



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

“VARIABILIDAD FLORÍSTICA EN EL
LAGO POMACOCHAS (AMAZONAS-
PERÚ) EN RESPUESTA A CAMBIOS
CLIMÁTICOS Y ANTROPOGÉNICOS
DURANTE EL PERÍODO ~1003 – 383
BP”

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR

CLAUDIA ROXANA MORALES PANTOJA

LIMA – PERÚ

2024

ASESORA

Dra. Diana Ochoa

CO ASESOR

Dr. Bruno Turcq

JURADO DE TESIS

DR. PEDRO MIGUEL TAPIA ORMEÑO

PRESIDENTE

DR. JAMES EMILIANO APAESTEGUI CAMPOS

VOCAL

MG. LUIS RAMON HUAMAN MESIA

SECRETARIO

DEDICATORIA

A mis padres, por su amor y apoyo incondicional

A mi hija, quien es mi fortaleza y mi cable a tierra

A mis abuelos, quienes me han enseñado que nada es imposible

A mis tíos que nunca olvidaré, Techy y Lucho

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Peruana Cayetano Heredia y profesores de la maestría, en especial a mi asesora Diana Ochoa quien me sumergió en la interpretación de los resultados de esta investigación y afianzó mis ganas de seguir reconstruyendo el pasado usando a los polencitos, y al profesor Bruno Turcq quien respaldó la pasantía realizada en Bondy, confió en mi para analizar las muestras de los sedimentos del lago Pomacochas y me ayudó con la interpretación geoquímica.

Al profesor Luis Huamán, mi mentor y amigo, quien me introdujo al mundo de la Palinología y a los LPPcinos que siempre me dan ánimos y hacen del laboratorio de Palinología y Paleobotánica mi segundo hogar.

A mis compañeros de la maestría, de quienes aprendí que la pasión por lo que uno hace puede ayudarte a superar cualquier obstáculo.

A mis padres Rosa y Ernesto, a mi hija Milagros, por entender mis largas ausencias, espero siempre llenarlos de orgullo.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Proyecto CONCYTEC-MAGNET “Clima, paleoambientes y biodiversidad en sistemas marinos y acuáticos continentales” (007-2017-FONDECYT).

CONCYTEC – FONDECYT (176-2019-FONDECYT) e Institut de Recherche pour le Développement (IRD), cofinanciaron la pasantía en los laboratorios de LOCEAN en el centro IRD de Bondy – Francia.

Laboratorio de Palinología y Paleobotánica – UPCH en donde se llevó a cabo el procesamiento palinológico.

VARIABILIDAD FLORÍSTICA EN EL LAGO POMACOCHAS (AMAZONAS-PERÚ) EN RESPUESTA A CAMBIOS CLIMÁTICOS Y ANTROPOGÉNICOS DURANTE EL PERÍODO ~1003 – 383 BP

ORIGINALITY REPORT

11 %	8 %	4 %	7 %
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	Submitted to Universidad Peruana Cayetano Heredia Student Paper	4 %
2	hdl.handle.net Internet Source	1 %
3	repositorio.untrm.edu.pe Internet Source	<1 %
4	idoc.pub Internet Source	<1 %
5	repositorio.unal.edu.co Internet Source	<1 %
6	www.librooa.unam.mx Internet Source	<1 %
7	repositorio.unb.br Internet Source	<1 %
8	orcid.org Internet Source	<1 %

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	
ABSTRACT	
I. INTRODUCCION	1
II. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Dinámica climática actual de Sudamérica.....	3
2.1.1 La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).....	3
2.1.2 El Niño Oscilación del Sur (ENSO).....	4
2.1.3 Sistema de Monzón Sudamericano (SMSA).....	7
2.2 Reconstrucción de la variabilidad del SMSA durante la Anomalía Climática Medieval (ACM) y Pequeña Era de Hielo (PEH) en los Andes orientales.....	9
2.3 Cobertura vegetal actual en Pomacochas.....	13
III. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION	16
3.1 Planteamiento del problema.....	16
IV. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	20
V. OBJETIVOS	22
5.1 Objetivo general.....	22
5.2 Objetivos específicos.....	22
VI. HIPÓTESIS	23
VII. METODOLOGÍA	24
7.1 Diseño de estudio.....	24
7.2 Zona de estudio.....	24
7.3 Población.....	25
7.4 Muestra.....	27
7.5 Operacionalización de variables.....	27
7.5.1 Variables explicativas o independientes.....	27
7.5.2 Variables respuesta o dependientes.....	27
7.6 Procedimientos y técnicas.....	27
7.6.1 Descripción del testigo PO6.....	27
7.6.2 Modelo de edad del Testigo PO6.....	28
7.6.3 Palinología.....	28
7.6.4 Escaneo del testigo PO6 por fluorescencia de rayos X (<i>XRF</i> , siglas en inglés).....	30
7.6.5 Plan de análisis.....	30
VIII. RESULTADOS	34
8.1 Descripción del testigo PO6.....	34
8.2 Modelo de edad del testigo PO6.....	36
8.3 Palinología.....	38
8.3.1 Descripción general de la asociación palinológica.....	38
8.3.2 Diversidad alfa: riqueza específica y estructura de la asociación	42
8.4 Composición elemental de PO6.....	54

IX. DISCUSIÓN	56
9.1 Comparación entre la cobertura actual en Pomacochas y la registrada durante 1003 – 383 BP.....	56
9.2 Variabilidad climática y las asociaciones palinológicas.....	57
9.3 Comparación del registro palinológico y climático de Pomacochas en un contexto regional.....	63
9.4 Presión antropogénica sobre las comunidades vegetales.....	67
X. CONCLUSIONES	70
XI. RECOMENDACIONES	73
XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
XIII. ANEXOS	

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Localización de la ZCIT en Sudamérica durante el verano e invierno austral.....	4
Figura 2.2 ENSO, condiciones normales y sus fases extremas	6
Figura 2.3 Componentes del Sistema de Monzón Sudamericano	8
Figura 2.4 Registros de $\delta^{18}\text{O}$ en los Andes orientales peruanos de los últimos 1500 años	11
Figura 2.5 Esquema de la humedad durante ACM (MCA, siglas en inglés) y PEH (LIA, siglas en inglés) en Sudamérica basados en registros paleoclimáticos de $\delta^{18}\text{O}$ calcita	12
Figura 2.6 Clasificación de uso y cobertura del suelo del distrito de Florida – localidad de Pomacochas para el año 2013.....	14
Figura 3.1 Cambios en los porcentajes de abundancia de polen en Pomacochas y su comparación con otros registros paleoclimáticos.....	18
Figura 3.2 Registros de polen de <i>Zea mays</i> en sedimentos lacustres durante la ACM	19
Figura 7.1 Ubicación de la zona de estudio	25
Figura 7.2 Batimetría del lago Pomacochas y lugar de perforación del testigo PO6.....	26
Figura 8.1 Fotografía del testigo PO6	34
Figura 8.2 Modelo edad-profundidad del testigo lacustre PO6	37
Figura 8.3 Palinograma y biozonas distinguidas en el segmento analizado del testigo PO6, mostrando los taxones que representan el 95% de la data palinológica analizada	41
Figura 8.4 Diversidad alfa en las muestras del segmento analizado del testigo PO6	44
Figura 8.5 Análisis de Escalamiento Multidimensional no paramétrico (nMDS) de las asociaciones palinológicas del segmento analizado del testigo PO6	47
Figura 8.6 Diagramas de dispersión entre el nMDS Axis 1, concentración de polen y las variables que presentan r^2 mayor a 0.5 según la tabla 8.3.....	50
Figura 8.7 Tipos de cobertura de acuerdo con las asociaciones palinológicas del segmento analizado del testigo PO6 y los trabajos de Salas et al. (2016) y Walentowski et al. (2018)	52
Figura 8.8 Composición elemental del segmento analizado del testigo PO6 mostrando los elementos asociados a PC1 y PC2	55
Figura 9.1 Variabilidad climática (Ti:Al) y cobertura vegetal en Pomacochas durante ~1003 – 383 BP	59

Figura 9.2 Relación entre la zona pantanosa, el lugar de recuperación del testigo PO6 y el aumento en el nivel del lago Pomacochas durante ~1003-383 BP	62
Figura 9.3 Comparación entre el index, Ti:Al y registros paleoclimáticos de precipitación en los Andes orientales peruanos	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 8.1 Características de los sedimentos del testigo PO6	35
Tabla 8.2 Dataciones radiocarbónicas y calibradas del testigo PO6 empleadas en el modelo de edad	36
Tabla 8.3 Correlación entre nMDS Axis 1. diversidad alfa y variables que representan el 95% de la data palinológica e identificada taxonómicamente...	48

RESUMEN

El lago Pomacochas se ubica en los Andes orientales, sus aguas drenan a la Cuenca Amazónica y se encuentra bajo la influencia del Sistema del Monzón Sudamericano (SMSA). Esta región ha sido habitada desde tiempos prehispánicos por diversos grupos humanos tales como los Chachapoyas (~1150 - 480 BP). El estudio palinológico de los sedimentos del lago Pomacochas describe la composición florística de la zona de estudio entre ~1003 - 383 BP, período que incluye una parte de la Anomalía Climática Medieval (ACM) y la primera mitad de la Pequeña Era de Hielo (PEH). La palinoflora registrada en las 30 muestras analizadas está asociada a zonas pantanosas, pastos y cultivos, arbustos y herbazales, pre-bosque y bosque. Sumado a un análisis de composición elemental, los resultados sugieren que Pomacochas estuvo caracterizada por un ambiente seco durante la ACM, con un solo evento de lluvias intensas, flora heterogénea, presencia de pastizales y un nivel de lago más bajo; mientras que, la primera mitad de la PEH, el ambiente fue húmedo, flora más homogénea, con predominancia de bosques, y un nivel del lago más elevado. El legado ecológico de los Chachapoyas incluye al *Alnus*, taxon asociado al pre-bosque; además, el cultivo de maíz se desarrolló en los alrededores del lago Pomacochas entre 1003 – 499 BP, con intervalos de ausencia (~940 – 878 BP, ~603 BP y ~565 – 515 BP). Finalmente, el *index* obtenido a partir de las abundancias relativas de Poaceae y *Alnus*, y Ti:Al se encuentran relacionados con otros registros isotópicos de los Andes orientales peruanos, sugiriendo que los sedimentos del lago guardan información de los cambios en la actividad monzónica durante el periodo de estudio.

PALABRAS CLAVE: POLEN, COMPOSICIÓN ELEMENTAL,
PALEOECOLOGÍA, CHACHAPOYAS, ANOMALÍA CLIMÁTICA
MEDIEVAL, PEQUEÑA ERA DE HIELO.

ABSTRACT

Lake Pomacochas is located in the eastern Andes, its water drains into the Amazon Basin and is under the influence of South American Monsoon System (SMSA). This region has been inhabited since pre-Hispanic times by various human groups such as the Chachapoyas (~1150 – 480 BP). The palynological study of Pomacochas lake's sediments describes the floristic composition of this study area between ~1003 - 383 BP, a period that includes part of the Medieval Climate Anomaly (MCA) and the first half of the Little Ice Age (LIA). The palynoflora recorded in the 30 samples analyzed is associated with swampy areas, grasslands and crops, shrubs and meadow, pre-forest, and forest. In addition, an analysis of elemental composition of the lake sediments was conducted, suggesting that Pomacochas was characterized by a dry environment during the MCA, with a single intense rainfall event, heterogeneous flora, presence of grasslands and a lower lake level; whereas, the first half of the LIA, the environment was humid, with a homogeneous flora, a predominance of forests, and a higher lake level. The ecological legacy of the Chachapoyas includes *Alnus*, which is associated with pre-forest; in addition, maize cultivation developed around Lake Pomacochas between ~1003 - 499 BP, with periods of absence (~940 - 878 BP, ~603 BP and ~565 - 515 BP). Finally, the *index* obtained from the relative abundances of Poaceae and *Alnus*, and the Ti:Al are related to other isotopic records from the eastern Peruvian Andes, suggesting that the lake sediments keep information of changes in monsoon activity within the period of the study.

KEYWORDS: POLLEN, ELEMENTAL COMPOSITION, PALEOECOLOGY,
CHACHAPOYAS, MEDIEVAL CLIMATE ANOMALY, LITTLE ICE AGE.

I. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global actual obliga a mirar hacia el pasado e indagar como la flora, fauna y el hombre han sido afectados por eventos climáticos de características similares, con la finalidad de entender el posible impacto en la biodiversidad actual y generar respuestas de mitigación o adaptación a dichos eventos. Entre los lugares que vienen siendo afectados por el incremento de la temperatura global tenemos a los *hotspots* regionales o puntos de alta biodiversidad y precipitación (Espinoza et al, 2015), los cuales son zonas que albergan una gran riqueza de especies y presentan alto endemismo, ambientes como estos los podemos encontrar en los Andes orientales peruanos y son conocidos por los servicios ecosistémicos que ofrecen como ser un almacén de carbono y fuente de agua para efluentes del Amazonas (Young et al, 2015), el cual finalmente contribuye con un 17% de descarga de agua dulce global al océano (Gloor et al., 2013).

Por otra parte, para entender los procesos climáticos necesitamos datos meteorológicos como temperatura, precipitación y humedad, los que en la actualidad son fáciles de obtener gracias a los diferentes instrumentos utilizados para tal fin; sin embargo, nuestros ancestros al carecer de escritura no nos dejaron un registro histórico que nos permita comprender cómo fueron las condiciones ambientales pasadas (Díaz et al., 2016). En este contexto, el estudio de diversos archivos naturales que permiten inferir como fue el clima y ambiente del pasado, así como establecer el legado ecológico de los antiguos pobladores es de vital

importancia, uno de los más empleados por los paleoclimatólogos y paleoecólogos son los sedimentos lacustres.

El lago Pomacochas, ubicado en los Andes orientales peruanos, guarda en sus sedimentos información sobre la flora y la presencia humana que se ha dado a través del tiempo en esa región (Bush et al., 2015). La flora actual característica de Pomacochas está asociada a un bosque montano húmedo, que hoy en día está siendo reemplazada por campos abiertos debido a la actividad ganadera desarrollada por la población (Walentowski et al., 2018). Este lado de los Andes está influenciado por la actividad monzónica, la cual se caracteriza por precipitaciones intensas durante los meses de verano (Zhou y Lau 1998) y en los últimos milenios durante eventos climáticos como la Anomalía Climática Medieval - ACM y Pequeña Era de Hielo - PEH se registraron variaciones en su intensidad (Kanner et al., 2013; Reuter et al., 2009; Bird et al., 2011; Apaéstegui et al., 2014 y 2018).

En este trabajo, se caracteriza el contenido palinológico en los sedimentos del lago Pomacochas, describiendo la composición florística en Pomacochas en un intervalo de 600 años, que incluye parte de la ACM y la primera mitad de la PEH, con la finalidad de evaluar la respuesta de la flora a la influencia del SMSA y verificar si la presencia antropogénica influyó en el modelamiento del paisaje durante el periodo ~1003 - 383 BP. Los resultados contribuirán al conocimiento de la respuesta de la vegetación en los Andes orientales peruanos a los eventos climáticos mencionados y se sumará a los estudios de reconstrucción paleoambiental realizados a la fecha en Sudamérica.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Dinámica climática actual de Sudamérica

La forma del continente sudamericano, más ancha en las latitudes bajas y angosta en latitudes medias, la presencia de los Andes que divide al continente asimétricamente de este a oeste, el océano Pacífico suroriental frío por el oeste y un Atlántico sudoccidental cálido por el este, influyen en la dinámica climática de esta parte del globo, siendo los principales mecanismos estacionales y modo de variabilidad la Zona de Convergencia Intertropical, el Sistema de Monzón Sudamericano y El Niño Oscilación del Sur respectivamente (Garreud et al., 2008).

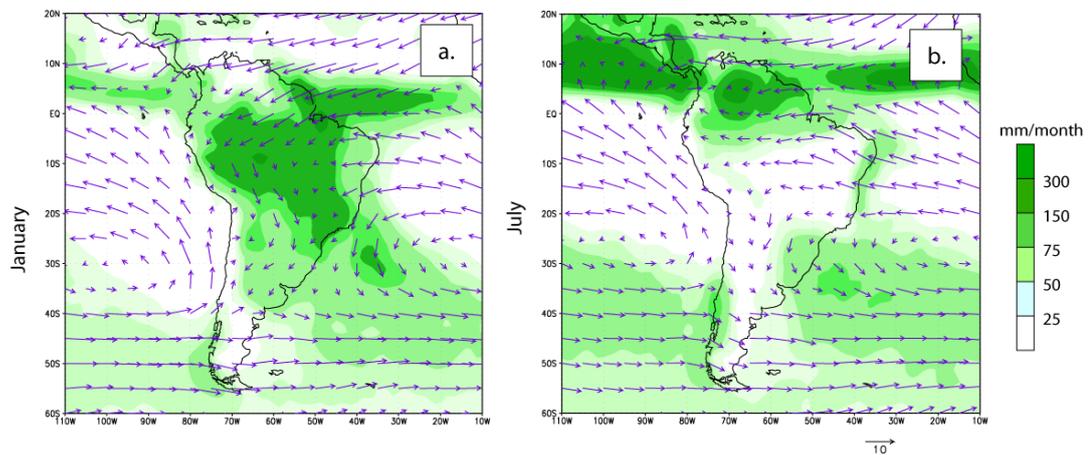
2.1.1 La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT)

La ZCIT es un cinturón de baja presión e intensa convergencia en bajos niveles de los vientos alisios (Garreud et al., 2008), visualizada a través de imágenes satelitales como una banda de nubes que se extiende a lo largo de la franja ecuatorial (figura 2.1) y responsable de las precipitaciones de naturaleza convectiva, producida por profundos cumulus-nimbos, en los océanos Atlántico, Pacífico e Índico (Correa et al., 2020). La posición de esta franja de baja presión fluctúa de manera cíclica dependiendo de las temperaturas de las cuencas oceánicas del hemisferio norte y sur, en la región del Atlántico oscila entre los 10°N (Haug et al., 2001) a 14°N durante agosto - setiembre y los 2°S durante marzo – abril llegando incluso a 5°S en años más lluviosos (Melo et al., 2009), mientras que en el Pacífico Este permanece generalmente en el norte de la línea ecuatorial (Takahashi

y Battisti, 2007) a 5°N con excepción durante los eventos El Niño (Garreud et al., 2008). La variación latitudinal en Sudamérica genera una distribución espacial de la nubosidad (humedad) diferente entre el océano y el área continental esto principalmente debido a la presencia de los Andes (Takahashi y Battisti, 2007; Correa et al., 2020).

Figura 2.1

Localización de la ZCIT en Sudamérica durante el verano e invierno austral



Nota: En verde se observa las precipitaciones durante el verano (a) e invierno (b) y las flechas indican la dirección de los vientos a 925 hPa.

Tomado de Garreud et al. (2008)

2.1.2 El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés)

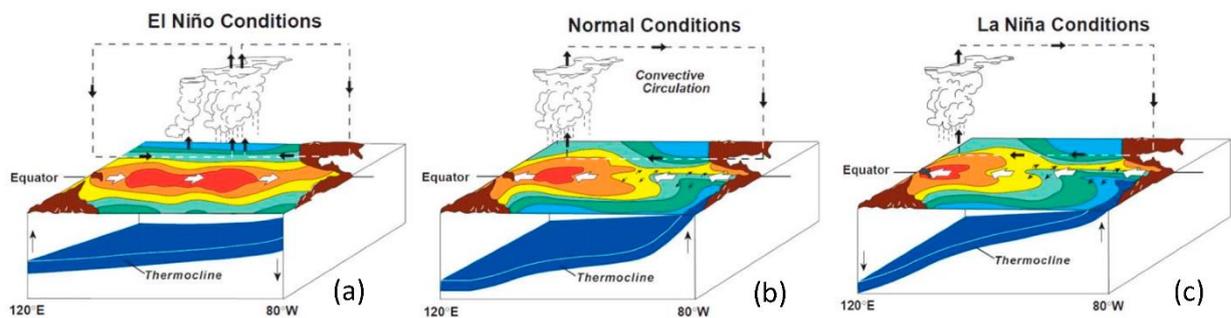
El ENSO es un acoplamiento océano-atmosfera arraigado en el Pacifico tropical, caracterizado por una diferencia interanual en la presión del nivel del mar entre el Pacífico occidental y oriental, así como el debilitamiento y fortalecimiento de los vientos alisios del este sobre la cuenca (Wang et al.,

2017), el cual modifica procesos ligados con la convección inducida por el calentamiento costero, la circulación de Walker o las anomalías de circulación atmosférica relacionadas con las ondas Rosby (Cai et al., 2020), además de ser considerado uno de los modos de variabilidad climática en el Océano Pacífico más relevantes tiene un gran impacto económico y social a nivel global (Bertrand et al., 2020; Cai et al., 2020). En condiciones normales del ENSO (Póveda y Mesa, 1996; Bertrand et al., 2020), las aguas superficiales del centro y este del Pacífico tropical se calientan produciendo una profundización de la termoclina oceánica, los vientos alisios del este se debilitan y el centro de convección se desplaza del oeste al centro (figura 2.2 b). Sus fases extremas son conocidas como El Niño (fase cálida, figura 2.2 a) y La Niña (fase fría, figura 2.2 c), debido al debilitamiento y fortalecimiento de los vientos alisios del este sobre el Pacífico tropical respectivamente (Wang et al., 2017), en el primer caso se observa una anómala corriente que empuja la *piscina cálida* hacia el este que profundiza la termoclina de oeste a este a lo largo del ecuador produciendo el calentamiento de la lengua fría de las aguas del océano Pacífico afuera de las costas del Ecuador y el Perú, generado por la reducción del gradiente zonal en la presión del nivel del mar a través de la cuenca, además de cambios en el contraste de las temperaturas entre la tierra y el mar (Póveda y Mesa, 1996; McPhaden, 2002; Wang et al., 2017; Takahashi y Martínez, 2019); mientras durante La Niña muestra características opuestas, los vientos alisios son más fuertes de lo normal así como se registra un baja anormal de la temperatura superficial del Pacífico

tropical, también se observa una presión atmosférica superficial inusualmente alta en el Pacífico tropical oriental y baja presión superficial en el Pacífico tropical occidental en asociación con la Oscilación del Sur (McPhaden, 2002). La amplitud espacial alcanzada durante la fase extrema fría del ENSO, La Niña, no ha logrado igualar a lo registrado a la fecha durante eventos extremos El Niño, lo cual es una diferencia resaltante de la diversidad y complejidad de las fases extremas del ENSO (Bertrand et al., 2020).

Figura 2.2

ENSO, condiciones normales y sus fases extremas



Nota: Condiciones El Niño (a), condiciones normales (b) y condiciones La Niña (c). Tomado de <https://www.pmel.noaa.gov/elnino/schematic-diagrams>.

Los eventos El Niño y La Niña están relacionados con anomalías hidrológicas y de temperaturas sudamericanas con ciertas diferencias en el tiempo y amplitud (Póveda y Mesa, 1996; Cai et al., 2020). Según Garreud et al. (2008), el ENSO presenta una correlación negativa débil con el lado oeste de la cuenca amazónica y tiende a maximizarse durante los meses de

invierno (junio-agosto). Por otra parte, Marengo y Espinoza (2016) determinaron que los eventos extremos de sequía e inundación en la cuenca amazónica no están ligados en su totalidad a eventos El Niño y La Niña respectivamente, como las sequías registradas en 1963 y 2005, más bien es el Atlántico tropical el que juega un rol relevante en los regímenes de lluvia en esta región.

2.1.3 Sistema de Monzón Sudamericano (SMSA)

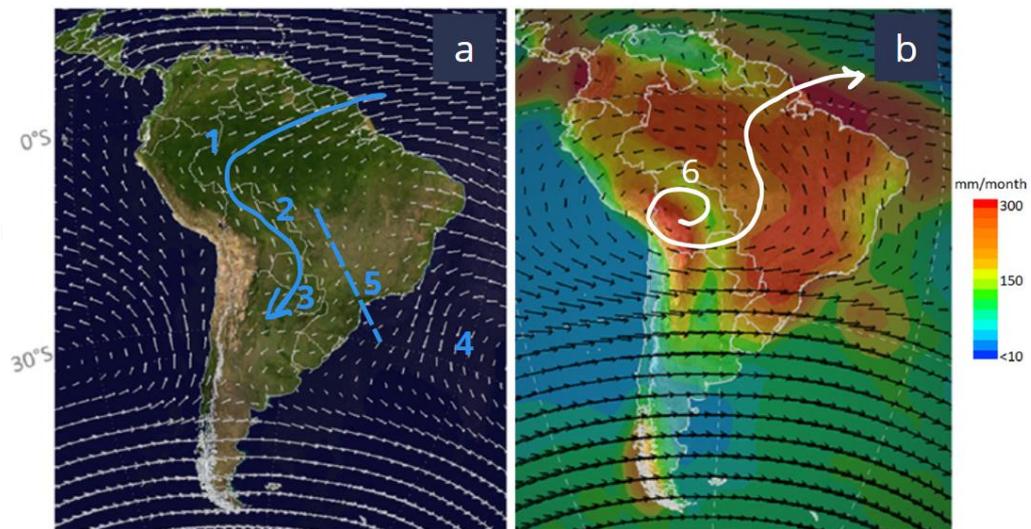
Desde 1998, se considera que las precipitaciones durante el verano austral se encuentran asociadas a un sistema monzónico (Zhou y Lau, 1998), el cual se detalla a continuación basado en lo descrito por Zhou y Lau (1998), Vera et al. (2006), Garreud et al. (2008), Baker y Fritz (2015) y Espinoza et al., (2020).

Durante la primavera austral (setiembre-noviembre), la insolación se incrementa en el trópico sur lo que impulsa el movimiento de la actividad convectiva sobre el continente y el cambio latitudinal de la ZCIT. En primavera-verano (setiembre-marzo), los alisios del nordeste penetran en la región tropical del continente y convergen hacia la región del Chaco debido a la presencia de los Andes, generando un aumento del gradiente de presión con el Atlántico por calentamiento convectivo continental. Este aumento de presión genera una disminución del flujo de los vientos de la Alta Subtropical del Atlántico Sur (ASAS) y fuerza a los vientos del este que actúan sobre la cuenca Amazónica a cambiar de dirección, los cuales

son reconducidos por la Corriente de Chorro de bajos niveles hacia el sur a lo largo de los Andes transportando grandes cantidades de humedad que generan tormentas convectivas. En la alta tropósfera, desde octubre se puede identificar una circulación anticiclónica, conocida como la Alta de Bolivia, que es resultado de la convección continental en la Amazonía. Con la formación de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS), el sistema del monzón está completo (figura 2.3). Durante el mes de abril, con el cambio de estación y la migración de la ZCIT hacia el norte, el monzón sudamericano llega a su fin.

Figura 2.3

Componentes del Sistema de Monzón Sudamericano



Nota: Vientos alisios del Nordeste (1), Corriente de Chorro de los bajos niveles (2), Baja de Chaco (3), Alta Subtropical del Atlántico Sur (4), Zona de Convergencia del Atlántico Sur (5), Alta de Bolivia (6). Adaptado de Espinoza et al (2020), (a) promedio de vientos (1981-2020) a 950 hPa; (b) promedio de vientos (1981-2020) a 200 hPa y promedio de precipitación (1981-2020).

Desde que se definió como un sistema monzónico, se ha estudiado la dinámica climática involucrada en su variabilidad intraestacional, interanual e interdecadal (Marengo, 2012; Vera et al., 2006, 2017). Logrando establecer que la ZCIT cumple un rol fundamental en las precipitaciones asociadas al SMSA, esta oscilación latitudinal es la principal moduladora del ciclo anual de lluvias a lo largo del norte tropical de América del Sur y su desplazamiento es controlado por la insolación (Garreud et al., 2008).

2.2 Reconstrucción de la variabilidad del SMSA durante la Anomalía Climática Medieval (ACM) y Pequeña Era de Hielo (PEH) en los Andes orientales

En los últimos dos milenios se han registrado dos eventos climáticos denominados Anomalía Medieval Climática y Pequeña Era de Hielo, los cuales se asocian mayormente con períodos cálidos y fríos respectivamente (Mann et al., 2009; Ljungqvist, 2010); mientras que, en el caso de los sistemas monzónicos se ha registrado variaciones en la intensidad durante dichos eventos (Masson-Delmotte et al., 2013).

En la cuenca Cariaco, al norte de Venezuela, a partir de las concentraciones de hierro y titanio se ha determinado que la posición latitudinal media de la ZCIT estuvo más al norte y al sur durante la ACM y PEH, respectivamente (Haug et al., 2001). Este desplazamiento anómalo de la ZCIT produjo cambios en la intensidad del SMSA, los registros paleoclimáticos en espeleotemas de los Andes orientales

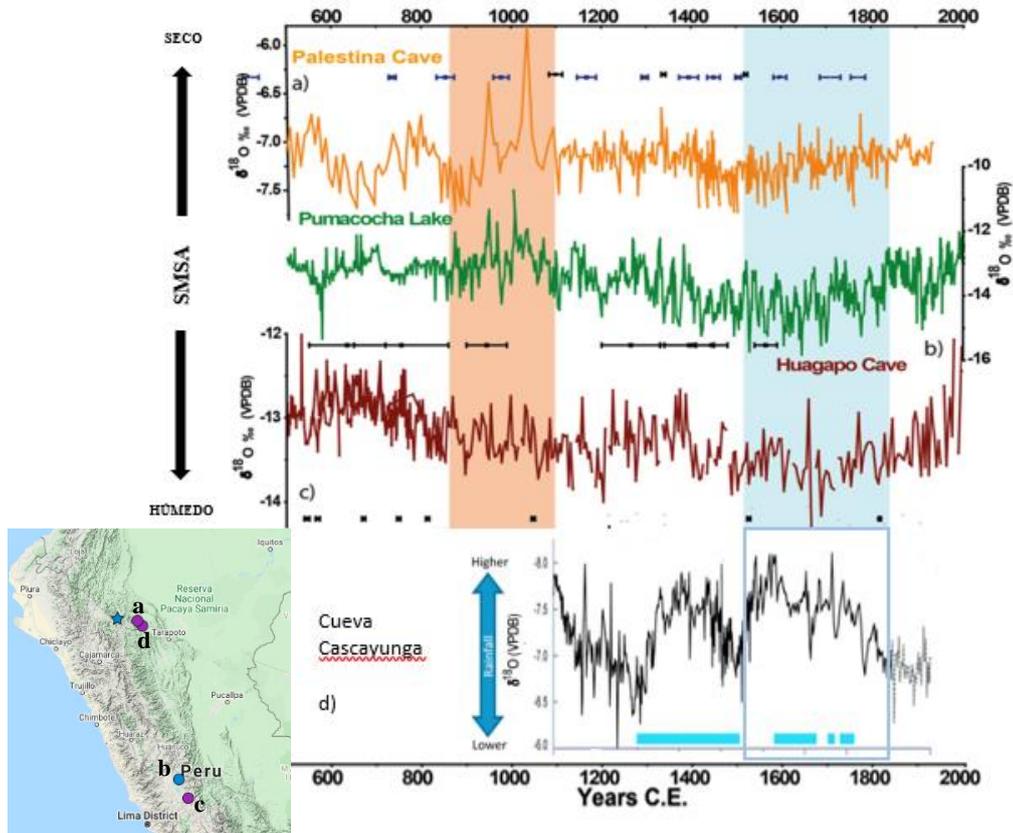
peruanos (figura 2.4), muestran un enriquecimiento en los valores $\delta^{18}\text{O}$ durante la ACM lo que indica una reducción en la intensidad del SMSA; en contraste con valores isotópicos menos enriquecidos durante la PEH se han asociado con un SMSA más intenso (Kanner et al., 2013; Reuter et al., 2009; Bird et al., 2011; Apaéstegui et al., 2014 y 2018).

Los cambios en la intensidad del SMSA produjeron variaciones en los niveles de precipitación originándose períodos mayormente secos y húmedos durante la ACM y PEH respectivamente (figura 2.5), los cuales afectaron en diferente magnitud el continente sudamericano, por lo que se sugiere una dependencia latitudinal (Apaéstegui et al., 2018).

La expresión de la ACM y de la PEH ha sido heterogénea en diferentes partes del mundo y no se ha dado de manera sincrónica a nivel mundial, Masson-Delmotte et al. (2013) indican que, de acuerdo con las temperaturas medias del hemisferio norte, la ACM tuvo lugar durante 1000 BP – 700 BP y que la PEH se desarrolló entre 500 – 100 BP. Mientras que las investigaciones en Sudamérica (Kanner et al., 2013; Reuter et al., 2009; Bird et al., 2011; Apaéstegui et al., 2014 y 2018) ubican a la ACM y PEH entre ~1050 - 850 BP y ~450 – 100 BP respectivamente.

Figura 2.4

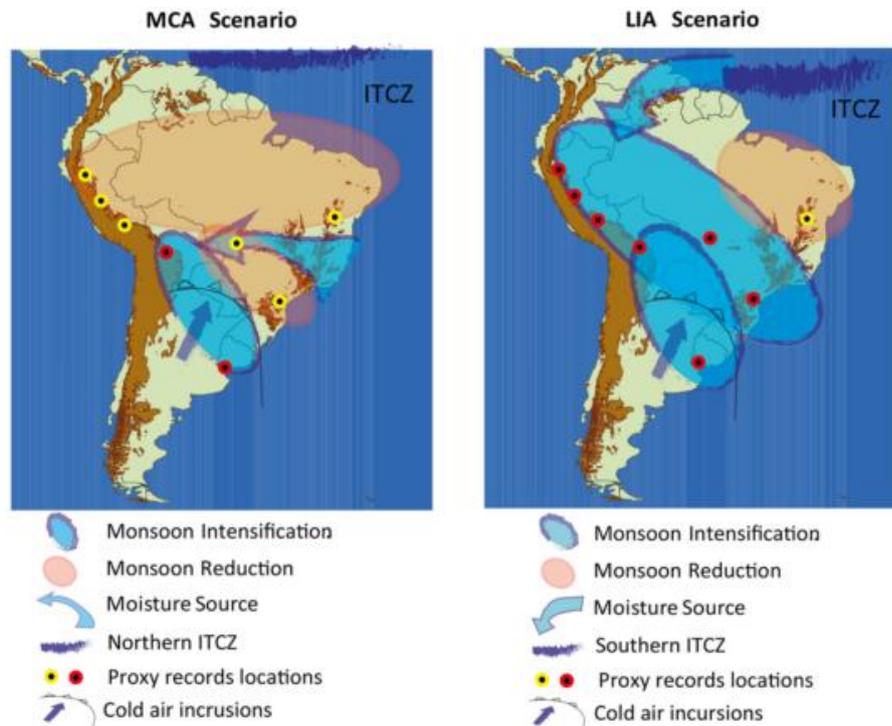
Registros de $\delta^{18}O$ en los Andes orientales peruanos de los últimos 1500 años



Nota: Espeleotemas de (a) Palestina (Apaéstegui et al., 2014), (c) Huagapo (Kanner et al., 2013) y (d) Cascayunga (Reuter et al., 2009). (b) Sedimentos de lago Pumacocha (Bird et al., 2011). Adaptado de Apaéstegui et al. (2018) y Reuter et al. (2009). Las bandas de color melon y celeste indican la ACM y PEH respectivamente.

Figura 2.5

Esquema de la humedad durante ACM (MCA, siglas en inglés) y PEH (LIA, siglas en inglés) en Sudamérica basado en registros paleoclimáticos de $\delta^{18}O$ calcita.



Nota: Tomado de Apaéstegui et al. (2018).

Las investigaciones paleoclimáticas realizadas a la fecha han logrado mostrar que el Atlántico tropical desempeña un rol fundamental en la intensidad de las precipitaciones monzónicas en Sudamérica (Chiessi et al., 2009; Reuter et al., 2009; Vuille et al., 2012; Gloor et al., 2013; Apaéstegui et al., 2014; Bustamante et al., 2016) y sus anomalías están asociadas a la insolación, desplazamiento de la ZCIT (Van Breukelen et al., 2008) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (Baker y Fritz, 2015; Vuille et al., 2012).

2.3 Cobertura vegetal actual en alrededores del lago Pomacochas

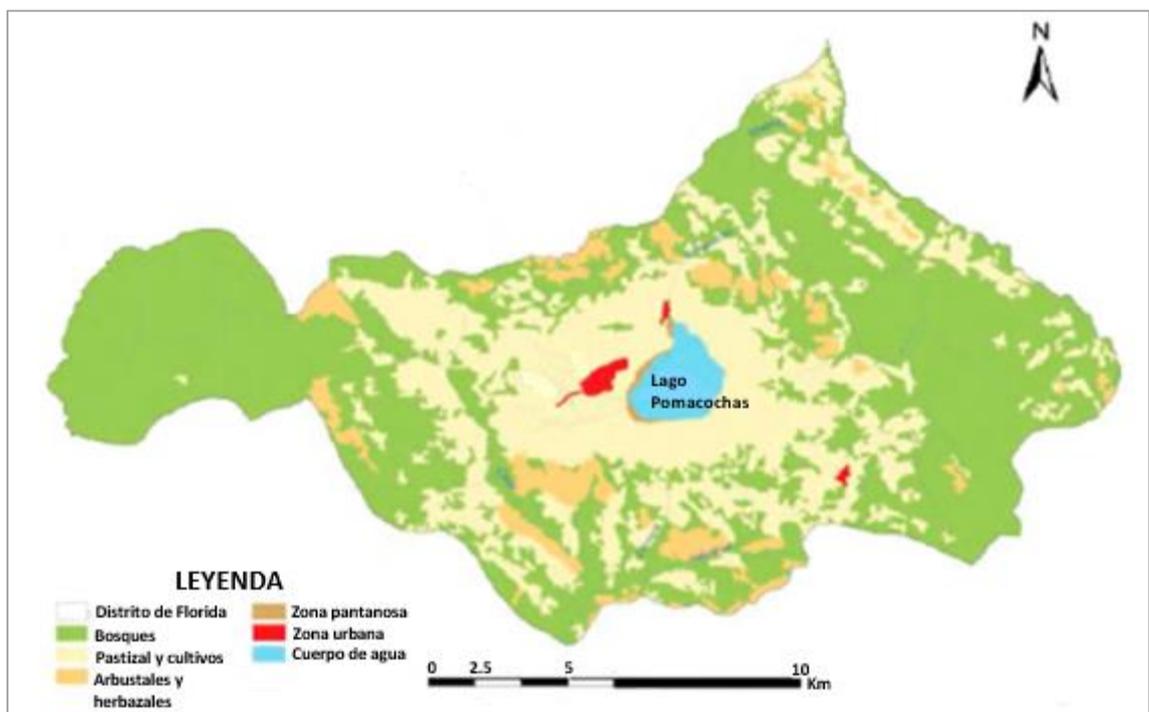
La localidad de Pomacochas forma parte de un largo y estrecho corredor biológico sobre los 2220 m s.n.m. (sobre el nivel del mar) dominado por bosques montanos andinos que recorren el continente desde el sur oeste de Venezuela hasta el norte de Argentina (Young y León, 2000; Tejedor et al., 2012). La flora que define a los bosques montanos incluye principalmente especies de las familias: Lauraceae, Rubiaceae, Melastomataceae, Mimosaceae, Sapindaceae y Meliaceae. Dentro de los servicios ecosistémicos que brinda este tipo de vegetación están la captación de niebla, almacenamiento de CO₂ y protección contra la erosión (Gálvez et al., 2003). El crecimiento y desarrollo del ecosistema de bosque montano en la localidad de Pomacochas se ve favorecido por la recarga continua de humedad procedente de bosque amazónico durante la época seca y de las precipitaciones asociadas al SMSA las cuales incluyen procesos de evapotranspiración forestal (Molina et al., 2019; Ampuero et al., 2020).

De acuerdo con el trabajo Salas et al. (2016), en la localidad de Pomacochas podemos encontrar alrededor de siete clases de cobertura, estas son: *bosques*, que se encuentran en los alrededores del lago Pomacochas, y su extensión se ha reducido considerablemente desde 1988; *pastos y cultivos*, los cuales ocupan un área importante ya que las principales actividades económicas desarrolladas por los pobladores son la ganadería y agricultura; *arbustos y herbazales*; también están presentes en esta localidad; *zona urbana*, en la parte central; *zona pantanosa*, en el margen oeste de la laguna; *áreas quemadas*; y, *cuerpo de agua*. En la figura 2.6, se observa la distribución de las coberturas registradas en el

distrito de Florida, incluida la localidad de Pomacochas durante el 2013, en el cual no registraron áreas quemadas a diferencia de los años anteriores, por lo que no se visualizan en la figura.

Figura 2.6

Clasificación de uso y cobertura del suelo del distrito de Florida – localidad de Pomacochas para el año 2013



Nota: Tomado de Salas et al. (2016).

Los bosques que aún se pueden observar en los alrededores de Pomacochas están fragmentados y las áreas abandonadas que fueron destinadas para la agricultura y ganadería se encuentran en proceso de sucesión. Según Walentowski et al. (2018), la sucesión observada se presenta en tres etapas: a) etapa de hierbas, dominadas por el helecho *Pteridium arachnoideum*, *Stipa ichu* (Poaceae) y *Asplundianthus stuebelii* (Asteraceae); b) etapa arbustiva, caracterizada por *Cortaderia* sp.

(Poaceae), hierba *Munnozia* sp. (Asteraceae), los arbustos *Rubus* (Rosaceae) y *Baccharis* (Asteraceae); c) etapa pre-bosque, de arbustos a árboles, formado principalmente por especies pioneras como *Alchornea glandulosa* (Euphorbiaceae), *Parathesis adenanthera* (Myrsinaceae) y *Ophiocaryon* sp. (Sabiaceae). Mientras que los bosques fragmentados se encuentran dominados por *Hedyosmum racemosum* (Chloranthaceae), *Piper macrotrichum* (Piperaceae), *Ocotea* (Lauraceae), *Cyathea* (helecho arborescente), *Leonia glycyarpa* (Violaceae, especie pionera tolerante a la sombra) y *Heliocarpus americanus* (Malvaceae, especie pionera demandante de luz).

En las praderas de Pomacochas, Vásquez et al. (2016) identificaron 39 especies de malezas, destacando por su abundancia: *Cyperus* sp. (Cyperaceae), *Cuphea strigulosa* (Lythraceae) y *Alchemilla orbiculata* (Rosaceae); además, Oliva et al. (2019) registraron especies forrajeras tales como: Poaceae (*Pennisetum clandestinum*, *Holcus lanatus*, *Lolium multiflorum*, *Dactylis glomerata*, *Paspalidium* sp., *Paspalum racemosum*, *Paspalum bonplandianum*, *Sporobolus indicus*, *Polypogon interruptus*); Asteraceae (*Philoglossa mimuloides*); *Trifolium repens* (Fabaceae); *Stellaria ovata* (Caryophyllaceae). Por otra parte, los programas de reforestación en Pomacochas están enfocados en construir muros naturales como cortavientos, para este fin usan la especie nativa *Alnus acuminata* (Betulaceae) y especies exóticas del género *Eucalyptus* (Myrtaceae) y *Cupressus* (Cupressaceae) (Walentowski et al., 2018), esto indica un continuo proceso de modelamiento del paisaje por parte de la población.

III. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Planteamiento del problema

Los estudios palinológicos realizados en América del Sur, en especial los registros de la cuenca amazónica revelan que en los últimos 2000 años se han dado procesos de deforestación, cultivo y reforestación (en ese orden) de forma asincrónica en distintos puntos de la Amazonia, aún queda la pregunta si el proceso de reforestación se ha dado por cambios climáticos, por abandono de la zona debido a conflictos sociales o enfermedades (Bush et al., 2021).

En un estudio palinológico previo sobre los sedimentos del lago Pomacochas usando una resolución temporal centenal, Bush et al. (2015) detallan el efecto de la ocupación humana y de los cambios climáticos sobre la cobertura vegetal del área circundante al lago durante los últimos 3500 años, encontrando que, durante la ACM disminuyen las especies arbóreas y no se registra maíz, a pesar de que en periodos secos previos a la ACM (entre ~3300 – 2560 cal. BP y ~1600 - 1500 cal. BP) favorecieron el cultivo de este importante recurso prehispánico (figura 3.1). En otros lagos altoandinos, como Ayauch (Bush et al., 1989), Pacucha (Valencia, 2010) y Sauce (Bush et al., 2016), tampoco se registra polen de maíz durante la ACM. No obstante, en lagos de menor elevación (ej., Gentry [Bush et al., 2007] y Huaypo [Mosblech et al., 2012]) si hay presencia de este taxón (figura 3.2). El período por evaluar en este trabajo, ~1003 – 383 BP, incluye ACM por lo que el análisis palinológico a alta resolución (entre 13 a 31 años en promedio) revelaría el desarrollo de actividad antropogénica en este localidad altoandina y daría luces del legado ecológico de los Chachapoyas (~1150 - 480 BP), considerados como

una de las culturas más importantes de la región amazónica y peruana pero cuyo estilo de vida y relación con el espacio físico son aun pobremente conocidos (Church y Guengerich, 2018).

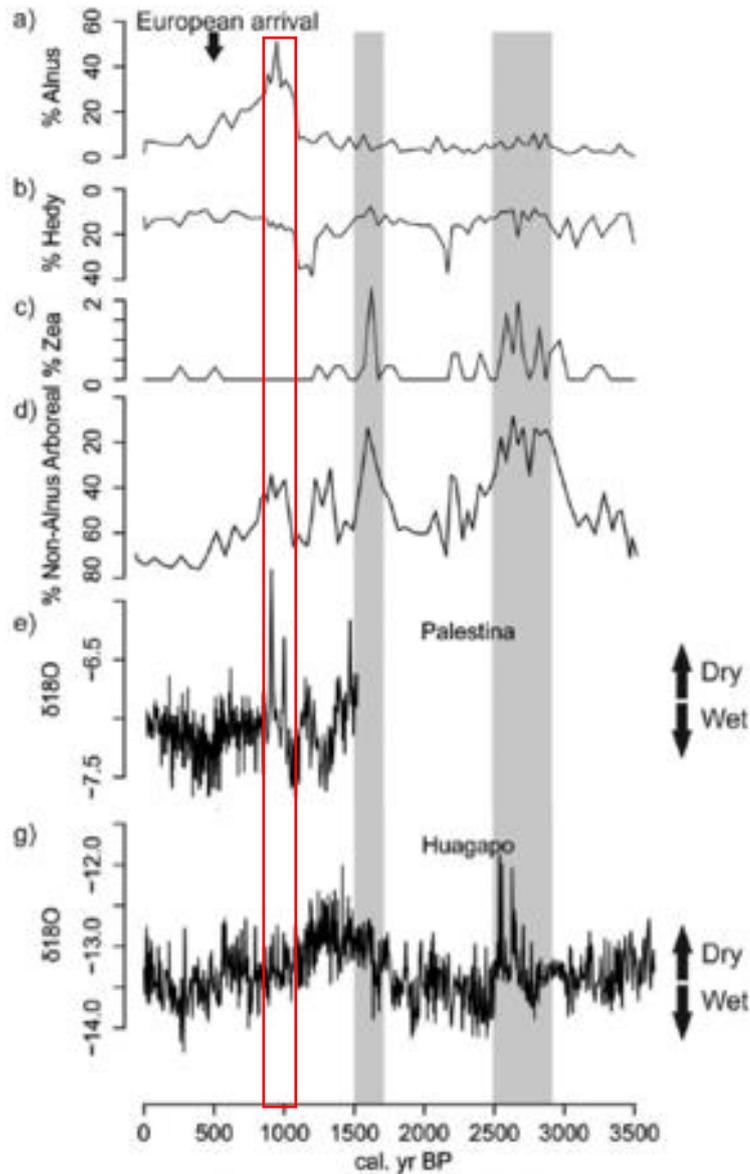
Por otra parte, estudios arqueológicos proponen que durante épocas de sequía se generaba la migración de poblaciones desde la sierra hacia las vertientes orientales de Chachapoyas, como la ocurrida entre ~850 – 450 BP (Moseley, 2001 mencionado en Church y Guengerich, 2018). Los efectos de la presión de la ocupación humana sobre el espacio físico podrían reflejarse en el registro palinológico de Pomacochas a través de cambios en las asociaciones polínicas, a partir de la presencia de polen de plantas cultivables (maíz, yuca, calabazas, etc) o de altos porcentajes en polen de arbustos, pastos y carbón o *charcoal*, estos últimos asociados a la expansión de áreas para la agricultura (Bush et al., 2017, 2021).

De acuerdo con lo descrito, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué cambios tuvo la composición de la palinoflora en Pomacochas durante el periodo ~1003 – 383 BP en respuesta a eventos climáticos globales como la ACM y la PEH, y que impacto tendría la presencia humana en el modelamiento del paisaje?

Figura 3.1

Cambios en los porcentajes de abundancia de polen en Pomacochas y su comparación con otros registros paleoclimáticos



Nota: (a) % de *Alnus*, (b) % *Hedyosmum*, (c) % *Zea mays*, (d) % Polen arbóreo – excluyendo *Alnus* (e) $\delta^{18}\text{O}$ Calcita cueva Palestina, (g) $\delta^{18}\text{O}$ Calcita cueva Huagapo. Barras en gris corresponden a períodos secos. Tomado de Bush et al. (2015). Rectángulo rojo indica la ACM

Figura 3.2

Registros de polen de Zea mays en sedimentos lacustres durante la ACM



Nota: Ausencia (rojo) y presencia (verde) de granos de polen de maíz en sedimentos de lago de sitios andinos y amazónicos. a) Ayauch (Bush et al., 1989); b) Pomacochas (Bush et al., 2015); c) Sauce (Bush et al., 2016); d) Pacucha (Valencia, 2010); e) Gentry (Bush et al., 2007) f) Huaypo (Mosblech, 2012). Adaptado de Bush et al. (2016).

IV. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El análisis palinológico de sedimentos es una de las principales herramientas para determinar la dinámica vegetal a través del tiempo que permite evaluar si los cambios se encuentran relacionados a procesos naturales o responden a actividades antropogénicas (Behre, 1982; Bennett y Willis, 2001); este tipo de estudio ha facilitado conocer la variación en la composición florística en una región de alta biodiversidad como es la Amazonia peruana (Weng et al., 2004; Bush et al., 2005; Bush et al., 2007). Uno de los factores que hace viable este tipo de investigaciones, es la esporopolenina, componente principal de la pared de los esporomorfos (polen y esporas). Este biopolímero, concede al gameto masculino de las plantas, resistencia a la degradación química, física y enzimática, favoreciendo su preservación indefinida en ambientes anaeróbicos como los fondos lacustres (Bennett y Willis, 2001). Gracias a esto, el polen de la vegetación circundante al lago Pomacochas se preserva a través del tiempo.

Adicionalmente, los sedimentos conservan características físico-químicas que pueden explicar los cambios del sistema lacustre entre ~1003- 383 BP, periodo que incluye eventos climáticos globales, como son la ACM y PEH, y que según estudios previos influyeron en la intensidad del sistema monzónica (Bird et al., 2011; Kanner et al., 2013, Vuille et al., 2012; Apaéstegui et al., 2014), pero aún se carece de investigaciones que puedan dilucidar la influencia de estos eventos sobre la flora de los bosques montanos de los Andes orientales ya que en su mayoría los estudios paleoambientales y paleoclimáticos se realizaron en tierras bajas y altas (e.g. Reuter et al., 2009; Kanner et al., 2013 respectivamente), y no

en elevaciones medias (1500 – 3500 m snm), donde se encuentra el Lago Pomacochas. Por lo tanto, conocer el comportamiento de la flora en condiciones climáticas diversas, ayuda a comprender la sensibilidad del ecosistema ante escenarios climáticos, como el actual calentamiento global. Esto considerando que las forzantes y los mecanismos asociados a la dinámica climática de esta región en la actualidad son las mismas que las del periodo a evaluar (~1003 – 383 BP). Se complementa el análisis palinológico con otro indicador de variabilidad climática, como es el registro semicuantitativo de contenido elemental adquirido usando fluorescencia de rayos X, la información recabada de este tipo de análisis brinda un panorama de los procesos sedimentarios y condiciones climáticas que afectaron Pomacochas, permitiendo entender cómo la zona de influencia del lago responde a los eventos climáticos globales ya mencionados.

Por último, los resultados obtenidos del análisis del polen ayudan a establecer si en el modelamiento del paisaje de Pomacochas ha intervenido el hombre. Esta información es relevante para el avance de la Arqueología amazónica ya que el paisaje agreste de la región y el limitado acceso a los recintos arqueológicos hacen que la exploración arqueológica sea escasa, por lo que aún existen preguntas no resueltas con respecto al desarrollo de culturas en esa parte de nuestro país, entre ellas los Chachapoyas.

V. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Caracterizar la flora palinológica de Pomacochas durante el período comprendido entre ~1003 - 383 BP, con el fin de evaluar la respuesta de la vegetación de esta región a forzantes de origen natural o antropogénica.

5.2 Objetivos Específicos

- Determinar las asociaciones palinológicas en Pomacochas durante el período comprendido entre (~1003 - 383 BP), mediante el análisis de las abundancias relativas de los taxones en los sedimentos del lago.
- Evaluar la respuesta de la palinoflora a la variabilidad climática, a través de la comparación de las frecuencias palinológicas con los patrones de variación en la composición elemental de los sedimentos.
- Comparar el registro palinológico y climático de Pomacochas con otros estudios en los Andes orientales.
- Verificar la actividad antropogénica durante el período comprendido entre ~1003 - 383 BP, mediante la presencia de granos de polen de plantas cultivables.

VI. HIPÓTESIS

H1. Las variaciones climáticas globales ocurridas durante el periodo comprendido entre ~1003 – 383 BP influyeron en la flora de Pomacochas, por lo que la composición de las asociaciones palinológicas del testigo PO6 debe reflejar la respuesta de la flora local, registrando variaciones en la frecuencia y presencia de ciertos tipos de polen de plantas asociadas a condiciones húmedas y secas.

H2. En los alrededores del lago Pomacochas durante el periodo comprendido entre ~1003 -383 BP, la actividad antropogénica contribuye al modelamiento del paisaje, es así como el registro palinológico del testigo PO6 incluye la presencia de taxones que permiten detectar intervalos de actividad humana y variaciones en la frecuencia de polen de flora asociada al bosque montano, ecosistema característico de esta zona.

VII. METODOLOGÍA

7.1 Diseño de estudio

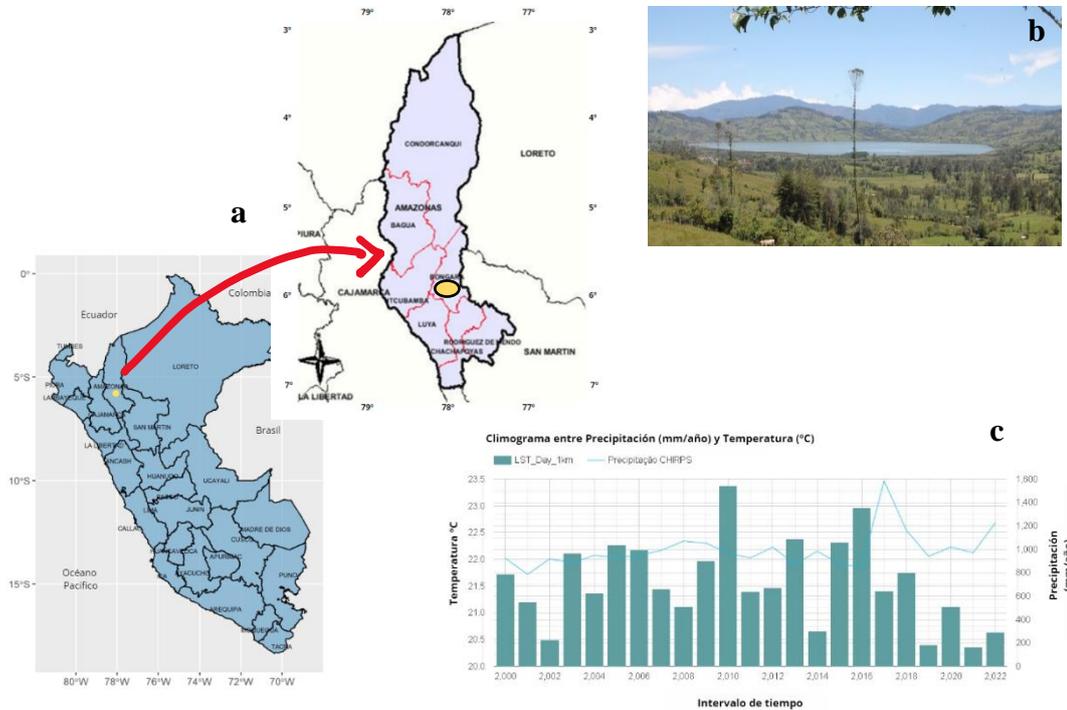
Con la finalidad de evaluar las hipótesis planteadas, se determinaron las asociaciones y zonas palinológicas registradas en los primeros 175cm del testigo PO6, verificando si existe o no diferencia significativa entre las zonas a partir de la diversidad *alfa* de cada una de ellas. Se evaluaron las tendencias de variación en la composición elemental de los elementos detectada a partir de la fluorescencia de rayos X con respecto a eventos climáticos pasados (ACM y PEH), con el fin de relacionar las variaciones del registro sedimentario con los patrones florísticos registrado en el testigo. Por último, se analizó si los resultados obtenidos responden a una señal global, regional o local.

7.2 Zona de estudio

La localidad de Pomacochas se ubica en el distrito de Florida, perteneciente a la provincia de Bongará del departamento Amazonas, entre los 5° 48' 35" y 5° 50' 5" latitud sur y 77° 57' 39" y 77° 56' 17" longitud oeste (figura 7.1). En la actualidad, el clima en el área de estudio es cálido y templado, regulado por la influencia lacustre; tiene una temperatura promedio anual de 15 °C, está situado a una altura de 2220 m s.n.m., con una precipitación pluvial de 1104,2 mm anuales (Castillo et al., 2016).

Figura 7.1

Ubicación de la zona de estudio



Nota: (a) Ubicación geográfica del lago Pomacochas, (b) vista panorámica del Lago Pomacochas y (c) climograma de la localidad de Pomacochas, precipitación acumulada anual (Funk et al., 2015) y temperatura media anual (Wan et al., 2015).

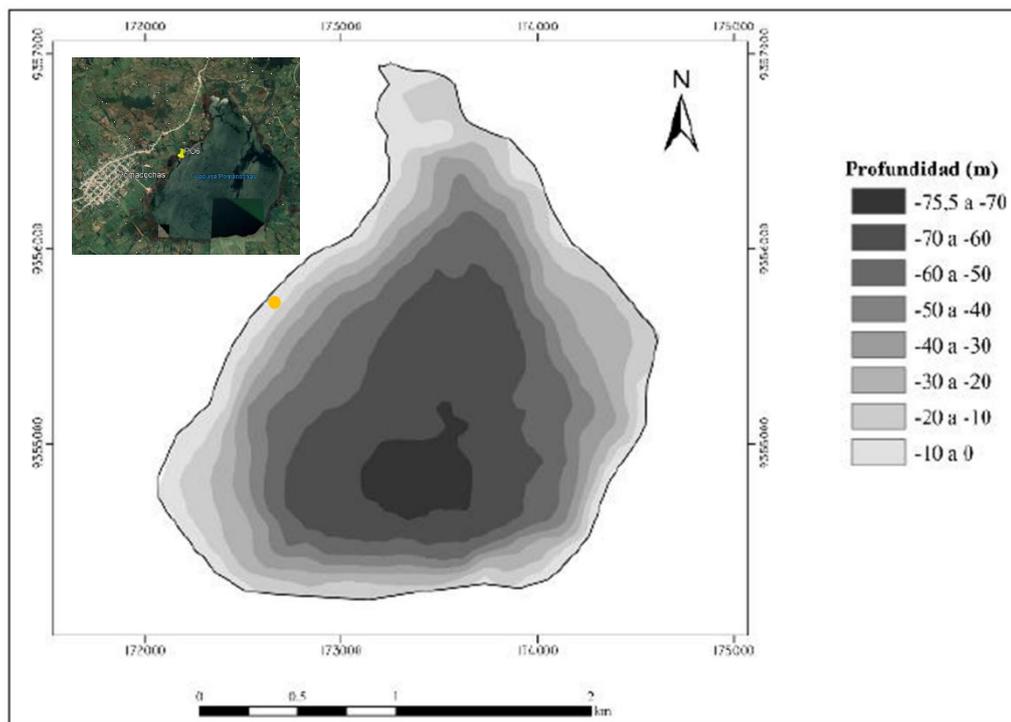
7.3 Población

El lago Pomacochas, según el estudio de Castillo et al. (2016), tiene un área de 4.25 Km² y 8.51 Km de perímetro; además, el modelo de curvas de nivel indica que la profundidad máxima es de 75.5 m y que presenta una pendiente pronunciada a partir de los 10 m en la zona oeste del lago (figura 7.2).

Se extrajeron testigos de los sedimentos del Lago Pomacochas el 2016, de los cuales el testigo PO6 ($5^{\circ}49'16.00''$ S, $77^{\circ}57'22.20''$ W) fue perforado a una profundidad de 5m y a una distancia aproximada de 20 m de la orilla. El testigo tiene una longitud de 347 cm, y fue extraído con el apoyo del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), Instituto Geofísico del Perú (IGP) y de la Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH).

Figura 7.2

Batimetría del lago Pomacochas y lugar de perforación del testigo PO6



Nota: Tomado de Castillo et al. (2018). Punto amarillo, ubicación del testigo PO6.

7.4 Muestra

La muestra de estudio corresponde a submuestreos de 1cm³ cada 6cm de los primeros 175cm del testigo PO6.

7.5 Operacionalización de variables

7.5.1 Variables explicativas o independientes

- Intensificación del SMSA (registros de variables $\delta^{18}\text{O}$ en los Andes)
- Escorrentía superficial (Titanio y Aluminio [cps] medida por XRF)

7.5.2 Variables respuesta o dependiente

- Concentración de polen y esporas de taxones vegetales (granos/g)
- Frecuencia de polen y esporas de taxones vegetales (%).

7.6 Procedimientos y Técnicas

7.6.1 Descripción del Testigo PO6

La descripción del testigo PO6 incluyó el registro de las características registradas *in situ* del sedimento, a cargo de la Dra. Patricia Turcq, las cuales fueron posteriormente complementadas con las radiografías de rayos X, tomadas con un equipo SCOPIX perteneciente al Laboratorio de Ambientes y Paleoambientes Oceánicos y Continentales (*EPOC*, siglas en francés) de la Universidad de Bordeaux, Francia.

7.6.2 Modelo de edad del Testigo PO6

Para obtener la datación del testigo PO6, se midió el ^{14}C en materia orgánica en 15 muestras ubicadas a lo largo del testigo. Las mediciones fueron realizadas en Laboratorio de Medición de Carbono 14 (LMC14/LSCE) de la Universidad Paris-Saclay, Francia. El modelo de edad fue elaborado por la Dra. Patricia Turcq del IRD, utilizando el paquete CLAM (Blaauw, 2010, versión 2.2) en el programa R (R Core Team, 2018), empleando la curva de calibración IntCal13.14C (Reimer et al., 2013) sin considerar un efecto reservorio al tratarse de una muestra continental y hasta el momento sin indicios de influencia marina, y la función smooth spline,

7.6.3 Palinología

Recuperación de palinomorfos fósiles: El contenido palinológico de las muestras de sedimento se recuperó mediante un tratamiento fisicoquímico en el Laboratorio de Palinología y Paleobotánica de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. La metodología utilizada para la extracción de palinomorfos es la descrita en Traverse (1988), la cual incluye:

- a. Adición de un marcador, *Lycopodium*, el cual permite realizar cálculos de la concentración del polen por grano de la muestra.

- b. Digestión del material inorgánico: Ataques del sedimento con HCl (10%) y HF (48%), con la finalidad de disolver carbonatos y silicatos respectivamente.
- c. Deshidratación de la muestra, para suspender y recuperar el material polínico en ácido acético glacial con el fin de evitar la reacción del agua con la solución acetolítica.
- d. Digestión orgánica: Acetólisis de Erdtman (1960), con el fin de remover el contenido orgánico restante del material polínico.
- e. Tinción de la muestra con safranina.
- f. Montaje de las muestras en un medio fijo usando *bálsamo de Canadá*.

Identificación y conteo de taxones: Se utilizaron catálogos palinológicos especializados (e.g., Roubik y Moreno, 1991; Herrera y Urrego, 1996; etc.) y la colección de polen del laboratorio de Palinología Y Paleobotánica de la UPCH. Se contaron 300 granos de polen por muestra, dejando de contar una vez contabilizadas 2000 esporas del marcador *Lycopodium* (e.g., Ledru et al., 2013; Bush et al., 2015; Schiferl et al., 2017).

Con una magnificación de 1000X, se tomaron microfotografías de los taxones analizados. Luego, con la información botánica, ecológica y arqueológica (e.g., Brack, 1999; Ugent y Ochoa, 2006; Fernández y Rodríguez, 2007) de los taxones hallados se determinaron las características de las asociaciones vegetales y su relación con la presencia humana.

7.6.4 Escaneo del testigo PO6 por fluorescencia de rayos X (XRF, siglas en inglés)

Una sección del testigo PO6 (247cm x 5cm x 1cm) fue sometida a fluorescencia de rayos X. El análisis fue realizado con el equipo AVAATECH-XRF Core Scanner del Laboratorio EPOC de la Universidad Bordeaux, Francia. Dicho análisis tiene como finalidad obtener un registro semi cuantitativo de la concentración elemental para utilizarlo como indicador de variabilidad climática.

7.6.5 Plan de análisis

- *Cálculo de concentración de polen:* De acuerdo con la fórmula propuesta por Dean (1998), se calcularon las concentraciones de polen en las muestras analizadas de PO6.

Concentración de polen

$$= \frac{\text{Granos de polen contados}}{\text{Granos de marcador contados}} \times \frac{\text{Total de granos de marcador adicionados}}{\text{Peso o volumen de la muestra}}$$

- *Palinogramas y zonas palinológicas:* A través de los palinogramas, elaborados con el programa C2 (Juggins, 2007), se observaron los cambios en la frecuencia y concentración de polen (granos/gr) a lo largo del testigo. Con la ayuda del programa R (R Core Team, 2018), se determinaron las asociaciones palinológicas, las cuales fueron realizadas con el algoritmo de análisis de conglomerados

estratigráficamente restringido “CONISS” (Grimm, 1987), programa incluido en el paquete Rioja (Juggins, 2017). Esto permite zonificar la columna estratigráfica de acuerdo con la similaridad entre las muestras.

- *Diversidad alfa (riqueza específica y estructura)*: La riqueza específica (S) determinada contabilizando el número total de especies registradas en el análisis, y la estructura de la asociación se obtuvo a través de modelo no paramétrico Chao1.

$$Chao1 = S + \frac{a^2}{2b}$$

Donde S, es el número de especies en una muestra, a es el número de especies que están representadas solamente por un único individuo en esa muestra (número de *singletons*) y b es el número de especies representadas por exactamente dos individuos en la muestra (número de *doubletons*) (Moreno, 2001). El cálculo del índice de Chao1, se realizó usando el siguiente enlace: <https://chao.shinyapps.io/SpadeR/>. En el análisis de diversidad alfa, incluimos los taxones registrados luego de concluir el conteo programado (300 granos de polen o 2000 *Lycopodium*). La finalidad de calcular la diversidad de cada muestra fue el de observar si esta se mantenía o no a lo largo del tiempo.

- *Diferencia entre zonas palinológicas a nivel de diversidad (riqueza específica y estructura de asociaciones)*: Se realizó mediante pruebas de normalidad, pruebas paramétricas (ANOVA y t de student) y pruebas no paramétricas (prueba de Kruskal-Wallis, $\alpha=0.05$), utilizando programa PAST (Hammer et al., 2001), para determinar la existencia de diferencias significativas entre las diversidades estimadas para las

muestras de cada zona palinológica y las muestras asociadas a cada evento climático (ACM y PEH).

- *Ordenamiento de muestras analizadas de PO6:* A través de un Análisis de Escalamiento Multidimensional no Métrico – nMDS (de sus siglas en inglés), utilizando la similitud de Bray-Curtis en el programa PAST (Hammer et al., 2001) y las abundancias relativas de las variables mayores que representan el 95% de la data, se observó la disimilaridad de las muestras en dos dimensiones y así determinar el comportamiento de las asociaciones a través del tiempo.
- *Correlación entre el nMDS Axis 1 con diferentes variables:* Mediante la prueba no paramétrica de correlación de Spearman, se verificó la asociación entre el nMDS Axis 1 con los taxones cuyas abundancias fueron mayores al 5%, riqueza y concentración de polen. Luego de obtener el coeficiente de correlación (r), elevamos al cuadrado para hallar el porcentaje de la varianza explicada (r^2), el cual se interpreta igual que el r^2 para Pearson.
- *Correlación de la composición elemental de los sedimentos:* Mediante un Análisis de Componentes Principales (PCA), elaborado con el paquete Factoextra (Kassambara, A., & Mundt, F., 2017) en el programa R (R Core Team, 2018), se estableció que elementos fueron los más importantes y relacionados con la variabilidad climática. Con esta información se determinó si las condiciones climáticas fueron variables o no, en especial durante los eventos climáticos registrados en los últimos milenios (ACM y PEH).

- *Media móvil*: Con la finalidad de suavizar fluctuaciones del análisis del XRF y compararlos con el registro palinológico, se recurrió a la media móvil cada 6 cm de cada componente principal.

VIII. RESULTADOS

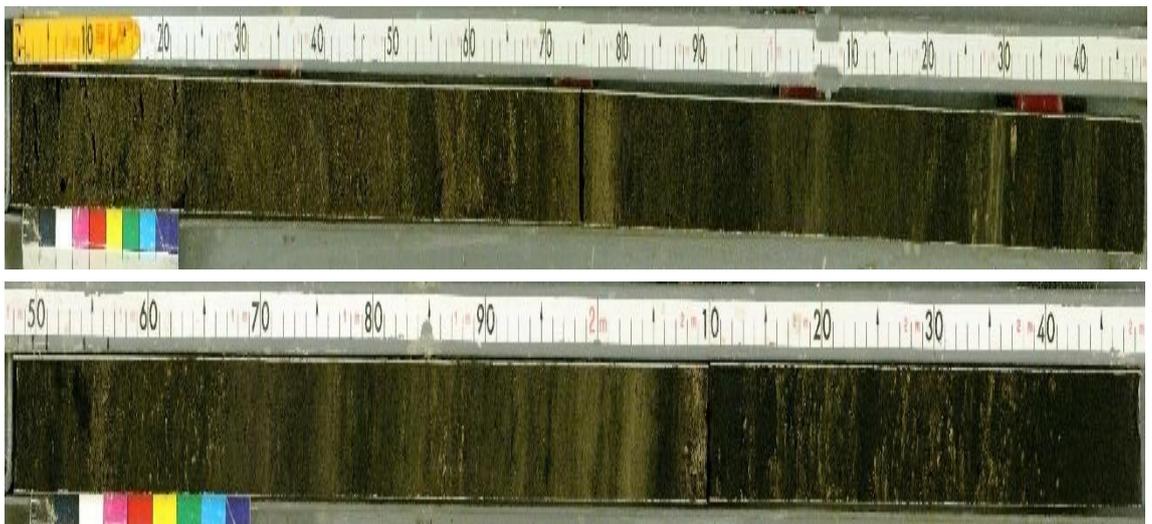
8.1 Descripción del testigo PO6

El testigo lacustre PO6 (figura 8.1), alcanzó una longitud de 247 cm. La litología del testigo está representada principalmente por limos, incluye materia orgánica y carbonatos en varias secciones del testigo, así como laminaciones milimétricas (27- 52 cm y 167-205cm) y centimétricas (52 -72 cm), nódulos de carbonatos milimétricos (125-131 cm y 205-240 cm) y coloración marrón amarillento en una gradiente de tonalidades de acuerdo con el código Munsell. En la tabla 4.1, se muestra la descripción del testigo PO6, en la cual se detalla la textura, presencia de materia orgánica y carbonatos, presencia de laminaciones, color de los sedimentos y el respectivo código Musell.

Figura 8.1

Fotografía del testigo PO6

Tope



Base

Tabla 8.1*Características de los sedimentos del testigo PO6*

Profundidad (cm)	Características	Color	Código Munsell
0-6.5	Limo rico en materia orgánica, porosidades centimétricas	marrón amarillento oscuro	10YR 2/2
6.5-23	Limo rico en materia orgánica con carbonatos en forma de cristales <200 µm y órganos vegetales fosilizados, porosidades centimétricas	marrón amarillento negro	10YR 4/2
23-27	Limo rico en materia orgánica	marrón amarillento oscuro	10YR 2/2
27- 52	Limo con laminaciones milimétricas ricas en materia orgánica y carbonatos, igual a los otros, presencia de pequeños gasterópodos	marrón amarillento oscuro	10YR 4/2
52 -72	Limo con capas alternas centimétricas ricas en materia orgánica o ricas en carbonatos	marrón amarillento oscuro a moderado	10YR 4/2 - 10YR 5/4
72-79	Limo fino rico en carbonatos	marrón amarillento moderado	10YR 5/4
79-125	Limo rico en materia orgánica y carbonatos, homogéneo (100-107 cm más claro)	marrón amarillento oscuro	10YR 4/2
125-131	Limo rico en materia orgánica con nódulos de carbonato de tamaño milimétrico	marrón oscuro a marrón amarillento pálido	10YR 4/2 - 10YR 6/2
131-155	Limo rico en materia orgánica	marrón amarillento oscuro	10YR 2/2
155-167	Limo rico en carbonato	marrón amarillento negro	10YR 4/2
167-205	Limo fino con laminaciones milimétricas alternas más rico en materia orgánica o más ricos en carbonatos	marrón amarillento negro a moderado	10YR 5/4
205-240	Limo con laminaciones centimétricas, presencia de nódulos de carbonatos milimétricos	marrón oscuro a marrón amarillento moderado	10YR 3/2 - 10YR 5/4
240	Transición gradual	-----	-----
240-248	Limo homogéneo rico en materia orgánica	marrón amarillento oscuro	10YR 2/2

8.2 Modelo de edad del testigo PO6

Las 15 dataciones radiocarbónicas de ^{14}C (tabla 8.2), indican una edad entre ~3893 – 383 BP del testigo PO6. En la figura 8.2, se muestra el modelo de edad-profundidad elaborado a partir de las dataciones radiocarbónicas. En este trabajo de investigación, se analiza los primeros 175cm que comprende una edad entre ~1003 - 383 BP.

Tabla 8.2

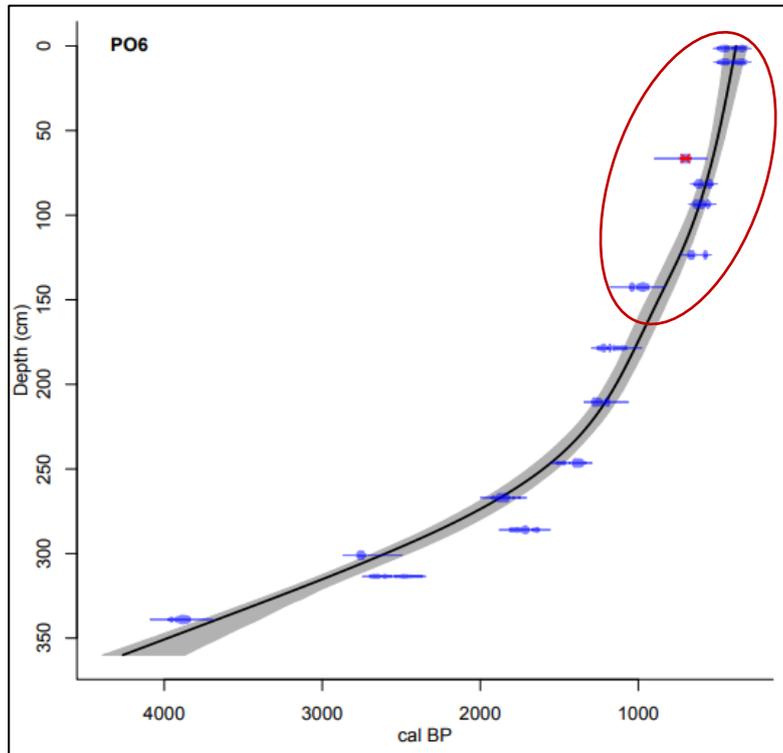
Dataciones radiocarbónicas y calibradas del testigo PO6 empleadas en el modelo de edad

Profundidad (cm)	Edad de Radiocarbono (^{14}C BP)	Edad calibrada (BP)		
		Máximo	Edad	Mínimo
1.5*	360 ± 30	453	384	314
9.5*	355 ± 30	463	338	338
66.5*	775 ± 30	529	529	490
81.5*	570 ± 30	613	573	535
93.5*	605 ± 30	660	612	575
123.5*	695 ± 30	690	736	805
142.5*	1080 ± 30	904	834	776
178.5	1235 ± 30	1021	1088	957
210.5	1310 ± 30	1209	1276	1145
246.5	1510 ± 30	1649	1554	1474
267	1915 ± 30	1968	1873	1767
286	1795 ± 30	2346	2261	2127
301	2625 ± 30	2702	2626	2486
313.5	2455 ± 30	3027	2954	2813
339	3585 ± 30	3755	3666	3402

Nota: (*) Dataciones que corresponden al segmento analizado en este trabajo

Figura 8.2

Modelo edad-profundidad del testigo lacustre PO6



Nota: Elaborado con el paquete CLAM. El círculo rojo indica la curva que corresponde al intervalo estudiado del PO6, ~383 – 1003 BP.

De acuerdo con el modelo de edad, entre ~1003 – 753 BP se registran intervalos de 31 a 32 años en promedio; entre ~753 – 603 BP, las muestras analizadas se encuentran en intervalos de 21 a 29 años aproximadamente; entre ~603 – 499 BP se registran intervalos de 16 a 19 años; finalmente, entre ~499 – 383 BP se registran intervalos de 12 a 14 años. Siendo la escala temporal multidecadal en la parte más antigua y decadal en la sección más moderna.

8.3 Palinología

8.3.1 Descripción general de la asociación palinológica

La preservación de los palinomorfos (esporas y granos de polen), fue buena en la mayor parte de la sección evaluada, siendo poco frecuente observarlos fragmentados, especialmente en las dos primeras partes del testigo. En los intervalos entre 175 – 133 cm (~1003 – 784 BP), se encontraban aplanados producto de la sedimentación, pero permitió separarlos por morfotipos. La muestra a 121 cm (~724 BP) no presentó buena preservación comparado con las otras, en algunos casos se observaron granos corroídos, pero se pudo completar el conteo propuesto en la metodología. La muestra a 151 cm (~878 BP) fue la única en la cual no se completó el conteo (168 granos de polen y 42 esporas de helechos) debido a la baja abundancia de palinomorfos.

En total, se registraron 396 morfotipos entre polen (68,2%) y esporas (31,8%), identificando 102 taxones (25,75%), distribuidos en una orden, 57 familias, una subfamilia, 55 géneros y 4 tipos palinológicos (Cheno/Am: Chenopodiaceae-*Amaranthus*; Sol/Lyc: *Solanum-Lycopersicon*; Urt/Morac: Urticaceae-Moraceae y Melast/Combret: Melastomataceae-Combretaceae). Los taxones restantes fueron definidos solo a partir de su denominación palinológica. En la figura 8.3 se muestran 34 taxones, cuyas abundancias relativas representan el 95% de la data analizada, de los cuales 22 son angiospermas, una gimnosperma y 11 pteridofitas. Los taxones más abundantes y presentes en todas las

muestras analizadas son: *Alnus* sp., *Alchornea* sp., *Hedyosmum* sp., Asteraceae, Cyperaceae y Poaceae (30-50µm y <30µm).

La distribución en profundidad de los taxones palinológicos permite distinguir tres zonas palinológicas (A, B y C) determinadas visualmente y con apoyo del CONISS (ver anexos), siendo la zona A la más antigua y la zona C la más moderna. A continuación, se describen las zonas palinológicas:

La **zona A** (175 - 127 cm: ~1003 - 753 BP), incluye nueve muestras de las cuales seis están relacionadas con la ACM (175 - 145 cm). La concentración de polen varía entre los 7 230 – 21 674 granos/g, siendo el rango más bajo del testigo analizado. Los taxones registrados en esta zona incluyen 22 angiospermas, una gimnosperma y 11 pteridofitas. De las angiospermas, Poaceae 30 - 50 µm es la que presenta mayor abundancia relativa (3,8 - 33%), seguida por *Alnus* (5,9 – 19,5%), *Hedyosmum* (7,4 – 17,1%), Poaceae <30 µm (2,9 – 10,8%), Cyperaceae (1,9 – 6,9%), *Alchornea* (2,6 – 5,9%), esporas de helecho (4,3 – 11,9 %) y el resto de los taxones menos del 5%. En seis muestras se observó *Zea mays*, entre los intervalos: 145 - 127 cm (~947 - 753 BP), 175 - 169 cm (~1003 - 972 BP), tres de estas muestras relacionadas a la ACM.

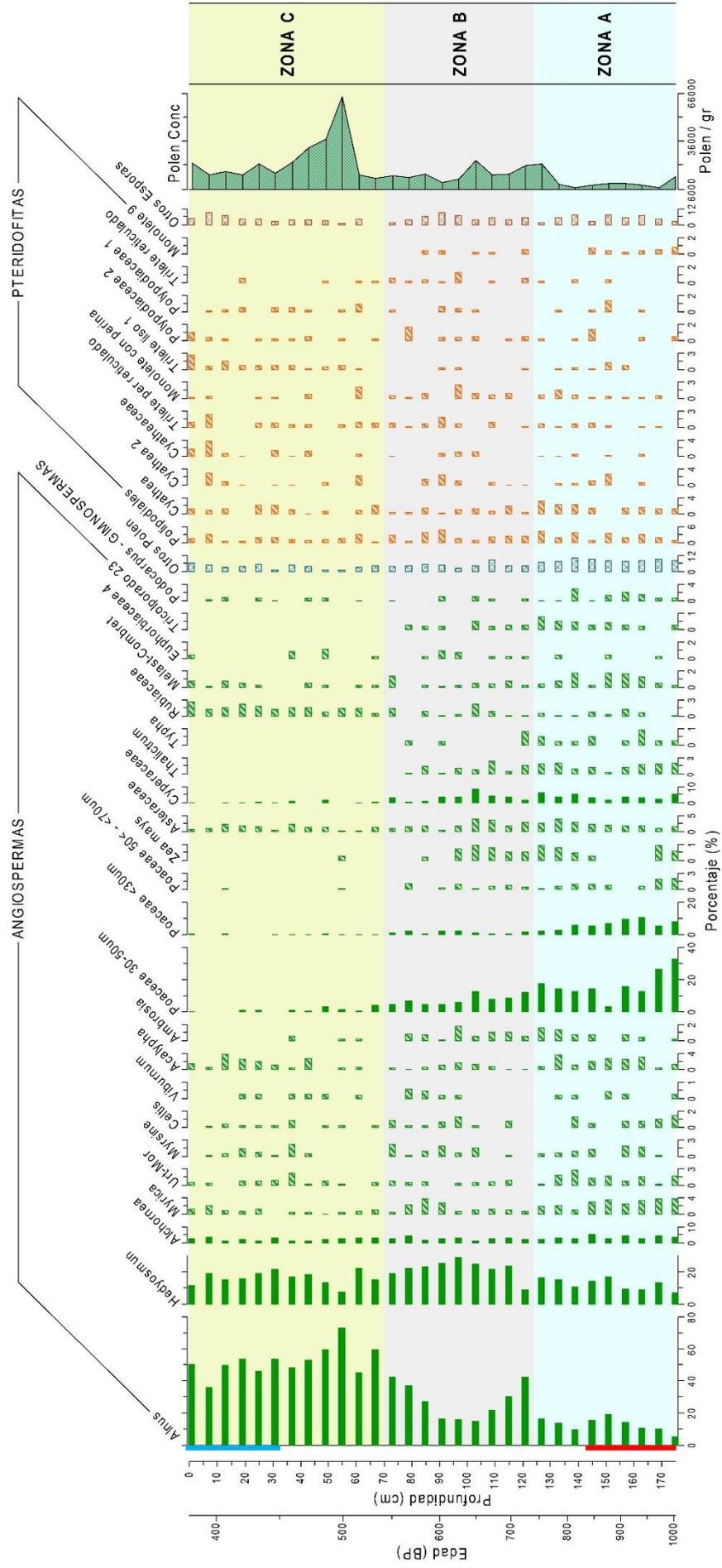
La **zona B** (121 – 73 cm: ~724 - 547 BP), incluye nueve muestras no relacionadas a ningún evento climático en particular. La concentración de polen se encuentra entre los 10 020 – 24 212 granos/gramo. Los taxones registrados en esta zona incluyen 22 angiospermas, una gimnosperma y

11 pteridofitas. De las angiospermas, *Alnus* presenta mayor abundancia relativa (15,4 – 43%), seguido por *Hedyosmun* (9,6 -29,6%), Poaceae 30-50 μm (5,2 – 13%) y Cyperaceae (1,2 – 9,2%). Mientras que las esporas de helecho presentan abundancia relativa entre 4,3 – 13,7%, entre los cuales destacan los Polypodiales (0,9 – 5,1%). Los taxones restantes representan menos del 5% de la abundancia total. En seis muestras se observó *Zea mays*, entre los intervalos 121 - 97 cm (~724 - 624 BP) y a 85 cm (~584 BP).

La **zona C** (67 - 1 cm: ~531 - 383 BP), incluye 12 muestras, de las cuales las seis más jóvenes están relacionadas con la PEH (31 - 1 cm). La concentración de polen se encuentra entre los 12 642 – 64 055 granos/gramo, siendo el rango de mayor concentración registrada en la columna. Los taxones registrados en esta zona incluyen 19 angiospermas, una gimnosperma y 10 pteridofitas. De las angiospermas, *Alnus* presenta la mayor abundancia relativa (36,8 – 73.8%), seguido por *Hedyosmun* (8,1 – 22,4%), las esporas de helecho (3,7 y 16%) y el resto de los taxones menos del 5%. *Zea mays*, sólo se observó en una sección (55 cm – ~ 499 BP).

Figura 8.3

Palinograma y biozonas distinguidas en el segmento analizado del testigo PO6, mostrando los taxones que representan el 95% de la data palinológica analizada.



Nota: Las líneas, ubicadas al lado derecho del eje de las ordenadas, de color celeste y roja indican la PEH y ACM respectivamente

8.3.2 Diversidad alfa: Riqueza específica y estructura de la asociación

En la figura 8.4, se han incluido la sumatoria de los granos de polen y esporas que presentan abundancia relativa menor a 5%, bajo la denominación OP (otros polen) y OE (otros esporas); asimismo, la sumatoria de taxones que aparecen una vez (*singletons*) o dos veces (*doubletons*) a lo largo del testigo, ya que estos son tomados en cuenta en el modelo no paramétrico de Chao1 para determinar la diversidad.

Los valores de OP y OE son mayores en la parte más antigua con relación a la parte más joven, los *singletons* siguen la tendencia del índice de Chao 1, mientras que los *doubletons* no. Tanto la riqueza específica (S) como la diversidad estimada (Chao1), reflejan la variabilidad de las asociaciones palinológicas a nivel de diversidad alfa, siendo mayores en la zona más antigua y menores hacia la zona más moderna. También se observa que los patrones de diversidad no están correlacionados con las concentraciones de polen a lo largo del segmento analizado de testigo PO6.

En la **zona A**, la riqueza específica se encuentra entre 56 – 76 taxones y el índice de Chao1 entre 147 – 774.5. En esta biozona, se observan los valores más altos de diversidad estimada (a 145 cm, Chao1= 463.8; a 151 cm, Chao1 = 774.5, ambas asociadas a la ACM), mientras que las concentraciones de polen son bajas comparadas con las de otras zonas. Tanto los *singletons* como *OP* siguen la curva de diversidad de Chao1, mientras que los *doubletons* lo hacen con la riqueza. De los taxones

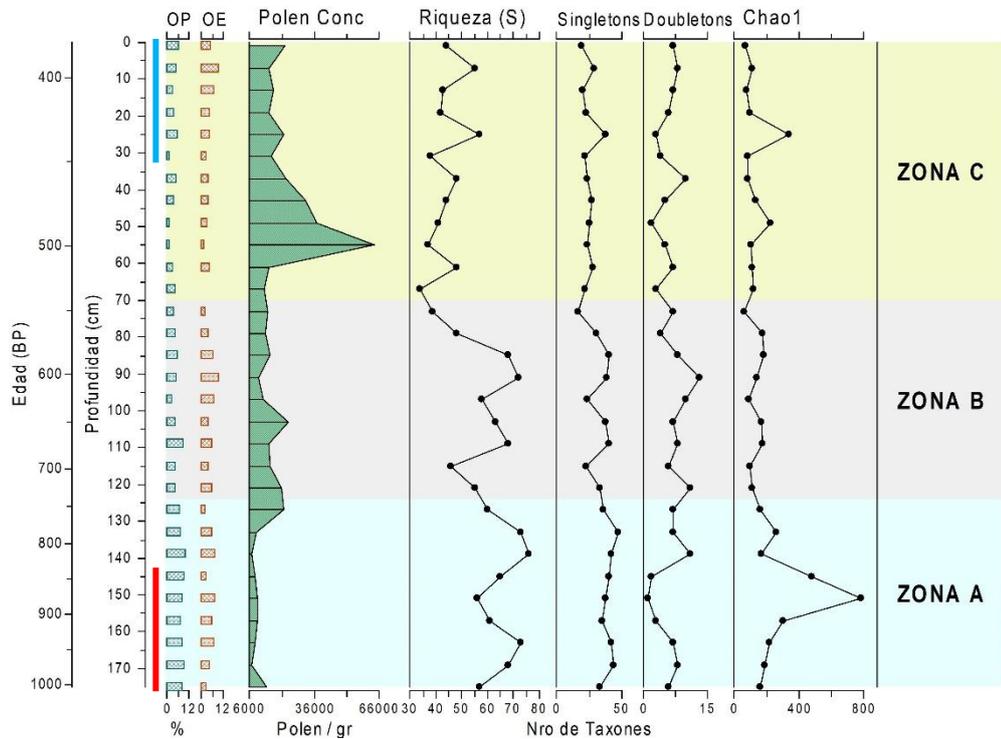
identificados, 9 son árboles, uno arborescente, dos arbustos y 4 hierbas (ver anexos).

En la **zona B**, con una riqueza específica entre 39 -72 taxones e índice de Chao1 entre 59.6 – 167.8 (la más baja entre las biozonas). La diversidad estimada se mantiene casi constante, pero la riqueza específica disminuye en la última sección de esta zona (de 72 a 39 taxones); mientras que, las concentraciones de polen aumentaron en relación con las de la zona A y se mantienen o aumentan a lo largo de la zona palinológica. Los *singletons*, *doubletons*, *OP*, *OE* (de las nueve muestras, en cuatro de ellas las esporas aportan más) y riqueza siguen el patrón de la diversidad. De los taxones identificados, 9 son árboles, uno arborescente, dos arbustos y 4 hierbas (ver anexos).

En la **zona C**, la riqueza específica oscila entre 34 a 57 taxones y Chao1 entre 69.7 – 297. La diversidad estimada presenta dos picos máximos, a 49 cm (Chao1=196.8) y 25 cm (Chao1=297); sin embargo, estos no son los más altos registrados en el segmento analizado del testigo PO6. En esta zona, observamos las mayores concentraciones de polen registrado en el testigo. Los *singletons*, *riqueza* y mayormente *OE* (de las doce muestras, en ocho de ellas las esporas aportan más) siguen la curva de diversidad. De los taxones identificados, 9 son árboles, uno arborescente, dos arbustos y 2 hierbas (ver anexos).

Figura 8.4

Diversidad alfa en las muestras del segmento analizado del testigo PO6



Nota: OP=Otros polen; OE=Otras esporas. Las líneas de color celeste y roja, ubicadas al lado derecho de las ordenadas, indican la PEH y ACM respectivamente.

A nivel de riqueza específica, mediante la prueba ANOVA se obtuvo que existe una diferencia significativa entre las zonas A y C ($p = 0.0001$), zonas B y C ($p = 0.0059$), pero no entre las zonas A y B ($p = 0.117$). Así mismo, con la prueba t de student se determinó que existe diferencia significativa entre las muestras de ACM (145-175 cm) y PEH (1-31 cm), $p = 0.0022$. En tanto, a nivel de diversidad estimada (Chao1) se realizó la prueba de Kruskal-Wallis, ya que la zona B no presentó una

distribución normal (prueba de Shapiro-Wilk, $p = 0.2086$). De lo cual se obtuvo que existe diferencia significativa entre las zonas A y C ($p = 0.0032$) y zonas A y B ($p = 0.0104$), mientras que entre las zonas B y C no existe diferencia significativa ($p = 0.4136$). Por otra parte, entre las muestras que comprenden PEH y ACM se encontró que existe una diferencia significativa ($p = 0.03064$) la cual fue obtenida a través de la prueba de Mann-Whitney ya que los valores de diversidad en la ACM no mostraron una distribución normal (prueba de Shapiro-Wilk, $p = 0.1142$).

En el análisis nMDS mostrado en la figura 8.5, se obtuvo un stress igual a 0.0861, valor aceptable de acuerdo con Cruz et al. (2010). En esta figura, las muestras están organizadas por zonas palinológicas y, por tanto, en orden cronológico, estando las más modernas hacia la izquierda y las más antiguas hacia la derecha. De acuerdo con el análisis de nMDS, las muestras más modernas (zona C) están más cercanas entre sí con excepción de la 7C (36.8% *Alnus*, 0% *Poaceae*, 0.2% *Cyperaceae*, 0% *Thalictrum* y 55 de riqueza) y la 55C (73.8% *Alnus*, 2.8% *Poaceae*^{Zm}, 0% *Cyperaceae*, 0% *Thalictrum* y 37 de riqueza). Por otra parte, las muestras de la zona A están más alejadas que las que corresponden a la zona C y las asociadas a la zona B se observan más dispersas que las dos zonas antes mencionadas (figura 8.5 y la tabla 8.3). En las muestras en las cuales se registra la presencia de polen de *Zea mays*, se indica así: *Poaceae*^{Zm}.

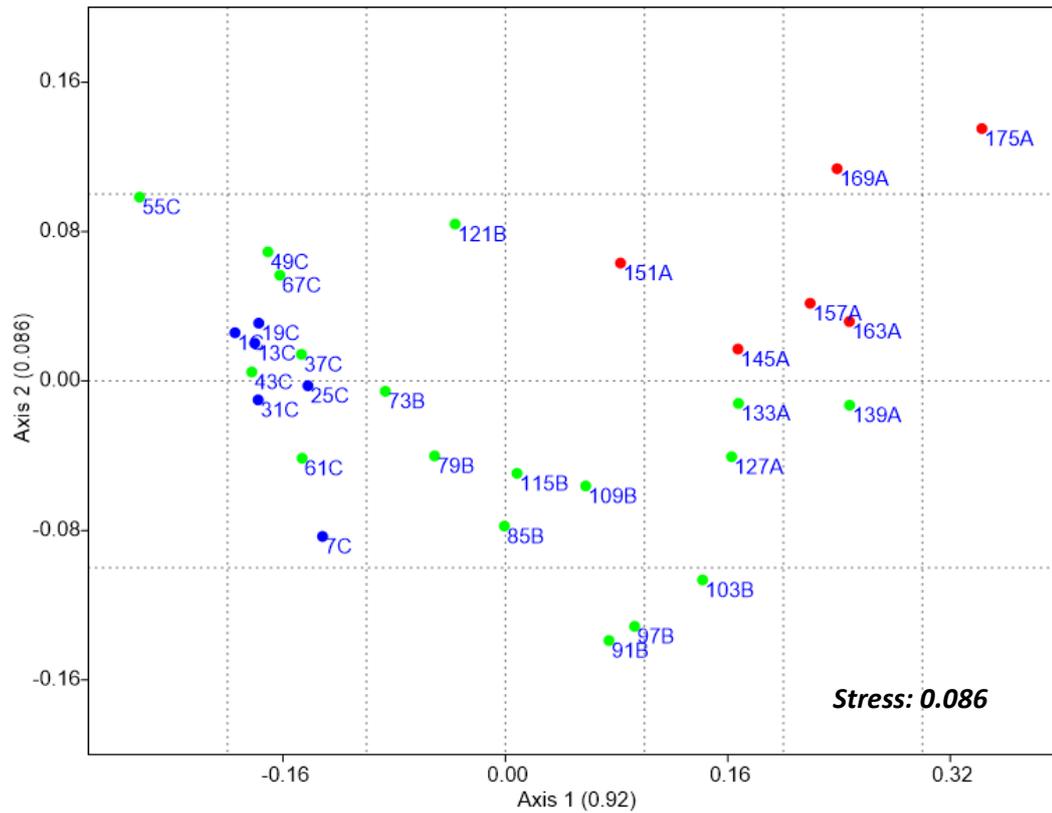
En el caso de la zona B, se alejan del grupo la 91B (17% *Alnus*, 8.6% *Poaceae*, 4.1% *Cyperaceae*, 0.3% *Thalictrum* y 72 de riqueza), 97B

(16.3% *Alnus* y 10.9% Poaceae^{Zm}, 4% Cyperaceae, 1.3% *Thalictrum* y 58 de riqueza), 103B (15.4% *Alnus*, 16.3% Poaceae^{Zm}, 9.2% Cyperaceae, 0.9% *Thalictrum* y 63 de riqueza) y 121B (42.7% *Alnus*, 16.1% Poaceae^{Zm}, 2.3% Cyperaceae, 1.8% *Thalictrum* y 55 de riqueza). En la zona A, las muestras 151A (19.5% *Alnus*, 12.4% Poaceae, 1.9% Cyperaceae, 0.5% *Thalictrum* y 56 de riqueza), 169A (10.8% *Alnus*, 35.6% Poaceae^{Zm}, 2.7% Cyperaceae, 2.1% *Thalictrum* y 68 de riqueza) y 175A (5.9% *Alnus*, 44.4% Poaceae^{Zm}, 5.6% Cyperaceae, 2.2% *Thalictrum* y 57 de riqueza) son las que se encuentran más distanciadas de las otras asociaciones palinológicas de la zona A.

Asimismo, en la figura 8.5 se observa que las muestras relacionadas con la PEH (puntos azules) se encuentran más cercanas entre sí, al contrario que las asociadas a la ACM (puntos rojos).

Figura 8.5

Análisis de Escalamiento multidimensional no paramétrico (nMDS) de las asociaciones palinológicas del segmento analizado del testigo PO6



Nota: Este análisis fue realizado con las abundancias relativas de los taxones que representan el 95% de las muestras analizadas del testigo PO6, indicando el nivel de estrés en segunda dimensión. En puntos azules: PEH, puntos rojos: ACM y puntos verdes: período de transición. Los números y letras (A, B y C) en azul corresponden a las profundidades y a las zonas palinológicas respectivamente.

Tabla 8.3

Correlación entre nMDS, diversidad alfa y variables que representan el 95% de la data palinológica e identificada taxonómicamente

Variabes	Coefficiente de Spearman (r)	p value	Varianza Explicada (r²)
Diversidad (Chao1)	0.57	9.47 e-04*	0.33
Riqueza	0.83	1.29 e-08*	0.70**
Concentración de polen	-0.69	2.88 e-05*	0.49
<i>Acalypha</i>	0.19	0.32	-----
<i>Alchornea</i>	0.38	0.041*	0.14
<i>Alnus</i>	-0.97	< 2.2 e-16*	0.94**
<i>Ambrosia</i>	0.54	2.27 e-03*	0.29
Asteraceae	0.47	8.7 e-03*	0.23
<i>Celtis</i>	0.37	0.04629*	0.14
Cyperaceae	0.83	1.62 e-08*	0.69**
Euphorbiaceae 4	-0.02	0.93	-----
<i>Hedyosmum</i>	-0.12	0.52	-----
Melast-Combret	0.36	0.05	-----
Urt-Mor	0.34	0.07	-----
<i>Myrica</i>	0.68	3.6 e-05*	0.46
<i>Myrsine</i>	0.29	0.1144	-----
Poaceae (incl. <i>Zea mays</i>)	0.89	2.50 e-11*	0.80**
<i>Podocarpus</i>	0.47	8.53 e-03*	0.22
Rubiaceae	-0.62	2.6 e-04*	0.38
<i>Thalictrum</i>	0.84	5.20 e-09*	0.71**
<i>Typha</i>	0.68	3.23 e-05*	0.47
<i>Viburnum</i>	0.04	0.82	-----
Esporas totales	0.24	0.21	-----

Nota: * Existe correlación entre el nMDS Axis1 y la variable analizada.

** Variables con porcentaje de la varianza explicada mayores a 50%.

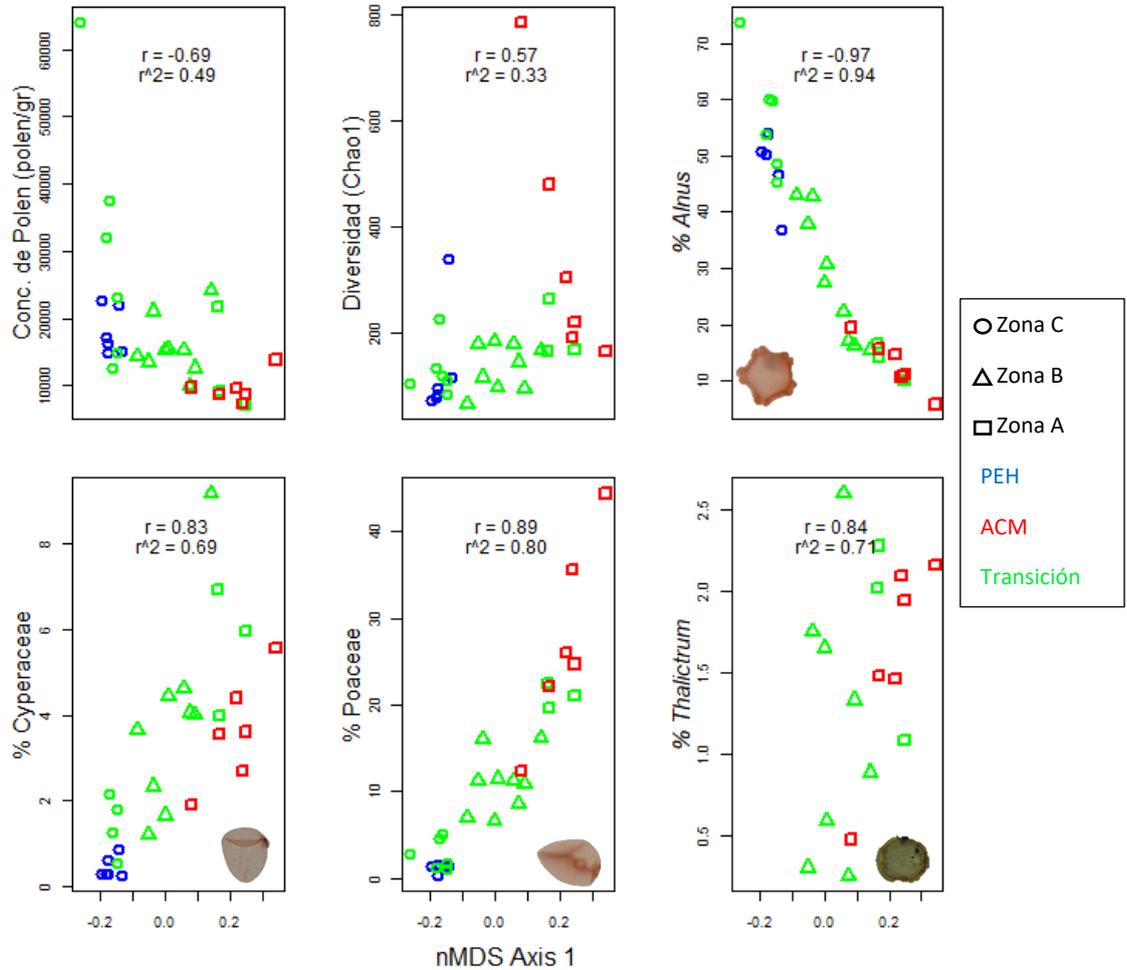
En la tabla 8.3, se indica cuáles de las variables que representan el 95% de la data analizada presentan correlación con el nMDS Axis 1 según la prueba de Spearman; y en la figura 8.6, se muestra el desglose de la correlación entre el nMDS y cada variable que presentan un r² mayor a 0.5, es decir porcentajes de la varianza explicada mayores a 50%, las cuales son: *Alnus*, Poaceae (incluido *Zea mays*), *Thalictrum* y

Cyperaceae. Se incluye la concentración de polen por su valor cercano a 0.5 y la diversidad estimada (Chao1) en lugar de la riqueza.

De acuerdo con la figura 8.6, la concentración de polen es mayor durante la PEH que durante la ACM, al contrario de la diversidad estimada, la cual es mayor durante la ACM y menor en la PEH. En el caso de *Alnus*, Cyperaceae y Poaceae, se observa que durante la PEH (en azul) las abundancias relativas se encuentran menos dispersas a diferencia de lo sucedido durante otros momentos, en especial durante la ACM (en rojo), un patrón similar presenta la concentración de polen y la diversidad estimada. *Alnus* y Poaceae siguen tendencias opuestas, mientras que *Alnus* presenta menor porcentaje en la parte más antigua, las poáceas muestran valores muy elevados; mientras avanza el tiempo, los valores de ambos taxones cambian, incrementándose en *Alnus* y disminuyendo en las poáceas. Por otra parte, *Alnus*, *Thalictrum* y las ciperáceas, muestran que los mayores valores en abundancia relativa no se observan durante un evento climático, como la PEH y ACM.

Figura 8.6

Diagramas de dispersión entre el nMDS Axis 1, concentración de polen y las variables que presentan r^2 mayor a 0.5 según la tabla 8.3



Nota: Coeficiente de Spearman (r) y porcentaje de varianza explicada (r²).

De acuerdo con los diagramas de dispersión de las abundancias relativas de Poaceae y *Alnus*, contrarias en el tiempo y con un r² mayor a 0.80, se ha construido un índice o *index* (de ahora en adelante), calculado a partir de la

siguiente fórmula (Klimaszewski-Patterson, 2022): $(\%Poaceae - \%Alnus) / (\%Poaceae + \%Alnus)$, los valores del índice varían entre -1 y 1 (figura 8.7).

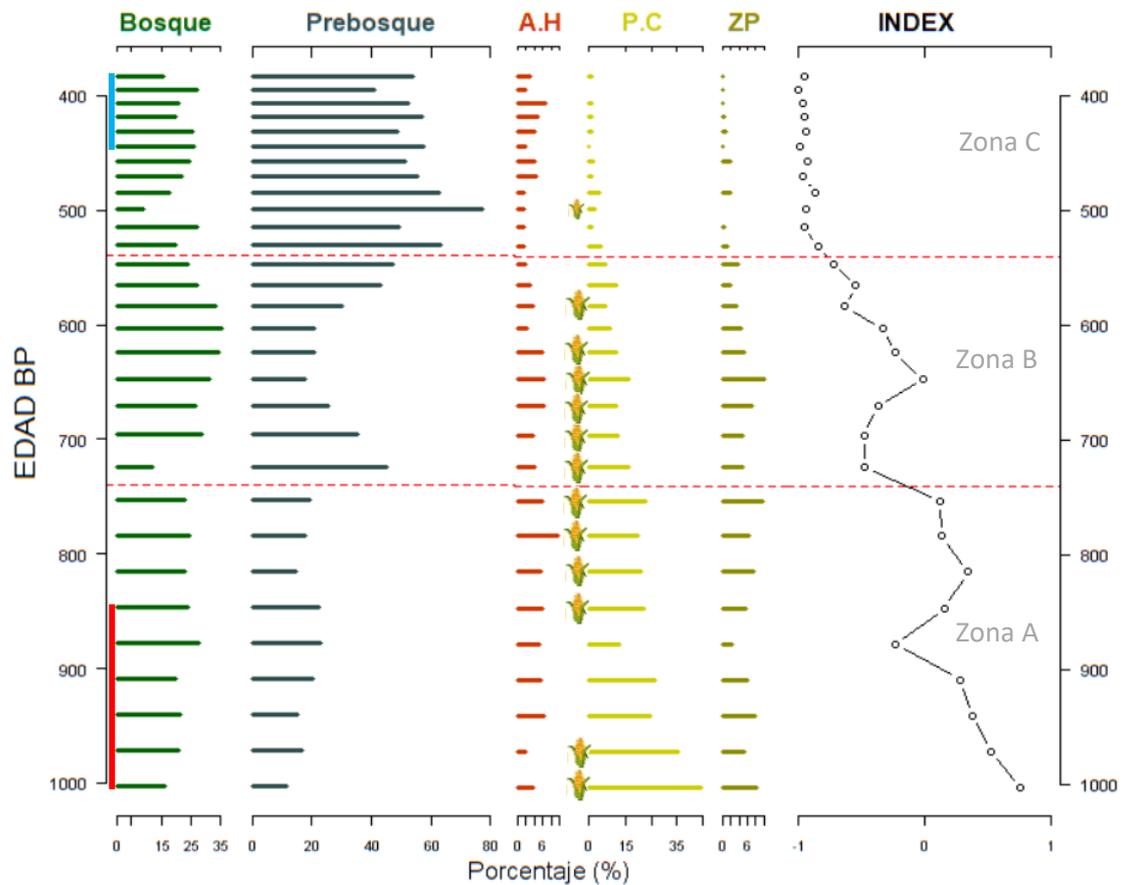
La palinoflora registrada en el segmento analizado del testigo PO6 (figura 8.3), cuyas abundancias relativas representan el 95% de la data analizada, la podemos clasificar en cuatro de los siete tipos de cobertura descrita por Salas et al. (2016) y dos de la sucesión de Walentowski et al. (2018). De esto tenemos que *Typha*, *Cyperaceae* y *Thalictrum*, son representantes de la zona pantanosa; *Poaceae* y *Zea mays*, de pastos y cultivos; *Acalypha*, *Ambrosia* y *Asteraceae*, de arbustos y herbazales; *Alnus*, *Alchornea* y *Celtis*, de pre-bosque; finalmente, *Hedyosmum*, *Myrica*, *Urt-Mor*, *Myrsine*, *Podocarpus*, *Viburnum* y *Cyathea*, del bosque montano. Consideraremos de aquí en adelante el tipo de cobertura de pastos y cultivos como pastizales, ya que casi el total del porcentaje corresponde a taxones asociados a pastos y no a *Zea mays* “maíz” (cultivo).

En PO6, los tipos de cobertura varían a través del periodo evaluado, ~1003 – 383 BP (figura 8.7), los porcentajes del pre-bosque se incrementan hacia la zona más moderna mientras que los de la zona pantanosa y pastizales muestran un comportamiento opuesto, disminuyendo sus abundancias hacia la zona C. Por otra parte, los porcentajes de bosque, arbustos y herbazales no presentan cambios sustanciales que permitan observar una tendencia definida. De los tipos de cobertura mencionados, la zona pantanosa y pastizales son las que siguen un patrón similar al *index*, la zona pantanosa muestra un incremento durante el intervalo de ~800 BP a ~600 BP. Durante la ACM, la cobertura característica fue el pastizal, el *index* presenta valores positivos con excepción a ~878 BP; a

diferencia de la PEH, periodo en el cual se incrementan las especies asociadas al pre-bosque y el *index* muestra valores cercanos a -1.

Figura 8.7

Tipos de cobertura de acuerdo con las asociaciones palinológicas del segmento analizado del testigo PO6 y los trabajos de Salas et al. (2016) y Walentowski et al. (2018).



Nota: A.H=Arbustos y Herbazales; P.C=Pastos y Cultivos (imagen de maíz indica la presencia de este taxón en la muestra); ZP=Zona Pantanosa. Líneas rojas entrecortadas indican la división entre zonas palinológicas. Las líneas, ubicadas al lado del eje de las ordenadas, de color celeste y roja indican la PEH y ACM respectivamente.

En la zona A, arbustos y herbazales no presentan mayores cambios al igual que la zona pantanosa, con excepción a ~972 BP en el caso del primero y a ~878 BP en la segunda donde se registran los valores más bajos de estas coberturas. Mientras que el pre-bosque y bosque muestran un incremento desde ~1003 BP hacia ~878 BP, manteniendo el bosque su abundancia relativa hacia finales de la zona A y el pre-bosque disminuye ligeramente. Los pastizales muestran las mayores abundancias relativas y van disminuyendo en forma gradual hacia finales de la zona A, la misma tendencia muestra el *index*, pero manteniendo valores positivos con excepción a ~878 BP.

En la zona B, los arbustos y herbazales junto con la zona pantanosa se incrementan desde ~724 BP hacia los ~647 BP y disminuyen hacia finales de la zona B, se observa el mismo patrón en el *index*. Los pastizales siguen disminuyendo paulatinamente, mostrando un pico máximo a los ~647 BP al igual que el *index*, el cual presenta valores negativos, pero no cercanos -1 como se aprecia en la zona más moderna.

En la zona C, la zona pantanosa y los pastizales muestran los más bajos porcentajes de abundancia relativa, siendo en algunos casos 0%, de la misma manera, el *index* registra valores cercanos a -1. Los arbustos y herbazales incrementan sus valores entre ~471 BP a ~407 BP, parte central de la zona palinológica. Los bosques mantienen el mismo patrón que en la zona B y los porcentajes del pre-bosque son mayores a la de los bosques.

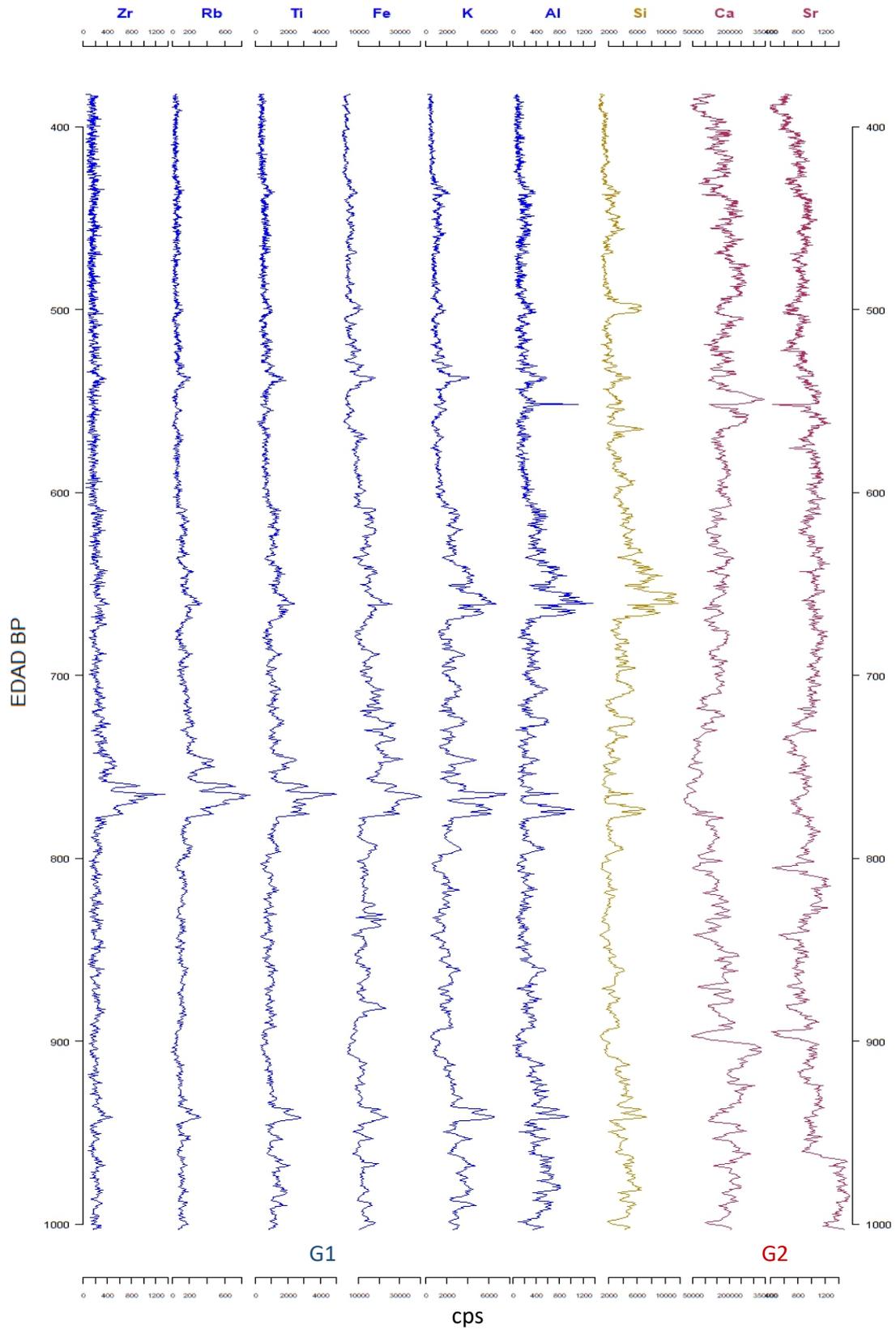
8.4 Composición elemental del segmento analizado del testigo PO6

El análisis de PCA de los elementos presentes en los sedimentos del segmento analizado del testigo PO6 (en anexos), muestran que los primeros dos componentes representan 63.4% de la varianza total. El primer componente (PC1) contabiliza el 43.8% de la varianza, los elementos que contribuyen al PC1 son: Potasio - K (14.2%), Hierro - Fe (14 %), Titanio - Ti (13.9 %), Rubidio – Rb (11%) y Aluminio - Al (9.5 %); mientras que el segundo componente (PC2) explica el 19.6% de la varianza, los elementos asociados a este componente son: Calcio – Ca (23.2 %) y Estroncio - Sr (18.4 %). En la figura 8.8, se observa el comportamiento de los elementos mencionados en el periodo comprendido entre ~1003 – 383 BP, en color azul a los elementos que aportan a la PC1 y en color guinda a los que contribuyen a la PC2; además, se incluye al Silicio - Si en color dorado, que aporta en ambas componentes.

El primer grupo (G1 de ahora en adelante) formado por los elementos Zr, Rb, Ti, Fe, K y Al muestran patrones similares a lo largo del periodo evaluado, siendo más notorio entre ~780 – 740 BP; sin embargo, en K y Al se observan periodos que resaltan y los diferencia de los otros cuatro, como los comprendidos entre: ~1003 – 950 BP, ~750 – 710 BP, ~680 – 640 BP y ~550 BP (Al). El segundo grupo (G2 de ahora en adelante), está conformado por Ca y Sr se observa que entre ~970 – 950 BP, ~810 BP y entre ~530 - 550 BP muestran diferencias en sus curvas. Por otra parte, Si presenta similitudes con ambos grupos, entre ~1003 - 640 BP y ~490 – 383 BP con el primer grupo y entre ~640 - 510 BP con el segundo grupo; sin embargo, entre ~510 – 490 BP su señal es pronunciada a diferencia del primer grupo y contraria al segundo.

Figura 8.8

Composición elemental del segmento analizado del testigo PO6 mostrando los elementos asociados a PC1 y PC2



IX. DISCUSIÓN

9.1 Comparación entre la cobertura actual en Pomacochas y la registrada durante ~1003 – 383 BP

De acuerdo con estudios realizados por Salas et al. (2016) y Walentowski et al. (2018) en los alrededores de la cuenca de Pomacochas, el área boscosa ha disminuido (pre-bosque y bosque), siendo el uso del suelo el principal factor del cambio de cobertura en la actualidad, por lo que los pastos y cultivos han incrementado su presencia en la cuenca. De las tres zonas palinológicas observadas (figura 8.7), la zona A (~1003 – 753 BP) presenta características similares a las observadas en la actualidad, ya que la cobertura característica en dicha zona palinológica es el pastizal, cuyo mayor aportante palinológico son las poáceas que se encuentran relacionados con espacios abiertos (Bush, 2002). Mientras que la cobertura vegetal en la Zona C (~531 – 383 BP) a pesar de ser la más moderna, muestra características diferentes a las observadas en la actualidad, reducción de las zonas abiertas e incremento las especies asociadas al bosque y pre-bosque (zona boscosa). Por otro lado, en la zona B (~724 – 547 BP) se observan patrones contrarios entre el pre-bosque y bosque, lo cual puede deberse a que las plantas pioneras estarían siendo reemplazadas por árboles característicos de bosque húmedo como el *Hedyosmun* (Todzia, 1988), y sumado a la disminución de pastizales nos indican un claro proceso de transición en la flora de Pomacochas.

En un trabajo de Bush et al. (2015) realizado en el lago Pomacochas, al igual que en este estudio, observaron un alto porcentaje de polen arbóreo (sumatoria de

porcentajes de bosque y pre-bosque en este trabajo) entre ~1003 - 383 BP. En contraste, los sedimentos del segmento analizado de PO6 durante ~1003 BP revelan que el porcentaje de Poaceae (pastizal) fue mayor al de arbóreo (pre-bosque y bosque). A diferencia del estudio mencionado, no se observa una marcada transición entre *Hedyosmun* y *Alnus* hasta ~810 BP; y desde ~710 BP en adelante, el polen arbóreo estuvo constituido en mayor porcentaje por *Alnus* (pre-bosque) y no por Moraceae-Urticaceae (bosque), una de las razones de esta diferencia puede estar ligada a la distancia que logran transportarse pólenes que usan el viento como medio para la polinización es decir son anemófilos (Mauri et al., 2016), dicha característica depende de su morfología. En el caso de los granos de polen de *Alnus* miden entre 23 – 35 μm y tienen un grosor de exina entre 1 – 1.5 μm (Leopold et al., 2012), mientras que los granos de Moraceae-Urticaceae son más pequeños, en promedio menores a 20 μm (Urticaceae: Sorsa y Huttunen, 1975; Moraceae: Punt y Eetgerink, 1982), lo que debió facilitar el depósito de estos en la parte central del lago ubicado a 1 km aproximadamente del punto de colecta de PO6 que es cercano a la zona urbana actual de Pomacochas.

9.2 Variabilidad climática y las asociaciones palinológicas

En la figura 8.5, es evidente el ordenamiento de las zonas por orden cronológico, de la más antigua hacia la más moderna (zonas A, B y C) y con la ayuda de los diagramas de dispersión (figura 8.6) se observa que la similitud entre las asociaciones se da mayormente en función de *Alnus* y Poaceae, taxones asociados a pre-bosque y pastizales respectivamente.

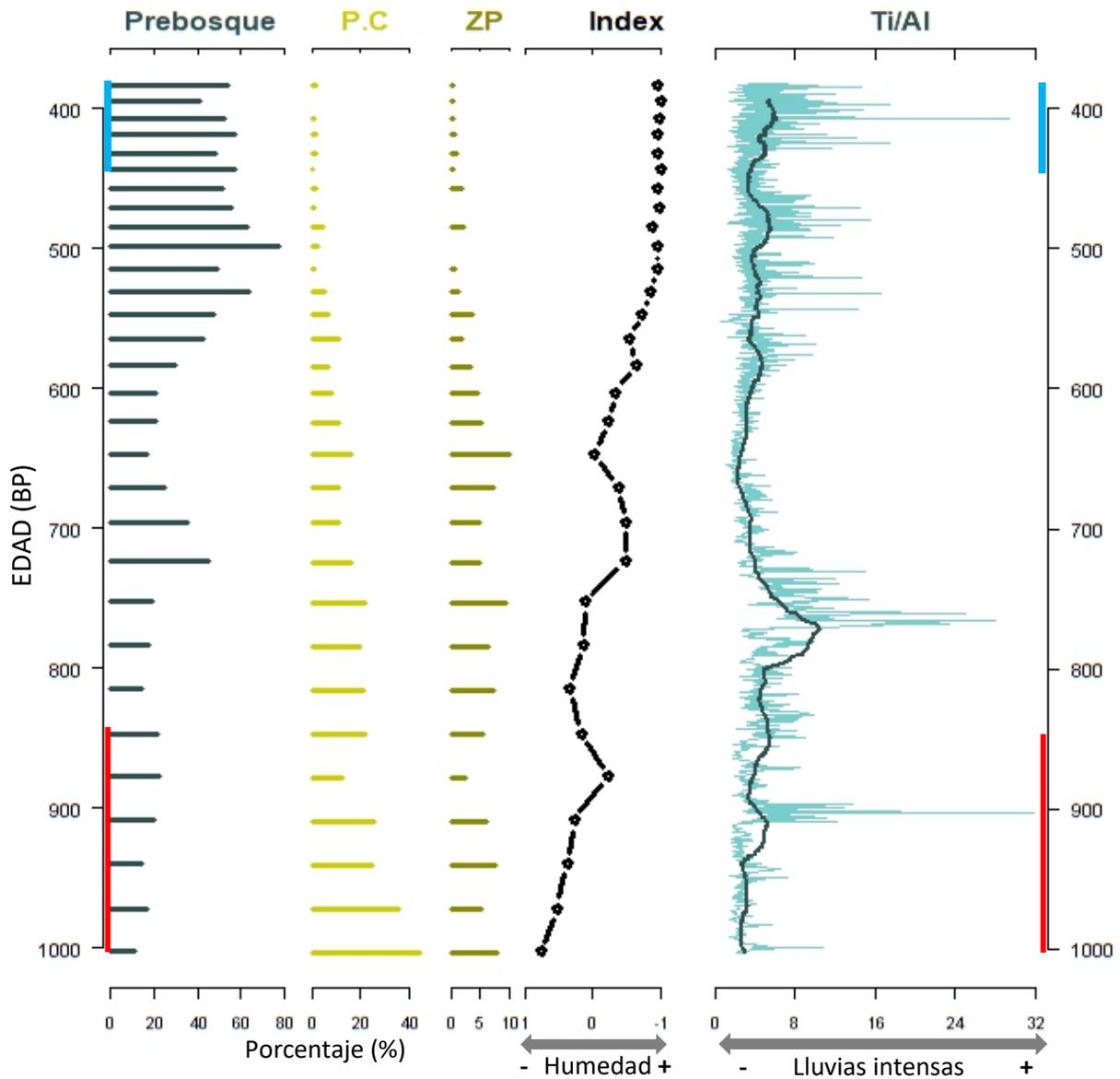
Por otra parte, los elementos del G1 (figura 8.8) como el Al y Ti son considerados generalmente elementos relativamente inmóviles durante procesos de meteorización (Young y Nesbitt, 1998) al igual que Zr y Rb (Boës et al., 2011), por lo que la presencia en los sedimentos de los elementos mencionados serían producto de la erosión en la cuenca y/o por la entrada de detritos al cuerpo de agua (Davies et al., 2015). Por el contrario, el G2 se encuentra relacionado a la dinámica del lago, ya que incluye elementos como el Ca que está ligado con la productividad biogénica de carbonato de calcio, cuyo incremento es favorecido por la presencia de microorganismos y plantas productoras de este compuesto (Peřechaty et al., 2013). Mientras en el caso del Si, la fuente es tanto externa como interna, pudiendo ser la fuente alóctona del elemento mencionado los fitolitos de las plantas que crecen cerca a la orilla del lago y las frústulas de las diatomeas la fuente biogénica interna (Davies et al., 2015).

Los óxidos de titanio son una de las formas como el Ti pudo llegar a los sedimentos de PO6, por lo que el incremento en los valores de este componente indicaría periodos de escorrentía por lluvias intensas, tal como indican estudios previos (Haug et al., 2001; Metcalfe et al., 2010; Yseki et al., 2022); adicionalmente, su relación con el Al ha servido para evaluar el grado de meteorización (Young y Nesbitt, 1998), siendo entonces los incrementos en la relación Ti:Al indicadores de la intensidad de lluvias registrados en los sedimentos del lago (figura 9.1).

Figura 9.1

Variabilidad climática (Ti:Al) y cobertura en Pomacochas durante ~1003 – 383

BP.



Nota: P.C=Pastos y Cultivos; ZP=Zona Pantanosa; Index= $(\%Poaceae - \%Alnus)/(\%Poaceae + \%Alnus)$. Las líneas ubicadas al lado del eje de las ordenadas de color celeste y roja indican la PEH y ACM respectivamente.

El testigo PO6 registra lluvias intensas más continuas hacia la parte más moderna, coincidiendo con el recambio de pastizales por pre-bosque lo que sugiere una tendencia hacia un clima más húmedo en Pomacochas entre ~1003 – 383 BP, patrón que también es observado en el *index* propuesto en este estudio. El recambio mencionado es propiciado por el crecimiento de especies pioneras, como *Alchornea* (Flores, 2014), *Celtis* (Vargas, 2012) y en especial *Alnus* (Russo, 1990), taxones cuyos granos de polen han sido observados en este estudio. Estas especies además de ser fijadoras de nitrógeno presentan características ecológicas diversas, como: crecimiento rápido en áreas abiertas y disturbadas, son muy exigentes en luz, se desarrollan en suelos pobres y se adaptan a condiciones secas (Russo, 1990; Pretel. 1985).

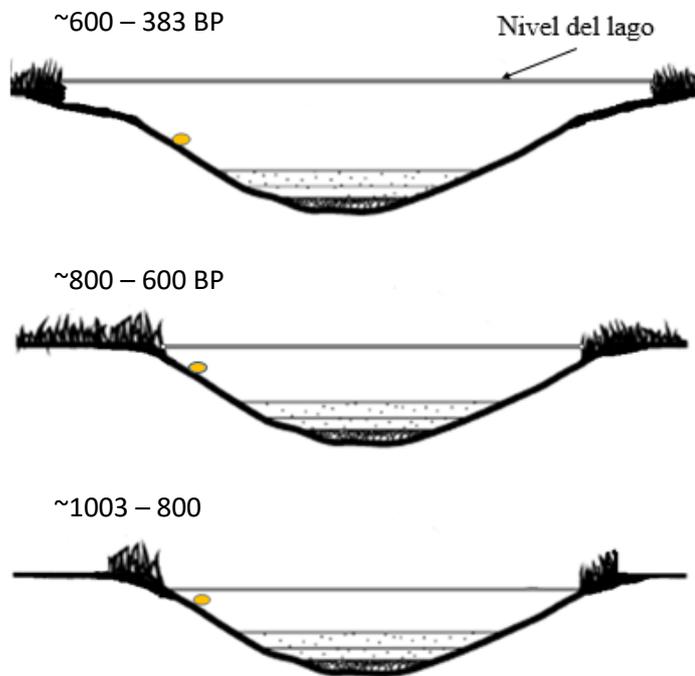
Las variaciones en la abundancia relativa de la zona pantanosa y la magnitud de los valores de la relación Ti:Al (figura 9.1) muestran que el nivel del lago se ha incrementado desde ~1003 a 383 BP. En trabajos anteriores, Chepstow-Lusty et al. (2003) y Correa-Metrio et al. (2010) asociaron las variaciones en las abundancias relativas de las ciperáceas con los cambios en los niveles de un lago, incluso indicando que en períodos secos el nivel de las aguas del lago baja y permite el crecimiento de las ciperáceas en sus bordes, sucediendo lo contrario durante periodos húmedos. Las especies de la familia Cyperaceae se caracterizan por crecer bordeando el margen de los lagos (Cirujano et al., 2014) y junto con *Thalictrum*, cuyas características ecológicas incluyen su desarrollo en suelos húmedos de matorrales y áreas boscosas (Trinidad et al., 2011), indican que el lugar de donde fue recuperado el testigo estuvo más cerca a la orilla y a medida que pasó el tiempo esta se alejó de PO6. De acuerdo con la figura 9.1, durante el

intervalo ~1003 – 800 BP se observan períodos cortos de lluvias intensas (siendo entre ~910 – 895 BP donde es continua y la relación Ti:Al alcanza los valores más elevados) y junto con la abundancia relativa de los taxones relacionados con la zona pantanosa indican que el testigo PO6 estuvo cerca a la orilla; pero, el cinturón de ciperáceas estaría menos desarrollado que durante el intervalo entre ~800 – 600 BP, tal vez porque el nivel del lago era muy bajo y la plataforma muy estrecha pero que permitía el desarrollo de macrofitas sumergidas (productoras de carbonatos). El segundo intervalo, ~800 – 600 BP, caracterizado por lluvias intensas durante ~780 – 730 BP que propician un aumento en el nivel del lago y donde se registra una fuerte entrada de detritos, que conlleva a una reducción en la concentración de carbonatos (Rothwell y Croudace, 2015), ocasionando la acumulación de sedimentos que favorecen el crecimiento de las ciperáceas (aumento en abundancias relativas). En el tercer intervalo, ~600 – 383 BP, las abundancias relativas de la zona pantanosa disminuyen gradualmente incluso *Thalictrum* no se observa en la mayoría de las muestras asociadas a este intervalo, el testigo se encuentra alejado del cinturón de ciperáceas por lo que se deduce que el nivel del lago es más elevado, aunque los valores de la relación Ti:Al no son los más altos, se observa continuidad de lluvias intensas en este periodo y valores elevados de polen asociado a pre-bosque que indicarían un control de la erosión por parte de la vegetación ya que los bosques en general reducen el riesgo de pérdida considerable del suelo (Morgan, 2005). En la figura 9.2, se muestran posibles escenarios derivados de la relación entre la zona pantanosa y los niveles del lago Pomacochas, tres períodos en los cuales los niveles del lago mostraron cambios de acuerdo con la relación Ti:Al y que difieren en aproximadamente 60

años con las zonas palinológicas por lo que se podría inferir una respuesta posterior de la vegetación a eventos como lluvias intensas, que incrementan el aporte terrígeno, tal como se observa entre ~800 – 600 BP.

Figura 9.2

Relación entre la zona pantanosa, el lugar de recuperación del testigo PO6 y el aumento en el nivel del lago Pomacochas durante ~1003-383 BP.



Nota: Adaptado de Chepstow-Lusty et al. (2003). Círculo amarillo, ubicación del testigo PO6.

Los eventos climáticos registrados en los sedimentos del lago, ACM y PEH, muestran diferencias resaltantes a nivel de palinoflora. Durante la ACM, la flora palinológica es más heterogénea (figuras 8.5) lo cual queda de manifiesto por la alta riqueza específica y elevados índices de Chao1 (figura 8.4); mientras que, en la PEH, la palinoflora es menos heterogénea, con menor riqueza específica y menores valores de índice de Chao1, lo que sugiere que la variabilidad palinológica mostrada durante la PEH es más confiable que durante la ACM. Con respecto a la cobertura vegetal de Pomacochas durante los eventos climáticos mencionados, se observa que el pastizal fue predominante durante la ACM y el registro de periodos cortos de lluvias intensas continuas sugieren un clima menos húmedo; sucediendo lo contrario en la PEH, donde el pre-bosque muestra abundancias relativas mayores, las lluvias intensas son más continuas relacionando estas características con un clima más húmedo.

9.3 Comparación del registro palinológico y climático de Pomacochas en un contexto regional

Trabajos previos han utilizado la relación entre el polen de diferentes taxones para establecer cambios en la humedad en una zona (Liu et al., 2005; Ledru et al., 2015) o en las lluvias estacionales (Fitchett y Bamford, 2017). El *index* de este estudio, construido a partir de *Alnus* y poáceas con r^2 mayores a 0.80 (figura 8.7), se encuentra relacionado con la variación de la humedad en Pomacochas y refleja los cambios en el ambiente durante la ACM y PEH, eventos climáticos archivados en espeleotemas de Palestina (Apaéstegui et al., 2014), Cascayunga (Reuter et al., 2009) y Huagapo (Kanner et al., 2013), además de los sedimentos lacustres de

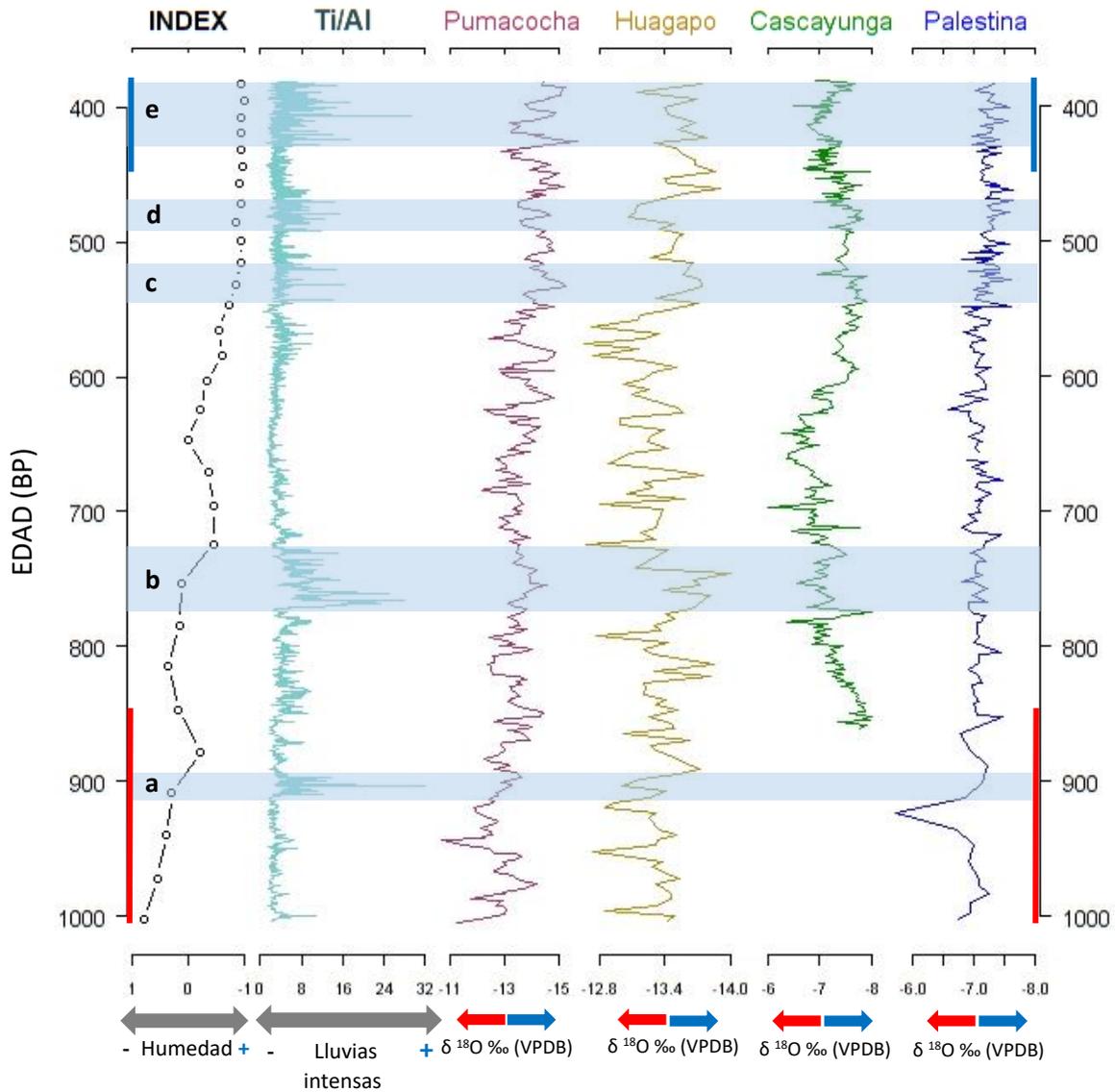
Pumacochas (Bird et al., 2011), todos estos considerados registros de alta resolución de los Andes orientales peruanos, la señal isotópica del oxígeno se encuentra relacionado con la variación en la intensificación del SMSA, siendo menos intenso durante la ACM dando como resultado la disminución en las precipitaciones lo que propició un ambiente más seco, sucediendo lo contrario durante la PEH (figura 9.3). Durante la transición entre los eventos climáticos mencionados, el *index* muestra una tendencia hacia un ambiente húmedo y sus incrementos son posteriores a la intensificación de lluvias en Pomacochas (figura 9.3a, 9.3b y 9.3c).

A diferencia de Pumacochas (4 300 m s.n.m.), Huagapo (3850 m s.n.m.), Cascayunga (930 m s.n.m) y Palestina (870 m s.n.m.), el lago Pomacochas se ubica a 2220 m s.n.m., una altitud media en los Andes, que según Bustamante et al. (2016) las áreas localizadas a estas alturas son sensibles a los cambios en el clima monzónico, lo que puede explicar porque el registro de lluvias intensas (figura 9.3a, 9.3b, 9.3c, 9.3d y 9.3e) coincide con algunos de los estudios isotópicos, en especial con Pumacochas y Huagapo, Durante la ACM, se observa un periodo de lluvias intensas (figura 9.3a) que no es marcado en los otros estudios lo cual podría deberse a la dinámica local (Ward et al., 2019) , a diferencia de la PEH en la cual a pesar de la interferencia en el registro de las lluvias intensas por el aumento en el nivel del lago, se observa los incrementos continuos de Ti:Al (figura 9.3e); y, entre los eventos (~850 – 450 BP) también se registran lluvias intensas (figura 9.3b y 9.3c), así como en Pumacocha, Huagapo, Cascayunga y Palestina, pero entre ~470 - 490 BP (figura 9.3d) en Huagapo no registra dicha condición.

De acuerdo con lo mencionado, un ambiente seco con poca precipitación intensa caracterizó a Pomacochas durante la ACM, mientras que un ambiente húmedo y con lluvias intensas describe la zona durante la PEH. Mientras que la transición entre dichos eventos (~850 – 450 BP), el ambiente se muestra cambiante entre seco y húmedo, con presencia de lluvias intensas y periodos con ausencia de ellas (~720 – 600 BP).

Figura 9.3

Comparación entre el index, Ti:Al y registros paleoclimáticos de precipitación en los Andes orientales peruanos.



Nota: Sedimentos de lago Pumacocha (Bird et al., 2011), espeleotemas de las cuevas Palestina (Apaéstegui et al., 2014), Cascayunga (Reuter et al., 2009) y Huagapo (Kanner et al., 2013), la ubicación geográfica de los registros se muestra en la figura 2.5. Las líneas ubicadas al lado del eje de las ordenadas de color celeste y roja indican la PEH y ACM respectivamente. Las flechas rojas y azules indican menor y mayor precipitación respectivamente.

9.4 Presión antropogénica sobre las comunidades vegetales

La perturbación antropogénica en el pasado incluye los incendios, la domesticación de árboles y la tala de bosques, dando como resultado el incremento en las hierbas y taxones pioneros (McMichael, 2020). A nivel microscópico, el polen asociado a cultivos y pastos, así como el carbón o *charcoal* son indicadores de actividad antropogénica (e.g. Chepstow-Lusty et al., 2003; Weng et al., 2006; Bush et al., 2002, 2005, 2007, 2015, 2016), pero si el registro carece de estos, los cambios en la cobertura vegetal responden exclusivamente a cambios ambientales y climáticos (e.g. Schiferl et al., 2017). Por lo que, la observación del polen de *Zea mays*, importante recurso prehispánico utilizado por los antiguos peruanos (Ugent y Ochoa, 2006), implica el desarrollo local de la agricultura (Lane, 2010; Taylor et al, 2012) en Pomacochas, esta actividad se llevó a cabo desde el inicio del registro hasta ~499 BP (figura 8.7), con intervalos de ausencia del polen de este taxón, entre ~940 – 878 BP, ~603 BP y entre ~565 – 515 BP, a diferencia de Bush et al. (2015) que sólo registraron polen de *Zea mays* a ~460 BP. Teniendo en cuenta el tamaño del polen de maíz (mayor a 70 μm) y exina lisa, puede transportarse por el viento a distancias cortas que varían entre 60 m (Raynor, 1972) a 100 m hasta un máximo de 4.45 Km (Hofmann et al., 2014), por lo que es probable que los cultivos de maíz se encontraban alejados del punto de colecta del testigo entre las distancias mencionadas o que la flora circundante al cuerpo de agua amortiguó la llegada del polen por escorrentía a los sedimentos del lago (Lane, 2020) en caso que los cultivos estuvieron cerca del punto de colecta del testigo.

El cultivo de maíz se ha dado mayormente en periodos secos, acorde con lo mencionado en los estudios de Bush et al. (2015) y Akesson et al. (2020); sin embargo, entre ~940 – 878 BP (parte de la ACM) tal vez por las lluvias intensas registradas (Ti:Al) o el incremento en la humedad (*index*) no se desarrolló esta actividad. Durante períodos húmedos incluido la PEH, no se observa el polen de maíz con excepción del registro a ~499 BP, por lo que sus antiguos habitantes al encontrarse en un entorno húmedo desfavorable para la preservación de los productos agrícolas y sumada las preferencias ecológicas del maíz (ambientes cálidos y secos), optaron por retirarse de la zona o reubicar sus cultivos lejos del entorno adverso (Akesson et al., 2020). Con respecto a la hipótesis sobre una posible sequía en la cordillera central durante ~850 – 450 BP (Moseley, 2001 mencionado por Church y Guengerich, 2018) que empujó a las poblaciones a migrar hacia los Andes Orientales de Chachapoyas en busca de condiciones más adecuadas para asentarse, no se puede establecer si hubo o no un incremento en el cultivo del maíz en Pomacochas durante este período debido a la demanda alimenticia por el aumento en la densidad poblacional, ya que las abundancias relativas registradas (<1.5 %) no permiten respaldar esa hipótesis; sin embargo, de acuerdo al *index* y Ti:Al se puede indicar que fue un periodo de transición favorable para la agricultura en Pomacochas.

Luego de la perturbación ocasionada por actividad humana, agricultura y ligada a esta la deforestación (Bush 2002; Akesson et al., 2020), en especial durante ~1003 – 499 BP, y de acuerdo con lo mencionado por McMichael (2020) se dió paso a la sucesión temprana (485 – 419 BP, 60 años aproximadamente) y sucesión media (~419 – 383 BP, 60 a 100 años después) en Pomacochas (figura 9.1). El legado

ecológico de los Chachapoyas incluye al *Alnus*, asociado al pre-bosque, especie pionera y por su porcentaje (>5%) puede reflejar su crecimiento local (Weng et al., 2004). Algunos autores atribuyen su presencia e incremento a la agroforestería practicada por los antiguos pobladores, lo que podría explicar el aumento ininterrumpido de este taxon desde ~565 BP (figura 8.9); sin embargo, el *index* señala un ambiente más húmedo en esta zona comparada con la anterior y de acuerdo con los requerimientos ecológicos de *Alnus*, puede colonizar áreas turbadas de altura (Weng et al., 2004) y también regenerarse naturalmente por el incremento en la humedad (Pretel, 1985).

X. CONCLUSIONES

- La palinoflora registrada en el segmento analizado del testigo PO6, muestra taxones asociados a zonas pantanosas, pastos y cultivos, arbustos y herbazales, pre-bosque y bosque. Las abundancias relativas del bosque, arbustos y herbazales indican que no hubo cambios sustanciales en estos tipos de cobertura. La zona palinológica A (~1003 - 753 BP), muestra características similares con la cobertura vegetal actual de Pomacochas; mientras que la zona C (~531 - 383 BP) difiere de la actual. La zona B (~724 - 547 BP) es una transición entre las zonas palinológicas A y C.
- El recambio entre taxones asociados a pastizales (Poaceae) y a pre-bosque (*Alnus*, *Alchornea*, *Celtis*) sugiere una tendencia hacia un clima húmedo en Pomacochas y un control de la erosión de la cuenca. Asimismo, el nivel base del lago ha variado, alejándose de la orilla hacia ~383 BP, esto inferido a través de la disminución de los taxones asociados a la zona pantanosa (ciperáceas y *Thalictrum*). El análisis de XRF indica tres períodos en los cuales el ingreso de aporte terrígeno modifica la zona pantanosa, en especial a las ciperáceas. Entre ~1003 – 800 BP, cinturón de ciperáceas poco desarrollado y el testigo PO6 cercano a la orilla; ~800 – 600 BP, cinturón de ciperáceas desarrollado favorecido por la acumulación de sedimentos, el testigo PO6 algo alejado de la orilla; y, ~600 – 383 BP, cinturón de ciperáceas y orilla alejada del testigo PO6.
- Los periodos en los cuales el nivel del lago Pomacochas cambió, difieren en aproximadamente 60 años con las zonas palinológicas, por lo que supone una

respuesta de la vegetación posterior a eventos que incrementan el aporte terrígeno.

- El *index* y Ti:Al sugieren que la humedad en Pomacochas ha variado desde ~1003 hacia 383 BP, de un ambiente seco con poca precipitación intensa (~1003 – 850 BP), a un ambiente seco a húmedo con lluvias intensas y variables (~800 – 450 BP), finalmente a un ambiente húmedo (~600 – 383 BP) pero con interferencia en el registro de lluvias intensas debido a que el nivel de lago al incrementarse pudo influir en el desplazamiento de la zona de sedimentación. Además, tanto el *index* como Ti:Al se encuentran relacionados con otros registros isotópicos de los Andes orientales peruanos, sugiriendo que los sedimentos de PO6 guardan información de los cambios en la actividad monzónica durante el periodo de estudio.
- El cultivo de maíz se desarrolló en los alrededores del lago Pomacochas entre la ~1003 – 499 BP, con intervalos de ausencia del polen de este taxon, entre ~940 – 878 BP, ~603 BP y entre ~565 – 515 BP, llevándose a cabo mayormente durante periodos secos y cálidos a nivel regional además de precipitaciones intensas en la cuenca. Sin embargo, no se puede establecer si hubo o no un incremento en el cultivo de maíz debido a la baja abundancia relativa de este taxón, menos del 1.5 %.
- El legado ecológico de los Chachapoyas incluye al *Alnus*, taxon asociado al pre-bosque y especie pionera, pero no podemos discernir si su presencia estuvo ligada a la agroforestería o si regeneró naturalmente ya que sus requerimientos ecológicos lo permiten.

- Durante el período que incluye parte de la ACM, Pomacochas estuvo caracterizada por un ambiente seco con solo un evento de lluvias intensas, flora heterogénea, presencia de pastizales y un nivel de lago más bajo; mientras que, durante la primera mitad de la PEH, el ambiente fue húmedo, flora más homogénea, con predominancia de bosques, y un nivel del lago más elevado que durante la ACM.

XI. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis palinológico de los sedimentos actuales del lago Pomacochas, para comparar a nivel palinológico los resultados obtenidos en el presente trabajo.

- Analizar otros testigos ubicados en diferentes partes del lago para tener más datos acerca de la flora en la cuenca ya que la producción y tamaño del polen varía entre las plantas, lo que influye en su recuperación de sedimentos.

- Realizar un análisis del contenido de carbón o *charcoal* en PO6, para determinar los mecanismos que utilizaron los Chachapoyas, tala o incendios focalizados, para aclarar áreas con fines agrícolas.

XII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Åkesson, C.M., Matthews-Bird, F., Bitting, M. (2020). 2,100 years of human adaptation to climate change in the High Andes. *Nat Ecol Evol* 4, 66–74.
- Ampuero, A., Stríkis, N. M., Apaéstegui, J., Vuille, M., Novello, V.F., Espinoza, J. C., et al. (2020). The forest effects on the isotopic composition of rainfall in the northwestern Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD031445. <https://doi.org/10.1029/2019JD031445>
- Apaéstegui, J., Cruz, F.W., Sifeddine, A., Vuille, M., Espinoza, J.C., Guyot, J.L., Khodri, M., Strikis, N., Santos, R.V., Cheng, H., Edwards, L., Carvalho, E., Santini, W. (2014) Hydroclimate variability of the northwestern Amazon Basin near the Andean foothills of Peru related to the South American Monsoon System during the last 1600 years. *Clim. Past*, 10, 1967–1981
Online_Resource: <https://www.ncdc.noaa.gov/paleo/study/19301>
- Apaéstegui, J., Cruz, F. W., Vuille, M., Fohlmeister, J., Espinoza, J. C., Sifeddine, A., ... & Edwards, R. L. (2018). Precipitation changes over the eastern Bolivian Andes inferred from speleothem ($\delta^{18}\text{O}$) records for the last 1400 years. *Earth and Planetary Science Letters*, 494, 124-134.
- Baker, P.A. y Fritz, S.C. (2015). Nature and causes of Quaternary climate variation of tropical South America. *Quaternary Science Reviews*, 124: 31-47.
- Behre, K.E. (1981). The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen et Spores*, 23(April), 225–245.
- Bennett K.D., Willis K.J. (2002) Pollen. In: Smol J.P., Birks H.J.B., Last W.M., Bradley R.S., Alverson K. (eds) *Tracking Environmental Change*

- Using Lake Sediments*. Developments in Paleoenvironmental Research, vol 3. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1_2
- Bertrand, A., Lengaigne, M., Takahashi, K., Avadi, A., Poulain, F., y Harrod, C. (2020). *El Niño Southern Oscillation (ENSO) effects on fisheries and aquaculture* (Vol. 660). Food & Agriculture Org.
- Blaauw, M. (2010). Methods and code for *classical* age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology*, 5 (5):512-518.
- Bird, B. W., Abbott, M. B., Vuille, M., Rodbell, D. T., Stansell, N. D., & Rosenmeier, M. F. (2011). A 2,300-year-long annually resolved record of the South American summer monsoon from the Peruvian Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(21), 8583–8588. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003719108>
- Boës, X., Rydberg, J., Martinez-Cortizas, A., Bindler, R., & Renberg, I. (2011). Evaluation of conservative lithogenic elements (Ti, Zr, Al, and Rb) to study anthropogenic element enrichments in lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, 46(1), 75–87. doi:10.1007/s10933-011-9515-z
- Brack, A. 1999. Diccionario enciclopédico de las plantas útiles del Perú. 550 pp. Cusco. Centro Bartolomé de las Casas.
- Bremond, L., Muller, S., Rouland, S y Favier, C. (2018). ISEM reference palynological database. OSU OREME. (Collection). DOI: 10.15148/bca4022a-4db1-48ec-a212-8bd28c4cb2df
- Bulalacao, L. J. (2003). Pollen of Southeast Asian Alchornea (Euphorbiaceae), with an overview of the pollen fossil record. *Blumea-Biodiversity, Evolution and Biogeography of Plants*, 48(3), 515-522.

- Burn, M. J., y Mayle, F. E. (2008). Palynological differentiation between genera of the Moraceae family and implications for Amazonian palaeoecology. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 149(3-4), 187-201.
- Bush, M.B., Piperno, D.R., Colinvaux, P.A., (1989). A 6000-year history of Amazonian maize cultivation. *Nature*, 340: 303-305.
- Bush, M. B. (2002). On the interpretation of fossil Poaceae pollen in the lowland humid neotropics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 177: 5-17
- Bush, M. B., Hansen, B. C. S., Rodbell, D. T., Seltzer, G. O., Young, K. R., Le N, B., ... Gosling, W. D. (2005). A 17 000-year history of Andean climate and vegetation change from Laguna de Chochos, Peru. *J. Quaternary Sci*, 20(20), 7–8. <https://doi.org/10.1002/jqs.983>
- Bush, M.B. and Weng, M.B. 2006. Introducing a new (freeware) tool for palynology. *Journal of Biogeography*, 34: 377-380
- Bush, M. B., Listopad, M.C.S., Silman, M.R. (2007). A regional study of Holocene climate change and human occupation in Peruvian Amazonia. *Journal of Biogeography*, 34(8), 1342–1356. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01704.x>
- Bush, M.B., Mosblech, N.A.S. y Church, W. (2015). Climate change and the agricultural history of a mid-elevation Andean montane forest. *The Holocene*, 25(9): 1522-1532.
- Bush, M. B., Correa-Metrio, A., McMichael, C. H., Sully, S., Shadik, C. R., Valencia, B. G., ... & Overpeck, J. T. (2016). A 6900-year history of landscape modification by humans in lowland Amazonia. *Quaternary Science*

Reviews, 141, 52-64.

- Bush, M. B., Correa-Metrio, A., van Woesik, R., Shadik, C. R., & McMichael, C. N. H. (2017). Human disturbance amplifies Amazonian El Niño–Southern Oscillation signal. *Global Change Biology, 23*(8), 3181–3192. <https://doi.org/10.1111/gcb.13608>
- Bush, M. B., Nascimento, M. N., Åkesson, C. M., Cárdenes-Sandí, G. M., Maezumi, S. Y., Behling, H., Correa-Metrio, A., Church, W., Hulsman, S. N., Kelly, T., Mayle, F. E. y McMichael, C. N. H. (2021). Widespread reforestation before European influence on Amazonia. *Science, 372*(6541). <https://doi.org/10.1126/science.abf3870>
- Bustamante, M. G., Cruz, F. W., Vuille, M., Apaéstegui, J., Strikis, N., Panizo, G., Novello, F.V., Deninger, M., Sifeddine, A., Cheng, H., Moquet, J. S., Guyot, J. L., Santos, R.V., Segura, H. y Edwards, R.L. (2016). Holocene changes in monsoon precipitation in the Andes of NE Peru based on $\delta 18 O$ speleothem records. *Quaternary Science Reviews, 146*, 274-287.
- Castillo, E. B., Quintana, J. L. M., Mestanza, C. N. V., Silupú, J. C., y Oliva, M. (2018). Análisis morfométrico y batimétrico del lago Pomacochas (Perú). *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable, 2*(2), 90-97.
- Chepstow-Lusty, A., Frogley, M. R., Bauer, B. S., Bush, M. B., & Herrera, A. T. (2003). A late Holocene record of arid events from the Cuzco region, Peru. *Journal of Quaternary Science: Published for the Quaternary Research Association, 18*(6): 491-502.

- Chiessi, C. M., Mulitza, S., Pätzold, J., Wefer, G., y Marengo, J. A. (2009). Possible impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the South American summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, 36(21).
- Church, W. y Guengerich, A. (2018). La (re)construcción de Chachapoyas a través de la historia e histografía. *Boletín De Arqueología PUCP*, (23), 5-38. <https://doi.org/10.18800/boletindearqueologiapucp.201702.000>
- Cirujano, S. C., Meco, A. y García, P. G., & Molina, A. M. (2014). *Flora acuática española: hidrófitos vasculares*. Madrid, España: Real Jardín Botánico, CSIC.
- Correa-Metrio, A., Cabrera, K. R., y Bush, M. B. (2010). Quantifying ecological change through discriminant analysis: a paleoecological example from the Peruvian Amazon. *Journal of Vegetation Science*, 21(4), 695-704.
- Correa, N., Rojo, J., y Carvajal, L. (2016). Caracterización de la variación espacial y temporal de la ZCIT sobre suramérica. In Mem. XXVII Congreso Latinoamericana de Hidráulica. Lima.
- Cruz, R. Y. A., Rojas, A. M. C., Ortega, C. E. P., y Herbozo, V. R. G. (2010). Evaluación de las principales características hidrográficas y físico químicas relacionadas a la calidad del medio marino mediante Escalamiento Multidimensional. *Pesquimat*, 13(2), 86-94.
- Cruz-Barros, M. A. V. D., Corrêa, A. M. D. S., Gasparino, E. C., & Paes, V. B. (2007). Flora Polínica da Reserva do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (São Paulo, Brasil): Família: 90-Melastomataceae. *Hoehnea*, 34, 531-552.
- Davies S., Lamb H., Roberts S. (2015) Micro-XRF Core Scanning in Palaeolimnology: Recent Developments. In: Croudace I., Rothwell R.

(eds) *Micro-XRF Studies of Sediment Cores. Developments in Paleoenvironmental Research*, vol 17. Springer, Dordrecht.
https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5_7

de Freitas, A. G., de Araujo Carvalho, M., de Toledo, M. B., Mendonça, C. B. F., & Gonçalves-Esteves, V. (2015). Bryophyte and pteridophyte spores and other palynomorphs in quaternary marine sediments from Campos Basin, southeastern Brazil: Core BU-91-GL-051. *Acta Botanica Brasilica*, 29(2), 161-174.

da Silva-Fourny, A., Hollunder, R., Garbin, M., Carrijo, T., Mendoza, C y Gonzales-Esteves, V. (2020). Pollen morphology applied to species delimitation of *Myrsine* (Myrsinoideae-Primulaceae). *Plant Syst Evol* 306, 21. <https://doi.org/10.1007/s00606-020-01654-y>

Dean, G. 1998. Finding a Needle in Palynological Haystack: a Comparison of Methods. *New Developments in Palynomorph Sampling, Extraction and Analysis*, edited by V. Bryant and J. Wrenn. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation. 53-59 p.

Díaz Palacios, J., Arana Cardó, M., Torres Guevara, J., & Patrucco Núñez-Carvalho, S. (2016). *Historia ambiental del Perú. Siglos XVIII y XIX*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente. Lima.

Dunlea, A. G., Murray, R. W., Tada, R., Alvarez-Zarikian, C. A., Anderson, C. H., Gilli, A., ... & Murayama, M. (2020). Intercomparison of XRF core scanning results from seven labs and approaches to practical calibration. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(9), e2020GC009248.

- Erdtman, G. 1960. The acetolysis method - a revised description. *Svensk Botanisk Tidskrift*. 54(4): 561-564.
- El-Ghazali, G., Tsuji, S. El-Ghazaly, G., y Nilsson, S. (1998). Combretaceae R. Br. *World Pollen and Spore Flora* 21: 1-40. ISSN 0346-4601.
- Espinoza, J. C., S. Chavez, J. Ronchail, C. Junquas, K. Takahashi, y Lavado, W. (2015), Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation, *Water Resour. Res.*, 51, 3459–3475, doi:10.1002/2014WR016273.
- Espinoza, J. C., Garreaud, R., Poveda, G., Arias, P. A., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M. y Scaff, L. (2020). Hydroclimate of the Andes Part I: Main Climatic Features. *Front. Earth Sci.* 8:64. doi:10.3389/feart.2020.00064
- Fernández, A. M., & Rodríguez, E. F. (2007). Etnobotánica del Perú Prehispánico, eds. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo-Perú, 164-167.
- Fitchett, J. M., & Bamford, M. K. (2017). The validity of the Asteraceae: Poaceae fossil pollen ratio in discrimination of the southern African summer-and winter-rainfall zones. *Quaternary Science Reviews*, 160, 85-95.
- Flores Bendezú, Y. (2014). Especies forestales nativas para la recuperación de áreas degradadas en la Región Ucayali. Pucallpa, Peru: Davidson.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2, 150066 (2015). <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gálvez M., J.R., Ordoñez G., O.R & Bussmann. R. W. (2003). Estructura del bosque montano perturbado y no-perturbado en el Sur de Ecuador. *Lyonia* 3(1):83-98.

- Garreud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R. y Marengo, J. (2008). Present-day South American climate, *Palaeogeography, Palaeoclimatology*. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.10.032
- Gastony, G. J., y Tryon, R. M. (1976). Spore morphology in the Cyatheaceae. II. The genera *Lophosoria*, *Metaxya*, *Sphaeropteris*, *Alsophila*, and *Nephelea*. *American Journal of Botany*, 63(6), 738-758.
- Gentry, A. H. (1993). A field guide to the families and genera of woody plants of northwest South America (Colombia, Ecuador, Peru): with supplementary notes on herbaceous taxa. Washington, D.C., USA: Conservation International.
- Giudice, G. E., Morbelli, M. A., Piñeiro, M. R., Copello, M., y Erra, G. (2004). Spore morphology of the Polypodiaceae from Northwestern Argentina. *American Fern Journal*, 94(1), 9-27.
- Gloor, M. R. J. W., Brienen, R. J., Galbraith, D., Feldpausch, T. R., Schöngart, J., Guyot, J. L., ... & Phillips, O. L. (2013). Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophysical Research Letters*, 40(9), 1729-1733.
- Gosling, W. D., Miller, C. S., y Livingstone, D. A. (2013). Atlas of the tropical West African pollen flora. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 199, 1-135.
- Grimm, E. C. (1987). CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & geosciences*, 13(1), 13-35.

- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9pp.
http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Haselhorst, D. S., Moreno, J. E., y Punyasena, S. W. (2013). Variability within the 10-year pollen rain of a seasonal neotropical forest and its implications for paleoenvironmental and phenological research. *PLoS One*, 8(1), e53485.
- Haug, G. H., Hughen, K. A., Sigman, D. M., Peterson, L. C., & Röhl, U. (2001). Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. *Science*, 293(5533), 1304-1308.
- Haas, J., Creame, W., Huamán, L., Goldstein, D., Reinhard, K y Vergel, C. (2013). Evidence for maize (*Zea mays*) in the Late Archaic (3000–1800 BC) in the Norte Chico region of Peru. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110 (13): 4945-4949. <https://doi.org/10.1073/pnas.121942511>
- Herrera, L. y Urrego, L. 1996. Atlas de Polen de Plantas útiles y cultivadas de la Amazonía Colombiana. Estudio de la Amazonía Colombiana. Tomo XI. Fundación Erigaie. Ed. Tropenbos. Colombia. 462p.
- Hofmann, F., Otto, M. & Wosniok, W. (2014). Maize pollen deposition in relation to distance from the nearest pollen source under common cultivation - results of 10 years of monitoring (2001 to 2010). *Environmental Sciences Europe*, 26:24
- Juggins, S. 2007. C2 Version 1.5 User guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation. Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK. 73pp.

- Juggins, S. (2017). Rioja: Analysis of Quaternary Science Data, R package version 0.9-21. (<http://cran.r-project.org/package=rioja>).
- Kanner, L., Burns, S. J., Cheng, H., Edwards, R. L & Vuille, M. (2013). High-resolution variability of the South American summer monsoon over the last seven millennia: insights from a speleothem record from the central Peruvian Andes. *Quaternary Science Reviews*, 75:1-100. Online_Resource: http://hurricane.ncdc.noaa.gov/pls/paleox/f?p=519:1:::P1_STUDY_ID:16405
- Kassambara, A., & Mundt, F. (2017). Factoextra. R package version 1.0.7. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
- Klimaszewski-Patterson, A. (20 de julio de 2022). Palyoplot tutorial: index plot. *Geotechnography. Developing modern tools for landscape science.* <http://www.geotechnography.com/palyoplot/palyoplot-tutorial-index-plot/>
- Lane, C. S., Cummings, K. E. & Clark, J. J. (2010). Maize pollen deposition in modern lake sediments: A case study from Northeastern Wisconsin. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 159, 177–187
- Leal, A., Berrío, J. C., Raimúndez, E., & Bilbao, B. (2011). A pollen atlas of premontane woody and herbaceous communities from the upland savannas of Guayana, Venezuela. *Palynology*, 35(2), 226-266.
- Ledru, M. P., Jomelli, V., Samaniego, P., Vuille, M., Hidalgo, S., Herrera, M., & Ceron, C. (2013). The Medieval climate anomaly and the Little Ice Age in the eastern Ecuadorian Andes.

- Leopold, E. B., Birkebak, J., Reinink-Smith, L., Jayachandar, A. P., Narváez, P. y Zaborac-Reed, S. (2012) Pollen morphology of the three subgenera of *Alnus*. *Palynology*, 36 (1), 131-151. DOI: 10.1080/01916122.2012.657876
- Liu, K. B., Reese, C. A., & Thompson, L. G. (2005). Ice-core pollen record of climatic changes in the central Andes during the last 400 yr. *Quaternary Research*, 64(2), 272-278.
- Ljungqvist, F.C. (2010). A new reconstruction of temperature variability in the extra-tropical Northern Hemisphere during the last two millennia. *Geogr. Ann.*, 92 A (3): 339–351.
- Mann, M.E., Z. Zhang, S. Rutherford, R. Bradley, M.K. Hughes, D. Shindell, C. Ammann, G. Faluvegi, and F. Ni, 2009: Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 326, 1256-1260. DOI:10.1126/science.1177303.
- Marengo, J. A., Liebmann, B., Grimm, A. M., Misra, V., Silva Dias, P. L., Cavalcanti, I. F. A., ... & Saulo, A. C. (2012). Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, 32(1), 1-21.
- Marengo, J. A. y Espinoza, J.C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.* 36:1033-1050. DOI: 10.1002/joc.4420
- Martinez, C., Madrinan, S., Zavada, M., & Alberto Jaramillo, C. (2013). Tracing the fossil pollen record of *Hedyosmum* (Chloranthaceae), an old lineage with recent Neotropical diversification. *Grana*, 52(3), 161-180.

- Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, A., González Rouco, J. F., Jansen, E., Lambeck, K., Luterbacher, J., Naish, T., Osborn, T., Otto-Bliesner, B., Quinn, T., Ramesh, R., Rojas, M., Shao, X. y Timmermann, A. (2013). Information from Paleoclimate Archives. En: T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P. M. Midgley (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- McPhaden, M. J. (2002). El Niño and La Niña: causes and global consequences. *Encyclopedia of global environmental change*, 1, 353-370.
- McMichael, C. N. (2020). Ecological legacies of past human activities in Amazonian forests. *New Phytologist*.
- Melo, A. B. C., Cavalcanti, I. F. de A, Souza, P. P. (2009). Zona de Convergencia Intertropical do Atlántico. In: I. F. de A. Cavalcanti, N. J. Ferreira, M. G. A. J. da Silva, M. A. F. da Silva Dias, (Eds.). *Tempo e Clima no Brasil*. Oficina de Textos, pp. 25-41.
- Mercuri, A. M., Torri, P., Fornaciari, R., & Florenzano, A. (2016). Plant responses to climate change: the case study of Betulaceae and Poaceae pollen seasons (Northern Italy, Vignola, Emilia-Romagna). *Plants*, 5(4), 42.
- Metcalf, S. E., Jones, M. D., Davies, S. J., Noren, A., & MacKenzie, A. (2010). Climate variability over the last two millennia in the North American Monsoon region, recorded in laminated lake sediments from Laguna de

- Juanacatlán, Mexico. *The Holocene*, 20(8), 1195–1206.
doi:10.1177/0959683610371994
- Moar, N., y Wilmshurst, J. (2003). A key to the pollen of New Zealand Cyperaceae, *New Zealand Journal of Botany*, 41:2, 325-334, DOI:10.1080/0028825X.2003.9512852
- Molina, R. D., Salazar, J. F., Martínez, J. A., Villegas, J. C., & Arias, P. A. (2019). Forest-induced exponential growth of precipitation along climatological wind streamlines over the Amazon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 2589–2599.
<https://doi.org/10.1029/2018JD029534>
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation*. 3rd ed. Malden, USA: Blackwell Science.
- Moreno, C. E. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. M&T-Manuales y Tesis SEA, vol. 1. Zaragoza.
- Nagels, A., Muasya, A. M., Huysmans, S., Vrijdaghs, A., Smets, E., y Vinckier, S. (2009). Palynological diversity and major evolutionary trends in Cyperaceae. *Plant Systematics and Evolution*, 277, 117-142.
- Mosblech, N.A.S., Chepstow-Lusty, A., Valencia, B.G., Bush, M.B., 2012. Anthropogenic control of late-Holocene landscapes in the Cuzco region. Peru. *Holocene* 22:1361-1372.
- Oliva, M.; Collazos, R.; Vásquez, H.; Rubio, K.; Maicelo, J. 2019. Composición florística de especies herbáceas forrajeras en praderas naturales de las principales microcuencas ganaderas de la región Amazonas. *Scientia Agropecuaria* 10(1): 109-117.

- Pełechaty, M., Pukacz, A., Apolinarska, K., Pełechata, A., & Siepak, M. (2013). The significance of Chara vegetation in the precipitation of lacustrine calcium carbonate. *Sedimentology*, 60(4), 1017-1035.
- Pretell, J., Ocaña, D., Jon, R., & Barahona, E. (1985). *Apuntes sobre algunas especies forestales nativas de la sierra peruana*. Lima, Perú: Instituto Nacional Forestal y de Fauna.
- Poveda, G., y Mesa, Ó. J. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Tecnología y ciencias del agua*, 11(1), 21-37.
- Punt, W. (1962). Pollen morphology of the euphorbiaceae with special reference to taxonomy. *Wentia*, 7(1), 1–116.
- Punt, W., y Eetgerink, E. (1982) On the pollen morphology of some genera of the tribe moreae (moraceae), *Grana*, 21:1, 15-19, DOI: 10.1080/00173138209427675
- Punt, W., Marks, A., y Hoen, P. P. (2003). Myricaceae. Review of Palaeobotany and *Palynology*, 123(1-2), 99-105.
- Punt, W., & Malotaux, M. (2007). Cannabaceae, moraceae and urticaceae. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 42(1-4), 23-44.
- Punt, W., y Hoen, P. P. (2009). The Northwest European Pollen Flora, 70: Asteraceae—Asteroideae. *Review of Palaeobotany and Palynology* 157 (1-2): 22-183.
- Raynor, G.S., Ogden, E.C. & Hayes, K.V. (1972). Dispersion and deposition of corn pollen from experimental sources. *Agronomy Journal*, 64, 420–427.

- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Raine, J.I., Li, X. y Newstrom-Lloyd L. (2022). *New Zealand bee pollen catalogue*.
<https://keys.landcareresearch.co.nz/nzbeepollen/key/nzbeepollen/media/html/2.htm>
- Rasoloarijao, T., Ramavovololona, P., Ramamonjisoa, R., Clemencet, J., Lebreton, G. y Delatte, H. (2019). Pollen morphology of melliferous plants for *Apis mellifera unicolor* in the tropical rainforest of Ranomafana National Park, Madagascar, *Palynology*, 43:2, 292- 320.
DOI: [10.1080/01916122.2018.1443980](https://doi.org/10.1080/01916122.2018.1443980)
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hafliðason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Turney, C.S.M. & Van der Plicht, J. (2013). IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0-50000 years calBP. *Radiocarbon* 55(4): 1869-1887.
- Reuter, J., Stott, L., Khider, D., Sinha, A., Cheng, H., & Edwards, R. L. (2009). A new perspective on the hydroclimate variability in northern South America during the Little Ice Age. *Geophysical Research Letters*, 36(21).
- Rothwell R. & Croudace I. (2015). Twenty Years of XRF Core Scanning Marine Sediments: What Do Geochemical Proxies Tell Us? En: Croudace

- I., Rothwell R. (eds) *Micro-XRF Studies of Sediment Cores. Developments in Paleoenvironmental Research, vol 17.* (pp25-97). Dordrecht: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5_2
- Roubik, D. W & Moreno, J. E. 1991. Pollen and Spores of Barro Colorado Island. Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden 36. 268p.
- Russo, R. O. (1990). Evaluating *Alnus acuminata* as a component in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 10(3), 241-252.
- Salas, R., Castillo, E. B., & Oliva, M. (2016). Dinámica multitemporal de índices de deforestación en el distrito de Florida, departamento de Amazonas, Perú. *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable*, 2(1), 18-27.
- Schiferl, J. D., Bush, M. B., Silman, M. R., & Urrego, D. H. (2017). Vegetation responses to late Holocene climate changes in an Andean Forest. *Quaternary Research*, 89(1), 1-15.
- Sorsa, P., Huttunen, P. 1975. On the pollen morphology of the Urticaceae. *Ann. Bot. Fenn.* 12: 165-182
- Stafford, P. J. (1995). Ulmaceae. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 88(1-4), 25-46.
- Tatlidil, S., Bicakci, A., Malyer, H. y Baser, K. (2005). Pollen morphology of *Thalictrum* L., species (Ranunculaceae) in Turkey. *Pakistan Journal of Botany*, 37(2), 203.

- Takahashi, K., y Battisti, D. S. (2007). Processes controlling the mean tropical Pacific precipitation pattern. Part I: The Andes and the eastern Pacific ITCZ. *Journal of Climate*, 20(14), 3434-3451.
- Takahashi, K., y Martínez, A. G. (2019). The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. *Climate Dynamics*, 52(12), 7389-7415.
- Taylor, Z. P., Horn, S. P. & Filkelstein, D. B. (2012) Maize pollen concentrations in Neotropical lake sediments as an indicator of the scale of prehistoric agriculture. *The Holocene*, 23(1), 78-84.
- Tejedor Garavito, N., Álvarez, E., Arango Caro, S., Araujo Murakami, A., Blundo, C., Boza Espinosa, T. E., La Torre Cuadros, M. A., Gaviria, J., Gutiérrez, N., Jørgensen, P. M., León, B., López Camacho, R., Malizia, L., Millán, B., Moraes, M. Pacheco, S., Rey Benayas, J. M., Reynel, C., Timaná de la Flor, M., Ulloa Ulloa, C., Vacas Cruz, O., Newton, A. C. (2012). Evaluación del estado de conservación de los bosques montanos en los Andes tropicales. *Ecosistemas* 21(1-2):148-166.
- The Plant List. 2013. Version 1.1. Published en Internet; <http://www.theplantlist.org/>
- Todzia, C. A. (1988). Chloranthaceae: Hedyosmum. *Flora Neotropica*, 1-138.
- Tryon, R. M. (1989). Pteridophyta of Peru. Part I. 1. Ophioglossaceae-12. Cyatheaceae. *Fieldiana Bot NS*, 20, 111-138.
- Tryon, A., y Lugardon, B. (2012). *Spores of the Pteridophyta: surface, wall structure, and diversity based on electron microscope studies*. Springer Science & Business Media.

- Trinidad, H., Cano, A., & León, B. (2011). *Thalictrum peruvianum* (Ranunculaceae), una especie nueva de Lima, Perú. *Revista peruana de biología*, 18(3), 271-274.
- Traverse, A. 1988. Paleopalynology. Unwin/Hyman Ltd., U.K., 600p.
- Ugent, D. & C. M. Ochoa. 2006. La Etnobotánica del Perú: Desde la prehistoria al presente. Primera edición. CONCYTEC. Perú. 379 pp.
- Valencia, B.G., Urrego, D.H., Silman, M.R. & Bush, M.B. (2010). From ice age to modern: a record of landscape change in an Andean cloud forest. *J. Biogeogr.* 37:1637-1647.
- Van Breukelen, M. R., Vonhof, H. B., Hellstrom, J. C., Wester, W. C. G., & Kroon, D. (2008). Fossil dripwater in stalagmites reveals Holocene temperature and rainfall variation in Amazonia. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(1-2), 54-60.
- Vargas, W. (2012). Los bosques secos del Valle del Cauca, Colombia: una aproximación a su flora actual. *Biota Colombiana*, 13(2).
- Vasquez, H., Maicelo, J. L., Collazos, R. y Oliva, M. (2016). Selección, identificación y distribución de malezas (adventicias), en praderas naturales de las principales microcuencas ganaderas de la región Amazonas. *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable*, 2(1), 71-79.
- Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, C., Nogues-Paegle, J., Silva Dias, P y Znahg, C. (2006). Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. *J. Climate*, 19, 4977–5000,

- Vuille, M., Burns, S.J., Taylor, B.L., Cruz, F.W., Bird, B.W., Abbott, M.B., Kanner, L.C., Cheng, H. y Novello, V.F. (2012) A review of the South American monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia. *Clim. Past*, 8: 1309–1321.
- Ward, B. M., Wong, C. I., Novello, V. F., McGee, D., Santos, R. V., Silva, L. C., Cruz, F. W., Wang, X., Edwards, R. L. y Cheng, H. (2019). Reconstruction of Holocene coupling between the South American Monsoon System and local moisture variability from speleothem $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ records. *Quaternary Science Reviews*, 210, 51-63.
- Walentowski, H.; Heinrichs, S.; Hohnwald, S.; Wiegand, A.; Heinen, H.; Thren, M.; Gamarra Torres, O.A.; Sabogal, A.B.; Zerbe, S. Vegetation Succession on Degraded Sites in the Pomacochas Basin (Amazonas, N Peru)—Ecological Options for Forest Restoration. *Sustainability* 2018, 10, 609.
- Wang, C., Deser, C., Yu, J. Y., DiNezio, P., y Clement, A. (2017). El Niño and southern oscillation (ENSO): a review. *Coral reefs of the eastern tropical Pacific: Persistence and loss in a dynamic environment*, 85-106.
- Weng, C., Bush, M. B. & Silman, M. R. (2004) An analysis of modern pollen rain on an elevational gradient in southern Peru. *Journal of Tropical Ecology* (2004) 20:113–124.
- Weng, C., Bush, M. B., Curtis, J. H., Kolata, A. L., Dillehay, T. D., & Binford, M. W. (2006). Deglaciation and Holocene climate change in the western Peruvian Andes. *Quaternary Research*, 66(1), 87-96.
- Young, K. R., & Leon, B. (2000). Biodiversity conservation in Peru's eastern Montane forests. *Mountain Research and Development*, 20(3), 208-211.

- Young, B. E., Josse, C., Stern, M., Vasconez, S., Olander, J., Smyth, R., ... & Hak, J. (2015). Hotspot de biodiversidad de los Andes tropicales. *Resumen técnico del perfil del ecosistema*.
- Young, G. M., & Nesbitt, H. W. (1998). Processes controlling the distribution of Ti and Al in weathering profiles, siliciclastic sediments and sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 68(3), 448–455. doi:10.2110/jsr.68.448
- Wan, Z., Hook, S., Hulley, G. (2015). MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Accessed 2023-11-02 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.006>
- Zhou, J., y Lau, K. M. (1998). Does a monsoon climate exist over South America? *J. Climate*, 11: 1020–1040

Hábitos de los taxones que representan el 95% de la data palinológica analizada de los sedimentos del lago Pomacochas (Amazonas - Perú)

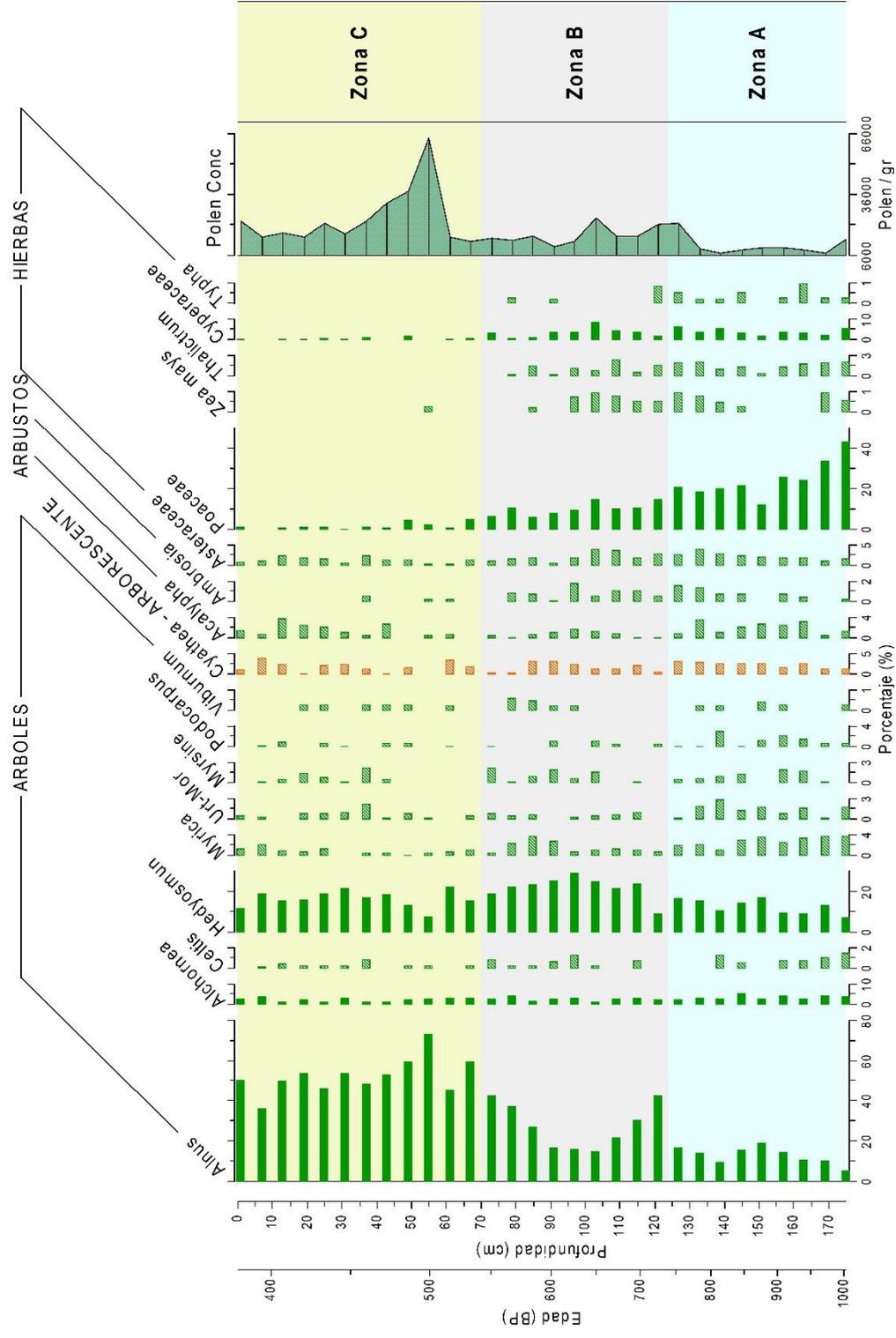
Taxones	Arboles	Arbustos	Hierbas	Identificación palinotaxonómica
<i>Acalypha</i>		X		Haselhorst et al. (2013), Bremond et al. (2018)
<i>Alchornea</i>	X			Bulalacao (2003). Bremond et al. (2018)
<i>Alnus</i>	X			Leopold et al. (2012), Haselhorst et al. (2013)
<i>Ambrosia</i>		X		Punt y Hoen (2009)
Asteraceae		X	X	Punt y Hoen (2009)
<i>Celtis</i>	X			Stafford (1995), Haselhorst et al. (2013)
Cyperaceae			X	Moar et al. (2003), Nagels et al. (2009)
Euphorbiaceae 4	X	X	X	Punt, W. (1962)
<i>Hedyosmun</i>	X			Martinez et al. (2013), Bremond et al. (2018)
Melast-Combret	X	X		El-Ghazali et al. (1998), Cruz-Barros et al. (2007)
Mor-Urt	X			Punt y Malotaux (1984), Burn y Mayle (2008)
<i>Myrica</i>	X			Punt et al. (2003), Bremond et al. (2018)
<i>Myrsine</i>	X			da Silva-Fourny et al. (2020)
Poaceae <30um			X	Herrera y Urrego (1996), Leal et al. (2011)
Poaceae 30- 50um			X	Herrera y Urrego (1996), Leal et al. (2011)
Poaceae 50< - <70um			X	Herrera y Urrego (1996), Leal et al. (2011)
<i>Podocarpus</i>	X			Gosling et al. (2013)
Rubiaceae	X	X	X	Rasoloarijao et al. (2018)
<i>Thalictrum</i>			X	Tatlidil et al. (2005), Bremond et al. (2018)
<i>Typha</i>			X	Gosling et al. (2013)
<i>Virburnum</i>	X			Bremond et al. (2018), Raine et al. (2022)
<i>Zea mays</i>			X	Haas et al. (2013)
Tricolporado 23				-----
<i>Cyathea</i>	X*			de Freitas et al. (2015)
<i>Cyathea 2</i>	X*			de Freitas et al. (2015)
Cyatheaceae	X*		X ⁺	Gastony y Tryon (1976)

Taxones	Arboles	Arbustos	Hierbas	Identificación palinotaxonómica
Polipodiales			X ⁺	Tryon y Lugardon (2012)
Polypodiaceae 1			X ⁺	Giudice et al. (2004)
Polypodiaceae 2			X ⁺	Giudice et al. (2004)
Monolete 9				-----
Monolete con perina				-----
Trilete liso 1				-----
Trilete per reticulado				-----
Trilete reticulado				-----

*arborescente; ⁺erecto, rizoma, rastrero

Nota: Hábitos determinados según Gentry (1993), Brack, (1999), Ugent y Ochoa (2016), Tryon (1989), Walentowski et al. (2018).

Agrupación por hábitos de los taxones identificados de la data palinológica analizada de los sedimentos del testigo PO6, en relación con la profundidad



Sumatoria de las abundancias relativas de los taxones asociados a las comunidades vegetales registradas en los sedimentos del lago Pomacochas (Amazonas - Perú)

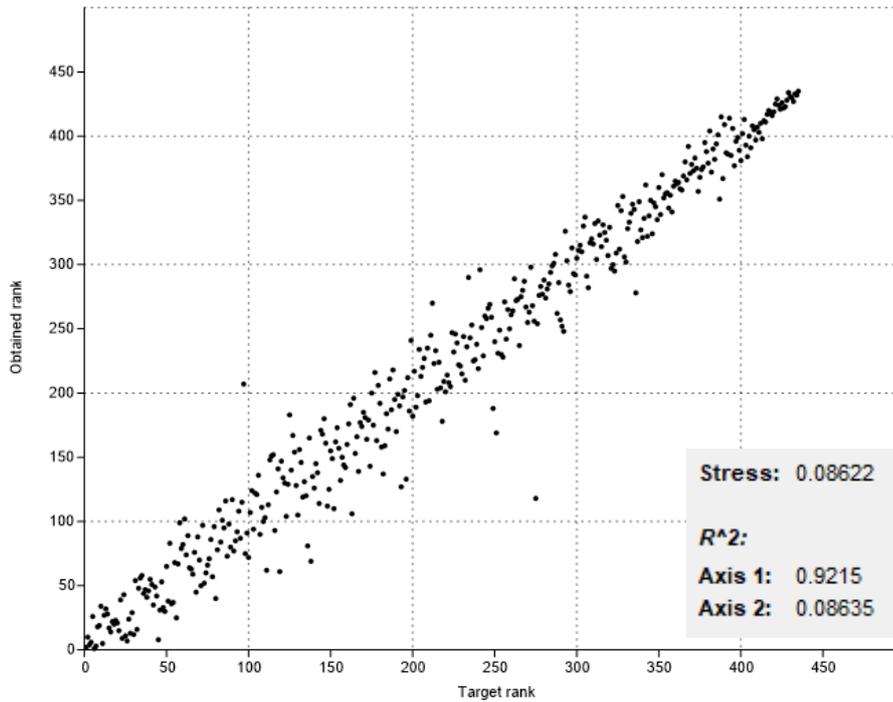
	Edad BP	Prof. (cm)	Pre – bosque (%)	Bosque (%)	Herbazal /Arbustos (%)	Pastos y cultivos (%)	Zona Pantanosa (%)
C	383	1	53.9	15.6	2.8	1.4	0.3
	395	7	41.2	27.2	2.0	0.0	0.2
	407	13	52.3	21.0	6.5	1.1	0.3
	419	19	57.0	20.1	4.9	1.5	0.6
	432	25	48.7	25.9	4.1	1.5	0.9
	444	31	57.6	26.5	2.0	0.3	0.3
	457	37	51.4	24.6	3.9	1.8	1.8
	471	43	55.5	22.1	4.5	1.2	0.0
	485	49	62.9	18.1	1.5	4.6	2.1
	499	55	77.2	9.1	1.6	2.8	0.0
	515	61	49.2	27.3	1.6	1.1	0.5
	531	67	63.5	20.0	1.6	5.1	1.3
	B	547	73	47.3	24.2	1.8	7.0
565		79	43.0	27.4	3.0	11.3	1.8
584		85	30.0	33.6	3.9	6.6	3.3
603		91	21.1	35.5	2.3	8.6	4.6
624		97	21.1	34.7	5.9	10.9	5.3
647		103	17.5	31.7	6.2	16.3	10.1
671		109	25.4	26.6	6.4	11.3	7.2
696		115	35.2	29.0	3.6	11.5	5.0
724		121	45.3	12.0	4.1	16.1	5.0
A	753	127	19.3	23.3	5.8	22.5	9.5
	784	133	17.9	24.5	9.4	19.7	6.6
	815	139	14.4	23.0	5.4	21.1	7.3
	847	145	22.2	24.3	5.9	22.2	5.6
	878	151	22.9	27.6	5.2	12.4	2.4
	909	157	20.5	19.9	5.6	26.1	6.2
	940	163	15.0	21.4	6.1	24.7	7.8
	972	169	16.8	21.0	1.8	35.6	5.1
1003	175	11.7	16.4	3.7	44.4	8.0	

Nota: Prof. = Profundidad. A, B y C son las zonas palinológicas. En celeste y rojo,

las profundidades asociadas a la PEH y ACM respectivamente.

Análisis de Escalamiento Multidimensional no Métrico (nMDS de sus siglas en inglés) del segmento analizado del testigo PO6: Shepard plot, valores de Axis 1 y

Axis 2



Prof_cm	Axis 1	Axis 2	Prof_cm	Axis 1	Axis 2
1 C	-0.1946	0.025897	91 B	0.07448	-0.13887
7 C	-0.13166	-0.083158	97 B	0.092909	-0.13129
13 C	-0.18042	0.020264	103 B	0.14183	-0.10644
19 C	-0.17754	0.031005	109 B	0.057722	-0.056127
25 C	-0.14215	-0.0024823	115 B	0.0083108	-0.049355
31 C	-0.178	-0.01006	121 B	-0.036279	0.08403
37 C	-0.14683	0.01434	127 A	0.16272	-0.040494
43 C	-0.18254	0.0048855	133 A	0.16763	-0.011931
49 C	-0.17095	0.069173	139 A	0.2476	-0.012877
55 C	-0.26325	0.098489	145 A	0.16722	0.01716
61 C	-0.14628	-0.04128	151 A	0.082743	0.063192
67 C	-0.16234	0.056676	157 A	0.21918	0.041656
73 B	-0.086438	-0.005453	163 A	0.24741	0.031883
79 B	-0.051026	-0.040043	169 A	0.23858	0.11368
85 B	-0.00077702	-0.077612	175 A	0.34274	0.13515

Análisis de Componentes Principales de elementos por XRF del segmento analizado del testigo PO6: Porcentaje de la varianza explicada y contribuciones de la PC1 y PC2

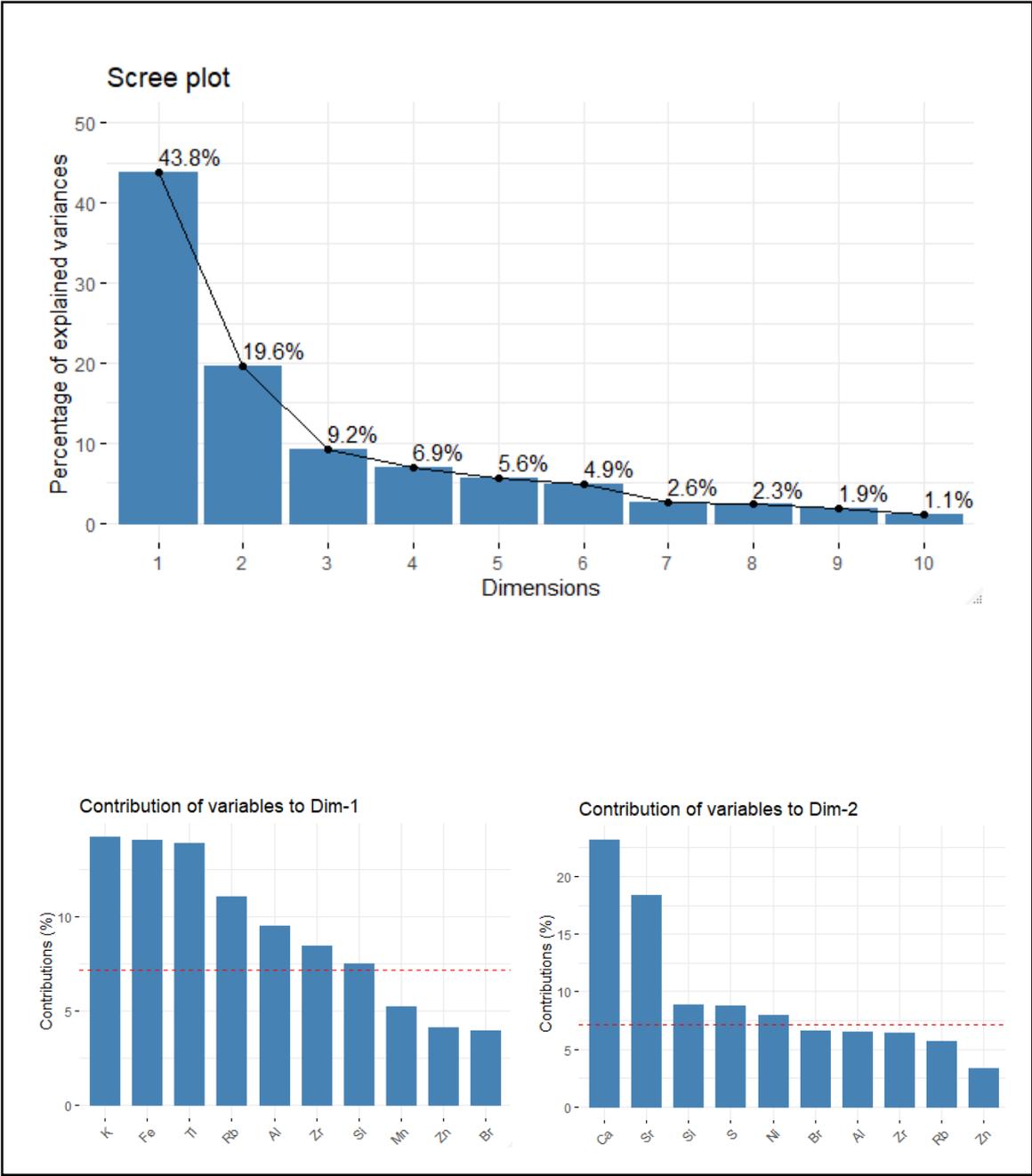
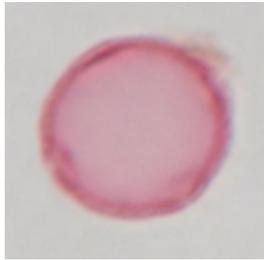
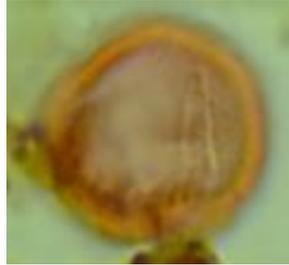


PLATE 1



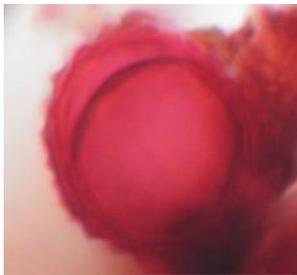
Acalypha



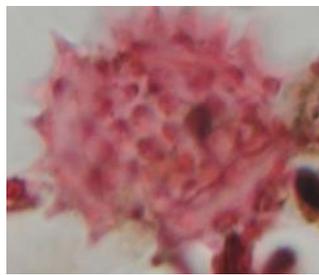
Alchornea



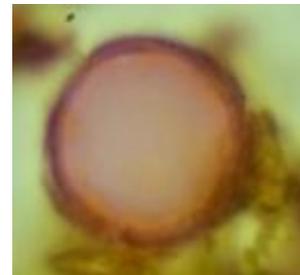
Alnus



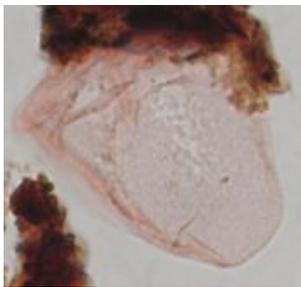
Ambrosia



Asteraceae



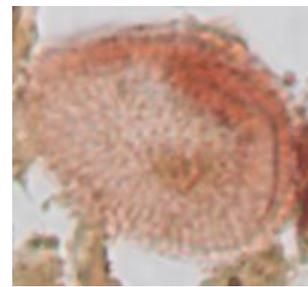
Celtis



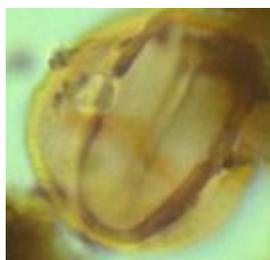
Cyperaceae



Euphorbiaceae 4



Hedyosmum



Melastomataceae / Combretaceae

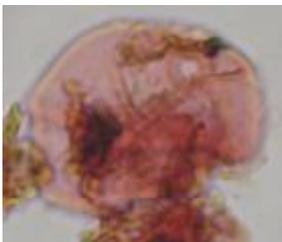
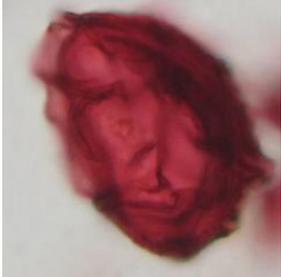


Moraceae / Urticaceae



Myrica

PLATE 2

		
<p><i>Myrsine</i></p>	<p>Poaceae</p>	<p><i>Podocarpus</i></p>
		
<p>Rubiaceae</p>	<p><i>Thalictrum</i></p>	<p><i>Typha</i></p>
		
<p><i>Virburnum</i></p>	<p><i>Zea mays</i></p>	<p><i>Cyathea</i></p>
		
<p>Cyatheaceae</p>	<p>Polypodiales</p>	<p>Polypodiaceae</p>