



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Departamento de Física

Firma Magnética asociada a la formación del cráter de Pantasma, sector
Noroeste-Sureste del departamento de Jinotega.

Tesis

Para obtener el título de:

Licenciado en Física con mención en geofísica

Presentado por:

Br. Darling Fabiola Castro Hidalgo

Tutor:

Dr. Marcel Chow Martínez

Asesores:

PhD. Pierre Rochette

M.Sc. Humberto García Montano

Managua, 16 de diciembre del 2021

Cráter de Pantasma, Jinotega | Castro, D.(2021)

DEDICATORIA

A mis padres:

Salvador Elías Castro Centeno

Mirama de Jesús Hidalgo Espinoza

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por el amor y apoyo incondicional para lograr esta etapa de mi investigación y brindarme todo lo necesario para culminarla.

A mi tutor Marcel Chow Martínez, por compartir sus habilidades científicas de buena racha, para mi formación profesional. Agradezco su disposición de tiempo para mi tesis monográfica así mismo M.Sc. Humberto García por brindarme su confianza y apoyo. A PhD. Pierre Rochette por guiarme entorno a mis objetivos investigativos.

Agradecer a la PhD. Heyddy Calderón del Instituto de Geología y Geofísica de la UNAN Managua (IGG-CIGEO), por brindar los recursos y el equipamiento que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación.

Al personal de la Alcaldía de Pantasma, por recibirme con tan gratitud, personas increíblemente simpáticas.

A mis sinodales, M.Sc. Jorge Flores; M.Sc. Gema Velázquez y M.Sc. Lener Sequeira, agradecerles por sus recomendaciones y correcciones en mi trabajo.

A mi amigo Erick Obando por apoyarme en el mantenimiento electrónico de los equipos; les agradezco personalmente a Enrique Navarro y Karina Quiroz por su cooperación en la campaña magnetométrica del 2019.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Managua 14 de diciembre del 2021

MSc. Xochilt Zambrana
Director
Departamento de Física.
Presente

Estimado Maestra Zambrana

El motivo de la presente es para comunicarle que he revisado el trabajo de investigación elaborado por la Br.: **Darling Fabiola Castro Hidalgo** de la carrera de Licenciatura en Física con mención en Geofísica de la UNAN-Mangua. Dicho trabajo lleva por título "Firma Magnética asociada a la formación del cráter de Pantasma, sector Noroeste-Sureste del departamento de Jinotega". Tutor: Dr. **Marcel Chow Martínez**.

Dado lo anterior, ratifico que el trabajo realizado contiene conocimientos que son científicamente aceptados y técnicamente prácticos, enmarcados en el tema.

Sin más a que referirme, me despido deseándole éxito en sus labores diarias.

Atentamente

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Gema Velásquez Espinoza". The signature is fluid and cursive, with a large initial "G" and "E".

MSc. Gema Velásquez Espinoza
Docente de la carrera de Ing. Geológica
Departamento de Tecnología/Facultad de Ciencias e Ingeniería

¡A la libertad por la Universidad!

Managua, 14 de Diciembre 2021

MSc. Xochilt Zambrana Areas
Directora
Departamento de Física
Facultad de Ciencias e Ingenierías
Presente

Estimada MSc. Zambrana:

El motivo de la presente es para comunicarle que he revisado el documento de tesis de la bachiller **Darling Fabiola Castro Hidalgo** de la carrera de Licenciatura en Geofísica. Dicho trabajo se titula: "Firma magnética asociada a la formación del cráter de Pantasma, sector Noroeste-Sureste del departamento de Jinotega", el cual es tutorado por el Dr. Marcel Chow Martínez y asesorado por el Dr. Pierre Rochette y M.Sc. Humberto García Montano.

He constatado que Castro Hidalgo ha integrado al documento la mayoría de observaciones orientadas como consecuencia de su pre-defensa realizada recientemente. Por tanto, la investigación realizada y sintetizada en el documento puede ser defendida.

Sin más a que referirme, me despido deseándole éxito en sus funciones.

Atentamente,



Lener De Jesús Sequeira Gómez

M.Sc. Geofísico – Hidrogeólogo
Docente de la Facultad de Ciencias e Ingenierías

Managua, 14 de Diciembre 2021

MSc. Xochilt Zambrana Areas
Directora
Departamento de Física
Facultad de Ciencias e Ingenierías
Presente

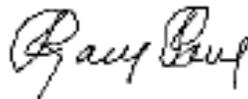
Estimada Directora:

Sirva la presente para comunicarle que he leído el documento de tesis de la Br. Darling Fabiola Castro Hidalgo de la carrera de Licenciatura en Geofísica, con título: "Firma magnética asociada a la formación del cráter de Pantasma, sector Noroeste-Sureste del departamento de Jinotega", tutelada por el Dr. Marcel Chow Martínez, asesorada por el Dr. Pierre Rochette y M.Sc. Humberto García Montano.

He verificado que Castro Hidalgo ha integrado al documento las observaciones orientadas después de su pre-defensa realizada el viernes 10 de diciembre del año en curso. Por consiguiente, avalo el trabajo de investigación realizado por la Br. Castro en el documento presentado y puede ser defendida en la fecha que Ud estime conveniente.

Sin más a que referirme, quedo a su disposición.

Atentamente,



JORGE RAMÓN FLORES PÉREZ
Docente Dpto. Física- FF CC e II
UNAN-MANAGUA

RESUMEN

El cráter de Pantasma está ubicado en Jinotega, al norte de Nicaragua. Tiene un diámetro de 14 km y edad estimada de 815 ± 11 mil años, lo que lo convierte en una estructura más joven que las rocas volcánicas antiguas del Oligoceno-Mioceno y rocas del Plioceno que rodean al cráter. La casi ausencia de evidencias que apoyen al origen volcánico hace poco probable que la estructura tenga una génesis debido a un vulcanismo. En este trabajo hemos realizado un estudio magnético con el fin de evaluar la causa de su formación. Realizamos un levantamiento magnético sobre el cráter en dos campañas desarrolladas en 2019 y 2021. Como resultado de este survey obtuvimos mapas y perfiles de las anomalías magnéticas a nivel local y regional. Producimos modelos conceptuales mejorados usando un modelo geológico desarrollado por Bravo 2019. La firma magnética del cráter fue comparada con las de estructuras de impacto y caldera volcánica, favoreciendo una firma de un impacto meteórico.

Palabras claves: *Geofísica, Firma magnética, Cráter de impacto, Cráter de Pantasma.*

ABSTRACT

The Pantasma Crater is located at Jinotega, in the northern region of Nicaragua. It is a 14 km diameter crater with an estimated age of 815 ± 11 thousand years, being younger than the volcanic rocks from Oligoceno-Mioceno and rocks from Plioceno that surround the crater. The lack of evidences that support the volcanic origin make not probable the vulcanism as the genesis of the Pantasma structure. In this work we development a magnetic study to evaluate the formation of the crater. We perform a magnetic survey on the crater in two distinct campaign on 2019 and 2021. As result of the survey we got magnetic anomaly maps and profiles in a local and a regional level. We produce improved conceptual models using the geological model made by Bravo 2019. The magnetic firm of the crater was compared with such of an impact structure and a volcanic boil, being the impact of meteoric the best hipotesis for the fomation of the crater.

Keywords: *Geophysic, Magnetic Firm, Impact Crater, Pantasma Crater*

CONTENIDO

Capítulo I	1
1.1. Introducción	1
1.2. Ubicación y vías de acceso	3
1.3. Planteamiento del problema	5
1.4. Justificación	7
1.5. Objetivos	8
1.5.1. General	8
1.5.2. Específicos	8
Capítulo ii	9
2.1. Marco referencial	9
2.1.1. Antecedentes	9
2.2. Marco Geotectónico Regional.....	11
2.3. Geología Regional de Nicaragua	12
2.4. Geología local.....	14
2.5. Marco Teórico.....	16
2.5.1. Parámetros morfológicos de un cráter de impacto	16
2.5.2. La Geofísica en el descubrimiento de estructuras por impacto.	21
2.5.2.1. Concepto de firma geofísica.....	21
2.5.2.2. Firma magnética típica de cráter de impacto.....	22
2.5.3. Magnetometría	24
2.5.3.1. Propiedades Magnéticas de los materiales	25
2.6. Hipótesis.....	27
Capítulo III	28
3.1. Diseño metodológico	28
3.1.1. Tipo de estudio.....	28

3.1.2. Área de estudio	28
3.1.3. Universo y Muestra	28
3.1.4. Variables y Operacionalización de variables	29
3.1.5. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos e información.....	30
3.1.5.1. Métodos e instrumentos de recolección de datos.....	30
3.1.5.2. Métodos y procedimientos de recolección de datos.....	32
3.1.5.2. Plan de Análisis y procedimiento de datos	34
Capítulo VI.	35
4.1. Análisis y resultados	35
4.1.1. Adquisición y procesado de los datos	35
4.1.2. Procesado de datos magnéticos.....	39
4.1.3. Interpretación.....	48
.....	60
4.1.4. Discusión de resultados.....	61
Capítulo v	62
5.1. Conclusiones	62
5.2. Recomendaciones	63
5.3. Referencias	64
5.4. Apéndice.....	68
5.4.1. Apéndice A.....	69

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DE LOCALIZACIÓN DEL CRÁTER DE PANTASMA. FUENTE: INETER, (1984).....	4
FIGURA 2. MAPA GEOTECTÓNICO DE CENTRO AMÉRICA. MODIFICADO DE MEZA Y RAMÍREZ, (2017). FUENTE: FRISCHBUTTER, (2001).	11
FIGURA 3. MAPA GEOLÓGICO REGIONAL MINERO. FUENTE: INETER, (1995).	13
FIGURA 4. MAPA GEOLÓGICO LOCAL DEL CRÁTER DE PANTASMA. FUENTE: BRAVO, (2019).	15
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS CRÁTERES CONOCIDOS. FUENTE: (GRIEVE, 2001).	16
FIGURA 6. PROCESO DE IMPACTO METEÓRICO. LA ILUSTRACIÓN MUESTRA LA CAÍDA DE LAS PRESIONES MÁXIMAS FRENTE A LA ONDA DE CHOQUE. FUENTE: FRENCH, (1998).	17
FIGURA 7. SECCIÓN ESQUEMÁTICA DE UN CRÁTER DE IMPACTO SIMPLE. FUENTE: GRIEVE, (1987).....	19
FIGURA 8. SECCIÓN ESQUEMÁTICA DE UN CRÁTER DE IMPACTO COMPLEJO. FUENTE: GRIEVE, (1987).	20
FIGURA 9. FIRMA MAGNÉTICA DE UN CRÁTER DE IMPACTO. FUENTE: PILKINGTON Y GRIEVE, (1992).	22
FIGURA 10. FIRMA MAGNÉTICA DE UNA CALDERA VOLCÁNICA. FUENTE: LINDNER, (2006).	23
FIGURA 11. MOMENTOS MAGNÉTICOS. FUENTE: KEAREY, (2002).	26
FIGURA 12. . POSICIÓN DEL SENSOR. FUENTE: INFO@GEMSYS.CA	31
FIGURA 13. . INSTRUMENTACIÓN MAGNETOMÉTRICA. FUENTE: INFO@GEMSYS.CA.....	31
FIGURA 14. CAMPAÑA MAGNETOMÉTRICA 2019: A) ESTACIÓN BASE MAGNÉTICA (2019), B) MODO ROVER (CAMINANTE). ..	32
FIGURA 15. CAMPAÑA MAGNETOMÉTRICA 2021. A) POSICIÓN MAGNÉTICA EN EL CENTRO DEL CRÁTER. B) POSICIÓN DE AMARRE CON LA BASE 2019. C) POSICIÓN MAGNÉTICA EN CAMBIOS LITOLÓGICOS.....	33
FIGURA 16. ESQUEMA DE CIRCUITOS MAGNETOMÉTRICOS.	37
FIGURA 17. MAPA DE PUNTOS MAGNÉTICOS.	38
FIGURA 18. CORRECCIÓN DIURNA 2019. TIEMPO (DÍAS) REFERENTE AL 2 DE SEPTIEMBRE DE 2019.....	39
FIGURA 19. PANEL IZQUIERDO: DISTRIBUCIÓN MUESTREADA EN EL 2019. PANEL DERECHO: VARIOGRAMA DEL 2019.....	40
FIGURA 20. MAPA MAGNÉTICO 2019	41
FIGURA 21. CURVA DE VARIACIÓN DIURNA DE LA CAMPAÑA DE 2021. LOS PUNTOS DE AMARRE REFERIDOS A LA BASE DE 2019 ESTÁN ENCERRADOS EN TRIÁNGULOS AZULES. LOS PUNTOS ROJOS SON LOS VALORES PREDICHOS POR LA CURVA EN LA BASE DE 2019 PARA LOS DATOS TOMADOS EN CAMPO. TIEMPO (DÍAS) REFERENTE AL 10 DE AGOSTO DE 2021.	42
FIGURA 22. VARIOGRAMA 2021.	43
FIGURA 23. MAPA MAGNÉTICO 2021.....	44
FIGURA 24. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DE LOS DATOS 2019 (AZUL) Y 2021 (ROJO). PANEL IZQUIERDO: HISTOGRAMAS DE AMBAS DISTRIBUCIONES. PANEL DERECHO: BOXPLOTS DE LAS DISTRIBUCIONES.....	45
FIGURA 25. PERFIL MAGNÉTICO 2019-2021 (PANEL SUPERIOR) CON ORIENTACIÓN N-S. (PANEL INTERMEDIO) CON ORIENTACIÓN N-S. LÍNEAS PARALELAS A LOS PERFILES (LÍMITES DEL CRÁTER). EL MODELO DE TERRENO ES PRESENTADO EN EL PANEL IZQUIERDO.....	46

FIGURA 26. PERFIL MAGNÉTICO 2021 (PANEL SUPERIOR) CON ORIENTACIÓN O-E. LÍNEAS PARALELAS A LOS PERFILES (LÍMITES DEL CRÁTER). EL MODELO DE TERRENO ES PRESENTADO EN EL PANEL IZQUIERDO.	47
FIGURA 27. MAPA MAGNÉTICO CONJUNTO (2019-2021).....	50
FIGURA 28. MODELOS 3D DEL SURVEY MAGNÉTICO LOCAL. VISUALIZACIÓN DE LA ANOMALÍA CENTRAL NEGATIVA.	51
FIGURA 29. MODELOS 3D DEL SURVEY MAGNÉTICO REGIONAL. VISUALIZACIÓN DE LA ANOMALÍA CENTRAL NEGATIVA.	52
FIGURA 30. MODELOS 3D. MAPAS MAGNÉTICOS CONJUNTO.	53
FIGURA 31. MODELO CONCEPTUAL (PERFIL MAGNÉTICO N-S, 2021).....	56
FIGURA 32. MODELO CONCEPTUAL (PERFIL MAGNÉTICO W-E, 2021).	57
FIGURA 33. COMPARACIÓN DE FIRMAS MAGNÉTICAS DE ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS. PANEL IZQUIERDO: FIRMAS MAGNÉTICAS DE CALDERAS VOLCÁNICAS: PANTASMA (A), CALDERA DE KLEINSAUBERNITZ (B) Y CALDERA BARUTH (C). PANEL DERECHO: FIRMAS MAGNÉTICAS DE CRÁTERES DE IMPACTO: PANTASMA (A), CRÁTER CLEARWATER EAST (B) CRÁTER MJØLNIR (C)..	59
FIGURA 34. COMPARACIÓN DE LAS FIRMAS MAGNÉTICAS. DESCRIPCIÓN DE LA LEYENDA: FIRMAS MAGNÉTICA DEL CRÁTER DE IMPACTO CLEARWATER (LÍNEA AZUL), CALDERA VOLCÁNICA DE KLEINSAUBERNITZ (LÍNEA ROSA) Y PANTASMA (LÍNEA NEGRA).	60

INDICE DE TABLAS E ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. UBICACIÓN DE OBSERVACIONES QUE IMPLICAN SEMIVARIANZAS ALTAS EN LA NUBE DEL VARIOGRAMA. FUENTE: PORRAS, (2014).	69
ILUSTRACIÓN 2. VARIOGRAMA EXPONENCIAL (DERECHA) Y EJEMPLO DE VARIABLE REGIONALIZADA ASOCIADA (IZQUIERDA) FUENTE: EMERY, (2008).	70
TABLA 1. CAMPAÑAS MAGNETOMÉTRICAS.	35

CAPÍTULO I

1.1. Introducción

En el sector noroeste de Jinotega se sitúa el cráter de Pantasma, una estructura con característica topográfica circular. Tiene un diámetro de 14 km con aproximadamente 400-500 m de elevación sobre el nivel del mar. El cráter está atravesado por el río de su mismo nombre y tiene una pendiente hacia el Sur. En su centro está ubicado el pueblo “Las Praderas”, perteneciente al municipio de “Santa María de Pantasma” con 53 499 habitantes.

La estructura de Pantasma, se encuentra rodeada de rocas volcánicas regionales antiguas, con edades de entre 3-52 millones de años según Hodgson, (2000). Debido a estas características se sugirió que Pantasma se formó por un colapso volcánico.

Investigaciones recientes (Rochette et al., 2020; Masotta et al., 2020; Rochette et al., 2021) sugieren un impacto meteórico ocurrido hace 815 ± 11 mil años el cual podría ser el origen del cráter. Entre las evidencias, quizás la más controvertida es la determinación de fases minerales extraterrestres en rocas inducidas por el impacto (brecha polimíctica y vidrio). Además, se dieron hallazgos de vidrios similares a tectitas reportadas en Belice (Rochette et al., 2021).

Para obtener un estudio adecuado en esta región, se propone para esta investigación identificar el tipo de firma magnética del cráter de Pantasma, girando en torno a la posibilidad de un origen explosivo, por ejemplo, impacto meteórico o vulcanismo. Sin embargo, la mejor alternativa para explicar el origen de la estructura es que haya sido producida por un impacto, teniendo en cuenta el tamaño y la forma con una ligera elevación en el centro, como se espera para un cráter de impacto.

Por esta razón y el Instituto IGG-CIGEO/ UNAN-Managua tiene a su cargo la presente propuesta investigativa, aportando al conocimiento científico y entendimiento de la historia geológica del País.

El presente trabajo se divide de la siguiente forma: Capítulo I plantea una descripción geográfica del sector, el planteamiento del problema, las características generales del sector, la importancia del estudio, por ende, los objetivos que se quieren alcanzar. En el Capítulo II se presenta el marco referencial y teórico. El diseño metodológico se despliega en el Capítulo III, marcando la adquisición de campo, procesos de recopilación de datos e información, con mapas y perfiles del levantamiento de los datos.

Los resultados de la investigación son presentados en el capítulo IV, su contenido obtiene los mapas magnéticos, gráficas y modelos geofísicos. Finalmente, en el Capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones.

1.2. Ubicación y vías de acceso

El municipio de “Santa María de Pantasma” se encuentra a 230 km de la capital de Managua hacia el NE-SO de Nicaragua. Limita al norte con Quilalí y Wiwilí, al sur con municipio de Jinotega, al este con el de El Cuá y al Oeste con los municipios de San Rafael del Norte y San Sebastián de Yalí.

En la misma localidad, se ubica el pueblo de “Pantasma”, bordeado de una estructura circular conocido como “Cráter de Pantasma”, este valle es atravesado por un Río de su mismo nombre tributario del Río coco (Instituto Nacional de Información de Desarrollo -INIDE, 2017).

Las vías de acceso rodean las comunidades: La piragua hacia el Norte, El Charcón 1 y 2 junto con El Acerrío y Santa María de Pantasma en su centro, siguiendo hacia el Sur con El recuerdo, El Sacramento, hacia el Oeste con San Luís y al Este con El Venado (**Figura 1**).

El sitio de estudio cubre un área aproximada de 300 km² y pertenece a las hojas topográficas San Rafael del Norte 2955-I, Quibuto 2956-II, Asturias 3055- IV, Las Praderas 3056-III, (INETER, 1988).

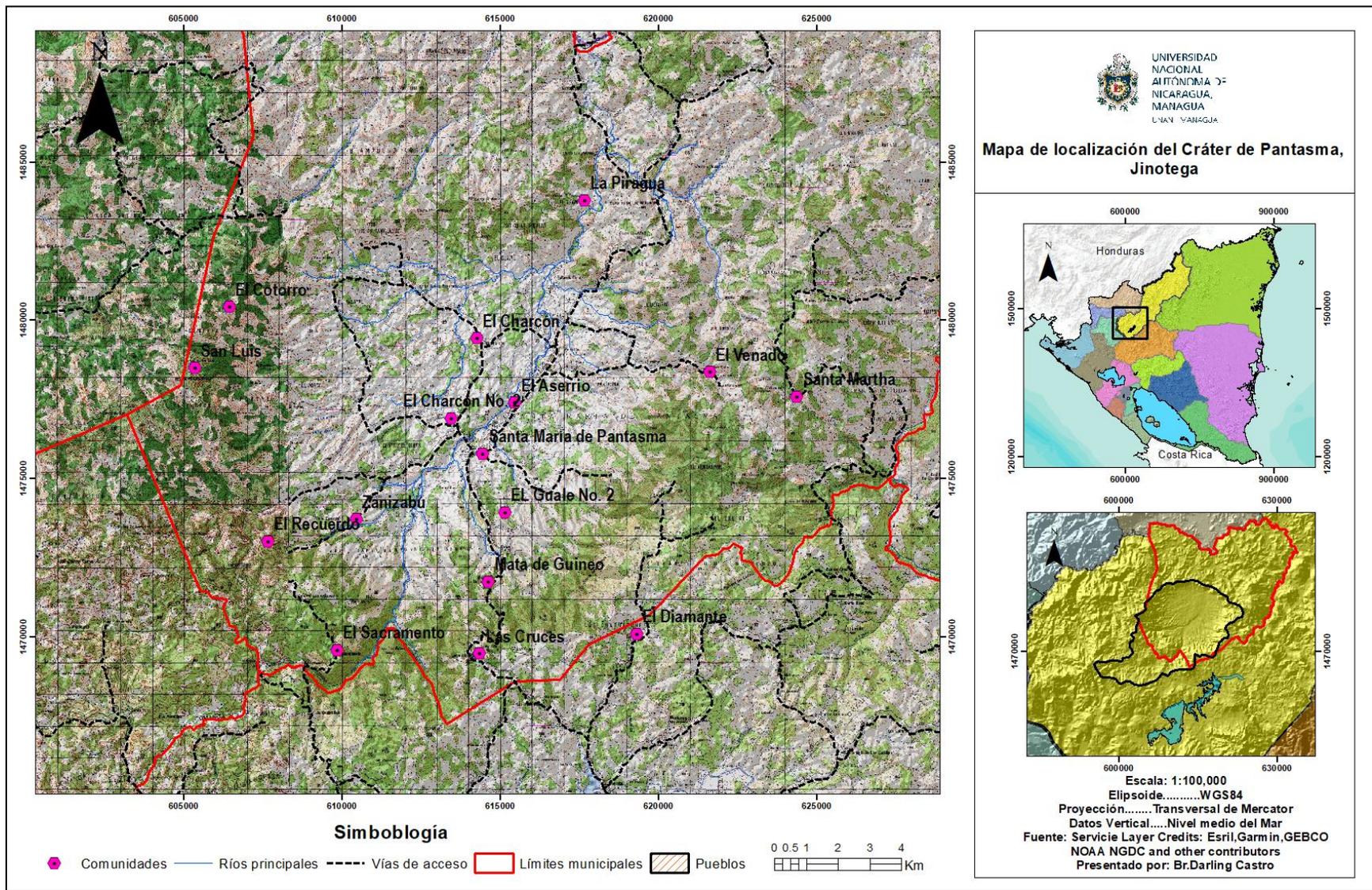


Figura 1. Mapa de localización del cráter de Pantasma. Fuente: Ineter, (1984).

1.3. Planteamiento del problema

La formación del cráter de Pantasma esconde un escenario geológico peculiar que constituye un enigma para la comunidad científica. Existen dos contrariedades respecto al origen de Pantasma: 1) una génesis relacionada con las rocas producto de un vulcanismo (Hodgson, 2000) y 2) producido por un impacto de meteorito (Rochette et al., 2019).

La primera hipótesis consiste que el cráter está ubicado entre dos formaciones geológicas regionales de la provincia central (Hodgson, 2000). Generalmente toda la región está constituida por rocas ígneas pertenecientes al Grupo Matagalpa (Oligoceno-Mioceno) con edades entre 25 y 52 millones de años, Grupo Coyol (Plioceno) y depósitos Cuaternarios (Pleistoceno- Holoceno) edades entre 3 y 30 millones de años. Desde luego posterior al Mioceno no se han registrado actividades volcánicas (Saginer et al., 2011).

Por el contexto Geológico regional, la estructura de Pantasma no se menciona dentro de la literatura geológica de Hodgson, (2000). Además, se localiza fuera de los límites E y S de la secuencia volcánica pertenecientes a la Depresión Nicaragüense. Solamente estos Centros volcánicos se consideraron como el producto de los depósitos volcánicos del Pleistoceno-Holoceno en ellas está el Cerro Ciguatepe, San Jacinto, Caldera Las Lajas, Valle de Guayucalí del grupo Coyol, en cuanto al grupo Matagalpa la Caldera la Bujona y El tempisque, todas estas estructuras están alineadas NW- SE. **(Ver Figura 3).**

Por otro lado, las evidencias encontradas por Rochette et al., (2019) apuntan a un origen del cráter de Pantasma como resultado de un impacto meteorítico. Entre sus resultados establecen que el cráter es más joven que las rocas volcánicas regionales, ya que dataron las edades de dos muestras recogidas dentro del cráter el resultado da lugar a 815 ± 11 mil años empleando una datación radiométrica de $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$. Esto convierte a la estructura de Pantasma, al menos un orden de magnitud más reciente que la edad de las rocas volcánicas mencionado por Hodgson, (2000).

Además, encontraron que las brechas polimictas en el centro del cráter manifiestan una anomalía de ^{54}Cr , la cual consiste en valores negativos comúnmente asociados a las condritas (material meteórico). En particular otra muestra de vidrio vesicular presenta fases minerales meteóricas indicadoras de reidita en zircón granular y coesita. Esta misma muestra del vidrio fue analizada por Masotta et al. (2020) quienes encontraron las mismas inclusiones de coesita a través de tomografía 3D de rayos X.

Sin embargo, establecer el origen del impacto propuesto por Rochette et al. (2019), requiere una caracterización única de las rocas inducidas por el posible impacto. Actualmente, las únicas características de impacto aceptadas son evidencias de firmas geoquímicas, firmas petrográficas y geofísicas de acuerdo con Pilkington y Grieve, (1992). Si bien los estudios geofísicos pueden complementar al estudio petrográfico y geoquímico (Rochette et al., 2019).

Debido a que el área presenta un clima tropical que ha favorecido al crecimiento en la vegetación esta ha sido modificada por la erosión y sedimentación durante miles de años. Estas condiciones también han modificado la evidencia meteórica, es la razón por la es necesario el estudio Geofísico que permitirá determinar una firma magnética que se vincule a la génesis del cráter. Por lo tanto, por lo expuesto anteriormente, nos formulamos la siguiente pregunta:

¿Cuál es la firma magnética del cráter de Pantasma?

1.4. Justificación

El cráter de Pantasma es la única estructura de Centroamérica para la que se ha propuesto formalmente un origen de impacto (Earth Impact Database, 2018). Nicaragua sería el primer país centroamericano con un cráter de Impacto meteórico. que por su predominante morfología puede ser observable con imágenes satelitales.

El determinar el origen de Pantasma es de un gran interés por parte de la comunidad científica, pero también para la opinión pública en general. Por lo tanto, la geología de Pantasma representa un potencial de aprendizaje en todos los niveles pedagógicos por los que estaría interesado incluso redes internacionales de investigación.

Dentro de su potencial social, Pantasma puede ser explotado como un candidato sólido a convertirse en un geoparque. Esto es debido a que se le consideraría como patrimonio geológico marcado como fuente sustentable económica, (González et al., 2014; UNESCO, 2020). También promoviendo el geoturismo como fuente sustentable económica y de comercialización (Panizza, 2001, p.27).

Nicaragua cuenta con un Geoparque, "Geoparque Río Coco" ubicado en Madriz (UNESCO, 2010). Una nueva iniciativa es promocionar la idea de un geoparque en Pantasma, siendo el segundo sitio de gran atractivo debido al interés geológico y geomorfológico de Nicaragua, por tener las tres principales metas expuestas por UNESCO, (2010) que incluyen: conservación y mantenimiento de un ambiente más sustentable, promoción de la educación en Ciencias de la Tierra y promoción del desarrollo económico sustentable a nivel local.

1.5. Objetivos

1.5.1. General

Determinar la firma magnética del cráter de Pantasma con el fin de evaluar la causa de su formación.

1.5.2. Específicos

Obtener las variaciones en la intensidad del campo magnético, para detección de contrastes litológicos que conforma el cráter.

Generar modelos conceptuales a escala de perfil, que permita inferir la tendencia del campo magnético con las unidades litológicas.

Relacionar la tendencia magnética del cráter de Pantasma indicando los dominios significativos asociados a su génesis.

CAPÍTULO II

2.1. Marco referencial

2.1.1. Antecedentes

Las investigaciones realizadas en la región del cráter de Pantasma y alrededores explican los dos caminos asociados a la formación de la estructura, y son descritos a continuación:

Hodgson, G. (2000) llevó a cabo un estudio geológico regional de Nicaragua en las que caracteriza las distintas formaciones geológicas divididas en Grupos principales Coyol y Matagalpa. Generalmente estas formaciones se presentan en estructuras volcánicas que son las siguientes: caldera Santa lucía, valle de Guacalí de Yalí del pueblo de Jinotega, compuestas de rocas del grupo coyol, otras estructuras como Ciguatope, San Jacinto y Caldera Las Lajas pertenecientes al Pleistoceno-Holoceno. Los geólogos del SGS en colaboración con Hodgson en 1985 emplearon un conjunto de rocas volcánicas en que se determinó existencias de cambios litológicos y centros de erupciones pertenecientes al grupo Matagalpa como las calderas la Bujona y El Tempisque.

Además, determina las edades correspondientes a dataciones radiométricas, el Grupo Coyol entre 3-30 millones de años y Grupo Matagalpa con 25.5 a 52 millones de años según la SGS y centros volcánicos del grupo Matagalpa.

Kowald L. (2006), un matemático alemán sugiere que el cráter de Pantasma es un cráter de meteorito basado en las imágenes satelitales de Google Earth y en una visita aérea que había realizado en Nicaragua en esas fechas. A pesar de su insistencia de estudiar el cráter en más detalle, los geólogos locales sugirieron que el origen del cráter es volcánico.

Hoffman et al., (2013) reportaron el hallazgo de dos tectitas encontradas en Belice en el 2012. No se encontró el cráter que dio origen a las tectitas en las proximidades del hallazgo. La edad de las tectitas fue datada (Ar-Ar) en 820 ± 40 mil años. A través de un análisis geoquímico se comparó con un tipo de tectita de nombre Australite-Indochinite. Este trabajo es de gran importancia porque es la

primera vez que se menciona a Pantasma como un potencial como posible cráter de impacto en un medio científico serio.

Rochette et al., (2019) realizaron un exhaustivo estudio que despertó el debate sobre el origen del cráter de Pantasma. Entre los resultados obtenidos alegaron haber encontrado evidencia en el vidrio con presencia de reidita y coesita (materiales de origen meteórico). Por otro lado, se encontraron valores extraterrestres en la anomalía del isótopo ^{54}Cr en brechas polimictas. Además, estimó la edad del cráter (a través de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) en 815 ± 11 mil años, consistente con la edad de las tectitas de Belice, convirtiendo a Pantasma en el mejor candidato a ser el evento que generó dichas tectitas. Realizaron modelación numérica de erosión y compararon con dos estructuras: el cráter Bosumtwi de Ghana, datado en 1.07 millones de años y la caldera de Las Lajas, Boaco, Nicaragua, de evidente origen volcánico, datado en 4.9 millones de años. Los modelos numéricos indican que el cráter de Pantasma no solo es morfológicamente más similar al cráter de Bosumtwi, pero además la datación por erosión indica una edad similar a la obtenida con $^{40}\text{Ar}^*$, alrededor de 800 mil años.

Bravo, A. (2020) caracterizo la estructura de Pantasma como caldera volcánica con criterios cartográficos, aunque no tuvo resultados objetivos para desaprobar la hipótesis del impacto. Definieron 6 unidades litológicas y estructuras superficiales aledañas, brindando información necesaria para el reconocimiento de dicho sector.

Masotta et al., (2020) realizaron una nueva visita a Pantasma en mayo del 2020 en colaboración con el IGG-CIGEO, UNAN-Managua. En esta investigación las muestras de vidrio de Pantasma se compararon con otras tectitas de otras partes del mundo encontrándose que estas son del tipo Muong Nong tras un análisis 3D de tomografía de rayos X.

Rochette et al., (2021) descubren que el cráter de Pantasma es la fuente de un vidrio de impacto esparcido en Belice a 530 km de distancia. Afirmó que cráteres de impacto del pleistoceno mayores a 10 km de diámetro han generado tectitas.

2.2. Marco Geotectónico Regional

Dentro del marco geotectónico, Centroamérica está limitada por la Placa Norte Americana, separada de la Placa Caribe e al Sur por la placa Nazca. Una sorprendente característica es la cordillera volcánica cuaternaria paralela a la fosa Centroamericana que se extiende desde el volcán Tacaná al Norte de México Guatemala hasta el volcán Irazú en Costa Rica.

Nicaragua se localiza en el margen entre la placa Caribe y la placa Cocos que subduce a la placa caribe. Se distinguen por una depresión que representa el vulcanismo activo de la cadena volcánica (Frischbutter, 2002).

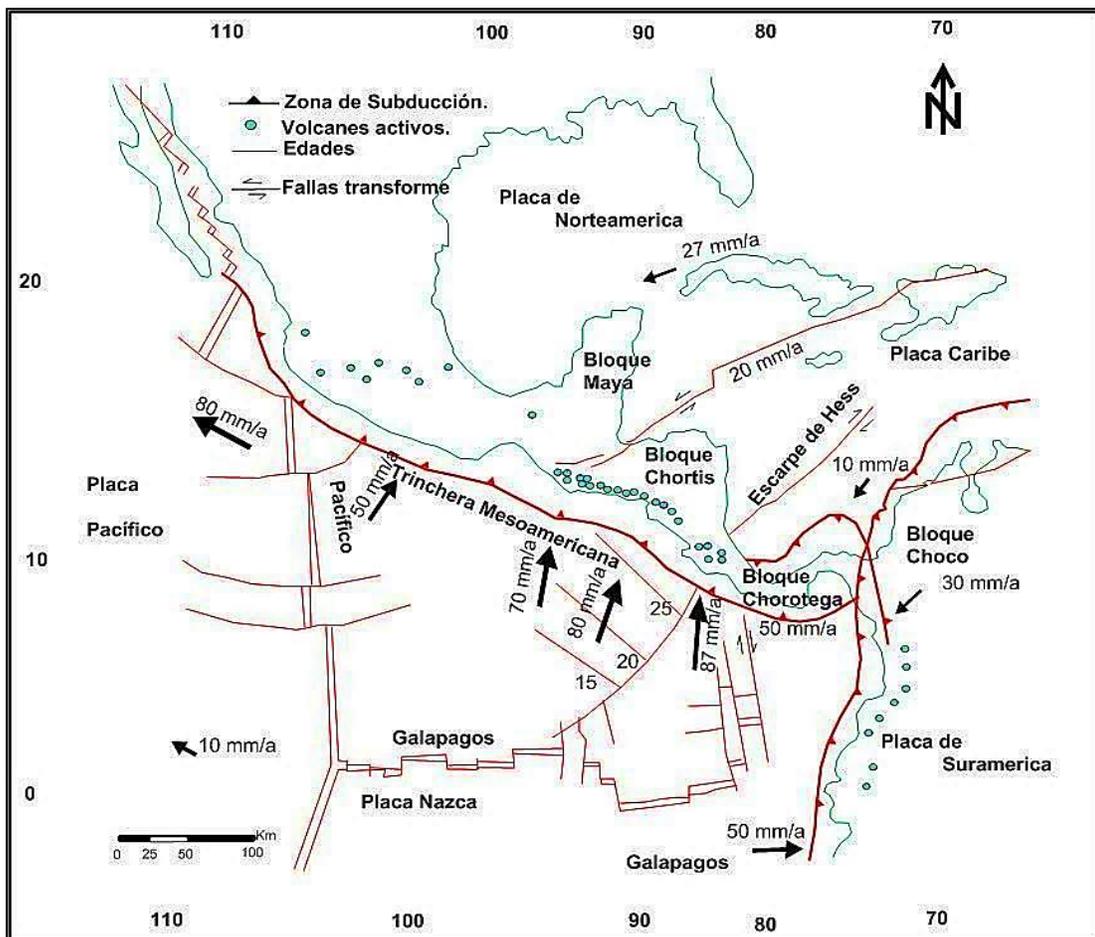


Figura 2. Mapa Geotectónico de Centro América. Modificado de Meza y Ramírez, (2017). Fuente: Frischbutter, (2001).

2.3. Geología Regional de Nicaragua

Entre los años 1976 al 2002 la descripción de la Geología regional de Nicaragua fue dividida en 5 provincias geológicas diferenciadas por su geomorfología y estratigrafía (Hodgson, 2000). Esta división geológica se describe a continuación:

- a) *Provincia Geológica de las planicies de la costa del Pacífico:* Se depositaron grandes espesores de rocas sedimentarias de edad cretáceo al terciario superior, luego se depositó materiales volcánicos e intrusiones ígneas que dieron lugar a un nuevo ambiente geológico.
- b) *Provincia Geológica de La Depresión de Nicaragua:* Está compuesta por rocas volcánicas recientes y sedimentarias de edad Cuaternaria.
- c) *Provincia Geológica del Norte:* Caracterizada por rocas metamórficas, representadas por relieves montañosos de mayor elevación en Nicaragua.
- d) *Provincia de los Llanos de la Costa Atlántica:* Compuesta de depósitos aluvionales con predominios de rocas sedimentarias del pleistoceno.
- e) *Provincia Geológica Central de Nicaragua:* Esta área forma parte en esta investigación (**Figura 3**). Esta provincia se caracteriza en unas secuencias alternadas de rocas volcánicas posterior a una tendencia de dos grupos principales. Estas referencias están validadas por exploraciones geológicas de Hodgson en el 2000, dando lugar al léxico geológico regional de la provincia y así mismo clasificándola en dos grupos:
 - o *Grupo Matagalpa:* Predominan rocas volcanoclásticas que se extienden desde edad el Eoceno-Oligoceno hasta el Mioceno con edades 25 y 52 millones de años.
 - o *Grupo Coyol:* Predominan rocas basálticas, andesíticas y riolíticas con tobas del Pleistoceno-Holoceno en las edades 3 y 30 millones de años. Añadiendo la unidad aluvional Cuaternaria que bordea parte del Río de Pantasma.

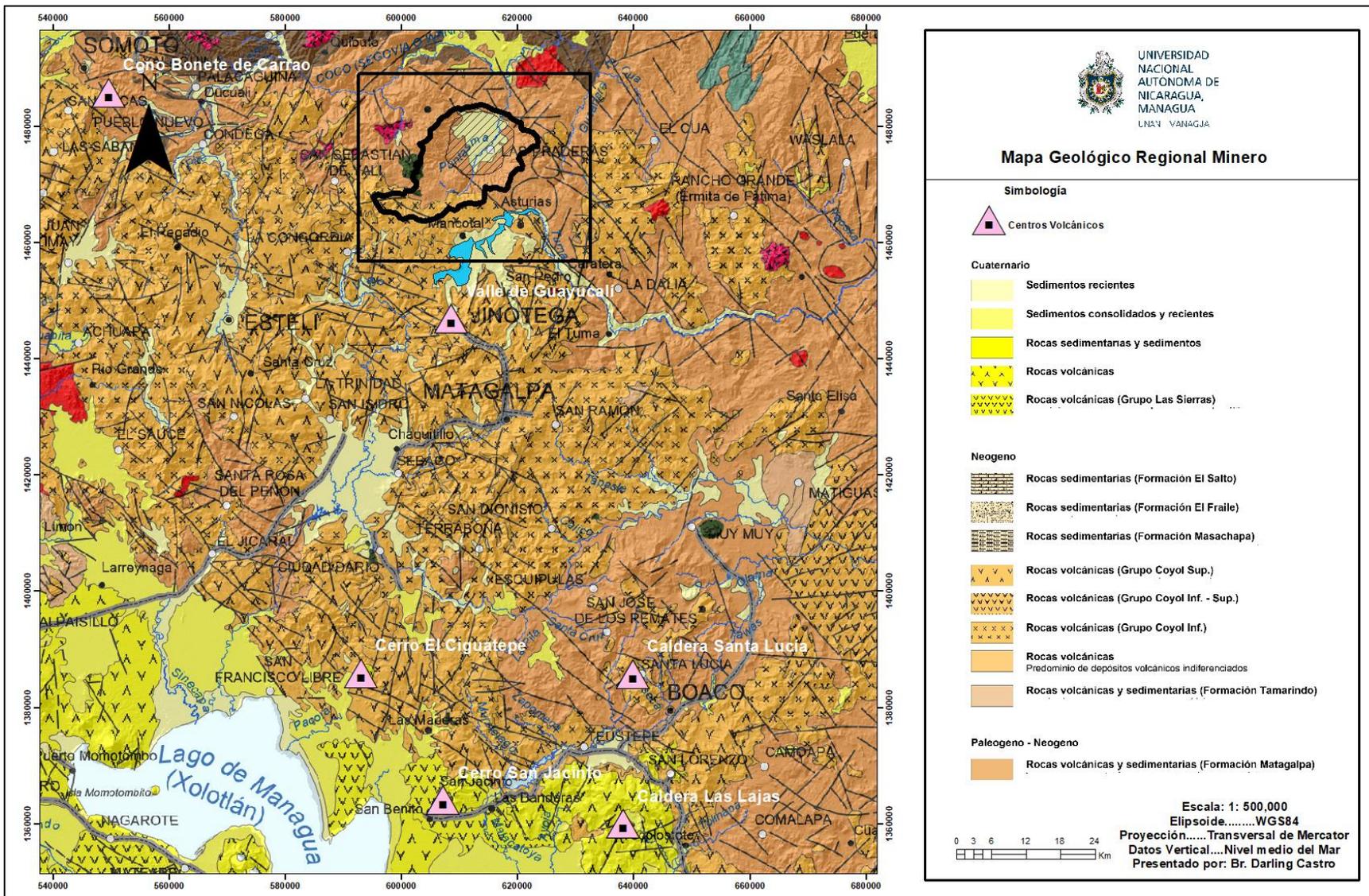


Figura 3. Mapa Geológico Regional Minero. Fuente: INETER, (1995).

2.4. Geología local

Un estudio Geológico desarrollado en el cráter de Pantasma por los autores Bravo (2020), acompañado del investigador Pierre Rochette, lograron identificar 6 unidades litológicas (**Ver Figura 4**), las principales que afloran en el área del Cráter de Pantasma:

- a) *Unidad de Rocas metamórficas (PTm)*: Se localiza en el sector NE y NO de la zona de estudio. Caracterizada por rocas metamórficas, esquistos, esquistos grafitosos y cuarcitas del Paleozoico.
- b) *Unidad andesítica (Tomms, a)*: Se encuentra en los bordes del escarpe del cráter, al NO de “El Corozal” hasta la comunidad “Los limones”. Caracterizada por grandes afloramientos y se encuentra sobre yaciendo la unidad de Brecha y aglomerados.
- c) *Unidad brecha aglomerado (Tomms, l)*: Esta unidad aflora en el sector Norte y central del cráter de Pantasma. Se describe por brechas aglomeráticas, con intercalaciones cenizas rojizas bien estratificadas.
- d) *Unidad ignimbritas (Tomms, M)*: Se ubica al SE y SO en las comunidades El Pacayal y El patastillal, se representa como una unidad de color rosa, ignimbritas (flammas y clastos de distinta morfología y composición).
- e) *Unidad riolítica (Tpci)*: Se localiza al SO de El Patastillal y NE de la comunidad Flor de Pino y está compuesta por rocas meteorizadas de tonalidad marrón, expuesta de manera antrópica.
- f) *Unidad Cuaternario aluvional (Qal)*: Se encuentra a lo largo del río Pantasma y en quebradas aledañas, constituida por depósitos aluvionales de espesor 10-30 m acompañado de materiales como gravas, arenas, arcillas y grandes bloques, arrastrados por el río mismo. También se encontraron fragmentos andesíticos, basálticos y brechas volcánicas conformadas por rellenos carbonatados de calcio y vidrio volcánico.

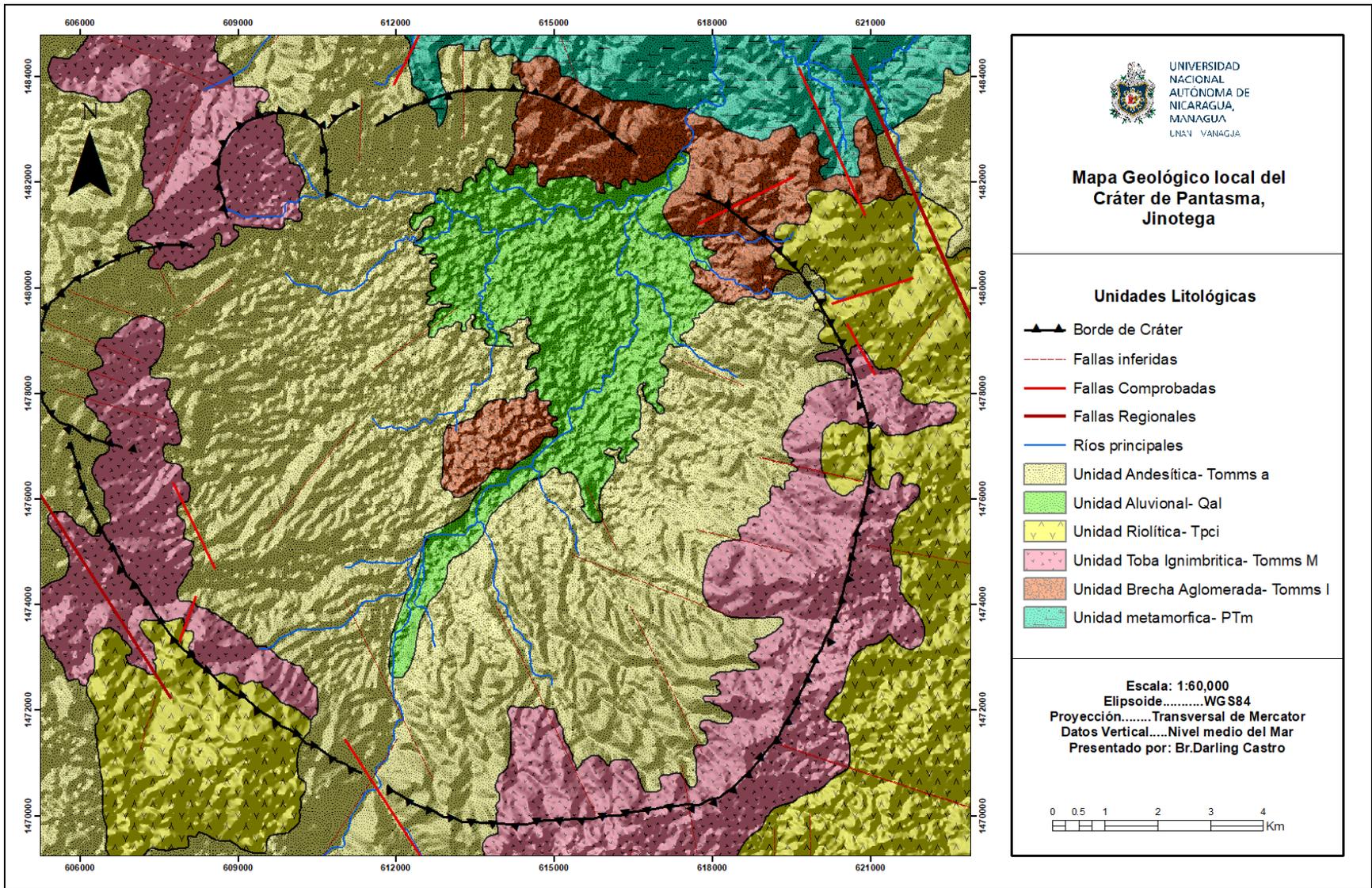


Figura 4. Mapa Geológico local del Cráter de Pantasma. Fuente: Bravo, (2019).

2.5. Marco Teórico

2.5.1. Parámetros morfológicos de un cráter de impacto

El estudio de los cráteres de impacto de meteoritos ha formado parte del proceso Geológico de nuestro planeta Tierra. Cuando estos objetos solidos impactan sobre la superficie terrestre, dejan huellas permitiendo el origen de grandes estructuras geológicas (Dence, 1972).

Los catálogos semioficiales de la distribución global de los cráteres de impacto descubiertos se pueden encontrar en Internet, de la base EarthImpactDatabase, como los mantenidos por la Universidad de New Brunswick (que administra la antigua base de datos del Servicio Geológico de Canadá) y el Proyecto de Estudios de Impacto Global (GISP).

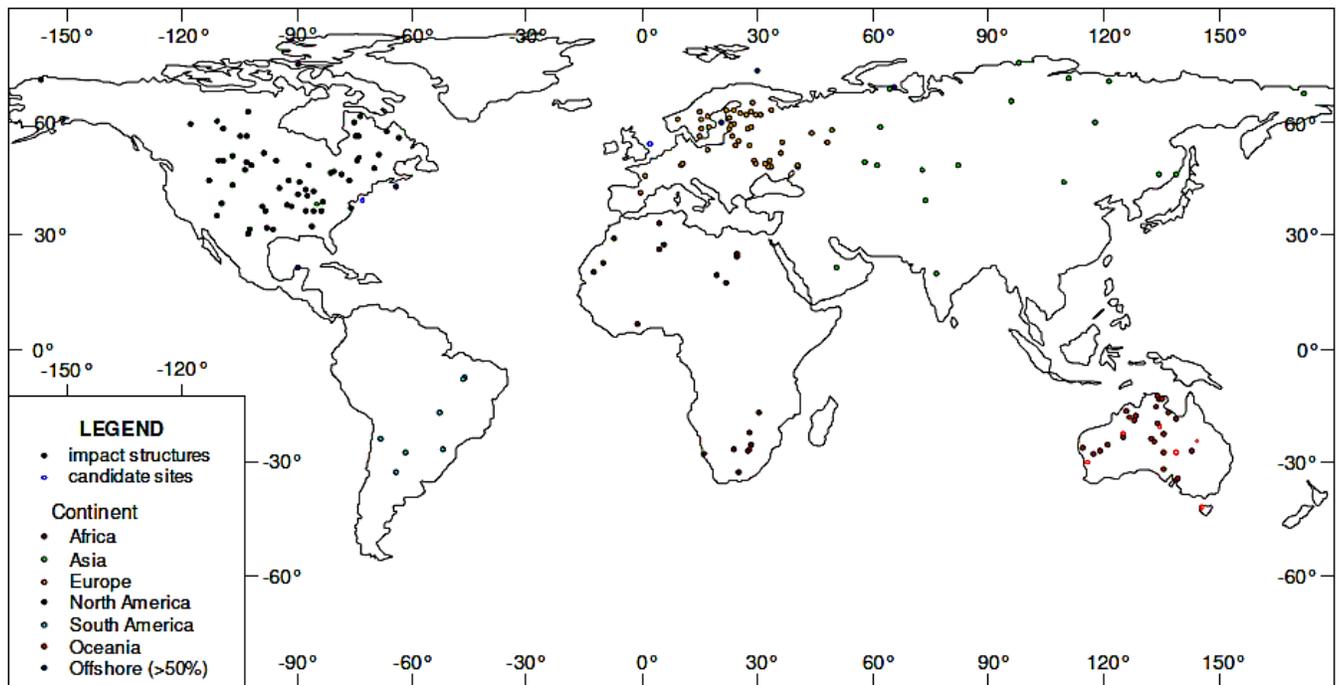


Figura 5. Distribución geográfica de los cráteres conocidos. Fuente: (Grieve, 2001).

En el proceso de impacto es notable la presencia de materiales, la más reconocida son las “Tectitas” una de las evidencias encontradas a cientos de kilómetros fuera del cráter. El descubrimiento proporcionó la aceptación general para el reconocimiento de estructuras por impacto (Dence, 1972). Estos materiales se encuentran en zonas de presión decreciente por el metamorfismo y conforme los años pueden permanecer en su mismo estado.

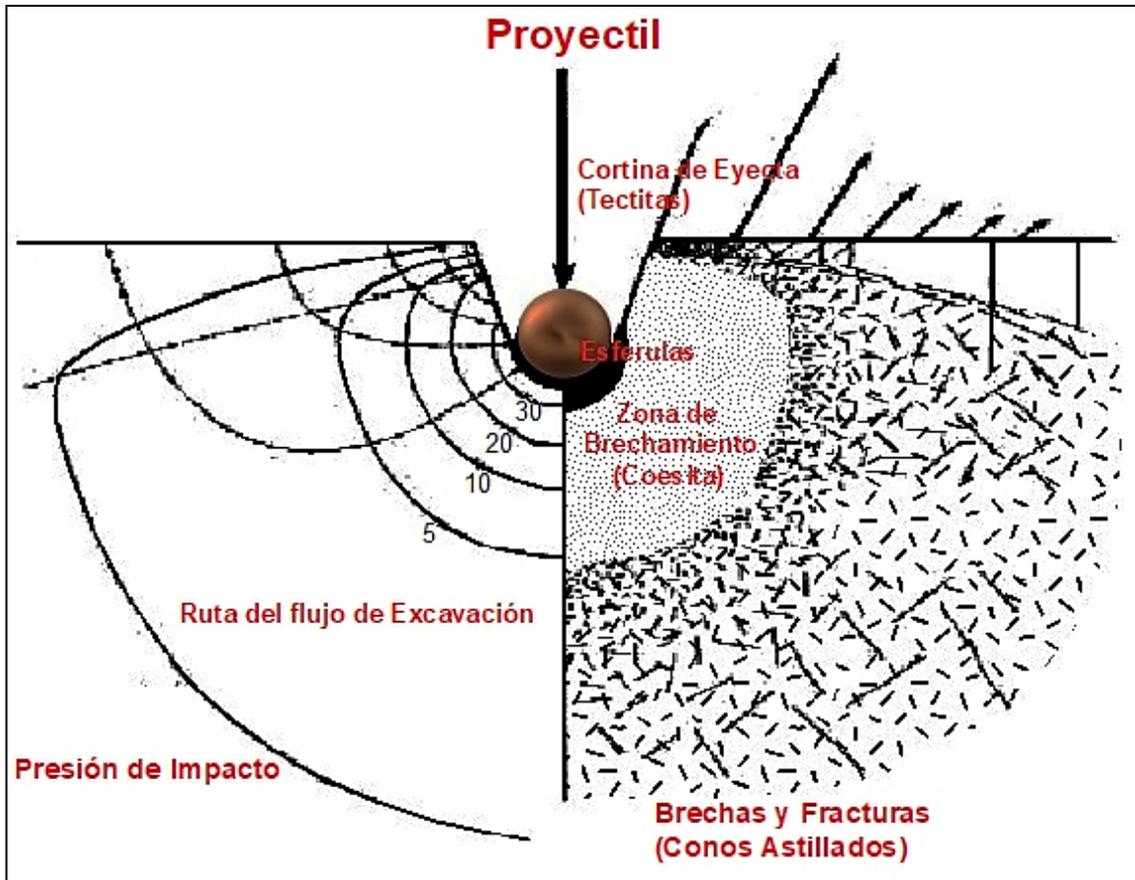


Figura 6. Proceso de impacto meteorítico. La ilustración muestra la caída de las presiones máximas frente a la onda de choque. Fuente: French, (1998).

De acuerdo al esquema anterior, French, (1998) y Melosh, (1989) describen las etapas del proceso de impacto:

- a) *Etapas de contacto - compresión:* La llegada del proyectil viaja a velocidades entre 30-200 km/h hace contacto con el objetivo impactado (superficie) logrando una onda de choque.
- b) *Final de etapa de contacto- compresión:* La onda de choque empuja el material y gran parte es expulsado (eyecta), el material que es comprimido termina fracturándose y generando brechamiento muy intenso de la zona de contacto.
- c) *Etapas de excavación:* Durante el proceso de compresión y expansión de la onda de choque se forma una cavidad de carácter semiesférico, y se funde la roca por la energía del impacto.
- d) *Final de etapa de excavación:* Cuando la cavidad llega a su máximo tamaño, la presión que ha generado deja de cesar y colapsa por efecto de la gravedad (cráter transitorio) y se deposita por el material fundido.
- e) *Etapas de modificación:* Una vez rellenada la cavidad, formando terrazas, elevaciones del piso del cráter y mayormente un levantamiento central.
- f) *Cráter final:* El resultado final es un depósito de mezcla de brechas (impactitas) y roca fundida de impacto dentro del cráter.

Una vez terminado el proceso de impacto, estarán expuestas al viento, lluvia, erupciones volcánicas, tectonismo, estos procesos actúan lentamente, haciendo cambiar su apariencia original, por lo que resultan un poco difícil de identificar estas estructuras (Chao, 1968, Osinski y Lee, 2001). Muchos de estos cráteres están localizados en ambientes volcánicos, océanos también justamente en medio de ciudades (French, 1998).

Sin embargo, los científicos han identificado numerosos cráteres en la Tierra. Considerando dos tipologías: cráteres simples y complejos. Según Grieve, (1987) caracteriza a las estructuras de impacto simples (**Figura 7**) y complejas (Figura 8) desde la distribución litológica y estructural.

- **Cráteres Simples.** Se caracterizan por tener un cuenco, a las orillas y fuera de los bordes elevados se forman depósitos de eyecta, también el derrumbamiento de las paredes. Este tipo de cráter es común en tamaños inferiores.

Las rocas objetivo se denominan “verdadero piso del cráter”. Estas rocas encuentran fracturadas y muestran niveles de magnetización disminuidos a profundidades muy por debajo del suelo del cráter, lo que sugiere que la onda de choque que se propagó es la causa de este proceso (Scott et al., 1995).

En la **Figura 7**, se observa un cráter que está sustentado por una capa de material que ha caído de las empinadas paredes superiores de la cavidad (Brecha suevítica) material localizado en el centro del cráter, es el punto donde se espera las presiones de choque más altas del evento, además del material proyectado hacia arriba por explosión del impacto (Capa de eyecta).

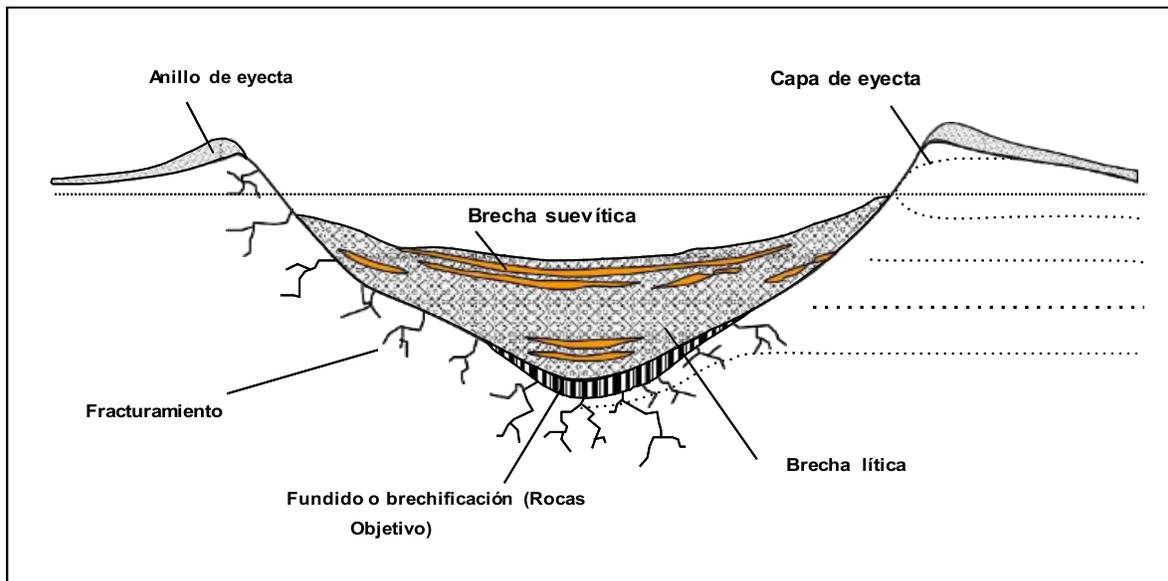


Figura 7. Sección esquemática de un Cráter de impacto Simple. Fuente: Grieve, (1987).

- **Cráteres complejos:** A diferencia de los cráteres simples, **(Figura 8)** estos son caracterizados por un levantamiento central elevado en el centro de la estructura, debido a su tamaño no soportan una forma de cráter simple y se colapsa bajo la gravedad para producir fallamiento.

Cabe señalar que, las rocas objetivo (vertedero del piso del cráter) se pueden identificar muy arriba del cráter complejo a diferencia de los cráteres simples. Entre la estructura central y el borde existen varios materiales formados por el impacto, rocas fundidas, brechas y materiales colisionados

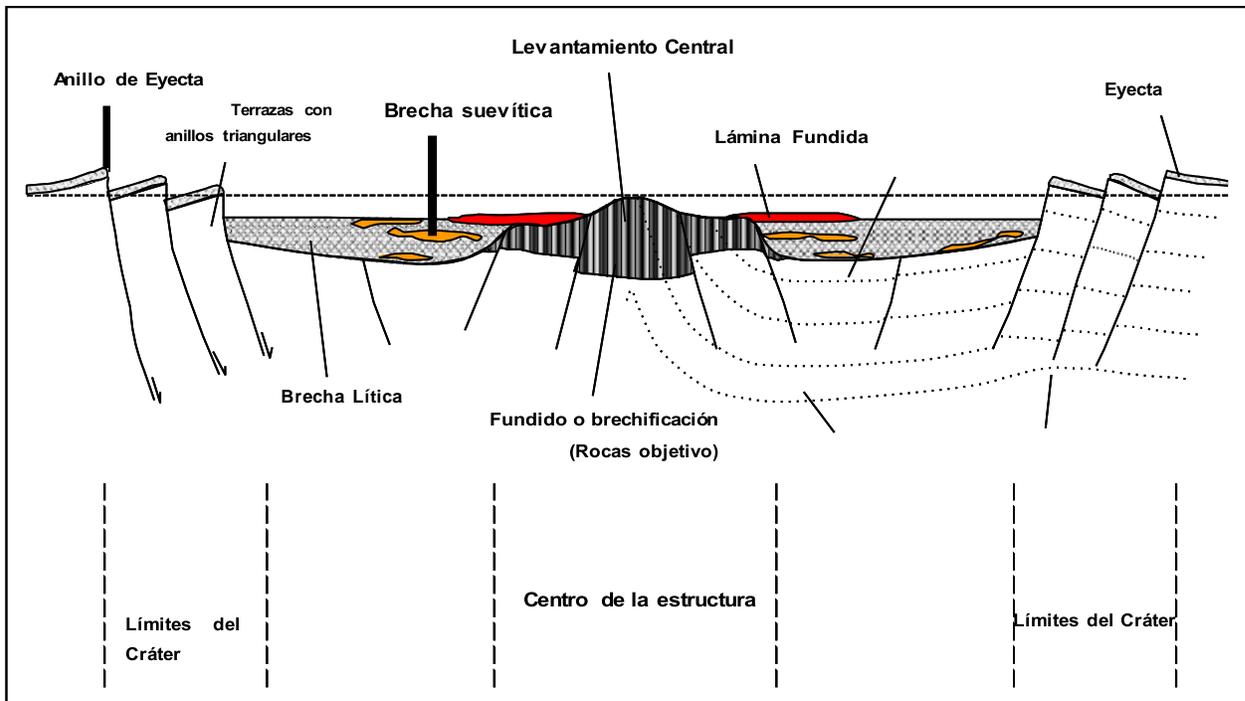


Figura 8. Sección esquemática de un Cráter de impacto Complejo. Fuente: Grieve, (1987).

2.5.2. La Geofísica en el descubrimiento de estructuras por impacto.

2.5.2.1. Concepto de firma geofísica

La geofísica es considerada como el uso de métodos fundamentales en el descubrimiento y la investigación de estructuras geológicas a pequeña y gran escala, desde sus propiedades físicas de las componentes individuales del suelo y la forma en que se distribuyen distintivamente (Romero, 2019).

El mismo autor refiere cómo estos métodos han proporcionado la obtención de una “firma geofísica típica” para cualquier estructura geológica, en respuesta al conjunto de elementos litológicos y estructurales que la conforman y está estrechamente relacionado al origen de la misma.

Si bien las estructuras volcánicas semejantes a las de impacto meteórico, tienen una firma Geofísica incomparable, según como señala Pilkington y Grieve (1992), Henkel (1992) y Grieve y Pilkington, (1996), así mismo se han centrado en las firmas geofísicas relacionadas al origen de cráteres de impacto no documentados.

En esta sección se describe las respuestas geofísicas esperadas sobre estructuras de impacto. Los casos de estudios describen las firmas típicas desde las diversas técnicas geofísicas empleadas para determinar los criterios estructurales como el “*Peak Ring*” o “*levantamiento central*” que se atribuye a una anomalía central en el cráter. Pilkington y Grieve (1992) plantean las siguientes respuestas geofísicas:

- a) *Firma Eléctrica*: La firma geofísica se debe al aumento de la conductividad en el centro de la estructura debido a la fracturación de las rocas, las cuales aumentan la porosidad y permeabilidad (Pesonen et al., 1998).
- b) *Firma Electromagnética (GPR)*: La firma geofísica son anomalías asociadas a material de eyección preservadas (Pesonen et al., 1998).

c) *Firma Sísmica*: La firma geofísica se debe a anomalías asociadas a reflectores que se superponen debido al levantamiento central. (Boernen et al.,2000).

d) *Firma de Gravedad*: La firma geofísica consiste en una respuesta de gravedad negativa más común. Y se puede observar en el centro de la estructura debido al levantamiento central de baja densidad. (Pilkington et al., 1994, Blakely, 1996; Grieve, 1996).

e) *Firma Magnética*: La firma geofísica consiste en una respuesta magnética de alta amplitud en el centro del cráter, indicando una fuente magnética poco profunda, estas anomalías pueden ser positivas y comunmente negativas. Esto es debido al efecto dominante de magnetización en las rocas (Grieve, 1996, Pilkington et al., 1994).

2.5.2.2. Firma magnética típica de cráter de impacto

En la **Figura 8** se muestra un caso típico de firma magnética de un cráter de impacto llamado *Mjølnir* situado en Barents. La firma comúnmente reside en una anomalía magnética central (**Figura 9**) se extiende desde los bordes del cráter, con un levantamiento central llamado en la literatura “Peak Ring” asociado a una elevación en el centro como producto de fusión de las brechas suevíticas (Henkel, 1992; Pilkington y Grieve, 1992, Arellano, 2017).

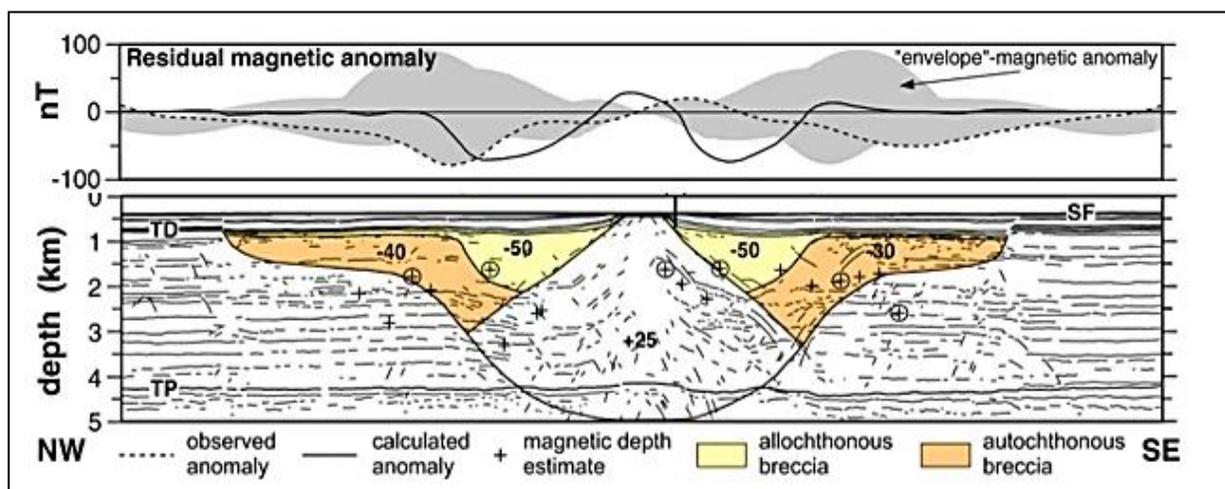


Figura 9. Firma Magnética de un Cráter de impacto. Fuente: Pilkington y Grieve, (1992).

Si comparamos con otras estructuras similares, las firmas geofísicas de las calderas volcánicas se asocian a un cuerpo intrusivo subterráneo muy grande, generalmente es una anomalía positiva de gran amplitud (**Figura 10**). La anomalía está relacionada por la composición de brechas de colapso e intrusiones basálticas en toda la región de la estructura (Lindner, et al., 2006).

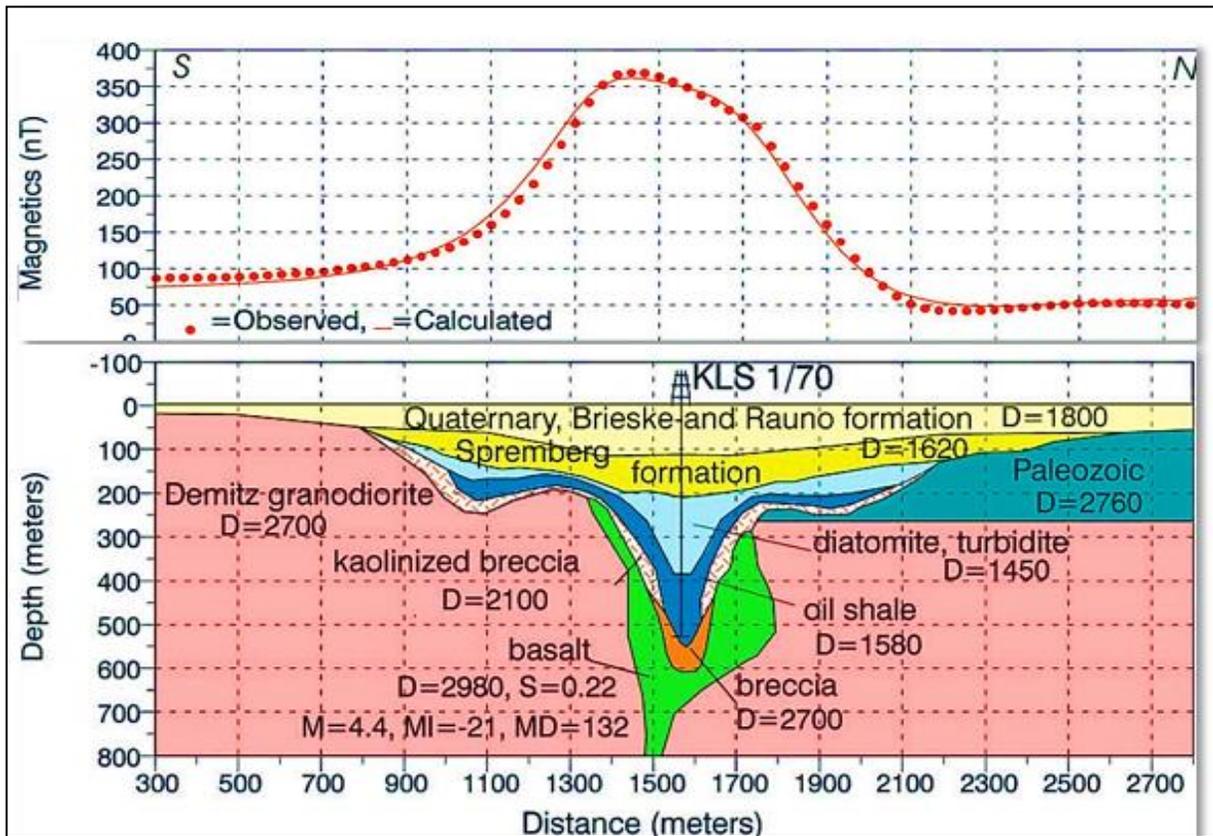


Figura 10. Firma Magnética de una caldera volcánica. Fuente: Lindner, (2006).

2.5.3. Magnetometría

El método magnético busca anomalías causadas por el cambio de las propiedades magnéticas de las rocas infiriendo la geología de subsuelo. Siendo las rocas ígneas y metamórficas las que presentan efectos magnéticos por el contenido ferromagnético (Nabighian et al., 2005).

Los levantamientos magnetométricos consisten en realizar mediciones del campo magnético con instrumentos llamados *magnetómetros* sobre la superficie terrestre a lo largo de una línea denominada perfil.

El campo magnético registrado se debe a:

- a) *Campo Interno*: Se genera desde el interior de la tierra a su vez se divide en dos: Campo Magnético debido a la corteza y al Núcleo (Telford et al.,1990).
- b) *Campo externo*: Se produce principalmente por el flujo de partículas cargadas eléctricamente a lo largo de la ionosfera e interacciona con el campo interno y el viento solar.

El campo magnético externo presenta variaciones considerables a lo largo del tiempo entre las cuales la más importante es la variación diurna δf (Telford et al., 1990).

- c) *Variación diurna*: Se produce entre el día y la noche en función del tiempo, y este ligado a perturbaciones solares y la influencia del viento solar.

Estas variaciones pueden ser corregidas con el uso de una estación base. En ese caso el campo es registrado simultáneamente por dos magnetómetros: un magnetómetro “base” y un magnetómetro móvil. El magnetómetro base se deja fijo para conocer las fluctuaciones del campo en un punto cercano al área de estudio.

Para la corrección requerida se calcula la diferencia entre valores medidos (ver manual magnetómetro Overhauser, p,70) representados a continuación:

$$\Delta_{CornT} = F_{nT} - F_{base} + datum \quad (1)$$

Dónde:

F_{nT}: Campo magnético del magnetómetro móvil (rover).

F_{base}: Variación de tendencia del campo magnético en función del tiempo obtenido de la base.

datum: Valor de referencia en un punto de la base magnética.

Aún es necesario eliminar el efecto del campo magnético interno debido al núcleo. Lowrie, (2007) define como un modelo matemático que se refleja o muestra el valor del campo magnético F_{IGRF} campo interno que se extiende desde el núcleo. Este modelo también llamado campo geomagnético Internacional de Referencia (IGRF) por sus siglas en inglés, permite eliminar el efecto antes mencionado para obtener las anomalías de interés, conocidas como Anomalías de Campo Total.

Para ellos se aplica lo siguiente:

$$A_{nT} = \Delta_{CornT} - IGRF \quad (2)$$

Dónde:

A_{nT}: Es la anomalía total.

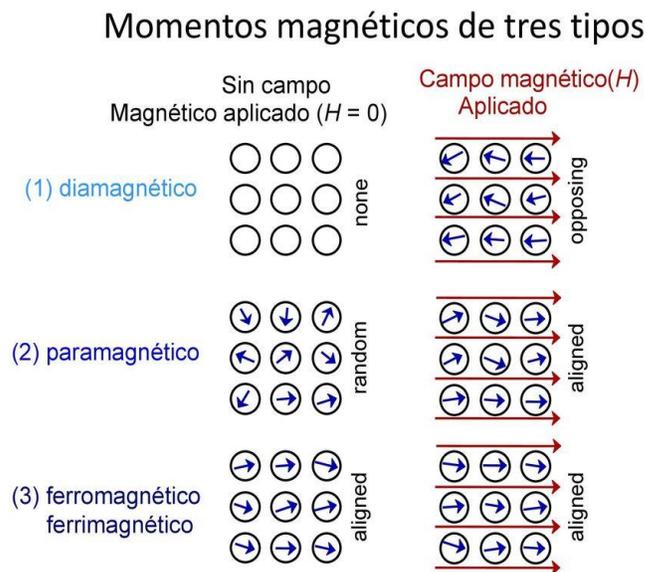
2.5.3.1. Propiedades Magnéticas de los materiales

Las características magnéticas de las rocas de la corteza terrestre están definidas por las propiedades físicas de sus minerales constituyentes. La imanación de las rocas se debe en parte a la inducción de un campo que depende de cuan susceptible sea el material.

Los materiales son capaces de adquirir magnetización remanente natural, es el caso del metamorfismo en las rocas. También dependen de la interacción magnética entre minerales adyacentes (Argote, 2008).

Es por eso que las medidas de intensidad magnética dependen de cuan es el grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético (Kearey, 2002), es decir las rocas básicas y ultra básicas tienen altas susceptibilidades, las rocas ígneas ácidas tienen valores intermedios, las rocas metamórficas tienen una susceptibilidad intermedia y rocas sedimentarias son relativamente no magnéticas.

Tomando en cuenta lo anterior, sabemos que los materiales tienen propiedades magnéticas como consecuencia de los momentos magnéticos que poseen los electrones y al aplicarle un campo magnético se comportan de la siguiente manera:



8

Figura 11. Momentos Magnéticos. Fuente: Kearey, (2002).

- a) *Diamagnéticos*: La susceptibilidad es débil pero negativa. Se debe a que el momento magnético es muy pequeño y tiene dirección opuesta al campo.
- b) *Paramagnéticos*: La susceptibilidad es débil pero positiva. En presencia del campo aplicado estos momentos magnéticos pueden girar y alinearse con el campo.
- c) *Ferromagnéticos*: Tienen susceptibilidades altas. Los momentos magnéticos se deben al espín de los electrones no cancelados.

2.6. Hipótesis

La firma magnética del cráter de Pantasma está asociada con la de una estructura producida por impacto meteórico.

CAPÍTULO III

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Tipo de estudio

La investigación es de tipo mixta y tiene como enfoque investigativo lo siguiente:

- Enfoque Cuantitativo porque usa la recolección de los datos para probar la hipótesis con respecto a la medición numérica y el análisis estadístico, para evaluar patrones de comportamiento y teorías.
- Enfoque Cualitativo porque usa descripción de las cualidades de la hipótesis y condición del planteamiento del problema.

3.1.2. Área de estudio

Por lo Institucional/Organizacional (Líneas de investigación UNAN-Managua):

- El área de conocimiento responde al Área 3 Ciencias Naturales y Exactas (CNE), aprobado por el consejo Universitario, en sesión 14-2021, del 09 de julio de 2021.
- Línea de investigación CNE-3: Aplicaciones de las ciencias exactas; y como sub línea CNE-3.2: Física aplicada.

3.1.3. Universo y Muestra

- El universo corresponde al conjunto de cráteres de impacto y calderas volcánicas.
- La muestra corresponde al cráter de Pantasma.

3.1.4. Variables y Operacionalización de variables

La matriz de Operacionalización de variables (MOVI) es la siguiente:

Objetivos Específicos	Obtener las variaciones en la intensidad del campo magnético, para detección de contrastes litológicos que conforma el cráter.	Generar modelos conceptuales a escala de perfil, que permita inferir un valor de intensidad magnética con una unidad litológica.	Relacionar la tendencia magnética del cráter de Pantasma indicando los dominios significativos asociado a su génesis.
Denominación	Intensidad de Campo Magnético	Fuentes anómalas	Tendencia magnética
Tipo	Independiente	Dependiente	Dependiente
Naturaleza	Cuantitativa	Cuantitativa	Cuantitativa
Medición	Intervalo	Intervalo	Intervalo
Indicador	Contrastes litológicos	Valor de intensidad magnética con una unidad litológica.	Firma Magnética
Unidad de Medida	nT	nT	nT
Instrumento	-Magnetómetro Protónico -Magnetómetro Overhauser	Softwares especializados	Softwares especializados
Dimensión	Geográfica	Geográfica	Geográfica
Definición Conceptual	Variaciones del campo magnético total producido por cambios en la distribución de las rocas del subsuelo.	Interpretación geológica de la zona específica en que la variación más intensa puede tener valor máxima o mínima de acuerdo a la litología.	Característica geofísica de las anomalías comunes en estructuras geológicas.

3.1.5. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos e información

3.1.5.1. Métodos e instrumentos de recolección de datos

a) Trabajo de gabinete

La recopilación de información fue necesaria en centros de documentación como INETER, Biblioteca central de la universidad Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua), CEDOC del departamento de Física y IGG CIGEO, así mismo compilando en sitios web, revistas y artículos científicos.

En esta etapa se recopiló:

- Mapas topográficos y geológicos (Regionales y locales).
- Imágenes Satelitales.
- Revisión bibliográfica de la Geología y Geomorfología de la región de Pantasma.

b) Componentes estándar del sistema de instrumentación

La obtención de los datos magnetométricos se adquieren con instrumentos sensibles llamados “magnetómetros”, el cual fue necesario utilizar dos modelos de la compañía Gemsystems, Inc Canadá, ensamblado por dos sensores de tipo Overhauser y Protónico que consta de las siguientes propiedades:

Magnetómetro de Protones/Gradiómetro Versátil	Magnetómetro Overhauser/Gradiómetro Robusto
Tipo de sensor: Sensibilidad: 0,022 nT	Tipo de sensor: Sensibilidad: 0,022 nT
Resolución: 0,01 nT Solución de protones	Resolución: 0,01 nT Solución de protones y iones paramagnéticos
Temperatura de funcionamiento: -40 ⁰ C a 50 ⁰ C	Temperatura de funcionamiento: -40 ⁰ C a 50 ⁰ C
Peso consola: 2,1 kg Peso Sensor y Opcionales del Operador: 2,2 kg	Peso consola: 2,1 kg Peso Sensor y Opcionales del Operador: 2,2 kg

Ambas unidades permiten medir el campo magnético usando los dos sensores sincronizados con el tiempo, permitiendo almacenar la información de toma de lectura. La posición del magnetómetro que se utiliza de modo móvil, puede ser llevado sobre soporte, una mochila o un tubo alejados de la consola entre 2-4 metros de altura.

Es necesario que el operador no cargue elementos n magnetic

es por la necesidad del operador de cargar elementos no magnéticos como los descritos en el **Acápite 3.1.5.2.**

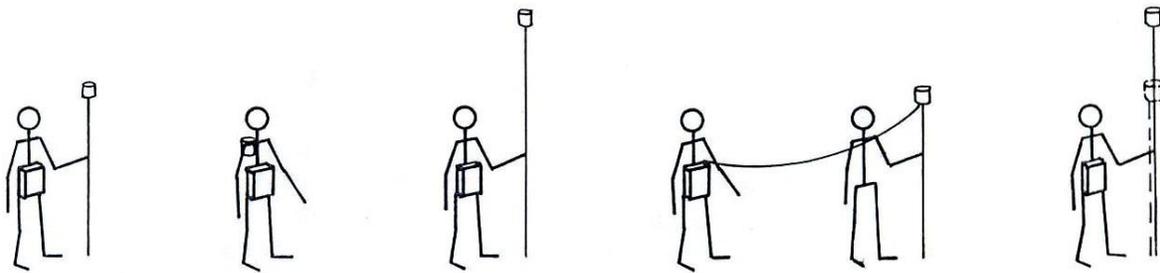


Figura 12. . Posición del sensor. Fuente: info@gemsys.ca



Figura 13. . Instrumentación Magnetométrica. Fuente: info@gemsys.ca

3.1.5.2. Métodos y procedimientos de recolección de datos

c) Trabajo de campo

Al existir los dos magnetómetros mencionados en el inciso b), se planificó dos campañas:

La primera consiste en un mapeo a escala local sobre la planicie del valle, con separaciones entre puntos de 100 m y 3-5 medidas por puntos, incluyendo un perfil con dirección N-S a lo largo del Río Pantasma con el propósito de identificar una señal anómala en el centro de la estructura de Pantasma.

Posterior a la obtención de estos datos magnetométricos, se procedió a ampliar el área de estudio con un mapeo a escala regional con separaciones de puntos de 500 m y 3-5 medidas por puntos, proyectando un perfil aproximándose a la misma dirección N-S para reanudar señales anómalas por los bordes y centro de la estructura de Pantasma.

Para ambos procedimientos se implementó una base aleatoria (modo de estación base) en ella se instaló el magnetómetro protónico que toma lecturas cada 2 segundos continuamente a lo largo del día. Este debe sincronizarse con el magnetómetro de tipo Overhauser (modo móvil que significa caminar o andante), permitiendo la adquisición de datos con sistemas de perfiles.



Figura 14. Campaña Magnetométrica 2019: A) Estación Base Magnética (2019), B) Modo Rover (Caminante).



Figura 15. Campaña Magnetométrica 2021. A) Posición Magnética en el Centro del Cráter. B) Posición de amarre con la Base 2019. C) Posición Magnética en cambios litológicos.

Nota: Para realizar correcciones diurnas, la hora del móvil y la base también deben estar sincronizadas. Si uno de los magnetómetros deja de funcionar, usar la metodología de puntos de amarre (Leer **Acápite 4.1.1**). Antes de realizar medidas, no se debe portar objetos metálicos cerca de los magnetómetros, mantenerse alejados de cables de alta tensión

Los magnetómetros de GEM Systems generan valores medidos reales sin filtrado adicional, promediado o manipulación de señal de ningún tipo.

3.1.5.2. Plan de Análisis y procedimiento de datos

Para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos se tomó en cuenta las técnicas implementadas, fue necesario el proceso Geoestadístico mediante bibliotecas o definiendo funciones propias de código abierto en el entorno de programación de R.

Además del Software ARCGIS 10.5, para modelaje espacial y digitalización de mapas Geológicos y Geofísicos.

SOTFWARE	DESARROLLADOR	APLICACIÓN
ARCGIS 10.5	ESRI	Creación de diferentes tipos de mapas (Ubicación, Geológico y Geofísico).
GEMLINK 5.4 SOFTWARE	GEMSYSTEMS	Exportar datos crudos de campo magnético.
R	R core Team (2020)	Digitalización de datos crudos, proceso matemático (Correcciones Geofísicas).
SIMPEG.XYZ	Simpeg Team (Rowan Cockett, (2015)	Modelaje directo.

CAPÍTULO VI.

4.1. Análisis y resultados

4.1.1. Adquisición y procesado de los datos

La recolección de datos registrados de las dos campañas magnéticas fue desarrollada en dos periodos: Campaña 2019 y 2021. Los detalles de las campañas se muestran en la **Tabla 1**, la obtención de los puntos medidos para toda la parte radial del cráter de Pantasma está representada en la **Figura 17**.

Tabla 1: Campañas Magnetométricas					
Campañas	Fecha inicial	Fecha final	Espaciamiento entre puntos (m)	Total de puntos	Región cubierta por el Survey
2019	02/09/2019	06/09/2019	100	222	14 km
2021	10/08/2021	12/08/2021	500	61	30 km

Tabla 1. Campañas Magnetométricas.

o *Campaña 2019*

La campaña de 2019 tuvo como objetivo, mapear la región central del cráter para determinar las características litológicas y posibles estructuras someras. En esta campaña se abordaron varios perfiles con separaciones de puntos de 100 m a lo largo de la planicie del valle de Pantasma.

El perfil de orientación N-S se extiende desde la comunidad “El Charcón” en dirección a “Zanizabu”. Esta línea de perfil atraviesa una importante unidad litológica “Brecha aglomerada” mencionada en el **Acápite 2.4**, siendo una zona de interés para el estudio ya que podría relacionarse con el “*Peak Ring*” (levantamiento central, también mencionado en el **Acápite 2.5.2.2**), una estructura central común en cráteres de impacto.

La unidad litológica Brecha Aglomerada que se localiza dentro de las coordenadas UTM:

Este (X)	Norte (Y)
613706	1477880
614954	1477444
612910	1476588
613586	1476317

Se escogió la metodología de “Estación Base”. Como instrumento de la base se utilizó el Magnetómetro Protónico. La base se encontraba cerca del Río de Pantasma sobre una zona aledaña a 300 m del pueblo. Las coordenadas de la base son: X:614058 m y Y:1476267 m. Este magnetómetro permanece midiendo periódicamente cada 3 s. Se encuentra sincronizado con el tiempo de ciclo del magnetómetro Overhauser (*Modo-Rover*). El tiempo de ciclo en estos modos representa el tiempo de espera máxima para hacer coincidir los segundos y la fracción de segundos con los de una unidad de estación base.

o *Campaña 2021*

En el 2021 se realizó una nueva campaña para llevar a cabo dos perfiles en direcciones perpendiculares uno del otro. Estos perfiles tuvieron como objetivo mapear los límites extremos del cráter de Pantasma.

El perfil N-S se extienden desde la comunidad “La Piragua” hasta culminar en “El Recuerdo”. Desde ahí se decidió adquirir más datos en el cambio litológico en esa zona, en dirección a la comunidad “El Sacramento”. Este perfil se caracteriza por tener la misma orientación a la del perfil del 2019 y pasar los límites del cráter.

El segundo perfil sigue una dirección W-E, extendido desde la comunidad “San Luis” hasta “El Venado”. Este perfil fue realizado con el fin de evaluar el comportamiento del campo magnético en esa dirección y también para corroborar con el perfil magnético N-S.

Para esta campaña es importante mencionar que el Magnetómetro Protónico estaba en mantenimiento, por lo que se utilizó únicamente la unidad “Overhauser”. La corrección diurna para una sola unidad implica el uso de una estrategia basada en “*Tie Points*” (puntos de amarre en español).

La estrategia de *Tie Points* es una metodología basada en circuitos magnetométricos en Modo Rover (Móvil). Esta estrategia intenta asegurar que haya puntos de amarre que se usen a modo de unidades base para registrar la variación diurna (**ver Acápite 4.1.2**).

Los circuitos consisten en 5 a 6 mediciones sobre la ruta, cuyo punto inicial y final son el mismo sitio tomados en un intervalo de media hora o menos según Parasnis, (1970). Este tiempo es el mínimo dentro del cual se espera que la variación diurna no muestre cambios significativos en su tendencia. El penúltimo punto del circuito será utilizado como primer punto y punto de amarre del siguiente circuito.

Las separaciones entre puntos fueron de 500 m en promedio. Se aprovecharon caminos para trazar la ruta. Cuando fue necesario se adentró 200 m sobre los terrenos para evitar interferencias de líneas de corriente. En este caso se tomaron medidas para asegurarse que el efecto de líneas de corriente fuera menor que el ruido ambiental al campo Magnético.

En la **Figura 16** representa un esquema de cómo funciona el método *Tie Point* desarrollados para la campaña 2021, donde los colores variados muestran los puntos de amarre, y los de color negro las medidas que no corresponden a puntos de amarre.

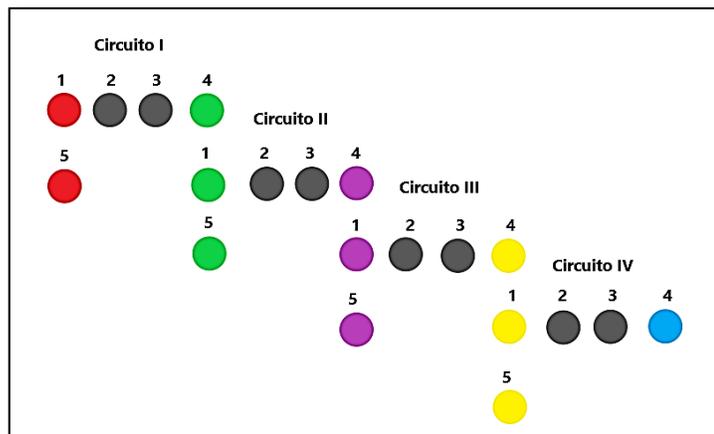


Figura 16. Esquema de Circuitos Magnetométricos.

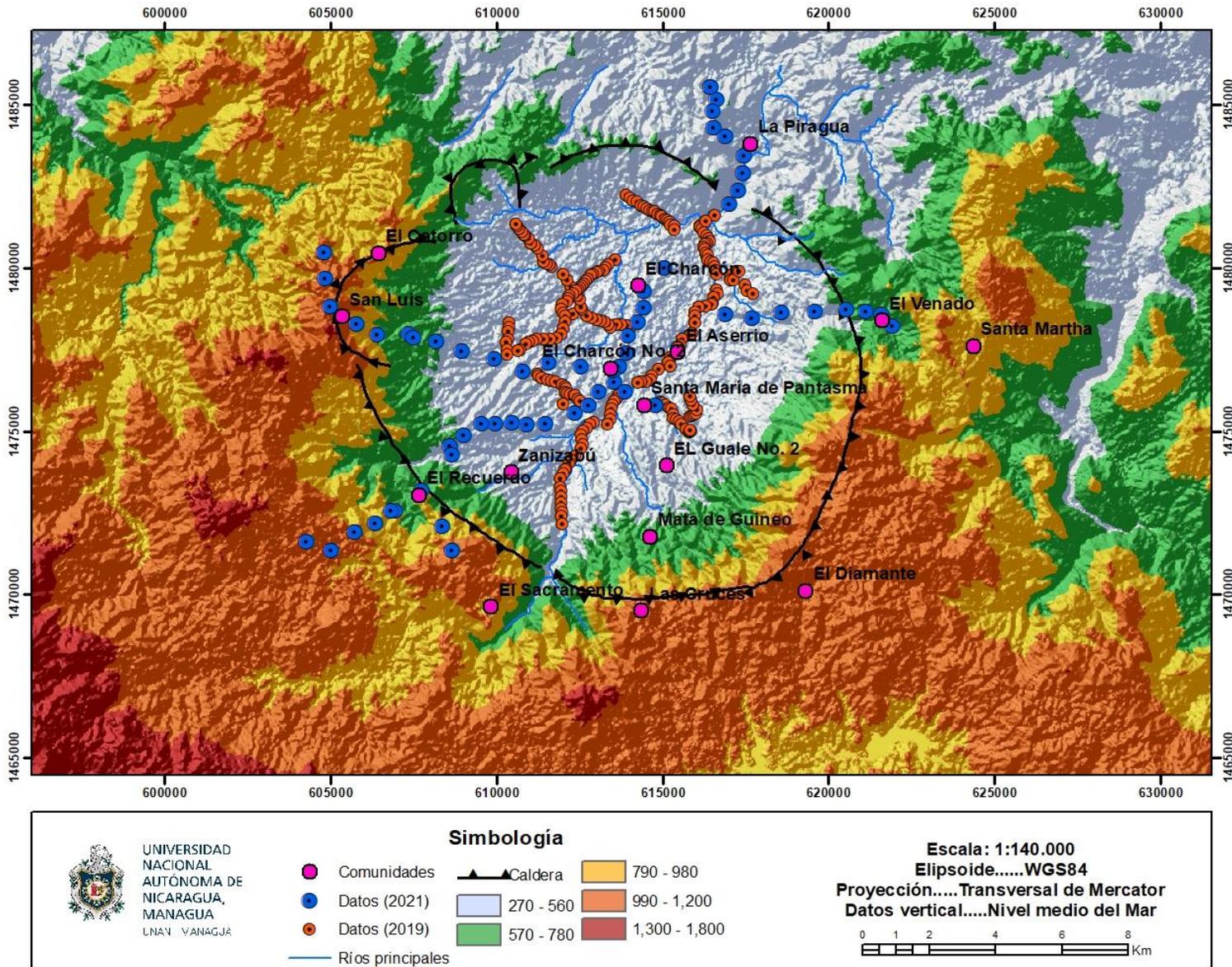


Figura 17. Mapa de puntos magnéticos.

4.1.2. Procesado de datos magnéticos

- *Corrección por variación diurna para campaña 2019*

La corrección diurna del 2019 se obtuvo mediante calculando la diferencia entre las lecturas de la unidad móvil (Magnetómetro Overhauser) con las lecturas de la unidad de estación base (Magnetómetro Protónico). La corrección diurna se obtiene usando la **Ecuación 1** del **Acápite 2.5.3**.

Dado que la Base es una unidad estacionaria, las lecturas de la esta unidad están influenciadas únicamente por el cambio del campo magnético durante el transcurso del día. Es así que la corrección diurna elimina las variaciones diurnas de los datos móviles para que las anomalías puedan ser identificadas.

En la **Figura 18** puede apreciarse la actividad magnética durante el levantamiento de los días 2 al 5 de septiembre de 2019 registrado por la estación base. La corrección implica ajustar un modelo matemático (curva de corrección diurna) para cualquier instante de tiempo. La variación diurna registrada por la base tiene un rango de alrededor de 30 nT, lo que no represente cambios fuera de lo esperado debido a esta variación (debido por ejemplo a tormentas solares, etc.).

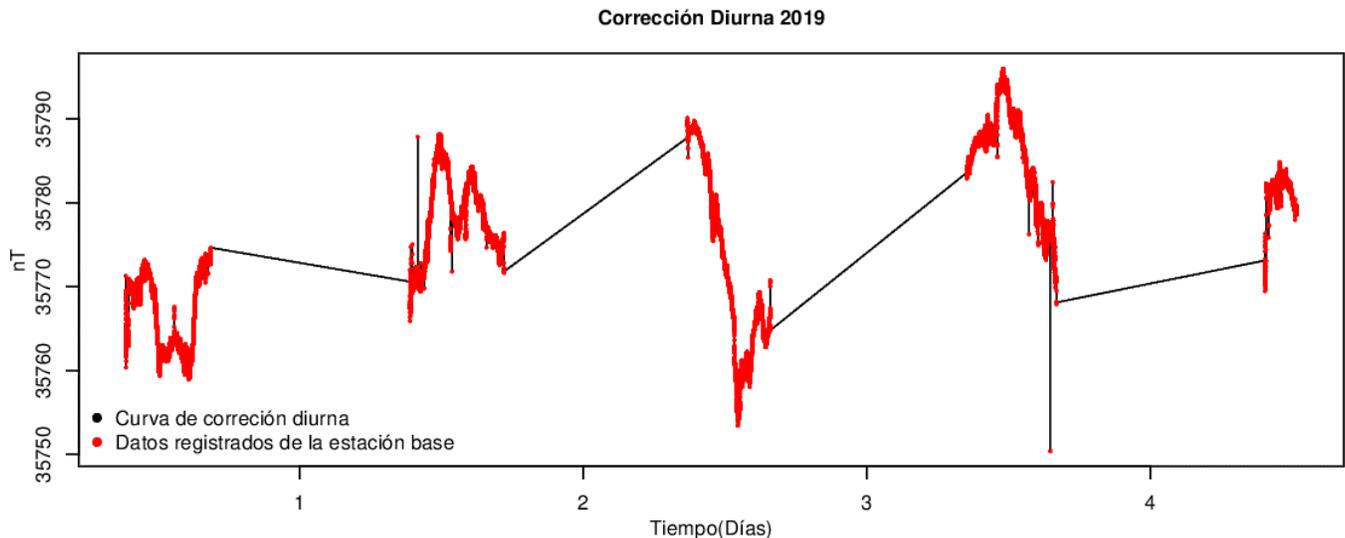


Figura 18. Corrección diurna 2019. Tiempo (Días) referente al 2 de septiembre de 2019

Se realizó un modelo matemático en el campo corregido a través de la diferencia del campo magnético (móvil) y el campo magnético (base), más el datum (promedio del campo magnético en la estación base). Al resultado le restamos un campo de referencia geomagnético (IGRF) de la región aplicando la **Ecuación 2 del Acápite 2.5.3**. Como resultado se adquiere la Anomalía de Campo Magnético Total.

El siguiente paso fue la construcción del mapa de las anomalías magnéticas mediante el entorno de R, (ambiente de programación) usando el método Kriging con las variables y parámetros Geofísicos considerados para el modelamiento espacial.

- *Método de Kriging*

El propósito de la estimación de Kriging es la predicción de valores no observados en variables espaciales (regionalizadas) apoyada en los valores observados de dichas variables. Las diferencias entre valores que dependen de la distancia de separación entre puntos (**Figura 19**, panel izquierdo) modelados con un variograma (panel derecho) (**consultar Anexos 1**).

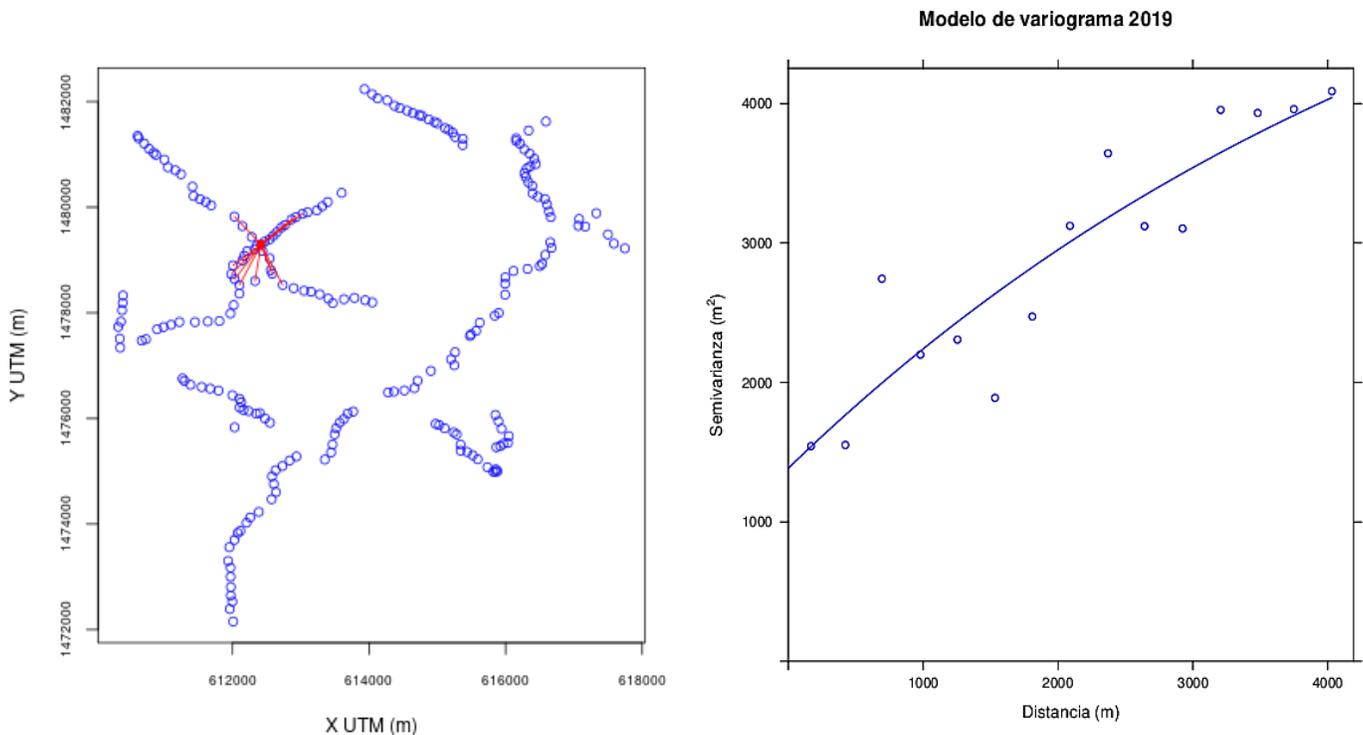


Figura 19. Panel izquierdo: Distribución muestreada en el 2019. Panel derecho: Variograma del 2019.

En este caso se utilizó un variograma de tipo exponencial (**consultar Apéndice A**) que contiene tres elementos característicos para ajustar un modelo teórico con el fin de interpolar los sitios muestreados. Como parte de este proceso se realizó la interpolación en la que se obtuvo una malla regular de las anomalías de campo a nivel local.

Para el modelado de los datos del 2019 se construyó el mapa magnético del 2019 mostrado en la **Figura 20**. Los rangos magnéticos varían entre -200 nT a -600 nT y pueden ser agrupados en tres grupos: -200 a -300 nT que corresponden a mínimos magnéticos en tonos azul-celeste (parte norte), intermedios que corresponden a -300 a -450 nT en verde (parte central) e intensidades máximas de -450 a -600 nT en tonos amarillo-rojo (parte sur). A primera vista se puede observar un gradiente que tiende a “crecer de manera negativa” hacia el Sur.

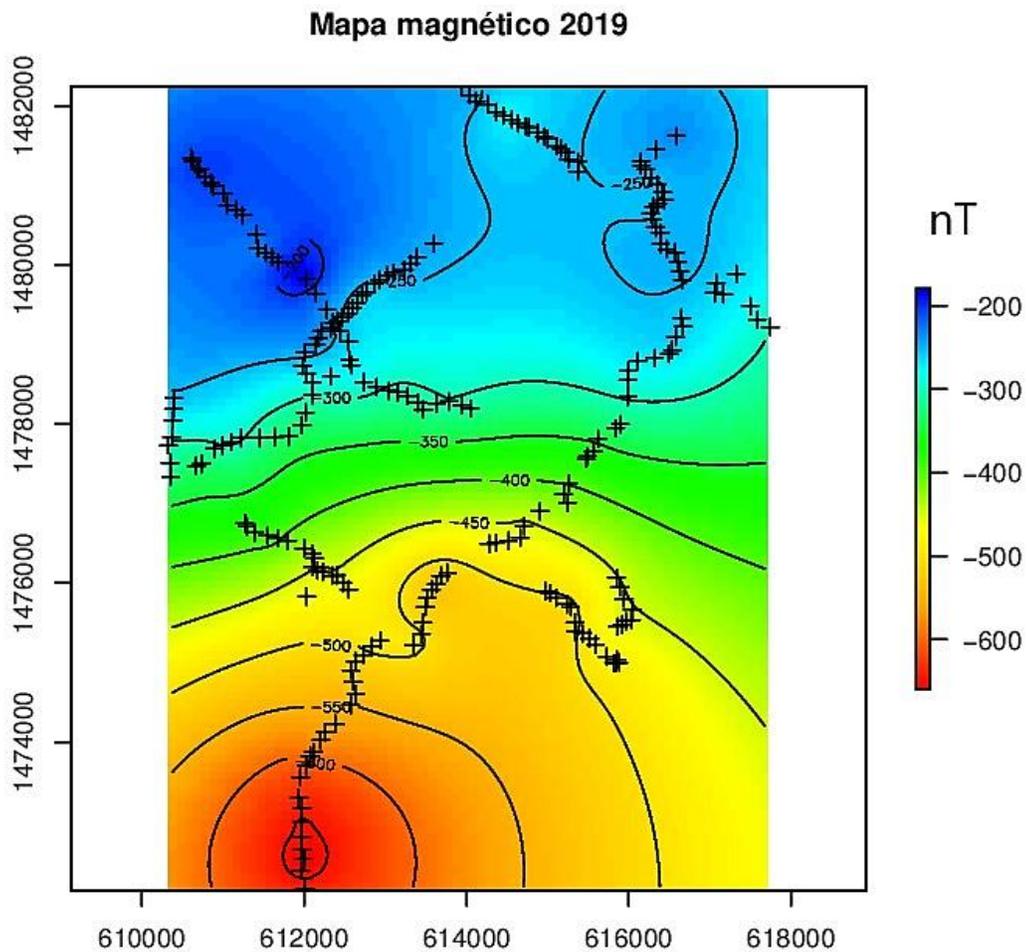


Figura 20. Mapa Magnético 2019.

○ *Corrección por variación diurna para campaña 2021*

La corrección diurna de 2021 se obtuvo mediante el método *Tie Points* mencionado en el **Acápite 4.1.1.1**. Los diferentes puntos de amarre de todos los circuitos se relacionan entre ellos mediante una red de interpolaciones. Dado que los puntos de amarre están “ligados” por esta red, podemos usar cualquier punto de amarre como referencia. Eligiendo esta referencia, las lecturas de los demás puntos de amarre serán corregidas de tal forma que parezca que dichas lecturas se tomaron en el sitio de referencia. El efecto final es similar a tener una “estación base” virtual que registro la variación diurna.

La **Figura 21** muestra los datos de los puntos de amarre (triángulos azules) referenciados a la estación base de 2019. La curva de variación diurna será usada para interpolar los datos de campo usando directamente la **Ecuación 1**. Estos datos aparecen como puntos rojos.

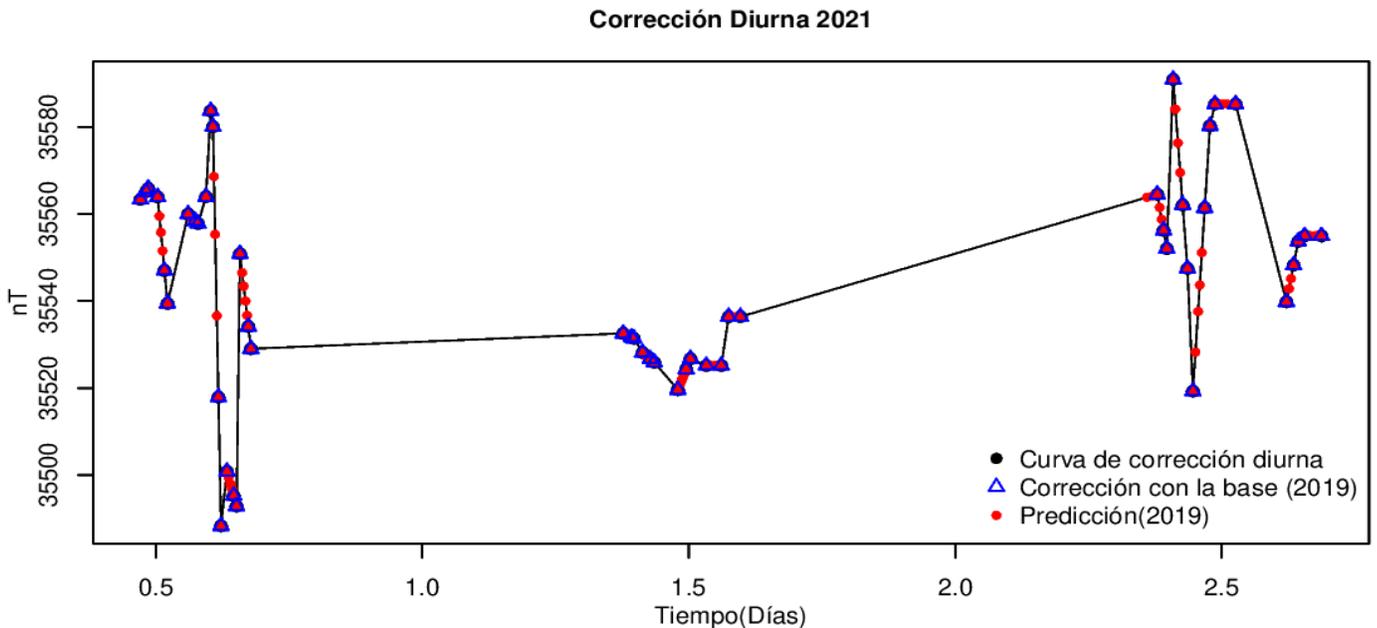


Figura 21. Curva de variación diurna de la campaña de 2021. Los puntos de amarre referidos a la base de 2019 están encerrados en triángulos azules. Los puntos rojos son los valores predichos por la curva en la base de 2019 para los datos tomados en campo. Tiempo (Días) referente al 10 de Agosto de 2021.

De los procesos elaborados para el mapa magnético del 2019, se realizó el variograma exponencial para la distribución del 2021 (ver Figura 22). Por la tipología de la muestra el modelo de variograma tiende a aplanarse en regiones donde los puntos están dispersos.

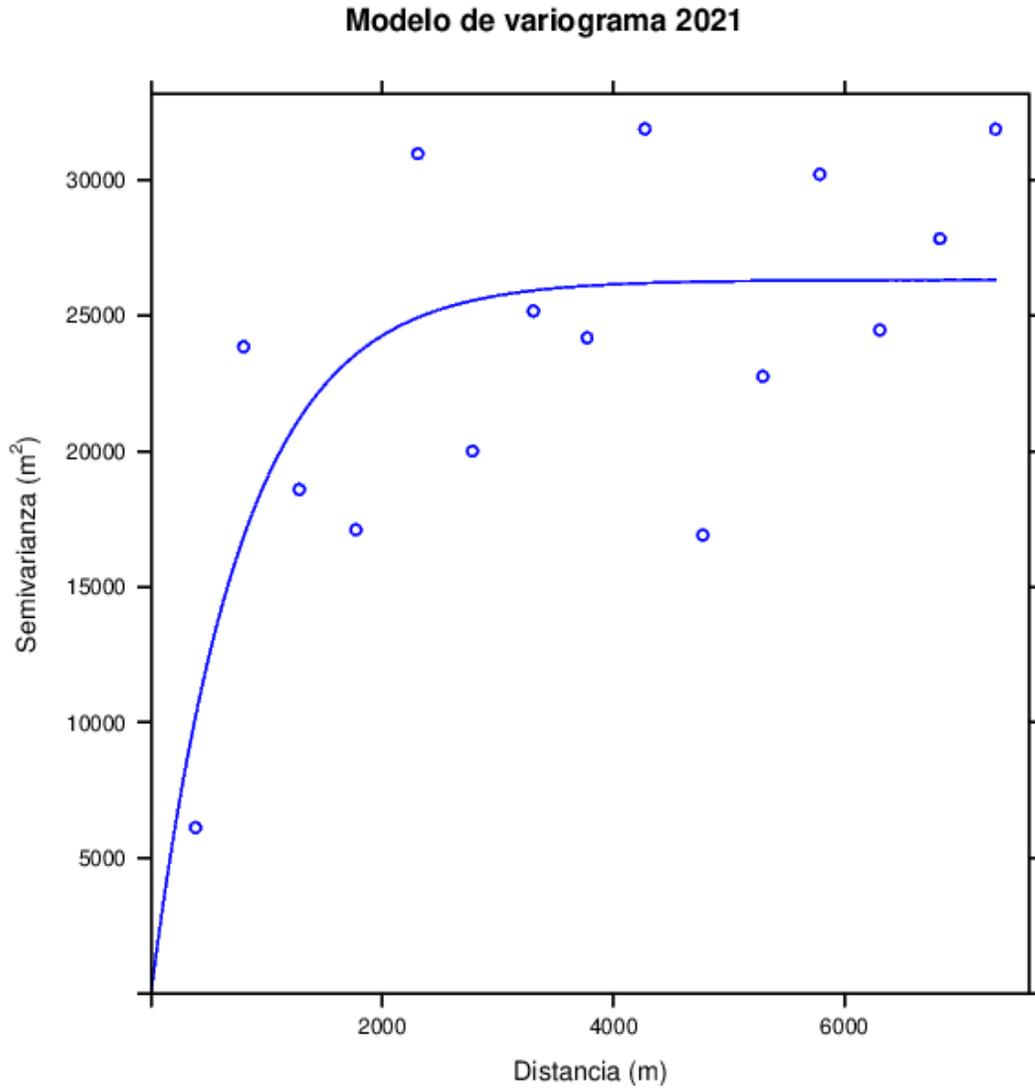


Figura 22. Variograma 2021.

Se aplicó nuevamente un kriging, obteniendo el mapa magnético del 2021. El mapa no muestra la geometría como la que se obtuvo para el mapa del 2019 debido a la distribución de los puntos. Aunque esto no descarta las zonas anómalas consistentes con las anomalías magnéticas del 2019 en la parte Central y Suroeste.

Las fuentes que dominan las anomalías magnéticas tienen valores negativos de 0 hasta -800 nT . No se obtuvo resolución para este mapa, ya que se contó solamente con dos perfiles magnéticos. Como se muestra en la **Figura 23**.

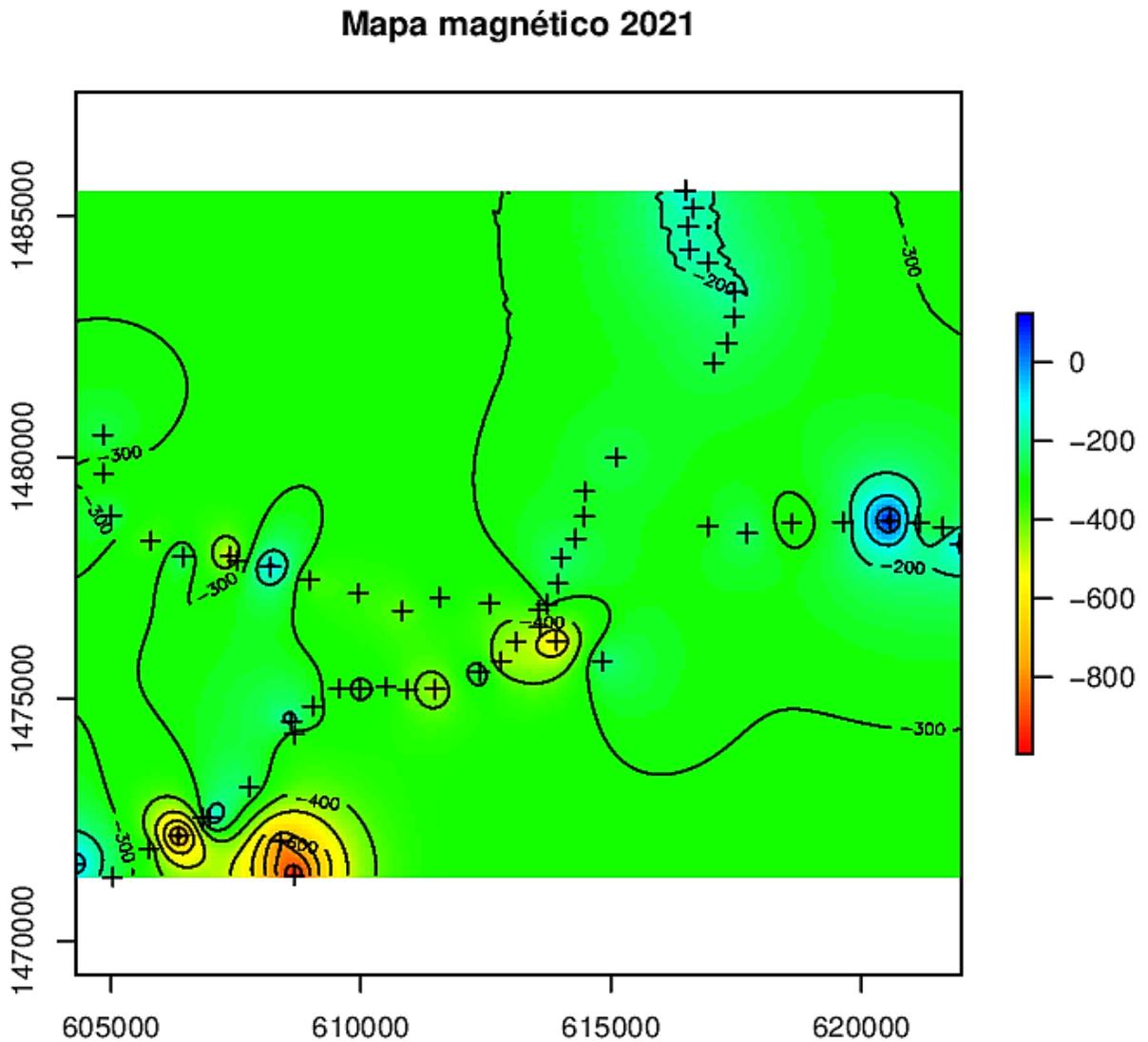


Figura 23. Mapa Magnético 2021.

○ *Correlación estadística de datos 2019-2021*

La **Figura 24** (panel izquierdo) muestra los histogramas de las campañas del 2019 (azul) y 2021 (rojo). El propósito es correlacionar ambas muestras, para encontrar una tendencia consistente en los periodos de adquisición de los datos.

El panel derecho muestra los *boxplots*, el diagrama muestra el eje central de las distribuciones cuantitativas para diagnosticar el intervalo de confianza de las muestras.

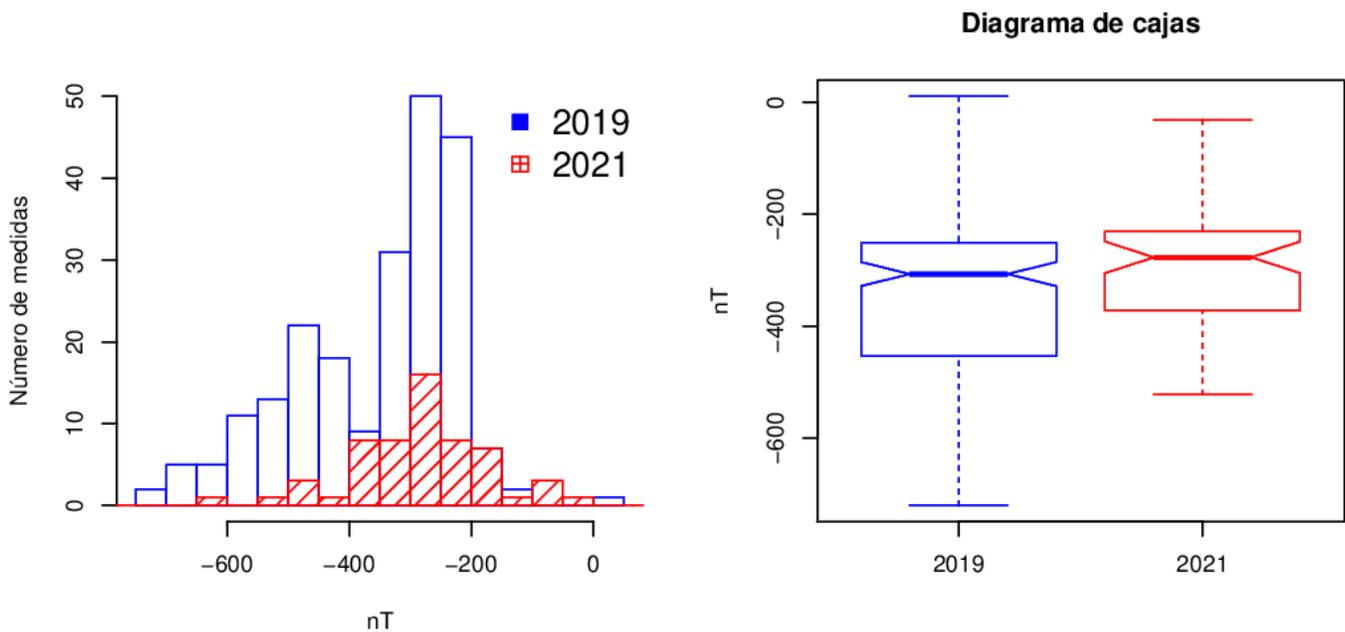


Figura 24. Distribuciones estadísticas de los datos 2019 (azul) y 2021 (rojo). Panel izquierdo: Histogramas de ambas distribuciones. Panel Derecho: Boxplots de las distribuciones.

○ *Perfiles Magnéticos 2019-2021*

En la **Figura 25**, se muestra el primer perfil (Panel Superior) realizado en el 2019. Es el más corto, teniendo una extensión total de 12 km y el segundo de 30 km. La dirección de adquisición fue N-S, desde “El Charcón 2” hasta “Zanizabú”. El segundo perfil mostrado (Panel Intermedio) representa el levantamiento N-S de 2021 y se extiende desde “La Piragua” interceptando con la comunidad “El Charcón” y desplazado hacia “Zanizabu” y “El Recuerdo”.

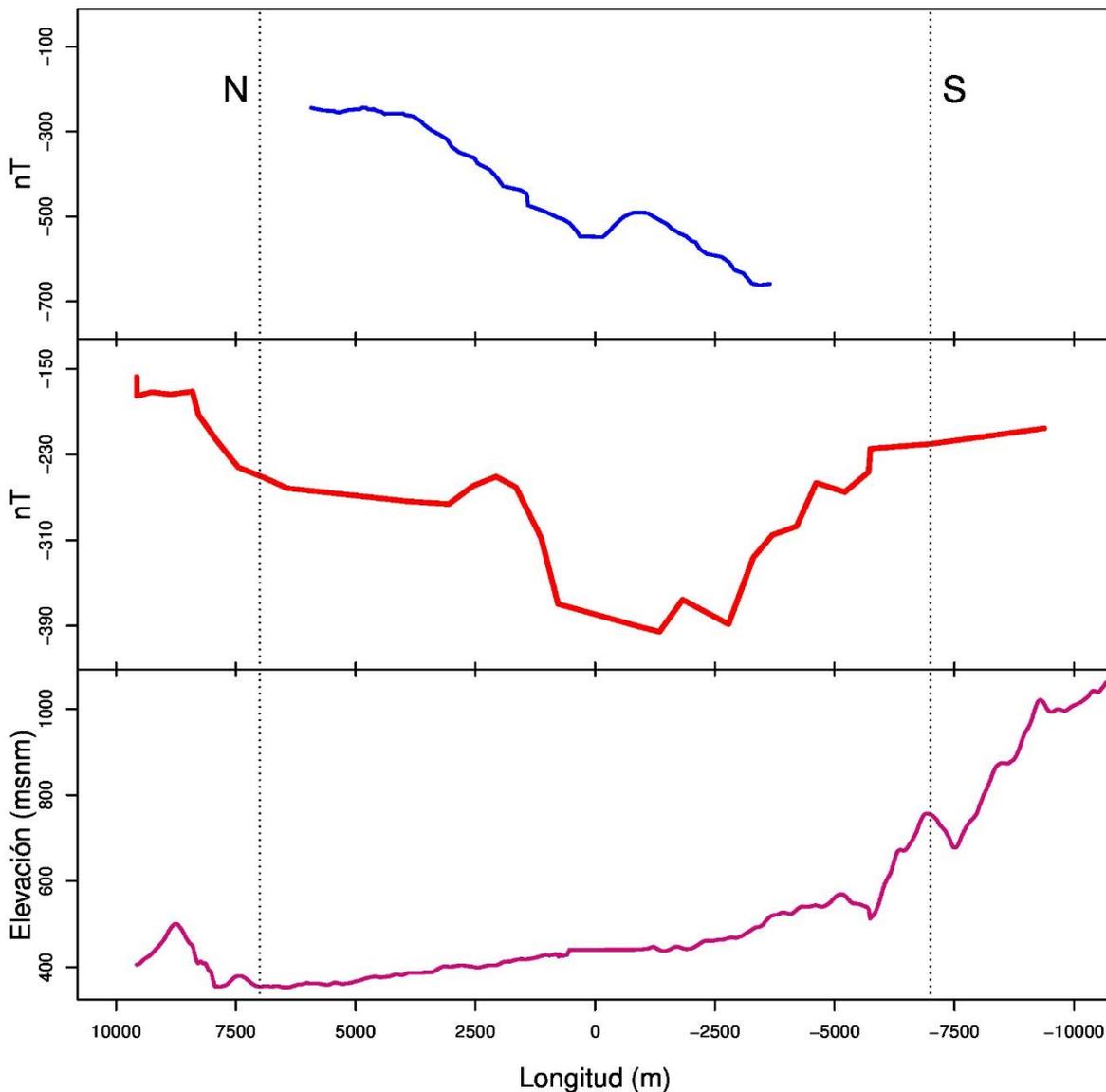


Figura 25. Perfil Magnético 2019-2021 (Panel Superior) con orientación N-S. (Panel Intermedio) con orientación N-S. Líneas paralelas a los perfiles (límites del cráter). El modelo de terrenos es presentado en el Panel Izquierdo.

En la misma campaña del 2021, se realizó otro perfil perpendicular al perfil N-S, (ver **Figura 26**, Panel Superior) con una longitud de 30 km, se extiende desde “San Luis” a “El Venado”. Entre el perfil N-S y O-E el punto de intersección es el centro del cráter. El Panel Inferior muestra el modelo de terreno sobre los perfiles obtenido de un Modelo Digital de Terreno (ALOS PALSAR).

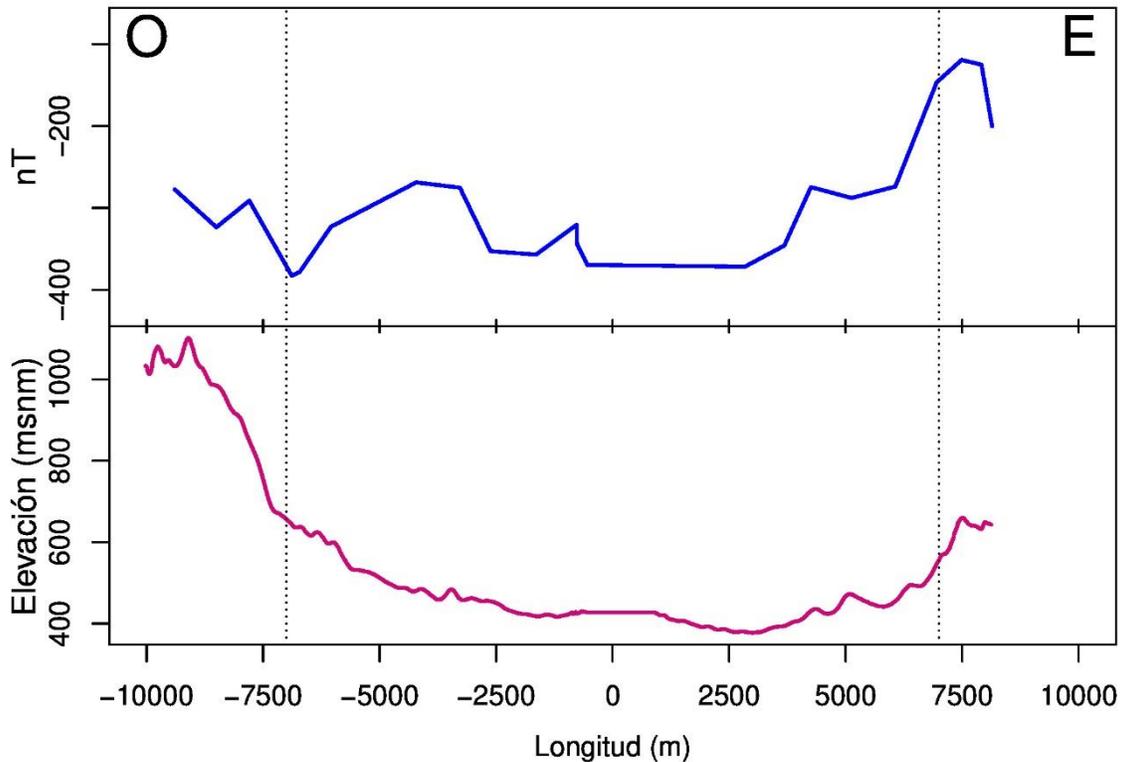


Figura 26. Perfil Magnético 2021 (Panel Superior) con orientación O-E. Líneas paralelas a los perfiles (límites del cráter). El modelo de terreno es presentado en el Panel Izquierdo.

4.1.3. Interpretación

4.1.3.1. Descripción cualitativa conjunta

- Mapas magnéticos conjuntos (2019 y 2021)

El primer paso hacia la interpretación es el resultado del mapa magnético conjunto (**Figura 27**), derivados de los mapas 2019 y 2021 (**Figuras 20 y 23**), estableciendo directamente las anomalías en el centro y bordes de la estructura de Pantasma.

Recapitulando el **Acápite 2.5.2.2**, la característica esencial es la identificación de una anomalía central negativa asociada a: (1) un levantamiento central producido en la etapa de modificación de la cavidad llamado en la literatura *Peak Ring* (**Acápite 2.5.2.2**) rodeada de un depósito de brechas y roca fundida de impacto. En otro caso esta anomalía central negativa no es común para las estructuras por vulcanismo.

En particular la anomalía central por su forma y amplitud surge de una fuente muy poco profunda vistos en las **Figuras 25 y 26**. Es decir cuanto más profunda es la fuente anómala más ancha es la anomalía, una característica común de las calderas volcánicas.

A continuación, se presenta el mapa conjunto (ver **Figura 27**), se identificó una anomalía en el centro obtenida en el área del “El Charcón No. 2” y “Santa María de Pantasma”. La anomalía alcanza los -540 nT, alrededor de una unidad litológica de Brechas, se puede asociar como la unidad geomorfológica del “levantamiento central” o bien dicho “peak ring”, (ver modelos 3D de **Figuras 28, 29 y 30**), podría ser que el efecto magnético en esta zona esté relacionado a una morfología de cráter de impacto con materiales de “Brechas de impacto y material fundido”.

En seguida acompañado de una anomalía muy intensa hacia el Sur de la comunidad “Zanizabú”, esta última tiende a crecer negativamente y su máxima intensidad magnética es aproximadamente -600 nT la cual puede ser debida a fuentes muy profundas.

Esta misma anomalía parece extenderse hasta la comunidad “El Recuerdo” como lo muestra el mapa magnético regional, indicando un máximo magnético de -1000-800 nT.

Se observaron anomalías puntuales aisladas hacia la comunidad de “San Luis”, que parecen estar asociadas a discontinuidades producto del fallamiento y contactos litológicos. Hacia la comunidad “El Venado” sobre el borde del cráter exhibe una anomalía que indica un material no muy magnetizado, por un mínimo positivo.

Es así que, a lo largo de toda el área de estudio, las anomalías magnéticas se ajustan con las unidades litológicas del mapa Geológico local elaborado por Bravo, (2019). Este estudio no solo implica consolidar la información Geológica local del cráter, sino de entender la naturaleza del cráter de Pantasma.

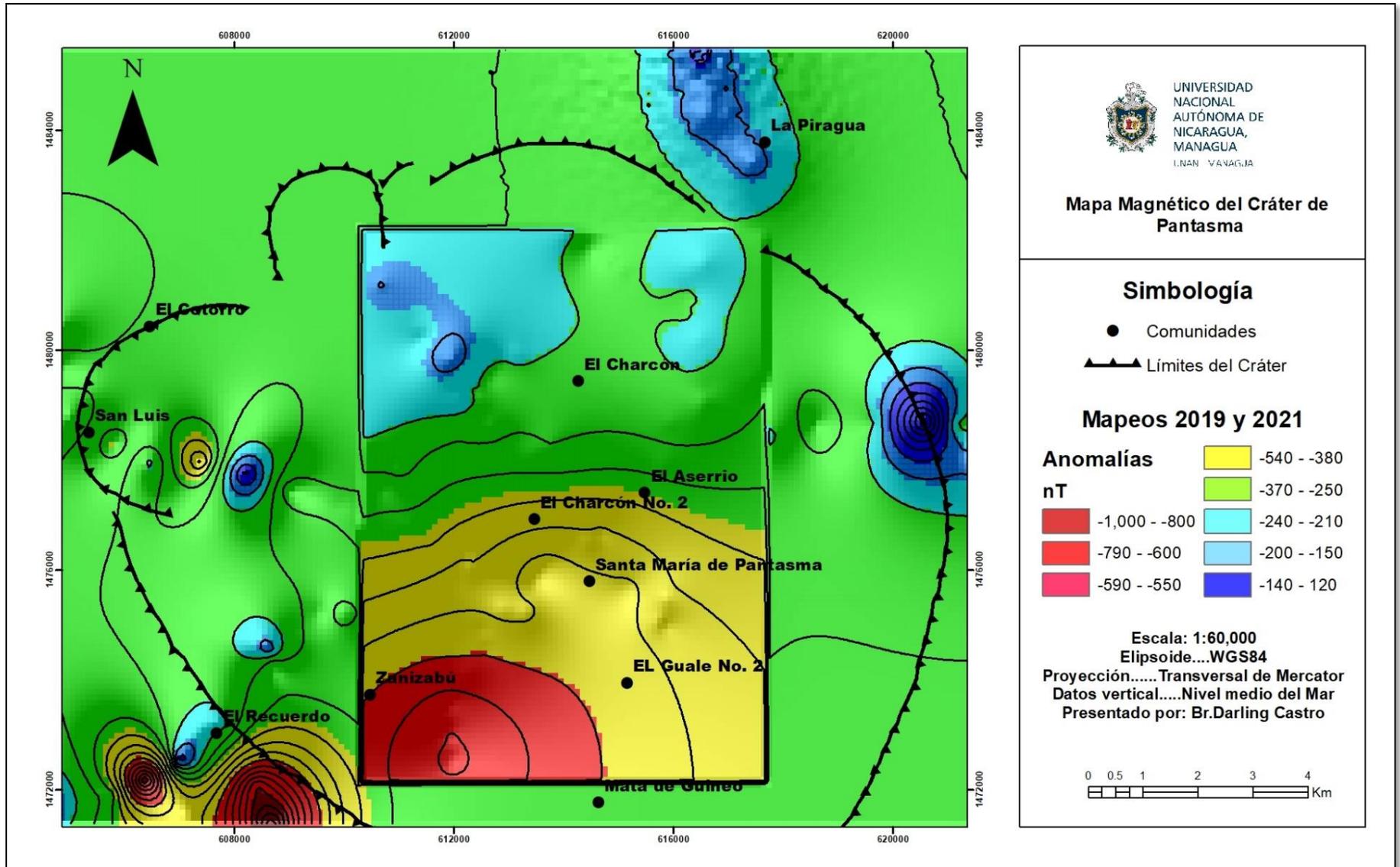


Figura 27. Mapa Magnético conjunto (2019-2021).

- Modelos 3D de los Mapas 2019 y 2021.

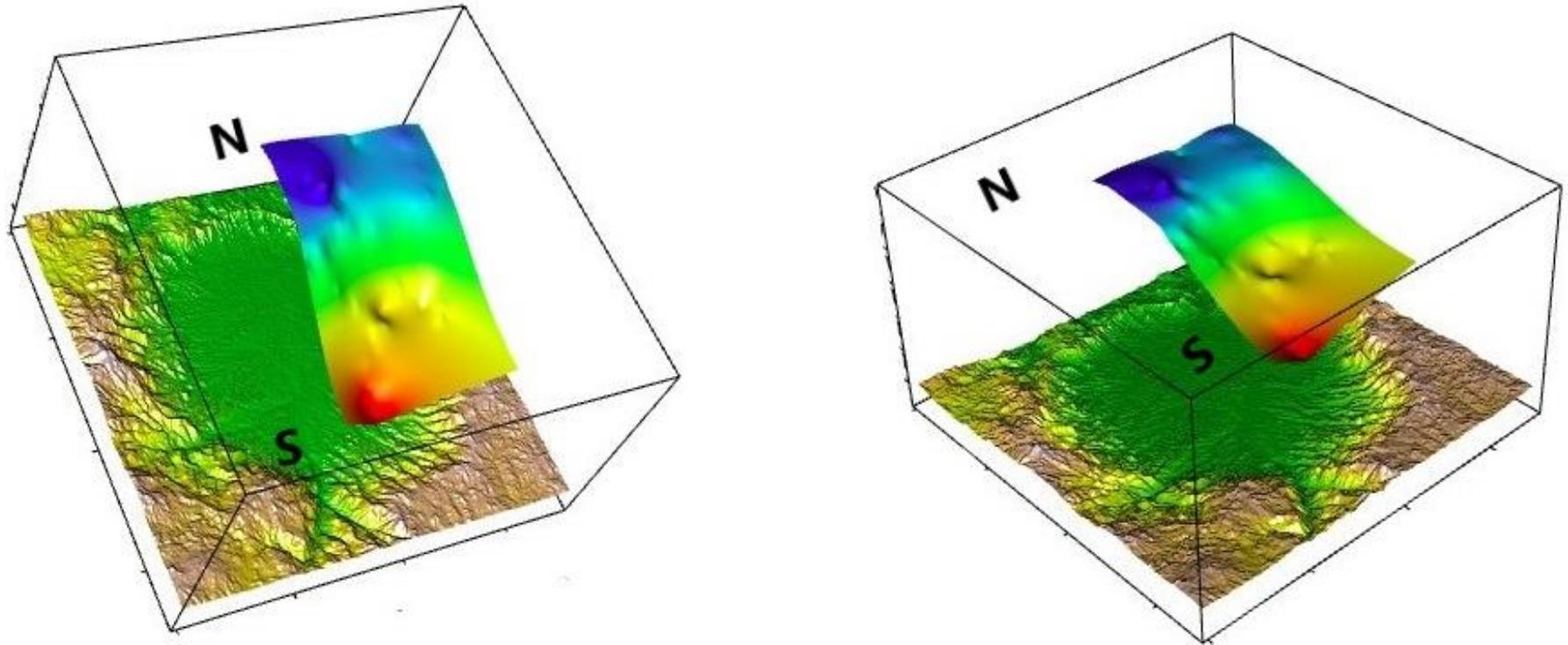


Figura 28. Modelos 3D del survey magnético local. Visualización de la anomalía central negativa.

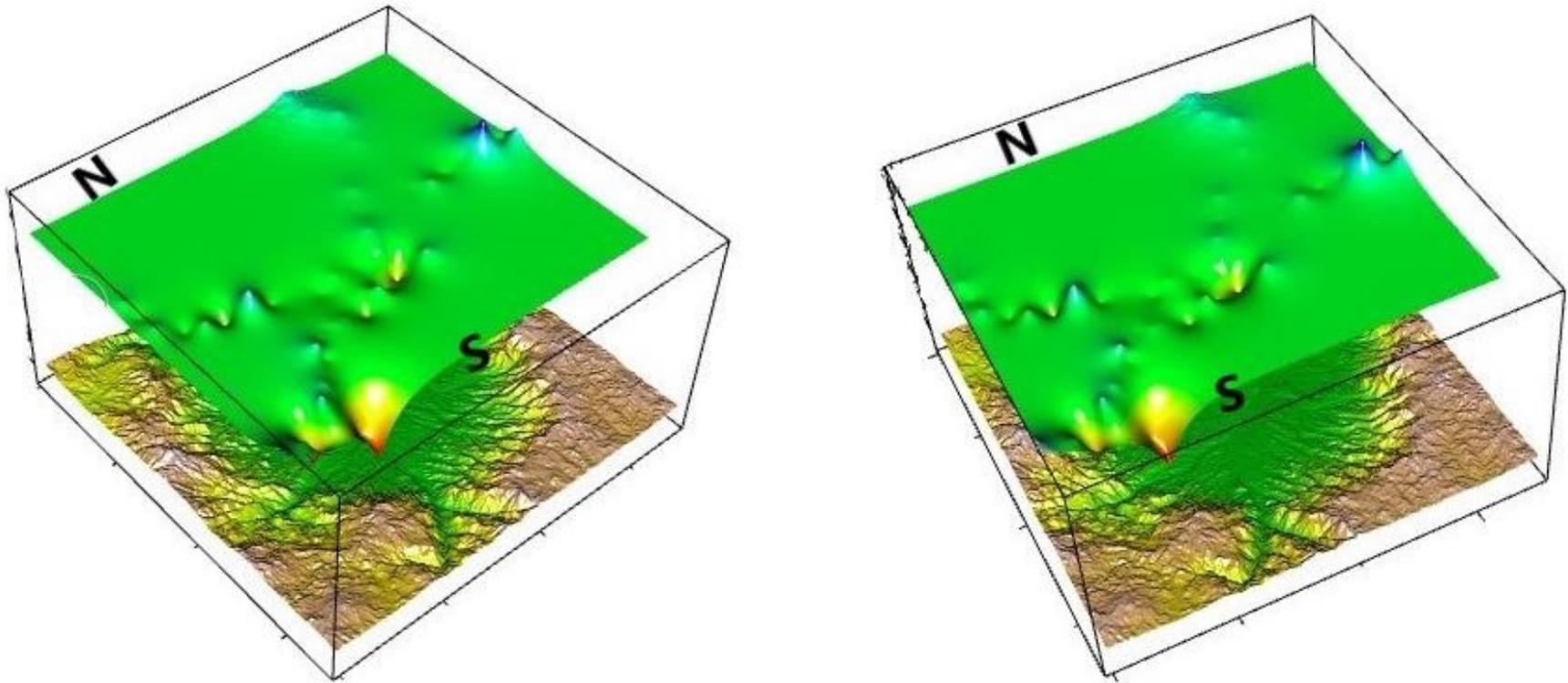


Figura 29. Modelos 3D del survey magnético regional. Visualización de la anomalía central negativa.

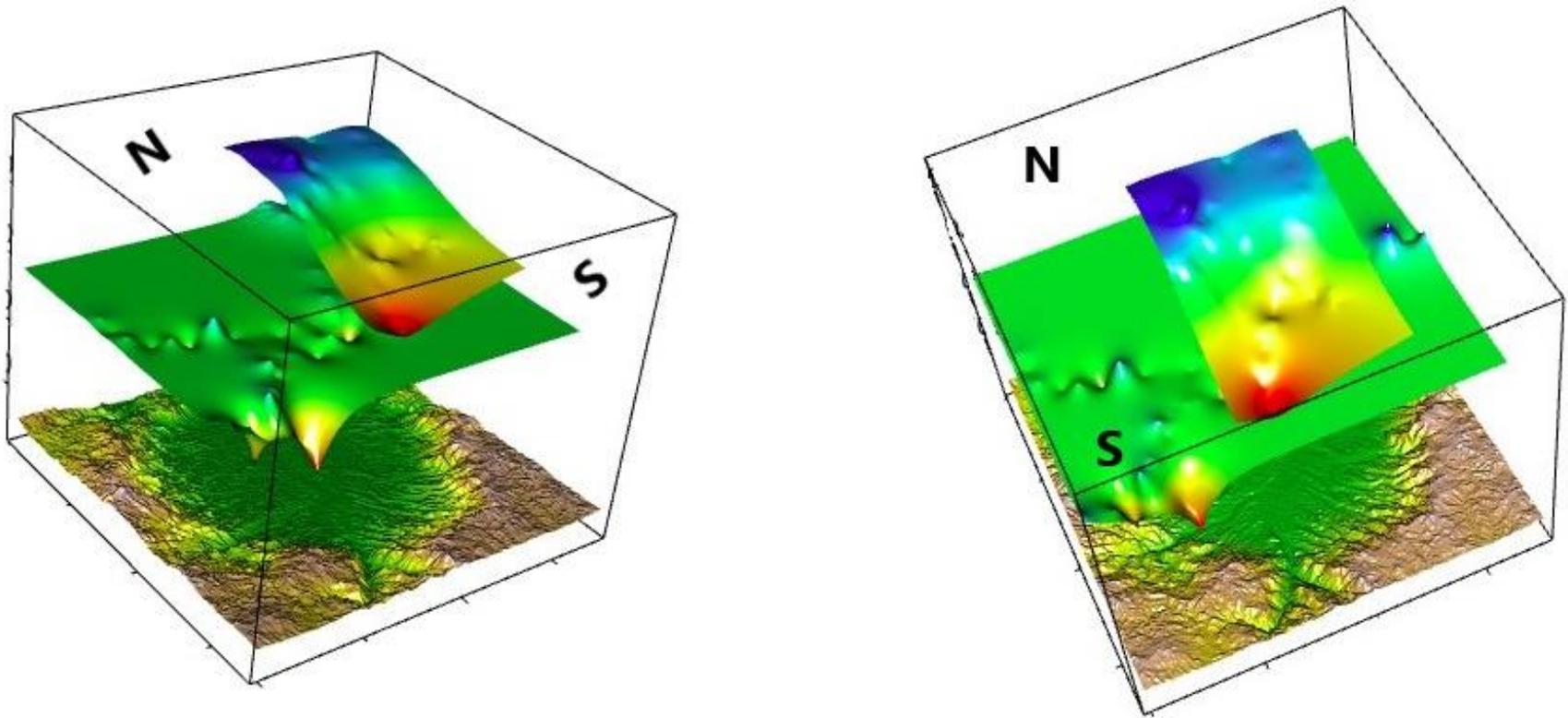


Figura 30. Modelos 3D. Mapas Magnéticos conjunto.

- *Modelos conceptuales.*

Entre la tendencia magnética y la distribución litológica se requieren de modelos simples que infieran la similitud de las posibles fuentes geológicas, como se ha venido mencionando en el **Acápite 4.1.3.1**. Para esta investigación se propone lo siguiente:

Dos modelos conceptuales integrando la información geológica de Bravo, (2019) con el objetivo de inferir la tendencia magnética respecto a las unidades litológicas a partir de los perfiles de la campaña del 2021. Los modelos realizados, se dividieron en:

- ✓ *Modelo Conceptual Magnético del Perfil N-S (2021).*
- ✓ *Modelo Conceptual Magnético del Perfil W-E (2021).*

En la **Figura 31** (Panel Inferior) se presenta el modelo conceptual del perfil N-S, con longitud de 30 km perteneciente a la campaña 2021. Este perfil se compone con un total de 38 puntos y se extiende a 30 km en total. Los rangos magnéticos van desde -100 nT a -300 nT.

El modelo para este perfil, se extiende desde la comunidad “La Piragua” en la parte N, pasando por el centro de “Santa María de Pantasma” y terminando hasta en la parte S entre “El Recuerdo y Zanizabu”.

En la parte N del perfil se muestra una tendencia homogénea del campo magnético inferido por las unidades litológicas de “Brechas Aglomeradas y depósitos aluvionales”.

Seguido de una anomalía en el centro del cráter, una zona tenue compuesta de “Brechas aglomeradas”, en contacto se encuentra un posible levantamiento topográfico, observable en los modelos 3D (**Figuras 26 y 28**).

En la parte Sur la tendencia magnética señala un contacto litológico. La tendencia heterogénea magnética suele presentar pequeñas perturbaciones debido a este conjunto de Andesitas, Ignimbritas y Riolfitas.

Un segundo modelo mostrado en la **Figura 32** se realizó en torno al perfil O-E de la campaña 2021. Este perfil se dispone de 23 puntos cruzando el centro del cráter y aproximándose a los bordes del cráter. El resultado nos proporcionó la misma anomalía central y una tendencia que coincide con los cambios litológicos.

Las anomalías hacia el O y E, muestran patrones muy agudos debido a la secuencia litológicas entre las unidades Andesítica e Ignimbritas. Un detalle de este modelo es que permitió evaluar una probabilidad litológica inversa de los depósitos Andesíticos.

En ambos modelos conceptuales se determinó una anomalía que predomina justo en el centro del cráter, exponiendo el *Peak Ring* (estructura central), asociando una unidad aflorante de brechas aglomeradas. Los modelos también están respaldados por interpretaciones magnéticas afines por Grieve, 1996, Pilkington et al., 1994). Estos autores han asociado anomalías centrales a la presencia de brechas de impacto.

En gran parte el levantamiento central es debido al restablecimiento del magnetismo remanente dentro del derretimiento de impacto o brecha de derretimiento (suevita). Estos procesos son la causa de las anomalías magnéticas centrales.

Modelo Conceptual Magnético del Cráter de Pantasma Perfil N-S (2021)

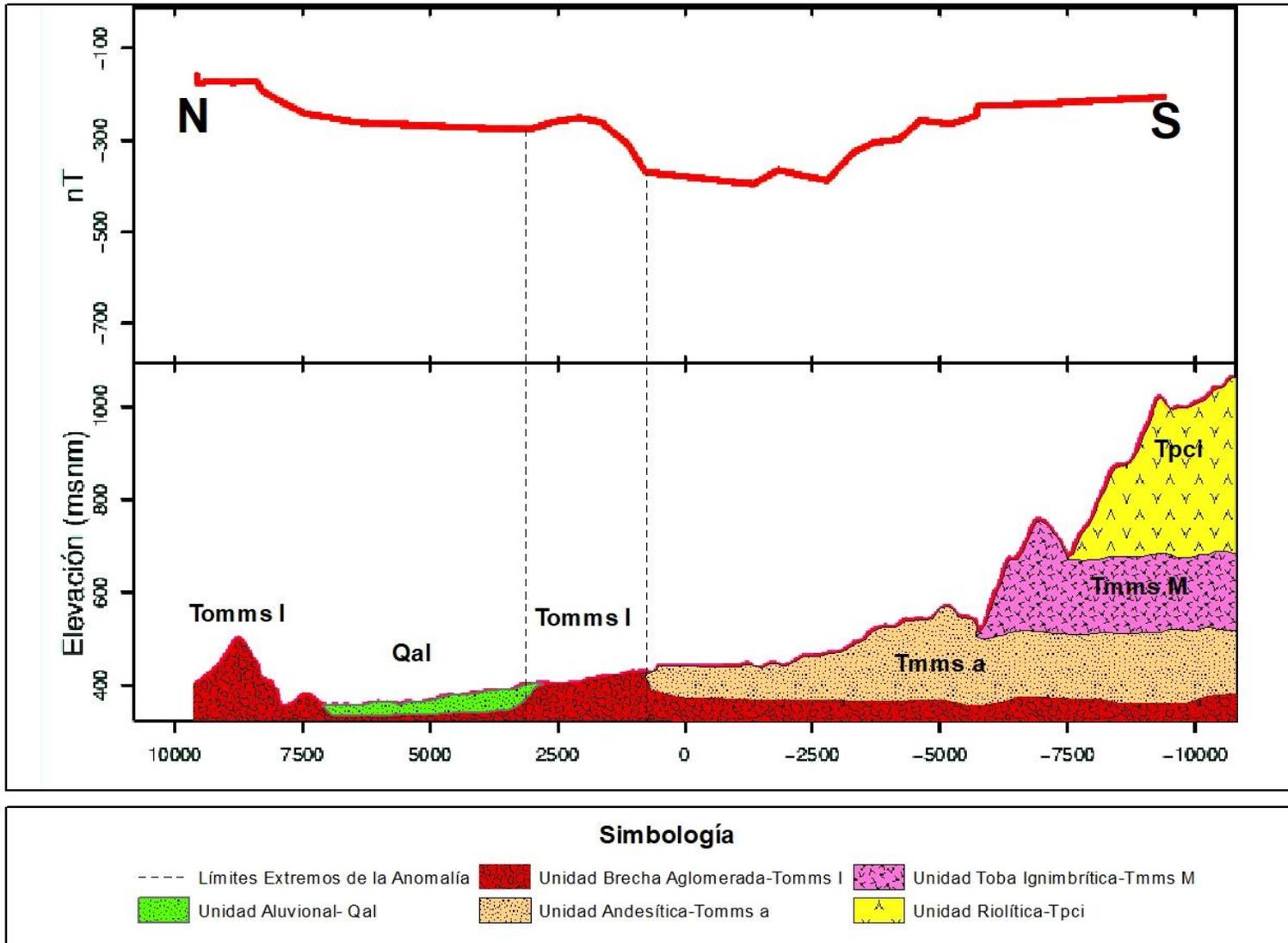


Figura 31. Modelo conceptual (Perfil Magnético N-S, 2021).

**Modelo Conceptual Magnético del Cráter de Pantasma
Perfil W-E (2021)**

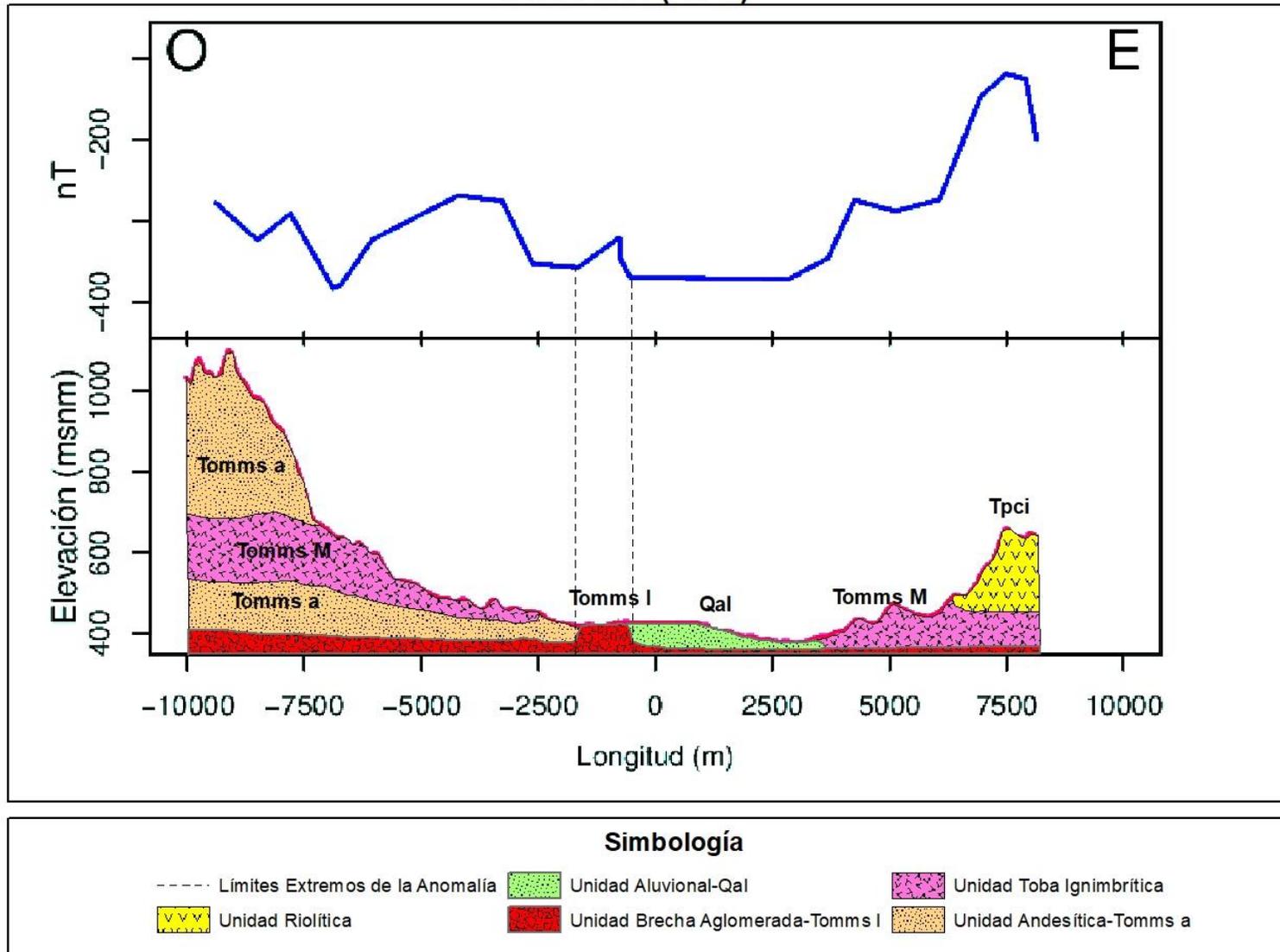


Figura 32. Modelo conceptual (Perfil Magnético W-E, 2021).

- *Comparación de la firma magnética de Pantasma con otras estructuras.*

Para lograr interpretaciones más objetivas comparamos con estructuras que no tienen este gradiente. Las firmas típicas son: (1) una caldera volcánica y (2) un cráter de impacto.

Basado de las firmas magnéticas presentadas **Acápite 2.5.2.2**, se digitalizaron los datos de campo magnético para comparar con la firma magnética de Pantasma, para luego normalizarlos a una sola escala en el rango de 0-1 con respecto al centro de las estructuras. Estos casos de estudio tienen resultados desarrollados en mediciones de campo potenciales, desde campañas gravimétricas y magnéticas entre otras.

La *Caldera de Kleinsaubernitz* (presentada en **Acápite 2.5.2.2**): en Alta Lusacia, los estudios magnéticos con intervalos de puntos entre 250 y 350 m revelaron una firma magnética en el área de Kleinsaubernitz. La anomalía es positiva, extremadamente abrupta y se extiende desde los bordes. La causa son el exceso de masa producto de las intrusiones de lavas. Por consiguiente la *caldera Baruth* los estudios magnéticos determinaron la ubicación precisa de una anomalía central positiva antes de las perforaciones.

La *Estructura de Impacto de Mjølnir* (presentada en **Acápite 2.5.2.2**): Consiste en una anomalía negativa con un levantamiento en el centro del cráter ("*Peak Ring*"). Esta anomalía se atribuyó a una masa fundida débilmente magnetizada. Además el cráter de impacto *Clearwater East* dió como resultado una anomalía central negativa determinando el levantamiento estructural sobre la base de un diámetro de 26 km.

Las diferencias entre los modelos se pueden reflejar en la **Figura 33 y 34**. En dónde: La respuesta de la anomalía central de *Kleinsaubernitz y Baruth* es igual al radio de la caldera, se despliega desde los límites de los bordes, mostrando una anomalía ancha y positiva. En comparación con la firma de magnética de Mjølnir y *Clearwater East* la anomalía central es menos ancha y negativa.

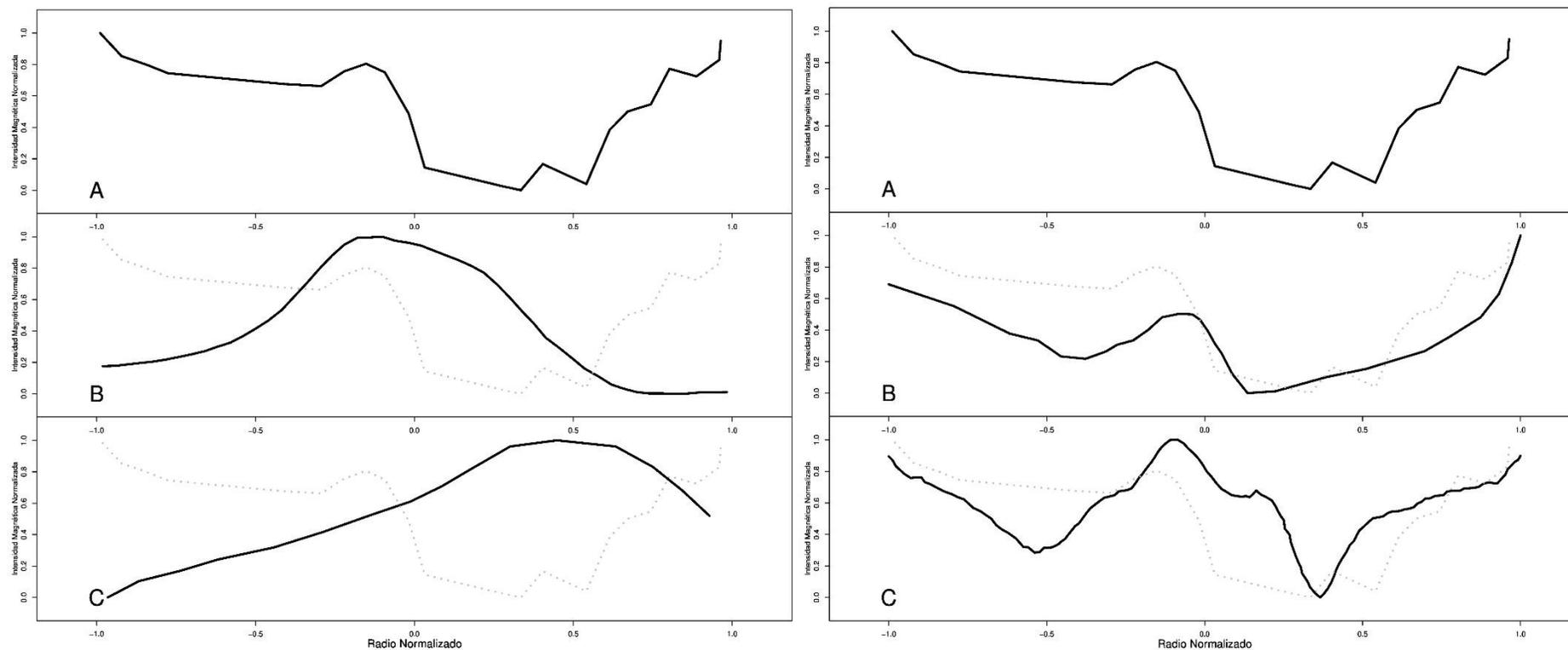


Figura 33. Comparación de firmas magnéticas de estructuras geológicas. Panel izquierdo: Firmas magnéticas de calderas volcánicas: Pantasma (A), caldera de Kleinsaubernitz (B) y caldera Baruth (C). Panel derecho: Firmas magnéticas de cráteres de impacto: Pantasma (A), cráter Clearwater East (B) Cráter Mjølner (C).

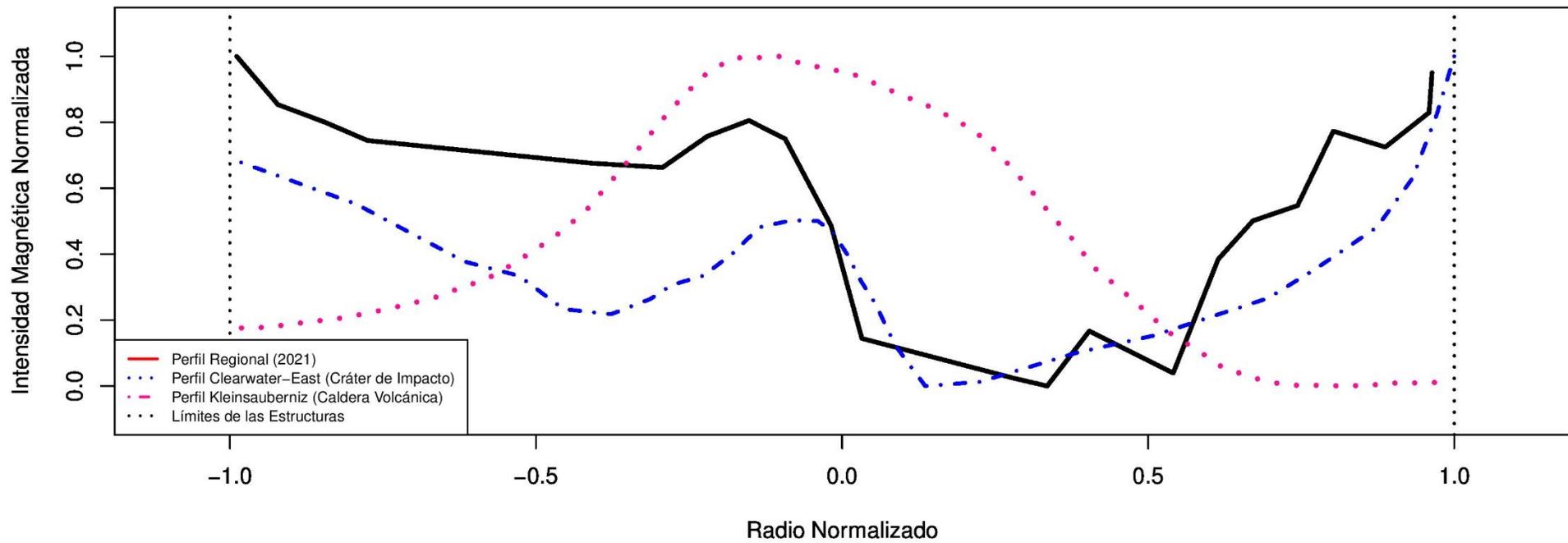


Figura 34. Comparación de las firmas magnéticas. Descripción de la leyenda: Firmas magnética del cráter de impacto Clearwater (línea azul), caldera volcánica de Kleinsauberniz (línea rosa) y Pantasma (línea negra).

4.1.4. Discusión de resultados

En este estudio se proponen dos tipos de evidencias de un posible impacto, basados de datos magnetométricos, la primera es la identificación de una anomalía central negativa en el centro del cráter de Pantasma, tal anomalía indica la existencia de un levantamiento central (*Peak ring*), bastante consistente con las anomalías centrales de estructuras de impacto.

La segunda evidencia es la presencia de una firma magnética negativa en el cráter de Pantasma, el cual ha sido interpretada como evidencia de las firmas Geofísicas esperadas de cráteres de impacto:

Tenemos una anomalía central negativa en el centro (*peak ring*), que no es similar a la de una anomalía magnética producida por colapso magmático. De hecho, cuando se encuentran estas depresiones en regiones de rocas volcánicas, como el caso del cráter de Pantasma, uno se inclina naturalmente a la interpretación de estructuras con origen volcánico.

Sin embargo, si la firma magnética de Pantasma se compara con la de una estructura por impacto, la anomalía central denota una tendencia magnética muy similar que indica la segunda pieza de evidencia que refuta dicha hipótesis.

Ante la ausencia de evidencias que permitan asignar el origen del cráter de Pantasma a otras causas geológicas la hipótesis más apropiada es que la firma magnética adquirida en esta investigación, está asociada a un impacto meteórico. De lo contrario, lo más convincente es realizar otros estudios directos para las fuentes magnéticas resultantes en la parte central y sobre los límites del cráter.

CAPÍTULO V

5.1. Conclusiones

En esta investigación se propone que la estructura de Pantasma tiene el potencial para ser un cráter de impacto meteórico, se concluyó la posición de una anomalía central negativa que se encuentra entre las comunidades “El Charcón No. 2” y “Santa María de Pantasma”, presentada en el mapa magnético conjunto. Fue de gran utilidad para determinar la ubicación del centro del cráter, así como la morfología del “peak ring”.

Con los modelos conceptuales obtenidos se pudo definir una tendencia magnética semejante a una huella de impacto. A partir de los perfiles realizados en las campañas 2019 y 2021, este resultado reconoció una zona anómala central, que se ajusta a una unidad de brechas aglomeradas coincidiendo con el material fundido (Brechas de impacto) característico de un cráter complejo.

De la comparación de la firma magnética del cráter de Pantasma, con las firmas de las calderas volcánicas la tendencia de Pantasma no indica ningún intrusivo volcánico, por lo tanto, la firma no es semejante. Sin embargo, las firmas magnéticas de los cráteres de impacto, si revela una tendencia magnética semejante a la de un cráter complejo en comparación con una caldera. La firma magnética está más acorde con la hipótesis de la génesis de un impacto meteórico.

Pantasma es solo una estructura que todavía no ha sido confirmada como cráter de impacto ni como caldera volcánica. Fue esencial la evaluación geofísica de un determinado origen (por ejemplo, una génesis de un cráter de impacto o una caldera volcánica) es plausible, si la mejor coincidencia sea entre estas dos alternativas. En este estudio se concluye que la firma magnética de Pantasma se parece más a la firma que observaríamos en un cráter de impacto meteórico que a la de una caldera volcánica.

5.2. Recomendaciones

Es probable que las estructuras de impacto puedan identificarse sin ambigüedades a partir de una evidencia geofísica. Se propone que para la estructura de Pantasma se realicen futuros proyectos geofísicos, dónde se deberá determinar el conjunto completo de firmas eléctricas, sísmicas, gravitatorias o electromagnéticas.

Tomando en consideración que la geología presenta un papel fundamental para identificar una nueva evidencia, se propone la aplicación de perforaciones, para el diagnóstico de estratigrafías inversas en apoyo al origen del impacto.

La topografía del cráter de Pantasma, permiten inferir un impacto oblicuo. Por consiguiente, se sugiere aplicar modelos de deformación numérica para determinar parámetros morfométricos (Energía cinética del proyectil que está involucrada en la excavación del cráter)

Para que esta estructura de Pantasma califique como estructuras de impacto "provisional" y recibir un estatus entre "posible" y "probable" se deben realizar los estudios anteriormente indicados y publicarlos en revistas científicas de acuerdo con la base de datos de cráteres de impacto en la página *EarthImpactDatabase*. También en impacts.rajmon.cz/ hay una base de datos creada por el grupo de estudios de campo de impactos.

Por lo mismo, Pantasma es un candidato ideal para ser proyectado como un Geoparque, lo que requerirá de propuestas para áreas destinadas a la preservación y protección del suelo, las cuencas hidrográficas, las aguas y en general los recursos naturales. Ya que UNESCO busca áreas de que contienen elementos históricos y científico, Pantasma es de carácter único y excepcional.

5.3. Referencias

Abad, P. (2013). Impactos sobre la Tierra. Madrid: Anuario Astronómico del Observatorio Nacional-Ministerio de Fomento.

Arellano, O. (2017). Modelado estructural del cráter de Impacto de Chicxulub derivado de datos de anomalías Gravimétricas y Magnéticas. UNAM. Ciudad de México. México.

Argote y Denisse, L. (2008). Modelación en 3D de Datos Magnéticos para Caracterizar estructuras Arqueológicas, Tesis de Doctorado en Ciencias, Instituto de Geofísica UNAM, México, pp. 27-54.

Armstrong, M. (1998). Basic Linear Geostatistics. Berlin, Germany Springer-Verlag.

Blakely, R. (1996). Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications, Cambridge University Press, UK.

Bravo, A. (2020). Cartografía Geológica a escala 1:50,000, del Sector NW del Municipio de Santa María de Pantasma, Departamento de Jinotega, Nicaragua. Managua: Universidad Autónoma de Nicaragua, Managua.

Boerner, D; Milkereit B, and Davidson, A. (2000). Geoscience impact: a synthesis of studies of the Sudbury Structure. Canadian Journal of Earth Science. pp. 477-501.

Brenan, R. Peterson, L y Smith, J. (1975). The origin of Red Wing Creek Structure, Mckenzie County, North Dakota. Wyoming Geological Association, Earth Science Bulletin. pp, 1-41,

Chao, E. (1968) Historias de impacto de presión y temperatura metamorfoseadas rocas - Basado en observaciones petrográficas. Neues Jahrbuch Mineralogische Abhandlungen. pp. 209-246

Contreras, H. (2014). Estudio Magnetométrico en Tláhuac de la Subcuenca de Chalco, Zona Conurbada México D.F. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Dence, A. (1972). The nature and significance of terrestrial impact structures. Proceedings 24th International Geological Conference, Montreal, Section 15, 77-89.

Emery X., 2008. Statistical tests for validating geostatistical simulation algorithms, Computers & Geosciences, Vol. 34, No. 11, p. 1610-1620.

French, B. (1998). Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impacts Structures. Lunar and Planetary Institute.

Frischbutter, A. (2002). Structure of the Managua graben, Nicaragua, from remote sensing images. Potsdam, Germany: GeoForschungsZentrum Potsdam.

González, M; Serrano, E. & González, M. (2014). Lugares de interés geomorfológico, geopatrimonio y gestión de espacios naturales protegidos: el Parque natural de Valderejo (Álava, España). Revista de Geografía Norte Grande, pp. 45-64.

Grieve, R. (1987). Terrestrial impact structures. Annual Reviews of Earth and Planetary Science, 15, 245-270.

Grieve, R & Pilkington, M. (1996). The signature of terrestrial impact. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, pp 399-420.

Grieve, (2001). The terrestrial cratering record. In Peuckner-Ehrenbrink, B., and Schmitz B. (eds.), Accretion of Extraterrestrial Matter .Throughout Earth History, Kluwer Academic, 379-402.

Henkel, H and Reimold, W. (1998). Integrated geophysical modelling of a giant, complex impact structure: anatomy of the Vredefort Structure, South Africa. Tectonophysics, 287, 1-20.

Hodgson, G. (2000) Geología Regional de Nicaragua (Introducción al Léxico Estratigráfico de Nicaragua.

Hoffman, V. et al. (2013). Magnetic Properties and Micro Raman Spectroscopy of a Central American Tektite from Belize. Lunar and Planetary Science Conference.

INIDE, (2017). Anuario Estadístico. Managua: Instituto Nacional de Información de Desarrollo. Obtenido de www.inide.gob.ni

Kearey, P. et al. (2002). An introduction to Geophysical Exploration, Wiley, John & Sons Incorporated.

Kowald, L. (2006). ¿Un joven impacto meteorítico en el paisaje volcánico de Nicaragua? Recuperado de <http://www.pantasma.com>

Massotta, M. et al. (2020). 3D X-ray tomographic analysis reveals how coesite is preserved in Muong Nong-type tektites. Scientific reports,10

Melosh, H. (1989). Impact cratering: A geologic process. New York: Oxford Univ.

Meza y Ramírez. (2017) Actualización de la cartografía geológica del Noroeste de boaco (serie 3053-ii), escala 1:25,000, Managua. Universidad Autónoma de Nicaragua.

Nabighian, M y Grauch V. (2005). Anniversary. The Historical development of the Magnetic Method in Exploration: SEG, Geophysics, Vol. 70, pp. 33-61.

Osinski, G., Spray, J y Lee, P (2001). Actividad hidrotermal inducida por impacto dentro de la estructura de impacto de Haughton, Canadá ártico: Generación de un oasis húmedo, cálido y transitorio. Meteorítica y ciencia planetaria. pp.731–745.

Panizza, M. (2001). “Geomorphosites: concepts, methods and examples of geomorphological survey”, Chinese Science Bulletin, vol. 46.

Parasnis, D. (1970). Principios de la Geofísica Aplicada. Departamento de Geodesia y Geofísica de la Universidad de Cambridge, Inglaterra.

Pesonen, J., Elo, S., Lehtinen, M., Jokinen, T., Puranen, R., and Kivekäs, L. (1999). Lake Karikkoselkä impact structure, central Finland: New geophysical and petrographic results. Large Meteorite Impacts and Planetary. Evolution II, Geological Society of America Special Paper. pp131-147.

Pilkington, M., and Grieve, R. A. F. (1992). The geophysical signature of terrestrial impact craters. *Reviews of Geophysics*, 30, 161-181.

Pilkington, M., Hildebrand, A y Ortiz, A. (1994). Modelado y estructura de campo magnético y de gravedad del cráter Chicxulub, México. *Revista de investigación geofísica*. pp. 13147-13162.

Pilkington, M., Hildebrand, A., (2000). Three-dimensional magnetic imaging of the Chicxulub Crater: *Journal of Geophysical Research*, 105: 23,479-23,491.

Rebolledo-Vieyra, M., Urrutia-Fucugauchi, J., López-Loera, H. (2010). Modelado Estructural del Cráter de Impacto de Chicxulub derivado de datos de anomalías gravimétricas y magnéticas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 27, 185-195.

Rochette, P. et al. (2019). Pantasma: Evidence for a Pleistocene circa 14 km diameter impact crater in Nicaragua. *Meteoritics & Planetary Scienc*. pp.1-22.

Saginer I., Gazel E., Carr MJ., Swisher, C y Turrin N. (2011). Las nuevas edades del Plioceno-Pleistoceno $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ llenan vacíos temporales en el registro volcánico de Nicaragua. *Revista de vulcanología e investigación geotérmica*. pp. 143 - 152.

Scott, G., Pilkington, M., Tanczyk, I., y Grieve, R. (1995). Propiedades magnéticas de tres estructuras de impacto en Canadá. *Meteoritics*, pp. 576-577.

Telford, W., Geldart, L. P y Sheriff, R. (1990) *Applied Geophysics*, Cambridge University Press,UK.

UNESCO (2010), "Guidelines and Criteria for National Geoparks seeking UNESCO's assistance to join the Global Geoparks Network (GGN)", United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

5.4. Apéndice

5.4.1. Apéndice A

I. Proceso geoestadístico

La presentación de datos mediante gráficos es algo que se realiza a diario y en forma casi natural por personas de las más diferentes profesiones. En este apéndice se da un esquema general de la elaboración de un variograma, posterior a las muestras (2019 y 2021). A continuación, se muestra el proceso de una distribución particular.

○ Función variograma.R

```
lvar<-fit.variogram(var,model=vgm(20000,"Exp",1000,0))
```

```
plot(var,lvar,col="blue",main="Modelo de variograma
```

```
2021",lab=1,cex.main=1,cex.axis=1,xlab='Distancia (m)',ylab=expression(paste('Semivarianza',m^2,'')))
```

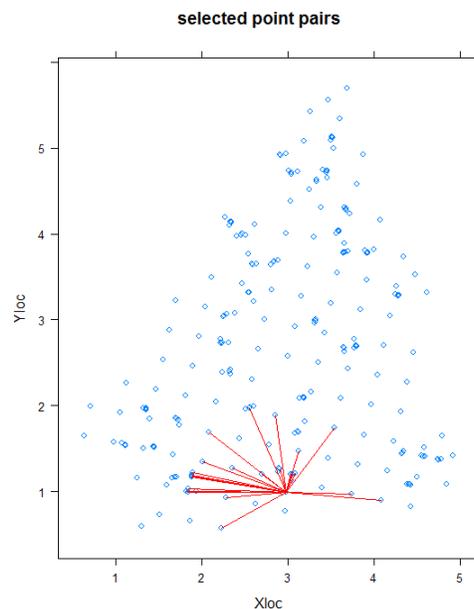


Ilustración 1. Ubicación de observaciones que implican semivarianzas altas en la nube del variograma. Fuente: Porras, (2014).

Una primera herramienta para estudiar la correlación de una muestra es el diagrama de dispersión, mostrado en la **Ilustración 1**. Para realizar este gráfico, primero hay que elegir una distancia de separación específica entre las observaciones.

El método consistiría en identificar para cada observación todas las mediciones ubicadas a una distancia. En el diagrama de dispersión se producirán dos puntos (pares ordenados). La correlación se visualiza de acuerdo con el nivel de agrupamiento (o dispersión) de la nube de puntos en la gráfica.

El siguiente paso consiste en calcular el variograma experimental para distintas clases de distancia. En la **Ilustración 2** se muestran tres elementos característicos del variograma experimental que deben tomarse en cuenta para hacer un ajuste a un modelo teórico.

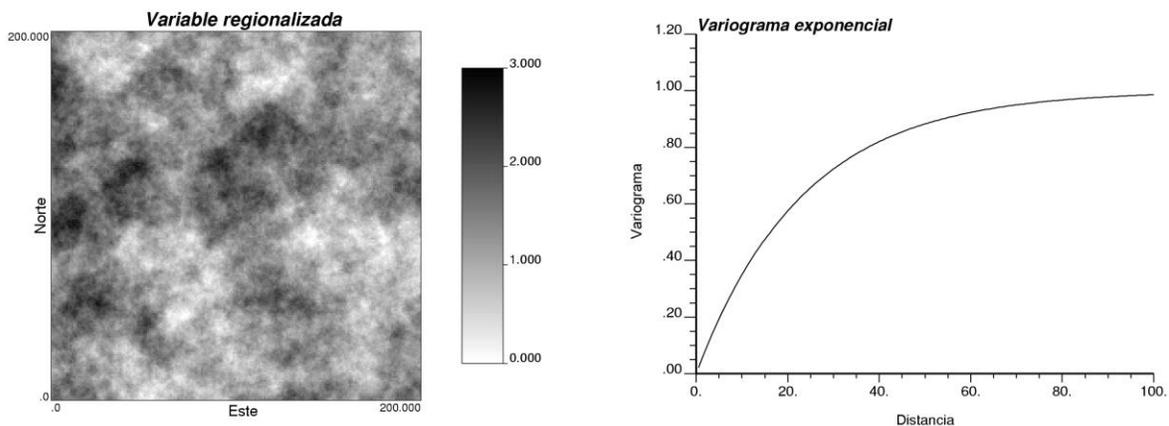


Ilustración 2. Variograma exponencial (derecha) y ejemplo de variable regionalizada asociada (izquierda) Fuente: Emery, (2008).



Nugget

Representa la discontinuidad en el variograma en las distancias que sean menores que la menor distancia dada entre los puntos de muestreo. Esta discontinuidad se puede presentar debido a errores en la medición o a una débil precisión analítica.



Sill

Siendo la meseta el valor de la semivarianza que se vuelve constante a partir de una determinada distancia, por lo que a partir de la cual existe independencia espacial.



Range

Es la distancia para la cual los valores del semivariograma se estabilizan y las muestras tienen dependencia espacial.

○ **Función Kriging.R**

```
krig<-krige(formula=anonT~1,shp,coord,model=lvar)
```

```
krig<-rasterize(krig,rs,krig$var1.pred)
```

El *kriging* que presentaremos a continuación busca mejorar la interpolación de los datos al tomar en cuenta:

- a) sus distancias al sitio a estimar.
- b) las redundancias entre los datos debidas a posibles agrupamientos.
- c) la continuidad espacial de la variable regionalizada (variograma):
 - privilegiar los datos cercanos si el variograma es muy regular en el origen
 - repartir la ponderación entre los datos si existe un importante efecto pepita
 - en caso de anisotropía, privilegiar los datos ubicados en las direcciones de mayor continuidad con respecto al sitio a estimar.

Asimismo, el *kriging* permitirá cuantificar la precisión de la estimación mediante una varianza que mide la dispersión del error potencial cometido en la estimación.

Como herramienta visual se puede utilizar para ilustrar los datos, para estudiar simetría, para estudiar las colas, y supuestos sobre la distribución, también se puede usar para comparar diferentes poblaciones. El *boxplot* es obtenido mediante la siguiente función:

○ **Función Boxplot o Caja de Tukey**

```
boxplot(x~y,outline=F,notch=T,main="Diagrama de cajas",border=c("blue","red"),xlab="",ylab="nT")
```

Un ejemplo en la **ilustración 3**, podemos comparar las distribuciones del número de pasajeros por viaje durante tres años. Se puede apreciar simultáneamente la tendencia y la dispersión.

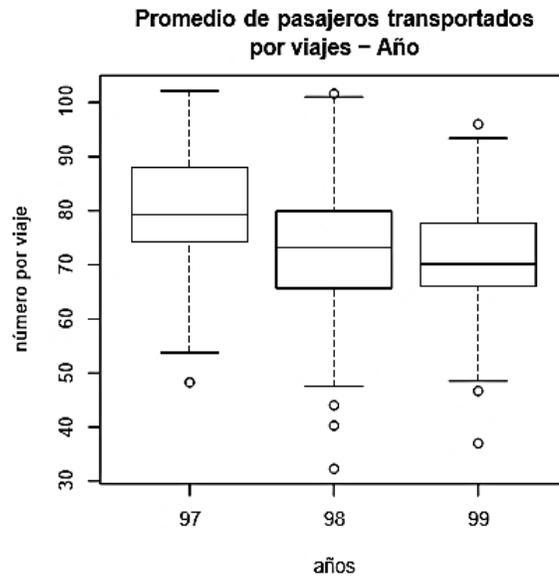


Ilustración 3. Boxplot. Fuente: Emery, (2008).

Existen muchas variaciones de este gráfico, las cuales tratan de involucrar otras características de los datos que en un momento dado puedan ser de interés para el investigador, por ejemplo, para comparar la localización de diferentes muestras y ver si la diferencia es significativa desde el punto de vista estadístico.