C. R., Alvares, C. A., Roig, F. A. y Tomazello Filho, M. (2016). Sensitivity of tree ring growth to local and large-scale climate variability in a region of Southeastern Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, *123*(1-2), 233-245. https://doi.org/10.1007/s00704-014-1351-4

Verbyla, A. P. (2019). A note on model selection using information criteria for general linear models estimated using REML. *Australian and New Zealand Journal of Statistics*, *61*(1), 39-50. https://doi.org/10.1111/anzs.12254

Wang, C., Deser, C., Yu, J.-Y., DiNezio, P. y Clement, A. (2017). El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A Review. En P. Glynn, D. Manzello, I. Enochs (eds.), *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific* (Vol. 8, pp. 85-106). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_4

Wang, S., Mu, L. y Liu, D. (2021). A hybrid approach for El Niño prediction based on Empirical Mode Decomposition and convolutional LSTM Encoder-Decoder. *Computers & Geosciences*, *149*, 104695.

Wood, S. (2017). *Generalized additive models: An introduction with R* (2nd edition). Chapman and Hall/CRC. https://doi.org/10.1201/9781315370279

Wu, D., Zhao, X., Liang, S., Zhou, T., Huang, K., Tang, B. y Zhao, W. (2015). Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Global Change Biology*, *21*(9), 3520-3531. https://doi.org/10.1111/gcb.12945

Zhang, C. (2005). Madden-Julian Oscillation. *Reviews of Geophysics*, *43*(2), 1-36. https://doi.org/10.1029/2004RG000158