

Instalación Y Puesta En Marcha Del Equipo De Susceptibilidad Magnética (Ms3 – Ms2)
Para Su Aplicación En Estudios Petrográficos Y Petrofísicos

Leidy Katherine Remolina Rojas

Informe de Pasantía de Investigación para Optar al Título de Geóloga

Director

Geólogo Ph.D, Carlos Alberto García Ramírez

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías fisicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga
2021

Dedicatoria

A mi papá, mi guía y mi luz desde el lugar donde descansa.

*A mi mamá y mis hermanas, mi motivación más grande, quienes nunca han dejado de
creer en mí ni en mis sueños.*

*A mi mejor amiga Leidy Katherine, por ser mi apoyo incondicional. Gracias por ser y
estar.*

A Silvia, Laura, Liliana y Daniela por crecer conmigo.

A Carlos, Hernán, Ángel, y Nicolás, Fefi por su compañía, y amistad infinita.

Agradecimientos

Al grupo de investigación Energy and Other Non-renewable Resources (EONr3g) por darme la oportunidad de aportar al conocimiento investigativo.

Al profesor Carlos Alberto García, por la confianza depositada en mí.

A la profesora Rocío Bernal, y a Mauricio Niño por apoyarme y guiarme durante este proceso.

A la Escuela de Geología y a la Universidad Industrial de Santander.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Desarrollo de la Pasantía de Investigación	13
2.1 Puesta en Marcha del Equipo.....	13
2.1.1 MS3 – Medidor de Susceptibilidad Magnética.....	14
2.1.2 Trimble Nomad 900.....	16
2.1.3 Sensores	17
3. Protocolo de Conexión.....	26
3. Productos Generados	27
3.1 Fase Inicial	27
3.2 Desarrollo del Manual.....	28
4. Obtención de resultados	30
4.1 MS2B Dual Sensor	31

4.2 Preparación de Muestras y Muestra de Calibración	31
4.3 Toma de Medidas.....	32
4.4 Análisis de Resultados	33
5. Aprendizajes	36
6. Recomendaciones	38
7. Conclusiones	39
Referencias Bibliográficas	41

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Aplicaciones y sensores MS2	14
Tabla 2. Especificaciones técnicas del MS3	15
Tabla 3. Especificaciones técnicas el sensor MS2B	19
Tabla 4. Especificaciones técnicas del MS2C	21
Tabla 5. Especificaciones técnicas del MS2G	23
Tabla 6. Especificaciones técnicas del MS2D	25
Tabla 7. Mediciones de susceptibilidad magnética.....	33

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Magnetómetro MS3.....	15
Figura 2. Trimble Nomad 900	16
Figura 3. Sensor MS2B.....	17
Figura 4. Sensor MS2C.....	19
Figura 5. Sensor MS2G.....	21
Figura 6. Sensor MS2D.....	24
Figura 7. Protocolo de conexión del MS3	26
Figura 8. Equipo de susceptibilidad magnética MS3 y sensores MS2	27
Figura 9. Portada del manual	30
Figura 10. Gráfica de medidas de susceptibilidad magnética.....	35
Figura 11. Susceptibilidad magnética de rocas comunes.....	36
Figura 12. Sistema de transporte de núcleos.....	39

Resumen

Título: Instalación y puesta en marcha del equipo de susceptibilidad magnética (MS2 – MS3) para su aplicación en estudios petrográficos y petrofísicos*

Autor: Remolina Rojas Leidy Katherine **

Palabras Clave: Susceptibilidad magnética, magnetometría, geofísica, petrofísica

Descripción:

La Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander por medio del grupo de investigación “Energy and other non-renewable resources” (EONr3g) adquirió el equipo de magnetometría MS3 – MS2 (+ 4 sensores) con el objetivo de explorar nuevos métodos que ayuden al desarrollo del conocimiento científico en esta área de la geología y concretamente como soporte a estudios petrológicos y petrofísicos.

En esta pasantía se planteó la instalación y puesta en marcha de este equipo MS3 – MS2 (+ 4 sensores). Una vez se realizó la instalación, calibración y manejo del software, se ejecutaron pruebas piloto para diferentes litologías con el objetivo de ajustar y clasificar los resultados.

Para la elaboración del manual se hizo una recopilación de la información obtenida en cada una de las actividades realizadas durante la pasantía de investigación, y de esta manera fortalecer y expandir el equipamiento y los diferentes métodos geofísicos usados en la Escuela de Geología.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Ph.D. Carlos Alberto García Ramirez

Abstract

Title: Installation and start-up of magnetic susceptibility equipment (MS2 - MS3) for application in petrography and petrophysics *

Author: Leidy Katherine Remolina Rojas **

Key Words: Magnetic susceptibility, magnetometry, geophysics, petrophysics.

Description:

The School of Geology of the Industrial University of Santander through the research group "Energy and other non-renewable resources" (EONr3g) acquired the MS3 - MS2 magnetometry equipment (+ 4 sensors) with the aim of exploring new methods that help to the development of scientific knowledge in this area of geology and specifically as a support for petrological and petrophysical studies.

In this internship, the installation and start-up of this MS3 - MS2 equipment (+ 4 sensors) was considered. Once the software was installed, calibrated, and managed, pilot tests were carried out for different lithologies to adjust and classify the results.

For the preparation of the manual, a compilation of the information obtained in each of the activities carried out during the research internship was made, and in this way to strengthen and expand the equipment and the different geophysical methods used in the School of Geology.

* Degree Work

** Physics-Chemical Engineering Faculty, Geology Department, Director Ph.D. Carlos Alberto García Ramirez

Introducción

La geología se destaca por ser una ciencia dinámica y amplia, así mismo lo son los métodos usados para la caracterización de propiedades físicas de las rocas. La magnetometría es un método geofísico rápido, confiable y versátil, que mide las irregularidades presentes en el campo geomagnético de la corteza terrestre. Existe una amplia gama de equipos especializados para este tipo de mediciones, como lo es el medidor de susceptibilidad magnética MS2/MS3.

El MS2/MS3 es un magnetómetro marca Bartington Inc. El equipo que tiene como base científica la susceptibilidad magnética. Este indica el grado de sensibilidad a la magnetización influenciado por un campo magnético, a su vez controlado por el tipo y cantidad de minerales magnéticos en una roca. Teniendo en cuenta todas estas características es clara la diferencia que existirá en la medición del fenómeno de susceptibilidad magnética en diferentes litologías ya sea por su génesis, composición mineralógica, grado de homogeneidad textural e intensidad de alteración de las rocas (Carmichael, 1982).

Este equipo puede ser combinado con una amplia gama de sensores diseñados para adaptarse a una variedad de tipos de muestras y es adecuada para uso en laboratorio y campo. En este caso se usaron 4 sensores (MS2B Dual Frequency Sensor, MS2C Core Logging Sensor, MS2D Probe Handle, MS2G

Justificación

La instalación y puesta en marcha del equipo de susceptibilidad MS2-MS3 es necesaria para mejorar y complementar los procesos de investigación y docencia que adelanta la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Por esta razón, la pasantía de investigación desarrollada generó el manual de uso y pruebas piloto en diferentes tipos de roca, para fortalecer el conocimiento de la medida de la susceptibilidad magnética y las aplicaciones del equipo MS3-MS2 Bartington Instruments, perteneciente al grupo *Energy and Other Non-renewable Resources*.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Estudiar el fenómeno de susceptibilidad magnética e implementar esta técnica de análisis petrográfico y petrofísico mediante el montaje y puesta en marcha del equipo MS2, MS3 y cada uno de sus sensores

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer el marco teórico del fenómeno de susceptibilidad magnética en diferentes tipos de rocas (sedimentarias, ígneas, metamórficas)
- Determinar los parámetros necesarios para la instalación del equipo MS2 – MS3
- Realizar pruebas y análisis de susceptibilidad magnética en diferentes litologías

2. Desarrollo de la Pasantía de Investigación

2.1 Puesta en Marcha del Equipo

Inicialmente, por medio de una revisión bibliográfica se realizó la recopilación de información acerca del funcionamiento del MS2/MS3 y cada uno de sus sensores a través de manuales, y brochures del fabricante, así como diferentes artículos científicos acerca del fenómeno de susceptibilidad magnética aplicado en este tipo de análisis.

Considerando qué puede revelar la susceptibilidad magnética en un el ambiente natural, la magnetización da información sobre los minerales presentes en suelos, rocas, tierra, y particularmente presencia de Fe. De esta manera, las medidas que se hicieron con el MS2/MS3 proveen información similar a las que producen otras técnicas mineralógicas como la difracción de rayos x o análisis de minerales pesados (Dearing, 1999).

La medición de la susceptibilidad magnética es extremadamente simple y conveniente, las ventajas que más se resaltan del MS2/MS3 son que las medidas pueden realizarse en todos los materiales, son seguras, rápidas y no destructivas, pueden hacerse en el laboratorio o en campo y se puede complementar fácilmente con otros tipos de análisis. (Dearing, 1999).

A continuación, en la Tabla 1 se muestran algunas de las aplicaciones:

Tabla 1.

Aplicaciones y sensores MS2

Área	Uso	Sensor
Geología	Mapeo de campo	MS2D
	Identificación de afloramientos	MS2D
	Identificación de zonas minerales	MS2D
	Muestras de mano simples	MS2B, MS2G
Suelos	Medición de campo de perfiles expuestos de suelo	MS2D
	Identificación de proveniencia	MS2G
	Medición de núcleos de suelo	MS2C
	Muestras de mano simples	MS2B
Hidrología y sedimentología	Estudio de cargas de fondo	MS2D
	Muestras simples de sedimento suspendido	MS2B, MS2G
	Muestras simples de carga de fondo	MS2B, MS2G
	Medición de núcleos de sedimentos y proveniencia	MS2B, MS2C

Nota: Tabla de sensores MS2 Bartington. Tomado y editado de: MS2/MS3 Magmetic Susceptibility System, por Bartington Instruments. (2010).

Mediante la información recopilada se reconocieron las funciones del medidor de susceptibilidad magnética MS2-MS3 y cada uno de los sensores, permitiendo la disposición e instalación correcta del equipo.

2.1.1 MS3 – Medidor de Susceptibilidad Magnética

El MS3 es un medidor de susceptibilidad magnética compacto, portátil y liviano con un rango de medición de 26 SI, el cual opera todos los sensores MS2, (MS2: versión antigua del medidor). La adquisición de datos y la configuración del sistema están controladas por el software Bartsoft, proporcionado por el fabricante. Puede ser ejecutado por medio de PC, laptop,

u otros dispositivos compatibles ya que cuenta con una entrada USB. El software brinda al usuario el control sobre las mediciones. (Bartington Instruments, 2010)

Figura 1.

Magnetómetro MS3



Nota: MS3, medidor de susceptibilidad magnética y sus componentes. Tomado y editado de MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment, por Bartington Instruments (2009)

En la tabla 2 se presentan las especificaciones técnicas del MS3:

Tabla 2.

Especificaciones técnicas del MS3

Especificaciones técnicas del MS3

Especificaciones	MS3
Rango	26 SI – volumen específico
Máxima resolución	2x10-6 SI (2 x10-7 CGS)

Unidades	SI o CGS
Tiempo de medición	Desde 0,1 segundo – mínimo
Registro de datos en laboratorio	Sí (con Bartsoft)
Registro de datos en campo	SÍ (con Bartsoft for Windows® CE)
Material	Acetato
Temperatura de operación	-10°C a +40°C
Dimensiones	50 x 25 x 123.5 mm
Conector de interfaz	Hirose HR10-7R-6P

Nota: Especificaciones técnicas del medidor de susceptibilidad magnética MS3. Tomado y editado de: MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment, por Bartington Instruments (2009)

2.1.2 Trimble Nomad 900

El Trimble Nomad 900 que se observa en la Figura 2, es el dispositivo que permite manejar la interfaz de la aplicación Bartsoft, el software del MS3 suministrado por Bartington para la toma de medidas con el MS3 y sus sensores. Pertenece a una amplia gama de computadores utilizados para campo. Está diseñado para soportar diferentes condiciones que pueden ocurrir en el campo: polvo, agua, vibraciones, calor y frío. La batería de litio de larga duración le permite funcionar durante más de 48 horas con una sola carga. También puede adaptarse a una gran variedad de conexiones y fuentes de energía.

Figura 2.

Trimble Nomad 900



Nota: Trimble Nomad 900, adquisidor de datos funcional con Bartsoft. Adaptado de <https://www.trimble.com/Outdoor-Rugged-Computers/nomad.aspx>

Cuenta con una capacidad de 512 MB a 2GB de almacenamiento interno, integrado con GPS, Wi-Fi, y bluetooth. (Ultima computers, 2019). El computador también incluye la última versión de Windows Mobile® 6.1, el cual es compatible en su totalidad con Bartsoft.

2.1.3 Sensores

2.1.3.1 M2SB – Sensor de Dos Frecuencias (Dual – LF, HG).

Figura 3.

Sensor MS2B



Nota: Sensor MS2B de frecuencia dual, por sus siglas en inglés LF: Low frequency (frecuencia baja), HF: High frequency (frecuencia alta), Tomado y editado de: Bartington Instruments MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment, por Bartington Instruments (2009)

El MS2B que se observa en la figura 3. es reconocido como uno de los instrumentos estándar para la caracterización de susceptibilidad magnética en suelos, rocas y sedimentos, ya que se adapta muy bien a muestras sólidas (<10 cm, ya que no deben superar el diámetro de la ranura de inserción, ni tampoco el diámetro del contenedor) o muestras trituradas que pueden ir desde 0,004 mm a 22mm. También es adecuado para mediciones de susceptibilidad de fluidos magnéticos, y micro/nano partículas. El sensor acepta recipientes de muestras de 10 y 20 ml, y cajas plásticas de 25,4 mm y 23 mm. (Bartington Instruments, 2010)

Este sensor tiene la facilidad de realizar las mediciones en dos frecuencias diferentes, o de manera dual: baja frecuencia (LF) o alta frecuencia (HF) (*por sus siglas en inglés low frequency y high frequency*). Esto permite realizar dos lecturas de los campos magnéticos a dos frecuencias diferentes (0,46 y 4,6 kHz). Los minerales ferromagnéticos o superparamagnéticos tendrán el mismo valor en ambas frecuencias, facilitando su detección en suelos o algunos tipos de rocas ricas en Fe. (Dearing, 1999). Cuando no se requieren mediciones de frecuencia dual,

siempre se debe seleccionar el rango de baja frecuencia (LF) ya que esto dará resultados más precisos. En la tabla 3 se presentan las especificaciones técnicas del MS2B.

Tabla 3.

Especificaciones técnicas el sensor MS2B

Especificaciones	MS2B
Precisión de calibración	1% (Muestra de calibración 10ml)
Periodo de medición	Rango x1: 1.5s SI (1.2 CGS) Rango x0.1: 15s SI (12s CGS)
Frecuencias de operación	LF: 0.465kHz \pm 1% HF: 4.65kHz \pm 1%
Máximo de resolución	2 x 10 ⁻⁶ SI (vol.) (2 x 10 ⁻⁷ CGS) (LF & HF)
Deriva a temperatura ambiente	<2 x 10 ⁻⁵ SI (<2 x 10 ⁻⁶ CGS) en 3 minutos (después de 5 minutos de calentamiento)
Dimensiones	110 x 145 x 210mm

Nota: Especificaciones técnicas del medidor del sensor MS2B. Tomado y editado de: MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment, por Bartington Instruments (2009)

2.1.3.2 MS2C – Sensor de Escaneo de Núcleos.

Figura 4.

Sensor MS2C



Nota: MS2C - Sensor de escaneo de núcleos, tomado y editado de MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment, por Bartington Instruments (2009)

Este sensor está diseñado para medir la susceptibilidad magnética núcleos extraídos de una muestra de interés. Usualmente este tipo registros los cambios estratigráficos son muy evidentes, por lo tanto, es una excelente herramienta de correlación de núcleo a núcleo. (Geotek, 2017).

El MS2C puede usarse para determinar propiedades litológicas, así como cualquier cambio de procedencia o diagénesis. Las mediciones de susceptibilidad magnética son capaces de sustituir mediciones de permeabilidad del núcleo, lo que permite determinar modelos de anomalías magnéticas para estudios geofísicos. (Geotek, 2017). El sensor se acomoda fácilmente a diferentes tipos de núcleos y diámetros que van desde 36 mm a 162 mm como se observa en la figura 4. Puede montarse de forma vertical u horizontal. En la tabla 4 se presentan las especificaciones técnicas del MS2C

Tabla 4.

Especificaciones técnicas del MS2C

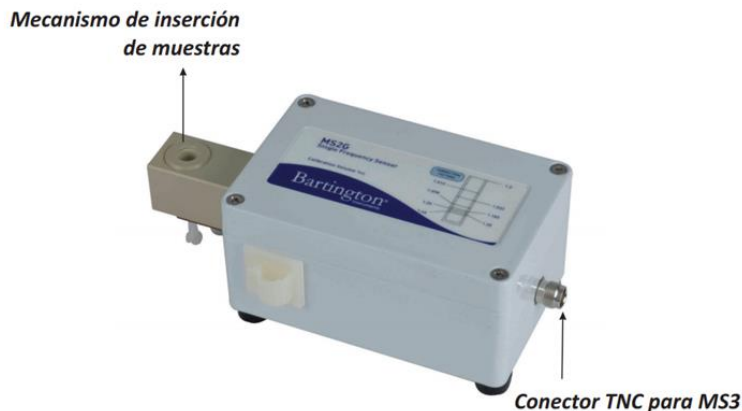
Especificaciones	MS2C
Diámetro interno	30, 36, 40, 45, 47, 50, 60, 70, 72, 80, 85, 90, 93, 100, 110, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 146, 150, 160 o 162mm
Precisión de calibración	5% (muestra de calibración proveída)
Periodo de medición	Rango x1: 1.1s SI (0.9 CGS) Rango x0.1: 11s SI (9s CGS)
Frecuencias de operación	0.565kHz
Resolución espacial	20mm
Deriva a temperatura ambiente	$<2 \times 10^{-5}$ SI (vol.) ($<2 \times 10^{-6}$ CGS) en 10 minutos (después de 5 minutos de calentamiento)
Dimensiones	200 x 290 x 162mm
Material	Policetal blanco

Nota: Especificaciones técnicas del medidor del sensor MS2C. Tomado y editado de: MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment, por Bartington Instruments (2009)

2.1.3.3 MS2G – Sensor de Única Frecuencia.

Figura 5.

Sensor MS2G



Nota: MS2G, Sensor de frecuencia única, tomado y editado de MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment, por Bartington Instruments (2009)

El MS2G, que se observa en la figura 5 está diseñado para realizar mediciones de susceptibilidad magnética en muestras líquidas o trituradas muy finas a finas (0,004 – 0,2mm). El sensor opera en una sola frecuencia (LF) y tiene una excelente estabilidad en cuanto a temperatura. Es usado para realizar mediciones en muestras de materiales homogéneos de grano fino, por ejemplo: partículas en el aire recogidas en filtro, o partículas en suspensión coloidal. (Bartington Instruments, 2010). Permite que se midan volúmenes de hasta 0,2 ml.

La conexión al medidor MS2 se realiza mediante el cable coaxial estándar TNC-TNC. Las muestras se insertan en la parte superior de la cavidad. Las marcas en el frente de la cavidad muestran la posición de la zona de medición. El portamuestras es compatible con otros equipos de medición de rocas, lo que permite una amplia gama de mediciones que deben tomarse sin necesidad de volver a preparar la muestra. En la tabla 5 se presentan las especificaciones técnicas del MS2G.

Tabla 5.

Especificaciones técnicas del MS2G

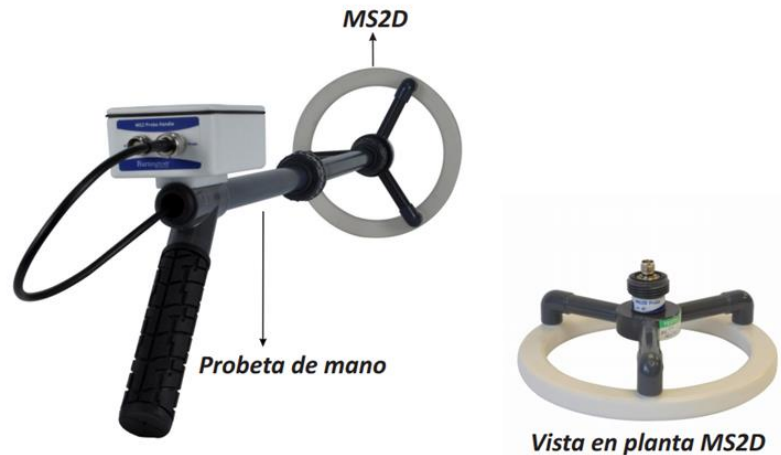
Especificaciones	MS2G
Precisión de calibración	2% (1ml muestra de calibración proveída)
Periodo de medición	Rango x1: 0.9 s SI (0.7 CGS) Rango x0.1: 9s SI (7s CGS)
Frecuencias de operación	1.35 kHz
Dimensión de cavidad de muestra	8,5 mm de diámetro x 28 mm de altura
Región sensible	5 mm de altura en el centro de la cavidad
Deriva a temperatura ambiente	$<2 \times 10^{-5}$ SI (vol.) ($<2 \times 10^{-6}$ CGS) en 5 minutos (después de 5 minutos de calentamiento)
Dimensiones	91 x 67 x 184mm
Material	Aluminio y cerámica

Nota: Especificaciones técnicas del medidor del sensor MS2B. Tomado y editado de: MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment, por Bartington Instruments (2009)

2.1.3.4 MS2D – Probeta de Mano.

Figura 6.

Sensor MS2D



Nota: MSD, compuesto por la probeta de mano y la base vista en planta. Tomado y editado de MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment, por Bartington Instruments (2009)

El MS2D Proporciona mediciones rápidas y no intrusivas de las concentraciones de material ferromagnético dentro de un rango de 100mm de la superficie de la tierra. Este sensor está compuesto de una sonda conectada a un mago con una unidad electrónica que a su vez está conectada al MS3 como se observa en la figura 6. Este sensor puede tolerar un estrés moderado cuando se presiona sobre la superficie de interés, incluso puede tolerar la inmersión en agua hasta 5 metros de profundidad (Bartington Instruments, 2010).

Es empleado principalmente en mapeo y reconocimientos geológicos, descripción de estratigrafía magnética y identificación de horizontes. También se puede utilizar para la caracterización de afloramientos (Dearing, 1999).

En la tabla 6 se presentan las especificaciones técnicas del MS2D.

Tabla 6.

Especificaciones técnicas del MS2D

Especificaciones	MS2D
Profundidad de respuesta	50% a 15mm - 10% a 60mm
Periodo de medición	Rango x1: 0.6 s SI (0.5 CGS) Rango x0.1: 6s SI (5s CGS)
Frecuencias de operación	950 ± 60 kHz
Deriva a temperatura ambiente	10 x 10 ⁻⁵ SI (vol) (<10 x 10 ⁻⁶ CGS) en 20 minutos (después de 20 minutos de calentamiento)
Peso	0.5kg
Material	Resina epoxy reforzada

Nota: Especificaciones técnicas del medidor del sensor MS2B. Tomado y editado de: MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment, por Bartington Instruments (2009)

3. Protocolo de Conexión

El protocolo de conexión del medidor de susceptibilidad magnética MS3 debe estar compuesto por tres partes para su correcto funcionamiento como se observa en la figura 7:

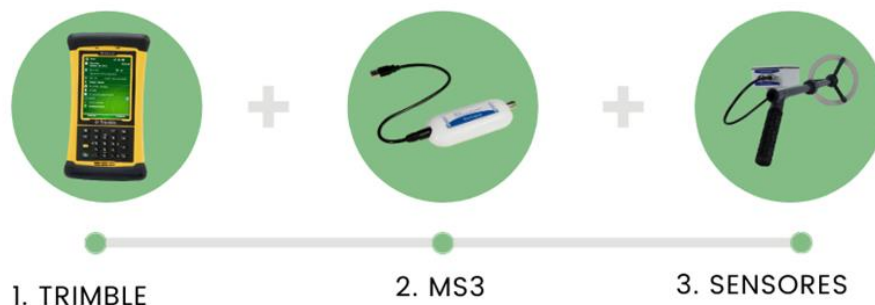
1. Trimble Nomad: Esta es la interfaz para controlar el sistema MS3. El dispositivo portátil contiene una batería recargable que se puede cargar fácilmente, conectándolo a un tomacorriente o a una fuente USB. El dispositivo se ejecuta en el sistema operativo Windows y se carga con el programa de software Bartsoft CE para operar el sensor.

2. MS3: Este medidor compacto alimenta los sensores y procesa la información de medición producida por ellos para producir una medida de susceptibilidad magnética de hasta 26 SI.

3. Sensores MS2: Cualquiera de los sensores incluidos en el equipo MS2B, MS2D, MS2G o MS2 Probe handle.

Figura 7.

Protocolo de conexión del MS3



Nota: Protocolo de conexión para toma de datos de susceptibilidad magnética. Elaboración propia.

3. Productos Generados

A partir de la instalación y puesta en marcha del equipo MS3 – MS2 enfocado en la toma de datos de susceptibilidad magnética aplicado a estudios petrográficos y petrofísicos se realizó un manual instructivo con sus especificaciones técnicas, descripciones, usos, protocolos de funcionamiento y aplicaciones al ámbito geológico. Esto se hizo con el objetivo de generar conocimiento científico e investigativo que ayude a promover el uso de las herramientas y equipos adquiridos por la Universidad Industrial de Santander para su correcto uso y funcionamiento.

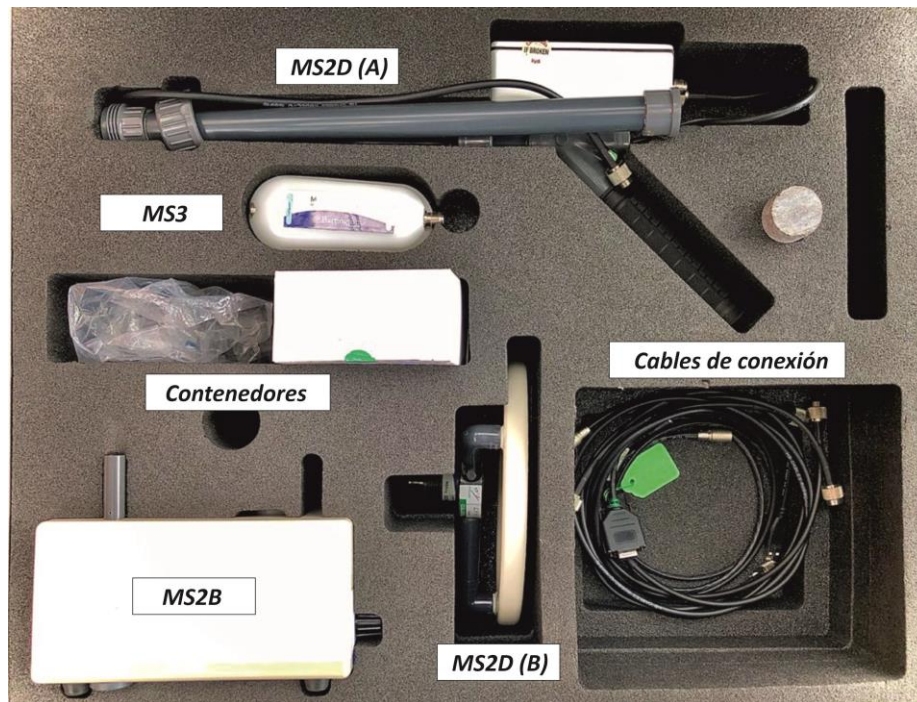
3.1 Fase Inicial

En la fase inicial de esta actividad se realizó una compilación bibliográfica en la cual se reconocieron las características fundamentales de la magnetometría como método geofísico, así como trabajos previos enfocados a esta área de la geología, bibliografía disponible del equipo Bartington para ajustar esta información a los requerimientos de la instalación y funcionamiento del sistema de susceptibilidad magnética para la Universidad Industrial de Santander.

Posteriormente se hizo inventario detallado de cada uno de los componentes del equipo de la figura 8, sus características técnicas y especificaciones, se ejecutó la instalación y puesta en marcha la cual consistió en configurar cada una de las herramientas y sensores del equipo MS3 para un funcionamiento óptimo desarrollando de manera correcta el protocolo.

Figura 8.

Equipo de susceptibilidad magnética MS3 y sensores MS2



Nota: Equipo de susceptibilidad magnética MS3 y sus sensores MS2 perteneciente a la Universidad Industrial de Santander.

3.2 Desarrollo del Manual

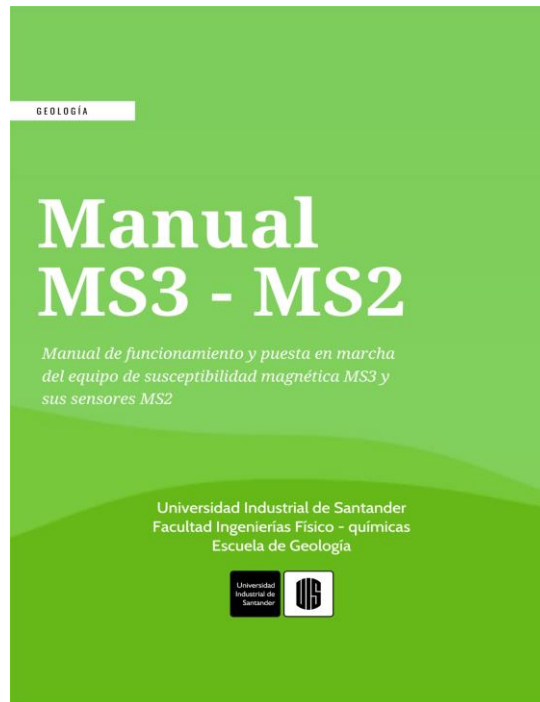
Una vez ejecutadas las actividades de la fase inicial para puesta en marcha del equipo MS3 se adelantó el diseño del manual de funcionamiento “*Manual MS3-MS2, Manual de funcionamiento y puesta en marcha del equipo de susceptibilidad magnética MS3 y sus sensores MS2*” (figura 9) a continuación se muestran los párrafos más importantes desarrollados en el manual:

- Instrucciones de seguridad: Consejos de para evitar daños al equipo MS3 y cada uno de sus sensores.
- Características: Identificación de características físicas, especificaciones, componentes y accesorios del equipo.

- Conceptos básicos: Principios físicos básicos relacionados a la susceptibilidad magnética para una mejor comprensión de los datos que serán procesados por el equipo.
- Información general: Consideraciones de operación de los sensores.
- Recomendaciones: Recomendaciones operacionales que permiten crear el ambiente propicio para la toma de mediciones de susceptibilidad magnética y así evitar la mayor perturbación electromagnética posible.
- Especificaciones del equipo y sensores: Descripción detallada de cada uno de los componentes del equipo (MS3, Trimble Nomad 900, MS2B, MS2C, MS2D, MS2G) así como instrucciones de conexión.
- Preparación de muestras: Consideraciones para el correcto manejo de las muestras previo a las mediciones.
- Software: Paso a paso del manejo de la interfaz operativa del software Bartsoft, descripción de funciones e imágenes ilustrativas que facilitan la navegación del usuario al momento de la toma de medidas con cada uno de los sensores disponibles.
- Informes: Presentación de resultados
- Solución de problemas: Procesos a seguir para la solución de problemas operativos o de conexión del equipo.
- Anexos: Tablas de valores de susceptibilidad magnética establecidos previamente en la literatura.

Figura 9.

Portada del manual



Nota: Portada del Manual MS3-MS2, Manual de funcionamiento y puesta en marcha del equipo de susceptibilidad magnética MS3 y sus sensores MS2.

4. Obtención de resultados

Se realizó la obtención de resultados de susceptibilidad magnética partir del sensor MS2B de frecuencia dual. Cabe resaltar, que el equipo MS3 presenta tres sensores adicionales, sin embargo se presentará un informe del sensor MS2B el cual se adapta más a las características y al tipo de muestras que se planeó analizar

4.1 MS2B Dual Sensor

Generalmente las medidas realizadas con el MS2B implican realizar dos lecturas κ en campos magnéticos creados en dos frecuencias diferentes (0,46 y 4,6 kHz). Las mediciones se utilizan para detectar la presencia de minerales ferromagnéticos superparamagnéticos ultrafinos que se producen como cristales producidos principalmente por procesos bioquímicos en el suelo. Las muestras en las que se encuentran presentes minerales ultrafinos mostrarán valores ligeramente más bajos cuando se midan a alta frecuencia; las muestras sin los minerales mostrarán valores κ idénticos en las dos frecuencias. El interruptor en la parte frontal del sensor MS2B permite la elección de rangos de baja frecuencia (LF) o alta frecuencia (HF). (Dearing, 1999)

Sin embargo, para la toma de mediciones no fue necesario el uso de las dos frecuencias, ya que las muestras fueron previamente identificadas y clasificadas petrográficamente, y no se encontró rastro de ningún mineral superparamagnético.

4.2 Preparación de Muestras y Muestra de Calibración

En primera instancia, se midió la muestra de calibración de 10 cm³ proporcionada por Bartington, está compuesta de un material ferromagnético con una susceptibilidad magnética moderadamente alta.

Durante este proceso el sensor MS2B mediante el MS3 creó un campo magnético que detectó la magnetización de la muestra y calculó la relación de la susceptibilidad magnética entre los dos (el equipo y la muestra de calibración). El valor obtenido se llama susceptibilidad de

volumen o κ (griego k o kappa) y representa la relación entre la magnetización y el campo (80 A m-1) en el esquema SI.

Se repitió esta medición tres veces para observar posibles variaciones las cuales no deberían ser mayores al 2%, teóricamente cualquier pequeña variación en el valor de la susceptibilidad de la muestra de calibración se debe a que las mediciones de aire no son exactamente cero (Dearing, 1999). Esto se debe a una combinación de un entorno de trabajo no ideal y una pequeña cantidad de deriva en los instrumentos.

4.3 Toma de Medidas

Para iniciar con la toma de medidas se siguió el protocolo de configuración del sensor MS2B incluido en el manual de uso del MS3 (*Manual MS3-MS2, Manual de funcionamiento y puesta en marcha del equipo de susceptibilidad magnética MS3 y sus sensores MS2*):

1. Conexión el sensor MS2B al medidor MS3 + Trimble Nomad como se explica en el Manual de operación, asegurándose de que las conexiones no estuvieran demasiado apretadas, 15 minutos antes de la toma de medidas, esto para adaptar el sensor a la temperatura y condiciones ambientales.
2. Se realizó la calibración del equipo midiendo la muestra del 10cm³ proporcionada por Bartington
3. Se seleccionó el rango de frecuencia baja (Low Frequency) y un rango de medida de x1 ya que no se necesitaron mediciones de frecuencia dual.

4. Para insertar la muestra, primero levantó la platina usando el pilar ubicado en la parte superior del sensor. Posteriormente se colocó la muestra en la platina perfectamente centrada. Luego se bajó la muestra en la cavidad para realizar la medición.

5. Teniendo el dispositivo conectado se procedió a tomar una muestra de vacío o “en blanco” para estabilizar el censor ante cualquier perturbación electromagnética externa. Posteriormente se midieron las 12 muestras de diferentes litologías y se realizó un promedio de tres mediciones por muestras para así minimizar el error en la toma de medidas.

4.4 Análisis de Resultados

Se analizaron 12 muestras variantes en litología (ígneas y metamórficas) y en composición mineralógica, lo que dio como resultado un amplio espectro del fenómeno de susceptibilidad magnética, medidos en unidades SI en formato notación científica, los rangos fueron registrados en la tabla 7:

Tabla 7.

Mediciones de susceptibilidad magnética

MUESTRAS DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA				
MUESTRA	VALOR SM 1	VALOR SM 2	VALOR SM 3	VALOR PROMEDIO SM
Uz-6	1,02690E-03	1,76790E-03	1,57830E-03	1,45770E-03
Dr-04	1,52080E-03	1,02340E-03	1,86750E-03	1,47057E-03
Fsa-14-2	2,75560E-03	2,01776E-03	3,18900E-03	2,65412E-03
Ps-5-1	3,75360E-03	2,91100E-06	3,40010E-03	2,38554E-03
MUESTRAS DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA				
MUESTRA	VALOR SM 1	VALOR SM 2	VALOR SM 3	VALOR PROMEDIO SM
Dr-10	4,46220E-03	3,81560E-03	4,89450E-03	4,39077E-03

Dr-09	4,34690E-03	5,90010E-03	4,79220E-03	5,01307E-03
Fsa-18-1	5,17640E-03	7,16060E-03	5,93470E-03	6,09057E-03
Uz-5	1,90000E-04	2,47890E-04	1,87280E-04	2,08390E-04
Ps-5-2	8,08000E-05	9,03420E-05	8,67800E-05	8,59740E-05
Ca-5-1	1,13300E-05	1,00422E-05	1,12410E-05	1,08711E-05
G2-28-2	1,16800E-05	1,25600E-05	1,22202E-05	1,21534E-05

Nota: Valores de susceptibilidad magnética obtenidos del MS2B.

De la Figura 10, se puede observar que las mediciones de susceptibilidad magnética mostraron una amplia variabilidad de propiedades magnéticas en rocas ígneas y rocas metamórficas, posiblemente condicionadas por diferentes fases minerales magnéticas principalmente magnetita con variaciones en su concentración dadas durante el proceso de cristalización. (Rodríguez, 2009).

Figura 10.

Gráfica de medidas de susceptibilidad magnética

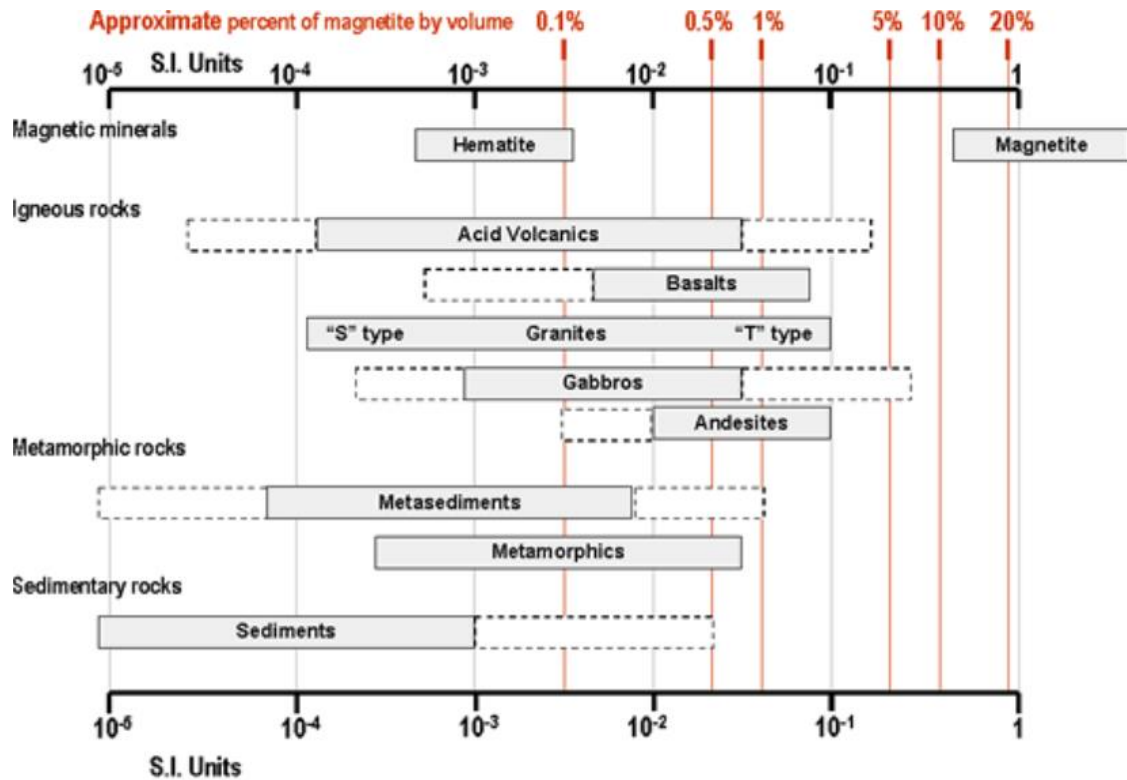


Nota: Gráfica de medidas de susceptibilidad magnética obtenidas en cada una de las muestras. Elaboración propia.

Como es de esperar la muestra Fsa-18-1 (diorita) mostró el valor de susceptibilidad más alto comprobando de esta manera que los valores más altos de susceptibilidad magnética se presentan en rocas ígneas (Carmichael, 1982) como se observa en la figura 11.

Figura 11.

Susceptibilidad magnética de rocas comunes



Nota: Valores de susceptibilidad magnética en diferentes litologías comunes. Tomado de Department of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences – The University of British Columbia: <https://www.eoas.ubc.ca/courses/eosc350/content/foundations/properties/magsuscept.htm>

5. Aprendizajes

El equipo de susceptibilidad magnética MS3-MS2 es un dispositivo que presenta una amplia gama de usos y aplicaciones, tanto en el sector investigativo como industrial. Este método posee ventajas que sobresalen sobre otras técnicas de análisis de susceptibilidad magnética en estudios geológicos tanto en laboratorio como en campo:

- Disposición, transporte e instalación del equipo.
- Facilidad en la medición de propiedades magnéticas en rocas, minerales y muestras líquidas.
- Análisis de una cantidad grande de muestras en un periodo de tiempo breve, lo que permite a su vez agilizar y reducir los tiempos de estudios petrográficos y petrofísicos.
- No se requiere una preparación de muestras compleja.
- La cantidad de muestra necesaria para llevar a cabo el estudio es muy pequeña por lo que no se requieren espacios grandes para el almacenamiento de las muestras antes y durante el análisis.
- Toma de mediciones altamente sensibles que permiten detectar variaciones menores al 1% de material magnético presente en la muestra.

El servicio que ofrece el área investigativa de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander por medio de la aplicación de esta clase de herramientas es un aporte que puede contribuir a generar una alianza estratégica entre el sector industrial y educativo.

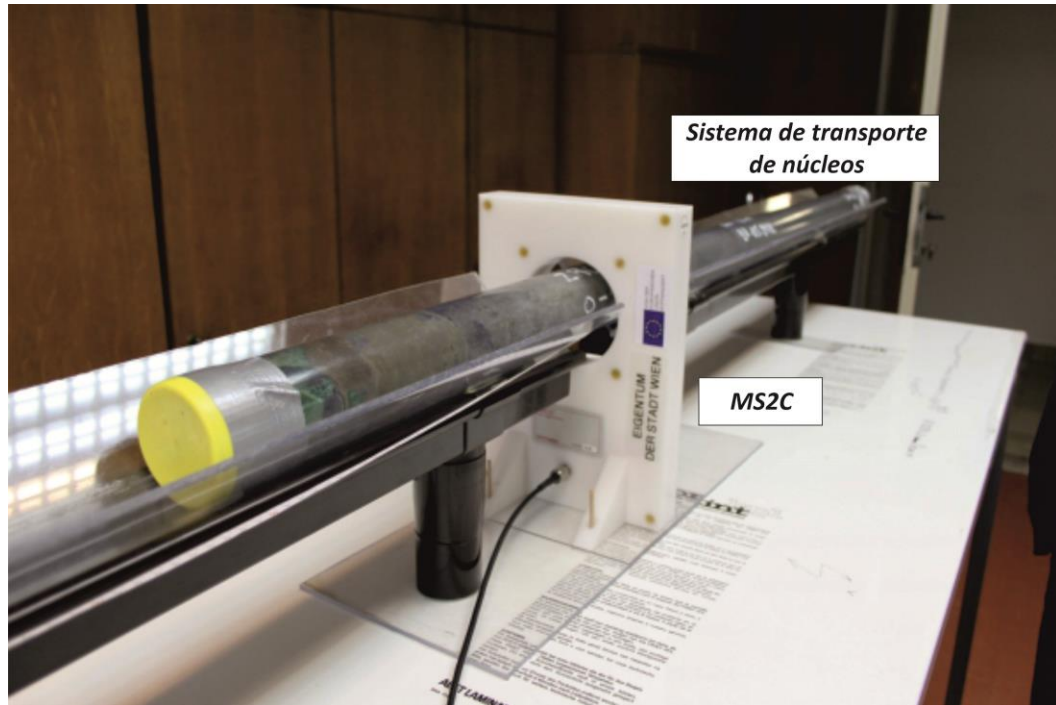
6. Recomendaciones

El MS3-MS2 de marca Bartington fue adquirido para incentivar la investigación y la exploración de diferentes estudios geofísicos por parte de los estudiantes de la Escuela de Geología, sin embargo existen algunos factores que pueden llegar a afectar el correcto y completo funcionamiento del equipo dentro y fuera de las instalaciones de la Universidad.

- El equipo y sus sensores deben instalarse y ponerse en marcha en un lugar sin objetos metálicos ni electrónicos que pudiesen llegar a generar un campo magnético considerable, por lo cual, se recomienda asignar un salón o espacio dentro de la Escuela de Geología libre de perturbaciones electromagnéticas para así obtener datos confiables durante las mediciones.
- El sensor MS2C está diseñado para medir la susceptibilidad magnética de núcleos extraídos de una muestra de interés, el núcleo pasa a través del sensor y las mediciones se toman en diferentes intervalos. Sin embargo, el MS2C requiere de un medio para pasar el núcleo a través del sensor de una manera controlada como se observa en la figura 12. El equipo de la Escuela de Geología no cuenta con este sistema de transporte de núcleos automatizado lo que imposibilita el uso del sensor de manera adecuada. Sería ideal la implementación de este complemento para el máximo aprovechamiento de esta herramienta.

Figura 12.

Sistema de transporte de núcleos



Nota: Sistema de transporte de núcleos, complemento del MS2C. Tomado y editado de Sestar, base de datos de instrumentos de investigación científica www.sestar.irb.hr/en/index

7. Conclusiones

- Se logró determinar que el equipo de susceptibilidad magnética MS3-MS2 es un método eficaz a la hora de realizar mediciones rápidas, y de bajo costo que permiten el estudio petrográfico y petrofísico de una amplia variedad de tipos de muestras.
- A partir de las pruebas realizadas con el sensor MS2B y el posterior análisis de la susceptibilidad magnética en 12 muestras de diferentes litologías, se obtuvieron valores altos de susceptibilidad magnética en rocas ígneas, posiblemente

condicionadas por diferentes fases minerales magnéticas principalmente magnetita con variaciones en su concentración dadas durante el proceso de cristalización. (Rodríguez, 2009). Esto comprueba así, la exactitud y confiabilidad de los datos obtenidos durante las mediciones.

- Es importante identificar las áreas de mejora para el máximo aprovechamiento del equipo como lo son un sitio ideal de instalación y la adquisición de complementos que mejoran el rendimiento de los procesos de toma de datos.

Referencias Bibliográficas

- Bartington Instruments. (2009). MS2/MS3 Magnetic Susceptibility Measuring Equipment.
- Bartington Instruments. (2010) *Operation Manual for Bartsoft for Windows CE*.
- Bartington Instruments. (2010). MS2/MS3 Magnetic Susceptibility System. Oxford, England.
- Carmichael, R. S. (1982). *Magnetic Properties of Minerals and Rocks: CRC Handbook of Physical Properties of Rocks*.
- Dearing, J. (1999). *Environmental Magnetic Susceptibility, Using the Bartington MS2 System*.
- Geotek. (2017). Obtenido de <https://www.geotek.co.uk/sensors/magsusc/>
- Linares , R., & López, J. (2012). Compatibilidad electromagnética. *Ingeniare, Revista chilena de ingeniería*, 5-7.
- Rodríguez, J. A. (2009). Comportamiento de la susceptibilidad magnética en el ambiente ofiolítico del nordeste de Cuba oriental. *Minería y Geología*, vol. 25, núm. 4., 1-25.
- The University of British Columbia. (2010). *Department of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences – The University of British Columbia*. Obtenido de <https://www.eoas.ubc.ca/courses/eosc350/content/foundations/properties/magsuscept.htm>
- Ultima computers. (2019). Obtenido de Ultima computers: <https://www.ultima-computers.co.uk/trimble-nomad-rugged-handheld-computer>