

Practical guide for volcano observatories on paleomagnetic sampling of pyroclastic deposits from active volcanoes

Guía práctica para observatorios vulcanológicos sobre el muestreo paleomagnético de depósitos piroclásticos de volcanes activos

Geoffrey A. Lerner^{1*}, R. Marcela Lira-Beltrán²

¹ División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), San Luis Potosí, Mexico

² Independent researcher

* geoffrey.lerner@ipicyt.edu.mx [Geoffrey A. Lerner]

ORCID (GAL): 0000-0002-9853-7601

ORCID (RMLB): 0009-0002-5596-861X

Keywords: volcano; paleomagnetism; pyroclastic density current; volcán; paleomagnetismo; Corriente de densidad piroclástico

November 13, 2025

This manuscript is a non-peer reviewed preprint submitted to *Volcanica*. Please note that the manuscript is currently under review and has not yet been accepted for publication. Subsequent versions of this manuscript may have different content. If accepted, the final version of this manuscript will be available via the ‘Peer-reviewed Publication DOI’ link on its EarthArXiv web page. Please feel free to contact us with any comments or feedback about our manuscript.

This manuscript is intended for bilingual publication in English and Spanish to allow for broader use by volcano observatories in multiple countries. As such, this preprint contains both versions of the manuscript, written and edited concurrently in both languages.

Este manuscrito es una preimpresión no revisada por pares que esta enviado a *Volcancia*. Por favor notase que el manuscrito está actualmente en proceso de revisión y todavía no está aceptado para publicación. Siguientes versiones del manuscrito podrían tener contenido diferente. Si está aceptado, la versión final del manuscrito será disponible por el enlace de “DOI de publicación revisado por pares” en su pagina de web de EarthArXiv. Nos pueden contactar con cualquier comentario o retroalimentación sobre nuestro manuscrito.

Este manuscrito tiene intención de publicación bilingüe en ingles y español para permitir uso más amplio por observatorios volcánicos en varios países. Por eso, esta preimpresión incluye ambas versiones del manuscrito, escrito y editado en manera contemporáneo en ambos idiomas.

Contents/Contenidos

Guide: English version..... 3

Abstract..... 3

35 1. Introduction..... 3

2. Why study PDC deposits with paleomagnetism? 4

3. How does the method for studying emplacement temperatures of volcanic deposit work? 6

4. What kind of results does this method give?..... 13

5. Sampling methods..... 13

40 6. Sampling procedure 16

7. Next steps..... 23

8. Concluding remarks 23

Acknowledgements..... 23

Author contributions 23

45 Guía: versión en español 24

Resumen..... 24

1. Introducción 24

2. ¿Porque estudiar los depósitos de las CDP con el paleomagnetismo?..... 25

3. ¿Como funciona el método para estudiar temperatura de flujos volcánicos con paleomagnetismo? 27

50 4. ¿Qué tipo de resultado esperamos al utilizar este método?..... 35

5. Métodos de muestreo 35

6. Protocolo de muestreo..... 38

7. Próximos pasos 45

8. Observaciones finales..... 45

55 Agradecimientos 46

Contribuciones de los autores 46

References/Referencias..... 46

Guide: English version

Abstract

This brief guide is designed to teach workers at observatories of volcanoes exhibiting explosive activity how to take samples of pyroclastic deposits for paleomagnetic studies. Paleomagnetism is a powerful tool for studying volcanoes, both dormant and currently active. Studies of the rock magnetic and paleomagnetic characteristics of volcanic rocks can provide important information about volcanic deposits and the processes that deposit them. This information can include important characteristics such as emplacement temperature, age, and flow direction. To use these techniques, a specific type of sampling is required. Here we describe reasons for taking paleomagnetic samples and how to do so in the field without the use of specialized equipment.

1. Introduction

Paleomagnetism is a field within geophysics that focuses on the study of the Earth's magnetic field, how it has changed over hundreds, thousands, or millions of years, and how it is recorded within natural materials (Tauxe et al., 2018). When a magnetic mineral is cooled below a certain temperature (called the Curie temperature), information about the current Earth's magnetic field is recorded. Volcanic rocks typically have a mineralogical composition that includes magnetic minerals (e.g., magnetite, titanomagnetite), which is why volcanic rocks are one of the main materials for paleomagnetic studies. Paleomagnetic data has many applications within the fields of geology and geophysics; it is used to study topics ranging from tectonics and the deep Earth interior to environmental issues.

However, paleomagnetic data from volcanic rocks and deposits can also be used to study the volcanoes that produce them (Ort et al., 2015; Lerner et al., 2022). At an active volcano with explosive activity, this mainly involves studying pyroclastic density current (PDC) deposits and sometimes reworked deposits (e.g., lahars). Methods have been developed to analyze paleomagnetic data to evaluate PDC characteristics such as emplacement temperature, flow direction, and sometimes eruption age. PDC deposits have been studied using magnetic methods since the 1950s in Japan (Aramaki and Akimoto, 1957). These methods have been developed over the years through studies in the United States, Italy, Greece, New Zealand, Japan, and elsewhere (Hoblitt and Kellogg, 1986; Kent et al., 1981; Bardot and McClelland, 2000; McClelland et al., 2004; Tanaka et al., 2004). In recent decades, these methods have come into more frequent use as a standard tool for evaluating the previously mentioned characteristics of PDCs in many parts of the world (e.g., Mexico, United States, Chile, Italy, Japan; Sulpizio et al., 2009; Paterson et al., 2010; Alva Valdivia et al., 2012; Pensa et al., 2018; Lerner et al., 2019; Hasegawa et al., 2024).

2. Why study PDC deposits with paleomagnetism?

Analysis of paleomagnetic data can reveal some very important characteristics of pyroclastic deposits, and thus also help us understand the characteristics of the PDC processes that deposited them. Here are the main ones (summarized in Table 1):

95 PDC or lahar?

Sometimes the physical processes associated with PDCs and lahars produce deposits with different characteristics. For example, sometimes a PDC deposit has angular clasts and massive bedding (without internal structure), while a lahar deposit, due to the presence of water, has laminated bedding, more rounded clasts, and a clayey/indurated matrix. However, in other situations, with pyroclastic deposits (e.g., block-and-ash flows) that are rapidly remobilized over short distances, it can be very difficult to differentiate in the field whether a volcanic deposit is primary or remobilized. By comparing data from various clasts within a volcanic flow deposit, it is possible to understand whether a deposit was emplaced directly from a high-temperature PDC during an eruption or whether it was deposited at another time by non-eruptive processes (e.g., as a lahar).

At what temperature was a PDC deposit emplaced?

105 PDCs generally have high temperatures, between 200 and 800 °C (Cole et al., 2015). Although all these temperatures are dangerous for humans, this range 1) can result in a range of different impact levels on people and infrastructure, 2) can be used to better understand the processes that caused the eruption. By studying the clasts or matrix of a PDC deposit, it is possible to understand with a relatively high degree of precision the temperature at which a PDC deposit was formed, and thus more or less the temperature of the PDC during the eruption.

110 When was the eruption that emplaced the deposit?

In certain situations, with very high-quality data and other specific conditions, it is possible to date volcanic deposits using paleomagnetic data. This is done by comparing the paleomagnetic direction recorded by the clasts of a PDC deposit with the history of changes in the Earth's magnetic field in a region. This technique has varying levels of accuracy and is most useful for studying deposits from older eruptions and eruptions separated by significant amounts of time. For eruptions separated by only months or years, it is very unlikely to obtain clearly differentiated dates.

Where did the deposit come from?

By using a technique called anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), it is possible to study the flow direction of a volcanic deposit (such as lava flow or PDC) by observing the alignment of the magnetic minerals it contains.

120 This technique is used to understand the most likely flow direction of a volcanic deposit when it was still moving. This technique is used when the source of a prehistoric eruption is unknown—by studying the flow direction from various points, it is possible to locate the vent.

Table 1: Summary of magnetic and paleomagnetic methods for studying pyroclastic deposits

Method	What is it used for?	What type of samples do you need?	What field equipment do you need?	What else do you need?
Differentiation between primary and remobilized deposits	To understand if a pyroclastic deposit was emplaced during an eruption or due to secondary processes	Oriented hand samples (clasts) or oriented cube samples (matrix)	Geological compass, brush, permanent marker, hammer/spatula	Collaboration with a paleomagnetic laboratory (with a magnetometer and ovens), rock cutting/drilling laboratory equipment
Deposit emplacement temperature	To understand at what temperature a pyroclastic density current deposit was emplaced	Oriented hand samples (clasts) or oriented cube samples (matrix)	Geological compass, brush, permanent marker, hammer/spatula	Collaboration with a paleomagnetic laboratory (with a magnetometer and ovens), rock cutting/drilling laboratory equipment
Paleomagnetic dating	To understand when the eruption was that emplaced a volcanic deposit	Hand samples or cores drilled from volcanic deposits	Geological compass, brush, permanent marker, hammer/spatula, specialized sampling drill and accessories	Collaboration with a paleomagnetic laboratory (with a magnetometer and ovens), high quality results with low error, paleosecular variation curve
Flow direction of deposits	To find the unknown source of a volcanic deposit	Oriented samples of matrix of a volcanic deposit	Specialized paleomagnetic sampling boxes, Geological compass, brush, permanent marker	Collaboration with a paleomagnetic laboratory (with kappabridge equipment)

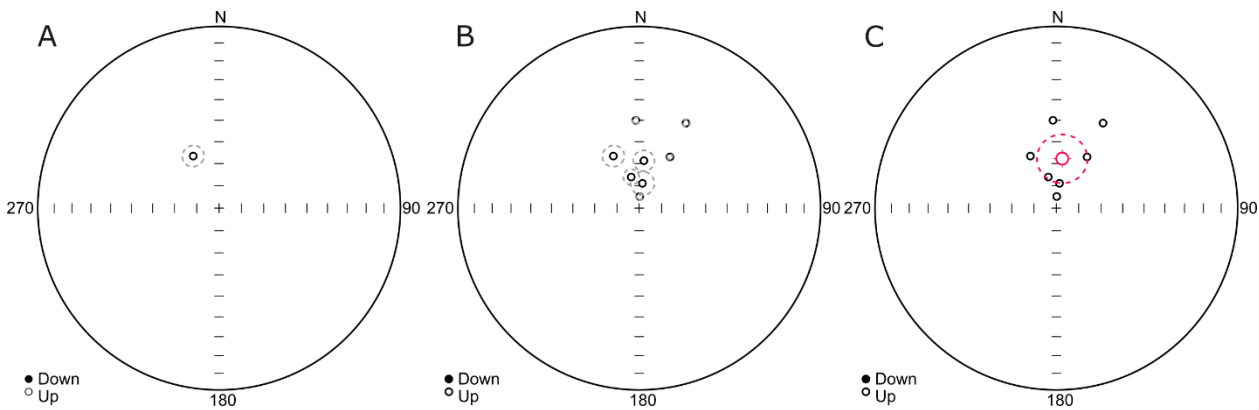
3. How does the method for studying emplacement temperatures of volcanic deposit work?

This method works by comparing paleomagnetic directions recorded by various clasts within a pyroclastic deposit.

- 130 When a rock cools below a certain temperature (called the Curie temperature), the rock's magnetic minerals record a signal of the Earth's current magnetic field (Tauxe et al., 2018). The Curie temperature depends on the magnetic minerals in the rock but is generally around 580 °C (magnetite). This signal is recorded in the form of vector data. That is, the data has a three-dimensional direction (paleomagnetic direction) and a strength value (paleointensity). The paleomagnetic direction is reported with two measurements, representing the horizontal (a measure of declination from 0-360°) and vertical (a measure of inclination from 0-90°) parts of the vector. Each paleomagnetic measurement also has a value called α_{95} (represented in degrees), which represents the level of uncertainty associated with our data. The intensity is reported as a magnetic field strength value, usually in microTesla (μT). So, a complete measurement of paleomagnetic direction and paleointensity looks like this:

$$\text{XXX}^\circ, \text{YY}^\circ, \alpha_{95} = x^\circ, Z \mu\text{T}$$

- 140 The directional part of these data can be represented on a stereonet, which represents the projection of our direction (and its α_{95}) onto half of a sphere (Fig 1A). Multiple paleomagnetic results can be plotted on the same stereonet to compare the results of various paleomagnetic samples (Fig1B), and if the samples are related, we can calculate a mean direction (with its own α_{95}) of the vector data from all of the samples along with its uncertainty (Fig1C).



- 145 **Figure 1: Stereonets representing the presentation of paleomagnetic data: [A] a stereonet showing a single paleomagnetic result representing one clast in a volcanic deposit, along with a circle representing its α_{95} , [B] a stereonet showing the results of paleomagnetic measurement of multiple clasts at a site, each with their own α_{95} circle, [C] a stereonet showing points representing paleomagnetic results of multiple clasts from a site, along with a larger point and circle representing the mean of all the clasts of that site and its α_{95} .**

150 For this method, data representing the paleomagnetic direction of the clasts is combined with our knowledge of important characteristics of volcanic processes to evaluate what the temperature of a volcanic flow was at the time of its emplacement. There are three possible scenarios that we can encounter when applying this method to a deposit (Figure 2):

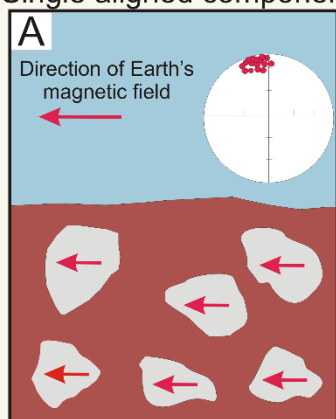
155 1. **A deposit emplaced above Curie temperature (~580° C):** In this case, we are looking at a PDC deposit emplaced through primary volcanic processes (Fig3A). This means that during the eruption, most of the material in this deposit descended the volcano at high temperature, sometimes picking up additional material that was then heated due to being part of the PDC. All of the material (clasts and matrix) of this deposit was emplaced together at this high temperature and cooled together in the same magnetic field (i.e., all the material has the same cooling history). Any material that was picked up by the deposit is heated
160 until it meets the temperature of the rest of the deposit that is cooling (this is called the equilibrium temperature). From a paleomagnetic perspective, what that means is that when we sample several clasts from this deposit and conduct paleomagnetic measurements, we should get similar results (i.e., similar paleomagnetic directions) from all of these clasts (Fig2A). This can be represented on a stereonet, where we will see a statistically significant grouping of the results from clasts taken at a single, independent site
165 within the deposit (Fig3B).

2. **A deposit emplaced at or near ambient temperature (approx. <150° C):** In this case, we are looking at a deposit made up of material that was emplaced at a low temperature after undergoing most or all of its cooling in a different location (Fig4A). This means that between the time of cooling (and with it the acquisition of the associated magnetic direction of Earth's magnetic field at that moment) and the present,
170 all of the material in the deposit was physically moved and rotated before forming the deposit we see in the field. Even if some or all of our deposit material may have previously shared a cooling history and magnetic direction, the physical reworking of the material has randomized the orientation of the clasts. When the paleomagnetic directions of all the sampled clasts are measured, there will be no meaningful grouping of the results (Figure 2B). On the stereonet, we will see a statistically random presentation of our
175 data (Fig4B).

3. **A deposit emplaced at an intermediate temperature (above ambient temperature but below Curie temperature):** There are many recorded instances of PDC deposits that were emplaced at intermediate temperatures (e.g., 350° C). In this case, our deposit consists of material that may have cooled partially in another location before its final emplacement or resulted from a lower temperature PDC (Fig5A). Samples
180 from this deposit will present a more complex result, as the clasts will contain a magnetic signal that

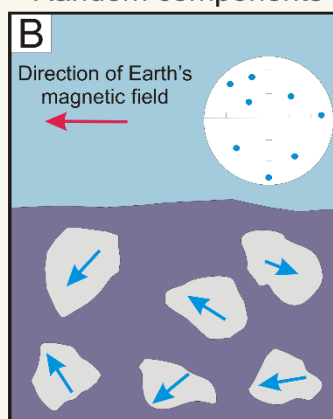
represents (at least) two parts of the cooling history: before and after final emplacement (Fig2C). This can be seen in a paleomagnetic plot called a vector component diagram, which breaks our vector direction into its horizontal and vertical components and allows us to see how complex the cooling history of each sample is (Fig5B). This also means that when comparing the paleomagnetic directions, we use multiple stereonet: one representing the high temperature component of the magnetic signal (acquired before final emplacement) and one representing the low temperature component of the magnetic signal (acquired during cooling at its final location of emplacement) (Fig5C,D). At high temperatures, each of the clasts may have a different cooling history and has also been physically moved before its final emplacement, so this stereonet will show a statistically random result (Fig5C). However, following the deposit's final emplacement, all of the clasts in the deposit cooled together, meaning that the stereonet representing the low temperature portion of the cooling history will show well-grouped directions (Fig5D). The point representing the change between the high and low temperature components of the magnetic signal, which can be identified on the vector component diagrams (Fig5B), represents the estimated emplacement temperature of each clast in our deposit. With temperature estimates from various clasts within our intermediate temperature deposit, we can estimate an overall emplacement temperature of the flow that emplaced the deposit.

Single aligned component



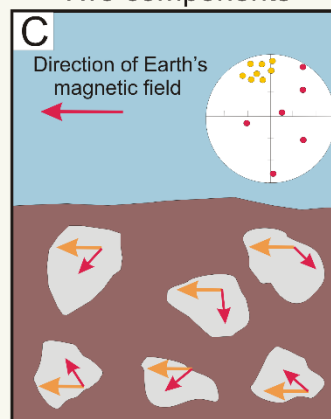
Emplacement $T > T_{\text{Curie}} 580^{\circ}\text{C}$

Random components

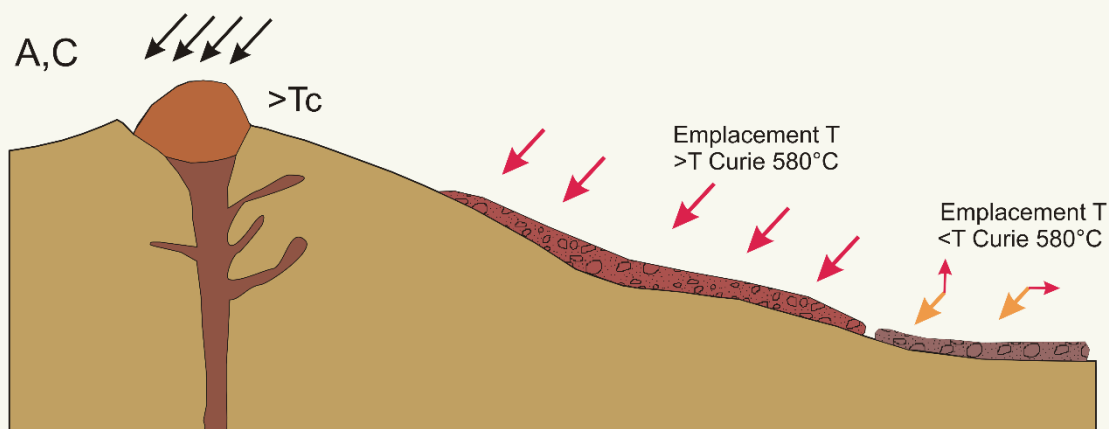
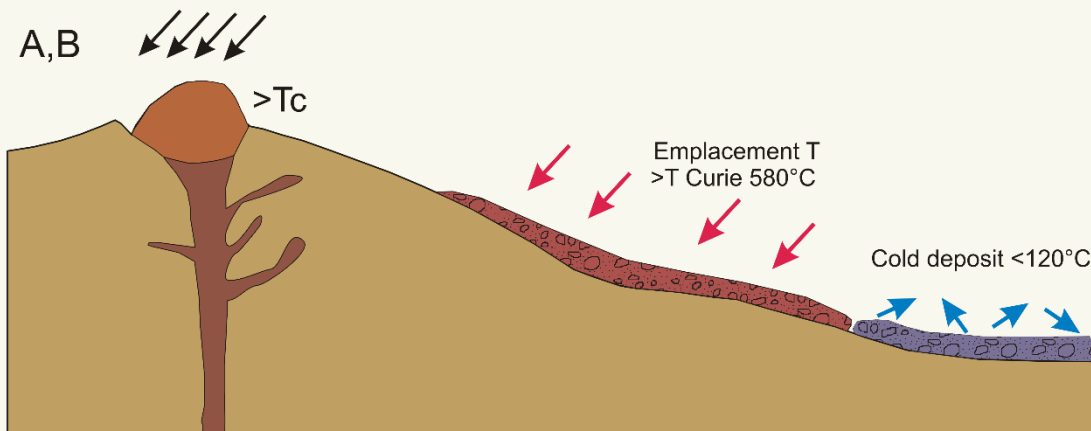


Cold deposit $< 120^{\circ}\text{C}$

Two components



Emplacement $T < T_{\text{Curie}} 580^{\circ}\text{C}$



PDC deposits



High temperature



Moderate/low temperature

Secondary deposits



Temperature below 120°C

Figure 2: Figure representing the depositional conditions and associated paleomagnetic results for pyroclastic deposits of different cooling histories. [A] PDC deposit emplaced at above Curie temperature ($\sim 580^{\circ}\text{C}$); similar paleomagnetic directional results from most clasts at each site, [B] remobilized deposit (e.g., lahar) emplaced at ambient temperature ($<150^{\circ}\text{C}$); random paleomagnetic results from clasts at each site, [C] PDC deposit emplaced at an intermediate temperature ($\sim 580\text{--}200^{\circ}\text{C}$); clasts within the deposit have a complex cooling history, with at least two components of magnetic signal, high temperatures before emplacement (random results) and lower temperatures after emplacement (aligned paleomagnetic directions). Modified from Lerner et al. (2022) and Uehara et al. (2015).

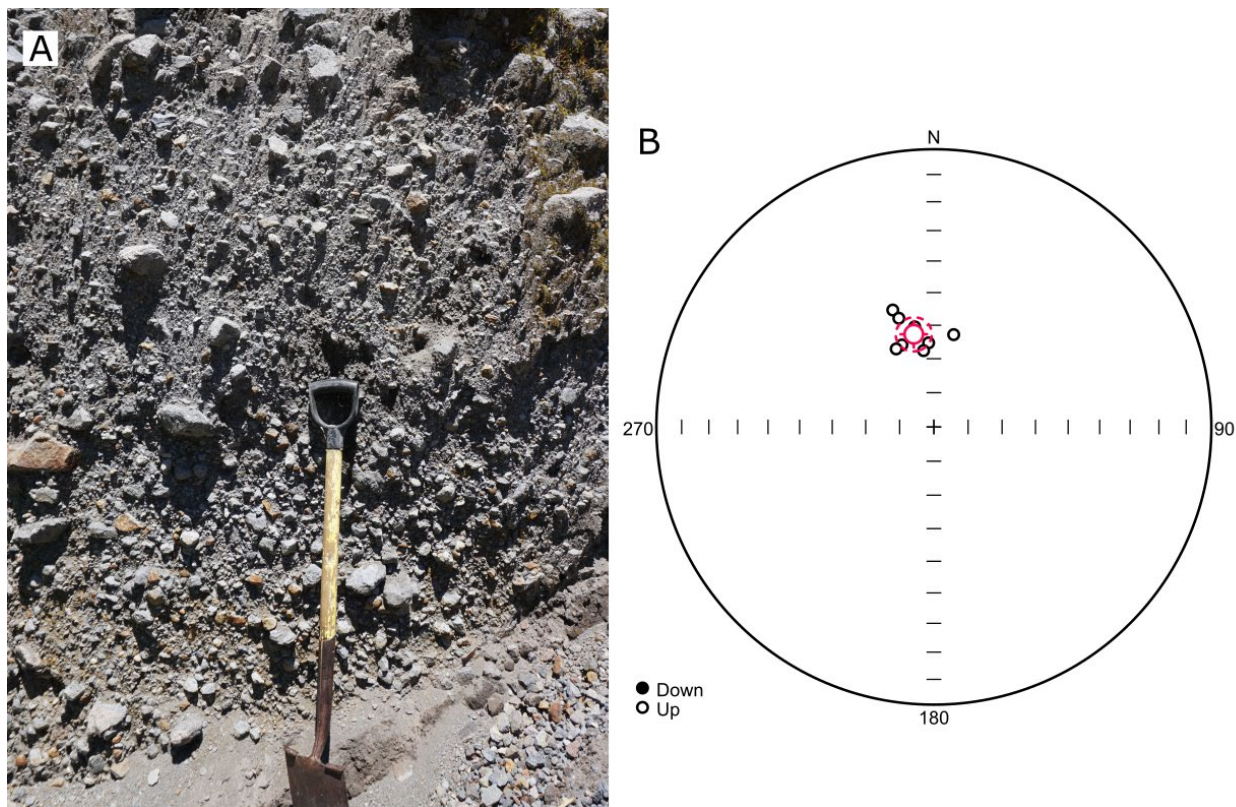


Figure 3: [A] example of a PDC deposit emplaced at above Curie temperature ($\sim 580^{\circ}\text{C}$), [B] results plotted on a stereonet for clasts taken from a site emplaced at this temperature, showing aligned paleomagnetic directions.

210

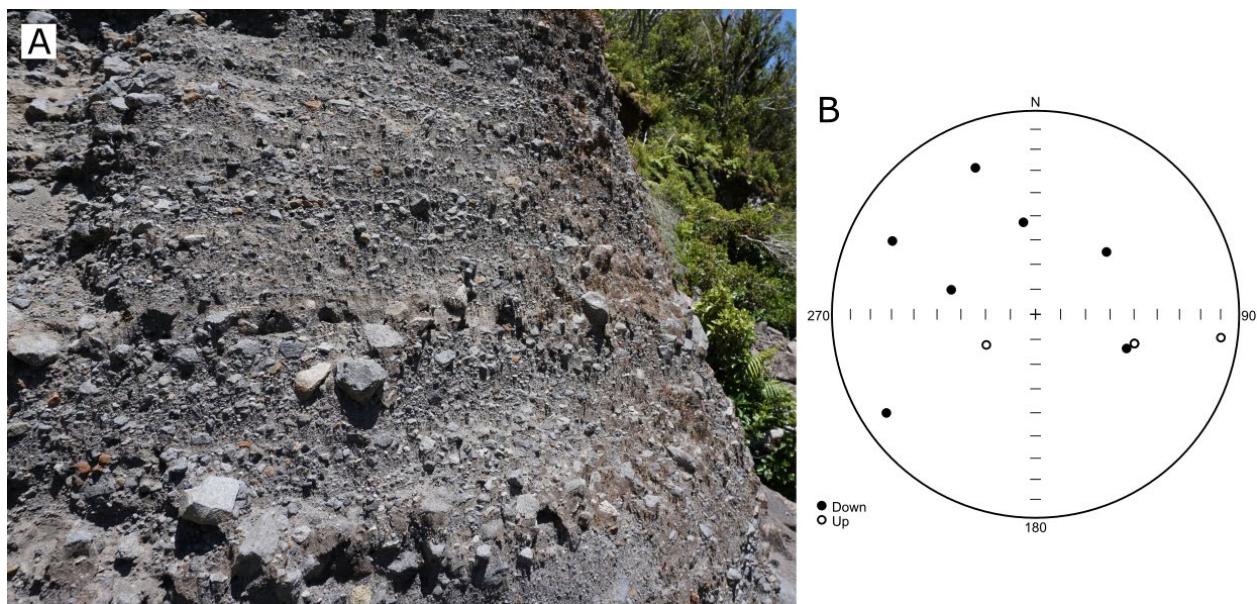
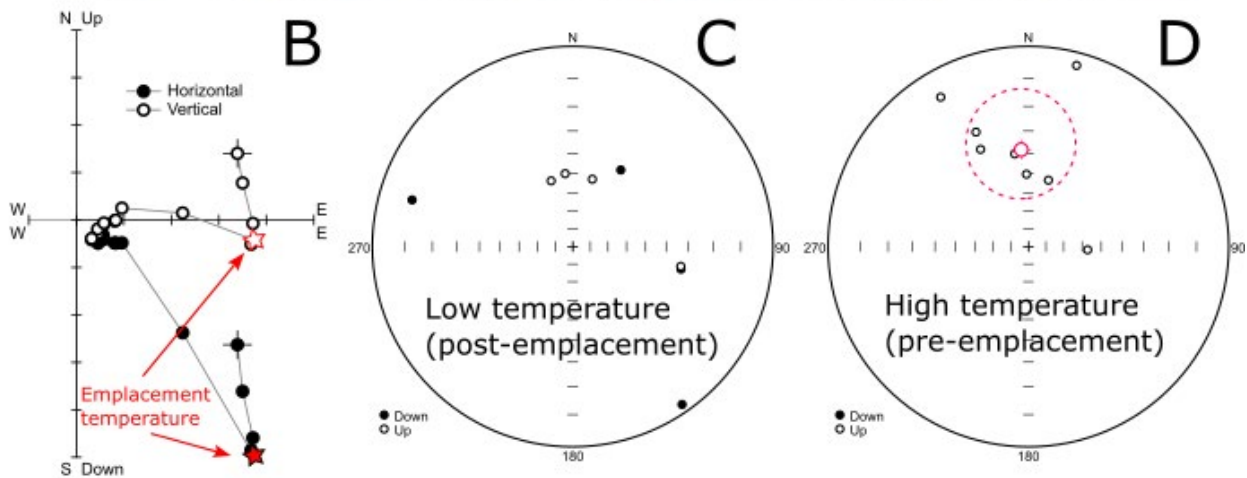


Figure 4: [A] example of a remobilized deposit emplaced at near ambient temperature ($<150^{\circ}\text{C}$), [B] results plotted on a stereonet for clasts taken from a site emplaced at this temperature, showing random paleomagnetic directions.



215 **Figure 5: [A] example of a PDC deposit emplaced at an intermediate temperature ($\sim 200\text{--}580^\circ\text{C}$), [B] vector**
 component diagram for a clast emplaced at an intermediate temperature. Two components of the remanent
 magnetization can clearly be seen, with the point where they meet representing the emplacement temperature,
 [C,D] results plotted on stereonets for clasts taken from a site emplaced at this temperature. In this scenario, the
 results representing each part of the cooling history are reported on separate stereonets, a stereonet [C]
 220 representing the pre-emplacement, high temperature cooling history (random directions) and a stereonet [D]
 representing the post-emplacement, low temperature cooling history (aligned paleomagnetic directions).

4. What kind of results does this method give?

225 The results of this method will depend on the type of deposit sampled, but will come in two categories:

1. Differentiation between the three main categories of deposit. Each site sampled will result in a stereonet showing the paleomagnetic direction of each clast sampled at the site, which can be used to decide if the deposit was emplaced at a high, intermediate, or low temperature.
2. Temperature estimates for each clast sampled within a high temperature or intermediate temperature deposit. Each clast can be evaluated using a vector component diagram to estimate a precise emplacement temperature. The temperature estimates of all the clasts at a deposit can be evaluated to estimate an overall emplacement temperature for the deposit.

230

These results, combined with a volcanological analysis of the deposits in the field, can be used to make interpretations of the origin of the deposits and the dynamics of the flows that emplaced them.

235 5. Sampling methods

Types of samples

The type of samples collected for this method are generally oriented hand samples. These samples will be used to create laboratory specimens that can be demagnetized and measured in the laboratory. These specimens are generally in the form of 25 mm diameter, 25 mm-thick cylinders, or 2 x 2 x 2 mm cubes (Fig 6A-C). Since the data generated by paleomagnetic measurements are vectors representing a 3-dimensional direction of the Earth's magnetic field as recorded by the rocks we sample, it is critical that we understand the physical orientation the samples had when they were still part of the outcrop. Therefore, there are some key characteristics that hand samples taken in the field must have:

240

1. Big enough that drilling or cutting them into specimens will yield at least one (ideally two or more) cylinder or cube. Generally, a fist-sized clast (around 5-10 cm in diameter) is ideal (Fig 6D),
2. Still in situ within the outcrop in which it is deposited (i.e., exactly in its original place of deposition; not taken from the ground nearby, even if it clearly originates from the same outcrop) (Fig 6D),
3. Have a flat surface that can be oriented and labeled (Fig 6D),
4. Are oriented with a geological compass and labeled in the field *before being removed from their outcrop* (Fig 6E).

250



Figure 6: Photos showing important paleomagnetic sample and specimen characteristics. [A] example of 25 mm diameter, 25 mm-thick cylindrical rock specimens, [B] 2 x 2 x 2 mm rock cube specimens, [C] specialized plastic and metal boxes for collecting 2 x 2 x 2 cubic samples of matrix, [D] PDC outcrop with several viable hand samples highlighted, [E] example of an ideal hand sample, note the flat face of rock that is ideal for measuring and labeling.

Equipment

The equipment needed for most types of sampling of pyroclastic deposits is relatively simple and can be relatively easily carried by one person. The primary tasks to be accomplished are identifying clasts to sample, orienting and marking the sample, removing the sample from the outcrop, and further cleaning and labelling each clast. To accomplish this, the following equipment is recommended:

- Field notebook (Fig 7A) – for recording paleomagnetic sample orientations, site name and coordinates, and geological observations

- Brushes (Fig 7B) – for cleaning the sample before labeling; it is important that the sample is relatively clean so that the orientation arrow and labels do not rub off,
- 265 • Permanent markers (Fig 7C)– for labeling the sample orientation and name; those that do not easily rub off or smudge, even when wet or dirty. Ideally many, as markers wear down quickly, especially if the rock surfaces are covered in ash, and do not label as precisely once blunt,
- 270 • Geological compass (Fig 7D) – for orienting clasts before removing from the outcrop; a compass with a level and an inclinometer that is capable of taking both a horizontal (azimuth) and vertical (dip) measurement,
- Smartphone compass-clinometer application (Fig 7E) – many modern smartphones have internal hardware sufficient to take precise orientation measurements using a number of available applications. Before deciding to use a smartphone for orientation measurements, it is advisable to test the phone app against a geological compass to assure that the measurements are accurate
- 275 • Metal spatulas (Fig 7F) – useful for cleaning the samples and removing matrix from around the sample to allow easier measurement of the orientation
- Hammer/pick (Fig 7G) – for cleaning the area around the sample, removing the sample from the outcrop, and potentially breaking a sample that is larger than expected once removed from the outcrop
- 280 • Sample bags (Fig 7H) – either large freezer bags (made from thick plastic to avoid tearing due to pointed sample edges) or cloth bags (e.g., reusable shopping bags) are useful for organizing the group of clasts taken from a single site



285 **Figure 7: Key equipment for paleomagnetic sampling of pyroclastic deposits. [A] field notebook, [B] brushes of varying sizes for cleaning rock samples before labeling, [C] permanent markers for labeling, [D] example of a geological compass-clinometer for orienting samples, [E] example of a smartphone compass-clinometer app that can also be used for sample orientation, [F] metal spatulas of varying sizes for cleaning the outcrop and the samples, [G] geological hammer/pick for cleaning the area around the sample and removing the sample from the outcrop, [H] cloth and plastic sample bags for organizing oriented samples.**

6. Sampling procedure

290 Site selection

The process of site selection depends on type of eruption and deposit, but in general the goal is to collect independently oriented samples at a series of independent sites. *Independent* means that each site is

geologically/geographically independent and therefore not influenced by the cooling and emplacement history of other sites, and that each sample is oriented individually, and therefore not dependent on the orientation of other samples. This means that when one specimen from each sample is measured in the lab, each paleomagnetic direction measured can be used to evaluate a site, and all the sites can be compared to evaluate the deposit as a whole.

Where possible, it is useful to select sites that may represent different cooling histories from the same eruption. This can mean sampling at different distances from the volcano within the same channel, within various channels or locations laterally around the volcano (if the pyroclastic deposit is not contained to a single channel), and at different heights within a deposit (if the deposit is of significant thickness). Sampling various pulses of the same eruption (if the events or deposits suggest emplacement in pulses) is also effective for capturing the cooling history of deposits from different parts of the eruption.

When the goal of the study is to differentiate between primary and remobilized deposits, sites should be chosen where this uncertainty exists. When the goal is to estimate the emplacement temperature of identified PDC deposits, sites should be selected based on the certainty that they are primary rather than remobilized.

Sampling at the outcrop

Once you arrive at the outcrop with the necessary sampling equipment, the procedure for sampling is relatively straightforward:

1. Prepare your notes – the simplest way to organize paleomagnetic sample information is a three-column table with headings SAM, DEC, and INC (for sample name, declination, and inclination) (Fig 8A). It is useful to include any relevant information about the sampling, including who is taking the samples, the orienting convention that is being used (e.g., strike and dip), if declination correction is already accounted for or will need to be accounted for (this depends on your location and your orienting tool). It is also ideal to include the complementary geographical and geological information about each site, including coordinates, outcrop observations like height, number of layers, color, sorting, rounding, etc. It is also recommended to take photos of the outcrop to document the important features of the deposit. Paleomagnetic site names generally consist of a prefix related to the project (shorter is better for labelling purposes) and a site number in the order of collection. For example, F1, F2, F3 or FG1, FG2, FG3 (Fuego site 1, Fuego site 2, Fuego site 3), or F25-1, F25-2, F25-3 (Fuego 2025 site 1, etc.).
2. Identify clasts for sampling – The ideal clasts are around fist-sized and, critically, have a relatively uniform flat face that can be oriented (Fig 8B). For easier orientation, try to find clasts whose flat surface dips away from the outcrop (i.e., the flat surface should not be inverted) (Fig 8C). Select approximately 6-8 clasts suitable for sampling. This will generally result in a sufficient amount of data for paleomagnetic analysis. In cases where you know that very few sites will be sampled (e.g., deposits from the eruption of interest

have mostly already eroded or are not safely accessible), it can be beneficial to take more samples. In cases where very few suitable samples can be identified at an outcrop (e.g., few clasts, clasts not angular enough, time or safety constraints) it is still worthwhile to sample if 4-5 clasts can be identified.

3. Clean the clasts and make space for orienting (Fig 8D) – clean the surface of the clast that will be oriented (with brushes and spatulas) so that the orientation arrow can be clearly written. If necessary, remove material from around the clast (without moving or dislodging the clast itself) to create enough space to use your compass or phone for orienting.
4. Orient and mark the sample – If using the compass, level the compass to take a strike measurement of the exposed flat face of the sample (generally strike is taken to the right). Without moving the compass, use your marker to draw an arrow parallel to the strike on the rock (use the edge of your compass that is in contact with the rock as a guide) (Fig 8E). Draw a tick mark on the arrow in the direction of the dip of the oriented face (Fig 8F). Use the clinometer of your compass to measure the dip of the oriented face (Fig 8G).
 - a. If using a smartphone app, use a level ruler or a geological compass to draw the strike line (arrow to the right) on your sample (Fig 8E). Draw a tick mark on the arrow in the direction of the dip of the oriented face (Fig 8F). Place the smartphone with the app open flat against the sample so that the plane of the phone is parallel with the flat face of the rock (Fig 8H). The app will provide both the declination and inclination measurements at the same time.
5. Record the sample orientations – each orientation should be recorded in the table in the field notebook, with samples labeled by letter in alphabetical order (e.g., F1A, F1B, F1C, for Fuego site 1 sample A, Fuego site 1 sample B, etc.) (Fig 8i).
6. Remove samples from outcrop and label them – use spatulas, pick, etc. to remove each oriented sample from the outcrop, and label them with the letter that corresponds to their recorded measurement in the notebook (Fig 8J). Use brushes, etc. to clean the samples if necessary to ensure the label is clearly written.
7. Organize samples and ensure quality of labelling – store all samples from a single site together in clearly labeled plastic or cloth sample bags (Fig 8K). Before storing the samples, ensure that the samples have been cleaned and labeled or re-labeled as clearly as possible, in multiple locations, to ensure that the label and orientation arrow do not get smudged or erased during transport and storage. Occasionally clasts will turn out to be bigger than expected once removed from the outcrop. If possible, these clasts can be broken to a more reasonable size, *as long as the marked orientation arrow is preserved and enough oriented material remains to cut or drill a specimen in the lab.*

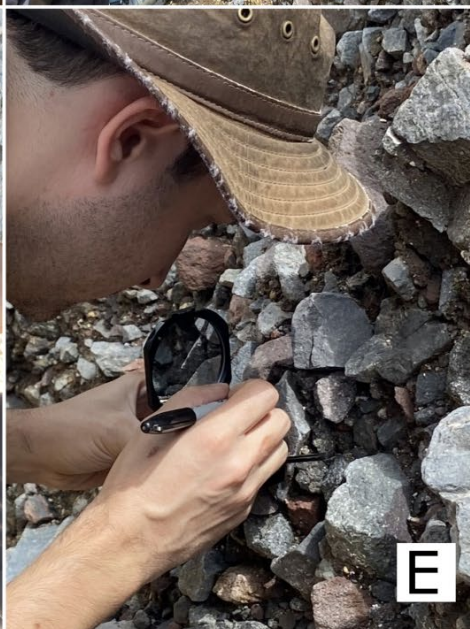
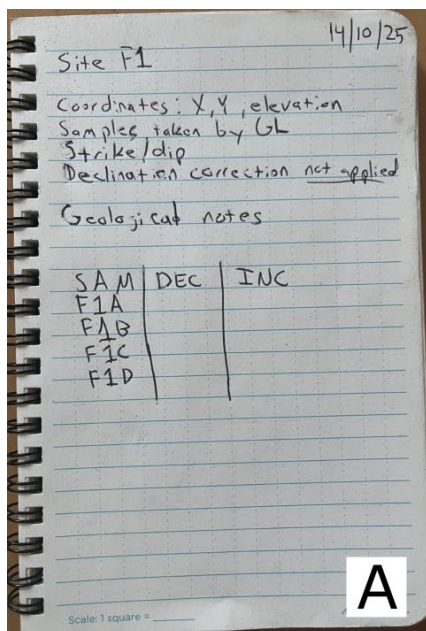




Figure 8: Steps for taking oriented paleomagnetic samples from a pyroclastic deposit outcrop. [A] example of a field notebook page prepared for notes on sampling and orientation, [B] examining the outcrop to choose ideal clasts for sampling, [C] example of an outcrop with a clast dipping away from the outcrop circled in red and an a clast with an inverted flat surface circled in blue, [D] cleaning the surface of a sample and clearing space around it before orientation and labelling, [E] using a permanent marker to draw a strike arrow parallel to the measurement being taken by the compass, [F] clast with the orientation arrow drawn for strike (indicated by red arrow) and tick mark for dip (indicted by smaller, black arrow), [G] measuring the declination of the sample with the geological compass, [H] measuring the declination and inclination of the flat sample face with a smartphone compass-clinometer app, [I] example of a standard field notebook table with sample names and orientations, [J]

oriented sample being labeled with its sample name after removal from the outcrop, [K] samples from a single site organized together in a well-labeled sample bag.

370 The sampling protocol is summarized in Figure 9. We recommend printing this figure and bringing it in the field to have a quick, visual version of the sampling procedure for reference. A video guide is available in Supplementary Material 1.

Paleomagnetic Sampling Protocol

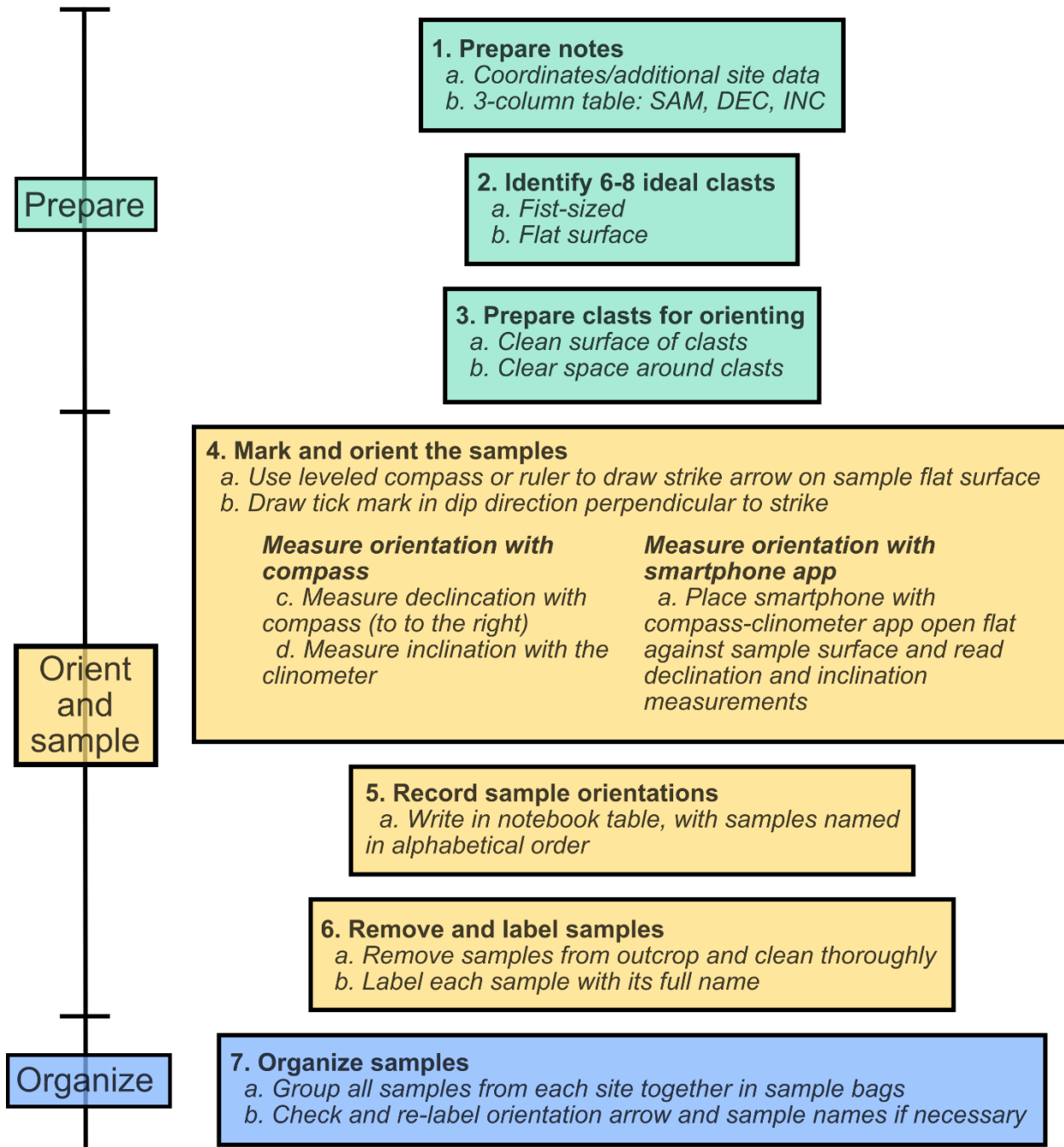


Figure 9: Brief, visual paleomagnetic sampling protocol. The seven steps are coordinated with the more detailed descriptions of the sampling procedure in the text, and the relevant photos for each step can be seen in Figure 8.

7. Next steps

At this point, the process should be repeated for as many sites as necessary depending on the goals of the study. A detailed study of a single eruption or deposit may involve the collection of many sites in different locations, depths
380 within the deposit, or pulses of an eruption, as previously mentioned, while a study of multiple eruptions over time might involve as few as one site from a single eruption.

The samples must be transferred to a collaborating paleomagnetic laboratory, where the clasts can be cut or drilled to create paleomagnetic specimens which can be measured with a magnetometer to determine their paleomagnetic direction and possibly with other magnetic equipment to determine other key magnetic characteristics (e.g., Curie
385 temperature). This will provide the data necessary for analysis to determine deposit types and emplacement temperatures.

8. Concluding remarks

The application of the sampling protocol and paleomagnetic methods discussed in this guide can provide us with important information regarding PDC emplacement temperature and can also be useful for differentiating between
390 deposits that cannot be effectively distinguished in the field (primary versus secondary deposits). This is useful for gaining a better understanding of the physical properties which govern PDC emplacement at frequently active volcanoes. Additionally, these studies provide information that can complement other studies and observations of eruptive activity. Although research scientists and those that work at observatories do not always have the same priorities and responsibilities, the use of these methods for the study of frequent explosive eruptions can result in
395 useful data for both fundamental and practical purposes. These short- and long-term studies of the dynamic and hazardous properties of PDCs and lahars are extremely useful for improving our understanding of the processes involved and for the work carried out at volcanological observatories in relation to the monitoring, planning, and mitigation of explosive eruptions.

Acknowledgements

400 The authors are thankful for discussions during fieldwork in Guatemala with INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología) and Volcán de Fuego observatory staff that inspired the writing of this guide.

Author contributions

GAL wrote the first draft in English and Spanish. RMLB edited the Spanish version of the manuscript. Both authors
405 contributed to the production of figures, collection of field photos and videos, and the editing of the final version of the guide.

Guía: versión en español

Resumen

Esta guía está diseñada para mostrar brevemente al personal de observatorios vulcanológicos que monitorean volcanes con actividad de tipo explosiva como coleccionar muestras de depósitos piroclásticos para realizar estudios paleomagnéticos. El paleomagnetismo es una herramienta que ha demostrado ser de gran utilidad para estudiar procesos volcánicos antiguos como recientes. Los estudios de las características magnéticas y paleomagnéticas de rocas volcánicas pueden brindar información importante de los depósitos volcánicos y de los procesos que los originaron. Esta información puede incluir temperatura de emplazamiento, edad, y dirección de flujo. Para la aplicación de estas técnicas, se requiere la implementación de un tipo de muestreo específico. En esta guía se describen las razones para tomar muestras paleomagnéticas y cómo coleccionarlas de una manera correcta en campo sin necesidad de usar equipo especializado.

1. Introducción

El paleomagnetismo es una disciplina dentro de la geofísica que se enfoca en el estudio del campo magnético de la Tierra, de cómo ha cambiado sobre cientos, miles, o millones de años, y de cómo se graba dentro de materiales naturales (Tauxe et al., 2018). Cuando se enfría un mineral magnético bajo una cierta temperatura (llamada temperatura Curie), se graba la información del campo magnético de la tierra actual. Las rocas volcánicas típicamente tienen composición mineralógica que incluye minerales magnéticos (e.g., magnetita, titanomagnetita), por eso son uno de los medios principales para llevar a cabo los estudios paleomagnéticos son las rocas volcánicas. Los estudios paleomagnéticos tienen muchas aplicaciones dentro los campos de la geología y la geofísica; se utilizan para estudiar temas de tectónica y del interior de la Tierra, hasta temas ambientales.

Asimismo, se pueden utilizar los datos paleomagnéticos de las rocas volcánicas para realizar investigaciones de los volcanes que las generan (Ort et al., 2015; Lerner et al., 2022). En un volcán activo con actividad explosiva, el estudio de rocas volcánicas con el paleomagnetismo implica principalmente el estudio de depósitos de corrientes de densidad piroclásticas (CDP) y en ocasiones depósitos retrabajados (e.g., lahares). Se han desarrollado métodos para analizar datos paleomagnéticos para evaluar características de las CDP como temperatura de emplazamiento, dirección de flujo, y a veces edad de la erupción. Los depósitos de CDP se han estudiado con métodos magnéticos desde los años 50s del siglo pasa en Japón (Aramaki y Akimoto, 1957). Estos métodos se han desarrollado sobre el paso de los años y se han aplicado con excelentes resultados en estudios realizados en Italia, Estados Unidos, Grecia, Nueva Zelanda, Japón, y más lugares (Kent et al., 1981; Hoblitt and Kellogg, 1986; Bardot and McClelland, 2000; McClelland et al., 2004; Tanaka et al., 2004). En las últimas décadas, estos métodos comenzaron a ser

utilizados más frecuente como una herramienta estándar para la evaluación de las características mencionadas de las CDP en muchos trabajos realizados alrededor del mundo (e.g., Estados Unidos, Chile, México, Italia, Japón; Paterson et al., 2010, Sulpizio et al., 2009; Alva Valdivia et al., 2012; Pensa et al., 2018; Lerner et al., 2019; 440 Hasegawa et al., 2024).

2. ¿Porque estudiar los depósitos de las CDP con el paleomagnetismo?

El análisis de los datos paleomagnéticos pueden brindar información sobre algunas características muy importantes de los depósitos piroclásticos, y así, también nos permiten comprender las particularidades de los procesos de las CDP que los depositaron. A continuación, se mencionan estas particularidades y se resumen en la Tabla 1:

445 Proceso: ¿CDP o lahar?

En ocasiones los procesos físicos asociados con las CDP y los lahares producen depósitos con características diferentes. Por ejemplo, los depósitos de CDP generalmente tiene clastos angulosos y se presentan de forma masiva (sin estructura interna aparente) mientras tanto un depósito lahar por la presencia de agua en su génesis puede presentar estratificación, clastos redondeados, y matriz arcillosa/endurecida. Pero en otras situaciones, con 450 depósitos piroclásticos (e.g., de tipo bloques y ceniza) removilizados rápidamente y sobre distancias no tan largas, la diferenciación puede llegar a ser muy complicada en el trabajo de campo entre un depósito volcánico primario o removilizado. Con la comparación de datos paleomagnéticos de varios clastos dentro un depósito de un flujo volcánico es posible entender si un depósito se emplazó directamente de una CDP de temperatura alta durante una erupción o si se depositó en otro momento por procesos secundarios de baja temperatura (e.g., en un lahar).

455 Temperatura: ¿A que temperatura se depositó una CDP?

Las CDP tiene generalmente temperaturas elevadas de emplazamiento, entre 200 y 800 °C (Cole et al., 2015). Aunque todas esas temperaturas son peligrosas para los seres humanos, ese rango: 1) implica el nivel de impacto en personas y edificios, 2) se puede usar para comprender los procesos que causaron la erupción. Con el estudio de los clastos o matriz de un depósito de CDP es posible entender con nivel relativamente alto de precisión la 460 temperatura a la que se emplazó un depósito de CDP, y así conocer aproximadamente la temperatura del CDP durante la erupción.

Edad: ¿De cuándo es el depósito?

En ciertas situaciones, con datos de muy alta calidad y otras condiciones específicas, hay posibilidad de fechar depósitos volcánicos con información paleomagnética. Esto se puede realizar al comparar la dirección
465 paleomagnética grabada en los clastos de un depósito de CDP con la historia de cambio del campo magnético de la Tierra en una región. Esta técnica tiene un nivel de precisión variada y es más útil para estudiar erupciones antiguas y no tan continuas. En erupciones separadas solo por meses o años, es muy poco probable recibir resultados de fechas muy bien diferenciadas.

Dirección: ¿De dónde vino el depósito?

470 Con la técnica de anisotropía de susceptibilidad magnética (ASM), se puede estudiar la dirección de flujo de un depósito volcánico (como un flujo de lava o de una CDP) por la alineación de los minerales magnéticos que contienen. Esa técnica se utiliza para conocer la dirección más probable de flujo de un depósito volcánico cuando estaba en movimiento. Esa técnica se puede emplear cuando se desconoce la fuente de una erupción antigua, a través de estudios de la dirección de flujos de varios puntos, se puede ubicar dónde se encontraba el centro de
475 emisión.

Tabla 1: Resumen de métodos paleomagnéticos para estudiar depósitos volcánicos

Método	¿Para qué se usa?	¿Qué tipos de muestras se necesitan?	¿Qué equipo es necesario?	¿Qué más ocupas?
Diferenciación entre depósitos primarios y removilizados	Para conocer si un depósito piroclástico se depositó a temperatura elevada durante una erupción o por procesos secundarios de baja temperatura	Muestras de mano (clastos) orientados o muestras cúbicas orientados (matriz)	Brújula geológica, cepillo (brocha), marcador permanente, martillo/espátula,	Colaboración con un laboratorio paleomagnético (con magnetómetro y hornos), equipo para cortar o perforar rocas
Temperatura de emplazamiento	Para saber a qué temperatura se emplazó un depósito piroclástico	Muestras de mano (clastos) orientados o muestras cúbicas orientados (matriz)	Brújula geológica, cepillo (brocha), marcador permanente, martillo/espátula	Colaboración con un laboratorio paleomagnético (con magnetómetro y hornos), equipo para cortar o perforar rocas
Fechamiento paleomagnético	Para entender cuando pasó la erupción de que proviene un depósito volcánico	Muestras de mano o núcleos perforados de depósitos volcánicos	Brújula geológica, cepillo (brocha), marcador permanente, martillo, taladro especializado	Colaboración con un laboratorio paleomagnético, resultados muy precisos de bajo error, curva de variación paleosecular regional
Dirección de flujo	Para localizar la fuente desconocida de depósitos volcánicos	Muestras orientadas de matriz de depósitos volcánicos	Cajas especializadas de muestreo paleomagnético de sedimentos, brújula geológica, marcador permanente	Colaboración con un laboratorio paleomagnético (con equipo kappabridge)

480

3. ¿Como funciona el método para estudiar temperatura de flujos volcánicos con paleomagnetismo?

Este método funciona comparando las direcciones paleomagnéticas grabadas en varios clastos dentro de un depósito piroclástico. Cuando se enfría una roca bajo cierta temperatura (temperatura Curie), los minerales

magnéticos de la roca registran un récord del campo magnético de la Tierra actual (Tauxe et al., 2018). La temperatura Curie depende en los minerales magnéticos que tiene la roca, pero generalmente está alrededor de 580 °C (magnetita). Ese récord está grabado en la forma de un dato tipo vector. Es decir, el dato tiene una dirección de tres dimensiones (dirección paleomagnética) y un valor de fuerza (paleointensidad). La dirección paleomagnética está reportada con dos medidas, que representan la parte horizontal (una medida de la declinación de 0-360°) y vertical (una medida de inclinación de 0-90°) del vector. Cada medida paleomagnética también lleva un valor numérico llamado $\alpha 95$ (representado en grados) que representa el nivel de incertidumbre asociado con los datos. La intensidad se reporta como un valor de fuerza del campo magnético, generalmente en microTesla (μT). Por lo tanto, una medida completa de dirección paleomagnética y de paleointensidad se ve así:

$$XXX^\circ, YY^\circ, \alpha 95 = x^\circ, Z \mu T$$

La componente direccional de los datos se puede representar en un estereonet, que representa la proyección de la dirección (y su $\alpha 95$) en la mitad de una esfera (Fig 1A). Múltiples resultados paleomagnéticos se pueden presentar en el mismo estereonet para comparar los resultados de varias muestras paleomagnéticas (Fig 1B), y si las muestras están relacionadas podemos calcular una dirección promedio (con su propio $\alpha 95$) de los datos vector de todas las muestras junto con su incertidumbre (Fig 1C).

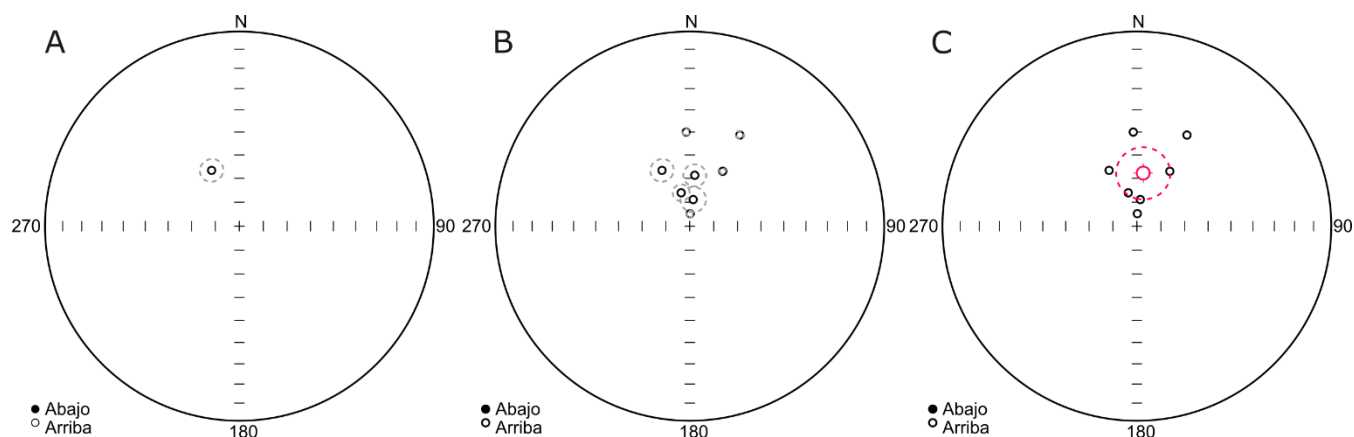


Figura 1: Estereonets que representan los datos paleomagnéticos: [A] estereonet que muestra un resultado paleomagnético representado por un clasto del depósito volcánico, junto con su círculo de $\alpha 95$, [B] estereonet que muestra resultados de varios clastos en un sitio, cada uno con su propio círculo de $\alpha 95$, [C] estereonet con los puntos que representan varios resultados paleomagnéticos de un sitio, con un punto más grande y un círculo que representa el promedio de todos los clastos y el $\alpha 95$ del promedio.

Para estos métodos, se utiliza la dirección paleomagnética en combinación con las características significativas de los procesos volcánicos, para evaluar la temperatura de un flujo volcánico en su momento de deposición. Hay tres escenarios posibles que podemos encontrar cuando aplicamos este método en el estudio de un depósito (Figura 2):

1. **Depósito emplazado por arriba de la temperatura Curie (~580 °C):** este caso corresponde a un depósito de CDP emplazado por procesos volcánicos (Fig 3A). Esto significa que, durante la erupción, la mayoría del material que conforma el depósito bajó del volcán a temperatura alta, en ocasiones incorporando material adicional que también fue calentado por la CDP. Todo el material (clastos y matriz) del depósito se emplazó en conjunto a una temperatura elevada y se enfrió bajo un mismo campo magnético (i.e., todo el material del depósito comparte la misma historia de enfriamiento). Cualquier material que fue incorporado dentro del flujo fue calentado hasta que se equilibra con la temperatura del resto del depósito que se está enfriando (conocida como temperatura de equilibrio). Desde el punto de vista paleomagnético, significa que cuando muestreemos varios clastos de un depósito y realizamos mediciones paleomagnéticas, debemos recibir resultados similares (i.e., direcciones paleomagnéticas similares) en todos los clastos (Fig 2A). Esta información se puede representar en un esteronet, donde podemos visualizar una agrupación estadísticamente significativa de los resultados de clastos muestreados de un sitio independiente individual dentro del depósito (Fig 3B).
2. **Depósito emplazado a (o cerca de) temperatura ambiente (aprox. <150° C):** este caso corresponde a un depósito emplazado a temperatura baja después de haberse enfriado en otro lugar para posteriormente ser removilizado y depositado en otro sitio (Fig 4A). Esto significa que entre su periodo de enfriamiento (y con eso la adquisición de la dirección paleomagnética asociada con el campo magnético de la Tierra de ese momento) y el presente, todo el material correspondiente al depósito fue físicamente removilizado y transportado a otro sitio donde se depositó nuevamente. Esto implica que, aunque si parcialmente o todo el depósito en el momento de su deposición original compartió la misma historia de enfriamiento y dirección paleomagnética, el retrabajo físico del material ha distribuido de forma aleatoria la orientación de los clastos (Fig 2B). Cuando las direcciones paleomagnéticas de todos los clastos muestreados sean medidas, no tendrán una agrupación significativa de los resultados (Fig 4B).
3. **Depósito emplazado a temperatura intermedia (arriba de la temperatura ambiente, pero por debajo de la temperatura Curie):** Las CDP se pueden emplazar a temperaturas intermedias (e.g., 350 °C). En este caso, el depósito está conformado por material que posiblemente se enfrió parcialmente en otro lugar antes de su emplazamiento final o resultó de una CDP de temperatura más baja (Fig 5A). Las muestras de un depósito con estas características presentan un resultado más complejo porque los clastos contienen una señal que representa (al menos) dos partes de su historia de enfriamiento: antes y después del emplazamiento final (Fig 2C). Lo anterior se puede visualizar en un gráfico paleomagnético conocido como diagrama de componentes vectoriales, que divide la dirección del vector en su componente

horizontal y vertical y nos permite evaluar que tan compleja ha sido la historia de enfriamiento de cada
540 clasto (Fig 5B). Esto significa que cuando hacemos comparaciones de las direcciones paleomagnéticas de
los clastos, usamos múltiples estereonet: uno que representa la componente de alta temperatura de su
señal magnética (adquirida antes del emplazamiento final) y uno que representa la componente de alta
temperatura de su señal magnética (adquirida durante su enfriamiento en el lugar de emplazamiento final)
(Fig5C,D). En la parte de temperatura alta, cada clasto puede tener una historia de enfriamiento diferente
545 pero también ha presentado un desplazamiento antes de su emplazamiento final, por lo tanto, en el
estereonet se presenta un resultado estadísticamente aleatorio (Fig 5C). Sin embargo, después del
emplazamiento final del depósito, todos los clastos se enfriaron juntos. Por esta razón, el estereonet que
representa la parte de enfriamiento de temperatura baja puede presentar direcciones bien agrupadas (Fig
5D). El punto que representa el cambio entre el componente de alta y baja temperatura de la señal
550 magnética es identificable claramente en el diagrama de componentes vectoriales (Fig 5B), y representa
la temperatura de emplazamiento estimada de cada clasto dentro del depósito. Con las estimaciones de la
temperatura de varios clastos dentro de un depósito de temperatura intermedia, podemos estimar una
temperatura general de emplazamiento del flujo que originó el depósito.

Componente única coherente



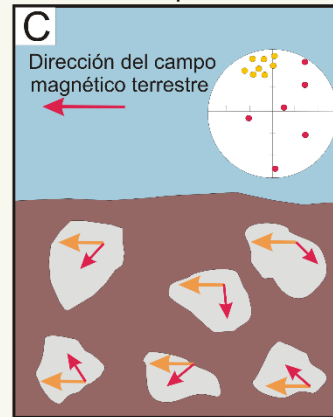
T de emplazamiento $> T_{\text{Curie}} 580^{\circ}\text{C}$

Componentes aleatorias

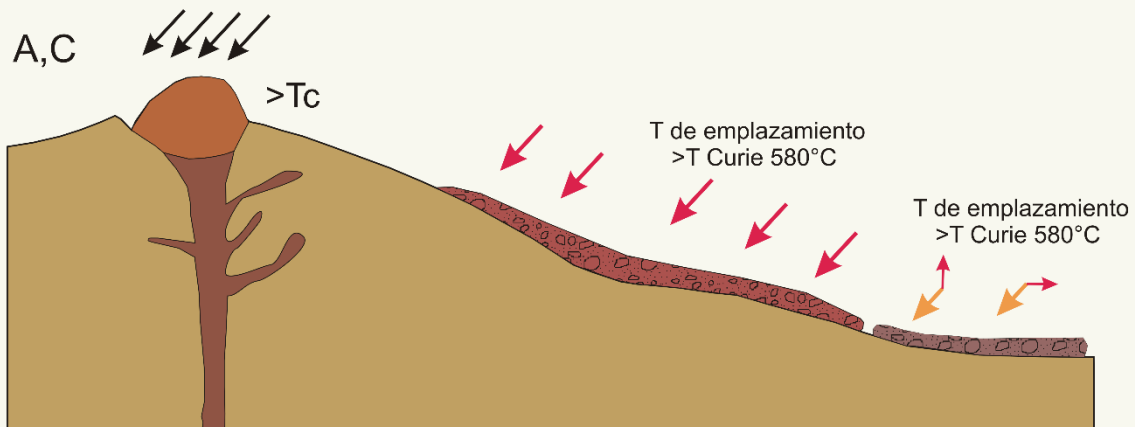
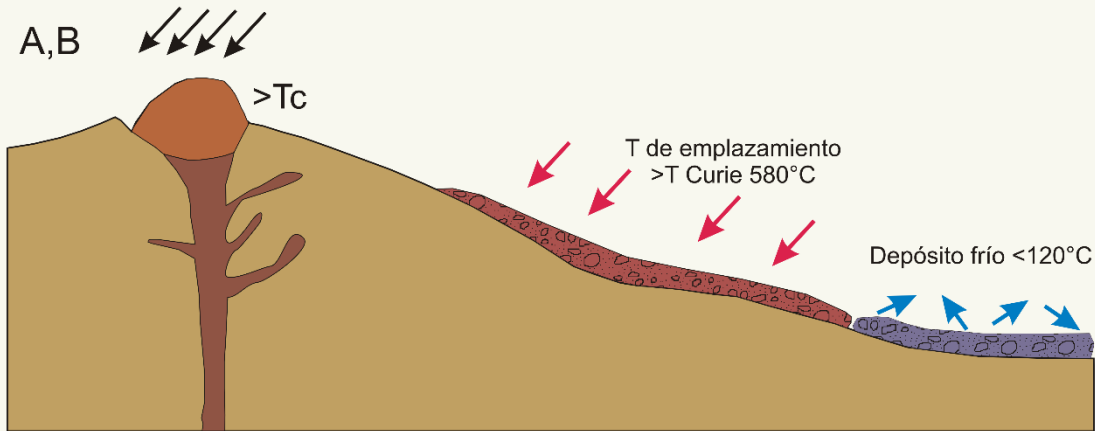


Depósito frío $< 120^{\circ}\text{C}$

Dos componentes



T de emplazamiento $< T_{\text{Curie}} 580^{\circ}\text{C}$



Depósitos de CDP



Alta temperatura



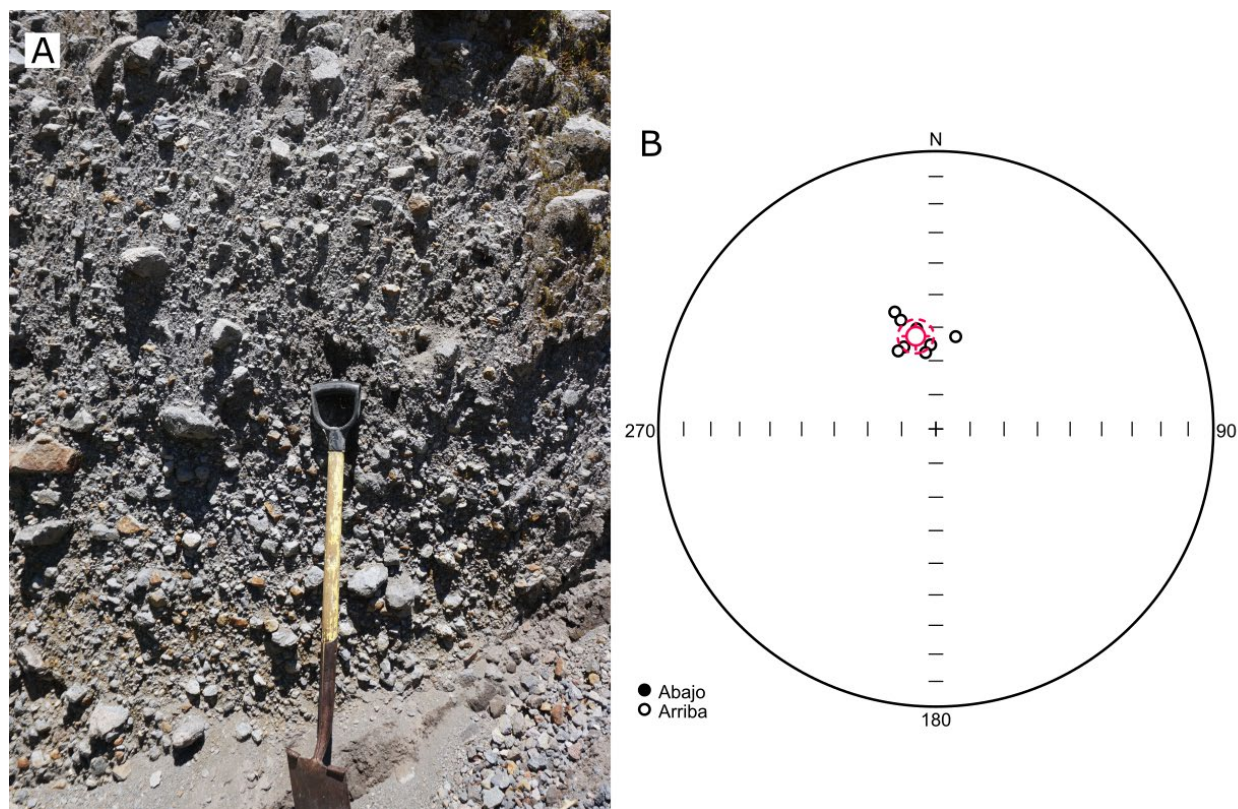
Moderada/baja temperatura

Depósitos secundarios

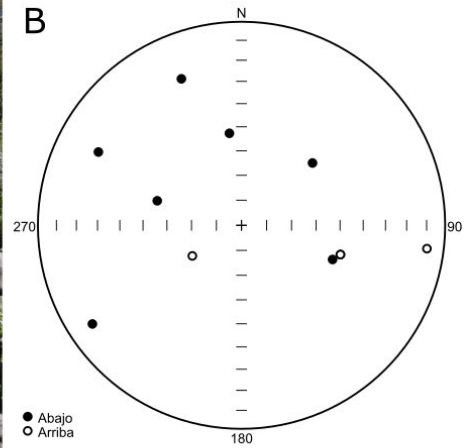


Temperatura por debajo de los 120°C

555 **Figura 2: Representación de las condiciones deposicionales y resultados paleomagnéticos asociados con depósitos**
piroclásticos de historias de enfriamiento diferentes. [A] Depósito de CDP emplazado por arriba de la
temperatura Curie ($\sim 580^{\circ}\text{C}$); resultados de direcciones paleomagnéticas similares dentro de cada sitio, [C]
depósito removilizado (e.g., lahar) emplazado a temperatura ambiente ($<150^{\circ}\text{C}$); resultados paleomagnéticos
560 **aleatorios de clastos dentro de cada sitio, [C] depósito de CDP emplazado a temperatura intermedia ($\sim 580\text{-}200^{\circ}$**
C); los clastos dentro del depósito tienen historias de enfriamiento complejas, con al menos dos componentes de
señal magnética, temperatura alta antes del emplazamiento (resultados aleatorios) y temperatura baja después
del emplazamiento (direcciones paleomagnéticas alineadas). Modificado de Lerner et al. (2022) y Uehara et al.
(2015).



565 **Figura 3: [A] ejemplo de un depósito de CDP emplazado por arriba de la temperatura Curie ($\sim 580^{\circ}\text{C}$), [B]**
resultados visualizados en un estereonet de clastos muestreado de un depósito que fue emplazado arriba de
temperatura Curie, con direcciones paleomagnéticas alineadas.



570 **Figura 4: [A] ejemplo de un depósito removilizado emplazado cerca de la temperatura ambiente ($<150^{\circ}\text{C}$), [B] resultados visualizados en un esteronet de clastos muestreado de un depósito emplazado a temperatura ambiente, con direcciones paleomagnéticas aleatorias.**

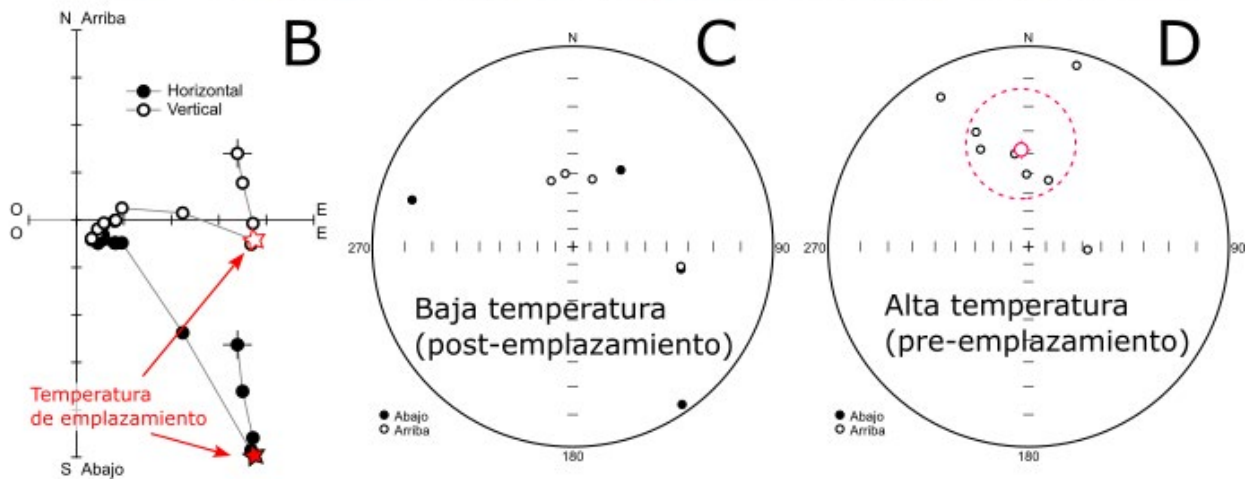


Figura 5: [A] ejemplo de un depósito de CDP emplazado a temperatura intermedia ($\sim 200-580^{\circ}\text{C}$), [B] diagrama de componentes vectoriales de un clasto emplazado a temperatura intermedia. En el diagrama se pueden visualizar claramente dos componentes de la magnetización remanente. En el punto en donde se unen las dos componentes representa la temperatura de emplazamiento, [C,D] resultados en dos estereonet de clastos muestreados de un depósito emplazado a temperatura intermedia. En este caso, los resultados que representan cada parte de la historia de enfriamiento son reportados en estereonet separados, un estereonet [C] que representa la historia de enfriamiento de alta temperatura, antes del emplazamiento (direcciones paleomagnéticas aleatorias) y un estereonet [D] que representa la historia del enfriamiento de baja temperatura, después del emplazamiento (direcciones paleomagnéticas alineadas).

4. ¿Qué tipo de resultado esperamos al utilizar este método?

585 Los resultados de la aplicación del método dependen del tipo de depósito muestreado, pero generalmente pueden agruparse en dos categorías:

1. Diferenciación entre los tres tipos principales de depósito. De cada sitio muestreado podemos obtener un esteronet que muestra la dirección paleomagnética de los clastos. La aplicación fundamental es conocer si el depósito se emplazó a temperatura alta, intermedia, o baja.
- 590 2. Resultados de temperatura para cada clasto muestreado en un depósito de temperatura alta o intermedia. Cada clasto se puede evaluar usando un diagrama de componentes vectoriales para estimar una temperatura de emplazamiento precisa. Las estimaciones de la temperatura de todos los clastos dentro de un depósito se pueden evaluar para conocer la temperatura de emplazamiento general del depósito.

Estos resultados en combinación con el trabajo y análisis volcanológico de los depósitos en campo, se puede utilizar
595 para la interpretación del origen de los depósitos estudiados y la dinámica de los flujos que los emplazaron.

5. Métodos de muestreo

Tipos de muestras colectadas

El tipo de muestra generalmente recolectada para el empleo de este método son muestras de mano orientadas. Estas muestras se usan para crear especímenes que se pueden desmagnetizar y medir con el equipo de laboratorio. Estos
600 especímenes generalmente tienen forma de cilindros de 25 mm diámetro y 25 mm de espesor, o cubos de 2 x 2 x 2 mm (Fig 6A-C). Los datos obtenidos por las medidas paleomagnéticas son vectores que representan direcciones tridimensionales del campo magnético de la Tierra que ha sido grabado en las rocas muestreadas. Por eso es fundamental que se comprenda la orientación física que tenían las muestras cuando eran parte del afloramiento muestreado. Por lo tanto, tenemos que tomar en cuenta las siguientes características clave que deben de tener las
605 muestras de mano colectadas en campo:

1. El clasto debe de ser bastante grande para poder perforar o cortar al menos un espécimen (de preferencia dos o más) con las medidas de 25 mm diámetro y 25 mm de espesor para un cilindro, o de 2 x 2 x 2 mm para un cubo. Generalmente un clasto que tiene el tamaño del puño (diámetro alrededor de 5-10 m) es ideal (Fig 6D),
- 610 2. El clasto sin excepción debe de ser colectado in situ dentro del afloramiento del depósito estudiado (i.e., exactamente en su ubicación original de deposición; no debe ser colectado en sitios donde el depósito se ve removido o directamente del suelo, aunque sea parte del mismo afloramiento) (Fig 6D),
3. El clasto seleccionado debe de tener una superficie plana que pueda ser utilizada para orientar y etiquetar (Fig 6D),

- 615 4. El clasto debe de estar orientado con una brújula geológica y etiquetado en campo *antes de retirarlo del afloramiento* (Fig 6E).



620 **Figura 6: Fotografías de las características más importantes de muestras y especímenes paleomagnéticos. [A]** ejemplo de un espécimen cilíndrico de roca de diámetro de 25 mm y espesor de 25 mm, **[B]** ejemplo de un espécimen cubico de roca de 2 x 2 x 2 mm, **[C]** cubos de plástico y metal especializados para toma de muestras cubicas de matriz de 2 x 2 x 2 mm, **[D]** afloramiento de un depósito de CDP donde se pueden apreciar clastos factibles para el muestreo, **[E]** ejemplo de una muestra de mano ideal, nótese la superficie plana de la roca que es ideal para medir y etiquetar.

Equipo

- 625 El equipo necesario para llevar a cabo el muestreo de depósitos piroclásticos es relativamente sencillo de utilizar y se puede ser llevado fácilmente por una persona. El principal trabajo que se hace en campo es identificar clastos para muestrear, orientar y etiquetar, coleccionar las muestras del afloramiento, y posteriormente limpiar y etiquetar nuevamente cada clasto. Para lograr lo anterior, se recomienda utilizar el siguiente equipo:

- 630 • Libreta de campo (Fig 7A) – Se utiliza para registrar las orientaciones de las muestras paleomagnéticas, coordenadas y nombre de los sitios, así como observaciones geológicas.
- Cepillos (brochas) (Fig 7B) – Estos se utilizan para limpiar la muestra antes de etiquetarlas; es importante que la muestra se encuentre relativamente limpia para que la flecha de orientación y etiquetas no se borren. Con ayuda de la brocha o cepillo se limpia cuidadosamente la superficie plana seleccionada, removiendo el exceso de ceniza o matriz.
- 635 • Marcadores permanentes (Fig 7C) – Se emplean para colocar la orientación y nombre o número de las muestras; es importante que el marcador sea permanente para que la etiqueta no se borre o difumine, todavía si están mojadas o sucias. Se recomienda llevar varios marcadores a campo ya que suelen desgastarse rápido, especialmente si la superficie de la roca está cubierta con ceniza.
- 640 • Brújula geológica (Fig 7D) – Se usa para orientar los clastos antes de extraerlos del afloramiento; una brújula con clinómetro y nivel con la capacidad de tomar una medida horizontal (azimut) y vertical (echado),
- 645 • Aplicación o App de brújula-clinómetro de un smartphone (Fig 7E) – muchos smartphones modernos tienen hardware interno suficiente para tomar mediciones precisas utilizando una de las varias aplicaciones disponibles. Antes de usar un smartphone para las mediciones de orientación, es recomendable comparar la aplicación a utilizarse con la brújula geológica para asegurarse que las mediciones son precisas,
- Espátulas metálicas (Fig 7F) – útil para limpiar muestras y remover el exceso de matriz, para poder llevar a cabo la lectura de la orientación una forma más sencilla
- 650 • Martillo/pica (Fig 7G) – Se utiliza para limpiar el área alrededor de las muestras, también para extraer las muestras del afloramiento, y en ocasiones puede ser útil para romper una muestra grande,
- Bolsas de plástico para el muestreo (Fig 7H) – bolsas de plástico de tamaño grande tipo (fabricadas preferentemente de plástico grueso para evitar que se rompan) o bolsas de tela (e.g., bolsas reutilizables de manta) son útiles para organizar los grupos de clastos tomado de sitios individuales.



655 **Figura 7: Equipo esencial para el muestreo paleomagnético de depósitos piroclásticos.** [A] libreta de campo, [B]
 cepillos o brochas de tamaños variados para limpiar las muestras de roca antes de etiquetarlas, [C] marcadores
 permanentes para etiquetar, d) ejemplo de una brújula geológica con clinómetro para orientar muestras, [E]
 ejemplo de un aplicación de smartphone de brújula-clinómetro que también se puede utilizar para orientar
 660 muestras, [F] espátulas metálicos de tamaños variados para limpiar el afloramiento y las muestras, [G]
 martillo/pica geológica para limpiar el área alrededor de la muestra y extraer la muestra del afloramiento, [H]
 bolsas de tela y plástico para organizar las muestras orientadas.

6. Protocolo de muestreo

Selección de sitios

El proceso de selección de sitios para llevar a cabo el muestreo depende en el tipo de erupción y depósito, pero en
 665 general se tiene el mismo objetivo que es recolectar muestras orientadas en una serie de sitios independientes. La
 palabra *independiente* en este caso significa que cada sitio seleccionado es geológicamente y geográficamente

independiente y por esa razón no está influenciado por la historia de enfriamiento de los otros sitios, y que cada muestra está orientada independientemente, y así no es dependiente en la orientación de las otras muestras. Eso significa que cuando un espécimen de cada muestra es medida en el laboratorio cada dirección paleomagnética obtenida se puede utilizar para evaluar un sitio, y todos los sitios se puede comparar para evaluar el depósito en su conjunto.

Cuando es posible, es útil seleccionar sitios que puedan representar historias de enfriamiento diferentes de una misma erupción. Lo anterior puede implicar la recolección de muestras a diferentes distancias del volcán dentro la misma barranca o dentro de varias barrancas alrededor del volcán (si el depósito piroclástico no está confinado a un solo canal), y se puede llevar a cabo el muestreo en diferentes secciones del depósito (base, sección media y cima del depósito) si el depósito tiene un espesor adecuado. También se puede efectuar el muestreo de varios pulsos originados en la misma erupción (si los eventos o depósitos implican emplazamiento en pulsos).

Cuando el objetivo del estudio es diferenciar entre depósitos primarios y secundarios, los sitios se deben seleccionar donde exista esta incertidumbre. Cuando el objetivo es estimar la temperatura de emplazamiento de los depósitos de CDP ya identificados, los sitios se deben seleccionar con base en la certidumbre de que se trata de depósitos primarios y no removilizados.

Muestreo en el afloramiento

Después de llegar al afloramiento seleccionado con el equipo necesario para llevar a cabo el muestreo, el protocolo a seguir es relativamente sencillo:

1. Preparación de las notas – la manera más sencilla de organizar la información de las muestras paleomagnéticas es una tabla de tres columnas con los encabezados SAM, DEC, y INC (nombre de muestra, declinación, e inclinación) (Fig 8A). Es útil incluir cualquier información relevante sobre el muestreo, incluido el nombre de la persona que toma las muestras, la estándar de orientación utilizado (e.g., rumbo y echado), si la corrección de declinación ya está aplicada o si se tiene que tomar en cuenta posteriormente (depende de la ubicación y herramienta de orientación utilizada). También es ideal incluir información complementaria sobre la geología y geografía de cada sitio, incluido las coordenadas, observaciones del afloramiento, número de capas, color, selección, forma y tamaño de los componentes, etc. Se recomienda tomar fotografías del afloramiento para documentar los detalles del depósito. Los nombres de sitios paleomagnéticos generalmente consisten en un prefijo relacionado al proyecto (de preferencia corto ya que es mejor para etiquetar) y un número de sitio en el orden de recolección. Por ejemplo, F1, F2, F3 o FG1, FG2, FG3 (Fuego sitio 1, Fuego sitio 2, Fuego sitio 3), o F25-1, F25-2, F25-3 (Fuego 2025 sitio 1, etc.).
2. Identificación de clastos para el muestreo – Los clastos ideales son alrededor del tamaño de un puño y, deben de tener una superficie relativamente uniforme y plana que se pueda orientar sin dificultad (Fig

700 8B). Para orientar de manera más sencilla, se intenta encontrar clastos cuya superficie plana se inclina hacia adelante del afloramiento (i.e., no debe de estar invertida) (Fig 8C). Seleccionar aproximadamente 6-8 clastos adecuados para muestreo. Generalmente esto resulta en una cantidad de datos suficiente para llevar a cabo el análisis paleomagnético. En el caso de cuando se sabe que se llevará acabo el muestreo en pocos sitios (e.g., los depósitos de la erupción de interés ya están muy erosionado o no están accesibles de forma segura), puede ser de gran utilidad tomar más muestras. En casos donde se pueden identificar muy pocas muestras adecuadas para muestreo en un afloramiento (e.g., pocos clastos, clastos sin superficies planas, límites de tiempo en el muestreo o seguridad), todavía es factible muestrear si se puede identificar un mínimo 4-5 clastos adecuados.

- 705 3. Limpiar los clastos y crear el espacio para llevar a cabo la orientación (Fig 8D) – limpiar la superficie del clasto que se va a orientar (con el uso de cepillo y espátula) para que la flecha correspondiente a la orientación se puede trazar bien. Si es necesario, remover el material excesivo de alrededor del clasto (sin mover o desplazar el clasto) para crear bastante espacio para usar la brújula o smartphone para orientar.
- 710 4. Orientar y etiquetar la muestra – si se utiliza la brújula, nivelar la brújula para tomar una medición de rumbo de la superficie plana expuesta de la muestra (generalmente rumbo se mide a la derecha). Sin mover la brújula, usar el marcador para dibujar una flecha paralela al rumbo en la superficie de la roca (usar el borde de la brújula como una guía) (Fig 8E). Dibujar una línea pequeña en el centro de la flecha en la dirección del echado de la superficie orientada (Fig 8F). Utilizar el clinómetro de la brújula para medir el echado de la superficie orientada (Fig 8G).
 - 715 a. Si se utiliza una aplicación de smartphone, es necesario que se utilice una regla de nivel o una brújula geológica para dibujar la línea de rumbo (con la flecha a la derecha) en la muestra (Fig 8e). Dibujar una línea pequeña en el centro de la flecha en la dirección del echado de la superficie orientada (Fig 8f). Colocar el smartphone con la aplicación abierta sobre la muestra, de manera que el plano del teléfono quede paralelo a la superficie plana de la roca (Fig 8H). La aplicación presentará las mediciones de declinación e inclinación en mismo momento.
- 720 5. Registrar las orientaciones de las muestras – cada orientación se debe registrar en la tabla de la libreta de campo, con las muestras etiquetadas por letra en orden alfabética (e.g., F1A, F1B, F1C, para Fuego sitio 1 muestra A, Fuego sitio 1 muestra B, etc.) (Fig 8I).
- 725 6. Colectar las muestras del afloramiento y etiquetarlas – utiliza las espátulas, pica, etc. para extraer cada muestra orientada del afloramiento, y etiquetarlas con la letra que corresponde a las mediciones registradas en la libreta (Fig 8J). Emplea los cepillos, etc. para limpiar las muestras si es necesario para asegurar que la etiqueta se encuentre de manera claramente escrita.
- 730 7. Organizar las muestras y asegurar la calidad de las etiquetas – se recomienda guardar todas las muestras de un sitio individual en bolsas de plástico o tela claramente etiquetadas (Fig 8K). Antes de guardar las muestras, se debe de asegurar que se encuentran limpiadas y etiquetadas o re-etiquetadas, en varios puntos, para asegurar que la etiqueta y flecha de orientación no se difuminen ni borren durante transporte y almacenamiento. Ocasionalmente los clastos resultarán ser más grandes de lo esperado una vez retirados del afloramiento. Si es posible, estos clastos se pueden romper hasta alcanzar un tamaño más práctico para el transporte, *siempre y cuando la flecha de orientación marcada se conserve y sea suficiente material orientado para cortar o perforar un espécimen en el laboratorio.*
- 735

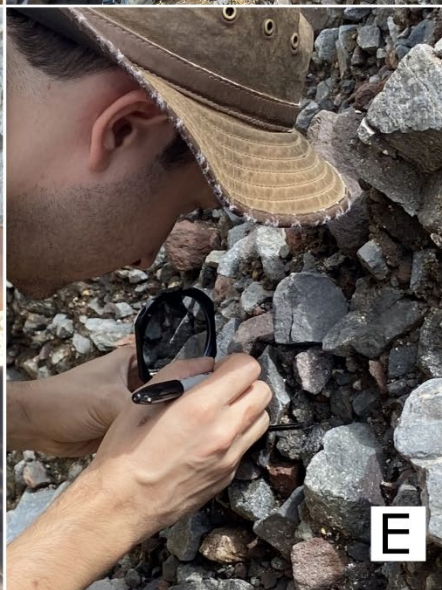
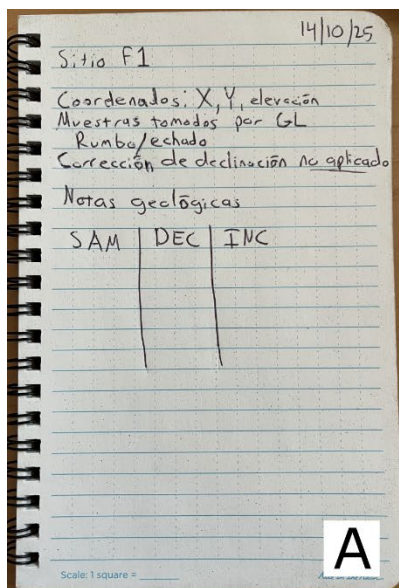


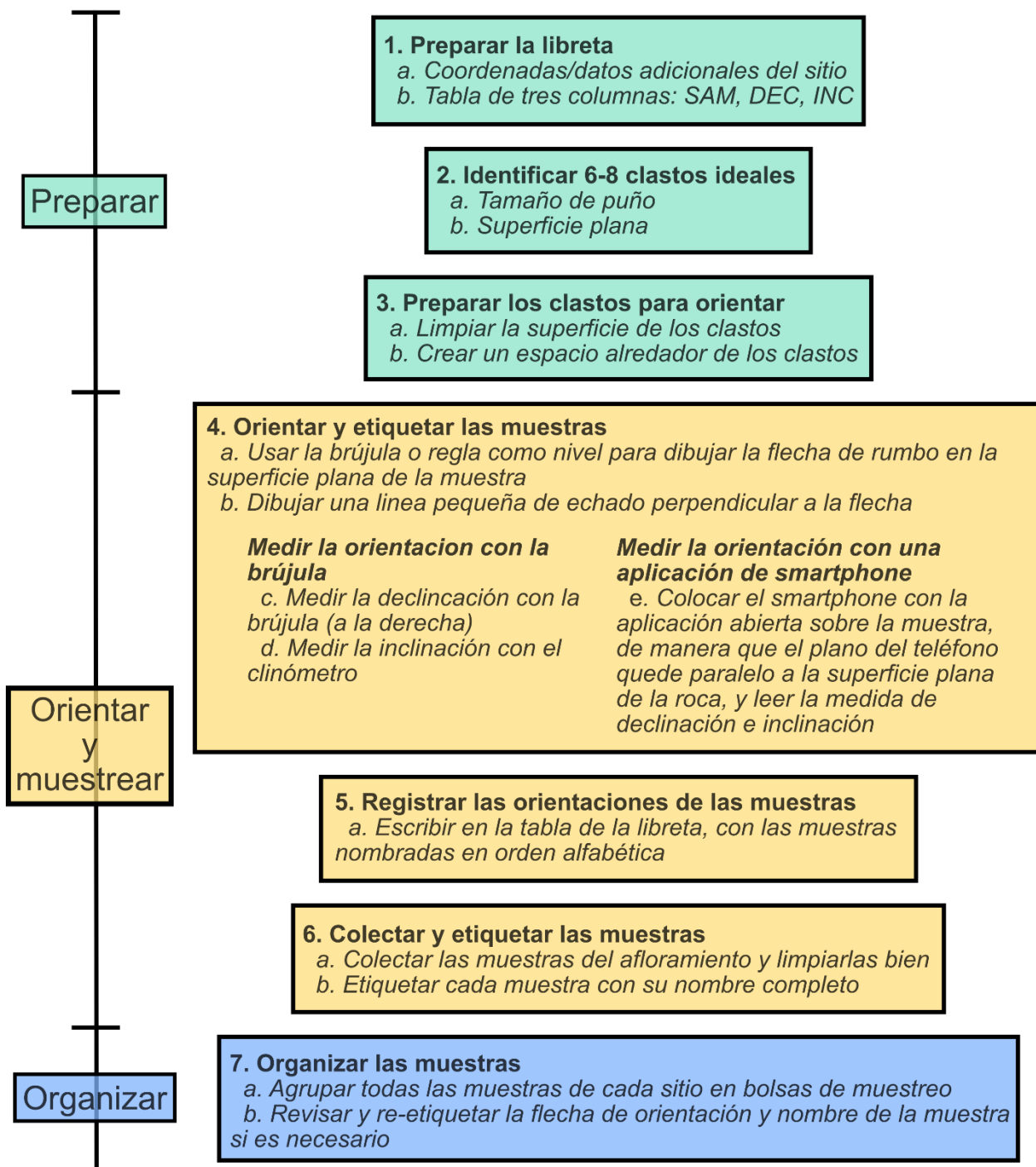


Figura 8: Pasos para coleccionar muestras paleomagnéticas orientadas de un depósito piroclástico. [A] ejemplo de la información que se debe tomar en la libreta de campo para registrar el muestreo y orientación, [B] identificación de clastos ideales para muestreo en el afloramiento, [C] ejemplo de un afloramiento con un clasto cuya superficie plana se inclina hacia adelante del afloramiento (círculo rojo) y un clasto con una superficie invertida (círculo azul), [D] limpieza del área alrededor de la muestra y de la superficie de una muestra antes de orientar y etiquetar, [E] uso del marcador permanente para dibujar una flecha de rumbo paralelo a la medición tomada con la brújula, [F] clasto con la flecha de rumbo marcada (indicado por la flecha roja) y línea pequeña perpendicular a la flecha de rumbo en la dirección del echado de la superficie plana de la muestra (indicado por la flecha pequeña negra), [G] medición de la declinación de la muestra con la brújula geológica, [H] medición de la declinación e inclinación

de la superficie plana de la muestra con una aplicación de brújula-clinómetro de smartphone, [I] ejemplo de una libreta de campo con la tabla estándar con nombres de muestras y orientaciones, [J] etiqueta de una muestra orientada con su nombre o número de muestra después de extraerla del afloramiento, [K] muestras de un sitio individual organizadas en una bolsa de plástico bien etiquetadas.

- 755 El protocolo de muestreo paleomagnético está resumido en la Figura 9 para visualizarse de una manera rápida y resumida. Se recomienda imprimirlo y llevarlo a campo para referenciarse durante el muestreo. Un video sobre los pasos de muestreo está disponible en el Material Suplementario 2.

Protocolo de muestreo paleomagnetico



760 **Figura 9: Guía breve y visual del protocolo de muestreo paleomagnético. Los siete pasos están relacionados con las descripciones más detallados en el texto, y las fotos relevantes que corresponden a cada paso se pueden observar en la Figura 8.**

7. Próximos pasos

El proceso se debe repetir para cuantos sitios sean necesarios dependiendo de los objetivos del estudio. Una investigación detallada de una sola erupción o depósito puede involucrar la recolección de varios sitios en diferentes
765 ubicaciones, así como en diferentes niveles dentro del depósito, o pulsos de una erupción, como se mencionó anteriormente, mientras que un estudio de múltiples erupciones sobre tiempo puede involucrar solo un sitio para cada una de las erupciones estudiadas.

Las muestras se deben enviar a un laboratorio paleomagnético, donde los clastos se pueden cortar o perforar para realizar los especímenes que se pueden medir con un magnetómetro para determinar sus direcciones
770 paleomagnéticas y posiblemente con otros equipos magnéticos para determinar otras características magnéticas importantes (e.g., temperatura Curie). Esto brinda los datos necesarios para el análisis que determina los tipos de depósitos y temperaturas de emplazamiento.

8. Observaciones finales

La aplicación del protocolo de muestreo y los métodos paleomagnéticos de cuales platicamos a lo largo de esta
775 guía pueden proporcionar información sobre las temperaturas de emplazamiento de las CDPs y, además, también son de utilidad para el reconocimiento de diferentes tipos de depósitos que no se puede distinguir claramente en campo (depósitos primarios versus depósitos secundarios). Son de mucha utilidad para conocer con mayor detalle las características físicas que gobiernan los procesos de emplazamiento de las CDP en volcanes con actividad frecuente. Conjuntamente, pueden brindar información para complementar otros estudios y observaciones de la
780 actividad eruptiva. Aunque los investigadores y el personal de los observatorios volcanológicos no siempre tienen los mismos prioridades y responsabilidades, la utilización de estos métodos para el estudio de erupciones explosivas frecuentes puede brindar datos útiles tanto de perspectiva fundamental como práctica. La experiencia y el conocimiento que tienen los observatorios en su volcán y en los depósitos recientes producidos por el mismo en combinación con la experiencia paleomagnética, así como los recursos y equipamiento de laboratorio de los
785 institutos de investigación y las universidades, proporcionan la base para realizar estudios colaborativos fundamentales e innovadores. Estos estudios de las propiedades dinámicas a corto y largo plazo y de las características peligrosas de los CDP y los lahares son importantes para una mejor comprensión de los procesos volcánicos y para el trabajo que se realiza en los observatorios volcanológicos con relación al monitoreo, planeación, y mitigación de erupciones explosivas.

790 **Agradecimientos**

Los autores agradecen al personal de INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología) y del observatorio del Volcán de Fuego en Guatemala por las discusiones en campo que inspiraron la elaboración del presente guía.

Contribuciones de los autores

- 795 GAL escribió el primer borrador en inglés y español. RMLB editó la versión en español del manuscrito. Ambos autores contribuyeron a la producción de figuras, la colección de fotos de campo y videos, así como la edición y finalización de la guía.

References/Referencias

- 800 Alva Valdivia, L.M., Torres-Hernández, J.R., González Rangel, J.A., Caballero Miranda, C.I., Rosas Elguera, J.G., Villalobos Romero, N., 2012. Paleomagnetism in the determination of the emplacement temperature of Panalillo Ignimbrite, Juchín, San Luis Potosí, Mexico. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 29, 619–638.
- Aramaki, S., Akimoto, S., 1957. Temperature estimation of pyroclastic deposits by natural remanent magnetism. *American Journal of Science* 255, 619–627. <https://doi.org/10.2475/ajs.255.9.619>
- 805 Bardot, L., McClelland, E., 2000. The reliability of emplacement temperature estimates using palaeomagnetic methods: a case study from Santorini, Greece. *Geophysical Journal International* 143, 39–51. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2000.00186.x>
- Cole, P.D., Neri, A., Baxter, P.J., 2015. Chapter 54 - Hazards from Pyroclastic Density Currents, in: Sigurdsson, H. (Ed.), *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)*. Academic Press, Amsterdam, pp. 943–956.
- 810 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00054-7>
- Hasegawa, T., Mochizuki, N., Shibuya, H., Nishihara, A., Kusu, C., Shibata, S., Okada, M., Nishiki, K., Sato, Y., 2024. Paleomagnetic study of the 30 ka Aira caldera-forming eruption and 60–45 ka Iwato pyroclastic flow deposits, southern Kyushu, Japan. *Earth Planets Space* 76, 161. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02089-2>
- Hoblitt, R.P., Kellogg, K.S., 1979. Emplacement temperatures of unsorted and unstratified deposits of volcanic rock debris as determined by paleomagnetic techniques. *GSA Bulletin* 90, 633–642. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1979\)90%253C633:ETOUAU%253E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90%253C633:ETOUAU%253E2.0.CO;2)
- 815 Kent, D.V., Ninkovich, D., Pescatore, T., Sparks, S.R.J., 1981. Palaeomagnetic determination of emplacement temperature of Vesuvius AD 79 pyroclastic deposits. *Nature* 290, 393–396. <https://doi.org/10.1038/290393a0>

- Lerner, G.A., Cronin, S.J., Turner, G.M., Rowe, M.C., 2019. Paleomagnetic determination of the age and properties of the 1780–1800 AD dome effusion/collapse episode of Mt. Taranaki, New Zealand. *Bull Volcanol* 81, 15. <https://doi.org/10.1007/s00445-019-1275-z>
- Lerner, G.A., Piispa, E.J., Bowles, J.A., Ort, M.H., 2022. Paleomagnetism and rock magnetism as tools for volcanology. *Bull Volcanol* 84, 24. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01529-9>
- McClelland, E., Wilson, C.J.N., Bardot, L., 2004. Palaeotemperature determinations for the 1.8-ka Taupo ignimbrite, New Zealand, and implications for the emplacement history of a high-velocity pyroclastic flow. *Bull Volcanol* 66, 492–513. <https://doi.org/10.1007/s00445-003-0335-5>
- Ort, M.H., Porreca, M., Geissman, J.W., 2015. The use of palaeomagnetism and rock magnetism to understand volcanic processes: introduction. *Geological Society, London, Special Publications* 396, 1–11. <https://doi.org/10.1144/SP396.17>
- Paterson, G.A., Roberts, A.P., Mac Niocaill, C., Muxworthy, A.R., Gurioli, L., Viramonté, J.G., Navarro, C., Weider, S., 2010. Paleomagnetic determination of emplacement temperatures of pyroclastic deposits: an under-utilized tool. *Bull Volcanol* 72, 309–330. <https://doi.org/10.1007/s00445-009-0324-4>
- Pensa, A., Capra, L., Giordano, G., Corrado, S., 2018. Emplacement temperature estimation of the 2015 dome collapse of Volcán de Colima as key proxy for flow dynamics of confined and unconfined pyroclastic density currents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 357, 321–338. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.05.010>
- Sulpizio, R., Zanella, E., Macías, J.L., 2008. Deposition temperature of some PDC deposits from the 1982 eruption of El Chichón volcano (Chiapas, Mexico) inferred from rock-magnetic data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 175, 494–500. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.02.024>
- Tanaka, H., Hoshizumi, H., Iwasaki, Y., Shibuya, H., 2004. Applications of paleomagnetism in the volcanic field: A case study of the Unzen Volcano, Japan. *Earth Planet Sp* 56, 635–647. <https://doi.org/10.1186/BF03352526>
- Tauxe, L., Banerjee, S.K., Butler, R.F., van der Voo, R., 2018. *Essentials of Paleomagnetism*, 5th Web Edition.
- Uehara, D., Cas, R.A.F., Folkes, C., Takarada, S., Oda, H., Porreca, M., 2015. Using thermal remanent magnetisation (TRM) to distinguish block and ash flow and debris flow deposits, and to estimate their emplacement temperature: 1991–1995 lava dome eruption at Mt. Unzen Volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 303, 92–111. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.019>