



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

ESTUDIO ARQUEOMAGNÉTICO
INTEGRAL REALIZADO A LA
CERÁMICA PREHISPÁNICA MÁS
ANTIGUA DE AMÉRICA (PUERTO
CHACHO, CARIBE COLOMBIANO)

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A

RICARDO PACHECO BALTAZAR

Tutor: Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano
Co-Tutor: Dr. Avtandil Gogichaishvili

MORELIA, MICHOACÁN

FEBRERO, 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES
10
años
(2011-2021)
UNIDAD MORELIA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO ESCUELA
NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

P R E S E N T E

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 08** del **Comité Académico de la Licenciatura en Geociencias** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **21 de septiembre de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno **Ricardo Pacheco Baltazar** de la Licenciatura en **Literatura en Geociencias**, con número de cuenta **420139359**, con el trabajo titulado: **"Estudio arqueomagnético integral realizado a la cerámica prehispánica más antigua de América (Puerto Chacho, Caribe Colombiano)"**, bajo la dirección como tutor del Dr. Miguel Ángel Cervantes Solano y como co-tutor el **Dr Avtandil Gogichaishvili**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. Gabriel Vázquez Castro
Vocal:	Dr. Manuel Calvo Rathert
Secretario:	Dr. Avtandil Gogichaishvili
Suplente:	Dr. José Luis Pinzo Díaz
Suplente:	Dra. Ana María Soler Arechalde

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 23 de febrero de 2024.

DRA. YUNUEN TAPIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme realizar mis estudios universitarios en una de las mejores casas de estudio del continente.

A la Unidad Michoacán del Instituto de Geofísica, en especial al equipo de paleomagnetismo, por permitirme utilizar su infraestructura que permitieron la realización de este trabajo.

A la Licenciatura en Geociencias por enseñarme a ver de una manera distinta al planeta Tierra y los procesos que ocurren en esta.

A los proyectos UNAM-DGAPA-PAPIIT n° IN100224 y CONAHCyT CF-1761.

Al Instituto Colombiano de Antropología e Historia, los Doctores Fernando Montejo y Carlos Reyna por las facilidades brindadas durante el estudio a las cerámicas de Puerto Chacho.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A mis tutores, Dr. Miguel Cervantes y Dr. Avto Gogichaishvili, por todo el apoyo que permitieron la realización de este trabajo.

Angi y al Dr. Rubén Cejudo quienes aportaron muchísimo apoyo no solo en la parte académica desde el momento en que los conocí.

A mis amigos Paco, Aye, Arely, Andi, Azul, Dani, Diego, Yarco que conocí durante la licenciatura y que han sido parte muy importante desde entonces.

A mí madre quien ha sido mi tutora incondicional a lo largo de los años y que gracias a todo su esfuerzo pude llegar hasta acá.

A mi novia Lizette por todo el apoyo que me ha dado.

A la michi, a pesar de haberse acostado y caminado tantas veces sobre el teclado mientras escribía.

RESUMEN

El campo magnético de la Tierra se caracteriza por experimentar variaciones continuas en dirección e intensidad con periodicidades del orden de años a decenas de miles de años a las que se les denomina variación secular. En las escalas de tiempo más amplias, de decenas a cientos de miles de años, llegan a presentarse inversiones en la polaridad geomagnética, presentándose también alejamientos muy amplios de la dirección estable del campo en los cuales parece iniciar un cambio de polaridad para finalmente regresa a su estado inicial llamadas excursiones geomagnéticas.

Si se conocen con precisión estas variaciones del campo geomagnético en el pasado, es posible establecer un registro de la variación temporal, llamada curva de variación secular. Desde el punto de vista geofísico, estas curvas permiten estudiar con detalle el comportamiento del campo en el pasado aportando información sobre el mecanismo que genera el campo magnético en el núcleo de la Tierra. Por otro lado, estas curvas pueden utilizarse como herramienta de datación, conocido como fechamiento arqueomagnético, el cual puede ser tan preciso como los métodos de datación radiométricos tradicionales. Actualmente este método representa una alternativa eficiente para datar edades de materiales arqueológicos como cerámicas, barros, arcillas y suelos quemados ya que contienen pequeñas cantidades de minerales magnéticos que, debido a el proceso de fabricación o la forma en que fueron utilizado, registraron la dirección e intensidad del campo magnético de la Tierra del pasado las cuales pueden ser obtenidas mediante las técnicas paleomagnéticas convencionales. La precisión de las edades obtenidas por este método depende de la información sobre el comportamiento del campo geomagnético (dirección e intensidad) con el que se construyen las curvas de variación secular. A pesar del aumento y avances de los estudios arqueomagnéticos en años recientes, aún existe una escasez de datos y una pobre distribución temporal y espacial que dificulta conocer con suficiente precisión la variación del campo geomagnético en varias regiones como es el caso del Caribe en el Continente Americano. En la región del norte de Colombia existe un gran patrimonio cultural debido principalmente a que en esta región se encuentran las redes de producción alfarera consideradas como las más antiguas de América, sin embargo, no existen antecedentes de estudios arqueomagnéticos sistemáticos que permitan conocer la información sobre el comportamiento del campo geomagnético.

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio arqueomagnético y de magnetismo rocas realizado en cerámicas provenientes de Puerto Chacho, Colombia. El objetivo principal es determinar la intensidad absoluta (arqueointensidad) registrada en la cerámica de Puerto Chacho para conocer cómo fue el campo geomagnético en esa época y compararla con los datos regionales y globales disponibles.

PALABRAS CLAVE

Campo geomagnético, Arqueomagnetismo, Mineralogía magnética, Arqueointensidad, Puerto Chacho, Colombia, Cerámica.

ABSTRACT

Earth's magnetic field is characterized by continuous short and long-term fluctuations of both directions and intensity, known as secular variation. Apart of these rather slow changes, larger departures of the geomagnetic field like reversals or excursions are other drastic manifestations that frequently occurred in the past.

If these fluctuations of the main geomagnetic field are precisely known in the past, it is possible to establish a temporal framework, known as secular variation curve. From a geophysics point of view, these patterns allow to study in detail the behavior of the field and provide some crucial information about the conditions that produces the magnetic field in the Earth's outer core. On the other hand, these curves can be used as an archaeomagnetic dating tool, which may eventually be as precise as traditional radiocarbon-based techniques. Currently, this methodology represents an efficient alternative for dating burned archaeological artifacts such as ceramics, clays, kilns and burned soils because they contain small concentration of magnetic minerals that may record the directions and intensity of the Earth's Magnetic Field during the cooling from high temperatures.

The precision of this dating method directly depends on the knowledge of fine characteristics of the field at the regional scale. Despite the increasing quantity and quality of new studies in recent years, there is still a lack of data. Moreover, an uneven temporal and geographic distribution makes impossible to fully understand the behavior of the geomagnetic field in some regions such as the Caribbean in the American continent. The

Northern region of Colombia is characterized by a rich cultural heritage, particularly because the fact that here, the Americas oldest pottery production networks are found. Unfortunately, still no systematic archaeomagnetic investigations are available.

In this study, we report the results obtained from an archaeomagnetic and rock magnetic experiments on pottery samples from Puerto Chacho, Colombia. The main goal is to determine the absolute intensity (archaeointensity) on the ceramic samples belonging to Puerto Chacho archaeological zone and compare the obtained values with regional and global geomagnetic models.

KEY WORDS

Geomagnetic field, Archaeomagnetism, Magnetic mineralogy, Archaeointensity, Puerto Chacho, Colombia, Ceramics.

CONTENIDO

RESUMEN	4
PALABRAS CLAVE.....	5
ABSTRACT	5
KEY WORDS	6
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO.....	13
1.1 Generalidades.....	13
1.2 El campo magnético terrestre (CMT)	13
Origen del CMT	13
Componentes del CMT	15
1.3 Variaciones del CMT	16
Variación secular	16
Inversiones magnéticas	17
1.4 El magnetismo en los materiales	18
1.5 Tipo de materiales magneticos.....	19
Diamagnéticos.....	19
Paramagnéticos.....	19
Ferromagnéticos	19
1.6 Dominios magnéticos	20
Dominio sencillo (<i>SD</i>).....	20
Dominio múltiple (<i>MD</i>)	20
Pseudo dominio sencillo (<i>PSD</i>).....	20
1.7 Temperatura de Curie (T_C).....	21
1.8 Mecanismos de adquisición de magnetización	21
Magnetización termoremanente (TRM).....	22
Magnetización remanente de Trítica (DRM)	22
Magnetización química remanente (CRM).....	22
1.9 Mineralogía magnética	22
Titanomagnetitas	23
Titanohematitas	23
1.10 Arqueomagnetismo	24
1.11 Artefactos de interés	25

1.12	Estudios direccionales.....	25
1.13	Estudios de arqueointensidad.....	26
1.14	Curvas de variación secular (CVS).....	27
	Modelos locales.....	28
	Modelos regionales o globales.....	28
1.15	El arqueomagnetismo como un método de fechamiento.....	29
1.16	Limitantes del fechamiento arqueomagnético.....	30
CAPÍTULO 2 SOCIEDADES ALFARERAS TEMPRANAS.....		31
2.1	Introducción.....	31
2.2	El Caribe Colombiano.....	31
2.3	El periodo Paleoindio.....	32
2.4	El periodo Arcaico.....	33
2.5	El periodo Formativo.....	33
2.6	Tradiciones alfareras tempranas.....	33
2.7	El Conchal de Puerto Chacho.....	34
CAPÍTULO 3 ESTUDIOS ARQUEOMAGNÉTICOS PREVIOS EN COLOMBIA.....		38
3.1	Introducción.....	38
3.2	Estudios previos.....	39
CAPÍTULO 4 PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y TRATAMIENTOS DE LABORATORIO.....		50
4.1	Introducción.....	50
4.2	Registro fotográfico e inventario.....	50
4.3	Preparación de las muestras.....	53
4.4	Tratamientos magnéticos.....	54
	Experimento de susceptibilidad contra temperatura.....	54
	Desmagnetización por campos alternos (AFD).....	54
	Arqueointensidad.....	55
	Ritmo de enfriamiento.....	56
CAPÍTULO 5 PRINCIPALES RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		58
5.1	Experimento de susceptibilidad contra temperatura.....	58
5.2	Desmagnetización por campos alternos.....	59
5.3	Arqueointensidad.....	60
Capítulo 6 CONCLUSIONES GENERALES.....		69

Referencias	71
ANEXO.....	76
APÉNDICE	79

INTRODUCCIÓN

Las variaciones y fluctuaciones del campo magnético de la Tierra se registran de forma precisa y continua por los observatorios geomagnéticos permitiendo conocer la evolución del geodínamo en una amplia gama de escalas de tiempo que van desde los milisegundos hasta varias decenas de años (Goguitchaichvili et al., 2023). Existen también diversos registros históricos de datos provenientes de mediciones directas de la declinación e inclinación magnética realizadas durante los últimos cuatro siglos, cuando comenzaron a recopilarse datos instrumentales en lugares específicos principalmente en Europa con fines de navegación marítima. Sin embargo, los registros de la medición directa de la intensidad geomagnética absoluta son más escasas y comenzaron a realizarse sistemáticamente a partir de siglo XIX. (véase la revisión realizada por Carrancho et al., 2015). Más allá de las mediciones instrumentales, el paleomagnetismo surgió como una herramienta útil para obtener información sobre la variación del campo magnético terrestre en escalas de tiempo geológicas y arqueológicas. Debido a que el registro de las variaciones magnéticas se logra mediante un proceso conocido como magnetización termoremanente (TRM), los flujos de lavas de edades conocidas mediante los métodos isotópicos, así como materiales y estructuras arqueológicas quemadas han permitido acceder al conocimiento sobre el campo geomagnético en el pasado.

En las últimas décadas los estudios arqueomagnéticos que presentan determinaciones de intensidad geomagnética absoluta (llamada también arqueointensidad) han aumentado considerablemente lo que ha generado también la aparición y mejora de diversas metodologías y una calidad en los resultados muy variable (por ejemplo, Goguitchaichvili et al., 2019, 2023; Mahgoub et al., 2019). A pesar de estos avances, no se ha logrado obtener una distribución homogénea de los datos geomagnéticos en regiones geográficas fuera de Europa, incluido el continente americano las cuales, a pesar de su extensión, siguen siendo escasamente estudiadas (Cejudo et al., 2019; Goguitchaichvili et al., 2023). Navarro Páez (2021) a partir de una recopilación de los datos disponibles para la región del Caribe (Berkovich et al., 2017; Cejudo et al., 2019; Obregón et al., 2019; Rojas Mora et al., 2020) demostró que la escasez de datos, junto con la distribución espacial irregular, hace imposible obtener conclusiones confiables acerca de la variación a largo plazo de la intensidad del

campo geomagnético en esa zona. Se hizo evidente también que los datos abarcan solamente los dos últimos milenios y que no hay dato alguno para períodos más antiguos (Goguitchaichvili et al., 2023).

Dentro de la región de Caribe, la zona del norte de Colombia se caracteriza por un tener un gran patrimonio cultural debido principalmente a que en esta región se encuentran las redes de producción alfarera consideradas como las más antiguas de América. Goguitchaichvili et al. (2023) realizaron un estudio arqueomagnético en cerámicas procedentes de la localidad San Jacinto, un sitio arqueológico ubicado en la Región de la Sabana en la costa norte de Colombia con evidencia de producción cerámica que data del 5940 ± 60 antes del presente (AP) hasta 5190 ± 40 AP (Oyuela-Caycedo y Bonzani, 2005) por lo que se considera una de las manifestaciones de alfarería más antigua en el continente americano. Sin embargo y a pesar de todo este patrimonio cultural, no se dispone de estudios arqueomagnéticos sistemáticos.

En el trabajo de Goguitchaichvili et al. (2023) a partir de 36 muestras provenientes de seis fragmentos de cerámica de San Jacinto, se obtuvieron determinaciones de la arqueointensidad mediante una metodología tipo Thellier de doble calentamiento. Los valores de intensidad media obtenidos varían de 50.7 ± 4.7 a 65.3 ± 11.9 mT, mientras que sus momentos dipolares axiales virtuales (VADM) correspondientes varían de 12.6 ± 1.2 a $16.2 \pm 2.9 \times 10^{22}$ Am², lo que indica una alta intensidad del campo geomagnético en comparación con los valores predichos por los modelos geomagnéticos globales. Los autores argumentaron que este resultado inesperado representa la primera evidencia de un valor 'pico' (*spike*) de la arqueointensidad registrado antes del año 1000 a.C. En la literatura, se han reportado intensidades absolutas geomagnéticas comparables o incluso con valores superiores en la Región de Levante alrededor del periodo de 1100-800 a.C. y en la región del suroeste Pacífico en el año 1450 d.C. La causa real de la existencia de una intensidad geomagnética anormalmente alta se atribuye comúnmente a los procesos geodinámicos ocurridos en las fronteras entre el núcleo exterior y el manto terrestre, sin embargo, este fenómeno aún no se comprende completamente. Como puede verse, este hallazgo fue excepcional por lo que es necesario confirmar con estudios adicionales en edades similares.

En este nuevo trabajo se presentan los resultados de una extensa investigación de arqueointensidad y magnetismo rocas realizada en tiestos cerámicos provenientes de Puerto Chacho, un sitio localizado igualmente en el Caribe Colombiano y contemporáneo al sitio de San Jacinto. Puerto Chacho fue excavado y estudiado de manera sistemática por Legros (1992) en su trabajo doctoral '*Puerto Chacho and the first American ceramists - new data on early formative of the Caribbean Coast of Colombia*' donde consideró al sitio como la manifestación alfarera más antigua en el continente americano. Estas cerámicas se obtuvieron gracias a una colaboración académica entre el Servicio Arqueomagnético Nacional (UNAM, México) y el ICANH (Instituto Nacional de Antropología e Historia de Colombia). El objetivo primordial es determinar la intensidad absoluta (arqueointensidad) registrada en la cerámica de Puerto Chacho para estimar la perseverancia y duración del evento geomagnético anormalmente intenso detectado para aproximadamente 5500 años antes del presente.

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1 GENERALIDADES

El magnetismo ha fascinado a los seres humanos por cientos de años, Posiblemente por su curiosa habilidad de atraer algunos materiales. Durante la Dinastía Han los chinos desarrollaron la primera brújula la cual estaba constituida por una roca rica en minerales magnéticos en forma de cuchara balanceada sobre una superficie plana. Gracias a la habilidad de alinearse es que se comenzó a utilizar como un instrumento de navegación. Los griegos conocían los efectos que tenían algunas rocas de atraer algunos materiales a los que les asociaban un origen metafísico. Para el año 1269 Pierre Pélerin de Maricourt redactó el *Epístola de Magnete* donde describía experimentos realizados con imanes. En 1600 William Gilbert publica *De Magnete* donde escribió lo que se conocía en ese entonces sobre los imanes. (Lowrie, 2007; Manda, 2022)



Ilustración 1.1 Brújula utilizada por los chinos durante la Dinastía Han. Imagen de acceso libre.

1.2 EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE (CMT)

ORIGEN DEL CMT

A pesar de que no tenemos la capacidad de ver ni sentir directamente los campos magnéticos podemos observar los efectos que estos producen sobre algunos materiales. Probablemente uno los efectos más conocidos, y bonitos, sean las auroras boreales ocasionadas cuando partículas cargadas del viento solar quedan atrapadas en el CMT e interaccionan con los gases de la atmósfera. Mientras experimentaba con una esfera magnetizada, William Gilbert logró imaginar que la Tierra se comportaba como un imán a

escala planetaria. Posteriormente en 1820 Hans Christian Oersted detectó que había una relación entre la electricidad y el magnetismo. (Lowrie, 2007)

Por años el origen del CMT permaneció un misterio. Con los avances en la sismología y geoquímica se descubrió que la Tierra poseía un núcleo externo líquido compuesto principalmente por hierro, una pequeña porción de níquel y unos pocos elementos ligeros, así como un núcleo interno sólido compuesto casi completamente por hierro. Con esto surgió una nueva teoría sobre el origen del CMT donde el movimiento de este fluido altamente conductor podría generar corrientes eléctricas y por consiguiente un campo magnético sin embargo este campo perdería energía de manera continua por lo que es necesario un proceso que lo regenere de manera continua. Con esto es que surge la teoría del dínamo autosostenido. (Lanza y Meloni, 2006; Lowrie, 2007)

Cuando el material del núcleo atraviesa el campo magnético ya existente, este experimenta un campo magnético deflectante, llamado campo de Lorentz, esta acción arrastra las líneas de campo hacia el eje de rotación en las que toman una configuración toroidal que queda confinada al núcleo y una configuración poloidal que sale hacia la superficie. Los mecanismos que ocasionan el movimiento del material son la convección mecánica producto de la solidificación del núcleo interno y el movimiento de rotación del planeta. (Lanza y Meloni, 2006; Lowrie, 2007)

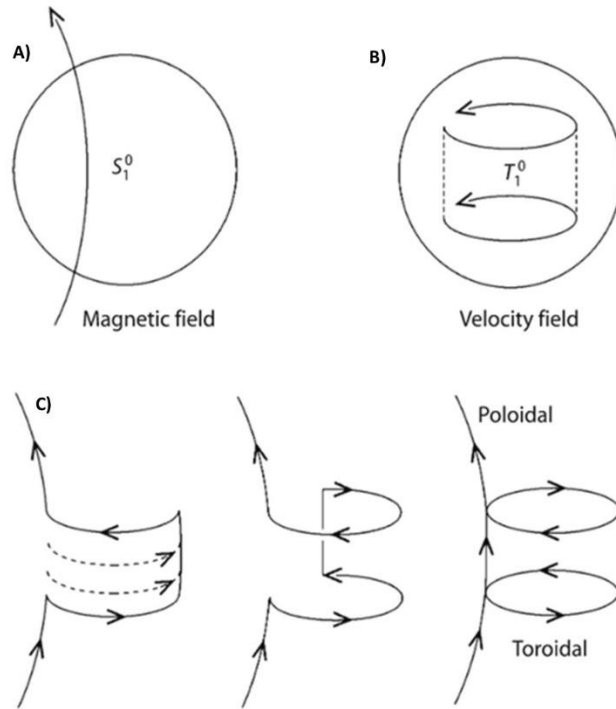


Ilustración 1.2 Procesos que llevan al dinamo autosostenido. A) Campo magnético (línea de campo) que atraviesa el manto. B) el movimiento de rotación del planeta ocasiona que el material del núcleo gire en sentido de la rotación del planeta y C) el movimiento rotación ocasiona que el campo magnético adopte una configuración toroidal confinada en el núcleo y dipodal que sale a la superficie. Modificado de Lanza y Meloni (2006).

COMPONENTES DEL CMT

Al ser un vector, el CMT tiene una intensidad y dirección. El módulo del vector se denota como F llamada intensidad, la dirección de esta depende de dos ángulos. D que se conoce como la declinación y se define como el ángulo entre el norte magnético y el norte geográfico, la inclinación I es el ángulo entre el plano horizontal y el vector de intensidad F . Otra manera de representar las componentes del CMT es una proyección sobre el plano horizontal donde H es la proyección de la intensidad F sobre la superficie y las componentes direccionales norte X y este Y . (Mandea, 2022)

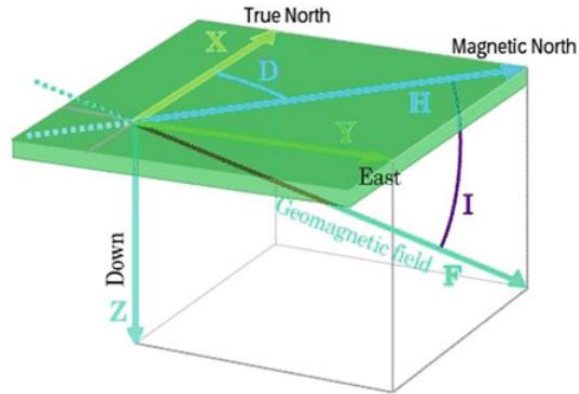


Ilustración 1.3 Representación de las componentes del vector del CMT. Tomado de Mandeia (2022).

1.3 VARIACIONES DEL CMT

El campo magnético no es estático en el tiempo, este ha tenido variaciones a lo largo de la historia de la Tierra que van desde pocas horas hasta millones de años de duración. En el caso del paleo y arqueomagnétismo son de interés la variación secular y las inversiones de polaridad (Carrancho et al., 2022; García Redondo, 2023)

VARIACIÓN SECULAR

Son cambios en intensidad y dirección respecto al norte geográfico sin un comportamiento, tasa o patrón determinado a una escala regional durante cientos a miles de años. Se origina debido a interacciones que ocurren entre el núcleo externo y el manto. (García Redondo, 2023)

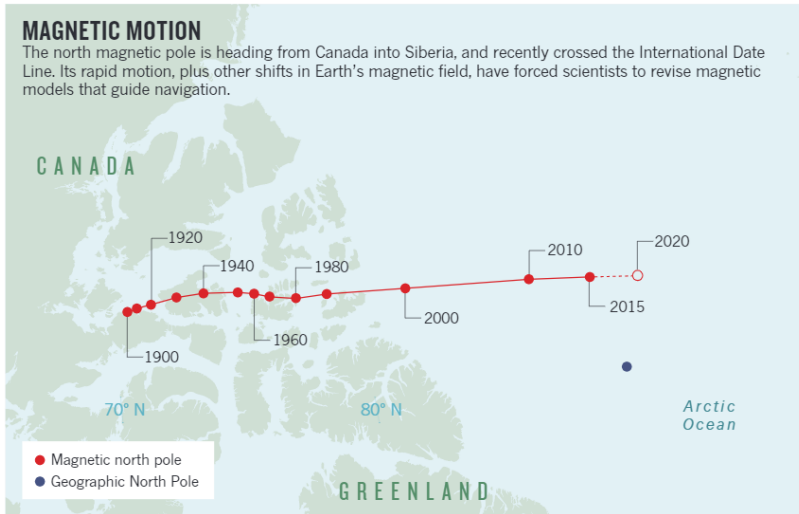


Ilustración 1.4 Desplazamiento del norte magnético terrestre de 1900 al 2020. Créditos: World Data Center for Geomagnetism/Kyoto Univ.

INVERSIONES MAGNÉTICAS

Este es un fenómeno en el cual ocurre un intercambio en la polaridad del CMT, es decir, hay una inversión entre los polos N-S. A los periodos en los que el norte magnético coincide con el polo norte geográfico se le denomina polaridad normal, cuando ocurre la configuración contraria se denomina polaridad inversa. (Lowrie, 2007; García Redondo, 2023)

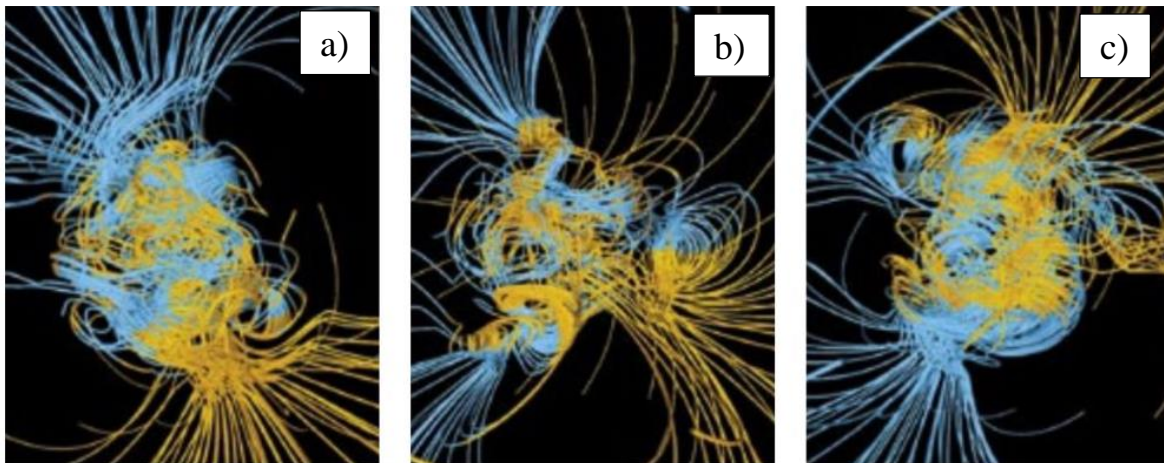


Ilustración 1.5 Representación de las variaciones del CMT. A) Polaridad normal, B) Proceso de inversión donde la configuración dipodal se pierde y C) Polaridad inversa. Modificado de García Redondo (2023).

1.4 EL MAGNETISMO EN LOS MATERIALES

A nivel atómico el movimiento de los electrones al rededor del núcleo produce una corriente eléctrica los cuales tiene asociados un momento magnético. La suma vectorial de estos momentos magnéticos por unidad de volumen se conoce como magnetización. El valor de la magnetización depende del grado de alineamiento de cada uno de los momentos magnéticos. (Lowrie, 2007)

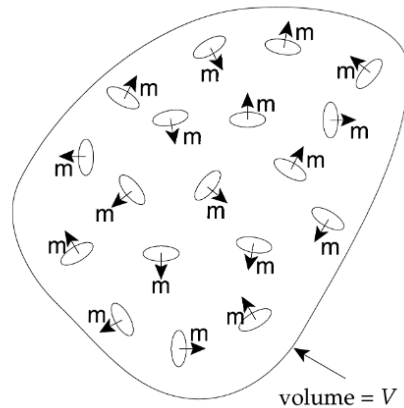


Ilustración 1.6 Representación de los momentos magnéticos individuales (m) ocasionados por el movimiento de los electrones dentro de un material de volumen V . La magnetización total del material está dada por la suma vectorial de cada momento magnético. Tomado de Lowrie (2007).

En presencia de un campo magnético externo \mathbf{H} toda la materia presenta algún tipo de reacción en la cual sus momentos magnéticos tienden a alinearse de alguna manera con este campo, por lo que el material va adquiriendo una magnetización proporcional al campo magnético al que está expuesto. La función en la que un material adquiere una magnetización está dada por:

$$M = \chi H \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Dónde \mathbf{M} es la magnetización que adquiere el material, \mathbf{H} el campo magnético aplicado y χ se conoce como susceptibilidad magnética la cual es una medida sobre la facilidad de un material de adquirir una magnetización. Se han observado tres comportamientos en los materiales en base al valor de su susceptibilidad magnética los cuales son paramagnéticos, diamagnéticos y ferromagnéticos. (Butler, 1992; Lowrie, 2007)

1.5 TIPO DE MATERIALES MAGNETICOS

DIAMAGNÉTICOS

En este tipo de materiales cuando se aplica un campo magnético externo sus momentos magnéticos se alinean de manera opuesta al campo aplicado adquiriendo una magnetización negativa débil que desaparece una vez que se retira el campo magnético externo.

PARAMAGNÉTICOS

Cuando se aplica un campo magnético externo los momentos magnéticos del material se alinean en el mismo sentido que el campo por lo tanto el material adquiere una magnetización positiva débil que desaparece una vez se retire el campo magnético externo.

FERROMAGNÉTICOS

En estos materiales los átomos se encuentran lo suficientemente cerca como para compartir electrones. Este intercambio de electrones permite que los momentos magnéticos estén alineados en una misma dirección en lo que se denominan dominios magnéticos. En presencia de un campo magnético externo los dominios magnéticos se alinean con el campo por lo que el material adquiere una fuerte magnetización, cuando el campo externo es retirado el material permanece magnetizado por lo que guarda un registro proporcional al campo que se le aplicó. (Butler, 1992; Lanza y Meloni, 2006; Lowrie, 2007)

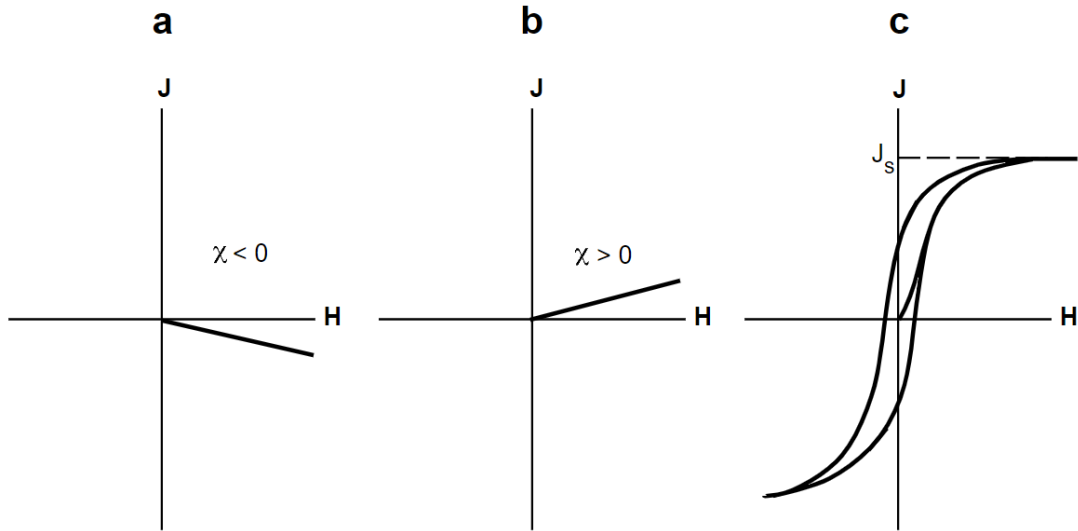


Ilustración 1.7 Clasificación de los materiales según el valor de su susceptibilidad magnética [χ]. A) Materiales diamagnéticos con $\chi < 0$ que adquieren una magnetización negativa. B) Materiales paramagnéticos con $\chi > 0$ por lo que adquieren una magnetización positiva. C) Comportamiento de los materiales ferromagnéticos donde se observa que el proceso de magnetización y desmagnetización no es reversible, χ no es una simple constante. Tomado de Butler (1992).

1.6 DOMINIOS MAGNÉTICOS

DOMINIO SENCILLO (*SD*)

Hay un único dominio donde todos los momentos magnéticos están alineados en una sola dirección lo que les permite guardar la magnetización de una manera muy estable en el tiempo. Ocurre en granos muy finos de minerales ferromagnéticos.

DOMINIO MÚLTIPLE (*MD*)

Cuando los granos de los minerales son muy grandes estos se vuelven inestables para mantener una magnetización homogénea por lo que la magnetización se divide en pequeños dominios. Esto hace que los minerales de domino múltiple sean inestables para guardar el registro del CMT en el tiempo.

PSEUDO DOMINIO SENCILLO (*PSD*)

Cuando el grano está de un tamaño intermedio entre las partículas de SD y MD pueden contener solo unos pocos dominios que se denominan de pseudo dominio sencillo,

esto las vuelve más estables que los de dominio múltiple pero no tan estables como los de dominio sencillo. (Lanza y Meloni, 2006)

1.7 TEMPERATURA DE CURIE (T_C)

Este es el valor de temperatura en la que la magnetización de un material se pierde, cuando la temperatura vuelve a estar por debajo de la T_C el material vuelve a adquirir una magnetización. Esta temperatura es característica para cada mineral ferromagnético. (Tauxe, 2010)

Tabla 1.1 Temperaturas de Curie de diferentes minerales magnéticos.

Mineral	T_C [°C]
Magnetita (Fe_3O_4)	575
Maghemita (Fe_3O_4)	590-675
Hematita (Fe_2O_4)	675
Goetita ($FeOOH$)	60-130
Greigita (Fe_3S_4)	330

1.8 MECANISMOS DE ADQUISICIÓN DE MAGNETIZACIÓN

Las rocas están compuestas por un conjunto de minerales, la baja concentración de minerales ferromagnéticos presentes les da sus propiedades magnéticas, la más importante es la habilidad de guardar un registro del vector completo (F , D e I) del CMT. Este registro del CMT puede ser conservado de manera estable a través del tiempo a no ser que haya alguna alteración térmica o química que modifique el orden de los dominios o altere la mineralogía portadora de la magnetización. (Lanza y Meloni, 2006; Lowrie, 2007)

El valor remanente de magnetización de un material se conoce como magnetización natural remanente (NRM) el cual es un vector que puede estar compuesto por una o más componentes adquiridas de diferentes maneras y en distintos momentos del tiempo. A la remanencia adquirida durante o lo más próximo a la formación del material se le conoce como componente primaria, cuando el material adquiere una magnetización posterior se conoce como una componente secundaria. (Lowrie, 2007)

MAGNETIZACIÓN TERMOREMANENTE (TRM)

La magnetización termoremanente es uno de los mecanismos más importantes de adquisición de magnetización en rocas ígneas y metamórficas, así como en artefactos arqueológicos. Ocurre durante el enfriamiento de los materiales cuando estos superan la T_c de sus minerales ferromagnéticos. A altas temperaturas la energía térmica ocasiona que los momentos magnéticos se mantengan desordenados, conforme la temperatura disminuye los momentos magnéticos quedan bloqueados en una dirección de mínima energía que corresponde a la dirección del CMT del momento. (Lanza y Meloni, 2006; Lowrie, 2007)

MAGNETIZACIÓN REMANENTE DETRÍTICA (DRM)

Este mecanismo de adquisición de magnetización ocurre durante la deposición y consolidación de las rocas sedimentarias. Los dendritos de magnetita son el mineral ferromagnético más común. Durante el proceso de sedimentación las partículas suspendidas en el agua se orientan en dirección del CMT. La suma estadística de los momentos magnéticos es lo que le da la magnetización a la roca. Sin embargo, hay procesos mecánicos que pueden afectar la alineación de los momentos magnéticos por ejemplo agua turbulenta durante la deposición lo que repercute en la precisión del registro del CMT. (Butler, 1992; Lanza y Meloni, 2006; Lowrie, 2007)

MAGNETIZACIÓN QUÍMICA REMANENTE (CRM)

La formación de un mineral ferromagnético por debajo de su T_c le permite adquirir una magnetización remanente conocida como magnetización remanente química. Esta puede ocurrir por la alteración de un mineral que pasa a modificarse a un mineral ferromagnético o por la precipitación de minerales ferromagnéticos de una solución. (Butler, 1992; Lanza y Meloni, 2006)

1.9 MINERALOGÍA MAGNÉTICA

Una parte importante de los estudios arqueo y paleomagnéticos es el estudio de los minerales portadores de la magnetización. Los minerales magnéticos más importantes son los óxidos de hierro-titanio. (Lowrie, 2007; Tauxe, 2010)

Una forma de representar los óxidos de hierro-titanio es mediante un diagrama ternario, en las esquinas se tienen el rutilo, wüstita y la hematita. De este diagrama las series más relevantes para el paleo y arqueomagnetismo corresponden a la de la titanomagnetita y titanohematita.

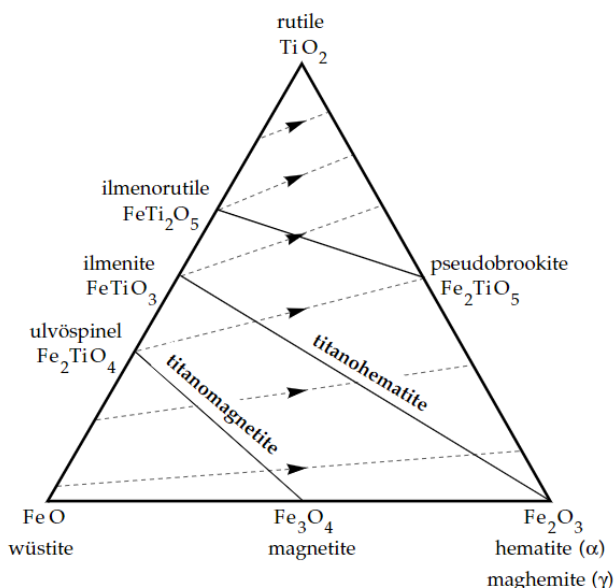


Ilustración 1.8 Diagrama ternario de los óxidos de hierro-titanio. Tomado de Lowrie (2007).

TITANOMAGNETITAS

Es el nombre que reciben los óxidos de hierro con fórmula $Fe_{3-x}Ti_xO_4$. La magnetita (Fe_3O_4) es uno de los minerales ferromagnéticos más importantes debido a su fuerte magnetización $M_s = 4.8 \times 10^5 \text{ Am}^{-1}$ y alta T_C de $578 \text{ }^\circ\text{C}$, estos valores disminuyen conforme aumenta el contenido en titanio. En muchas rocas ígneas y sedimentarias el valor de su susceptibilidad magnética es proporcional a su contenido de magnetita. (Lowrie, 2007)

TITANOHEMATITAS

Los minerales extremos de esta serie son la hematita (Fe_2O_3) y la ilmenita ($FeTiO_3$). Su fórmula general es $Fe_{2-x}Ti_xO_3$. La hematita es uno de los minerales más importantes debido a su ocurrencia natural, así como su estabilidad magnética y química. Su magnetización espontánea es de $M_s = 2.2 \times 10^3 \text{ Am}^{-1}$ y su $T_c = 675 \text{ }^\circ\text{C}$. (Lowrie, 2007)

1.10 ARQUEOMAGNETISMO

El arqueomagnetismo se encarga de estudiar el CMT del pasado que queda registrado en materiales arqueológicos que han sido sometidos a altas temperaturas. Esta disciplina tuvo sus orígenes durante los años 40 del Siglo XX con los trabajos pioneros de E. Thelier en Francia y posteriormente los trabajos de M. Kovacheva. (Carrancho et al., 2022)

Muchos materiales arqueológicos, como suelos, sedimentos o arcillas, presentan óxidos de hierro como la magnetita, hematita o maghematita (Batt, 2013). Si estos materiales son expuestos a procesos de calentamiento intensos, por encima de la T_C de sus minerales portadores de la magnetización, estos guardan un registro del CMT. Además, si la posición del material no cambia en el tiempo este se convierte en un registro del vector magnético completo (**F**, **D** e **I**). Este registro puede ser reescrito si el material nuevamente es expuesto a algún proceso de calentamiento intenso, por lo que el registro magnético puede estar asociado al momento de fabricación o último uso del artefacto arqueológico. (Carrancho et al. 2022)

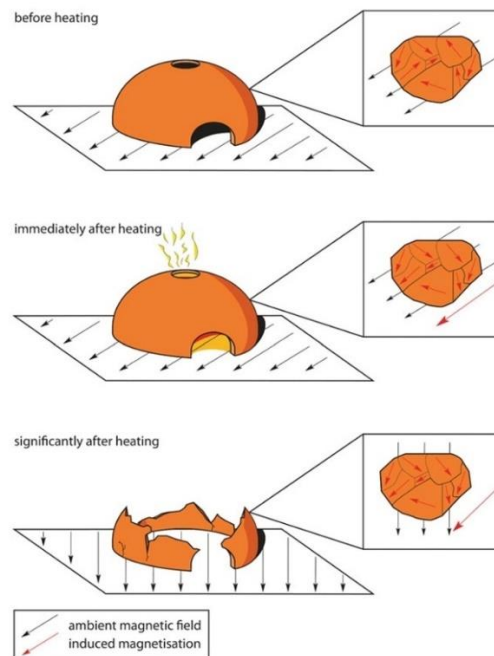


Ilustración 1.9 Proceso de adquisición de la magnetización en artefactos arqueológicos. Inicialmente los momentos magnéticos se encuentran orientados de manera aleatoria por lo que la magnetización es cero. Después de un proceso de calentamiento intenso los momentos magnéticos tienden a alinearse en la dirección

del CMT del momento. Posteriormente los momentos magnéticos conservan su dirección a pesar de que el CMT haya cambiado. Tomado de Batt (2013).

1.11 ARTEFACTOS DE INTERÉS

Debido a que la mayoría de los materiales arcillosos presentan minerales ferromagnéticos, existe un alto número de artefactos arqueológicos que han sido sometidos a altas temperaturas que son candidatos para estudios arqueomagnéticos como son hornos, sedimentos quemados, ladrillos o cerámicas. (Carrancho et al., 2022)

1.12 ESTUDIOS DIRECCIONALES

Los artefactos que no han cambiado de posición desde la última adquisición de su magnetización son conocidas como muestras orientadas. Estas pueden ser sometidas a procesos de desmagnetización progresiva, por medio de temperatura o campos magnéticos alternantes, en el que en el que durante cada paso de desmagnetización se obtiene un vector de la magnetización restante de la muestra. Los diagramas ortogonales o de Zijderveld permiten observar las componentes del vector magnético mediante cambios en la dirección del vector magnético. (García Redondo, 2023)

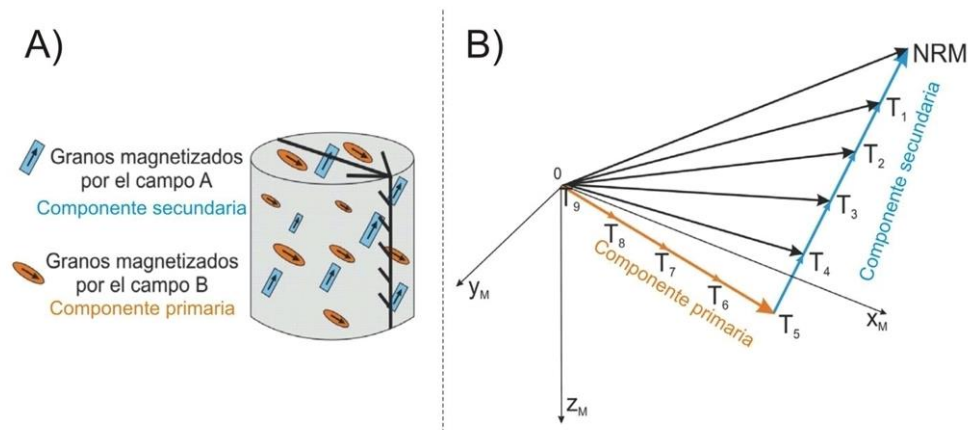


Ilustración 1.10 A) Muestra con dos componentes magnéticas. B) Desmagnetización progresiva vista en un diagrama de Zijderveld donde se observan las dos componentes magnéticas que componen al vector de la MNR. Tomado de García Redondo (2023).

Para el análisis de las direcciones se trabaja con la componente principal ligada a la fabricación o último uso del artefacto. Durante cada paso se obtiene un vector de la

magnetización remante, los vectores que se obtienen y pertenecen a una misma componente magnética tendrán valores similares de **D** e **I**, por lo que cuando se proyecten en un estereograma estos tenderán a agruparse. (García Redondo, 2023)

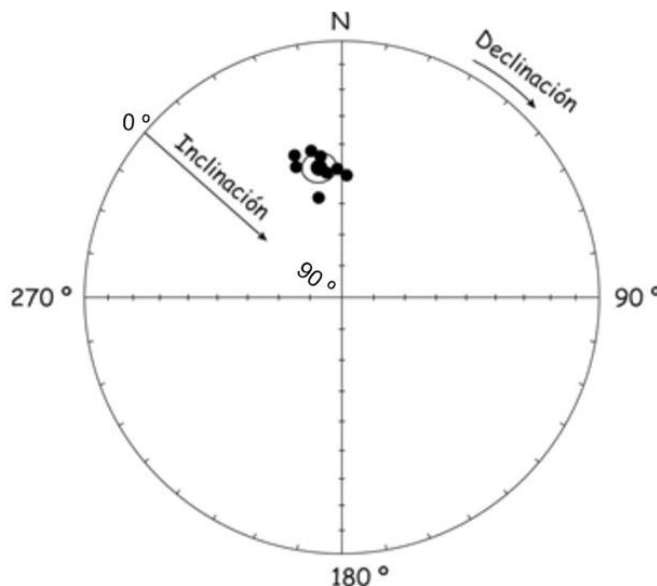


Ilustración 1.11 Proyección estereográfica. El valor de declinación se mide a lo largo de la circunferencia de 0° a 360° en sentido horario, la declinación se mide de 0° a 90° desde la circunferencia al centro del círculo. Durante una desmagnetización progresiva los vectores de una misma componente tenderán a agruparse. Tomado de García Redondo (2023).

1.13 ESTUDIOS DE ARQUEOINTENSIDAD

La determinación de la arqueointensidad es un proceso más complejo debido a que los materiales adquieren únicamente una magnetización proporcional a la del CMT. Es decir, un material adquiere una magnetización (**M_{NMR}**) que es proporcional (**V_{ANC}**) al CMT del pasado (**B_{ANC}**). (Tauxe, 2010; García Redondo, 2023)

$$M_{NMR} = V_{ANC} B_{ANC} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

En principio es posible determinar el valor del CMT antiguo debido a que los mecanismos de magnetización están relacionados linealmente (Tauxe, 2010). Por lo que si a la muestra es expuesta a un campo magnético de laboratorio conocido (**B_{LAB}**) adquirirá una magnetización (**M_{LAB}**) que será proporcional (**V_{LAB}**) al campo aplicado.

$$M_{LAB} = V_{LAB} B_{LAB} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Estas constantes de proporcionalidad (V_{ANC} y V_{LAB}) en principio son iguales por lo que combinando las ecuaciones 1.2 y 1.3 se observa que únicamente se necesita medir la M_{NRM} y la M_{LAB} .

$$M_{NMR} = V_{ANC} B_{ANC}$$

$$M_{LAB} = V_{LAB} B_{LAB}$$

$$V_{ANC} = V_{LAB} \rightarrow B_{ANC} = \frac{M_{NMR}}{M_{LAB}} B_{LAB} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

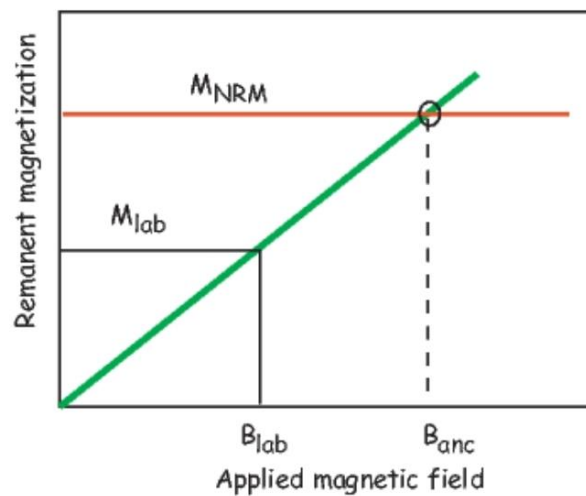


Ilustración 1.12 Principios de la estimación de la arqueointensidad (B_{ANC}). La M_{NMR} es proporcional al B_{ANC} . La línea verde representa la constante de proporcionalidad V que puede calcularse conociendo el B_{LAB} y la M_{LAB} lo que permite estimar el valor del B_{ANC} . Tomado de Tauxe (2010).

1.14 CURVAS DE VARIACIÓN SECULAR (CVS)

El conjunto de datos arqueo y paleomagnéticos permiten crear modelos donde es posible observar la variación que ha tenido el CMT en sus distintas componentes a lo largo del tiempo. Dependiendo de la disponibilidad de estudios previos es posible obtener CVS

para una zona determinada o sí nos es el caso, modelos regionales o mundiales sintéticos estimados por modelos matemáticos. (Carrancho et al., 2022)

MODELOS LOCALES

Estas curvas están calculadas para una región específica con datos arqueo o paleomagnéticos de estudios previos y están en constante actualización conforme se van añadiendo nuevos estudios lo que permite extenderlas más atrás en el tiempo o disminuir su incertidumbre para algunos intervalos de tiempo. (Carrancho et al., 2022)

MODELOS REGIONALES O GLOBALES

En regiones donde no se tienen los suficientes datos para calcular una curva de variación secular local es posible obtener una curva sintética utilizando los datos disponibles en una región continental o global para ciertos intervalos de tiempo. (Carrancho et al., 2022)

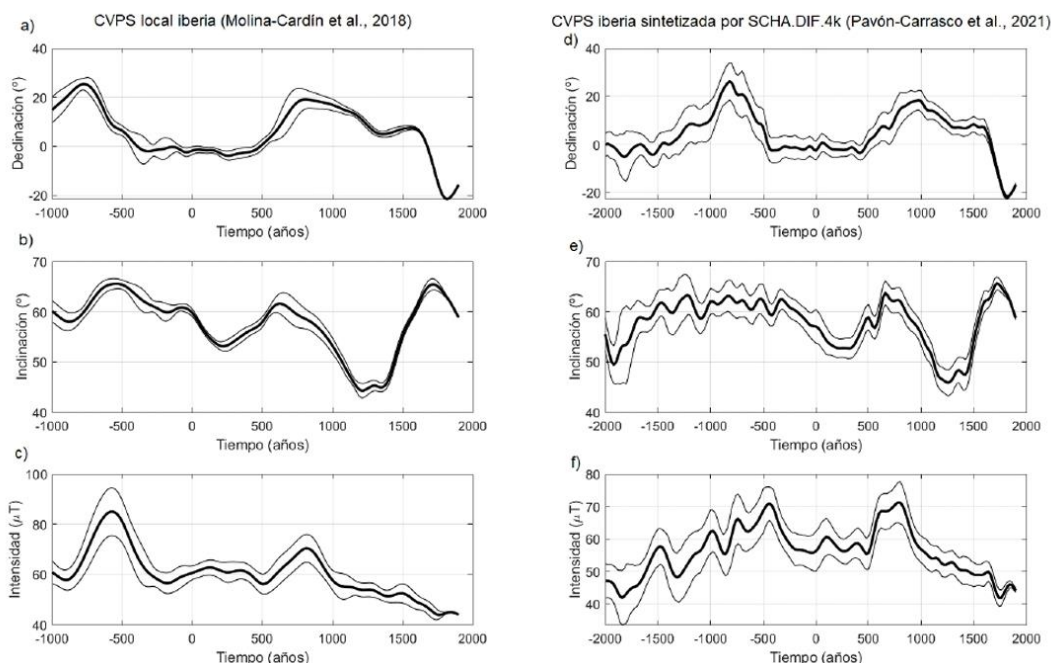


Ilustración 1.13 Curvas de variación secular de las componentes del CMT. Comparativa entre una CVS local y una CVS calculada de manera sintética ambas referenciadas para Madrid, España. A), B), C) CVS local desarrollada por Molina-Cardín y colaboradores en el 2018. D), E), F) Curva sintetizada con el modelo SCHA.DIF.4K desarrollada por Pavón-Carrasco y colaboradores en el 2021. Modificado de Carrancho et al. (2022).

1.15 EL ARQUEOMAGNETISMO COMO UN MÉTODO DE FECHAMIENTO

El fechamiento mediante el método arqueomagnético está basado en la comparación del vector del CMT del pasado registrado en los artefactos arqueológicos con las curvas de variación secular donde, se busca que los valores de dirección, intensidad o combinados coincidan con estas curvas y mediante métodos estadísticos donde se combinan estas probabilidades es que se obtienen intervalos de tiempo utilizados para fechar artefactos arqueológicos. Dependiendo de la calidad de las determinaciones, la disponibilidad de una curva local de variación secular y su incertidumbre es posible obtener con el método arqueomagnético determinaciones con una precisión de hasta ± 50 años. (Batt, 2013; Carrancho et al., 2022)

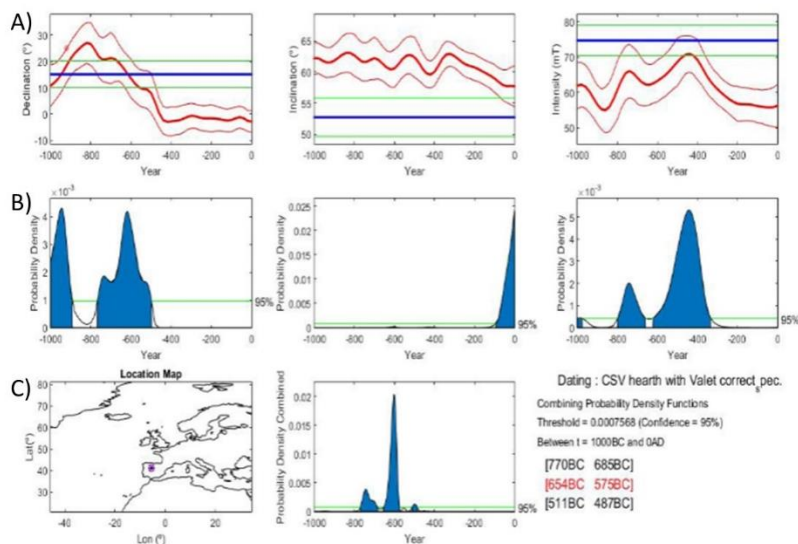


Imagen. 1.1 Ejemplo de fechamiento de un hogar en el Cerro de San Vicente en Salamanca, España mediante el arqueomagnetismo. A) Las líneas rojas representan la variación de las componentes (Intensidad, D e I) del CMT, la línea azul corresponde a los datos arqueomagnéticos que serán utilizados para la datación. B) Se observa las probabilidades combinadas de las tres componentes. Modificado de Carrancho et al. (2022).

1.16 LIMITANTES DEL FECHAMIENTO ARQUEOMAGNÉTICO

Existen muchos factores que influyen en la precisión que es posible obtener mediante el método arqueomagnético. De estas, la principal es la precisión de la CVS utilizada (Batt, 2013). Además, la misma curva de referencia es la que determinará el rango temporal con el que puede aplicarse el fechamiento. (Carrancho et al., 2022)

Además de la precisión y rango temporal de la curva de variación secular otros factores que influyen en la precisión del fechamiento son:

- La precisión de la determinación de las componentes del CMT antiguo.
- El uso de las componentes direccionales del CMT o el vector magnético completo.
- La variabilidad del campo magnético en el tiempo.

Debido a la variabilidad del CMT en distintos momentos del tiempo es posible obtener más de un intervalo temporal donde ambos son igualmente probables de ser correctos, por lo que es necesario conocer el contexto arqueológico para poder descartar intervalos temporales incoherentes. (Carrancho *et al.*, 2022).

CAPÍTULO 2 SOCIEDADES ALFARERAS

TEMPRANAS

2.1 INTRODUCCIÓN

El Caribe Colombiano se caracteriza por su diversidad de microambientes en donde predominan colinas y pastizales que sufren inundaciones de manera estacional. La colonización de esta región del continente comenzó hace unos 11 mil años. Posteriormente durante el periodo Arcaico y Formativo se presentan migraciones estacionales de poblaciones que dependían fuertemente de los recursos disponibles en los diferentes microambientes que habitaban. Alrededor del año 4000 a.C. es que se inventa la cerámica. A pesar de su importancia, el pasado arqueológico del Caribe Colombiano sigue siendo poco conocido. El primer intento para ordenar cronológicamente el pasado prehispanico de Colombia fue realizado por Reichel-Dolmatoff (1965) donde utilizó datos regionales y cronológicos ubicando distintas culturas arqueológicas en diferentes épocas de desarrollo, sin embargo, periodos como el Arcaico quedaron poco definidos debido a la escasa información disponible durante la época. (Reichel-Dolmatoff, 1965; Oyuela-Caycedo, 2008; Loaiza Díaz y Aceituno Bocanegra, 2015)

2.2 EL CARIBE COLOMBIANO

El poblamiento de esta región del continente comenzó durante el periodo Paleoindio hace unos 11 mil años al ser una ruta sencilla para los primeros colonizadores que se adentraban hacia el Este del continente americano. Posteriormente con la introducción de la cerámica alrededor del 4000 a.C. se dio inicio al Periodo Arcaico y Formativo donde las poblaciones realizaban migraciones en respuesta a la disponibilidad estacional de los recursos.

En las partes bajas de Colombia, la reducción en la movilidad de las poblaciones permitió la aparición de formas de poder descentralizado asociadas a jefaturas, siendo Sinú y Tairona las primeras. Ambas se caracterizaron por la compleja transformación del paisaje natural que habitaban, aunque se diferenciaban por el contexto en donde se desarrollaron. La región de Sinú se formó en un sistema ecológico complejo de drenajes fluviales y sabanas

interfluviales que presentaban inundaciones de manera estacional mientras que la región de Tairona se desarrolló en una región montañosa con pendientes de más de 45° y suelos pobres, pero rico en recursos marinos. (Oyuela-Caycedo, 2008)

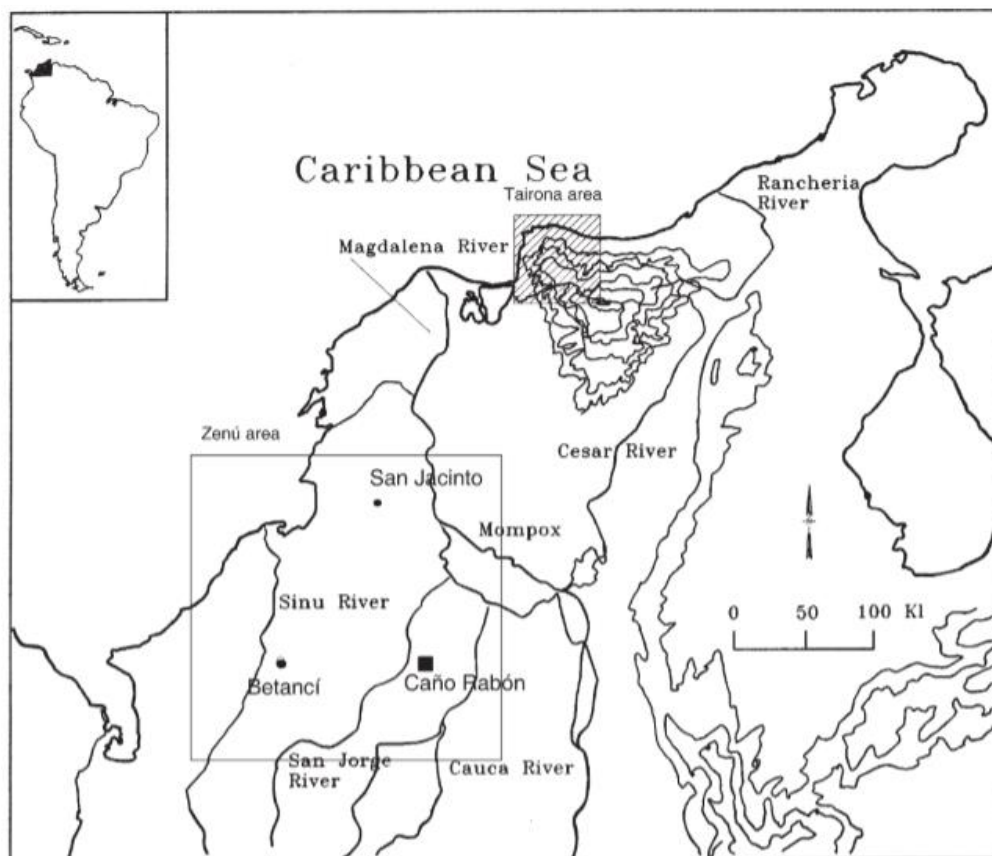


Ilustración 2.2.1 Localización de las Jefaturas de Sinú y Tairona. Tomado de Oyuela-Caycedo (2008).

2.3 EL PERIODO PALEOINDIO

El conocimiento sobre el periodo Paleoindio en la costa atlántica colombiana es limitado debido a la característica de los yacimientos de la época que han sido excavados, principalmente se han encontrado superficialmente fragmentos de artefactos en colinas erosionadas o terrazas antiguas. No se tienen fechas absolutas para sitios del Paleoindio, únicamente se han obtenido edades relacionando cronológicamente con otros sitios mediante la comparación de artefactos. Con los vestigios encontrados es que se sabe que las sociedades paleoindias eran cazadoras-recolectoras y pescadoras. A este periodo pertenecen los sitios de Puerto Hormiga y Puerto Badel. (Rodríguez *et al.*, 1987)

2.4 EL PERIODO ARCAICO

Reichel-Dolmatoff (1965) consideraba un periodo de transición en donde las sociedades de la costa colombiana pasaron de ser nómadas depredadoras líticas a sociedades semisedentarias recolectoras con indicios de cultivos de raíces, aunque siendo aún precerámicas. Sin embargo, este periodo de transición ha sido reconsiderado debido a descubrimientos posterior de nuevos sitios precerámicos con claros indicios de actividades agrícolas. (Reichel-Dolmatoff, 1965; Rodríguez *et al.*, 1987)

2.5 EL PERIODO FORMATIVO

De acuerdo con Reichel-Dolmatoff (1965) las sociedades de este periodo eran agrícolas sedentarias que desarrollaron tecnologías que les permitieron el aprovechamiento de los distintos recursos disponibles. Este periodo está marcado por la invención de la cerámica. Cronológicamente el periodo se ubica entre el 7000 y 1000 a.C. Las sociedades del formativo subsistían por medio de la caza, recolección e inicialmente con el cultivo de raíces silvestres como la yuca y posteriormente el cultivo de maíz. Este periodo se divide cronológicamente en el Formativo Temprano, Medio y Tardío. (Reichel-Dolmatoff, 1965; Rodríguez *et al.*, 1987)

2.6 TRADICIONES ALFARERAS TEMPRANAS

Por su posición geográfica el Caribe Colombiano ha sido un sitio de intercambio de personas, objetos y conocimiento. De acuerdo con las excavaciones en sitios como San Jacinto I, la cerámica se inventó alrededor del año 4000 a.C. Las poblaciones caribeñas tenían una vida semisedentaria con diferentes estrategias de movilidad en grupo, dependían de la caza, recolección y la pesca que se adaptaba a los distintos microambientes que habitaban. Los principales modelos propuestos sobre el surgimiento de la cerámica en América son a) Cocción y procesamiento de alimentos, b) Almacenar alimentos y c) Festividades. (Pratt, 1999; Oyuela-Caycedo, 2008; Carvajal-Contreras, 2022)

Estas cerámicas tempranas estaban caracterizadas por el uso de desgrasantes vegetales, aditivos que le dan resistencia mecánica y térmica, en sitios del Formativo temprano como San Jacinto, Puerto Hormiga y el mismo Puerto Chacho. En estos sitios inicialmente

predominó la forma de tazones semiesféricos conocidos como tecomates, el uso del pellizado y modelado por rollos. Tanto la ausencia de hollín, la forma y tamaño de las cerámicas sugieren que estas no eran utilizadas para cocinar, posiblemente eran utilizadas para servir o almacenar alimentos. (Pratt, 1999; Carvajal-Contreras, 2022)



Ilustración 2.2.2 Reconstrucción del tecomate encontrado en Puerto Chacho. Fotografía por el Museo Nacional de Colombia.

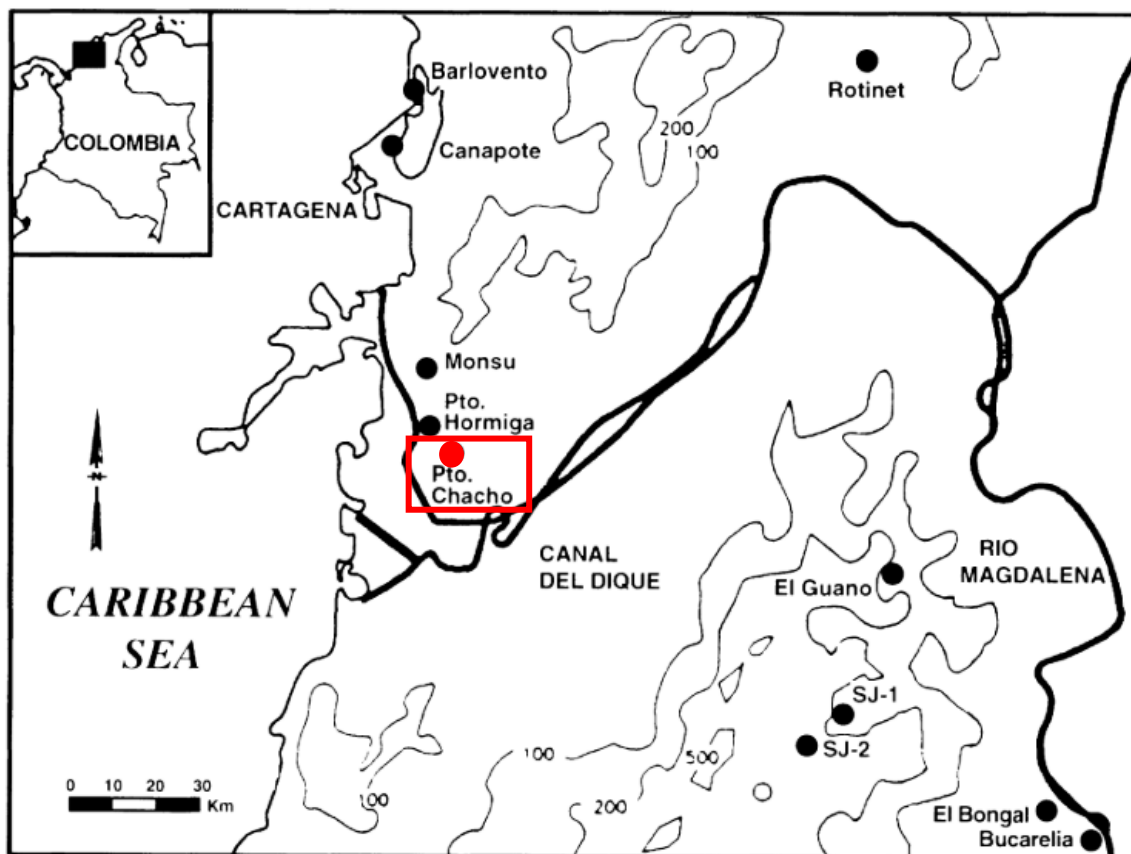
Posteriormente durante el Formativo medio se diversificaron las formas de las cerámicas donde aparecieron ollas globulares o cuencos esféricos, se emplea el uso de desgrasantes minerales como son la arena presente en las cerámicas de los niveles superiores de los sitios San Jacinto I y II. (Pratt, 1999; Carvajal-Contreras, 2022)

Por años la edad asociada de 3090 ± 70 a.C. obtenida por Reichel-Dolmatoff (1965) fue considerada las más antiguas para una cerámica en el continente. Posteriormente Oyuela Caycedo (1987) publica una edad de 3750 ± 430 a.C. para la ocupación final del sitio de San Jacinto (Oyuela Caycedo, 1987; Rodríguez, 1988)

2.7 EL CONCHAL DE PUERTO CHACHO

El sitio arqueológico conocido como el Conchal de Puerto Chacho fue descubierto y excavado en 1988, se localiza sobre el margen derecho del Canal del Dique en el municipio de Arjona, Departamento de Bolívar a unos kilómetros de la costa del Caribe Colombiano y a 30 Km de la ciudad de Cartagena. Este conchal es parte de una serie de conchales consecutivos cercanos pertenecientes al Formativo Temprano en los que se encuentran cerámicas con las tradiciones tempranas como los desgrasantes vegetales. De la excavación

inicial se obtuvo una edad de radiocarbono de 3270 ± 90 años a.C. para uno de los estratos medios por lo que es probable que la ocupación inicial del sitio sea aún más antigua. (Rodríguez, 1988; Legros, 1989; Álvarez León y Maldonado Pachón, 2009)



Mapa 2.1 Ubicación del Conchal de Puerto Chacho. Modificado de Pratt (1999).

El sitio se encuentra sobre una terraza aluvial que se levanta 12 m de manera abrupta sobre el nivel subacuático con un perímetro de 84 m. Los 1.2 m de estratos se constituyen por cuatro capas de acumulación de desechos de cocina y cerámicas.

Capa 1

Constituida por humus color oscuro y dividida en 1A y 1B. Presenta ostras molidas que aumentan en la capa 1B.

Capa 2

Dividida en dos unidades estratigráficas, la 2A y 2B. La unidad 2A se constituye de un sedimento claro con un porcentaje de acumulación de conchas mayor al de la capa 1B.

Para la unidad 2B desaparece el sedimento casi en su totalidad y se compone de acumulación de conchas enteras mezcladas con ictiofauna y carbón el cual fue fechado en 3270 a.C.

Capa 3

Esta capa se conforma por las unidades 3A y 3B, siendo la B la más compleja. La capa 3A aparece envuelta en un sedimento franco-arenoso de tonalidad grisácea.

Capa 4

Esta capa corresponde a la ocupación inicial del sitio sobre un nivel de playa arenosa amarilla. Está caracterizada por la ausencia de conchas y una abundante presencia de material arqueológico. (Legros, 1989)

Tabla 2.1 Edades de radiocarbono disponibles para Puerto Chacho. La calibración de estas se realizó utilizando la curva IntCal20 (Reimer *et al.*, 2020). Modificado de Legros (1992).

Unidad estratigráfica	Material	Datación 14C [a.C.]	Intervalo no calibrado	Intervalos calibrados [a.C]	Calibración 2σ IntCal20 [calBC]
				3815–3878	
J–2B	Carbón	3270 ± 90	3180 - 3360	3910-4245	4320-3801
				4285-4317	
J–3	Conchas	2780 ± 70	2710 -2850	3368-3667	3637-3371
J–3A	Conchas	2880 ± 70	2810 – 2950		3773-3378
J–3B	Conchas	2850 ± 50	2800 – 2900		3653-3380
J– 4	Tierra carbonizada	2490 ± 90	2400 - 2580	2922-3351	3358-2910

Gracias a los restos arqueológicos hallados junto con la edad por radiocarbono asociada, se sabe que el sitio fue habitado por una de las primeras poblaciones alfareras del continente americano y que posiblemente fue ocupado de manera ocasional por unos 300

años entre el 3300 y 3000 a.C. (Álvarez León y Maldonado Pachón, 2009; Carvajal-Contreras, 2022)

En el sitio predominaron los manglares, el bosque subhúmedo y por su cercanía a la zona costera recursos faunísticos del que se han encontrado restos de moluscos, peces, mamíferos y reptiles. La acumulación compleja de sedimentos antrópicos con diferente composición sugiere que el conchal fue habitado de manera indeterminada y en distintos momentos por grupos humanos con tecnología similar y que hacían un aprovechamiento óptimo de los recursos del manglar. Las características ambientales de los manglares no permiten en principio sostener una población numerosa, los recursos se ven agotados rápidamente, por lo que es posible que el sitio fuese ocupado por pequeños grupos semisedentarios, quizá familias numerosas, de manera estacional para aprovechar los recursos que se volvían disponibles. (Álvarez León y Maldonado Pachón, 2009)

La cerámica posiblemente era utilizada para transportar agua o alimentos. Estas cerámicas no fueron utilizadas para la recolección de moluscos debido a la poca abundancia de material cerámico. Debido a que únicamente se ha encontrado una vasija completa la producción de cerámicas no fue una actividad sobresaliente de los habitantes de Puerto Chacho, además, en un análisis granulométrico de los restos, se sugiere que posiblemente provienen de un sitio distinto. (Álvarez León y Maldonado Pachón, 2009)

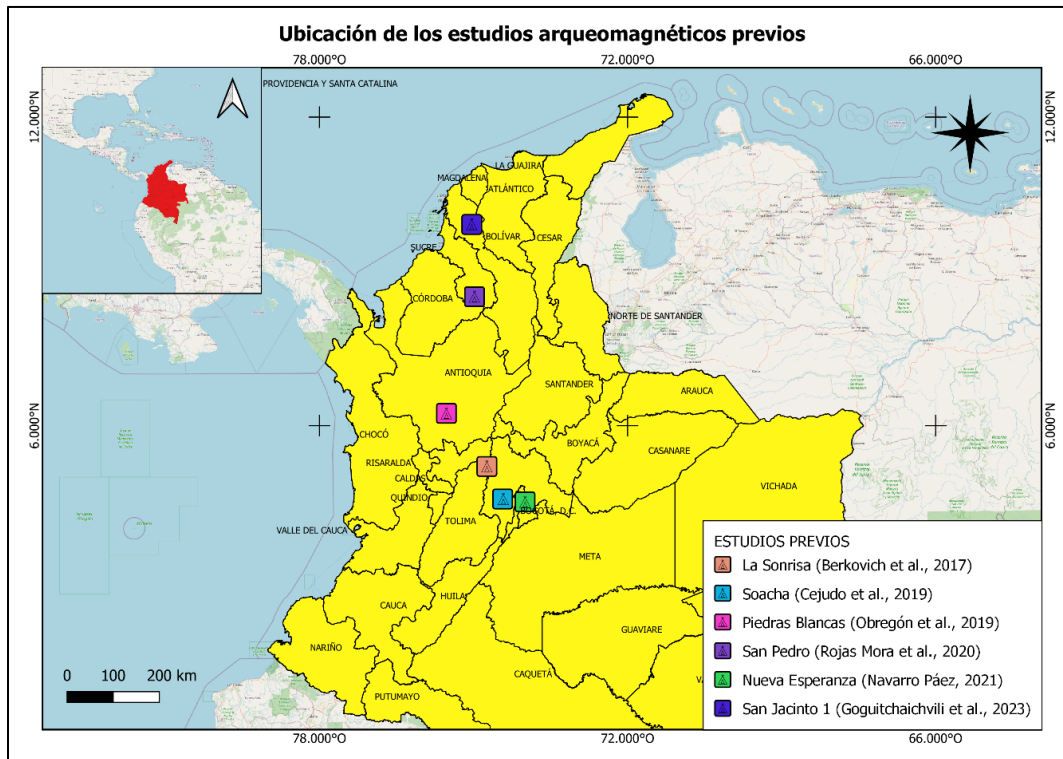
Del sitio arqueológico de Puerto Chacho destaca el uso mixto de los desgrasantes vegetales y minerales. Además, estos desgrasantes aparecen de manera simultánea lo que pone en cuestión si el uso de desgrasantes minerales es posterior a los vegetales. De los artefactos líticos recolectados, estos principalmente eran utilizados para triturar y machacar lo que es propio a los grupos paleoindios. Por lo que es posible considerar que hacía el fin del cuarto milenio a.C. pequeños grupos prehispánicos se asentaron en la región del Caribe Colombiano en sitios cercanos a ríos y manglares en los que se especializaron para aprovechar de manera óptima los recursos disponibles. (Legros, 1989)

CAPÍTULO 3 ESTUDIOS ARQUEOMAGNÉTICOS PREVIOS EN COLOMBIA

3.1 INTRODUCCIÓN

A pesar de que en las dos últimas décadas el número de estudios arqueomagnéticos publicados ha ido en aumento, estos no están distribuidos de manera uniforme a través del globo, principalmente se concentran en el hemisferio norte siendo Europa la región con el mayor número de estudios realizados. Esto dificulta la realización de estudios arqueomagnéticos fuera de estas regiones debido a la falta de datos para la construcción de una CVS local precisa y por ende obtener un fechamiento confiable (Navarro Páez, 2021). En el continente americano los estudios arqueomagnéticos se han concentrado principalmente en México, sin embargo, en los últimos años se han realizados nuevos estudios en otras regiones del continente (Rojas Mora *et al.*, 2020).

Para el caso de Colombia los datos arqueomagnéticos son aún muy escasos con únicamente 5 estudios publicados (Berkovich *et al.*, 2017; Cejudo *et al.*, 2019; Obregón *et al.*, 2019; Rojas Mora *et al.*, 2020; Goguitchaichvili *et al.*, 2023) y una tesis de máster (Navarro Páez, 2021), siendo todos estudios de arqueointensidad. De estos trabajos únicamente (Obregón *et al.*, 2019; Rojas Mora *et al.*, 2020; Navarro Páez, 2021) presentan resultados de fechamientos, aunque con rangos muy amplios de tiempo. En los trabajos previos la mayoría de los autores asocian esta falta de éxito o precisión a la falta de una CVS local, además como menciona Cejudo *et al.* (2019) debido a su posición geográfica el CMT en Colombia presenta un comportamiento diferente al resto de Sudamérica posiblemente ocasionada por contribuciones no-dipolares de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur.



Mapa 3.1 Ubicación de los estudios arqueomagnéticos realizados en Colombia. Autoría propia.

3.2 ESTUDIOS PREVIOS

El primer intento de obtener de obtener un fechamiento por medio del método arqueomagnético en Colombia lo realizó Berkovich *et al.* (2017) donde analizaron fragmentos cerámicos de los sitios arqueológicos de La Sonrisa y La Salada en la zona de los Andes noroccidentales, localizados sobre terrazas aluviales cercanas al Río Magdalena. Estos sitios fueron ocupados por sociedades agrícolas fabricantes de cerámica y orfebrería refinada desde siglos antes de la Era Común (EC) hasta la invasión española en el siglo XVI.

Tabla 3.1 Fechamientos previos para los sitios de La Sonrisa y La Salada.

Sitios de La Sonrisa y La Salada (Berkovich et. al., 2017)		
Sitio	Fechamientos previos [d.C.]	Intervalos arqueomagnéticos obtenidos
La Sonrisa	Periodo Tardío (Entre los Siglos XII y XVI)	No se logró obtener
La Salada	Periodo Intermedio (Siglo II)	No se logró obtener

A los fragmentos cerámicos se le realizaron experimentos de magnetismo de rocas para caracterizar su mineralogía magnética, componentes del vector magnético y determinar

las muestras candidatas para la determinación de la arqueointensidad mediante experimentos de tipo Thelier. El fechamiento se realizó utilizando los modelos de variación secular ARCH3K.1e y CALS10K.1b.

A pesar de haber obtenido 4 valores de arqueointensidad no fue posible obtener una tendencia clara en las variaciones de la intensidad en la región lo que se ve reflejado en la discordancia entre las determinaciones obtenidas con lo predicho por los modelos de CVS.

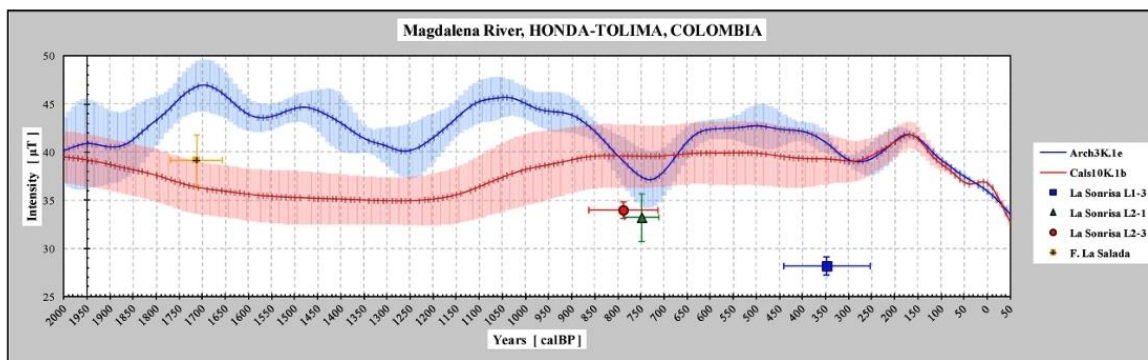


Ilustración 3.1 Comparativa entre las intensidades obtenidas para La Sonrisa y La Salada con los modelos ARCH3K.1e y CALS10K.1b donde se observa una gran diferencia entre las determinaciones y la predicción de los modelos de variación secular. Tomado de Berkovich et al. (2017).

Posteriormente Cejudo et al. (2019) realizan un estudio arqueomagnético en seis muestras cerámicas divididas en 72 fragmentos provenientes la Comunidad de Soacha ubicada en la parte sur de la Sabana Pre-Hispánica de Bogotá. De acuerdo con la información arqueológica y radiométricas los fragmentos cerámicos tienen temporalidades asociadas al 1035 ± 115 EC y al 1230 ± 110 EC.

Tabla 3.2 Dataciones radiométricas previas y arqueomagnéticas para el sitio de Soacha.

Cerámica de la Sabana Pre-Hispánica de Bogotá (Cejudo, et. al., 2019)		
Muestra	Dataciones radiométricas previas [EC]	Intervalos arqueomagnéticos obtenidos [AD]
Soacha 6	1230 ± 110	1564 - 1738
Soacha 7	1035 ± 115	

Para la caracterización mineralógica y de las propiedades magnéticas, así como la selección de muestras candidatas para los experimentos de doble calentamiento de tipo Thelier para determinar la arqueointensidad las muestras fueron sometidas a experimentos de magnetismo de rocas. Se seleccionaron 52 fragmentos cerámicos para los experimentos

de arqueointensidad al presentar estabilidad térmica y magnética. De los 52 fragmentos únicamente en 37 fragmentos se logró obtener una determinación con parámetros de calidad aceptables.

A falta de un modelo de CVS local se utilizó el modelo global SHADIF.14K del cual el intervalo más probable que se obtuvo fue 1564 – 1738 AD, el cual no era concordante con las edades obtenidas mediante radiocarbono.

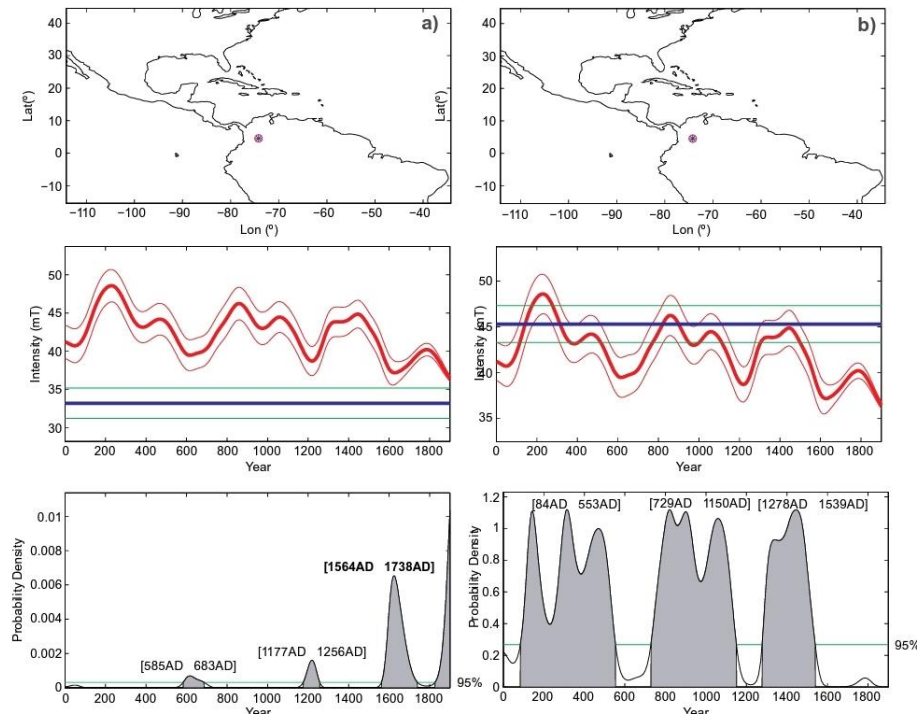


Ilustración 3.2 Datación para las muestras Soacha 6 y Soacha 7. Tomado de Cejudo *et al.* (2019).

Por lo que en este estudio se realizó una nueva aproximación utilizando datos publicados del Caribe y el sur de México para poder construir una CVS local para el Caribe referenciada a Costa Rica lo que permitió observar el comportamiento de la intensidad del CMT en la región.

Cuando se comparó esta curva del Caribe con el modelo de CVS del Centro de México y sur de Estados Unidos (CMSUS) se observaron similitudes en la variación en la intensidad del CMT. Sin embargo, cuando se comparó la curva del Caribe con la de Sudamérica (SOUTHAM) se observaron comportamientos muy distintos en la intensidad del CMT posiblemente influenciadas por contribuciones no dipolares de la Anomalía Magnética

del Atlántico Sur. Sin embargo, para realizar una datación arqueomagnética en Colombia y regiones cercanas de acuerdo con Cejudo *et al.* (2019) la mejor opción es utilizar la CVS del Caribe a falta de una CVS local.

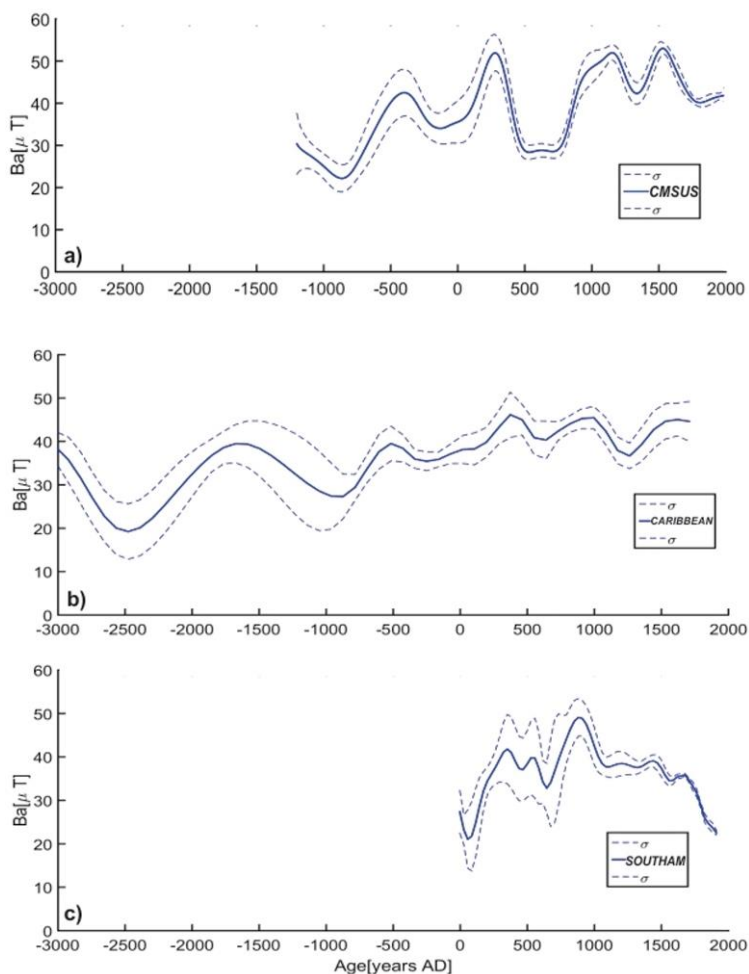


Ilustración 3.3 Comparativo de la variación paleosecular entre las curvas de a) Norteamérica (CMSUS), b) el Caribe (CARIBBEAN) y c) Sudamérica (SOUTHAM). Tomado de Cejudo *et al.* (2019).

En 2019, Obregón *et al.* realizaron un nuevo intento de datación arqueomagnética en fragmentos cerámicos prehispánicos procedentes de lugares de habitación en la cuenca alta de la quebrada de Piedras Blancas de la Cordillera Central en el departamento de Antioquia. Estas muestras fueron datadas previamente mediante el método de termoluminiscencia.

Tabla 3.3 Dataciones por termoluminiscencia previas y fechamiento arqueomagnético para el sitio de Piedras Blancas

Fragmentos cerámicos de los Andes noroccidentales (Obregón et. al., 2019)		
Muestra	Dataciones previas (Termoluminiscencia) [d.C.]	Intervalos arqueomagnéticos obtenidos [d.C.]
MED2	1574 ± 32	1208 - 1233
MED6	1632 ± 63	1581-1708
		585-678
MED10	1505 ± 24	1188-1249
		1573-1736

A los fragmentos cerámicos se les realizó un análisis completo de magnetismo de rocas para determinar sus portadores magnéticos y estabilidad térmica del vector magnético. Se logró obtener 12 determinaciones de la arqueointensidad con parámetros de calidad aceptables. Para realizar la datación se utilizó la curva SHA.DIF.14K con el que se obtuvieron intervalos de tiempo concordantes con la datación por termoluminiscencia previa.

Sin embargo, a pesar de haber obtenido intervalos concordantes con la datación por termoluminiscencia estas determinaciones tienen un rango temporal bastante amplio debido a la poca precisión de la CVS de referencia lo que no permitió obtener una datación con menor incertidumbre comparado al obtenido mediante termoluminiscencia.

El cuarto estudio arqueomagnético lo realizó Rojas Mora et al. (2020) en 11 fragmentos cerámicos con fechas asociadas por radiocarbono provenientes del sitio de San Pedro ubicado sobre una extensa llanura inundable conocida como la Depresión Momposina en el norte de Colombia. Los fragmentos arqueológicos fueron recuperados en plataformas de tierra construidas de forma artificial que eran construidas como respuestas a las inundaciones que sufría la región. Estas plataformas están asociadas a sitios de habitación que fueron ocupadas en distintos momentos.

Tabla 3.4 Edades radiométricas asociadas e intervalos arqueomagnéticos obtenidos para el sitio de San Pedro.

Estudio magnético de la cerámica de la Depresión Momposina (Rojas et. al., 2020)			
Fragmento	Edad radiométrica [BP]	Intervalos calibrados [d.C.]	Intervalos arqueomagnéticos obtenidos [d.C.]
SP-8854	1450 ± 30	cal. 560-650	463-587/ 611-733
SP-8857			475-558/ 635-723
SP-6537	1410 ± 30	cal. 600-660	428-764 /898-976
SP-6423			455-740
SP-6574			472-563/ 632-726
SP-7582			470-556/ 629-729
SP-18546	70 ± 30	cal. 1690-1730	430-762 /901-975
SP-27008	1260 ± 30	cal. 660-735	462-587/ 611-733

Las muestras fueron sometidas a experimentos de magnetismo de rocas para determinar los fragmentos candidatos a los experimentos de arqueointensidad, de los cuales se seleccionaron nueve fragmentos. Para realizar el fechamiento se utilizaron los modelos globales SHA.DIF.14K y ARCH3k, sin embargo, con estos modelos no se logró obtener dataciones concordantes con las edades por radiocarbono. Por lo que se utilizó el modelo SED3k basado en datos de sedimentos lacustres.

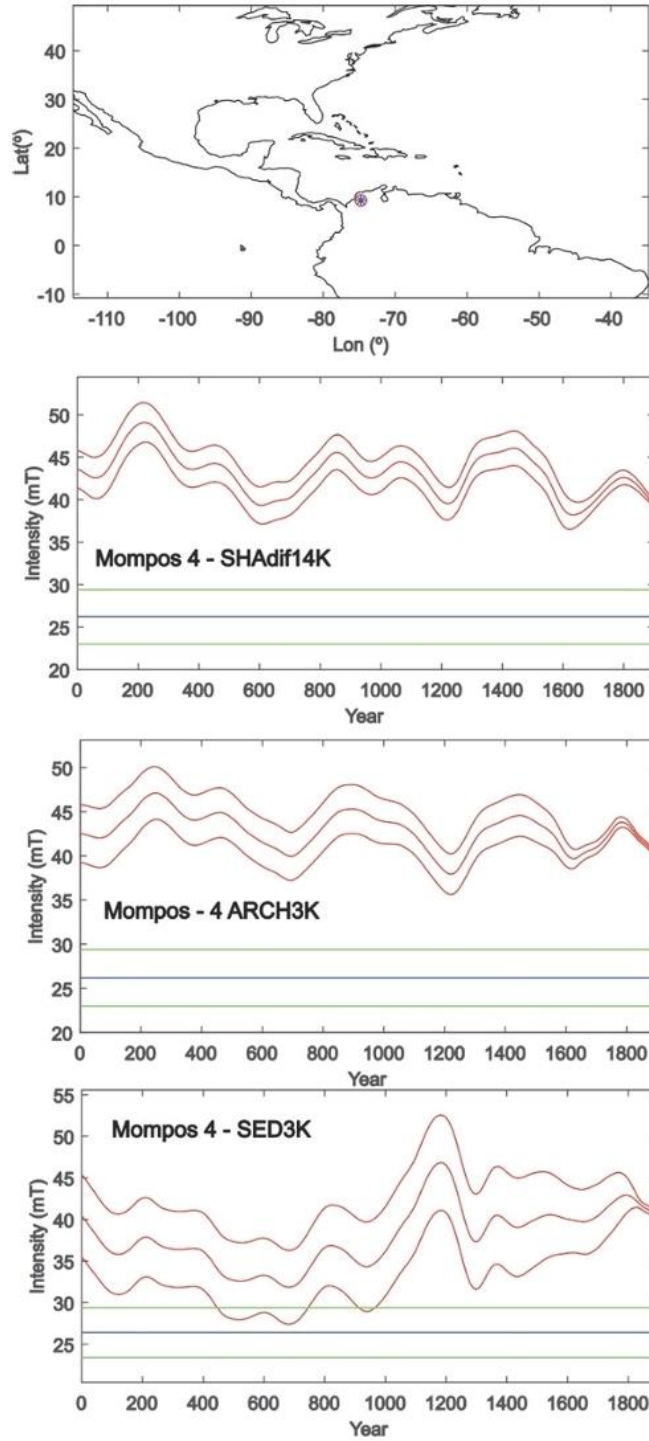


Ilustración 3.4 Comparativa de datación mediante el modelo SHA.DIF.14k, ARCH3k y SED3k. Tomado de Rojas Mora et al. (2020).

A pesar de haber obtenido intervalos concordantes con las edades radiométricas asociadas estos intervalos fueron bastante amplios comparados con los de radiocarbono, además de que el uso de una CVS sedimentaria no es ideal para este tipo de estudios, por lo que las edades de radiocarbono según los autores seguirán siendo más precisas mientras no haya una CVS local.

Posteriormente en 2021, Navarro Páez presenta su trabajo de máster en el cual realizó un estudio arqueomagnético en 39 fragmentos cerámicos provenientes de tres contextos funerarios del sitio de Nueva Esperanza en la municipalidad de Soacha de la Sabana de Bogotá. 20 fragmentos presentaban una edad de radiocarbono asociada. A los 39 fragmentos se les realizaron experimentos de magnetismo de rocas donde se seleccionó las muestras candidatas para el experimento de arqueointensidad.

Tabla 3.5 Datación radiométrica asociada y el intervalo obtenido mediante el método arqueomagnético para el sitio de Nueva Esperanza

Nueva Esperanza (Navarro Páez, 2021)			
Muestra	Edad radiométrica [BP]	Edad calibrada [CE]	Intervalos arqueomagnéticos obtenidos [EC]
TC14			
TC14-9	960	990 ± 30	1100 - 1200 EC
TC14-11			

Navarro Páez (2021) menciona sobre la dificultad de realizar un fechamiento mediante el método arqueomagnético debido a la falta de una CVS local en la región. Además, debido a que el CMT en la región presenta un comportamiento distinto al del resto de Sudamérica, ocasionada posiblemente por la Anomalía del Atlántico Sur, los modelos globales muestran comportamientos muy distintos entre sí lo que se ve reflejado en la falta resultados satisfactorios en estudios previos. Por lo que Navarro Páez (2021) realizó una aproximación similar a la realizada por Cejudo et al. (2019) realizando un nuevo intento para fabricar una curva local con datos arqueomagnéticos de sitios cercanos, sin embargo, debido a la alta incertidumbre en los intervalos temporales no fue posible obtener una tendencia clara en la variación de la intensidad del CMT.

Por lo que comparó los valores de intensidad obtenidos con la curva del Caribe referenciada para Bogotá presentada por Cejudo et al. (2019). Los valores de intensidad determinados únicamente fueron concordantes con la CVS entre los años 1100 y 1500 EC

del que se logró obtener para un fragmento un intervalo en alrededor de 1100 - 1200 EC lo cual fue concordante con la cronología arqueológica.

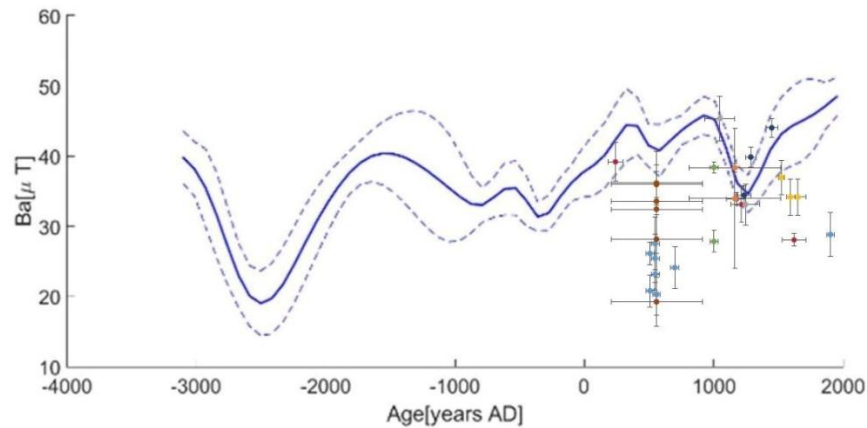


Ilustración 3.5 Comparativa entre los datos de intensidad obtenidos con la CVS del Caribe. Tomado de Navarro Páez (2021).

El último estudio arqueomagnético publicado fue realizado por Goguitchaichvili et al. (2023) en 11 fragmentos cerámicos provenientes del sitio de San Jacinto 1 cercano a la comunidad del mismo nombre en el Departamento de Bolívar en la Costa del Caribe Colombiano. Estos fragmentos cerámicos tienen asociadas doce diferentes edades por radiocarbono en un rango entre 5940 ± 60 al 5190 ± 40 BP. El sitio de San Jacinto 1 fue ocupado del 6000 al 5000 BP por lo que es uno de los lugares donde también se encuentran una de las cerámicas más antiguas del continente americano.

Se realizaron experimentos de magnetismo de rocas para seleccionar las muestras más prometedoras para los experimentos de tipo Thelie para la determinación de la arqueointensidad. Se descartaron cinco fragmentos debido a que presentaban múltiples componentes magnéticas o patrones de magnetización inestables.

Tabla 3.6 Rango de edades radiométricas asociadas y el resultado obtenido del fechamiento arqueomagnético para el sitio San Jacinto 1.

Sitio arqueológico de San Jacinto 1 (Goguitchaichvili et al, 2023)		
Sitio	Rango de edades radiométricas asociadas [BP]	Intervalos arqueomagnéticos obtenidos
San Jacinto 1	5940 ± 60 al 5190 ± 40	No se logró obtener

Se logró obtener determinaciones de la arqueointensidad para los seis fragmentos cerámicos en un rango entre 50.7 ± 4.7 a 65.3 ± 11.9 μ T. Estos valores muestran un alto valor

en la intensidad del CMT para Colombia comparado con lo obtenido en estudios previos al igual que con lo predicho por las CVS CALSk.10K, SHA.DIF.14K y ArchKalmag.14K que predicen una intensidad de por lo menos la mitad de la intensidad a las de las muestras de San Jacinto 1. A pesar de la obtención de los seis valores de arqueointensidad con buena calidad técnica no fue posible obtener un fechamiento arqueomagnético.

Las muestras de San Jacinto 1 sugieren un pico en la intensidad del CMT durante el Holoceno temprano siendo la primera vez que se observa un pico magnético para antes del 1000 a.C. el cual aparentemente está asociado a configuraciones complejas del CMT y a la dinámica en el límite núcleo-manto.

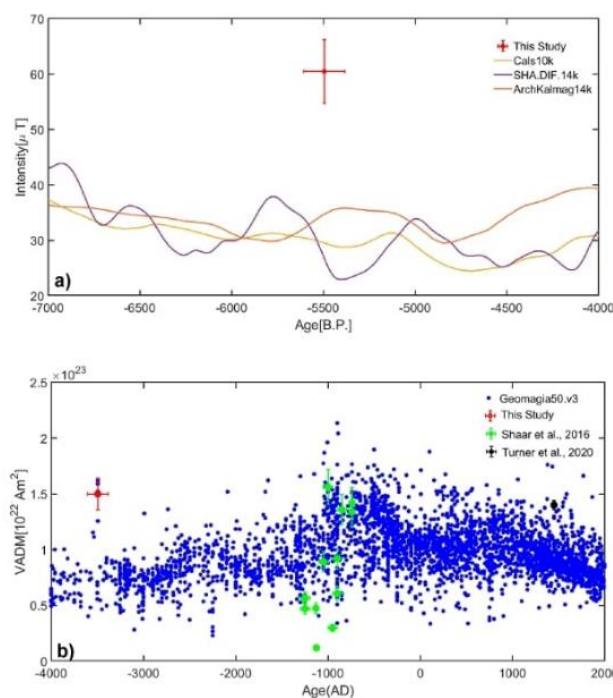


Ilustración 3.6 Comparativa entre el valor medio de arqueointensidad obtenido con a) los modelos CALS.10k, SHA.DIF.14k, ArchKalmag y b) datos disponibles de la base de datos Geomagia50.v3. Tomado de Gogutchiaichvili et al. (2023).

A pesar de los diferentes intentos de realizar fechamientos arqueomagnéticos, en la mayoría de los casos no ha sido posible obtener intervalos de tiempo concordantes con la información arqueológica o isotópica previa. Incluso cuando se logra obtener intervalos de tiempo concordantes, estos tienden a ser mucho menos precisos comparados con otros métodos de datación. La principal limitante, de la que concuerdan los autores de los estudios previos, es la falta de una CVS local debido a los pocos datos aún disponibles para Colombia,

así como posiblemente por efectos ocasionados por la Anomalía Magnética del Atlántico Sur o la dinámica en el límite núcleo-manto lo que ocasiona que el comportamiento del CMT en la región difiera presenta variaciones importantes en sus componentes para periodos relativamente cortos de tiempo. Es necesario seguir trabajando en la región para obtener una CVS local que permitiría mejorar la realización de trabajos arqueomagnéticos, así como mejorar nuestro conocimiento sobre la compleja dinámica de los procesos que ocurren en el límite núcleo-manto que producen al CMT.

CAPÍTULO 4 PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y TRATAMIENTOS DE LABORATORIO

4.1 INTRODUCCIÓN

Únicamente las muestras que cumplen ciertas condiciones magnéticas pueden considerarse como candidatas para los experimentos de doble calentamiento tipo Thellier (Thellier y Thellier, 1959; Coe et al., 1978). En este trabajo, para asegurar la idoneidad de las muestras para experimentos de arqueointensidad, se aplicaron criterios de preselección basados en: la relativa reversibilidad de curvas termomagnéticas continuas así como la variación de la susceptibilidad en función de la temperatura y una estabilidad razonable durante los experimentos de desmagnetización por campos alternos. De esta manera se descartaron 2 (CHA02 Y CHA06) de los 10 fragmentos cerámicos iniciales. Los fragmentos provienen de las trincheras K, J y L de Puerto Chacho los cuales fueron proporcionados por el Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).

Tabla 4.1 Registro de la información de cada fragmento cerámico

ID	Código	Ubicación	Trinchera	ID LAB
1	FG-B0128	3861	J	CHA 01
1	FG-B0128	3861	J	CHA 02
2	FG-B0128	37G3	K/NIVEL:3	CHA 03
2	FG-B0128	37G3	K/NIVEL:3	CHA 04
3	FG-B0128	37J1	L/NIVEL:3A	CHA 05
3	FG-B0128	37J1	L/NIVEL:3A	CHA 06
4	FG-B0128	37J1	L/NIVEL:3B	CHA 07
4	FG-B0128	37J1	L/NIVEL:3B	CHA 08
5	FG-B0128	37J1	L/NIVEL: 4	CHA 09
5	FG-B0128	37J1	L/NIVEL: 4	CHA 10

4.2 REGISTRO FOTOGRÁFICO E INVENTARIO

Se realizó un registro fotográfico en ambas caras de los fragmentos, así como un inventario donde se asignó un ID para los tratamientos de laboratorio posteriores. Las cerámicas no presentaron ningún tipo de elemento decorativo.

Tabla 4.2 Registro fotográfico de las cerámicas



Relación de muestras

Puerto Chacho, Colombia

Fecha: 25/04/2022

Tipo de muestras: Cerámicas.

Sitio: Puerto Chacho, Colombia.

Jefe de proyecto: Dr. Avtandil Gogichaishvili

Muestra	ID laboratorio	Frente	Reverso
FG-B0128 (3861) Trinchera: J	CHA 01		
FG-B0128 (3861) Trinchera: J	CHA 02		
FG-B0128 (37G3) Trinchera: K/NIVEL 3	CHA 03		

Tabla 4.3/2 Registro fotográfico de las cerámicas


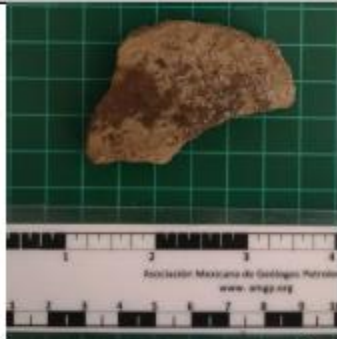




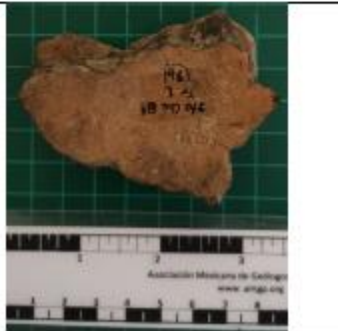

Muestra	ID laboratorio	Frente	Reverso
FG-B0128 (37G3) Trinche ra: K/NIVEL 3	CHA 04		
FG-B0128 (37J1) Trinche ra: L/NIVEL 3A	CHA 05		
FG-B0128 (37J1) Trinche ra: L/NIVEL 3A	CHA 06		
FG-B0128 (37J1) Trinche ra: L/NIVEL 3B	CHA 07		

Tabla 4.4/3 Registro fotográfico de las cerámicas



Muestra	ID laboratorio	Frente	Reverso
FG-B0128 (37J1) Trinche ra: L/NIVEL 3B	CHA 08		
FG-B0128 (37J1) Trinche ra: L/NIVEL 4	CHA 09		
FG-B0128 (37J1) Trinche ra: L/NIVEL 4	CHA 10		

4.3 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para poder trabajar con las muestras fue necesario cortarlas en por lo menos ocho fragmentos de ~2x2 cm los cuales se utilizaron en los diferentes tratamientos de laboratorio. El corte se realizó en seco con una sierra eléctrica cuyo disco era de material diamagnético

para evitar alterar los resultados de las mediciones. En total se obtuvieron 64 fragmentos los cuales fueron utilizados para los experimentos posteriores.



Ilustración 4.1 A) Orientación arbitraria previa al corte. B) Sierra con la que se realiza el corte.

4.4 TRATAMIENTOS MAGNÉTICOS

EXPERIMENTO DE SUSCEPTIBILIDAD CONTRA TEMPERATURA

Para evaluar la estabilidad térmica se realizó el experimento de susceptibilidad contra temperatura con una muestra de ~ 2 gr de cada fragmento cerámico pulverizada en un mortero de ágata y utilizando el suceptilímetro MFK1 marca AGICO. La muestra fue calentada hasta 650°C con una velocidad de calentamiento de aproximadamente $15^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ y posteriormente se enfrió hasta alcanzar temperatura ambiente. Los experimentos se llevaron a cabo en una atmósfera de argón para reducir la posibilidad de oxidación durante el calentamiento. Los puntos de Curie (también conocidos como temperaturas de Curie) se estimaron siguiendo el método descrito por Prévot et al., (1983).

DESMAGNETIZACIÓN POR CAMPOS ALTERNOS (AFD)

Para conocer si las cerámicas sufrieron una remagnetización posterior a la correspondiente a su fabricación o ultimo uso se realizó una desmagnetización progresiva (por etapas) mediante campos magnéticos alternantes. La magnetización remanente natural (NRM) se midió con un magnetómetro de giro (AGICO JR-6) acoplado con un desmagnetizador por campos alternos LDA-5 ambos de la marca AGICO. Cada fragmento cerámico se sometió hasta un campo alterno máximo de 100 mT.

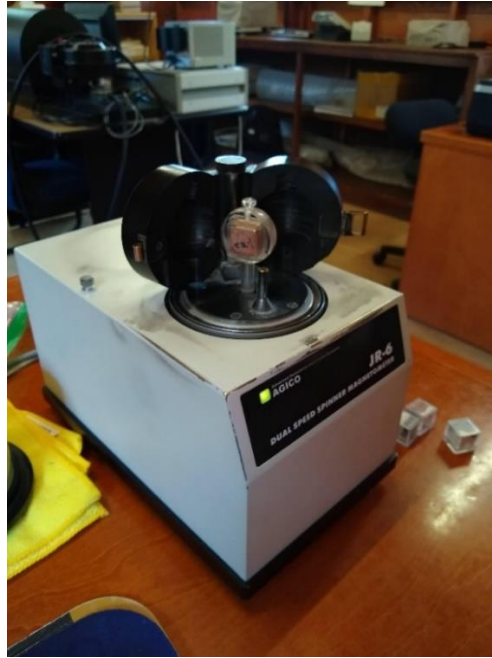


Ilustración 4.2 Magnetómetro de giro JR-6 de AGICO.

ARQUEOINTENSIDAD

Para poder realizar el experimento de arqueointensidad se encapsularon 6 fragmentos de cada muestra en cilindros de sal (NaCl) lo que permitió tratarlas como núcleos paleomagnéticos estándar. Previamente la sal se calentó a 60°C por ~30 min en un horno eléctrico para eliminar la mayor parte de la humedad y posteriormente se molió hasta obtener partículas finas de sal. Se utilizaron ~20 gr de sal con tres gotas de agua como cementante por cilindro en donde al centro se colocó un fragmento cerámico en las direcciones $\pm X$, $\pm Y$ y $\pm Z$ para reducir los efectos por anisotropía como describe Morales et al. (2009). Para la consolidación de los núcleos se utilizó una prensa hidráulica a ~20 toneladas, posteriormente se dejaron secar a temperatura ambiente por alrededor de una semana.

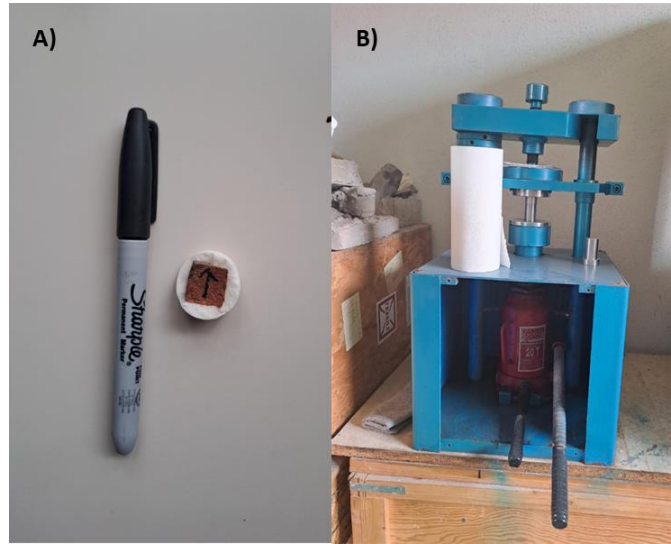


Ilustración 4.3 A) Fragmento cerámico encapsulado en un núcleo de sal. B) Prensa hidráulica utilizada para consolidar los núcleos de sal.

El experimento de arqueointensidad se realizó siguiendo la metodología de Thellier y Thellier (1959) modificada por Coe et al. (1978). En total se realizaron 14 dobles calentamientos en un rango de temperatura entre 150 a 560°C junto a seis calentamientos de control (también conocidos como *pTRM checks* por sus siglas en inglés). Los calentamientos se llevaron a cabo utilizando un horno de una cámara marca ASC Scientific TD-48 *Singel Chamber* (desmagnetizador de bobinas para producir campos permanentes). El campo magnético de laboratorio aplicado fue de 50 mT paralelo al eje -Z. Posterior a cada etapa de desmagnetización, la magnetización remanente se midió con el magnetómetro JR-6.

RITMO DE ENFRIAMIENTO

Posterior al último calentamiento se realizaron tres calentamientos adicionales para estimar los efectos por el ritmo de enfriamiento como describe Chauvin et al. (2000). Se realizó un primer calentamiento a 560°C en presencia de un campo magnético de 50 mT, posteriormente las muestras fueron enfriadas utilizando el ventilador equipado en el horno por ~45 minutos hasta que alcanzaron temperatura ambiente. El segundo calentamiento se realizó en las mismas condiciones, pero ahora se dejaron enfriar sin utilizar el ventilador por un periodo de ~8 horas. El último calentamiento se realizó de la misma manera que el primero en tiempo y temperatura. Posterior a cada calentamiento se midió la remanencia con el magnetómetro JR-6.

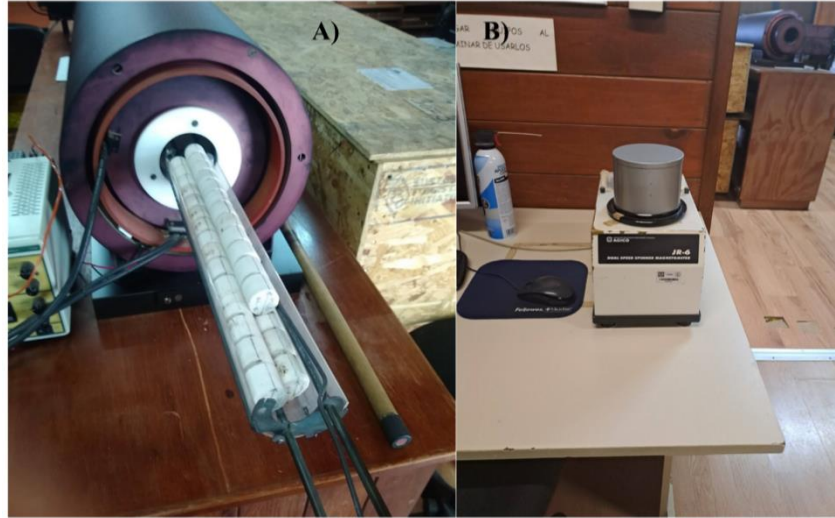


Ilustración 4.4 A) Horno TD-48SC con núcleos de sal previos al calentamiento. B) Magnetómetro JR-6 utilizado posterior a cada calentamiento.

CAPÍTULO 5 PRINCIPALES RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 EXPERIMENTO DE SUCEPTIBILIDAD CONTRA TEMPERATURA

En la mayoría de los casos (Ilustración 5.1), se observa un comportamiento relativamente reversible, a excepción de la muestra CHA02 (Ilustración 5.1a) identificándose a la magnetita o titanomagnetita pobre en titanio como el principal portador de la magnetización. Una porción menor de susceptibilidad magnética aún permanece por encima de los 600 °C, lo que indica la presencia de granos de hematita. Sin embargo, estos granos antiferromagneticos son poco significativos por lo que la contribución de la magnetización es ignorable.

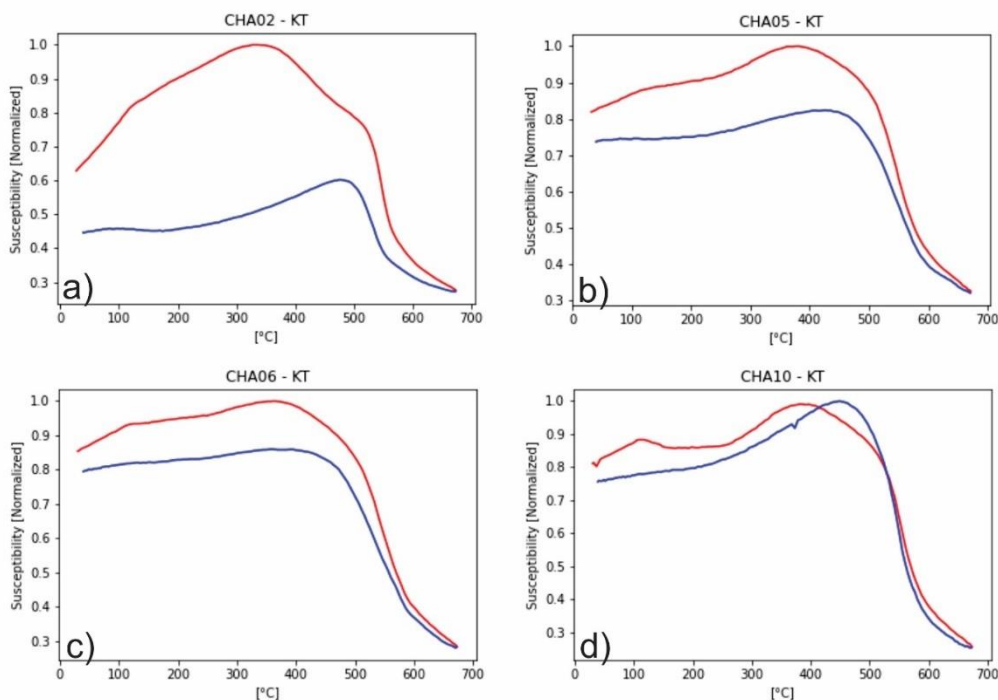


Ilustración 5.1 Susceptibilidad magnética en función de la Temperatura (curvas K-T). En color rojo se muestra el comportamiento de la susceptibilidad durante el calentamiento y en color azul durante el enfriamiento, la susceptibilidad magnética se muestra en unidades arbitrarias. Véase Apéndice I.

5.2 DESMAGNETIZACIÓN POR CAMPOS ALTERNOS

La aplicación del máximo de campos disponibles permitió eliminar más del 85% de la magnetización total. En cambio, para algunas muestras, los patrones de desmagnetización inestables (Ilustración 5.2b) muestran múltiples magnetizaciones secundarias, motivo por el cual estas muestras fueron descartadas para los análisis posteriores.

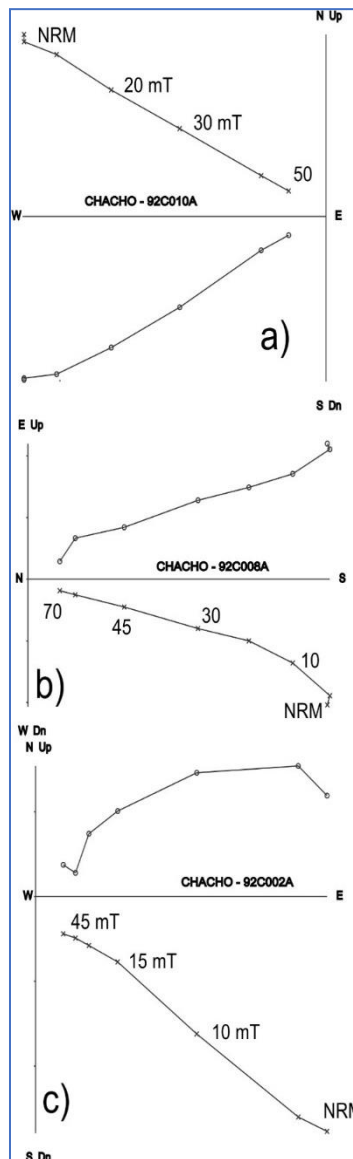


Ilustración 5.2 Diagramas ortogonales de desmagnetización progresiva por campos alternos, los números indican el valor de la intensidad en mT del campo magnético máximo aplicado durante cada etapa de desmagnetización. Véase Apéndice I.

5.3 ARQUEOINTENSIDAD

Los experimentos de arqueointensidad proporcionaron 23 determinaciones técnicamente aceptables (Coe et al., 1978; Morales et al., 2011, Goguitchaichvili et al., 2023) de 5 fragmentos de cerámica (Tabla 5.1). Las ilustraciones *Ilustración 5.3* y *Ilustración 5.4* muestran el comportamiento de la muestras durante los experimentos en las determinaciones exitosas donde se aprecia que no existe alguna de desviación de las direcciones de la magnetización remanente natural hacia las direcciones del campo de laboratorio (eje -Z); los pTRM *checks* positivos se consideran aceptables típicamente dentro del 10% o incluso hasta el 15% en las primeras etapas donde solo una pequeña fracción de la remanencia total está involucrada; en las curvas de Arai-Nagata no se observa algún comportamiento cóncavo (*Concave-Up*); el parámetro de calidad q , tal como lo definen (Coe et al., 1978) varía de 5.6 a 46.2; la fracción de remanencia f asociada a la determinación oscila entre 0.38 y 0.89; se utilizaron por lo menos 7 y un máximo de 11 puntos razonablemente bien alineados para la determinación. En las muestras que fueron rechazadas se presentaron comportamientos cóncavos durante lo experimentos, un ejemplo representativo es de la muestra 92C015A la cual fue rechazada para determinación de la intensidad absoluta (*Ilustración 5.5*) donde se observa franco comportamiento indicativo de la presencia predominante de granos magnéticos multidominio. Los efectos por ritmo de enfriamiento se estimaron en menos del 5% para todas las muestras por lo que, consideramos que no era necesario realizar la corrección.

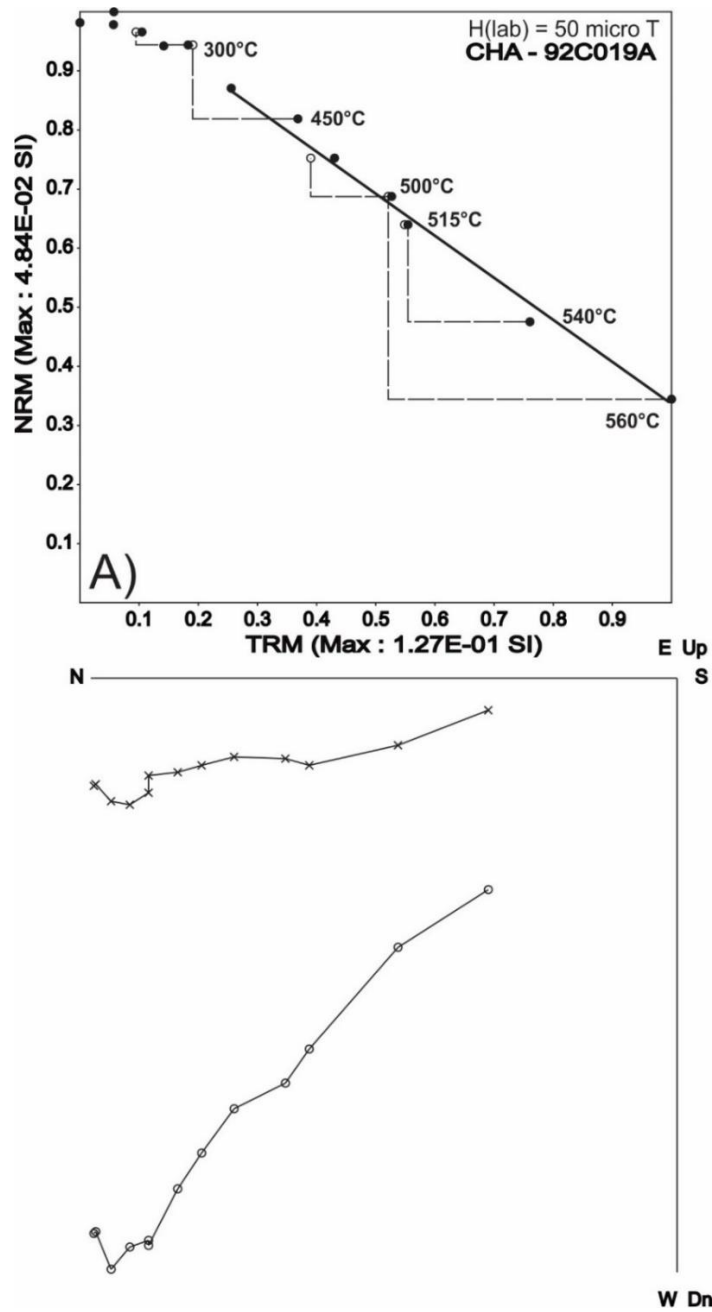


Ilustración 5.3 Curva NRM-TRM conocida como diagramas de Arai y su correspondiente diagrama ortogonal asociados a la muestra 92C019A durante los experimentos de arqueointensidad. Véase Apéndice I.

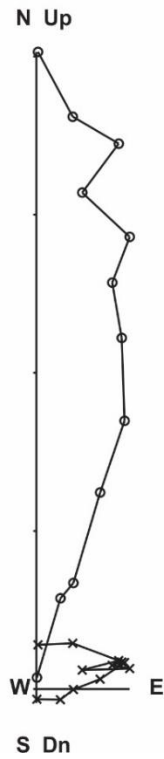
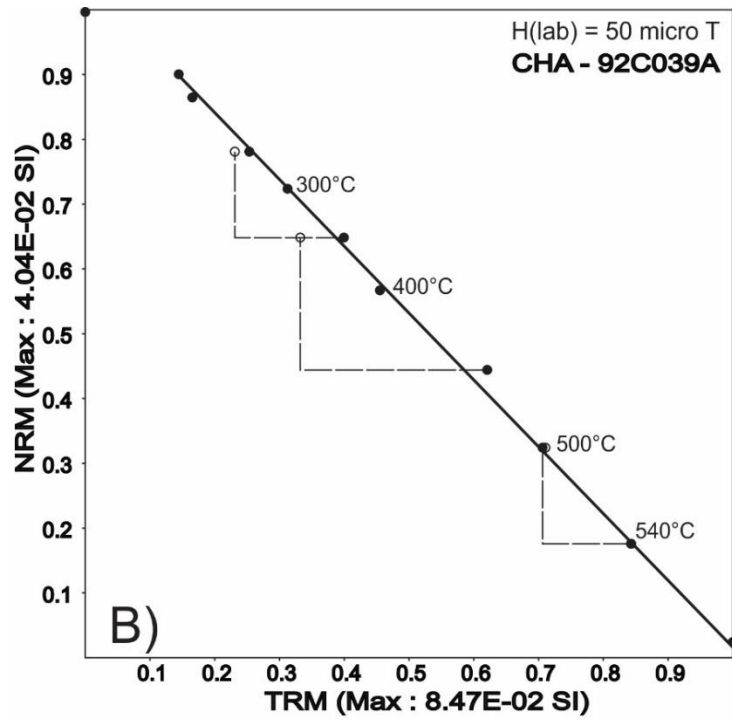


Ilustración 5.4 Diagrama de Arai y su correspondiente diagrama ortogonal asociados a la muestra 92C039A durante los experimentos de arqueointensidad. Véase Apéndice I.

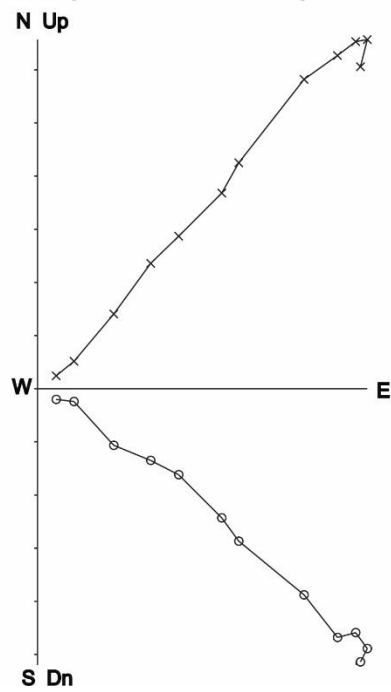
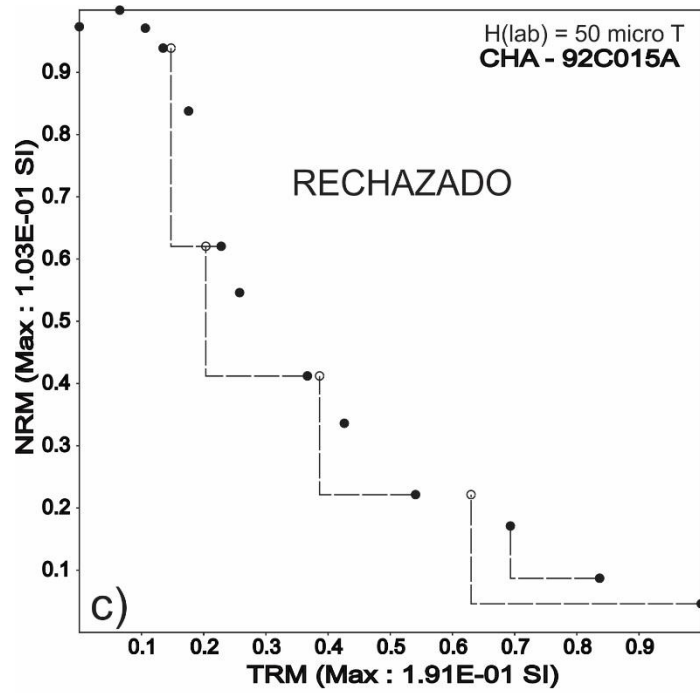


Ilustración 5.5 diagramas de Arai y su correspondiente diagrama ortogonal asociados a la muestra 92C015A durante los experimentos de arqueointensidad. Véase Apéndice I.

Tabla 5.1 Determinaciones de arqueointensidad aceptadas. N: Número de puntos en el diagrama de Arai utilizados para el ajuste lineal, T₁/T₂, intervalos de temperatura utilizados para determinar la arqueointensidad; f: Fracción de la NRM utilizada; g y q: Factores de calidad (Coe et al., 1978); MAD: Máxima desviación angular; α: diferencia angular entre puntos anclados y no anclados del ajuste lineal; CK-error: error de chequeos relativo; k': Parámetro de curvatura; F: Factor de anisotropía utilizando el ARM en 15 posiciones. Intensidad absoluta corregida por anisotropía y momento virtual dipolar axial. Los valores resaltados excedieron criterios de calidad. Las muestras PCH19-PCH24 corresponden al nivel 3A, PCH25-PCH33 al nivel 3B y PCH37-PCH48 al nivel 4. Véase Apéndice I.

Sample	N	T ₁ -T ₂ [°C]	f	g	q	MAD	α	δ(CK)	k'	Anis F	B Corr [μT]	σ _B	VADM [10 ²² Am ²]	Error [10 ²² Am ²]
PCH19	8	300-560	0.56	0.82	12.2	1.34	0.84	2.85	0.01	0.8997	14.4	0.5	3.57	0.12
PCH21	7	350-560	0.46	0.72	5.6	5.07	6.62	1.69	0.19	0.8399	8.7	0.5	2.16	0.13
PCH22	8	300-560	0.62	0.82	13.7	3.42	2.82	2.25	0.1	0.8981	14.3	0.6	3.55	0.15
PCH23	9	200-540	0.49	0.85	7.3	7.39	20.71	4.88	0.77	0.9737	12.6	0.7	3.13	0.17
PCH24	9	200-540	0.64	0.82	11.6	3.69	5.11	4.68	0.04	0.9352	12.1	0.6	3.00	0.15
PCH25	8	350-560	0.63	0.85	7.2	14.74	13.42	6.92	0.49	0.9738	8.9	0.7	2.21	0.17
PCH26	8	250-540	0.57	0.85	9.6	9.54	14.68	2.65	0.25	broken	12.2	0.6	3.03	0.15
PCH27	8	300-540	0.56	0.85	10.9	7.34	9.05	9.32	0.05	0.9387	27.3	1.2	6.77	0.31
PCH28	9	300-560	0.59	0.76	11.9	2.88	7.82	2.94	0.22	0.9098	9.5	0.3	2.36	0.008
PCH29	10	250-560	0.75	0.84	13.9	4.49	14.72	3.07	0.01	0.9414	9.4	0.4	2.33	0.009
PCH32	8	250-500	0.39	0.38	6.1	7.32	12.81	2.59	0.44	0.9811	18.1	1.1	4.49	0.27
PCH33	7	300-540	0.32	0.82	7.1	3.21	9.27	1.35	0.17	0.9664	10.2	0.4	2.53	0.09
PCH37	11	150-560	0.81	0.89	33.8	3.9	5.93	2.55	0.01	0.9192	20.6	0.4	5.11	0.09
PCH39	11	150-540	0.84	0.88	37.2	4.49	7.42	6.55	0.04	0.9585	24.6	0.5	6.10	0.12
PCH40	11	150-560	0.94	0.89	27.4	4.68	2.08	15.16	0.05	0.9239	20.7	0.6	5.13	0.15
PCH41	11	150-560	0.82	0.87	28.7	3.01	5.42	3.64	0.16	0.9187	15.5	0.4	3.84	0.16
PCH42	7	350-560	0.61	0.83	10.1	6	5.64	4.89	0.12	0.96	15.3	0.8	3.79	0.21
PCH43	11	150-560	0.89	0.89	46.2	4.38	6.97	1.15	0.09	0.9203	26.7	0.7	6.90	0.17
PCH44	8	300-560	0.72	0.84	19.1	5.78	10.32	40.77	0.11	0.9385	19.3	0.6	4.79	0.19
PCH45	8	300-560	0.7	0.83	20.8	4.27	7.42	13.21	0.2	0.93	20.4	0.7	5.06	0.17
PCH46	8	300-560	0.74	0.84	13.8	4.74	7.43	8.7	0.2	0.9442	21.6	1.1	5.36	0.27
PCH47	10	200-560	0.75	0.84	26.6	3.58	8.28	5.86	0.06	0.9476	24.5	0.7	6.08	0.18
PCH48	9	250-560	0.7	0.85	15.9	5.33	9.24	6.63	0.05	0.9641	26.2	0.9	6.50	0.23

Las intensidades absolutas medias de los fragmentos oscilan entre 12.4 ± 0.6 y $22.6 \pm 0.8 \mu\text{T}$, los cuales corresponden a valores de VADM (momento dipolar axial virtual) entre 3.1 y $5.6 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ (Tabla 5.2). Debido a que las edades radiométricas son indistinguibles entre niveles por su incertidumbre se calculó un valor promedio para intensidad de $17.1 \pm 6.2 \mu\text{T}$ y $4.2 \pm 1.5 \times 10^{22} \text{ Am}^2$ de VADM para todos los niveles estratigráficos. Estos valores están muy por debajo de las intensidades reportadas para San Jacinto 1 (Gogutchavili et al.,

2023) considerando que es un sitio contemporáneo y cercano a Puerto Chacho. Para tratar de explicar esta diferencia entre valores de intensidad se realizó la calibración de las edades radiométricas disponibles utilizando la curva de calibración INTCAL20 (Reimer et al., 2020). De esta manera se obtuvieron dos intervalos donde Puerto Chacho está por debajo del sitio de San Jacinto (Ilustración 5.6). Para confirmar esta nueva determinación se realizó un *bootstrap* para tratar de distinguir entre dos distribuciones de edad distintas. El *bootstrap* se realizó generando una muestra aleatoria de 200 edades teóricas. Finalmente se generaron los histogramas de distribución que indican las edades promedio para cada sitio con sus límites de confianza del 95% (García-Pimentel et al., 2022). Las edades obtenidas mediante este método fueron 3489 ± 280 a.C. para Puerto Chacho y 4178 ± 414 a.C. para San Jacinto (Ilustración 5.7).

Tabla 5.2 Valores promedio de las arqueointensidad (**B**) por fragmento y su correspondiente momento magnético dipolar virtual (**VADM**) obtenido para cada fragmento.

Muestra	Nivel	Edad radiométrica [cal a.C.]	B [μT]	ΔB [μT]	VADM [Am^2]
CHA05	3A	3773-3378	12.42	0.58	3.07E+22
CHA07	3B	3653-3380	13.54	0.64	3.35E+22
CHA08	3B	3653-3380	14.15	0.75	3.50E+22
CHA09	4	3358-2910	19.34	0.54	4.79E+22
CHA10	4	3358-2910	22.62	0.77	5.60E+22

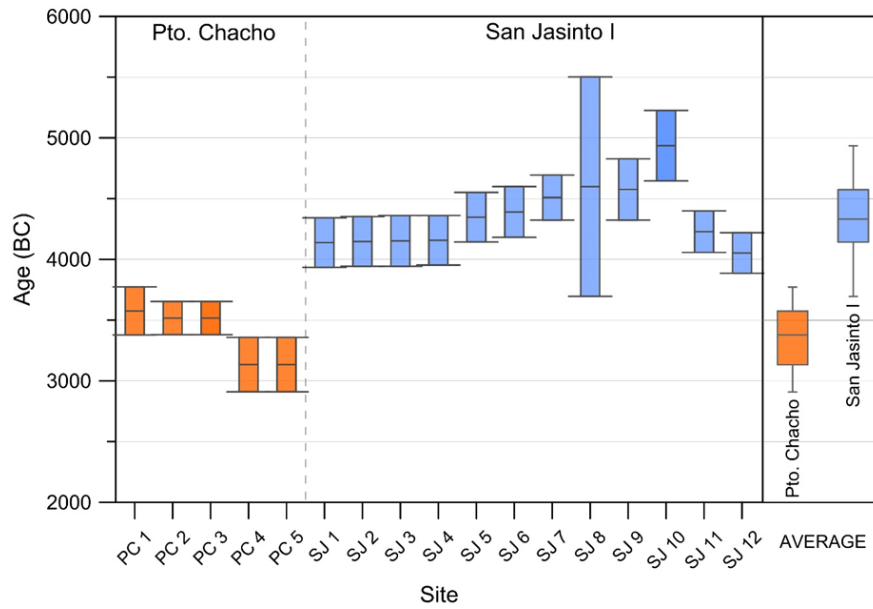


Ilustración 5.6 Edades de radiocarbono disponibles para Puerto Chacho (Legros, 1992) y San Jacinto (Oyuela-Caycedo y Bonzani, 2005) además de la edad promedio para cada sitio. Todas las edades se calibraron utilizando la curva INTCAL20 (Reimer et al., 2020). Véase Apéndice I.

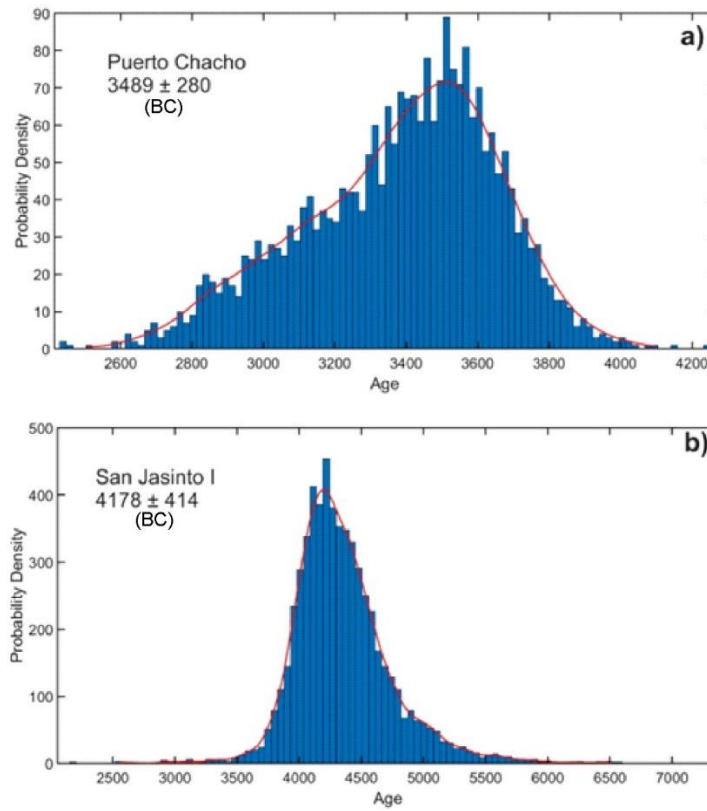


Ilustración 5.7 Histogramas de frecuencia del cálculo de los intervalos de edad para los sitios de Puerto Chacho y San Jacinto utilizando el método *bootstrap*. Véase Apéndice I.

Estos valores indican una intensidad del campo geomagnético comparable con los datos existentes para Colombia y sus alrededores (ver Cejudo et al., 2019) para los últimos 2000 años. Lo mismo ocurre en comparación con los modelos geomagnéticos globales disponibles (Ilustración 5.8) CALSk.10K, SHA.DIF.14K y ArchKalmag.14K ((Korte et al., 2011; Pavón-Carrasco et al., 2014; Schanner et al., 2022).

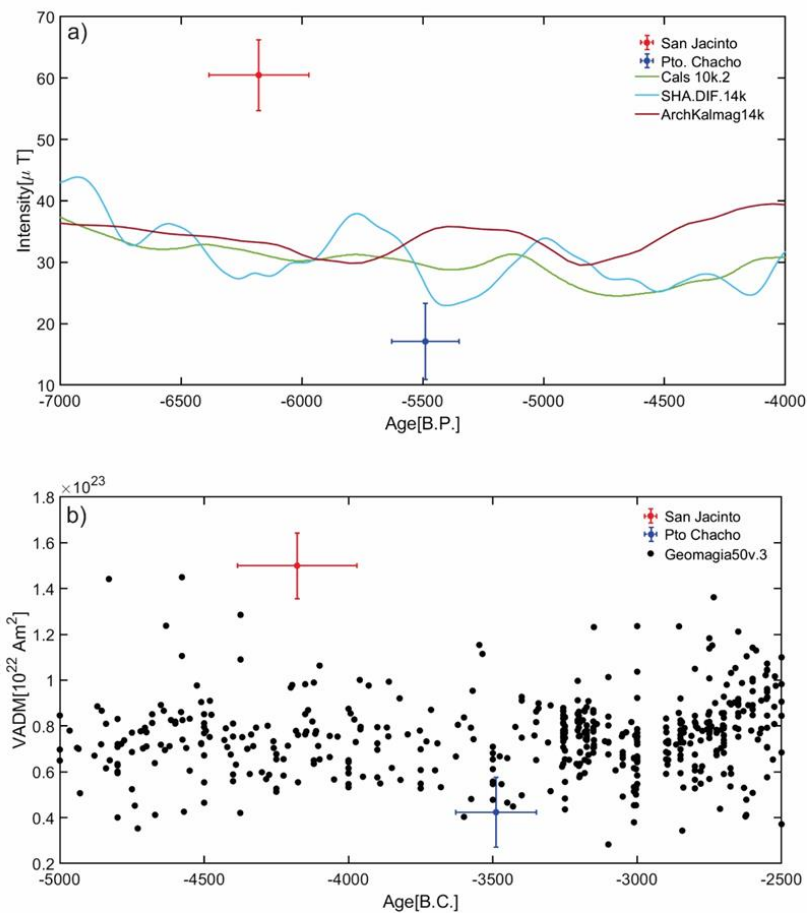


Ilustración 5.8 Valor promedio de arqueointensidad obtenido en este estudio y en Goguitchaichvili *et al.* (2023) comparado con a) los modelos geomagnéticos globales CALSk.10K, SHA.DIF.14K y ArchKalmag y b) datos disponibles en la base de datos Geomagia50.v3. Véase Apéndice I.

Desde el punto de vista geofísico, la intensidad anormalmente alta del campo geomagnético está relacionada con la compleja configuración del campo y la dinámica de las direcciones de flujo en el límite entre el núcleo y el manto (Korte y Constable, 2011; Tema y Kondopoulou, 2011; Kovacheva et al., 2014). Sin embargo, las intensidades obtenidas mediante el estudio independiente de fragmentos cerámicos de sitio Puerto Chacho con edades similares parecen no apoyar esta hipótesis por lo que a falta de más información sobre

la variación en la intensidad del campo geomagnético en esta zona y de edades más precisas y dada la calidad técnica en estas nuevas determinaciones, la principal aportación de estos resultados es la evidencia de las fluctuaciones de campo geomagnético con amplitudes inusualmente altas entre los 5000 y 6000 años AP.

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES GENERALES

Se realizó un estudio arqueomagnético y de magnetismo en rocas en 10 fragmentos cerámicos provenientes de las trincheras K, J y L (niveles estratigráficos 3A, 3B y 4 principalmente) de Puerto Chacho, costa caribeña de Colombia, las cuales fueron proporcionadas por Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH).

Los experimentos de susceptibilidad magnética en función de la temperatura mostraron que el principal mineral magnético responsable de la remanencia magnética presente en la mayor parte de las muestras estudiadas es magnetita o titanomagnetita con bajo contenido en titanio, sin embargo, se observó también que en algunas pocas muestras conservaban una señal magnética muy baja por encima de los 600°C lo que indica la presencia de hematita los cuales contribuyen muy poco a la remanencia total.

Mediante la desmagnetización progresiva por campos alternos y los experimentos de magnetismo de rocas, fueron seleccionadas las muestras más prometedoras para los experimentos de arqueointensidad. Estas mostraron un comportamiento térmico y magnético estable sin presentar evidencia de magnetizaciones secundarias.

Los experimentos de arqueointensidad de tipo Thellier produjeron 23 determinaciones con buena calidad técnica, las cuales proceden de cinco fragmentos de cerámica distintos. Los valores de la arqueointensidad promedio en estos fragmentos varían desde 22.62 a 12.42 μT los que corresponde momentos magnéticos axiales dipolares virtuales entre 3.07 a 5.60 $\times 10^{22}$ Am^2 . Estos valores concuerdan, dentro de su incertidumbre, con los esperados según los modelos geomagnéticos globales de CALSK.10K, SHA.DIF.14K y ArchKalmag.14K. Sin embargo, estas intensidades son significativamente menores al compararlos con los obtenidos en las cerámicas de San Jacinto con edades alrededor de 5500 BP y que representan el único antecedente de arqueointensidad en esta región (Goguitchaichvili et al., 2023). Ante la falta de datos cronológicos más precisos y dada la calidad técnica en las nuevas determinaciones y en las del estudio previo, resulta difícil descartar alguno de los resultados por lo que la hipótesis más posible es que esta alta variabilidad, la cual se observa en los diferentes valores de intensidad obtenidos en los estudios previos y los modelos globales disponibles, sea una evidencia de la compleja configuración del campo geomagnético relacionada a la dinámica entre el núcleo y el manto

lo cual ocasiona cambios importantes en el valor de intensidad del campo geomagnético para periodos relativamente cortos de tiempo.

REFERENCIAS

- Álvarez León, R., Maldonado Pachón, H., 2009, ARQUEOFAUNA ENCONTRADA EN PUERTO CHACHO, SITIO ARQUEOLÓGICO DEL CARIBE COLOMBIANO (3300 a.C.): *Revista Académica Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 33(128), 407–424.
- Batt, C., 2013, *Archaeomagnetic Dating: Encyclopedia of Scientific Dating Methods*, Dordrecht, Springer Netherlands, 1–9. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6326-5_11-1
- Berkovich, C.S., Gogitchaichvili, A., León, G.A.P., Morales, J., 2017, PRIMEROS RESULTADOS DE ARQUEOINTENSIDADES DE COLOMBIA: SITIOS PREHISPÁNICOS EN EL VALLE DEL RÍO MAGDALENA (HONDA-TOLIMA Y PUERTO BOGOTÁ-CUNDINAMARCA): *ARQUEOLOGÍA IBEROAMERICANA* 33, 10–17.
- Butler, R.F., 1992, *PALEOMAGNETISM: Magnetic Domains to Geologic Terranes*, Electronic Edition. ed: Blackwell Science Inc.
- Carrancho, A., Gogichaishvili, A., Kapper, L., Morales, J., Soler-Arechalde, A., Tema, E., 2015, GEOMAGNETIC APPLICATIONS IN ARCHEOLOGY: STATE OF THE ART AND RECENT ADVANCES. In: *New Developments in Paleomagnetism Research: The Story of the Earth's Past Magnetic Field*:, 64.
- Carrancho, Gómez-Paccard, M., Pavón-Carrasco, F.J., 2022, Archaeomagnetic dating: Fundamentals, achievements and limitations: *Cuaternario y Geomorfología* 36(3–4), 31–43. <https://doi.org/10.17735/cyg.v36i3-4.94093>
- Carvajal-Contreras, D.R., 2022, LA REGIÓN DEL CARIBE COLOMBIANO COMO ESCENARIO PRECOLOMBINO PARA DESARROLLOS AGRÍCOLAS, PROCESOS DE SEDENTARIZACIÓN Y NUEVAS TECNOLOGÍAS DURANTE EL PERÍODO FORMATIVO: *TESSITURA* 10(1), 113–132.
- Cejudo, R., Gogitchaichvili, A., Montejo, F., García Ruiz, R., Botiva, Á., Morales, J., 2019, First archaeomagnetic results from Colombia (the Bogotá Savanna Pre-Hispanic sites): Implications for the Caribbean absolute geomagnetic intensity variation curve: *Journal of Archaeological Science: Reports* 26. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.101898>
- Chauvin, A., Garcia, Y., Lanos, P., Laubenheimer, F., Francé, F., 2000, Paleointensity of the geomagnetic field recovered on archaeomagnetic sites from France, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*: 111–136 p.
- Coe, R.S., Grommé, S., Mankinen, E.A., 1978, Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 83(B4), 1740–1756. <https://doi.org/10.1029/jb083ib04p01740>

- García Redondo, N., 2023, “ESTUDIOS ARQUEOMAGNÉTICOS Y DE ARQUEOINTENSIDAD EN MATERIALES ARQUEOLÓGICOS QUEMADOS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y EL CÁUCASO”: Burgos, Universidad de Burgos, Tesis doctoral.
- García-Pimentel, A., Goguitchaichvili, A., Torreblanca, C., Kravchinsky, V., Cervantes, M., García, R., Cejudo, R., Bautista, F., Morales, J., 2022, Depopulation of the Northern Border of Mesoamerica during the Early Postclassic: Evidence from the Reappraisal of Archaeomagnetic Data: *Land* 11(12). <https://doi.org/10.3390/land11122103>
- Goguitchaichvili, A., Greco, C., Ruiz, R.G., Domingorena, L.P., Cejudo, R., Morales, J., Gogorza, C., Scattolin, C., Tarragó, M., 2019, First archaeointensity reference paleosecular variation curve for South America and its implications for geomagnetism and archaeology: *Quaternary Research* 92(1), 81–97.
- Goguitchaichvili, A., Morales, J., García, R., Montejo, F., Kravchinsky, V., Cejudo, R., Cervantes, M., Reina, C., 2023, Possible evidence for geomagnetic intensity anomaly around 5500 BP from archaeomagnetic analyses of San Jacinto pottery, Caribbean Colombia: *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 341, 107061. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2023.107061>
- Korte, M., Constable, C., 2011, Improving geomagnetic field reconstructions for 0–3ka: *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 188(3–4), 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.06.017>
- Korte, M., Constable, C., Donadini, F., Holme, R., 2011, Reconstructing the Holocene geomagnetic field: *Earth and Planetary Science Letters* 312(3–4), 497–505. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.031>
- Kovacheva, M., Kostadinova-Avramova, M., Jordanova, N., Lanos, P., Boyadzhiev, Y., 2014, Extended and revised archaeomagnetic database and secular variation curves from Bulgaria for the last eight millennia: *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 236, 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.07.002>
- Lanza, R., Meloni, A., 2006, *The Earth’s Magnetism An Introduction for Geologists*: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 67–97 p.
- Legros, T., 1992, *Puerto Chaco et les premiers céramistes américains: nouvelles données sur le formatif ancien du littoral caribe de Colombie*: Paris 1.
- Legros, T., 1989, Consideraciones sobre Puerto Chacho, un conchero de las Llanuras del Caribe Colombiano: *Memorias del V Congreso Nacional de Antropología* 67–76.
- Loaiza Díaz, N., Aceituno Bocanegra, F.J., 2015, Reflexiones en torno al Arcaico colombiano: *Revista colombiana de antropología* 51(2), 121–146.
- Lowrie, W., 2007, *Fundamentals of geophysics*: Cambridge University Press, 381 p.

- Mahgoub, A.N., Juárez-Arriaga, E., Böhnell, H., Manzanilla, L.R., Cyphers, A., 2019, Refined 3600 years palaeointensity curve for Mexico: *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 296. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.106328>
- Mandea, M., 2022, *The Magnetic Declination: A History of the Compass*: SpringerBriefs.
- Morales, J., Goguitchaichvili, A., Acosta, G., González-Moran, T., Alva-Valdivia, L., Robles-Camacho, J., Del Sol Hernández-Bernal, M., 2009, Magnetic properties and archeointensity determination on Pre-Columbian pottery from Chiapas, Mesoamerica, *Earth Planets Space*: 83–91 p.
- Morales, J., Goguitchaichvili, A., Aguilar-Reyes, B., Pineda-Duran, M., Camps, P., Carvallo, C., Calvo-Rathert, M., 2011, Are ceramics and bricks reliable absolute geomagnetic intensity carriers? *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 187(3–4), 310–321. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2011.06.007>
- Navarro Páez, L.F., 2021, Archaeomagnetic characterization and possible dating based on archeointensity values, of prehispanic ceramics from the Nueva Esperanza archaeological site-TCE Sector (Sabana de Bogotá, Colombia): Thessaloniki, Aristotle University of Thessaloniki, Tesis de master.
- Obregón, M., Luna, Á.R., Goguitchaichvili, A., Cejudo, R., Morales, J., Cervantes-Solano, M., Greco, C., 2019, TERMOLUMINISCENCIA VS. ARQUEOMAGNETISMO: DATACIÓN ABSOLUTA DE FRAGMENTOS CERÁMICOS PREHISPÁNICOS DE LOS ANDES NOROCCIDENTALES (PIEDRAS BLANCAS, MEDELLÍN, COLOMBIA): *ARQUEOLOGÍA IBEROAMERICANA* 42, 42–49.
- Oyuela Caycedo, A., 1987, DOS SITIOS ARQUEOLOGICOS CON DESGRASANTE DE FIBRA VEGETAL EN LA SERRANIA DE SAN JACINTO (DEPARTAMENTO DE BOLIVAR).
- Oyuela-Caycedo, A., 2008, Late Pre-Hispanic Chiefdoms of Northern Colombia and the Formation of Anthropogenic Landscapes: *The Handbook of South American Archaeology*, Springer New York, 405–428. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74907-5_22
- Oyuela-Caycedo, A., Bonzani, R.M., 2005, *San Jacinto 1: a historical ecological approach to an archaic site in Colombia*: University of Alabama Press.
- Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M., De Santis, A., 2014, A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data: *Earth and Planetary Science Letters* 388, 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.046>
- Pratt, J.A.F., 1999, Determining the Function of One of the New World's Earliest Pottery Assemblages: The Case of San Jacinto, Colombia: *Latin America Antiquity* 10(1), 71–85.

- Prévo, M., Mankinen, E.A., Grommé, S., Lecaille, A., 1983, High paleointensities of the geomagnetic field from thermomagnetic studies on Rift Valley pillow basalts from the Mid-Atlantic Ridge: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 88(B3), 2316–2326. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JB088iB03p02316>
- Reichel-Dolmatoff, G., 1965, Excavaciones en los Conchales de la Costa de Barlovento: 249–272 p.
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Butzin, M., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kromer, B., Manning, S.W., Muscheler, R., Palmer, J.G., Pearson, C., Van Der Plicht, J., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Turney, C.S.M., Wacker, L., Adolphi, F., Büntgen, U., Capano, M., Fahrni, S.M., Fogtmann-Schulz, A., Friedrich, R., Köhler, P., Kudsk, S., Miyake, F., Olsen, J., Reinig, F., Sakamoto, M., Sookdeo, A., Talamo, S., 2020, The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0-55 cal kBP): *Radiocarbon* 62(4), 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Rodríguez, C., 1988, Las tradiciones alfareras tempranas en las llanuras del caribe colombiano (Departamentos de Bolívar y Atlántico). *Periodización y comparación cerámica.*: 26–40 p.
- Rodríguez, C., Legros, T., Pauly, C., 1987, El Formativo de la Costa del Caribe Colombiana: 1–62 p.
- Rojas Mora, S., Cejudo, R., Marín Uribe, M., del Sol Hernández-Bernal, M., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Montejo, F., Bautista, F., 2020, ESTUDIO MAGNÉTICO Y GEOQUÍMICO DE LA CERÁMICA PREHISPÁNICA DE LA DEPRESIÓN MOMPOSINA: ANÁLISIS ARQUEOMÉTRICOS EN EL NORTE DE SUDAMÉRICA *Magnetic and Geochemical Study of Pre-Hispanic Pottery from the Momposina Depression: Archaeometric Analysis in Northern South America*: 15–22.
- Schanner, M., Korte, M., Holschneider, M., 2022, ArchKalmag14k: A Kalman-Filter Based Global Geomagnetic Model for the Holocene: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 127(2). <https://doi.org/10.1029/2021JB023166>
- Tauxe, L., 2010, *Essentials of paleomagnetism*: Univ of California Press.
- Tema, E., Kondopoulou, D., 2011, Secular variation of the Earth's magnetic field in the Balkan region during the last eight millennia based on archaeomagnetic data: *Geophysical Journal International* 186(2), 603–614. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05088.x>
- Theillier, E., Theillier, O., 1959, Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique: *Annales Géophysique*, v. 15:

ANEXO

Anexo I Autorización de salida e intervención del material arqueológico



Instituto Colombiano de
Antropología e Historia

ICANH



La cultura
es de todos

Mincultura



ICANH - 2022150000021641

No. Entrada 2022144200019962

Fecha: 14-03-2022

Bogotá D.C.





A QUIEN CORRESPONDA

Asunto: Autorización de salida e intervención de material arqueológico para investigación

Mediante el presente documento y en aplicación del Artículo 7º de la Ley 1185 de 2008, el Instituto Colombiano de Antropología e Historia – ICANH, certifica que el investigador de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, **AVTANDIL GOGICHAISHVIL** identificado con pasaporte mexicano No. G21668934, está autorizado para sacar del país e intervenir diez (10) fragmentos arqueológicos en cerámica que hacían parte de la Colección de Referencia a cargo del Instituto, procedentes de la excavación arqueológica realizada por Thierry Legros en 1988 en el sitio arqueológico Puerto Chacho, ubicado en el municipio de Arjona, Bolívar. El material no presenta riesgo biológico ni tiene valor comercial.

A continuación, se presenta el material arqueológico a intervenir:

No.	Cantidad	Foto
1	1	 Fragmento en cerámica Unidad estratigráfica 2B, Trinchera J
2	1	 Fragmento en cerámica Unidad estratigráfica 2B, Trinchera J

No.	Cantidad	Foto
3-4	2	 <p>Fragmentos en cerámica Unidad estratigráfica 3, Trinchera K</p>
5-6	2	 <p>Fragmentos en cerámica Unidad estratigráfica 3A, Trinchera L</p>
7-8	2	 <p>Fragmentos en cerámica Unidad estratigráfica 3B, Trinchera L</p>
9-10	2	 <p>Fragmentos en cerámica Nivel 4, Trinchera L</p>

Esta autorización de salida e intervención se otorga teniendo en cuenta que a estos bienes se les realizarán análisis especializados de arqueomagnetismo (de carácter destructivo) con el fin de obtener una datación absoluta de la cerámica del sitio arqueológico de Puerto Chacho, análisis que se efectuarán en el Laboratorio de Geofísica de la UNAM, en México, en el marco del proyecto que desarrolla el Subdirector de Gestión del Patrimonio del ICANH, Fernando Montejo Gaitán.

Los fragmentos serán transportados por el investigador Avtandil Gogichaishvil y saldrán del país durante el mes de marzo de 2022.



Instituto Colombiano de
Antropología e Historia

ICANH



La cultura
es de todos

Mincultura

Para efectos de realizar seguimiento a esta autorización, es necesario que una vez finalicen los análisis, se remita a este Instituto la copia del informe final de estudio.

Atentamente,

Firmado digitalmente por: Fernando Montejo Gaitán
Unidad organizacional: INSTITUTO COLOMBIANO
DE ANTROPOLOGÍA E HISTORIA
Lugar: Bogotá
Fecha: 14/03/2022 17:28:54

FERNANDO MONTEJO GAITÁN
Subdirector de Gestión del Patrimonio

Proyectó: Angela Escobar Lora – Grupo de Arqueología

APÉNDICE

Apéndice I Artículo sometido a la revista *Earth, Planets and Space* de *Springer Nature*
- <https://earth-planets-space.springeropen.com/>

Absolute palaeointensities retrieved from the Americas oldest pottery.

Ricardo Pacheco¹, Avto Goguitchaichvili¹, Rubén Cejudo¹, Rafael García-Ruiz¹, Fernando Montejo², Vadim Kravchinsky³, Miguel Cervantes¹, Carlos Reina², Juan Morales¹

1. Servicio Archeomagnetico Nacional, Instituto de Geofísica, UNAM campus Morelia, México
2. Unstituto Colombiano de Antropología e Historia, Bogotá, Colombia
3. Geophysics, Department of Physics, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada T6G2E1

Corresponding author: avto@geofisica.unam.mx

ABSTRACT

We carried out detailed rock-magnetic and absolute paleointensity investigation on well-dated, presumably the oldest American pottery from northern Colombia. The study aims to contribute to the reconstruction of Earth's Magnetic Field strength fluctuations in the southern hemisphere. Individual intensities obtained from Puerto Chacho archaeological site vary from 8.7 ± 0.5 to 27.3 ± 1.2 μT , which corresponds to the Virtual Axial Dipole Moments (VADM) values between 2.2 ± 0.1 and 6.8 ± 0.3 10^{22} Am^2 . The mean Puerto Chacho's intensity determined for all twenty-three accepted values is 17.1 ± 6.2 μT , corresponding to the mean VADM of 4.2 ± 1.5 10^{22} Am^2 . These values are significantly lower compared to nearby San Jacinto paleointensities (Goguitchaishvili *et al.* 2023), considered coetaneous to Puerto Chacho. Moreover, the absolute intensity values obtained from the Puerto Chacho pottery yielded relatively low values compared to those derived from three available global field prediction models CALSk.10K, SHA.DIF.14K and ArchKalmag.14K and existing data obtained from previously published studies from Colombia and surrounding areas. A bootstrap analysis of available age distributions and updated radiocarbon calibration values indicate that absolute age intervals for Puerto Chacho are significantly younger, which may explain the difference between the intensity values. The time interval between 6000-5000 BP is usually characterized by some drastic variations of the Earth's magnetic Field strength. Although many studies have recently become available, no conclusions may be drawn about the regional fluctuations of the geomagnetic field strength.

Key Words: Geomagnetic Field Strength, Rock Magnetic Properties, South America, Colombia, Puerto Chacho, Pottery.

Introduction

In recent decades, archaeomagnetic surveys that present determinations of absolute geomagnetic intensity (also called palaeointensity or archaeointensity) have increased considerably in Central and North America (Goguitchaichvili *et al.*, 2019; Mahgoub *et al.*, 2019, among others). Even though new studies become available during the last decade, it

has not been possible to achieve a homogeneous distribution of geomagnetic data in many geographical regions outside Europe, including the American continent (Cejudo *et al.*, 2019; Goguitchaichvili *et al.*, 2023). Navarro Páez (2021), based on a compilation of the data available for the Caribbean region (Berkovich *et al.*, 2017; Cejudo *et al.*, 2019; Obregón *et al.*, 2019; Rojas Mora *et al.*, 2020), demonstrated that the scarcity of data, together with the irregular spatial distribution, makes it impossible to obtain any firm conclusions about the long-term variation of the intensity of the geomagnetic field in that area. It is also evident that the data cover only the last two millennia and that there are almost no data for older periods (Goguitchaichvili *et al.*, 2023).

Goguitchaichvili *et al.* (2023) carried out an archaeomagnetic study on ceramics between 5940 ± 60 BP and 5190 ± 40 BP from the San Jacinto locality, an archaeological site located in the Sabana Region on the northern coast of Colombia (Oyuela-Caycedo and Bonzani, 2005). Goguitchaichvili *et al.* (2023) reported archaeointensity determinations from 36 samples of six ceramic fragments from San Jacinto, using a double heating Thellier method. The obtained mean intensity values vary from 50.7 ± 4.7 to 65.3 ± 11.9 μT . In contrast, their corresponding virtual axial dipole moments (VADM) vary from 12.6 ± 1.2 to $16.2 \pm 2.9 \times 10^{22}$ Am^2 , indicating unusually high geomagnetic field intensities compared to values predicted by global geomagnetic models. The authors argued that this unexpected result represented the first evidence of a 'peak' value of archaeointensity recorded before 1000 BC. In the specialized literature, similar or even higher absolute geomagnetic intensities have been reported in the Levant Region around 1100-800 BC and in the southwest Pacific region in 1450 AD. The actual cause of an abnormally high geomagnetic intensity is commonly attributed to geodynamic processes occurring at the boundaries between the outer core and the Earth's mantle, however, this phenomenon is not yet fully understood. Because of the importance of these rather exceptional results, it is necessary to confirm it with additional studies of similar age burned archaeological artifacts bearing thermoremanent magnetization.

The northern region of Colombia, known for its pottery production networks, is considered the oldest in America (Legros, 1992). However, still, no systematic archaeomagnetic studies are available, and thus, fine characteristics of the Earth's Magnetic Field remain unknown. The comprehensive investigation conducted by Legros (1992) on the

Caribbean coast of Colombia unearthed early evidence of the ceramic network in the Americas. Puerto Chacho, together with San Jacinto 1 (see Goguitchaichvili *et al.* 2023), was occupied by prehistoric populations during the second half of the fourth millennium (3500-3000 B.C.).

Our study presents the results of an extensive investigation of archaeointensity and rock magnetism carried out on ceramic sherds from Puerto Chacho, a site also located in the Colombian Caribbean with the same temporality as San Jacinto. These ceramics were obtained because of a scientific collaboration between the National Archaeomagnetic Service (UNAM, Mexico) and the ICANH (National Institute of Anthropology and History of Colombia). The primary objectives were to determine the absolute intensity (archaeointensity) recorded in the Puerto Chacho ceramics and to estimate the perseverance and duration of the anomalously intense geomagnetic event detected for approximately 5500 years BP.

Archaeological Context and Samples

The Colombian Caribbean is characterized by its diversity of habitat, where hills and grasslands predominate and are affected by seasonal flooding. The colonization of this region of the continent began about 11 thousand years ago. Later, during the Archaic and Formative periods, seasonal migrations of populations occurred and strongly depended on the resources available in the different microenvironments where they lived. Around 4000 BC, pottery was invented. This pottery is considered as one of the oldest findings in the Americas (Reichel-Dolmatoff, 1965; Oyuela-Caycedo, 2008; Loaiza Díaz and Aceituno Bocanegra, 2015). Despite the importance of this discovery, the archaeological past of the Colombian Caribbean remains little known. The first attempt to chronologically describe Colombia's pre-Hispanic past was made by Reichel-Dolmatoff (1965) for different archaeological cultures in different periods of development. However, periods such as the Archaic remained poorly defined due to the lack of reliable information (Reichel-Dolmatoff, 1965; Oyuela-Caycedo, 2008; Loaiza Díaz and Aceituno Bocanegra, 2015).

Due to its geographical position, northern Colombia has been a site of exchange of people, objects and knowledge. The Caribbean populations had a semi-sedentary life with different group mobility strategies; they depended on hunting, gathering and fishing methods that were adapted to the different microenvironments. The main models proposed for the emergence of ceramics in America are a) Cooking and processing of food, b) Storing food and c) Festivities (Pratt, 1999; Oyuela-Caycedo, 2008; Carvajal-Contreras, 2022). These early ceramics were characterized by the use of vegetable degreasers, additives that give them mechanical and thermal resistance in early Formative period sites San Jacinto, Puerto Hormiga and Puerto Chacho. The shape and size of the ceramics suggest that they were mainly used to serve or store food (Pratt, 1999; Carvajal-Contreras, 2022). The age of 3090 ± 70 BC obtained by Reichel-Dolmatoff (1965) was considered the oldest for ceramic on the continent. Later, Oyuela Caycedo (1987) published an age of 3750 ± 430 BC for the final occupation of the San Jacinto site (Oyuela Caycedo, 1987; Rodríguez, 1988).

The archaeological site known as the *Conchal de Puerto Chacho* was discovered and excavated in 1988. It is located on the right bank of the *Canal del Dique* in the municipality of Arjona, Department of Bolívar, a few kilometers from the Colombian Caribbean coast and 30 km from the city of Cartagena. A radiocarbon age of 3270 ± 90 years BC was obtained for one of the middle strata that contained pottery remnants so it is likely that the initial occupation of the site is even older (Rodríguez, 1988; Legros, 1989, 1992; Álvarez León and Maldonado Pachón, 2009). Therefore, the site is considered to be inhabited by one of the first pottery-making populations on the American continent. The site was occasionally occupied for about 300 years between 3300 and 3000 BC (Álvarez León and Maldonado Pachón, 2009; Carvajal-Contreras, 2022). Ceramics were apparently used to transport water or food, but not used for collecting mollusks due to the low abundance of pottery material. Because only one complete vessel has been found, ceramic production was not an outstanding activity of the inhabitants of Puerto Chacho (Álvarez León and Maldonado Pachón, 2009).

Four different laboratory radiocarbon ages are reported in Table 1, ranging from 3270 ± 90 BC to 52490 ± 90 BC (uncalibrated). Pottery samples analyzed in the present investigation belong to ICANH (*Colombian Institute of Anthropology and History*) archives. The available radiocarbon dates are reported in Legros (1992) and come from the four

apparently well-defined stratigraphic layers (see Table 1). In this context, it seems that samples match criterion B for the Sample-Event (S-E) relationship and degree II for the Date-Pottery (D-P) association (Waterbolk, 1983, see also Goguitchaichvili *et al.*, 2019). This means that there is an acceptable relationship between the pottery samples and associated radiocarbon age.

Experimental Procedures

In order to select the most suitable samples for Thellier-type archaeointensity experiments, we recorded susceptibility vs. temperature continuous thermomagnetic curves (k-T curves) on chips from pottery fragments. AGICO MFK-1 magnetic susceptibility bridge equipped with a furnace was used to obtain the k-T curves. Specimens were crushed with an agate mortar and then heated up to 670-675°C at the rate of 20°C per minute. Another specimen per fragment was demagnetized using alternating fields. The thermal demagnetization experiments were carried out using ASC Scientific archaeointensity oven equipped with coils to produce magnetic fields. The remanent magnetization was measured using the AGICO JR6 spinner magnetometer. Sample fragments were broken into at least six specimens and pressed into ultrapure salt (NaCl) pellets to measure them as standard paleomagnetic cores.

The Thellier–Coe method (Thellier and Thellier, 1959; Coe *et al.*, 1978) was employed for archaeointensity experiments. Twelve temperatures were distributed from room temperature to 560 °C while a laboratory field of 50 μ T was held during heating and cooling segments. Three to five control heatings or so-called pTRM (partial thermoremanent magnetization) checks were recorded throughout the whole experiment. All heatings were carried out in the air. Samples were cooled down naturally up to 120°C, and the fans were used to accelerate the cooling process to room temperature. Because no remanence is usually blocked between 120°C and room temperature, cooling rate correction is not required, and thus, three additional heatings may be avoided. The thermoremanence anisotropy effect was investigated through anhysteretic remanent magnetization (AARM) instead of thermoremanent magnetization. The corresponding anisotropy correction factors for each specimen are listed in Table 2 according to the simplified protocol of Veitch *et al.* (1984).

Results and Discussion

Continuous susceptibility curves, together with alternating field demagnetization of one sample per pottery fragment, served to select the most suitable samples for the Thellier archaeointensity experiments. Figure 2 summarizes these experiments exhibiting the behavior of representative samples. The presence of Ti-poor titanomagnetite (Curie temperatures between 545-567°C) and some fractions of hematite are general characteristics of analyzed samples. Figure 2a shows the unstable thermomagnetic properties while remaining samples exhibit reasonably reversible behaviour during the heating and cooling cycles. It cannot be ascertained that a poorly defined inflection at very low temperatures detected in sample CHA10 (Figure 2d) is a true magnetic phase or some experimental artifact. As alternating field demagnetization experiments are concerned, the majority of samples exhibited an essentially linear and single component (Figure 3a and b). The major part of total remanence is removed between 50 and 70 mT, while MDF (Median Destructive Field) values range between 25 and 30 mT. It demonstrates that magnetite the hematite grain contribution is negligible in the samples. Some samples yielded evidence of multicomponent magnetization (Figure 3c) and we did not use them for absolute intensity experiments.

Archaeointensity experiments were carried out on 39 specimens from levels 3A, 3B and 4, showing stable demagnetization patterns and reasonably reversible continuous thermomagnetic curves. Some representative Arai-Nagata diagrams are shown in Figure 4, while experimental details are reported in Table 2. We accepted only determinations (23 in total) which yielded the following quality parameters (Leonhardt, 2006; Patersen, 2014): $n \geq 6$, $f \geq 1/3$ of total remanence, $MAD \leq 15$, $\alpha \leq 15$, $\delta CK \leq 9$, $q \geq 5$, and concavity parameter k' is below 0.27 (see Table 1 for the detailed description of quality parameters). Five specimens did not obey these quality criteria (Table 2, PCH23, 25, 32, 40, 44 and 45), but their intensity values are close to the average archaeointensities. Thus, we decided to incorporate them in our analysis. The main reason for the failure of archaeointensity determination was a clearly concave-up behaviour (Figure 4c) commonly associated with dominantly multi-domain structure magnetic grains.

Individual intensities vary from 8.7 ± 0.5 to 27.3 ± 1.2 μT , which corresponds to VADM (Virtual Axial Dipole Moment) values between 2.2 ± 0.1 and 6.8 ± 0.3 10^{22} Am^2 . Because the radiocarbon ages from different stratigraphic levels are statistically indistinguishable within the uncertainties (Table 1), we calculate the mean of all individual determinations. This way, the mean Puerto Chacho intensity for all accepted determinations is 17.1 ± 6.2 μT , while mean VADM is 4.2 ± 1.5 10^{22} Am^2 . These values are significantly below San Jacinto archaeointensities of the same age (Goguitchaishvili *et al.*, 2023). To clarify this apparent discrepancy, we applied an updated radiocarbon calibration curve INT.CAL20 (Reimer *et al.*, 2020) to the available radiocarbon dates for Puerto Chacho. Figure 5 shows that the calibrated ages are younger than the San Jacinto dates (see also Table 1). To reinforce this finding, we carried out a bootstrap resampling to distinguish between two age distributions. For this purpose, a random sample of 200 theoretical ages was generated. Finally, the frequency histograms were generated (Figure 6) indicating the average age of each site with its 95% confidence intervals (Garcia-Pimentel *et al.*, 2022). The bootstrap resampling yielded the age of 4178 ± 414 BC for San Jacinto and 3489 ± 280 BC for Puerto Chacho.

The archaeointensity values obtained from the Puerto Chacho pottery have relatively low values compared to the values derived from the three available global field prediction models CALSk.10K, SHA.DIF.14K and ArchKalmag.14K (Korte *et al.* 2011; Pavon-Carrasco *et al.* 2014; Schanner *et al.*, 2022) (Figure 7a). The Puerto Chacho archaeointensity values are also lower than the values from previously published data for Colombia and surrounding areas (Figure 7b).

Concluding Remarks

- The review of existing archaeointensity data in Colombia and surrounding areas shows highly irregular spatial distribution, which impedes drawing any firm conclusions about the long-term variation of the geomagnetic field strength.
- The selected, available data cover only the last two millennia, while there is almost no data for older periods. Our San Jacinto and Puerto Chacho extend this interval to 3,000-5,000 years BC.

- Our Puerto Chacho study provides the first evidence of unusually high geomagnetic field intensity compared to values predicted by global geomagnetic models obtained for the San Jacinto pottery from the Caribbean coast of Colombia at around 5500 BP.
- An extensive archaeointensity and rock-magnetism investigation was carried out on pottery sherds from Puerto Chacho, another site also located in the Colombian Caribbean with the younger age pottery than previously studied San Jacinto.
- Almost the magnetite phase (extreme members of titanomagnetite solid solutions) is the main magnetic signal carrier, while hematite grains may also coexist without notably contributing to the thermoremanence.
- Suitable samples for paleointensity experiments were selected upon alternating field demagnetization and continuous thermomagnetic curves.
- Twenty-three individual determinations belonging to three stratigraphic levels yielded significantly lower intensities than San Jacinto intensities and values derived from the recent geomagnetic models and GEOMAGIA database.
- The bootstrap analysis performed on updated and calibrated age intervals available for both sites indicated a significantly younger age for the Puerto Chacho site.
 - The time interval between 5000 and 6000 BP appears to have extreme variations of the Earth's magnetic field strength.

Acknowledgements

This work was supported by the DGAPA-PAPIIT grant n° IN100224. This study was partially funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada for V.A.K. (NSERC grant RGPIN-2019-04780). A.G. is grateful for the support provided by UNAM-DGAPA for his sabbatical fellowship.

References

Álvarez León, R., Maldonado Pachón, H., Arqueofauna encontrada en puerto chacho, sitio arqueológico del Caribe Colombiano (3300 a.C.), *Revista Académica Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 33(128), 407–424, 2009.

Berkovich, C.S., Goguitchaichvili, A., León, G.A.P., Morales, J., Primeros resultados de arqueointensidades de Colombia: sitios prehispánicos en el valle del río magdalena (hondatolima y puerto Bogotá-Cundinamarca, *Arqueología Iberoamericana*, 33, 10-17, 2017.

Carvajal-Contreras, D.R., La región del caribe colombiano como escenario precolombino para desarrollos agrícolas, procesos de sedentarización y nuevas tecnologías durante el período formativo, *TESSITURA*, 10(1), 113–132, 2022.

Cejudo, R., Goguitchaichvili, A., Montejo, F., García Ruiz, R., Botiva, Á., Morales, J., First archaeomagnetic results from Colombia (the Bogotá Savanna Pre-Hispanic sites): Implications for the Caribbean absolute geomagnetic intensity variation curve, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 26, <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.101898>, 2019.

Coe, R.S., Grommé, S., Mankinen, E.A., Geomagnetic paleointensities from radiocarbon-dated lava flows on Hawaii and the question of the Pacific nondipole low, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B4), 1740–1756, <https://doi.org/10.1029/jb083ib04p01740>, 1978.

Pimentel, A. G., Goguitchaichvili, A., Torreblanca, C., Kravchinsky, V., Cervantes, M., García, R., & Morales, J., Depopulation of the Northern Border of Mesoamerica during the Early Postclassic: Evidence from the Reappraisal of Archaeomagnetic Data, *Land*, 11(12), 2103, <https://doi.org/10.3390/land11122103>, 2022.

Goguitchaichvili, A., Greco, C., Ruiz, R.G., Domingorena, L.P., Cejudo, R., Morales, J., Gogorza, C., Scattolin, C., Tarragó, M., First archaeointensity reference paleosecular variation curve for South America and its implications for geomagnetism and archaeology, *Quaternary Research*, 92(1), 81–97, 2019.

Goguitchaichvili, A., Morales, J., García, R., Montejo, F., Kravchinsky, V., Cejudo, R., Cervantes, M., Reina, C., Possible evidence for geomagnetic intensity anomaly around 5500 BP from archaeomagnetic analyses of San Jacinto pottery, Caribbean Colombia, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 31, 107061, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2023.107061>, 2023.

Korte, M., Constable, C., Donadini, F., Holme, R., Reconstructing the Holocene geomagnetic field: *Earth and Planetary Science Letters*, 312(3–4), 497–505, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.10.031>, 2011.

Legros, T., Consideraciones sobre Puerto Chacho, un conchero de las Llanuras del Caribe Colombiano, *Memorias del V Congreso Nacional de Antropología*, 67–76, 1989.

Legros, T., Puerto Chacho and the first American ceramists - new data on early formative of the Caribbean coast of Colombia, PhD Thesis, Paris 1. 1992.

Leonhardt, R., C. Heunem, D. Krása. Analyzing Absolute Paleointensity Determinations: Acceptance Criteria and The Software Thellier Tool4.0. *Geochem Geophys Geosyst* 5:12, <https://doi.org/10.1029/2004g c00008>, 2004.

Loaiza Díaz, N., Aceituno Bocanegra, F.J., Reflexiones en torno al Arcaico colombiano, *Revista colombiana de antropología*, 51(2), 121–146, 2015.

Mahgoub, A.N., Juárez-Arriaga, E., Böhnell, H., Manzanilla, L.R., Cyphers, A., Refined 3600 years palaeointensity curve for Mexico, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 296, 106328, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2019.106328>, 2019.

Navarro Páez, L.F., Archaeomagnetic characterization and possible dating based on archaeointensity values, of prehispanic ceramics from the Nueva Esperanza archaeological site-TCE Sector (Sabana de Bogotá, Colombia), Master Thesis, Thessaloniki, Aristotle University of Thessaloniki, 2021.

Obregón, M., Luna, Á.R., Gogutchiaichvili, A., Cejudo, R., Morales, J., Cervantes-Solano, M., Greco, C., Termoluminiscencia vs. arqueomagnetismo: datación absoluta de fragmentos cerámicos prehispánicos de los andes noroccidentales (piedras blancas, Medellín, Colombia), *Arqueología Iberoamericana*, 42, 42-49, 2019.

Oyuela Caycedo, A., Dos sitios arqueológicos con desgrasante de fibra vegetal en la serranía de San Jacinto (Departamento de Bolivar), 1987.

Oyuela-Caycedo, A., Late Pre-Hispanic Chiefdoms of Northern Colombia and the Formation of Anthropogenic Landscapes: The Handbook of South American Archaeology, Springer New York, 405–428, https://doi.org/10.1007/978-0-387-74907-5_22, 2008.

Oyuela-Caycedo, A., Bonzani, R.M., San Jacinto 1: a historical ecological approach to an archaic site in Colombia, University of Alabama Press, 2005.

Paterson, G. A., Tauxe, L., Biggin, A. J., Shaar, R., & Jonestrask, L. C., On improving the selection of Thellier-type paleointensity data, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(4), 1180-1192, <https://doi.org/10.1002/2013GC005135>, 2014.

Pavón-Carrasco, F.J., Osete, M.L., Torta, J.M., De Santis, A., A geomagnetic field model for the Holocene based on archaeomagnetic and lava flow data, *Earth and Planetary Science Letters*, 388, 98-109, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.046>, 2014.

Pratt, J.A.F., Determining the Function of One of the New World's Earliest Pottery Assemblages: The Case of San Jacinto, Colombia, *Latin America Antiquity*, 10(1), 71-85, 1999.

Reichel-Dolmatoff, G., Excavaciones en los Conchales de la Costa de Barlovento, *Revista Colombiana de Antropología*, 4, 249-272, 1965.

Reimer, P.J., Austin, W.E.N., Bard, E., Bayliss, A., et. al., The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0-55 cal kBP), *Radiocarbon*, 62(4), 725-757, <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>, 2020.

Rodríguez, C., Las tradiciones alfareras tempranas en las llanuras del caribe colombiano (Departamentos de Bolívar y Atlántico). *Periodización y comparación cerámica*, *Boletín de Arqueología*, 3, 26-40, 1988.

Rojas Mora, S., Cejudo, R., Marín Uribe, M., del Sol Hernández-Bernal, M., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Montejo, F., Bautista, F., Estudio magnético y geoquímico de la cerámica prehispánica de la depresión Momposina: análisis arqueométricos en el norte de Sudamérica, *Arqueología Iberoamericana*, 46. 15-22, 2020.

Schanner, M., Korte, M., Holschneider, M., ArchKalmag14k: A Kalman-Filter Based Global Geomagnetic Model for the Holocene, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(2), <https://doi.org/10.1029/2021JB023166>, 2022.

Thellier, E., Thellier, O., Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, *Annales Géophysique*, 15, 285-386, 1959.

Veitch, R. J., An investigation of the intensity of the geomagnetic field during Roman times using magnetically anisotropic bricks and tiles, *Arch. Sci. Geneve.*, 37(3), 359-373, 1984.

Waterbolk, H. T., Ten guidelines for the archaeological interpretation of radiocarbon dates, *PACT J. European Study Group Phys. Chem- Math. Tech. Appl. Archaeol*, 8, 57-70.

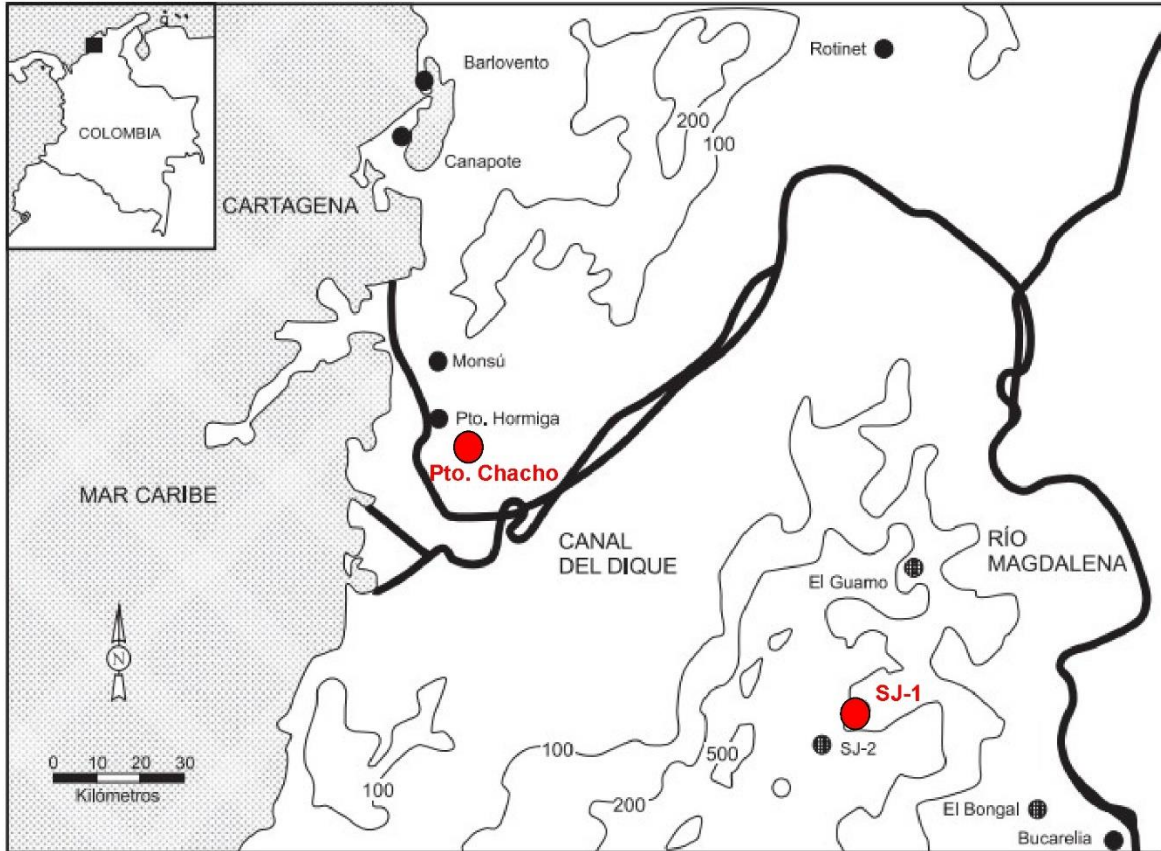


Figure 1. Location of Puerto Chacho archeological site at the Caribbean coast of Colombia. Also shown is the location of San Jasinto I, Redrawn from Oyuela-Caycedo and Bonzani (2005).

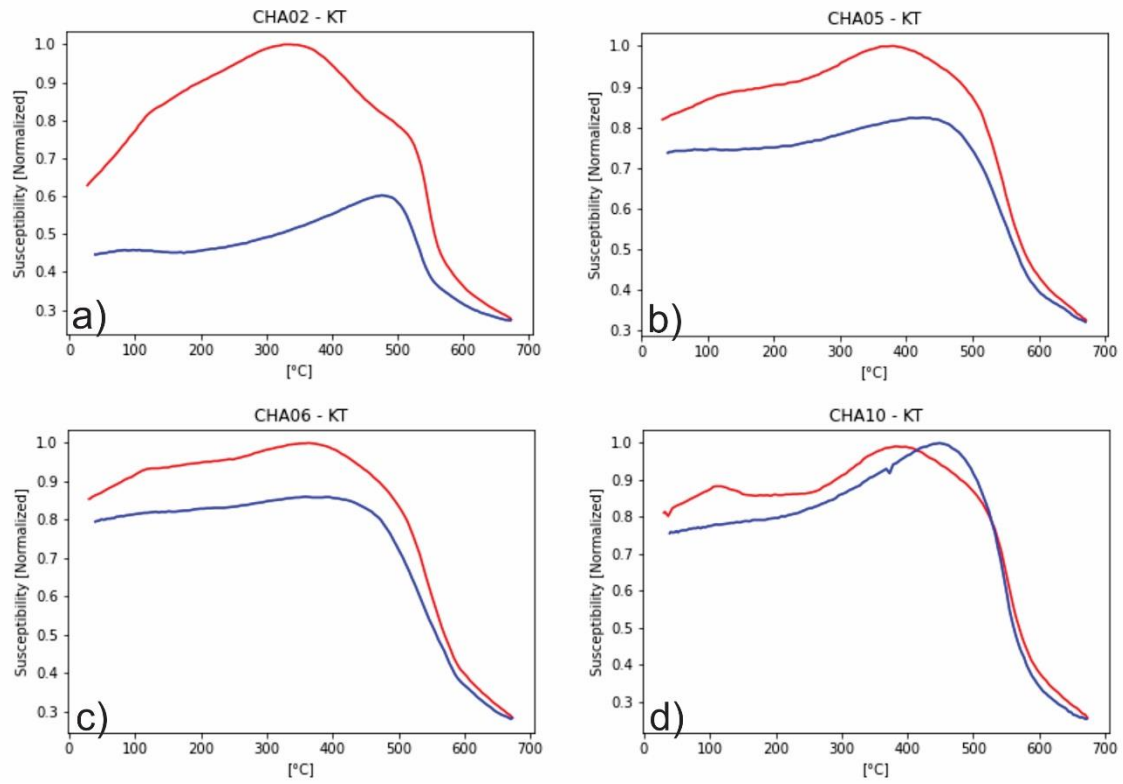


Figure 2. Representative examples of continuous thermomagnetic curves for selected samples (please see text for more details). Red/blue colors refer to heating and cooling branches, respectively.

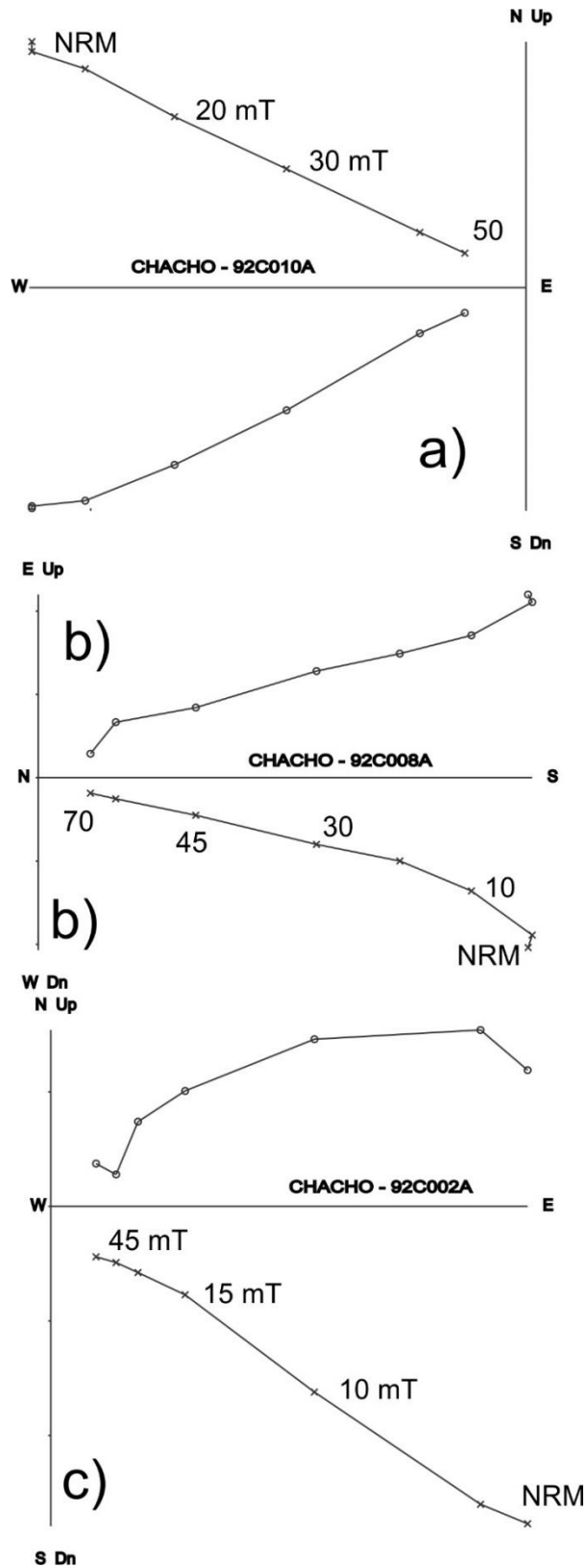


Figure 3. Representative examples of alternating field demagnetization of small chips from virgin specimens per pottery fragment.

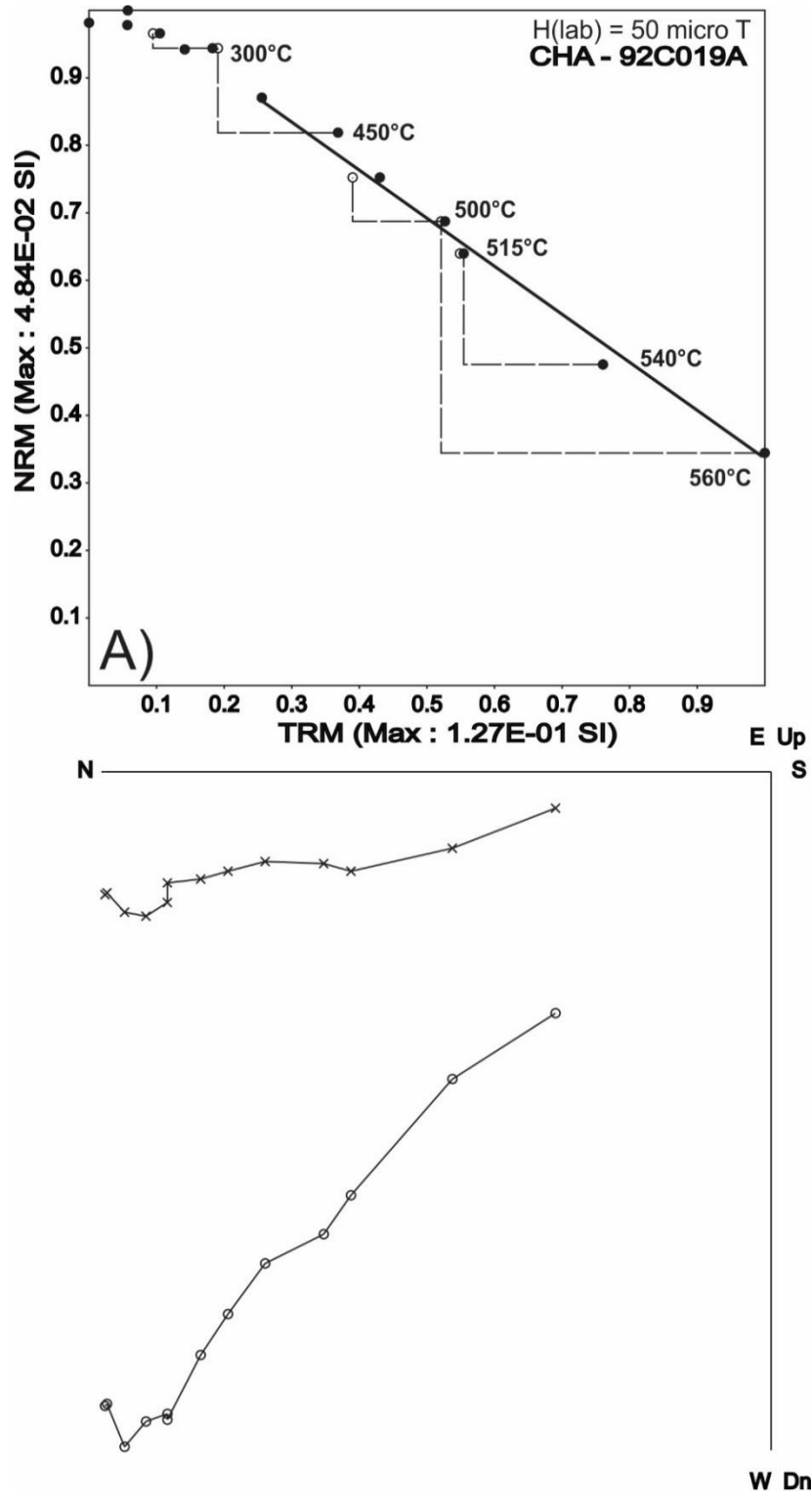


Figure 4a. Representative Natural Remanent Magnetization (NRM) – Thermomagnetic Remanent Magnetization (TRM) plots (Arai-Nagata plots) and associated orthogonal vector NRM end points demagnetization diagrams, for representative samples.

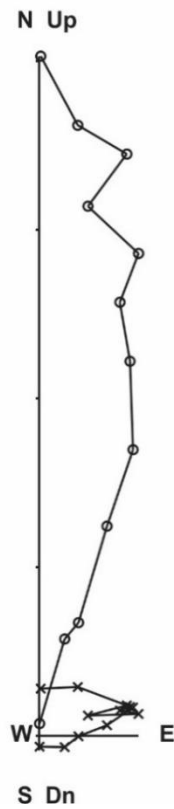
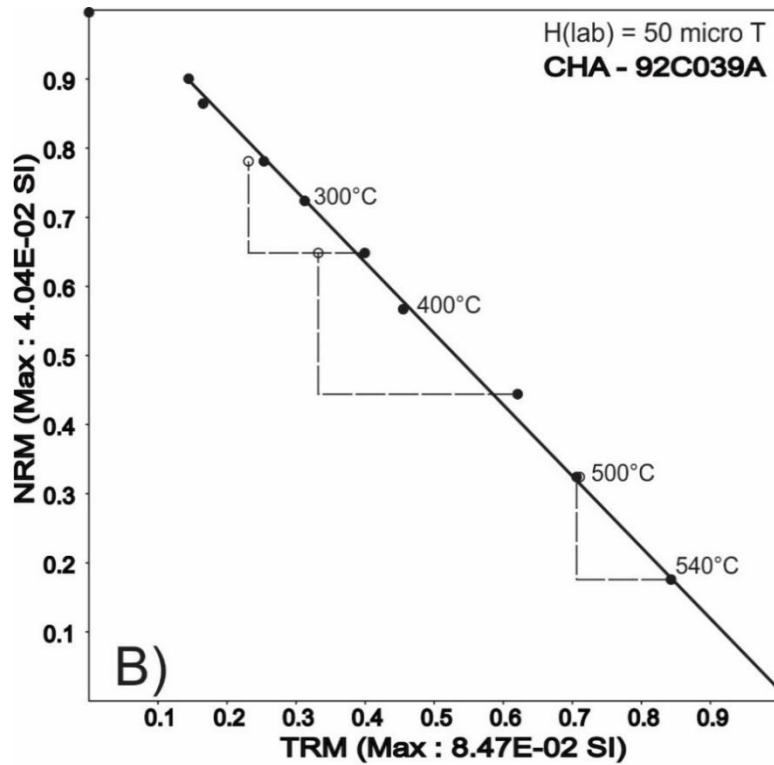


Figure 4b. Representative Natural Remanent Magnetization (NRM) – Thermomagnetic Remanent Magnetization (TRM) plots (Arai-Nagata plots) and associated orthogonal vector NRM end points demagnetization diagrams, for representative samples.

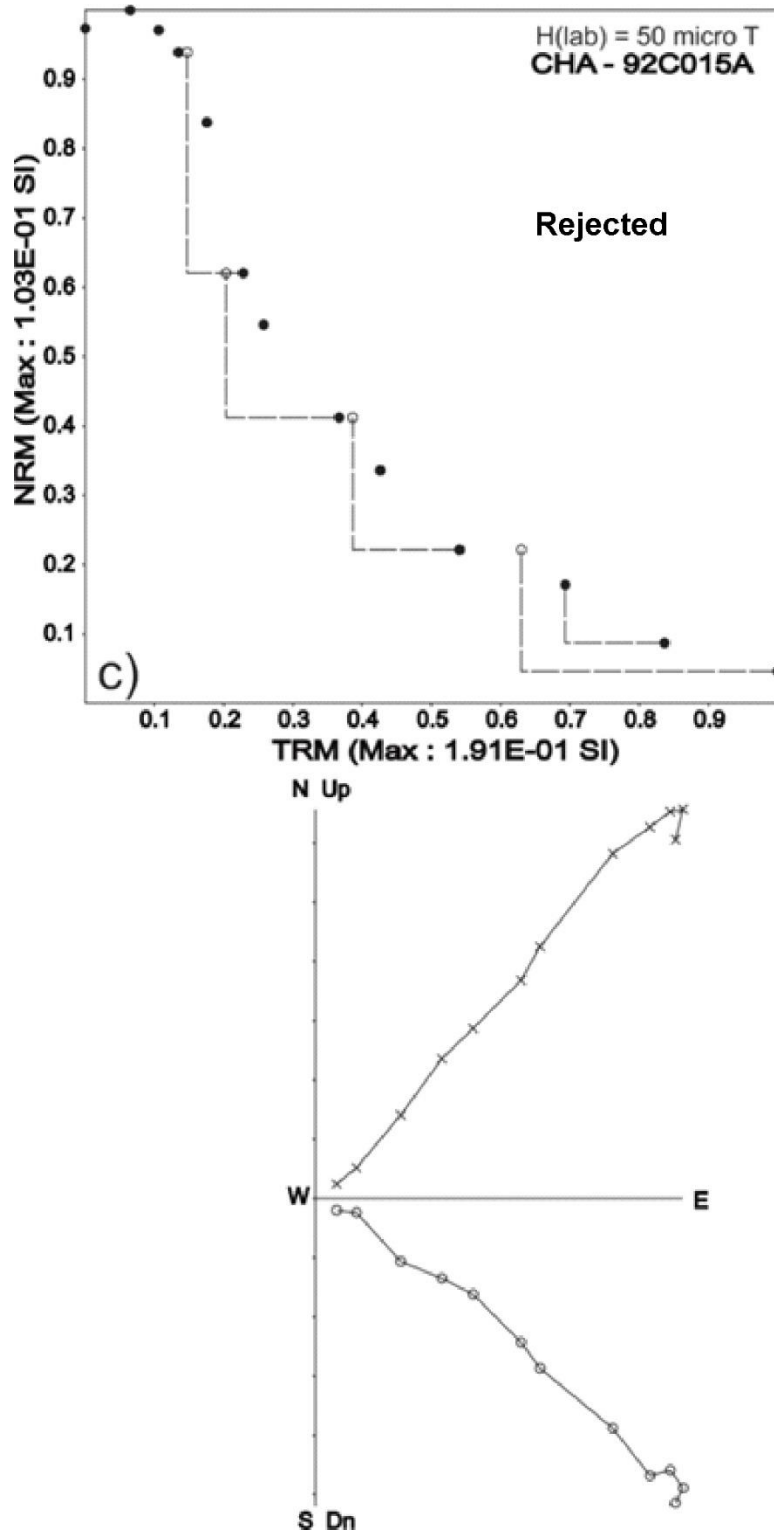


Figure 4c. Representative Natural Remanent Magnetization (NRM) – Thermomagnetic Remanent Magnetization (TRM) plots (Arai-Nagata plots) and associated orthogonal vector NRM end points demagnetization diagrams, for representative samples.

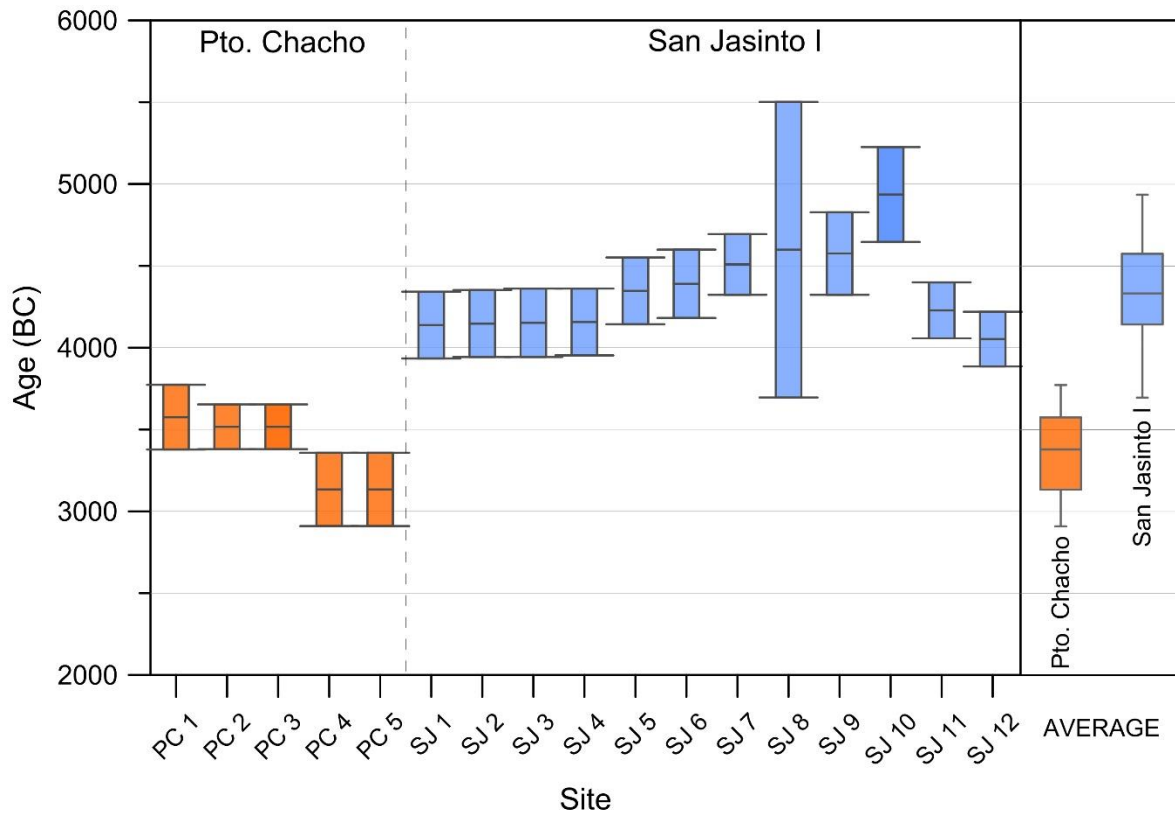


Figure 5. Available radiocarbon ages for Puerto Chacho (Legros *et al.*, 1992) and San Jacinto 1 (Oyuela-Caycedo and Bonzani, 2005) archaeological sites. Mean values with corresponding standard deviations are also shown. All ages are calibrated using INT.CAL20 curve by Reimer *et al.* (2020).

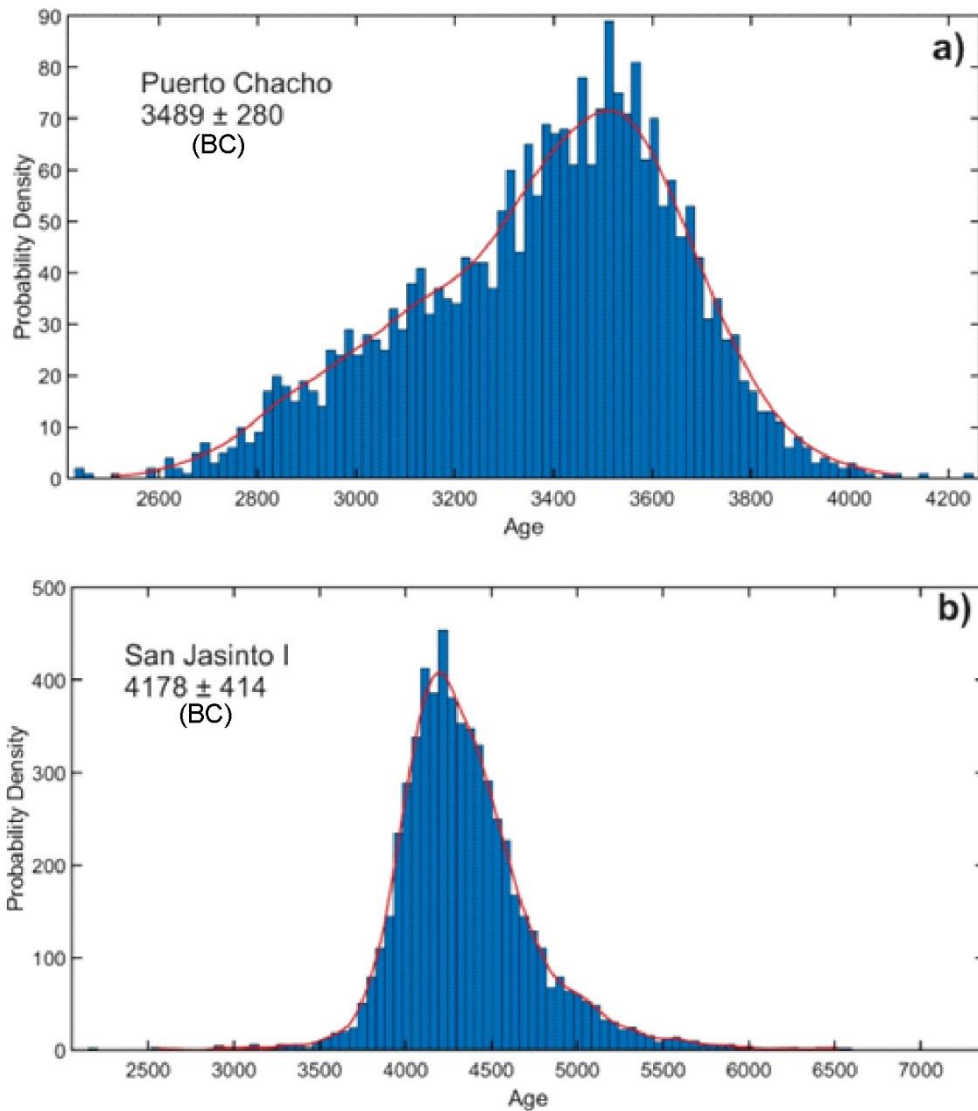


Figure 6. Frequency histogram corresponding to the calculation of the average age intervals of Puerto Chacho and San Jacinto I using the bootstrap method. The dotted blue lines indicate the limits of the 95% confidence interval.

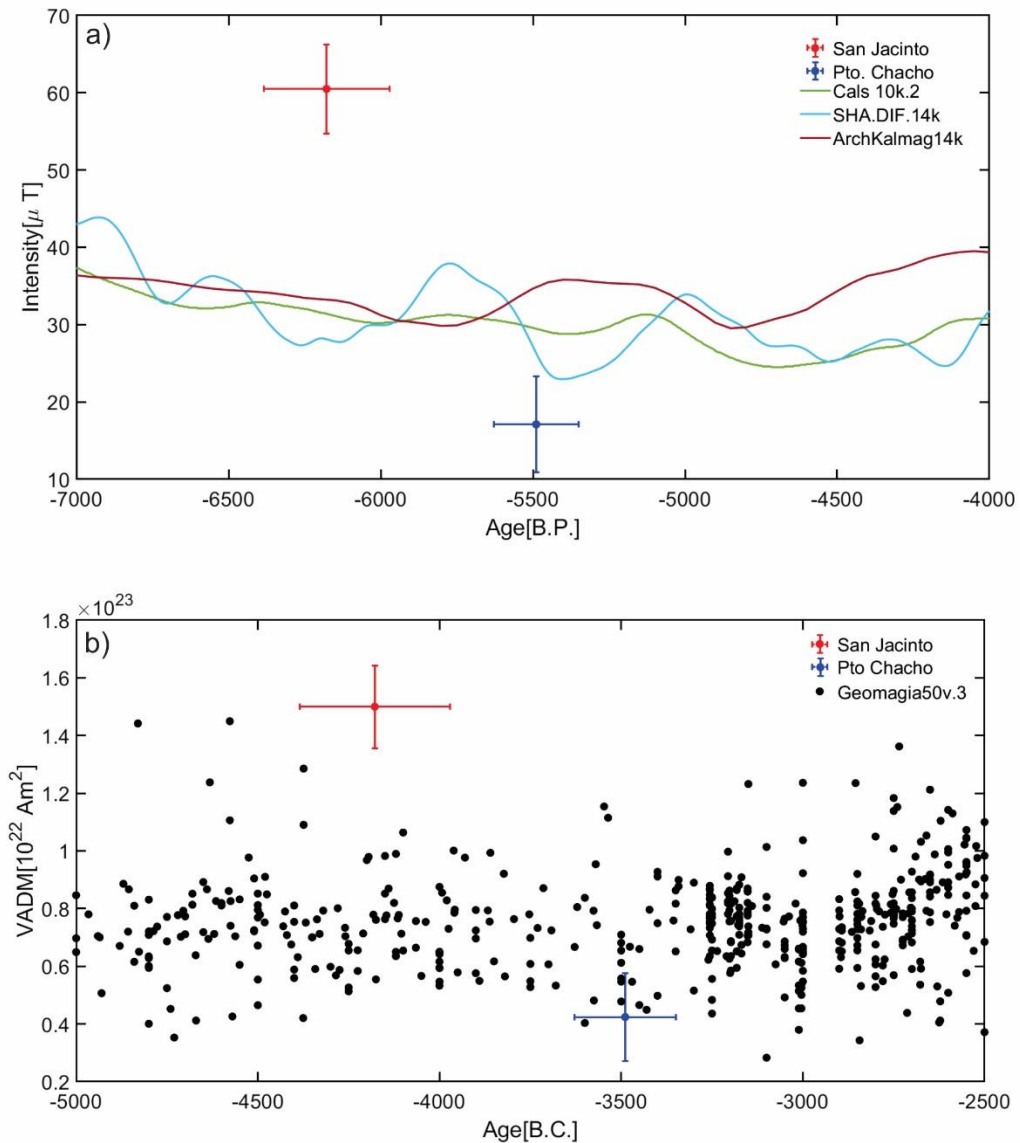


Figure 7. (a) The mean paleointensity value obtained in this study and in Goguitchaichvili *et al.* (2023) compared to the global geomagnetic models CALSk.10K, SHA.DIF.14K and ArchKalmag. (b) Available data in Geomagia50.v3 database (please see text for more details).

Table 1. Available radiocarbon ages for Puerto Chacho. The calibration was carried out using the IntCal20 curve (Reimer *et al.*, 2020). Modified from (Legros, 1992).

Stratigraphic Unit	Dating¹⁴C [BC]	Intervals Uncalibrated	Calibrated 2σ IntCal20 [cal BC]
J-2B	3270 \pm 90	3180 - 3360	4320-3801
J-3	2780 \pm 70	2710 -2850	3637-3371
J-3A	2880 \pm 70	2810 – 2950	3773-3378
J-3B	2850 \pm 50	2800 – 2900	3653-3380
J- 4	2490 \pm 90	2400 - 2580	3358-2910

Table 2. Thellier archaeointensity determination (accepted samples); **N**: number of points in the Arai plot used for the linear best-fit, **T₁/T₂**: lower/upper-temperature step used to determine the archaeointensity; **f**: NRM fraction used for the best-fit calculation; **g** and **q**: quality factors (Coe *et al.*, 1978); **MAD**: maximum angular deviation; **Alpha**: the angular difference between the anchored and non-anchored best-fit; **CK-error**: relative check error, **k'** – curvature parameter, **F** – Anisotropy factor using an ARM in 15 positions. Anisotropy corrected absolute intensity and associated virtual axial dipole moments. Marked values exceed imposed quality criteria (see text for details). Samples PCH19-PCH24 correspond to level 3A), PCH25-PCH33 (level 3B), PCH37-PCH48 (level 4).

Sample	N	T ₁ -T ₂	f	g	q	MAD	α	δ(CK)	k'	Anis F	B (μT)	σ _B	VADM	Error
°C											Corr	10 ²² Am ²	10 ²² Am ²	
PCH19	8	300-560	0.56	0.82	12.2	1.34	0.84	2.85	0.01	0.8997	14.4	0.5	3.57	0.12
PCH21	7	350-560	0.46	0.72	5.6	5.07	6.62	1.69	0.19	0.8399	8.7	0.5	2.16	0.13
PCH22	8	300-560	0.62	0.82	13.7	3.42	2.82	2.25	0.1	0.8981	14.3	0.6	3.55	0.15
PCH23	9	200-540	0.49	0.85	7.3	7.39	20.71	4.88	0.77	0.9737	12.6	0.7	3.13	0.17
PCH24	9	200-540	0.64	0.82	11.6	3.69	5.11	4.68	0.04	0.9352	12.1	0.6	3.00	0.15
PCH25	8	350-560	0.63	0.85	7.2	14.74	13.42	6.92	0.49	0.9738	8.9	0.7	2.21	0.17
PCH26	8	250-540	0.57	0.85	9.6	9.54	14.68	2.65	0.25	broken	12.2	0.6	3.03	0.15
PCH27	8	300-540	0.56	0.85	10.9	7.34	9.05	9.32	0.05	0.9387	27.3	1.2	6.77	0.31
PCH28	9	300-560	0.59	0.76	11.9	2.88	7.82	2.94	0.22	0.9098	9.5	0.3	2.36	0.008
PCH29	10	250-560	0.75	0.84	13.9	4.49	14.72	3.07	0.01	0.9414	9.4	0.4	2.33	0.009
PCH32	8	250-500	0.39	0.38	6.1	7.32	12.81	2.59	0.44	0.9811	18.1	1.1	4.49	0.27
PCH33	7	300-540	0.32	0.82	7.1	3.21	9.27	1.35	0.17	0.9664	10.2	0.4	2.53	0.09
PCH37	11	150-560	0.81	0.89	33.8	3.9	5.93	2.55	0.01	0.9192	20.6	0.4	5.11	0.09
PCH39	11	150-540	0.84	0.88	37.2	4.49	7.42	6.55	0.04	0.9585	24.6	0.5	6.10	0.12
PCH40	11	150-560	0.94	0.89	27.4	4.68	2.08	15.16	0.05	0.9239	20.7	0.6	5.13	0.15
PCH41	11	150-560	0.82	0.87	28.7	3.01	5.42	3.64	0.16	0.9187	15.5	0.4	3.84	0.16
PCH42	7	350-560	0.61	0.83	10.1	6	5.64	4.89	0.12	0.96	15.3	0.8	3.79	0.21
PCH43	11	150-560	0.89	0.89	46.2	4.38	6.97	1.15	0.09	0.9203	26.7	0.7	6.90	0.17
PCH44	8	300-560	0.72	0.84	19.1	5.78	10.32	40.77	0.11	0.9385	19.3	0.6	4.79	0.19
PCH45	8	300-560	0.7	0.83	20.8	4.27	7.42	13.21	0.2	0.93	20.4	0.7	5.06	0.17
PCH46	8	300-560	0.74	0.84	13.8	4.74	7.43	8.7	0.2	0.9442	21.6	1.1	5.36	0.27
PCH47	10	200-560	0.75	0.84	26.6	3.58	8.28	5.86	0.06	0.9476	24.5	0.7	6.08	0.18
PCH48	9	250-560	0.7	0.85	15.9	5.33	9.24	6.63	0.05	0.9641	26.2	0.9	6.50	0.23