

Revisión de aplicaciones del análisis *wavelet* en parámetros magnéticos de sedimentos del Holoceno, sur de Argentina

Review of applied wavelet analysis in magnetic parameters of Holocene sediments, southern Argentina

Luigina Cappellotto^{1*}, María Julia Orgeira¹, Víctor Manuel Velasco Herrera²

¹ CONICET, Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

² Instituto de Geofísica, Observatorio de Radiación Solar, Universidad Nacional Autónoma de México.

* Autor para correspondencia: (L. Cappellotto) luigginacappellotto@gmail.com

Cómo citar este artículo:

Cappellotto, L., Orgeira, M.J., Velasco Herrera, V.M., 2024, Revisión de aplicaciones del análisis *wavelet* en parámetros magnéticos de sedimentos del Holoceno, sur de Argentina: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 76 (3), A260424. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2024v76n3a260424>

Manuscrito recibido: 20 de Octubre, 2023
Manuscrito corregido: 20 de Abril, 2024
Manuscrito aceptado: 26 de Abril, 2024

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

RESUMEN

El uso de herramientas de análisis matemático y estadístico en variables medidas en registros geológicos por métodos geofísicos, y relacionadas con diversos procesos naturales, es importante para analizar periodicidades a distintas escalas y valorar relaciones entre diversos forzantes. Así, el análisis de las variaciones del campo magnético terrestre (CMT) resulta de singular interés en el aporte de conocimiento sobre su comportamiento. En esta revisión, resumimos casos de estudio en los cuales estos análisis fueron aplicados a parámetros direccionales del CMT y propiedades magnéticas de los sedimentos en series de tiempo que comprenden el Holoceno. Las periodicidades encontradas reflejan forzantes que podrían estar interactuando con el CMT. Tal es el caso de las periodicidades relacionadas con un modo solar fundamental y las variaciones climáticas en el registro de parámetros direccionales del CMT. Este hecho permite sugerir, por una parte, que el CMT podría ser un forzante climático y, por la otra, que el mismo forzante externo al planeta afecta al CMT y al clima. Otro caso de estudio presentado muestra cómo las propiedades magnéticas, medidas en secuencias sedimentarias muestreadas con alta resolución, fueron de utilidad para la determinación indirecta de los cambios medioambientales, así como de las fluctuaciones energéticas de los agentes de transporte involucrados, en este caso, el viento.

Palabras clave: análisis matemático y estadístico, periodicidades, campo magnético terrestre, parámetros magnéticos.

ABSTRACT

The use of mathematical and statistical analysis tools in variables measured in geological records by geophysical methods and related to various natural processes, is important to analyze periodicities at different scales and assess relationships between different forcing agents. Thus, the analysis of the variations of the geomagnetic field (GF) is of particular interest in providing knowledge about its behavior. In this review, we summarize case studies in which these analyses were applied to directional parameters of the GF and magnetic properties of sediments in time series spanning the Holocene. The periodicities found reflect forcings that could be interacting with the GF. Such is the case of periodicities related to a fundamental solar mode and climatic variations in the GF directional parameter record. This fact suggests, on the one hand, that the GF could be a climatic forcing and, on the other hand, that the same external forcing to the planet affects the GF and the climate. Another case study presented shows how magnetic properties, measured in sedimentary sequences sampled at high resolution, were useful for the indirect determination of environmental changes, as well as of the energetic fluctuations of the transport agents involved, in this case, the wind.

Keywords: mathematical and statistical analysis, periodicities, geomagnetic field, magnetic parameters.

1. Introducción

Cualquier análisis espectral de potencia, tal como el análisis de onícula o *wavelet*, es una herramienta útil para analizar series de tiempo en distintos registros. Estos se utilizan especialmente para analizar cambios temporales, reconocer variaciones en el espectro de potencia a lo largo del tiempo y obtener periodicidades (frecuencias) en esas series.

El análisis de las variaciones del campo magnético terrestre (CMT) y sus cambios a lo largo del tiempo, es un campo de investigación de especial interés, con múltiples aplicaciones que ayudan a la comprensión de los procesos acaecidos durante la historia de la Tierra y la estimación de los posibles futuros escenarios del planeta.

Numerosos autores han determinado las posibles periodicidades en las variaciones del CMT en diferentes escalas temporales, ya sea en su inten-

sidad, dirección o polaridad. Asimismo, la relación entre las periodicidades del CMT con otras variables, tales como los parámetros orbitales, ha sido propuesta en numerosas contribuciones (*e.g.*, Channell *et al.*, 1998; Channell, 1999; Yamazaki, 1999; Yokoyama y Yamazaki, 2000; Yamazaki y Oda, 2002; Fuller, 2006, 2017; Saracco *et al.*, 2009, Orgeira *et al.*, 2022a, Cappellotto *et al.*, 2022), aunque también ha sido frecuentemente debatida por otros autores (*e.g.*, Heslop, 2007; Valet *et al.*, 2011).

Durante el Cenozoico, se ha propuesto un amplio espectro de frecuencias en el CMT, que van desde cambios rápidos hasta reversiones con frecuencias variables (Constable y Constable, 2004). Nilsson *et al.* (2011) analizaron la variación secular durante el Holoceno utilizando registros paleomagnéticos de sedimentos e identificaron una periodicidad de 1350 años en la inclinación del dipolo durante, prácticamente, todo el

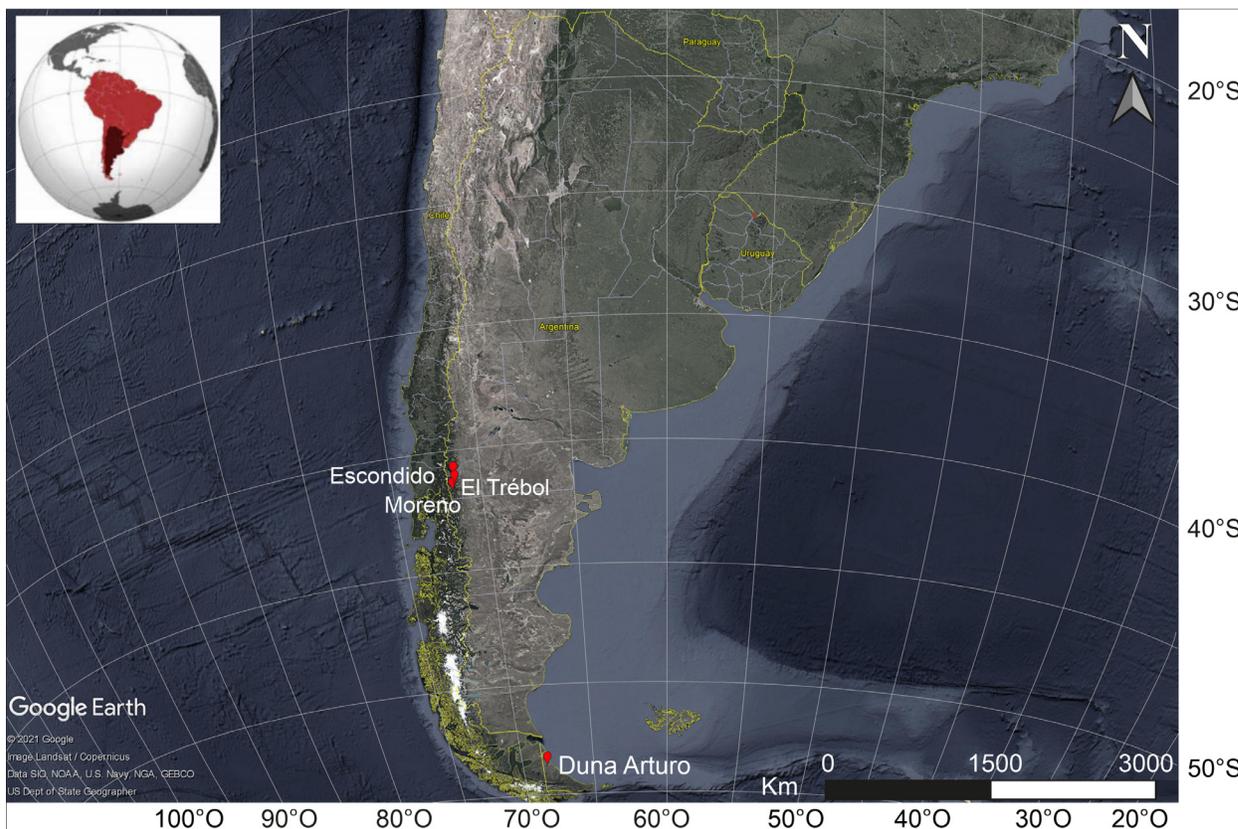


Figura 1 Mapa de ubicación de las zonas de estudio los Lagos Escondido, Moreno y El Trébol (Provincia de Río Negro) y la duna Arturo (Tierra del Fuego, Argentina).

Holoceno en registros de sedimentos de Estados Unidos, Finlandia, Japón, Australia y Argentina.

González-López *et al.* (2021) utilizaron la transformada de Fourier, la descomposición modal empírica y el análisis de *wavelet* aplicados a reconstrucciones del CMT y hallaron una variabilidad periódica de su energía en torno a los 2000, 1000-1400, 600-800 y 250-400 años. El tiempo característico en torno a los 600-800 años está bien determinado en todas las reconstrucciones paleomagnéticas y, según estos autores, está relacionado con los términos del dipolo axial, del octupolo axial y del dipolo ecuatorial. Las frecuencias de 1000-1400 años, las encontraron, especialmente, en los términos dipolar y cuadrupolar ecuatoriales; el período de 2000 años sólo lo encontraron bien determinado en la energía total del CMT.

Estudios que aplican las variaciones de las propiedades magnéticas en registros sedimentarios marinos y lacustres (Kodama *et al.*, 2010; Hinnov *et al.*, 2013) han permitido establecer la ciclicidad asociada a los parámetros orbitales. Sin embargo, los estudios sobre sedimentos eólicos depositados son novedosos en la literatura. La aplicación del análisis espectral a las propiedades magnéticas en secuencias de sedimentos, teniendo en cuenta las variaciones de variables climáticas como el viento, constituye un enfoque innovador. El análisis estadístico de las variaciones de estos parámetros a lo largo del tiempo podría indicar, indirectamente, cualquier periodicidad predominante a partir de la cual se puede, bajo determinadas condiciones, interpretar variación en la velocidad del viento durante el lapso estudiado.

Este artículo recopila información de los análisis de la evolución temporal y espacial del CMT durante el Holoceno en registros lacustres, así como también otros análisis climáticos inferidos a partir de sedimentos eólicos del sur de Argentina (Patagonia). Los objetivos de este estudio fueron revisar la coherencia de las oscilaciones en la variación paleosecular del CMT y de las propiedades magnéticas de sedimentos obtenidas en los registros geológicos estudiados (Orgeira *et al.*, 2022b; 2024 *en prensa*), así como determinar la

posible existencia de algunos patrones comunes entre ellas.

2. Descripción de las zonas de estudio

El área de trabajo está ubicada en el sur de Argentina (Figura 1), donde se realizaron distintos muestreos de registros magnéticos en secuencias lacustres y eólicas.

Por un lado, en el suroeste de Argentina, en el lado oriental de la Cordillera Andina Patagónica, se ubican tres lagos situados a aproximadamente 800 m sobre el nivel del mar, que fueron objeto de estudio a través de la obtención de testigos de fondo. En el lago Escondido (41°S, 71°30'O), Gogorza *et al.* (1999, 2002, 2004) obtuvieron la paleointensidad y las direcciones de la magnetización remanente natural (MRN, declinación e inclinación) de un registro obtenido a partir de cuatro testigos que abarca el lapso comprendido entre 0 y 19000 años calibrados.

En el lago El Trébol (41°04' S, 71°29' O; Figura 1), Irurzun *et al.* (2006) realizaron estudios paleomagnéticos en seis testigos y obtuvieron mediciones de direcciones (declinación e inclinación) e intensidad de la MRN. Gogorza *et al.* (2006) utilizaron cuatro testigos del lago El Trébol para estimar la paleointensidad regional del CMT. Desarrollaron registros de paleointensidad relativa usando una normalización convencional para complementar los parámetros direccionales correspondientes a esos testigos (Irurzun *et al.*, 2006).

En el lago Moreno (41° S, 71°30' O; Figura 1), Gogorza *et al.* (2000) realizaron estudios paleomagnéticos y sedimentológicos en cuatro testigos. Los resultados se integraron con los datos obtenidos por Creer *et al.* (1983). Las correlaciones dentro del lago se basaron en la susceptibilidad magnética y la intensidad de la magnetización remanente natural (MRN). Los autores obtuvieron un registro magnético de inclinación y declinación completo desde 300 a 12200 años calibrados.

Por otro lado, en el extremo sur de Argentina, en la región norte de la Isla Grande de Tierra del

Fuego (53° 43' 28" S, 68° 18' 51" O), se analizaron muestras del registro de sedimentos de la duna Arturo, la cual se sitúa en la cima de un acantilado rocoso orientado al NO, en la orilla sur del lago homónimo. Es una secuencia sedimentaria formada por una sucesión de unidades eólicas limoarcillosas interdigitadas por paleosuelos, que cubren un espesor total de 19 m (Coronato *et al.*, 2011; 2021).

3. Materiales y métodos

El detalle de la metodología de muestreo, dataciones, modelo de edades y medición de los parámetros magnéticos se encuentra en publicaciones anteriores (Orgeira *et al.*, 2022b; 2024 *en prensa*).

Los parámetros direccionales analizados en los registros de los lagos Escondido, El Trébol y Moreno fueron la declinación e inclinación magnéticas (Orgeira *et al.*, 2024 *en prensa*) y también se incluyeron el registro de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bentónicos del Océano Atlántico Sur (Waelbroeck *et al.*, 2011) para representar las paleotemperaturas oceánicas y un parámetro de actividad solar (Soon *et al.*, 2014).

En particular, los parámetros analizados a partir de los registros de la duna Arturo incluyen diferentes propiedades y relaciones magnéticas (Orgeira *et al.*, 2022b). Estas propiedades son la fuerza coercitiva (H_c), la magnetización de saturación (M_s), la susceptibilidad magnética de baja frecuencia (470 Hz) (kLF) y la relación entre la magnetización remanente anhisterética (ARM) y la susceptibilidad magnética (ARM/k) (Evans y Heller, 2003). Estos parámetros se relacionaron con el registro de $\delta^{18}\text{O}$ (Waelbroeck *et al.*, 2011). En cuanto a la mineralogía magnética, es importante resaltar que la secuencia contiene únicamente magnetita o titanomagnetita con bajos contenidos en Ti (Orgeira *et al.*, 2022b). En consecuencia, las variaciones de H_c (parámetro intensivo, no dependiente de la cantidad de mineral magnético) sólo pueden atribuirse a cambios en el tamaño de las partículas magnéticas (Dankers, 1978). Esto

significa que su variación está directamente asociada a la energía del agente transportador, en este caso, el viento. Según Turner (1997), la relación ARM/k está asociada a las variaciones del tamaño del grano magnético (inversamente proporcional al tamaño del grano magnético).

Esta contribución se centra en la aplicación del análisis matemático y estadístico en los citados parámetros magnéticos. Los algoritmos son una manera de encontrar posibles frecuencias comunes y coherentes en una o varias series de tiempo de distintos orígenes y así reconocer patrones y moduladores (Frick *et al.*, 1997; Torrence y Compo, 1998; Soon *et al.*, 1999). En los últimos años, Soon *et al.* (2014) y Velasco Herrera *et al.* (2017) desarrollaron y describieron un algoritmo y una nueva metodología para analizar señales en el espacio tiempo-frecuencia en múltiples series de tiempo de cualquier tipo de registro y su covarianza espectral.

Los resultados de los análisis de *wavelets* (una serie de tiempo), *cross wavelets* (dos series de tiempo cruzadas) y múltiples *cross wavelets* (más de dos series) son representados en figuras compuestas por distintos paneles y cada uno muestra distintos aspectos del análisis (Figura 2, 3). En esas figuras, en el panel superior se observa la serie o series de tiempo utilizadas en el análisis. El panel izquierdo muestra el espectro global de *wavelet* y las periodicidades encontradas. Aquellas que superan el nivel de confianza del 95%, representado con una línea discontinua roja, son las periodicidades con mayor densidad espectral de potencia (DEP). El nivel de significancia del 5% implica que, para una serie temporal, las periodicidades que están por encima de este umbral tienen un nivel de confianza del 95%. El panel central muestra la DEP en una escala rojo-verde-azul, en la cual el color rojo representa la mayor potencia espectral y el azul la menor. En ese mismo panel, las flechas negras en las figuras de las múltiples *cross wavelets* (Figuras 2, 3) muestran la fase relativa entre las series temporales en una periodicidad determinada. Si la orientación de las flechas es hacia la derecha, las series de tiempo están en fase y si es hacia la izquierda,

Tabla 1. Periodicidades halladas en los distintos parámetros magnéticos

Parámetros del CMT	Periodicidades	
Declinación (D) (Orgeira <i>et al.</i> , 2024, <i>en prensa</i>)	El Trébol	3169 y 1332 años
	Escondido	2241 y 1120 años
	Moreno	2340 y 1332 años
	3 lagos	2374 y 1257 años
Inclinación (I) (Orgeira <i>et al.</i> , 2024, <i>en prensa</i>)	El Trébol	2992, 2241 y 1496 años
	Escondido	2665 y 1496 años
	Moreno	2999 y 1496 años
	3 lagos	2824 y 1496 años
Declinación + Inclinación (Orgeira <i>et al.</i> , 2024, <i>en prensa</i>)	El Trébol	3169 y 1412 años
	Escondido	2374 y 1257 años
	Moreno	2400 y 1496 años
	3 lagos	2515 y ~1500 años
D + I + actividad solar (Orgeira <i>et al.</i> , 2024, <i>en prensa</i>)	2500, 1510 y 1332 años	
D + I + actividad solar + $\delta^{18}\text{O}$ (Orgeira <i>et al.</i> , 2024, <i>en prensa</i>)	2600 años	
Susceptibilidad magnética de baja frecuencia (kLF) (Orgeira <i>et al.</i> , 2022b)	1496 y 2666 años	
Magnetización de saturación (Ms) (Orgeira <i>et al.</i> , 2022b)	1333 y 3170 años	
Fuerza coercitiva (Hc) (Orgeira <i>et al.</i> , 2022b)	1412 y 3358 años	
Relación ARM/k (Orgeira <i>et al.</i> , 2022b)	1258 y 2824 años	
4 parámetros magnéticos (Orgeira <i>et al.</i> , 2022b)	2824 años	
4 parámetros magnéticos + $\delta^{18}\text{O}$ (Orgeira <i>et al.</i> , 2022b)	2992 años	
$\delta^{18}\text{O}$ (Orgeira <i>et al.</i> , 2022b; 2024 <i>en prensa</i>)	~ 1200-1500 y 2600-3000 años	

entonces están en antifase; esto significa una correlación positiva o negativa, respectivamente. Si las flechas tienen cualquier otra dirección, significa que existe una relación compleja entre las series temporales (Velasco Herrera *et al.*, 2017).

4. Resultados

4.1. PARÁMETROS DIRECCIONALES

De los análisis de *wavelet* correspondientes a los parámetros direccionales del CMT (declinación, D, e inclinación, I) en registros de los lagos Escondido, El Trébol y Moreno (Orgeira *et al.*, 2024 *en prensa*), se obtuvieron periodicidades principales entre 1100-1500 y 2200-3200 años, tanto en los análisis individuales como en las correlaciones cruzadas. Las frecuencias princi-

pales se encuentran detalladas en la Tabla 1. Los valores de frecuencia, obtenidos del análisis de la inclinación del CMT de los registros de los tres lagos, muestran menor dispersión entre ellos y son levemente superiores a los de declinación (Tabla 1). La DEP de las frecuencias características no se mantiene con igual intensidad durante todo el Holoceno. Existen discontinuidades, principalmente en las frecuencias más altas (Figura 2). Las *cross wavelets*, que incluyen D+I en cada lago por separado (Tabla 1), destacan las periodicidades de frecuencias más bajas encontradas alrededor de los intervalos de tiempo 2400-3100 y 1250-1500 años. En particular, las múltiples *cross wavelets* que incluyen seis variables (D+I de los tres lagos) destacan que la frecuencia de alrededor de 2500 años se mantiene con DEP generalmente continua a lo largo del intervalo de tiempo analizado y una periodicidad cercana a 1500 años más discreta

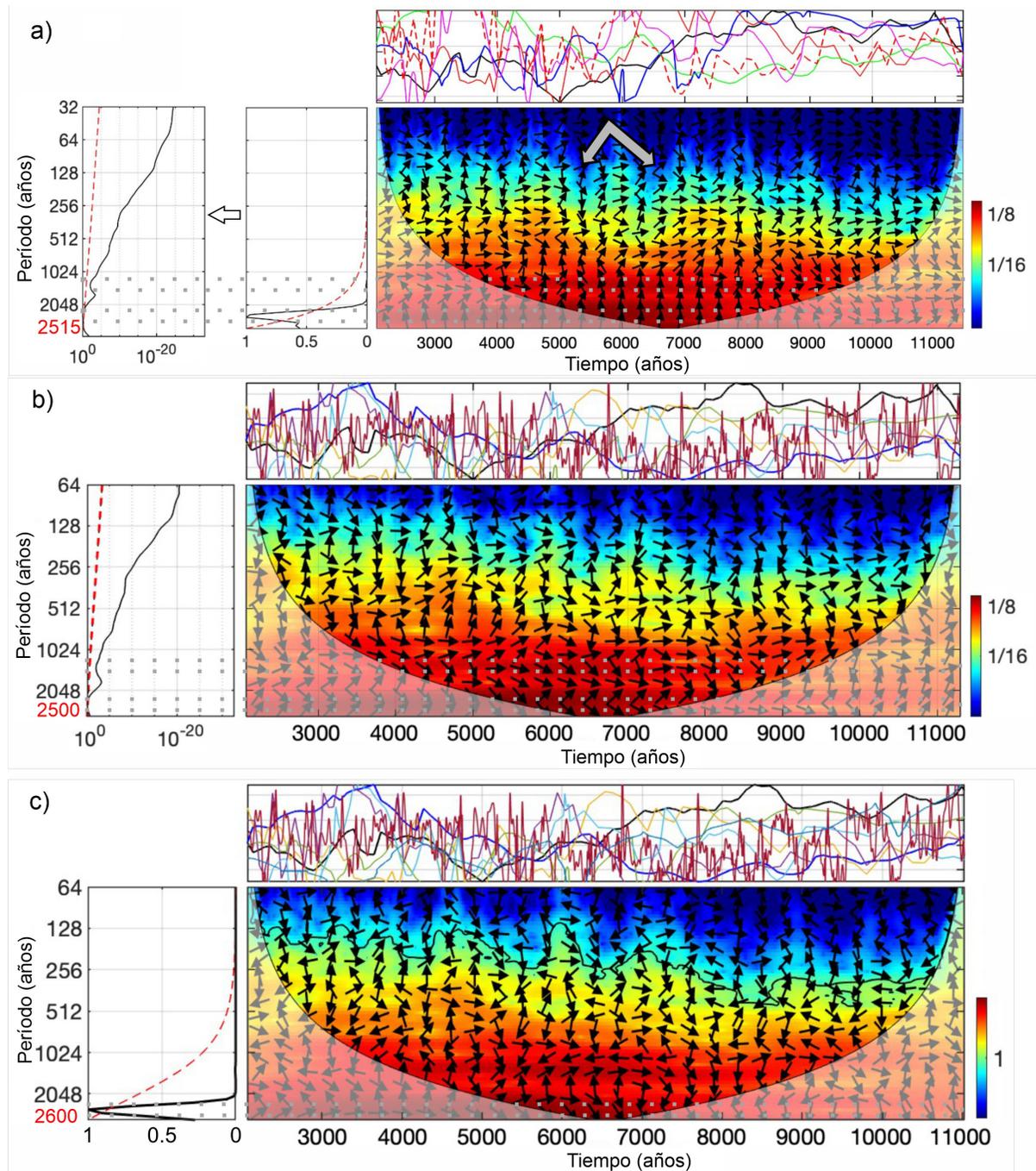


Figura 2 Múltiples *cross wavelets* realizados en los registros de los lagos Escondido, El Trébol y Moreno (Orgeira *et al.*, 2024 *in prensa*), que incluyen a) Declinación e inclinación de los tres lagos, b) D+I de los tres lagos y actividad solar y c) D+I+ $\delta^{18}O$ + actividad solar. En cada figura, el panel superior muestra las series de tiempo, el panel izquierdo muestra la wavelet global como una curva negra, la línea discontinua roja es el nivel de confianza del 95% y los números en rojo indican la periodicidad con mayor densidad espectral de potencia (DEP). El panel central muestra la wavelet en unidades normalizadas mediante escalas de color rojo-verde-azul, las líneas negras curvas marcan el cono de influencia (posibles efectos de borde en la DEP). Las flechas negras en la DEP indican la fase relativa de las covariaciones entre las series de tiempo. De izquierda a derecha (o de derecha a izquierda), las orientaciones sugieren una correlación lineal, en fase (o antifase). Cualquier otra orientación significa una covariación compleja, no lineal, lo que significa que los dos fenómenos estudiados tienen una relación no lineal más compleja. Las flechas gruesas grises señalan algunas de las discontinuidades que se observan principalmente en las frecuencias más altas. Los recuadros de líneas punteadas grises muestran la DEP de cada periodicidad en el intervalo de tiempo considerado.

(Figura 2a).

Para comprobar la existencia de una correlación entre las fluctuaciones del CMT analizadas y el clima, se analizaron las oscilaciones de la actividad solar y el $\delta^{18}\text{O}$ para el Holoceno utilizando la misma metodología. Al cruzar la declinación e inclinación de los tres lagos con la variable de la actividad solar extraída de Soon *et al.* (2014), con el fin de establecer las posibles correlaciones entre todos los parámetros considerados, se encontró una periodicidad principal de 2500 años (Figura 2b) y otras dos periodicidades por debajo del 95% de confianza de alrededor de 1500 y 1300 años. La serie de $\delta^{18}\text{O}$, que individualmente tiene periodicidades de 1500 y 3000 años (Orgeira *et al.*, 2024 *en prensa*), coincide parcialmente con algunas de las periodicidades encontradas en el análisis de las series de tiempo de los parámetros magnéticos direccionales, por lo cual fue incorporada a los análisis. El análisis de múltiples *cross wavelets* entre todos estos parámetros dio como resultado una periodicidad principal de 2600 años (Figura 2c).

4.2. PROPIEDADES MAGNÉTICAS

A partir del análisis de *wavelet* realizado en las series correspondientes a cada propiedad magnética medida en las muestras de sedimentos eólicos recogidas en la Duna de Arturo, se obtuvieron diversos resultados (Orgeira *et al.*, 2022b). En el análisis de *wavelet* de kLF, se pudieron identificar dos periodicidades por encima del nivel de confianza del 95% (1496 y 2666 años). La DEP de ambas periodicidades es muy fuerte a lo largo de todo el intervalo analizado. También se obtuvieron resultados similares en el análisis de otro parámetro extensivo, Ms, donde se distinguieron periodicidades de 1333 y 3170 años. La DEP de la periodicidad de 1333 años es muy densa desde el Holoceno Medio (Orgeira *et al.*, 2022b). Los resultados del análisis de *wavelet* de Hc mostraron dos periodicidades de 1412 y 3358 años por encima del nivel de confianza del 95%. El análisis de *wavelet* de la relación ARM/k presentó dos periodicidades de 1258 y 2824 años, pero, en este caso, por debajo del nivel de confianza del 95% (Orgeira *et*

al., 2022b).

En este caso, también se incluyó la variación de $\delta^{18}\text{O}$ en los foraminíferos bentónicos. Dicho análisis mostró dos periodicidades, una por encima del 95% de confianza, en torno a 1200 años (muy intensa a principios del Holoceno), y otra a 2600 años, por debajo (Orgeira *et al.*, 2022b). El análisis de múltiples *cross wavelets* entre los cuatro parámetros magnéticos medidos en las muestras eólicas recogidas en la duna Arturo (kLF, Ms, Hc y ARM/k), mostró una periodicidad de 2824 años por encima del nivel de confianza del 95% (Figura 3a). Al incorporar la serie de $\delta^{18}\text{O}$ al análisis, se obtiene un resultado similar, revelando una periodicidad de 2992 años (Figura 3b). La Tabla 1 resume los resultados de todos los análisis de *wavelet*, *cross wavelets* y múltiples *cross wavelets* descritos anteriormente.

5. Discusión

Los resultados resumidos en la Tabla 1 muestran distintas periodicidades obtenidas en los diferentes análisis de *wavelets*, *cross wavelets* y múltiples *cross wavelets* de los parámetros magnéticos analizados en Orgeira *et al.* (2022b; 2024 *en prensa*).

Como se puede apreciar en la Tabla 1, algunas de esas periodicidades no necesariamente se superponen con precisión. Sin embargo, en todos los resultados se observan dos rangos de periodicidades principales alrededor de 2400-3000 y 1100-1500 años. La falta de coincidencia precisa podría deberse a la incertidumbre metodológica intrínseca asociada a las periodicidades obtenidas mediante el análisis de *wavelet* (Velasco Herrera *et al.*, 2017), así como también a que los resultados geofísicos obtenidos con diferentes metodologías tienen errores debido a las diferentes sensibilidades de los equipos de medición.

La relación entre las variaciones solares y climáticas centenarias y milenarias, como los fenómenos periódicos o intermitentes y no periódicos durante el Holoceno, ha sido propuesta y debatida por numerosos autores (*e.g.*, Stefani *et al.*, 2021).

Asimismo, numerosas evidencias demuestran que un componente significativo de la variabilidad climática sub-Milankovitch se produce en ciclos de 1000-3000 años. Soon *et al.* (2014) utilizaron múltiples *cross wavelets* en el espacio tiempo-frecuencia e informaron sobre la existencia y la naturaleza de las variaciones solares y climáticas del Holoceno en escalas de tiempo centenarias a milenarias:

2300 años (Hallstattzeit; Chambers *et al.*, 1999), 1000 años (Eddy) y 500 años. El ciclo de 1500-1800 años puede ser fundamental o derivado.

Resultados previos, obtenidos a partir de datos magnéticos, indican una ciclicidad aproximada en ciertos intervalos de frecuencias características en el comportamiento del CMT y de la naturaleza de las variaciones solares y climáticas (*e.g.*, 2000,

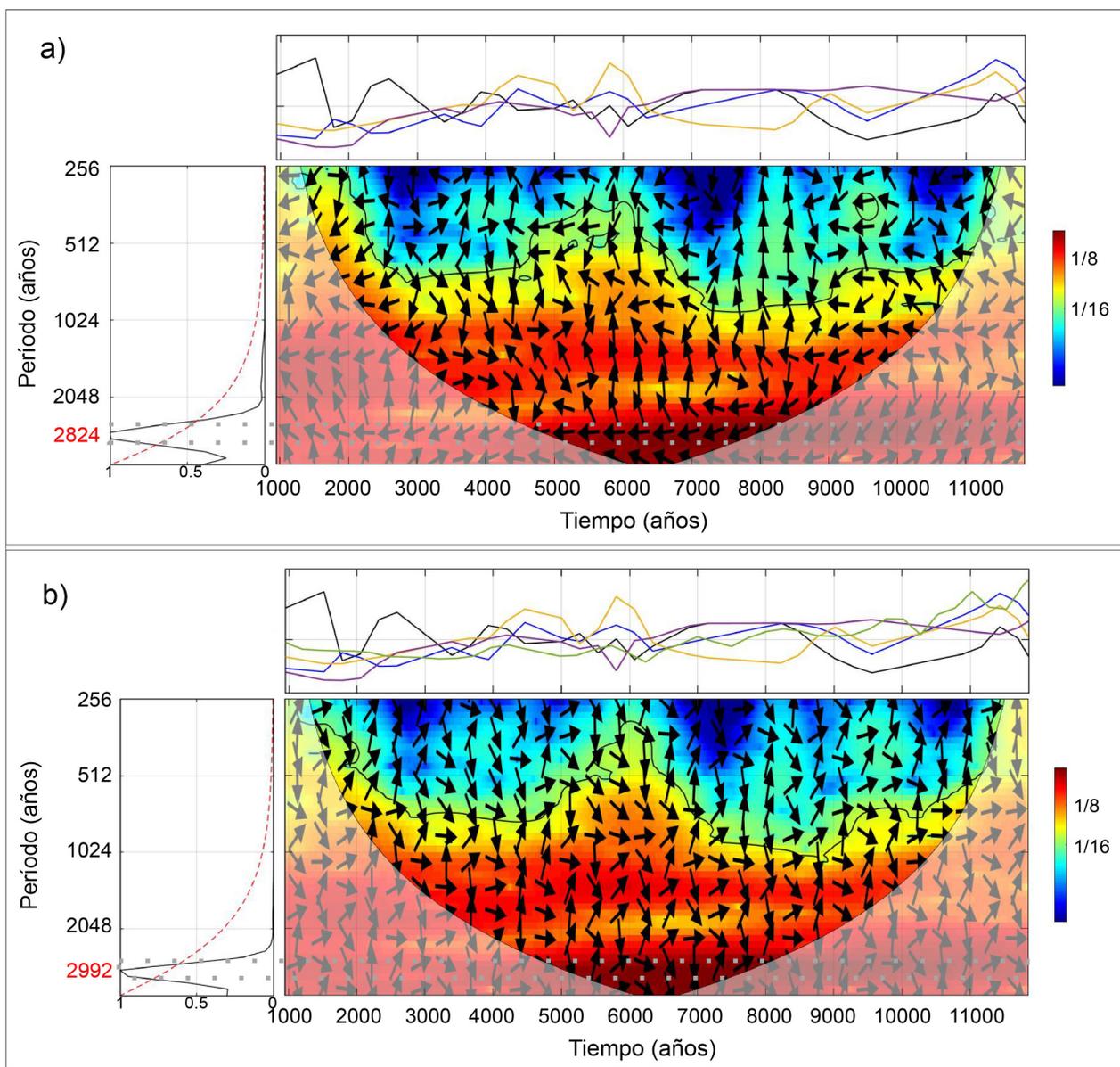


Figura 3 Múltiples *cross wavelets* realizados en los registros de la duna Arturo (Orgeira *et al.*, 2022b), que incluyen a) los cuatro parámetros magnéticos (kLF, Ms, Hc y ARM/k) y b) los cuatro parámetros magnéticos + $\delta^{18}\text{O}$. La descripción de cada figura es la misma que en la Figura 2.

1000-1400 años; González-López et al., 2021), que representan fluctuaciones en los procesos naturales durante el Cenozoico tardío. Sprovieri et al. (2006) obtuvieron periodicidades de 3000, 2500 y 1500 años, mediante el análisis espectral y de *wavelet* en registros faunísticos de alta resolución del Mediterráneo, para el Plioceno medio (2.6-3.6 Ma). Esto sugiere una variabilidad a escala milenaria (periodicidades sub-Milankovitch) para el intervalo estudiado. Berner et al. (2008) analizaron series de datos de alta resolución obtenidos en registros de diatomeas de un testigo de sedimentos (Reykjanes Ridge, Océano Atlántico Norte), como proxy de las temperaturas de la superficie del mar y encontraron periodicidades de 2500, 1500 y 1000 a 600 años. Los autores mencionaron forzantes externos, como la actividad del Sol, y oscilaciones internas tanto en el sistema de circulación oceánica como en los procesos atmosféricos.

Los datos magnéticos direccionales analizados para cada lago mostraron variaciones con periodicidades conspicuas alrededor de 2400-3100 y 1400 años (Tabla 1) y, cuando se analizaron conjuntamente los tres lagos, se determinaron periodicidades de 2300-2800 años y una discreta de 1500 años (Tabla 1; Figura 2a). Se observa una correspondencia aproximada entre el modo solar fundamental de 2300 años (Hallstattzeit) y los resultados de la frecuencia de variabilidad de las direcciones del CMT. Resulta notable la buena correlación en los análisis sumando las variables climáticas ($\delta^{18}\text{O}$) y solar (2500-2600 años) (Tabla 1; Figura 2b, 2c).

La periodicidad de 2300-3100 años encontrada a través del análisis de las variaciones temporales del CMT registradas en América del Sur, también podría estar relacionada con el movimiento de la Anomalía del Atlántico Sur (AAS) (Orgeira et al., 2024 *en prensa*). Hasta el momento, nuestros resultados no nos permiten determinar el origen de esta anomalía. Dado que este intervalo de periodicidad también se registra en el proxy climático, se puede especular que el CMT podría estar actuando como uno de los forzantes climáticos o que ambos (CMT y clima) están modulados por un mismo

forzante externo.

En los distintos análisis de *wavelets* realizados en la duna Arturo, Tierra del Fuego, se observó una periodicidad de alrededor de 2800 años en las propiedades magnéticas. Al incorporar la serie de $\delta^{18}\text{O}$, se obtuvo una periodicidad de alrededor de 3000 años. La similitud en los valores específicos de ciclos recurrentes, que surgen de los análisis de *wavelets* de varios registros completamente diferentes, es sugerente y también muestran una coherencia aproximada con el modo solar fundamental de 2300 años.

La frecuencia característica de alrededor de 1500 años, reconocida en los diferentes análisis de *wavelets*, *cross wavelets* y múltiples *cross wavelets* de los parámetros magnéticos, también podría coincidir con cambios climáticos conspicuos y modos solares. Sobre la base de la evidencia recopilada de los testigos de aguas profundas del Atlántico Norte, se determinaron los cambios abruptos marcados durante el clima del Holoceno. Durante cada uno de estos episodios, las aguas heladas del norte de Islandia se prolongaron hacia el sur hasta la latitud de Gran Bretaña con una periodicidad de alrededor de 1500 años (Bond, 1997). Estos ciclos también se detectaron en estalagmitas (Niggemann et al., 2003) y muchos otros registros (Soon et al., 2014). Durante los últimos 12000 años se observaron nueve desplazamientos fríos, llamados ciclos de Bond, principalmente en la zona del Océano Atlántico Norte. Dos de los cambios climáticos más pronunciados de los últimos 120000 años son los eventos de Dansgaard-Oeschger y Heinrich que presentan una periodicidad de aproximadamente 1500 años, de origen debatido. Dima y Lohmann (2009) muestran, a partir de un modelo conceptual, que esa variabilidad podría originarse a partir de la rectificación de un forzamiento externo (posiblemente solar).

Stephenson et al. (2016) analizaron las variaciones en la velocidad de rotación de la Tierra y encontraron indicios de una oscilación en la duración del día solar medio con un período de aproximadamente 1500 años. Es interesante que el registro del CMT también parece mostrar una

periodicidad cercana a los 1500 años (Orgeira *et al.* 2024 *en prensa*). Dado que este campo es generado por el movimiento de material fluido en el núcleo externo, parece plausible que las oscilaciones en la velocidad de rotación de la Tierra afecten al CMT. Si bien se trata de un sistema complejo, se puede sugerir que las variaciones en el CMT y el clima durante el Holoceno podrían haber sido promovidas principalmente por forzantes externos, posiblemente asociados con la oscilación en el Sistema Solar (ciclos sub Milankovitch y modos fundamentales solares).

5. Conclusiones

El uso de herramientas de análisis matemático y estadístico en variables relacionadas con las variaciones del CMT resultarelevante al aporte de conocimiento sobre su comportamiento. En este estudio se emplearon análisis de *wavelet*, *cross wavelets* y múltiples *cross wavelets* para examinar parámetros magnéticos recopilados de registros lacustres y eólicos del sur de Argentina, abarcando el período del Holoceno. Los análisis de wavelets de los datos paleomagnéticos direccionales de los testigos sedimentarios recolectados de los lagos El Trébol, Escondido y Moreno (Patagonia, Argentina) revelaron periodicidades alrededor de 2200–3200 y 1100–1500 años durante el Holoceno. Estos resultados concuerdan, parcialmente, con los obtenidos por otros autores a partir de bases de datos magnéticas compiladas. También muestran cierta coherencia con un modo solar fundamental y las variaciones climáticas. Esto podría indicar que el CMT podría ser un forzante climático, y/o que el CMT y el clima oscila debido a la influencia del mismo forzante externo al planeta. Se sugiere que la periodicidad de 2200–3200 años también podría estar relacionada con el movimiento de la AAS y que la frecuencia de alrededor de 1500 años podría estar correlacionada con cambios climáticos notorios.

En el análisis de múltiples *cross wavelets* de propiedades magnéticas obtenidas en sedimentos de

la duna Arturo, Tierra del Fuego, se observó una periodicidad en la variación de la velocidad inferida del viento de 2824 años. Al incorporar la serie de $\delta^{18}\text{O}$, se obtuvo una periodicidad de alrededor de 3000 años. Estas podrían estar relacionadas con un modo solar fundamental con una periodicidad de 2300 años (ciclo Hallstattzeit). Resulta sugerente la similitud en los valores específicos de ciclos recurrentes que surgen de los análisis de *wavelets* de varios registros completamente diferentes.

Contribuciones de los autores

(1) Conceptualización: MJO, LC, VMVH; (2) Análisis o adquisición de datos: VMVH, LC; (3) Desarrollo metodológico/técnico: VMVH, LC; (4) Redacción del manuscrito original: LC, MJO; (5) Redacción del manuscrito corregido y editado: LC, MJO; (6) Diseño gráfico: LC, VMVH; (7) Trabajo de campo: MJO; (8) Interpretación: MJO, LC; (9) Financiamiento: MJO, VMVH.

Financiamiento

CONICET, Argentina. Universidad de Buenos Aires, Argentina. Universidad Nacional Autónoma de México.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su más profundo agradecimiento a las instituciones que financiaron el presente estudio, el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET), la Universidad de Buenos Aires (UBA, Argentina), la Universidad Nacional Autónoma de México. También extendemos nuestro agradecimiento a los revisores de este manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia ni relaciones perso-

nales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Editora a cargo

Milagrosa Aldana.

Referencias

- Berner, K.S., Koc, N., Divine, D., Godtlielsen, F., Moros, M. 2008, A decadal-scale Holocene sea surface temperature record from the subpolar North Atlantic constructed using diatoms and statistics and its relation to other climate parameters: *Paleoceanography and paleoclimatology*, 23(2), PA2210. <https://doi.org/10.1029/2006PA001339>
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., DeMenocal, P., Paul Priore P, Cullen H., Hajdas I., Bonani, G., 1997, A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates: *Science*, 278(5341), 1257-1266. <https://doi.org/10.1126/science.278.5341.1257>
- Cappellotto, L., Orgeira, M.J., Velasco Herrera, V.M., Cionco, R.G., 2022, Multivariable statistical analysis between geomagnetic field, climate, and orbital periodicities over the last 500 kyr, and their relationships during the Last interglacial: *Global and Planetary Change*, 213, 103836. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103836>
- Chambers, F.M., Ogle, M.I., Blackford, J.J., 1999, Palaeoenvironmental evidence for solar forcing of Holocene climate: linkages to solar science: *Progress in Physical Geography: earth and environment*, 23(2), 181-204. <https://doi.org/10.1177/030913339902300202>
- Channell, J.E.T., Hodell, D.A., McManus, J., Lehman, B., 1998, Orbital modulation of the Earth's magnetic field intensity: *Nature*, 394, 464-468. <https://doi.org/10.1038/28833>
- Channell, J.E.T., 1999, Geomagnetic paleointensity and directional secular variation at Ocean Drilling Program (ODP) Site 984 (Bjorn Drift) since 500 ka: comparisons with ODP Site 983 (Gardar Drift): *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B10), 22937-22951. <https://doi.org/10.1029/1999JB900223>
- Constable, C.G., Constable, S.C., 2004, Satellite magnetic field measurements: applications in studying the deep earth, en: Sparks, R. and Hawkesworth, C. (eds.), *The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics*, Geophysical Monograph Series, 150, 147-159. <https://doi.org/10.1029/150GM13>
- Coronato, A., Fanning, P., Salemme, M., Oría, J., Pickard, J., Ponce, J.F., 2011, Aeolian sequence and the archaeological record in the fuegian steppe, Argentina: *Quaternary International*, 245(1), 122-135. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.02.042>
- Coronato, A., Salemme, M., Oría, J., Mari, F., Lopez, R., 2021, Perched dunes in the fuegian steppe, southern Argentina: archeological reservoirs of Holocene information, in Collantes, M., Perucca, L., Niz, A., Rabassa, J. (eds.), *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina*: Nueva York, Springer Cham, 58-91. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22621-3_3
- Creer, K.M., Valencio, D.A., Sinito, A.M., Tucholka, P., Vilas, J.F.A., 1983, Geomagnetic secular variations 0-14 000 yr BP as recorded by lake sediments from Argentina: *Geophysical Journal International*, 74(1), 199-221. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1983.tb01877.x>
- Dankers, P.H.M., 1978, *Magnetic Properties of Dispersed Natural Iron-Oxides of Known Grain-Size*: Utrecht, State University of Utrecht, tesis doctoral, 143 p.
- Dima, M., Lohmann, G., 2009, Conceptual model for millennial climate variability: a possible combined solar-thermohaline circulation origin for the ~ 1,500-year cycle: *Climate Dynamics*, 32, 301-311. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0471-x>

- Evans, M., Heller, F., 2003. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics: Amsterdam, Academic Press, 299 p. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(03\)X8309-6](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(03)X8309-6)
- Frick, P., Baliunas, S., Galyagin, D., Sokoloff, D., Soon, W., 1997, Wavelet analysis of stellar chromospheric activity variations: *The Astrophysical Journal*, 483, 426–434. <https://doi.org/10.1086/304206>
- Fuller, M.D., 2006, Geomagnetic field intensity, excursions, reversals and the 41,000-yr obliquity signal: *Earth and Planetary Science Letters*, 245(3-4), 605-615. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.022>
- Fuller, M.D., 2017, Evidence for a geodynamo driven by thermal energy in the outermost core and by precession deeper in the outer core: *International Journal of Earth Science and Geophysics*, 3(1), 1-10. <https://doi.org/10.35840/2631-5033/1812>
- Gogorza, C.S., Sinito, A.M., Di Tomasso, I., Vilas, J.F., Creer, K.M., Nuñez, H., 1999, Holocene secular variation recorded by sediments from Escondido Lake (south Argentina): *Earth Planets and Space*, 51, 93–106. <https://doi.org/10.1186/BF03352214>
- Gogorza, C.S.G., Sinito, A.M., Di Tommaso, I., Vilas, J.F., Creer, K.M., Nuñez, H., 2000, Geomagnetic Secular Variations 0-12000 yr. As recorded by sediments from Moreno Lake (South Argentina): *Journal of South American Earth Sciences*, Elsevier, 13(7), 627-645. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00052-3](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00052-3)
- Gogorza, C.S.G., Sinito, A.M., Lirio, J.M., Nuñez, H., Chaparro, M., Vilas, J.F., 2002, Paleosecular variations 0–19,000 years recorded by sediments from Escondido Lake (Argentina): *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 133(1-4), 35-55. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(02\)00086-9](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(02)00086-9)
- Gogorza, C.S.G., Lirio, J.M., Nuñez, H., Chaparro, M., Bertorello, H.R., Sinito, A.M., 2004, Paleointensity studies on Holocene–Pleistocene sediments from lake Escondido, Argentina: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 145(1-4), 219-238. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2004.03.010>
- Gogorza, C.S.G., Irurzun, M.A., Chaparro, M.A. E., Lirio, J.M., Nuñez, H., Bercoff, P.G., Sinito, A.M., 2006, Relative paleointensity of the geomagnetic field over the last 21,000 years BP from sediment cores, Lake El Trébol (Patagonia, Argentina): *Earth Planets and Space*, 58, 1323-1332. <https://doi.org/10.1186/BF03352628>
- González-López, A., Campuzano, S.A., Molina-Cardín, A., Pavón-Carrasco, F.J., De Santis, A., Osete, M.L., 2021, Characteristic periods of the paleosecular variation of the Earth's magnetic field during the Holocene from global paleoreconstructions: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 312, 106656. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2021.106656>
- Heslop, D., 2007, A wavelet investigation of possible orbital influences on past geomagnetic field intensity: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(3), 1-10. <https://doi.org/10.1029/2006GC001498>
- Hinnov, L.A., Kodama, K.P., Anastasio, D.J., Elrick, M., Latta, D.K., 2013, Global Milankovitch cycles recorded in rock magnetism of the shallow marine lower Cretaceous Cupido Formation, northeastern Mexico: *Geological Society, London, Special Publications*, 373, 325–340. <https://doi.org/10.1144/SP373.20>
- Irurzun, M.A., Gogorza, C.S.G., Chaparro, M.A.E., Lirio, J.M., Nuñez, H., Vilas, J.F., Sinito, A.M., 2006, Paleosecular variations recorded by Holocene-Pleistocene sediments from Lake El Trébol (Patagonia, Argentina): *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 154(1), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2005.06.012>
- Kodama, K.P., Anastasio, D.J., Newton, M.L., Pares, J.M., Hinnov, L.A., 2010, High-resolution rock magnetic cyclostratigraphy in an Eocene

- flysch: Spanish Pyrenees, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(6), 1–22. <https://doi.org/10.1029/2010GC003069>
- Niggemann, S., Mangini, A., Mudelsee, M., Richter, D.K., Wurth, G., 2003, Sub-Milankovitch climatic cycles in Holocene stalagmites from Sauerland, Germany: *Earth and Planetary Science Letters*, 216(4), 539–547. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00513-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00513-2)
- Nilsson, A., Muscheler, R., Snowball, I., 2011, Millennial scale cyclicity in the geodynamo inferred from a dipole tilt reconstruction: *Earth and Planetary Science Letters*, 311(3–4), 299–305. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.09.030>
- Orgeira, M.J., Velasco Herrera, V.M., Cappellotto, L., Compagnucci, R.H., 2022a, Statistical analysis of the connection between geomagnetic field reversal, a supernova, and climate change during the Plio–Pleistocene transition: *International Journal of Earth Sciences*, 111, 1357–1372. <https://doi.org/10.1007/s00531-022-02184-3>
- Orgeira M.J, Achaga R., Cappellotto L., Gogorza C., Coronato, A., Ponce J.F., Velasco Herrera, V.M., 2022b, Rock magnetic properties as proxy indicators of characteristic periodicities in Holocene aeolian sediments (Arturo dune, Tierra del Fuego, Argentina): *Journal of South American Earth Sciences*, 116, 103807. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103807>
- Orgeira, M.J., Cappellotto, L., Velasco Herrera, V.M., Gogorza, C.S. (2024 *en prensa*) Quantitative analysis using wavelets on time series of three Patagonian Lakes. En: *Late Paleozoic to Cenozoic of Mexico and Beyond: Stratigraphy, Magmatism, Geochronology, Tectonics, and Paleomagnetism: A Tribute to Roberto Stanley Molina-Garza: The Geological Society of America.*
- Saracco, G., Thouveny, N., Bourles, D.L., Carcaillet, J.T., 2009, Extraction of non-continuous orbital frequencies from noisy insolation data and from palaeoproxy records of geomagnetic intensity using the phase of continuous wavelet transforms: *Geophysical Journal International*, 176(3), 767–781. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.04057.x>
- Soon, W., Frick, P., Baliunas, S., 1999, Lifetime of surface features and stellar rotation: a wavelet time-frequency approach: *The Astrophysical Journal*, 510(2), L135–L138. <https://doi.org/10.1086/311805>
- Soon, W., Herrera, V.M.V., Selvaraj, K., Traversi, R., Usoskin, I., Chen, C-T.A., Lou, J-H., Kao, S-J., Carter, R.M., Pipin, V., Severi, M., Becagli, S., 2014, A review of Holocene solar-linked climatic variation on centennial to millennial timescales: Physical processes, interpretative frameworks and a new multiple cross-wavelet transform algorithm: *Earth-Science Reviews*, 134, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.003>
- Sprovieri, R., Sprovieri, M., Caruso, A., Pelosi, N., Bonomo, S., Ferraro, L., 2006, Astronomic forcing on the planktonic foraminifera assemblage in the Piacenzian Punta Piccola section (southern Italy): *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 21(4), PA4204, 1–21. <https://doi.org/10.1029/2006PA001268>
- Stefani, F., Stepanov, R., Weier, T., 2021, Shaken and stirred: when bond meets suess–de Vries and Gnevyshev–Ohl: *Solar Physics*, 296(6) 1–23.
- Stephenson, F.R., Morrison, L.V., Hohenkerk, C.Y., 2016, Measurement of the Earth’s rotation: 720 BC to AD 2015: *Proceedings of the Royal Society A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 472(2196), 20160404. <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0404>
- Torrence, C., Compo, G.P., 1998, A practical guide to wavelet analysis: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61–78. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2)
- Turner, G.M., 1997, Environmental magnetism

and magnetic correlation of high-resolution lake sediment records from Northern Hawke's Bay, New Zealand: *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 40(3), 287–298. <https://doi.org/10.1080/00288306.1997.9514761>

Valet, J.P., Moreno, E., Bassinot, F., Johannes, L., Dewilde, F., Bastos, T., Lefort A., Venec-Peyre, M.T., 2011, Isolating climatic and paleomagnetic imbricated signals in two marine cores using principal component analysis: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(8), 1-23. <https://doi.org/10.1029/2011GC003697>

Velasco Herrera, V.M., Soon, W., Velasco Herrera, G., Traversi, R., Horiuchi, K., 2017, Generalization of the cross-wavelet function: *New Astronomy*, 56, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2017.04.012>

Waelbroeck, C., Skinner, L.C., Labeyrie, L., Duplessy, J.C., Michel, E., Vazquez Riveiros,

N., Gherardi, M., Dewilde, F., 2011, The timing of deglacial circulation changes in the Atlantic: *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 26(3), PA3213, 1-10. <https://doi.org/10.1029/2010PA002007>

Yamazaki, T., 1999, Relative paleointensity of the geomagnetic field during Brunhes Chron recorded in North Pacific deep-sea sediment cores: orbital influence?: *Earth and Planetary Science Letters*, 169(1-2), 23–35. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00064-3)

Yamazaki, T., Oda, H., 2002, Orbital influence on Earth's magnetic field: 100,000-year periodicity in inclination: *Science*, 295(5564), 2435-2438. <https://doi.org/10.1126/science.1068541>

Yokoyama, Y., Yamazaki, T., 2000, Geomagnetic paleointensity variation with a 100 kyr quasi-period: *Earth and Planetary Science Letters*, 181(1–2), 7-14. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00199-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00199-0)