



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**Eficiencia de la dispersión ultrasónica de partículas para la  
caracterización de la materia orgánica de los Andosoles en  
la zona del volcán Nevado de Toluca**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**Licenciado en Ciencias de la tierra**

**P R E S E N T A:**

**EDWIN HAZEL LÓPEZ ORTIZ**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DOCTOR BRUNO MANUEL CHÁVEZ VERGARA**

**CIUDAD DE MÉXICO, 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

1. Datos del alumno

López  
Ortiz  
Edwin Hazel  
59142200  
Universidad Nacional Autónoma de  
México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
311149685

2. Datos del tutor

Dr.  
Bruno Manuel  
Chávez  
Vergara

3. Datos del sinodal 1.

Dra.  
Elizabeth  
Solleiro  
Rebolledo

4. Datos del sinodal 2.

Dr.  
Héctor Víctor  
Cabadas  
Báez

5. Datos del sinodal 3.

Dra.  
Ana María Lizeth  
Caballero  
García

6. Datos del sinodal 4.

Dr.  
Felipe Francisco  
García  
Oliva

7. Datos del trabajo escrito.

Eficiencia de la dispersión ultrasónica de partículas para la caracterización de la materia orgánica de los Andosoles en la zona del volcán Nevado de Toluca  
59p.  
2018

## **Agradecimientos**

**A la Facultad de Ciencias y a la Coordinación de Ciencias de la Tierra.**

**Al Instituto de Geología de la UNAM (IGI, UNAM)** por las facilidades otorgadas para el uso de sus instalaciones y laboratorios en los que realicé los análisis.

**Al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM)** por las facilidades otorgadas para el uso de sus instalaciones y laboratorios en los que realice los análisis.

**Al Laboratorio de Física de Suelos (IGI, UNAM-LANGEM)** por el apoyo, la paciencia y la motivación para realizar los análisis del presente trabajo.

**Al Laboratorio de Biogeoquímica (IGI, UNAM-LANGEM)** por el apoyo en el trabajo de laboratorio y por aportarme conocimientos en mi formación profesional.

**Al Dr. Bruno Manuel Chávez Vergara** por su apoyo en el desarrollo del presente trabajo, por sus consejos para un mejor desarrollo de éste y por aportarme sus conocimientos para mi formación académica.

**Al Biol. Jorge René Alcalá Martínez** por el apoyo durante el proceso de los análisis de laboratorio, por la paciencia en el desarrollo de la metodología, por la motivación y despertar el interés en el tema y por aportarme sus conocimientos para mi formación académica.

**Al M. en C. Arturo Huitzilihuitl Atilano Alvarado** por la paciencia, apoyo y comprensión en el desarrollo de la metodología y por aportarme sus conocimientos para mi formación académica.

**A la M. en C. Ofelia Ivette Beltrán Paz** por su apoyo y paciencia en el trabajo realizado en el Laboratorio de Biogeoquímica.

**A la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo** por despertar en mí el interés por el estudio del suelo, por acercarme con las personas indicadas para el desarrollo del presente trabajo y por acceder a ser parte de mi jurado.

**Al Dr. Héctor Víctor Cabañas Baez, al Dr. Felipe Francisco García Oliva y a la Dra. Ana María Lizeth Caballero García** por interesarse por mi trabajo, por sus consejos y por aceptar ser parte de mi jurado.

## **AGRADECIMIENTOS A TÍTULO PERSONAL.**

**A mis padres Ana María del Carmen y Javier** por todo su apoyo, amor y cariño a lo largo de mi vida, por enseñarme a ser un hombre dedicado y comprometido con el estudio, por haberme forjado como un hombre de bien y que nunca se debe de dar por vencido pesé a las circunstancias que se presenten en la vida.

**A mi hermana Valeria** por ser mi compañera de aventuras, además de sangre, por estar presente con su amor y cariño a lo largo de mi vida.

**A mis abuelos Carmen y José** por comprensión, enseñanzas, por tener fe en mí y por su apoyo y amor a lo largo de toda mi vida.

**A mi abuelo Martin** por su comprensión, enseñanzas y por tener fe en mí a lo largo de mi vida. **A mi abuela Carmen †** que desde el cielo sé que esta orgullosa de su nieto y estará siempre conmigo en todo momento.

**A mis tíos** por su apoyo, por inyectarme ganas de seguir superándome y por su cariño a lo largo de mi vida.

**A mis primos** por cada momento que me han brindando a lo largo de mi vida al igual que su apoyo incondicional.

**Al Dr. Bruno Manuel Chávez Vergara** por la confianza depositada en mí para el desarrollo de este trabajo, por asesorarme y proporcionarme consejos que son importantes para mi vida académica y profesional en un futuro, además de siempre motivarme para ser un mejor profesionalista.

**Al Biol. Jorge René Alcalá Martínez** por su sencillez al momento de asesorarme en la metodología, por la motivación al realizar este trabajo, por la confianza depositada en mí para la realización del mismo y por contagiarme de ganas para superarme en todo momento.

**Al M. en C. Arturo Huitzilihuitl Atilano Alvarado** por su apoyo durante el desarrollo de la metodología, por siempre motivarme a investigar más del tema, por su compromiso y entrega para que este proyecto tuviera éxito.

**A José Eduardo Rocha Espinosa** por su apoyo incondicional, por su cariño, por motivarme a ser una mejor persona y seguir superándome como ser humano en todo momento y en cualquier situación que se llegue a presentar. Gracias por entenderme en todo y por ser ese motor de felicidad en este y en todos los momentos por venir.

**A mis mejores amigos de carrera (Karla, José, Gessel, Lupita, Héctor y Mario)** por creer en mí, por enseñarme que el trabajo en equipo y la amistad no están peleadas, a aprender más cosas, por su apoyo en todo momento y ayudarme a crecer como persona y no darme por vencido.

**A mis mejores amigos (Diana, Héctor, Gio, Angy, Mónica, Fer, Iván, David y Leti)** quienes me han enseñado que hay que tener carácter para tomar una decisión, por el apoyo que me han dado y por sus ánimos al igual que siempre creer en mí.

**A mis amigos** que han estado presentes en diferentes momentos de mi vida y me han dejado una enseñanza.

**A la Dra. Elena Centeno García** por motivarme y despertar en mí la curiosidad por la Geología y por motivarme a buscar lo que más me apasiona y no darme por vencido pese a cualquier situación.

**Al Dr. Juan Francisco Sánchez Beristáin** por su sencillez al aportarme sus conocimientos y enseñarme a que un profesor puede ser una guía muy importante en el proceso de formación académica.

**Al Dr. Alberto Vásquez Serrano** por manera tan original y creativa de contagiarme su gusto por la geología estructural y la geología de campo. Por su dedicación por que aprendiera los conocimientos de estas ramas de la geología.

**A la M. en C. Elizabeth Rangel Granados** por cada detalle y dedicación para aclarar mis dudas, por siempre motivarme a ser un mejor estudiante y sobre todo por su manera original de impartirme sus conocimientos para mi formación académica.

**A la M. en EMSyS Isabel Mejía Luna** por siempre inculcarme la disciplina en un laboratorio y en el estudio, por su sencillez y la originalidad en como me transmitió los conocimientos y por el apoyo y a la motivación para ser un excelente estudiante.

**A la Dra. Ana María Lizeth Caballero García** por sus sencillez, claridad y precisión de enseñarme los conocimientos para mi formación académica, por inculcarme disciplina y dedicación en todos mis trabajos, así como, las ganas de estudiar y aprender más acerca de los temas.

**A mis profesores** que me han aportado conocimientos en diferentes disciplinas, quienes me han enseñado a ser comprometido con el trabajo y ha no ser conformista a siempre cuestionarme más cosas.

# Tesis dedicada a...

*A mis padres por todo su amor,  
cariño y apoyo.*

*A mi hermana por siempre ser mi  
compañera de aventuras.*

# Índice

1. Introducción .....	1
2. Marco teórico.....	3
2.1 Suelo.....	3
2.1.1 Propiedades físicas.....	4
2.1.1.1 Color .....	4
2.1.1.3 Humedad.....	6
2.1.1.4 Estructura .....	6
2.1.1.5 Porosidad.....	8
2.1.1.6 Densidad real y aparente .....	8
2.1.1.5 Textura y granulometría.....	9
2.1.2 Propiedades químicas .....	13
2.1.2.1 Conductividad eléctrica.....	13
2.1.2.2 Potencial de hidrógeno .....	13
2.1.2.2. Materia orgánica .....	14
2.2 Andosoles.....	17
2.3 Dispersor ultrasónico. ....	19
3. Antecedentes .....	23
4. Justificación .....	25
5. Objetivos. ....	26
6. Metodología .....	27
6.1 Área de estudio. ....	27
6.2 Muestreo de suelos.....	29
a. Análisis de laboratorio (propiedades físicas) .....	30
6.3 Color. ....	30
6.4 Humedad.....	30
6.5 Determinación de densidad aparente, real y porosidad.....	30
6.6 Análisis granulométrico de partículas con humedad de campo. ....	31
6.7 Calibración del equipo de ultrasonido de alta frecuencia. ....	34
6.8 Análisis granulométrico de partículas a través de ultrasonido de alta frecuencia. ....	35
b. Análisis de laboratorio (propiedades químicas).....	37
6.9. Potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica. ....	37
6.9.1. Determinación de material no cristalino (potencial de hidrogeno).....	37

6.10 carbono orgánico en diferentes fracciones granulométricas. ....	37
7. Resultados. ....	39
a. Propiedades físicas ....	39
7.1 Color. ....	39
7.2 Humedad ....	39
7.3 Determinación de densidad aparente, real y porosidad.....	39
7.4 Análisis granulométrico de partículas con humedad de campo. ....	40
7.5 Calibración del equipo de ultrasonido de alta frecuencia. ....	41
7.6 Análisis granulométrico de partículas a través de ultrasonido de alta frecuencia. ....	42
b. Propiedades químicas ....	45
7.7 Potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica. ....	45
7.8 Carbono orgánico en diferentes fracciones granulométricas. ....	46
8. Discusión. ....	48
8.1. Estandarización del método de dispersión para suelos de origen volcánico ....	48
8.2. Distribución de la materia orgánica en suelos volcánicos bajo diferentes especies vegetales. .....	49
9. Conclusión ....	51
10. Anexo.....	52
10.1 Comportamiento de la potencia en función de la vibración de amplitud ....	52
10. Referencias.....	54

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fases presentes en el suelo.....	4
Figura 2 Fenómeno de reflexión de la longitud de onda en el espectro de luz visible la cual produce el color en los objetos (Tomado de <a href="http://www.hamze.co">http://www.hamze.co</a> ).....	5
Figura 3 Sistema de las tablas de Munsell para describir el color del suelo (Porta et al 2003).....	6
Figura 4 Clasificación de la estructura de los agregados con base en su forma geométrica (Tomado de Porta et al 2003).....	7
Figura 5 (1) Densidad aparente (suelo + agua y aire). (2) Densidad real (suelo) .....	9
Figura 6 Triángulo de clases texturales, de acuerdo con la USDA .....	11
Figura 7 Descripción de las fuerzas que actúan en una partícula de suelo, donde se puede ver la fuerza de empuje (E), la aceleración (a), el peso (mg), la distancia de caída (x) y la fuerza de rozamiento (Fr).....	12
Figura 8 Gráfica de las diferentes frecuencias con ejemplos que abarcan distintos intervalos de frecuencia (Tomado de Serway et al., 2008).....	17
Figura 9 Transformación de energía eléctrica a energía en forma de ondas ultrasónicas por medio de un transductor.....	19
Figura 10 Temperaturas necesarias para el cálculo de la capacidad calorimétrica del contenedor...20	
Figura 11 Montaje del experimento para el cálculo de la entalpía donde el vaso se encuentra dentro de un aislante térmico.....	22
Figura 12 Distribución global de los suelos de origen volcánico. Tomado de la USDA.....	23
Figura 13 Suelos predominantes de la provincia geológica faja volcánica transmexicana tomado de Ahrens et al., (2013). .....	28
Figura 14 Mapa Geológico de la zona del volcán Nevado de Toluca tomado de Macías (2005) y García et al., 2002.....	29
Figura 15. Mapa de Área Natural Protegida Nevado de Toluca tomado de Bernal et al., (2011). ...	30
Figura 16 Figura 16. Perfil donde se muestra las diferentes altitudes donde se recogieron las muestras. A mayor altitud se tiene la muestra de cobertura vegetal de pastizal, en una altitud media la cobertura de pino y en una altitud más baja la cobertura de bosque mixto.....	31
Figura 17 Destrucción de la materia orgánica en las muestras .....	32
Figura 18 Frascos sellados con Parafilm para agitación de 12 horas. ....	33
Figura 19 Pipeta de 25 ml que se utilizó para extraer la fracción arcilla .....	34
Figura 20 (a) Inicio de la floculación y (b) material floculado en el fondo de la probeta. ....	34
Figura 21 Aislante térmico para evitar la pérdida de calor a través de las paredes del vaso.....	36
Figura 22 Fracción arcilla recuperada en los vasos de precipitados y el restante (fracción limo) se encuentra en las probetas. ....	37
Figura 23 Muestra molida en mortero de ágata y tamiz 80 $\mu\text{m}$ de abertura. ....	38

Figura 24 Gráfica del decremento de la temperatura con respecto al tiempo. En la esquina superior se muestra la ecuación obtenida al graficar estos datos. ....	42
Figura 25 Gráficas del comportamiento de los porcentajes de las fracciones contra la energía de dispersión. En la parte superior izquierda se encuentran las arenas, en la superior derecha se encuentran los limos y en la parte inferior las arcillas.....	45
Figura 26 Muestras con la fenolftaleína y Fluoruro de sodio a los 10 minutos de reacción. ....	47
Figura 27 Escala de tipo Linkert aplicado a la intensidad de color de reacción de la fenolftaleína y Fluoruro de sodio. ....	47
Figura 28. Distribución de carbono orgánico en las diferentes fracciones granulométricas de los tres sitios de estudios.....	48
Figura 29 Incorporación de material volcánico al suelo (zona geológica reciente) y la zona donde no hay una incorporación de material volcánico (zona geológica antigua).....	49
Figura 30 Comportamiento del pH, cantidad de materiales no cristalinos y de la conductividad eléctrica conforme a la altitud .....	50
Figura 31 Montaje del desarrollo experimental para medir la temperatura de calentamiento .....	53

## INDICE DE CUADROS

Tabla 1. Fracciones granulométricas y su justificación (Tomado de Porta, 2003).....	10
Tabla 2 Formas del carbono orgánico en el suelo (Hartemink et al., 2014) .....	16
Tabla 3. Color de las muestras con humedad de campo y secadas al aire. ....	40
Tabla 4. Promedio del porcentaje de humedad obtenido en las muestras.....	40
Tabla 5. Densidad aparente de las muestras .....	40
Tabla 6. Densidad real y porosidad de las muestras. ....	41
Tabla 7. Porcentaje de las fracciones granulométricas de las muestras .....	41
Tabla 8. Datos obtenidos del calor del contenedor (medido 10 veces) aplicando la ecuación 8. ....	42
Tabla 9. Ecuación de entalpía a una amplitud de 100% en un solo ciclo.....	43
Tabla 10. Tiempos y energía para cada una de las muestras.....	43
Tabla 11. Diferentes fracciones granulométricas obtenidas a distintos niveles de energía.....	43
Tabla 12. Resultados obtenidos del fraccionamiento del suelo con el método de la pipeta contra el método de dispersor ultrasónico (energía más cercana a los valores del método tradicional).....	46
Tabla 13. pH y Conductividad eléctrica de las muestras.....	46
Tabla 14. Incremento y estabilización del pH durante un intervalo de tiempo de 10 minutos.....	46
Tabla 15. Porcentaje de carbono orgánico de las muestras. ....	47
Tabla 16. Porcentaje de carbono orgánico en las diferentes fracciones granulométricas de las muestras.....	48
Tabla 17. Función de entalpía acorde a la vibración de amplitud. ....	54
Tabla 18. Potencia obtenida acorde a la vibración de la amplitud de la onda.....	54

## 1. INTRODUCCIÓN

El suelo es considerado como un elemento fundamental para el desarrollo de la vida y desde el punto de vista antrópico, es esencial para la obtención de recursos alimenticios. Inicialmente, el interés por el estudio del suelo, se ha desarrollado parcialmente a los progresos conseguidos en los conocimientos agrícolas y forestales. (Porta et al., 2003). Para que un suelo se forme se requiere que converjan un conjunto de variables tanto espaciales como temporales, lo cuales son denominados factores formadores: material parental, tiempo, clima, relieve y los organismos. Cada uno de estos factores y sus interacciones influirán en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo a través de su evolución, lo cual derivará en un aumento de complejidad a lo largo del tiempo, mientras no exista una perturbación en su desarrollo.

Una de las propiedades que puede preservar la historia de los procesos a través de los cuales se ha desarrollado el suelo es la materia orgánica (MOS). La MOS está constituida por los residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición, así como la biomasa microbiana, y es causa y consecuencia de otras propiedades biológicas, físicas y químicas del suelo (Christensen, 1985). La materia orgánica se encuentra en diferente concentración y contenido entre distintos suelos. Particularmente, en suelos originados de material volcánico como son los andosoles, presentan elevada concentración MOS derivado de ser el soporte de abundante vegetación y algunas características que permiten que esta permanezca por largo tiempo (Peña-Ramírez et al, 2009). La elevada concentración de MOS al ser un rasgo distintivo ha sido empleada como una característica para su clasificación. Los andosoles en México se encuentran distribuidos en la Faja Volcánica Transmexicana y en las zonas donde se haya presentado actividad volcánica (Volcán Chichonal y Tacaná) que es una zona con presenta actividad volcánica con una superficie relativa de 1.3% del territorio nacional (SEMARNAT, 2012), pero que alberga comunidades vegetales de bosque templado muy importantes en la provisión de servicios ambientales (Galicia et al, 2018).

La materia orgánica no solo facilita la estructura, la infiltración y amortigua los cambios químicos en los suelos, también es almacén y fuente de energía y nutrientes para la actividad biológica, lo cual resalta la necesidad de entender la dinámica de la MOS para comprender los flujos de materia y energía en los ecosistemas terrestres (Matus et al., 2000). Así también, el interés en el estudio de la MOS se ha incrementado en las últimas décadas debido a que se ha reconocido que el carbono orgánico del suelo es un componente importante del ciclo global del carbono, el cual llega a significar el 2/3 del carbono orgánico de la biosfera, y también es en el suelo donde se acumula más C que en otro compartimento de la geosfera (FAO, 2001).

La materia orgánica es continuamente empleada por la comunidad microbiana del suelo, la cual si tuviera acceso ilimitado a esta la mineralizaría completamente y no se podría acumular. Lo que previene su completa mineralización es la existencia de mecanismos de protección, estos mecanismos pueden ser químicos y/o físicos (von Lützow et al., 2006). Particularmente, los mecanismos físicos limitan la accesibilidad espacial de los microorganismos hacia los residuos orgánicos (Dungait et al., 2012). Estos mecanismos están relacionados con la interacción de los compuestos orgánicos con las partículas minerales de los suelos, las cuales se pueden dar a nivel de adsorción a superficies, intercalación en láminas de arcillas, formación de agregados, entre otros. La adsorción de la MOS en superficies minerales es considerada como uno de los mecanismos más

importantes para su protección, sustentado en que en algunos estudios se ha determinado que la mayor parte del carbono se encuentra asociado a las partículas de limo y arcilla (Christensen, 1992).

Entender las interacciones que tienen la materia orgánica y las partículas minerales nos puede proveer de información para conocer más de este importante almacén de C, sin embargo, existe la continua limitante metodológica para el estudio de la materia orgánica asociada a superficies minerales. Lo anterior debido a que la extracción con soluciones ácidas o alcalinas puede modificar su composición química y no hay una selectividad sobre la superficie en la actuación. Por lo anterior, el método de dispersión ultrasónica y cuantificación de la materia orgánica asociada a partículas minerales resulta ser adecuada, al no modificar su concentración y/o composición química, y por consecuencia, no existirán sesgos para su caracterización. Así también este método tiene la ventaja de que la energía disipada en la suspensión puede ser medida y las condiciones pueden ser reproducibles (Morra et al., 1991).

Aunque en México se ha realizado un estudio en el tema (Báez et al., 2011), su empleo no está generalizado. Lo cual ha dificultado la estandarización del método de dispersión ultrasónica aplicado al estudio de carbono orgánico en suelos de origen volcánico; por lo cual este trabajo tiene como finalidad probar un método de estandarización de dispersión ultrasónica de partículas minerales para suelos volcánicos y su empleo en la cuantificación del carbono orgánico asociado a partículas minerales en suelos volcánicos bajo diferentes coberturas vegetales.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 SUELO

Se define como un cuerpo natural arreglado en capas (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua (figura 1). El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios) (FAO, 2017). El suelo es una cubierta delgada de material no consolidado, sobre la litosfera el cual permite la actividad biológica y mantiene los procesos de retroalimentación positiva para su continua evolución. Los procesos que originan la suelo, o pedogénesis, son dependientes de las características de cada uno de los factores que influyen en su formación, los cuales se describen a continuación:

a. **Material Parental:** La formación de las rocas es producto de los diversos procesos geológicos que ocurren en el planeta y sus propiedades de las rocas van a influir en el proceso de formación del suelo. Por ejemplo, el tipo de roca (ígneas, sedimentaria o metamórfica) será una variable que influya en la velocidad de meteorización, así como, los productos que se desprendan de esta; por tanto, van a influir en las propiedades del suelo como: la concentración de iones (p.e. P, S, Al, Ca, Mg, Fe, Si, etc), pH y composición de minerales reactivos con influencia en la retención de nutrientes (p.e. arcillas, minerales de rango corto).

b. **Clima:** La temperatura y la precipitación son factores importantes para la formación de suelo. Un primer efecto está relacionado con la meteorización, definida como fragmentación física y alteración química de la roca (Tarbuck *et al.*, 2005), que definirán las características físicas y químicas del suelo. Así también los ciclos de humedecimiento y secado pueden influir en la descompresión, expansión, disolución, oxidación, hidrólisis y solubilización de minerales. Por tanto, se pueden definir zonas climáticas donde existe el desarrollo de suelos con características distintivas a éstas. Por ejemplo: en regiones donde hay un clima seco, la cantidad de materia orgánica es baja, mientras que en climas tropicales el contenido de materia orgánica es alto (Porta *et al.*, 2003)

c. **Relieve:** Las variaciones que existen en el terreno pueden inducir el desarrollo de una variedad de tipo de suelos. Ya que estas diferencias en el paisaje condicionan procesos de transportación y/o depositación de material en la zona.

La comprensión de cómo ha funcionado el sistema suelo-paisaje resulta esencial para inferir características y comportamiento de los suelos a partir de las formas de relieve y viceversa (Porta, 2003)

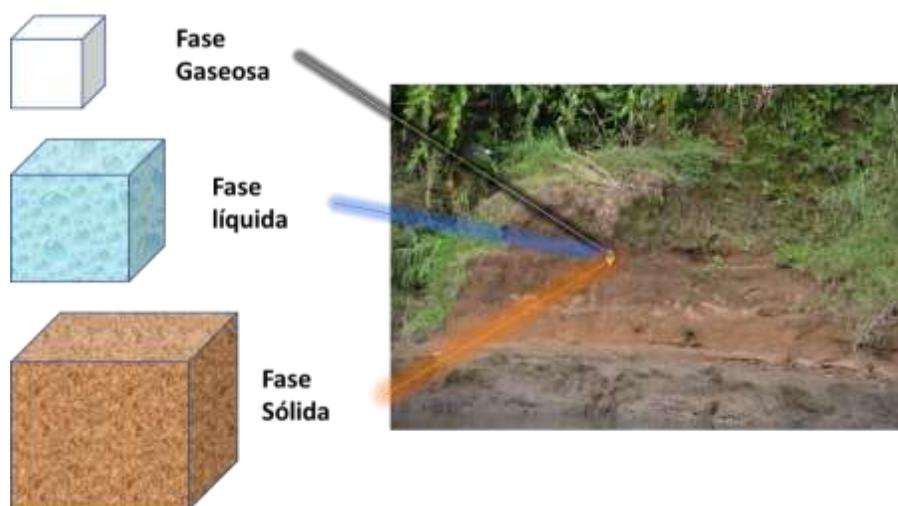
d. **Factores bióticos:** Los organismos como plantas, animales, bacterias y hongos contribuyen a la formación de suelos. Se sabe que la vegetación, en el proceso de formación, cumple con las siguientes funciones: aportación de materia orgánica, interviene en la meteorización de la roca, construye el sistema de huecos por medio de las raíces (favorece la circulación de aire y agua a través del suelo).

A su vez, la fauna tiene una participación importante en el proceso de formación de suelo, ya que esta puede actuar en la superficie favoreciendo el proceso de meteorización de la roca o puede actuar en el interior de la roca como trituradora y mezcladora de suelo dando pie a la estructuración, la formación de crotovinas y galerías y a la formación de horizontes Bw.

Por último, la microbiota del suelo (bacterias, hongos, algas y protozoos) tienen un papel importante en el suelo, ya que influyen en la meteorización de las rocas y por su intervención en los procesos de biodegradación de la materia orgánica y en la formación de complejos órgano-minerales.

e. **Tiempo:** Como se sabe, en el transcurso de un día existen diversos cambios en la temperatura y contenido de agua en la superficie, en la actividad biológica, en la erosión, entre otras más; a lo largo del año cambia la salinidad, la humedad, la temperatura, el contenido de nutrientes, la tasa de erosión, etcétera; o bien a lo largo de décadas puede variar: los procesos de meteorización, se presenta una diferenciación de horizontes, cambio en las poblaciones de flora y fauna, etc. El tiempo como factor formador afecta a las variaciones a lo largo de los años (Porta *et al.*, 2003), es decir, el tiempo influye en los cuatro factores de formación y van a tener diferentes repercusiones sobre la formación de un suelo. Por consecuencia, la evolución de un suelo es variable y puede involucrar de cien a miles de años.

Como resultado de los procesos de formación, cada suelo presentará propiedades físicas, químicas y biológicas diferentes. Dado a que el material parental está constituido por una fase mineral, en el suelo se encuentra una fase mineral, una fase líquida y una fase gaseosa (Figura 1). Cada una de estas fases puede ser caracterizadas a través las propiedades del suelo, y por ello se puede conocer cuáles fueron sus factores formadores.



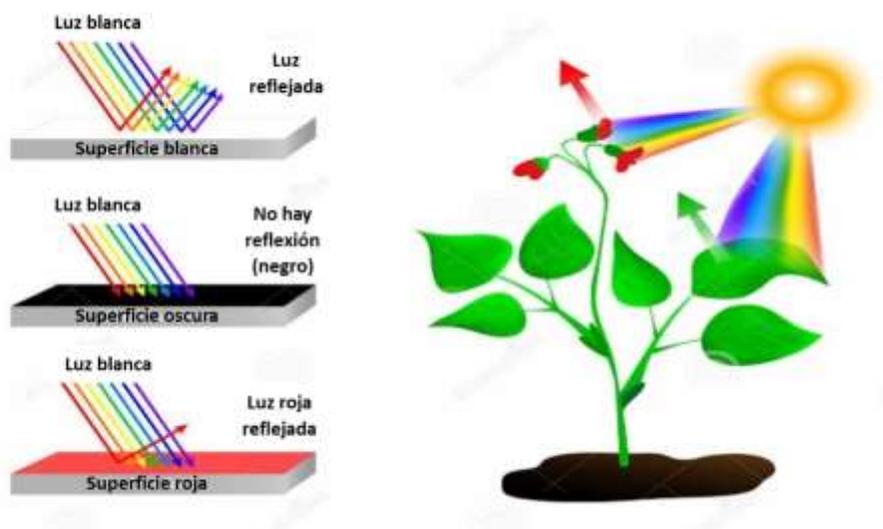
**Figura 1. Fases presentes en el suelo.**

## 2.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS

### 2.1.1.1 COLOR

El color del suelo es una propiedad física relacionada con la longitud de onda en el espectro visible cuando esta es reflejada en la superficie del suelo, cuando no se presenta el fenómeno de reflexión el color que se muestra es oscuro (Figura 2). Las características del color (tono e intensidad) que se encuentran tanto en los horizontes como en la superficie, permiten realizar inferencias acerca de los procesos pedogenéticos que ha sufrido el suelo durante su evolución. El color del suelo está determinado por la cantidad y estado de los minerales de hierro y/o manganeso, así como de la

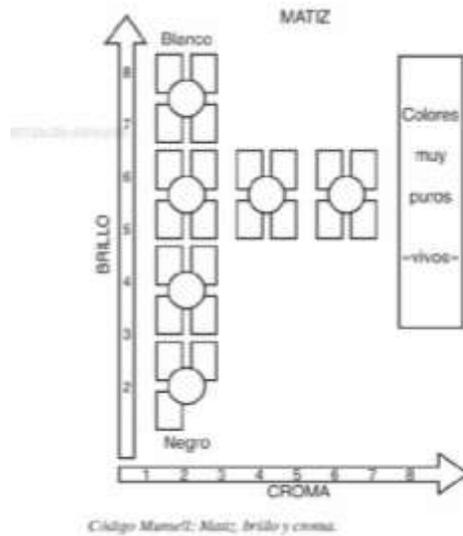
materia orgánica, además de la existencia de procesos de oxidación o reducción. El color del suelo afecta, indirectamente, la temperatura y la humedad, a través de su efecto sobre la energía radiante (Flores y Alcalá, 2010).



**Figura 2. Fenómeno de reflexión de la longitud de onda en el espectro de luz visible la cual produce el color en los objetos (Tomado de <http://www.hamze.co>).**

Para describir los colores del suelo, se utiliza un código de colores que permite una descripción objetiva y una denominación normalizada: El Código Munsell, que es el que utilizan las tablas de Munsell (Figura 3). A continuación, se describen estos parámetros (Porta *et al.*, 2003).

- **Matiz:** Expresa la longitud de onda dominante en la radiación reflejada
- **Brillo (Intervalo de 1 – 8):** Expresa la radiación reflejada respecto a la radiación incidente. Es función del contenido de humedad, por lo que al describir un color deberá indicarse si se hace en muestra seca o bien en húmedo.
- **Croma (1 a 8):** Expresa la pureza relativa del color y corresponde a la intensidad de color espectral dominante o saturación cromática. A mayor pureza mayor croma.



**Figura 3. Sistema de las tablas de Munsell para describir el color del suelo (Porta et al 2003).**

### 2.1.1.3 HUMEDAD

Se ha visto que el color y la conductividad eléctrica del suelo están influenciadas por la humedad que contenga este. Esta propiedad se define como la cantidad de agua que está presente en el suelo, la cual va estar definida fundamentalmente por la textura, el contenido de materia orgánica, la composición de la fracción mineral y orgánica, el arreglo que presente el medio físico y el aporte de agua que sea agregado ya sea natural o artificialmente.

Para su determinación se trata de establecer el contenido de agua en el suelo en un porcentaje con base en la masa (masa gravimétrica) o en el volumen. La manera más común de medir el porcentaje de humedad es colocando una muestra representativa del suelo en un horno de laboratorio hasta llegar al peso constante (Flores y Alcalá, 2010). El cálculo de la humedad se realiza con la siguiente ecuación.

$$W(\%) = \frac{M_{sh} - M_{ss}}{M_{ss}} * 100 \quad (1)$$

donde  $M_{sh}$  es la masa del suelo en húmedo,  $M_{ss}$  es la masa del suelo seco y  $W$  es el porcentaje de humedad del suelo.

### 2.1.1.4 ESTRUCTURA

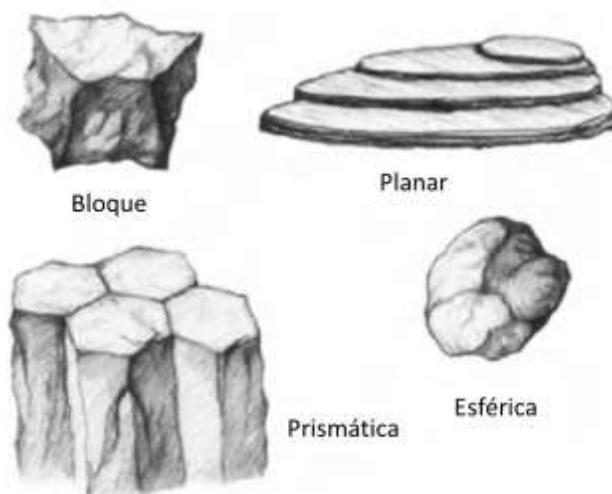
La estructura del suelo es la clave importante para el funcionamiento del suelo. Es la base para albergar la vida de las plantas y animales que viven en el suelo. Una estructura estable y una buena estabilidad de agregados ayuda a que el suelo tenga una buena fertilidad, contribuye a la porosidad, la productividad agronómica y disminuye la erosión (Khan *et al.*, 2013). Esta propiedad del suelo es una de las principales propiedades, ya que el arreglo que presente la fase sólida estará determinando la fase líquida y gaseosa del suelo; por lo anterior va influir en algunas propiedades físicas como la porosidad, densidad aparente, el régimen hídrico, el régimen térmico, la distribución que presente la materia orgánica, etc.

Otro aspecto importante de la estructura es que la existencia de una relación estrecha entre su desarrollo y la génesis que tuvo el suelo, ya que la presencia y su desarrollo son evidencia de un proceso de evolución (Jaramillo *et al.*, 2012)

La estructura del suelo se define como el ordenamiento que presentan los granos individuales en partículas secundarias o agregados y el espacio de huecos que llevan asociados, todo como producto de interacciones fisicoquímicas entre las arcillas y los grupos funcionales que se encuentran en la materia orgánica.

Los granos se suelen unir de forma natural entre sí para formar unidades secundarias de mayor tamaño, que tiene carácter persistente y se denominan agregados (Porta *et al.*, 2003). Este término es utilizado generalmente en la agronomía para describir unidades estructurales especialmente en las capas superficiales del suelo o en horizontes A.

La estructura del suelo es clasificada de acuerdo con su forma como se muestre en la figura 4 (esférica, prismática, planar y bloques), por su tamaño (muy fino, fino, medio, grueso y muy grueso) y por su estabilidad (débil, moderado y fuerte).



**Figura 4. Clasificación de la estructura de los agregados con base en su forma geométrica (Porta et al 2003).**

El grado de desarrollo de estructura va a depender del tipo de partículas que estén presentes y de las fuerzas de atracción y repulsión que generen entre ellas. La organización de partículas puede construir un simple empaquetamiento o bien dar lugar a unidades de fábrica (Porta *et al.*, 2003). Además, otras fuerzas que pueden generar la formación de agregados, por ejemplo, las fuerzas generadas por el cambio de estado del agua, la fuerza de tensión superficial producto de la evaporación del agua y la presión generada por el efecto osmótico de los cationes intercambiables en la superficie de las arcillas.

La estabilidad de un agregado se define como la capacidad que tiene para mantener su forma al ser sometido a una serie de fuerzas externas, un ejemplo de estas fuerzas son: las gotas de lluvia, el paso del agua o algún proceso de dispersión (de manera artificial). Esta propiedad de los agregados es importante ya que, dependiendo de su estabilidad, va influir en otras propiedades del suelo como

la humedad, retención de materia orgánica, textura, etc. Después de los factores que pueden formar un agregado, estos deben de tener una estabilidad, esta hace referencia a la capacidad para mantener su forma de ser sometido a fuerzas inducidas artificialmente, es decir, de la humectación, del impacto de las gotas de lluvia o el paso del agua o un determinado proceso dispersivo.

#### 2.1.1.5 POROSIDAD

El espacio poroso de un suelo es la parte del mismo que en su estado natural está ocupado por aire y agua. El volumen de este espacio poro depende mucho de la disposición de las partículas sólidas (Flores y Alcalá, 2010). El espacio poroso es producto de la agregación de las partículas minerales como se describió en la estructura del suelo.

La porosidad puede explicarse a nivel global, atendiendo a los huecos de un horizonte en morfología, dimensiones laterales, longitud, rugosidad, tortuosidad, conectividad, etc (Flores y Alcalá, 2010) conjunto, o bien en un agregado. La descripción detallada del espacio poroso incluye, cantidad, continuidad, orientación, distribución y forma que pueden llegar a tener los huecos.

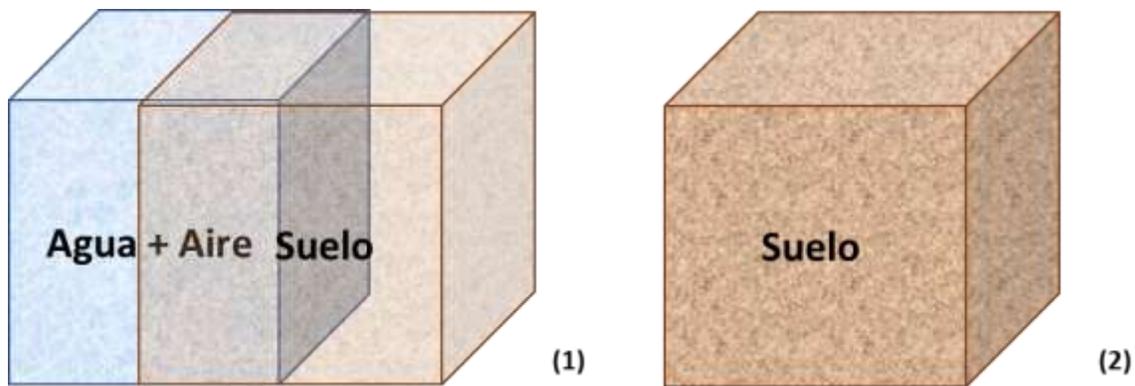
#### 2.1.1.6 DENSIDAD REAL Y APARENTE

Las partículas de un suelo varían en su composición y en su densidad. La densidad de la fase sólida del suelo está definida como la masa total de los sólidos dividida por el volumen total de ellos. Se define la densidad o masa específica  $\rho$  de un cuerpo como la relación entre su masa  $m$  con respecto a su volumen  $V$ .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

La unidad en el Sistema Internacional (SI) para la densidad son kilogramos entre metro cúbico ( $kg/m^3$ ). Los valores típicos varían de 2.5-2.8  $kg/m^3$ , siendo 2.65  $kg/m^3$  el valor más representativo de muchos suelos y el valor de la densidad de partícula del cuarzo (Flores y Alcalá, 2010).

La densidad aparente del suelo es la relación entre la masa del suelo seco y el volumen total, incluyendo al espacio poroso (figura 5-1). Contrariamente, la densidad real se define como la relación de la masa del suelo seco y el volumen total, pero sin contar el espacio poroso que existe entre las partículas (figura 5 -2). En la agricultura, la masa del suelo seco se refiere a este valor después de secar este en estufa a 110 °C durante 24h o hasta alcanzar un peso constante y, el volumen, se refiere al agua que desplaza el suelo en una probeta de 100ml (Flores y Alcalá,2010).



**Figura 5. (1) Densidad aparente (suelo + agua y aire). (2) Densidad real (suelo)**

#### 2.1.1.5 TEXTURA Y GRANULOMETRÍA

La textura del suelo es la proporción de partículas de suelo de diferentes tamaños (Porta *et al.*, 2003) describe que los distintos horizontes de un suelo pueden estar formados por fragmentos de rocas de más de un metro, hasta partículas menores de un micrómetro. La proporción de partículas de diferente tamaño que constituyen la fracción mineral de los suelos va estar influenciado por los factores de formación del suelo (Smith, 2007).

La granulometría, a diferencia de la textura, se define como la expresión de proporciones relativas de las distintas partículas minerales inferiores a 2mm, agrupadas por clases de tamaños, en fracciones granulométricas, tras la destrucción de los agregados (Porta *et al.*, 2003). Por tanto, es de suma importancia conocer estas proporciones ya que pueden inferirse otras propiedades y características cuya relación directa se basa en el uso y comportamiento del suelo. Por ejemplo, se mencionan algunas propiedades de suelo que se ven afectadas:

- a. Capacidad de almacenamiento de nutrientes
- b. Capacidad para admitir aguas residuales, purinas y otros residuos
- c. Facilidad para la circulación del agua
- d. Capacidad de retención de agua disponible para las plantas y de suministro
- e. Orden de magnitud de superficie específica.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO por sus siglas en inglés) clasifica las fracciones granulométricas como se puede observar en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Fracciones granulométricas y su justificación (Tomado de Porta, 2003).**

<b>Límite</b>	<b>Fracción</b>	<b>Justificación</b>
<b>&gt;2mm</b>	Elementos Gruesos	A partir de este tamaño las fuerzas de unión actúan difícilmente y las partículas se mantienen siempre separadas sin cohesión, incluso estando húmedas.
<b>200µm</b>	Límite superior de la arena fina IUSS	Por debajo de este tamaño los granos de los minerales formadores de rocas se presentan separados, esta circunstancia tiene interés para estudios mineralógicos de arena.
<b>50µm</b>	Límite superior del Limo USDA*	El predominio de las partículas de tamaño limo (50-2 µm) en un suelo le confiere unas características físicas desfavorables, inestabilidad estructural, apelmazamiento, susceptibilidad a formar costra superficial, deficiente movimiento del agua, etc.
<b>20µm</b>	Límite superior del limo IUSS*	Límite arbitrario
<b>≤2µm</b>	Arcilla	Partícula con importante carga eléctrica superficial. Superficie específica elevada.
<b>≤0.2µm</b>	Arcilla Fina	Comportamiento coloidal. Superficie específica elevada. Partículas con carga eléctrica superficial.

\**Departamento de agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture, por sus siglas en inglés USDA).*

\**La Unión Internacional de Ciencias del Suelo (The International Union of Soil Sciences, por sus siglas en inglés IUSS)*

En el suelo, se presenta combinaciones de las fracciones granulométricas que pueden clasificarse en grupos a los cuales se les conoce como clases texturales. Al definir los nombres de las clases texturales, se ha querido dejar patente que la acción de ciertas fracciones es más significativa que otra con el propósito de determinar las propiedades del suelo, el comportamiento de la fase líquida y gaseosa y del comportamiento vegetal (Porta,2003). En la siguiente figura se presenta el diagrama de las clases texturales por porcentaje de tamaño de partícula de acuerdo con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en el inglés).



donde  $\rho_w$  es la densidad del líquido en que sedimenta. Por último, se toma en cuenta la fuerza de rozamiento que se describe en la siguiente ecuación 5.

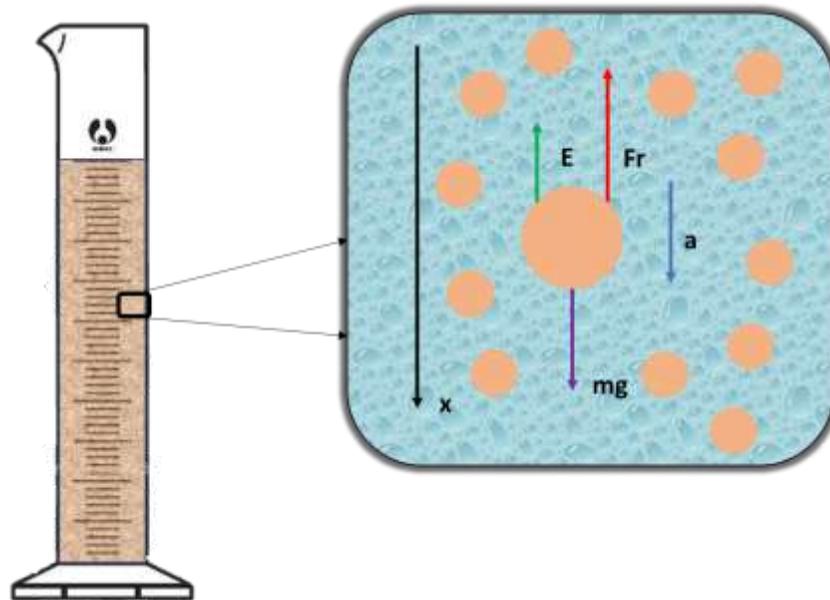
$$F_r = 6\pi r\eta v \quad (5)$$

donde  $\eta$  es la viscosidad dinámica y  $v$  es la velocidad de sedimentación, la fuerza de rozamiento es proporcional a la velocidad y su expresión es denominada como la ley de Stokes (Figura 7). En una sedimentación en régimen laminar, la resultante de estas fuerzas es nula, de que se deduce la expresión de la velocidad terminal de sedimentación descrita en la ecuación 6.

$$v = \frac{2}{9} \frac{r^2(\rho_s - \rho_w)g}{\eta} = \frac{r^2(\rho_s - \rho_w)g}{18\eta} = Kr^2 = \frac{h}{t} \quad (6)$$

siendo  $K = f(T)$  = constante para una determinada temperatura,  $t$  el tiempo de sedimentación y  $h$  la altura de sedimentación (profundidad del pipeteado). La ecuación 6 permite calcular, para una altura dada, el tiempo que debe de transcurrir para que las partículas de diámetro aparentemente igual o inferior a  $2r$  sean las únicas que estén sedimentando a dicha altura, en condiciones de isotermas. Con ello se consigue muestrear partículas del mismo tamaño.

El método de la pipeta consiste en dejar sedimentar una muestra de suelo en un medio líquido durante un determinado tiempo, al cabo del cual cuantifica la cantidad de partículas de un determinado tamaño que hay en suspensión; la medida de las partículas en suspensión se hace directamente en un medio acuoso, por medio de un hidrómetro, o muestreando aquella con una pipeta y cuantificando, posteriormente, la cantidad de material extraído (Jaramillo, 2002).



**Figura 7. Descripción de las fuerzas que actúan en una partícula de suelo, donde se puede ver la fuerza de empuje (E), la aceleración (a), el peso (mg), la distancia de caída (x) y la fuerza de rozamiento (Fr).**

## 2.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS

### 2.1.2.1 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.

Así como el color puede ayudar a inferir algún proceso pedogénico y/o caracterizar algún rasgo descriptivo de los suelos, la conductividad eléctrica es una propiedad importante para el estudio de este sistema. La conductividad eléctrica (CE) del suelo es la capacidad de conducir la corriente eléctrica, la cual depende de la cantidad de iones positivos y negativos que se encuentran en la solución del suelo, por eso la CE de la solución de suelo es un indicador del contenido de sales (Matías *et al*, 2012). Esta propiedad esta influencia de otras propiedades fisico-químicas del suelo, es decir, la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, la humedad del suelo, capacidad de intercambio catiónico, salinidad, pH y contenido de elementos como  $Ca^{+2}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$  y  $Mg^{+2}$ , el tipo de suelo, etc.

### 2.1.2.2 POTENCIAL DE HIDRÓGENO

Entender las propiedades químicas del suelo, es de gran importancia ya que gracias ellas nos dan un complemento para entender su proceso de formación, evolución y comportamiento. Una de estas propiedades es el grado de acidez o basicidad que tenga un suelo. Para calcular esta variable se utiliza el potencial de hidrógeno.

Se expresa por el potencial de hidrógeno (pH), definido como el logaritmo de la inversa de la actividad de protones ( $H^+$ ) en la fase líquida del suelo (Porta *et al.*, 2003) como se puede observar en la ecuación 11:

$$pH = \log \frac{1}{H^+} \quad (7)$$

Al medirse en el suelo, indica el grado de saturación de bases que dependen de la arcilla dominante y el grado de disociación de los iones hidrógeno procedente de los lugares de intercambio o la extensión de la formación de dichos iones por la hidrólisis del ion  $Al-3$ . El pH es un factor importante en la movilidad de iones, ya que incide en la precipitación y adsorción de metales pesados (Porta, 2003).

El pH del suelo permite entender la importancia de diversos procesos que suceden en este sistema, por ejemplo: la movilidad de iones, disoluciones, procesos de oxido-reducción, la disponibilidad de nutrientes y la respuesta biológica ante la acidez o la basicidad. Además, el pH es una propiedad muy variable que puede cambiar por el clima de la región, la materia orgánica presente en el suelo, la vegetación, el tiempo, aporte de contaminantes, el manejo del suelo, etc. (Porta *et al.*, 2003).

Burt (2004) describió que la acción del NaF sobre un material no cristalino, libera iones de hidroxilo ( $OH^-$ ), a la solución del suelo que ocasiona un aumento en el pH de la solución. La cantidad de material no cristalino determina la liberación de estos iones hidroxilo y por tanto, el aumento en esta propiedad química. En las siguientes reacciones se muestra el proceso de liberación de los iones que son la base de este procedimiento:



La mayoría de los suelos contienen componentes que pueden reaccionar con el NaF y liberar los iones de hidroxilo. Sin embargo, cuando la solución de NaF tiene un  $\text{pH} \geq 9.4$  es un fuerte indicador del material no cristalino donde domina el complejo de intercambio del suelo, cabe mencionar que estos materiales se forman por la meteorización temprana de los materiales volcánicos en un clima húmedo (Burt *et al.*, 2014).

### 2.1.2.2. MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica se define como la expresión que agrupa a todos los constituyentes orgánicos del suelo. Principalmente está formado por C, N, H y O y, en menor proporción, por S, P, B, Fe, Mo, entre otros (Porta *et al.*, 2003).

- La cantidad de la materia orgánica que se encuentran en los suelos dependen de múltiples factores, por ejemplo:
- Vegetación
- Clima
- Drenaje
- Organismos en el suelo
- Posición en la ladera
- Textura
- Composición de las arcillas
- Estructura

Según Schnitzer (1991), la materia orgánica se va a diferenciar de acuerdo con el grado de incorporación a la matriz mineral y de transformación que sufra está en las siguientes tres categorías:

- Materia orgánica no humificada: Principalmente está constituida por la biomasa vegetal, animal y por los microorganismos que no están constituidos a la fracción mineral.
- Sustancias no humificadas: Está constituido por macromoléculas que fácilmente se pueden degradar como los carbohidratos, lípidos, resinas, proteínas, etc. Estas van a tener una vida corta en el suelo.
- Humus: Este es producto de transformaciones que dan lugar a estructuras amorfas. Principalmente son compuestos con estructura aromática, hidrofílicas, ácidas, carga negativa y estas formadas por procesos oxidativos. Sin embargo, actualmente existen otras aproximaciones donde se considera que el tiempo de residencia de la materia orgánica depende de los mecanismos de exclusión de la comunidad microbiana para hacer uso de los compuestos orgánicos, lo cual tiene como el resultado de la transformación a compuestos inorgánicos (p.e.  $\text{CO}_2$ ) (Dungait *et al.*, 2012).

La materia orgánica influye de manera directa en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Según Porta *et al.*, (2003) describe el papel de la materia orgánica sobre las propiedades del suelo, de la siguiente manera:

- Propiedades Físicas:
  - Formación y estabilidad de agregados.
  - Movimiento del agua en el suelo
  - Prevención de los procesos erosivos

- Mientras el suelo se vuelva oscuro, indica mayor contenido de materia orgánica, por tanto, va a disminuir el efecto albedo, y por consecuencia, va a repercutir en efectos térmicos del suelo.
- Propiedades Químicas:
  - Formación de complejos organominerales
  - Procesos de intercambio catiónico.
  - Interacciones con xenobióticos
  - Estabilización de nutrientes en forma orgánica.
- Propiedades Biológicas:
  - Estimula e inhibe la actividad enzimática
  - Contiene reguladores del crecimiento de las plantas
  - Fuente de macronutrientes y micronutrientes
  - Efectos antibióticos frente a organismos patógenos.
  - Constituye una reserva de energía metabólica, por las grandes cantidades de C y nutrientes que contiene.

La materia orgánica del suelo tiene un papel importante en la fertilidad del suelo, ya que controla la actividad microbiana, debido a que representa una fuente de carbono y nitrógeno mineralizable; y porque afecta la tasa de infiltración del agua, capacidad de almacenamiento del agua, ciclo de nutrientes y adsorción de plaguicidas, entre otros; por lo que el manejo del suelo es parte fundamental para una agricultura sostenible. Se ha reconocido a la MO como el indicador central de la calidad y salud del suelo; por ejemplo, una disminución de ésta por oxidación biológica o erosión reduce significativamente el abastecimiento de nitrógeno dando lugar a un deterioro en las condiciones físicas del suelo y por lo tanto, una reducción en la productividad de los cultivos (Ding *et al.*, 2002).

El secuestro de carbono se refiere a la capacidad que tiene el suelo para almacenar este elemento que proviene de diferentes procesos que ocurren durante su ciclo de este

El almacenamiento del carbono orgánico se logra a través de la estabilización de la materia orgánica mediante la oclusión física dentro de los agregados, las interacciones químicas con las arcillas minerales y la recalcitrancia bioquímica. El aumento de carbono en el suelo está relacionado con el aumento de la estabilidad de los agregados, la estructura que tengan esto y la capacidad de retención de agua del suelo. Hartemink (2014) y autores mencionan que los factores formadores del suelo, así como la actividad antrópica también influyen en el contenido de carbono.

El carbono se puede almacenar en diferentes formas con intervalos de tiempo distintos siempre y cuando exista un estado de equilibrio en el suelo. En la siguiente tabla se describen las formas en las que se encuentra el carbono orgánico en el suelo (Hartemink *et al.*, 2014):

**Tabla 2 Formas del carbono orgánico en el suelo (Hartemink et al., 2014)**

Forma	Composición	Categoría de almacenamiento
<b>Residuos de plantas superficiales</b>	Material vegetal que reside en la superficie del suelo, incluida la hojarasca y el material de cosecha / pasto	<b>Rápida (o lábil)</b> La descomposición ocurre en una escala de tiempo de días o años
<b>Residuos de plantas enterradas</b>	Material vegetal de más de 2 mm de tamaño que reside dentro del suelo	<b>Rápida (o lábil)</b> La descomposición ocurre en una escala de tiempo de días o años
<b>Materia orgánica particulada</b>	Material orgánico semidescompuesto de menos de 2 mm y más de 50 µm de tamaño	<b>Rápida (o lábil)</b> La descomposición ocurre en una escala de tiempo de días o años
<b>Asociación mineral</b>	Material orgánico bien descompuesto con un tamaño inferior a 50 µm asociado a partículas de suelo	<b>Lento (o estable)</b> La descomposición ocurre en una escala de tiempo de años a décadas
<b>Carbono orgánico resistente.</b>	Carbón de leña o materiales carbonizados que resultan de la quema de materia orgánica resistente a la descomposición biológica.	<b>Pasivo (o recalcitrante)</b> La descomposición ocurre en una escala de tiempo de décadas a miles de años

Se ha discutido ampliamente que la concentración de carbono es dependiente de la textura del suelo. Se sabe que una concentración crítica del carbono orgánico se refiere a un nivel en el que el suelo reduce sus funciones significativamente, en cambio, una saturación de este está relacionado con la capacidad limitante de las partículas finas (limos y arcillas) para almacenar este elemento (Hartermink *et al.*, 2014).

La noción de que los contenidos de carbono orgánico más altos resultan en una mejora del estado del suelo se ha discutido ampliamente dentro del concepto de calidad del suelo (Andrews *et al.* 2004) y se ha abordado más recientemente como parte del marco de **Soil Security** (Bouma & McBratney 2013).

Por lo anterior, se sabe que el carbono orgánico juega un papel importante en la gestión de sustentabilidad del suelo y este es considerado como indicador para evaluación de calidad de suelo, ya que se encuentra asociado con la mayoría de los recursos del suelo y la productividad que puede alcanzar éste.

En el caso de los Andosoles, la materia orgánica forma complejos muy estables con los materiales no cristalinos que dificultan su degradación, favoreciendo la acumulación de carbono orgánico. Los materiales no cristalinos (se define como un grupo de minerales con ausencia de un arreglo cristalino de silicio, aluminio y agua), las arcillas imogolita y óxidos y oxihidroxidos de hierro y aluminio en fracción arcilla resultan ser las más estables para formar estos complejos órgano-

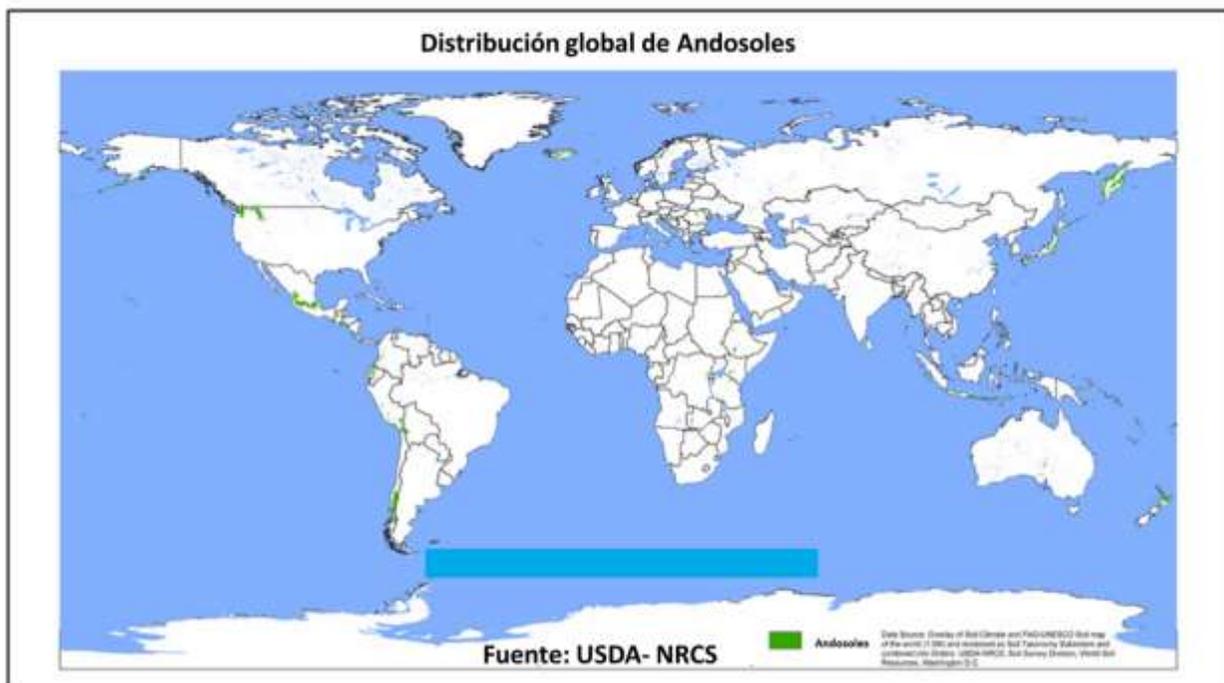
minerales. Algunos estudios muestran que los suelos ricos en aluminio, como los Andosoles, ayudan para la estabilización química del carbono en estos suelos (Huyens *et al.*, 2014).

En México el manejo de las áreas naturales protegidas y los bosques naturales son una de las mejores opciones para la captación de carbono, ofreciendo simultáneamente una alternativa para incrementar la producción, tanto maderable como no maderable (Laguna *et al.*, 2009). Cabe resaltar que en los ecosistemas forestales contienen grandes cantidades de carbono almacenadas en la biomasa viva, muerta y en el suelo.

## 2.2 ANDOSOLES

Son suelos predominado por eyecciones de materiales volcánicos, que tienen una fracción coloidal dominada por materiales no cristalinos, minerales de arcillas, que están formadas por la unión de una o dos láminas tetraédricas con una octaédrica (Alvarado *et al.*, 2014), por ejemplo: Imogolita, Haloisita, Ópalo, minerales arcillosos 1:1 y 2:1 (p.e. Haloisita-Esmectita, Caolinita-Esmectita, Ferrihidrita-Hisingerita), y los complejos aluminio-hierro-humus. Estas fracciones dan como resultado una capacidad de intercambio variable, un pH ácido, alta retención de fósforo y una baja densidad aparente.

Las distribuciones de estos suelos se encuentran principalmente en donde hay actividad volcánica reciente o hay presencia de un volcán activo (localizados en los límites de placa) como se observa en la siguiente figura.



**Figura 8. Distribución global de los suelos de origen volcánico. Tomado de la USDA**

Con dificultad se ha logrado establecer que los andosoles cubren entre 110-124 millones de hectáreas, aproximadamente un 0.84% de la superficie terrestre. Los andosoles son el producto típico de la meteorización en ambientes templados y tropicales con una superficie de humedad. Su

desarrollo va estar influido por el tipo de material volcánico (material parental), el tiempo, el clima, la topografía y la vegetación que este presente en la zona. (Dahlgren *et al.*, 2004).

Los andosoles poseen características físicas que se le atribuyen a la presencia de materiales no cristalinos y la abundancia de materia orgánica. Estas favorecen el crecimiento de las plantas y son suelos resistentes a las condiciones de estrés por sequía; por tanto, son uno de los suelos más utilizados para la agricultura.

En el caso de la textura, los materiales no cristalinos que están presentes en grandes cantidades contribuyen a la formación de agregados estables que resisten fuertemente a la dispersión. El contenido de arcillas en los Andosoles, determinado por un análisis mecánico muestran un contenido de esta fracción de un 30% (ajustando el pH y con una retención de agua de 1500KPa) (Shoji *et al.*, 1993).

Los Andosoles debido a los materiales no cristalinos y al contenido de materia orgánica, presentan densidades bajas. La densidad disminuye si las concentraciones de hierro y aluminio aumentan, los Andosoles muestran que si  $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0 > 2\%$  generalmente el suelo tendrá una densidad del aproximadamente entre  $0.2-0.9 \text{ Mg/m}^3$  y si la densidad es menor a  $0.9 \text{ Mg/m}^3$  indica que la concentración de los materiales no cristalinos es mayor (Shoji *et al.*, 1993). Así también se sabe que, si las concentraciones de carbono orgánico aumentan, la densidad va a disminuir.

La baja densidad que presentan los andosoles indica que hay un desarrollo del espacio poroso y tendrá un incremento cuando la densidad de las partículas de humus es baja ( $1.4 - 1.8 \text{ Mg/m}^3$ ) y la del vidrio volcánico ( $2.4 \text{ Mg/m}^3$ ), por lo que es importante conocer cuál es la densidad que posee para los cálculos requeridos para los análisis granulométricos, y además afecta otras propiedades como por ejemplo: se tendrá mejor retención de agua y/o aire, las plantas tienen una mejor distribución en este suelo, etc. (Shoji *et al.*, 1993).

La acumulación de materia orgánica en estos suelos influye directamente en sus propiedades físicas y químicas. En los Andosoles, la estabilización de la materia orgánica puede ocurrir a través de la formación de complejos Al/Fe- humus y la sorción de materiales no cristalinos, imogolita y ferrihidrita. Es decir, los cationes presentes ( $Al^{3+}$  y  $Fe^{3+}$ ) en complejo con las sustancias húmicas dan como resultados que los grupos funcionales orgánicos se vuelvan más funcionales y menos susceptibles al ataque biológico. Como estos suelos son de carácter ácido, la materia orgánica puede protegerse de la biodegradación por la toxicidad del aluminio hacia los microorganismos. Una fracción significativa de la materia orgánica puede ser inaccesible para los organismos y esta se puede almacenar en las arcillas y en los materiales no cristalinos por la capacidad de adherencia que tienen estos (Dahlgren R. *et al.*, 2004)

Otra propiedad importante de los Andosoles es la gran capacidad de almacenamiento de carbono orgánico. Se sabe que la concentración de carbono orgánico está relacionada con la concentración de materiales no cristalinos a lo largo de una cronosecuencia de suelo de hace 4 millones de años formados por lavas basálticas en Hawái (Torn *et al.*, 1997). Además, la concentración de carbono también está asociada a complejos de Al/Fe-humus, se ha observado que la acumulación de carbono orgánico en 35 cm de suelos volcánicos muestra una relación lineal con el Al+Fe. (Shoji *et al.*, 1993).

### 2.3 DISPERSOR ULTRASÓNICO.

Edwards y Bremner (1964, 1967) encontraron que los agregados del suelo son dispersados sin usar oxidantes, ácidos o agentes dispersantes; usando suspensiones suelo-agua por medio del ultrasonido de alta frecuencia; por tanto, se puede considerar como un método alternativo para realizar estudios de textura, análisis de materia orgánica y mineralogía en las diferentes fracciones granulométricas.

El ultrasonido es una clase de onda mecánica longitudinal cuya frecuencia de vibración es mayor a los 2000 ciclos por segundo, por ese motivo el oído humano no lo puede percibir (Oyaga *et al.*, 2007). Este tipo de ondas tienen el comportamiento de las ondas sonoras, las cuales pueden viajar en cualquier medio con una rapidez que será dependiente de las características del medio, cabe resaltar que las ondas ultrasónicas tienen una baja propagación en medios gaseosos y que la cantidad de energía acústica reflejada dependerá del medio. Las ondas ultrasónicas tienen una frecuencia mayor a 10,000 Hz como se muestra en la figura 8.

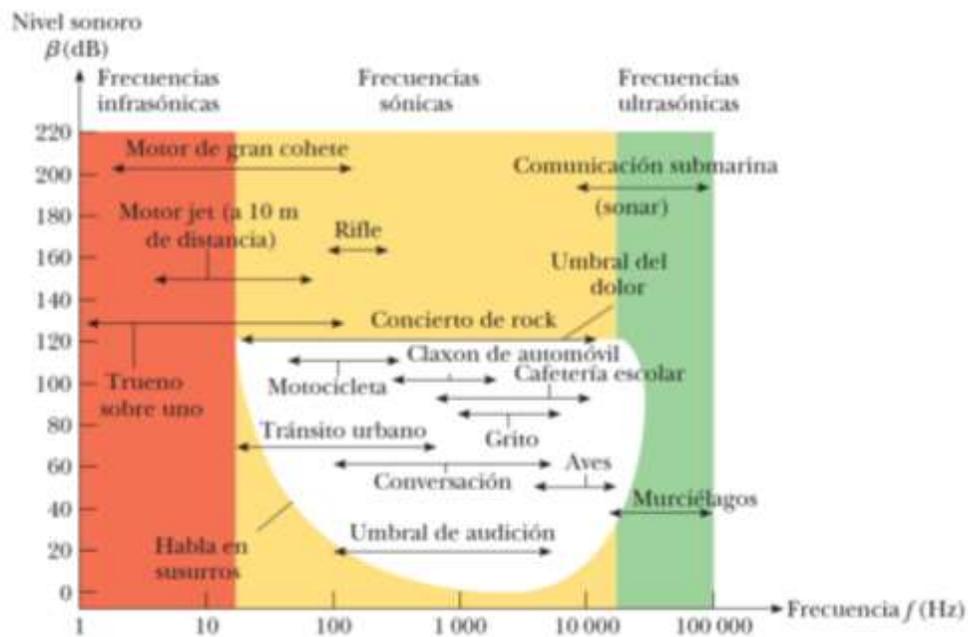
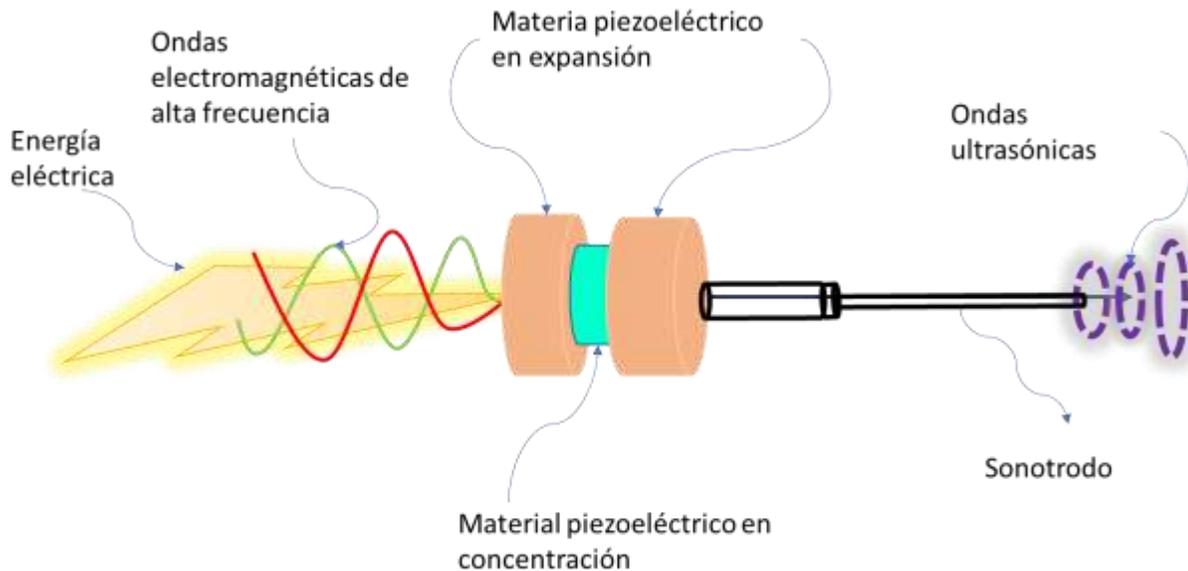


Figura 9. Gráfica de las diferentes frecuencias con ejemplos que abarcan distintos intervalos de frecuencia Tomada de Serway *et al.*, 2008.

En el dispersor ultrasónico, es importante considerar el efecto de la piezoelectricidad, ya que este es el que va a generar las ondas ultrasónicas. Cuando ciertos cristales como el cuarzo o el titanio de bario se polarizan eléctricamente, se someten a esfuerzos mecánicos de compresión y viceversa. Esto significa que al aplicar un campo eléctrico oscilante experimentaran vibraciones mecánicas, si estas coinciden con su frecuencia de vibración propia, resultaran de notable amplitud como consecuencia de la resonancia, a esto se le conoce efecto piezoeléctrico (Oyaga *et al.*, 2007). Para que se genere este efecto, se necesita un transductor que es un dispositivo que puede convertir una forma de energía en otra, en el caso de un transductor de ultrasonido se convierte energía eléctrica en mecánica en forma de onda y viceversa, es por esta razón que la mayoría de los transductores de ultrasonido pueden utilizarse para aplicación de pulso eco. (Marreno *et al.*, 2010). En la figura 9

se puede observar la transformación de energía eléctrica a energía mecánica (forma de ondas) que realiza un transductor y que las ondas ultrasónicas son emitidas solo en la parte inferior del sonotrodo.



**Figura 10. Transformación de energía eléctrica a energía en forma de ondas ultrasónicas por medio de un transductor.**

Gracias a esta transformación de energía las ondas ultrasónicas poseen características particulares, por ejemplo, el ultrasonido permite lograr longitudes de ondas cortas; eso trae una serie de ventajas, entre ellas su capacidad de penetración. Además, la difracción de estas ondas en torno a un objeto puede ser menor y pueden probarse en cualquier medio (Oyaga *et al.*, 2007).

Utilizar ondas ultrasónicas puede ser un método alternativo para la disgregación de los agregados del suelo sin utilizar algún químico como dispersante. Sin embargo, existen condiciones que puede influir en el efecto de las ondas ultrasónicas sobre la mezcla de suelo-agua, las cuales se mencionan a continuación:

- **Volumen de la solución.**  
El volumen de la solución tendrá una influencia en la energía absorbida. Ya que, en un menor volumen de muestra, se requiere una menor energía mientras que un volumen mayor se va a requerir una mayor energía. Esto quiere decir que la energía ultrasónica que recibe la solución va a ser similar y esto depende del siguiente factor: que la vibración de amplitud ultrasónica y la profundidad de inserción sean constantes.
- **Profundidad de Inserción.**  
La profundidad de inserción del sonotrodo influye en la energía que absorbe la mezcla de suelo-agua, ya que las ondas ultrasónicas van a producir un calentamiento por la fricción que estas tienen con el contenedor, por consecuencia aumentará la temperatura de la mezcla, cambia la potencia y la energía absorbida.

Además, se conoce la amplitud de la onda va influir en la velocidad en la que viajan las ondas ultrasónicas; por tanto, es importante conocer que amplitud se está manejando al momento de insertar el sonotrodo ya que será afectada la potencia y la energía absorbida por la mezcla suelo-agua.

Para utilizar este método para la ruptura de los agregados, además de conocer los efectos que pueden afectar la dispersión, es importante realizar la calibración del equipo ultrasónico. North y colaboradores en el año de 1976 realizaron una calibración por medio de la potencia calorimétrica, llegando a la siguiente ecuación:

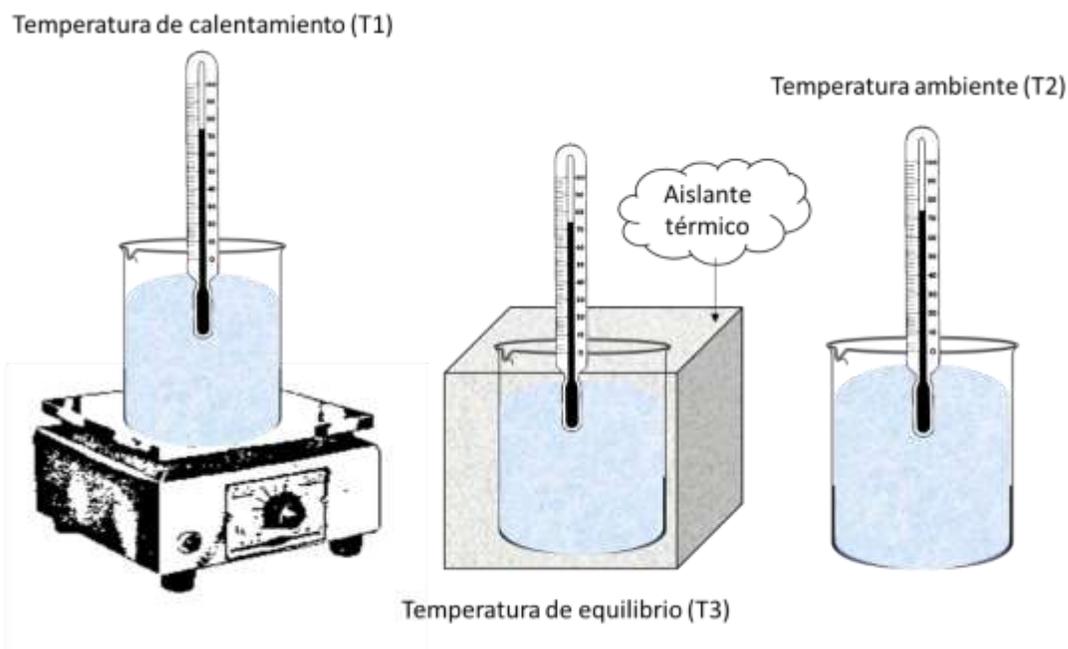
$$P_c = \left\{ \left[ (m_a * C_{e_a} + C_{cont}) * \frac{\Delta T}{\Delta t} \right] + H \right\} \quad (10)$$

donde  $P_c$  (W) es la potencia calorimétrica emitida por el equipo de ultrasonido,  $m_a$  la masa del agua contenida en el vaso (g),  $C_{e_a}$  es el calor específico del agua (4.186J/g°C),  $C_{cont}$  es la capacidad calorimétrica del contenedor expresada en Joules entre Celsius (J/°C),  $\Delta T/\Delta t$  indica el incremento de la temperatura durante el tiempo de sonificación en Celsius entre segundo (°C/s) y  $H$  es la entalpia en Joules entre segundo (J/s).

La capacidad calorimétrica del vaso es determinada mediante la siguiente ecuación descrita por Morra et al. (1991):

$$C_{cont} = \left\{ \frac{m_1 C_{e_a} (T_1 - T_2)}{T_3 - T_2} \right\} - (m_2 C_{e_a}) \quad (11)$$

donde  $m_1$  es la masa del agua (g) calentada a  $T_1$  (50°C),  $m_2$  es la masa del agua (g) a temperatura ambiente  $T_2$  (°C) y  $T_3$  es la temperatura de equilibrio a la que llega la muestra (°C). En la siguiente figura se señalan diferentes temperaturas necesarias para el cálculo de esta variable.

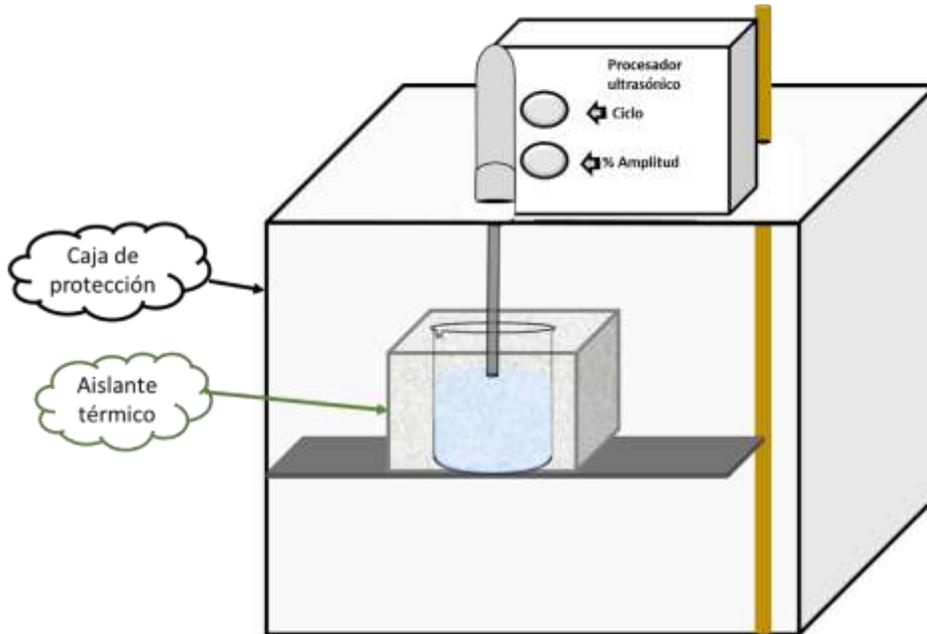


**Figura 11. Temperaturas necesarias para el cálculo de la capacidad calorimétrica del contenedor**

La tasa de pérdida de energía (entalpía) se calculó con la siguiente ecuación descrita por Morra en al. (1991):

$$H = (m_a C e_a) \frac{\Delta T}{t_d} \quad (12)$$

donde  $H$  es la entalpía expresada en Joules entre segundo (J/s),  $m_a$  es la masa del agua en gramos (g),  $C e_a$  es el calor específico del agua (4.186J/g°C) y  $\Delta T/t_d$  es la tasa de enfriamiento al momento de terminar la sonicación. Cabe mencionar que, para el cálculo de esta variable, el vaso debe de tener un aislante térmico para que la pérdida de energía fluya en una sola dirección hacia el ambiente (Figura 11)



**Figura 12. Montaje del experimento para el cálculo de la entalpía donde el vaso se encuentra dentro de un aislante térmico.**

Por lo tanto, se puede calcular la energía aplicada utilizando la potencia calorimétrica (ecuación 7) que fue propuesto por Christensen (1985) con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{P_c(t_s)}{V} \quad (13)$$

donde  $E$  es la energía aplicada se expresa Joules entre mililitro (J/ml),  $P_c$  es la potencia calorimétrica medido en Watts (W),  $t_s$  es el tiempo en segundos de la sonicación (s) y  $V$  es el volumen dentro del vaso de precipitados (ml).

North encontró que la eficiencia de la dispersión se ve significativamente afectada por la potencia de salida, el período de tratamiento, la relación de agua y las características del equipo ultrasónico. Dicho lo anterior, es necesario describir el equipo que se utilizó para este proyecto.

Hay varias ventajas en la dispersión ultrasónica según lo revisado por Edwards y Bremner (1967). Sin embargo, no hay un procedimiento estandarizado para ultrasonido (Gee y Bauder, 1986). Por

ejemplo, potencia ultrasónica y la duración del tratamiento depende del suelo, lo que indica que la condición óptima para el ultrasonido debe determinarse por ensayo y error para cada muestra de suelo.

En este proyecto, se utilizó el equipo UP100H que cuenta con una eficiencia mayor al 90% con una frecuencia de 30 KHz y un rango de control de  $\pm 1$  KHz. El aparato fue equipado con un sonotrodo micro tip MS3 con un diámetro de 3 mm, este emite una densidad acústica de  $460 \text{ W/cm}^2$ . La máxima profundidad a la que se puede sumergir es de 30 mm. El equipo necesita una potencia de 100 W y este puede trabajar de manera continua durante 24 h sin ejercer un sobrecalentamiento en la muestra que se está trabajando. El sonotrodo está colocado dentro de una caja de protección acústica SB2-16 con una bandeja ajustable en altura y varilla con diámetro de 16 mm. El procesador ultrasónico se encuentra dentro de esta caja.

### 3. ANTECEDENTES

El carbono orgánico del suelo influye en la agregación de las partículas del suelo, se sabe que existe una relación entre el tamaño de los agregados y el contenido de carbono orgánico, es decir, mientras mayor contenido de carbono orgánico lábil, mayor será el tamaño de los agregados; además se ha encontrado que el carbono orgánico da una mayor estabilidad a los agregados (Martinez *et al.*, 2008).

En el caso de la textura, se ha encontrado una relación con la acumulación y el almacenamiento de carbono. Anderson *et al.*, 1981 encontraron que la materia orgánica se encuentra asociada al tamaño arcilla, y por otra parte, también observó que las fracciones finas son esenciales para comprender la dinámica de la materia orgánica del suelo. Aproximadamente el 80% de la materia orgánica se acumula en las fracciones finas del suelo. Por ello, existió la necesidad de desarrollar un método para estudiar el carbono en las fracciones finas.

En el siglo XX comenzaron los estudios acerca de la aplicación de las ondas ultrasónicas como un método alternativo para el estudio de la materia orgánica del suelo. El estudio realizado por Genrich y Bremner (1972) consistió en una evaluación sobre este método, en el cual concluyen que éste resultó efectivo para la dispersión de los suelos sin la necesidad de agregar dispersantes químicos que pudieran alterar la composición química de los suelos. Sin embargo, no existía una estandarización que permitiera la comparación de resultados entre diferentes trabajos.

North en el año de 1976 realizó el ajuste de la potencia nominal del equipo de ultrasonido, con el propósito de conocer la energía que recibe la mezcla (suelo y agua). Él concluyó que es necesaria una estandarización del método de dispersión ultrasónica, ya que si se adopta ampliamente contribuiría a una comparación cuantitativa de resultados obtenidos de diversos trabajos; así este también ofrece la posibilidad para el estudio de fracciones más finas, de igual manera, el contenido orgánico que afecta a la estabilidad del suelo.

Anderson *et al.*, (1981) realizaron el análisis de la distribución de los elementos de carbono, nitrógeno y azufre en las diferentes fracciones. Ellos dicen que gracias a esta metodología se puede eliminar la exposición a ácidos fuertes o álcalis, por consecuencia, reduce la posibilidad que existan cambios en la composición del suelo mientras se realiza la dispersión.

A medida que se incrementa el interés sobre el uso del ultrasonido, fue necesario realizar estudios que permitieran mejorar el equipo de ultrasonido. Por ejemplo, el material del sonotrodo es

importante, ya que este influye en la dispersión pues sobre él se ejerce el efecto de la piezoelectricidad (importante para generación de estas ondas sonoras). Busacca *et al.*, (1984) estudiaron que la forma del sonotrodo, así como el material de este, eran importantes para lograr una dispersión similar a la del tratamiento con hexametáfosfato, por tanto, estandarizaron un tipo de sonotrodo hecho de titanio para estudios futuros.

Con base en lo anterior, se estudiaron las propiedades físicas de las ondas ultrasónicas, es decir, qué tanto influía la vibración de amplitud en la dispersión de los suelos. Esto demostró que la energía y la potencia del dispersor de ultrasonido está relacionado con el porcentaje de amplitud que se esté trabajando. (Mayer et al., 2012)

Morra *et al.*, (1991) y Roscoe et al., (2000), previo a lo anteriormente descrito, realizaron el estudio detallado sobre el método realizado por North en 1976 donde se describen una serie de ecuaciones matemáticas, con condiciones controladas, que ayudarán al desarrollo de variables para la calibración del equipo de ultrasonido. Por consecuencia, esto contribuye a una estandarización para un mejor ajuste de potencia y de energía.

Silva et al., 2014 realizaron la metodología de dispersión ultrasónica, utilizando la ecuación descrita por North 1976 para el cálculo de potencia. Este estudio demostró que se necesita una energía al menos 100 J/ml para lograr dispersar los suelos volcánicos y que al aumentar energía se incrementa la cantidad de fracción de arcilla. Por último, ellos mencionan que la mineralogía que tengan los suelos volcánicos van influir al momento de la dispersión ultrasónica.

En el caso de los Andosoles la unión que sucede entre los materiales no cristalinos de aluminio y los minerales de arcilla, da como resultado una mejor estabilización del carbono. Además, se ha observado que la estabilización del carbono en este tipo de suelos es producto de la asociación de los complejos arcilla-metal-humus, por la protección de los agregados y por la cobertura vegetal que tenga el suelo.

En México se implementó el método de dispersión ultrasónica en el trabajo realizado por Báez et al., 2011 con el propósito de conocer la acumulación de carbono orgánico en tres suelos diferentes. No obstante, en este trabajo no se describe una estandarización del método de dispersión ultrasónico, así como, la calibración del equipo de ultrasónico. Sin embargo, presentan que las propiedades químicas de los Andosoles están condicionadas por su mineralogía y que se requieren energías altas (910 J/ml) para lograr su dispersión.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

Los suelos en forma general contienen óxidos de hierro y magnesio, carbonatos, sales y materia orgánica. Los agentes cementantes actúan como coloides en el suelo y poseen una carga eléctrica negativa, el agua en el suelo actúa como dipolo; cuando ocurre la unión agua-partículas pueden contener algunos cationes y puede llegar a afectar la agregación. Si hubiera una pérdida de agua en el suelo, los coloides tienden a pegarse más o unen partículas para formar agregados a esto se le conoce como acción cementante.

La materia orgánica es uno de los agentes cementantes principales del suelo (Casanova, 2005). Otra función que cumple la materia orgánica es actuar como un búffer o amortiguador frente a los cambios químicos que sufre el suelo, además, aumenta la disponibilidad de nutrientes para plantas y microorganismos. Ésta ofrece algunos servicios ecosistémicos como: captura y secuestro de carbono, en la fertilidad del suelo, capacidad de liberar nutrientes, etc. Es importante entender y cuantificar la dinámica del carbono (~69% de la materia orgánica) del suelo y su relación con el tipo de vegetación presente y del pasado (Ruiperez *et al.*, 2004).

Varios estudios han demostrado que algunas propiedades del suelo dependen más de la cantidad de materia orgánica acumulada en las diferentes fracciones de tamaño que los contenidos de materia orgánica (Ruiperez *et al.*, 2004). Por tanto, la metodología de fraccionamiento físico por ultrasonido de alta frecuencia ayuda a separar las fracciones para realizar análisis más detallados para conocer el almacenamiento de carbono orgánico.

Para la determinación del análisis granulométrico es común realizar tratamientos previos químicos y físicos para obtener una buena dispersión de los agregados. Sin embargo, en suelos fuertemente intemperizados, ricos en óxidos de hierro y de materiales no cristalinos ricos en sílice y aluminio. Los suelos derivados de materiales volcánicos se forman compuestos órgano-minerales muy estables, así como fuertes uniones electrostáticas. Estos suelos, con altos contenidos de materiales no cristalinos, tienen una gran resistencia a la dispersión, particularmente después del secado al aire o en estufa, y ya que, estos tratamientos previos destruyen la materia orgánica del suelo, fue seleccionada la determinación de los diferentes tamaños de partículas del dispersor ultrasónico de alta frecuencia, y así conocer la interacción de los elementos biogeoquímicos y el suelo, para evaluar la calidad de éste, su capacidad de almacenamiento de agua, tasa de infiltración, tasa de erosión eólica e hídrica, etc.

Por lo anterior, es de importancia: estandarizar una metodología que contribuya al estudio del suelo con características particulares como son las derivadas de su origen volcánico y que permitan comprender el comportamiento de la materia orgánica asociada a la fracción mineral del suelo como la base para el entendimiento del suelo como almacén de carbono y nutrientes.

## 5. OBJETIVOS.

### General

Evaluar la eficiencia de la dispersión ultrasónica de partículas para la caracterización de la materia orgánica de los Andosoles en la zona del volcán Nevado de Toluca.

### Particulares.

- a. Desarrollar el método de calibración para el equipo de ultrasonido de alta frecuencia para obtener su potencia calorimétrica.
- b. Comparar los resultados obtenidos de textura por el método tradicional de pipeta y la del dispersor ultrasónico.
- c. Cuantificar la concentración de carbono orgánico asociado a partículas minerales en suelos volcánicos bajo diferentes coberturas vegetales del volcán Nevado de Toluca.

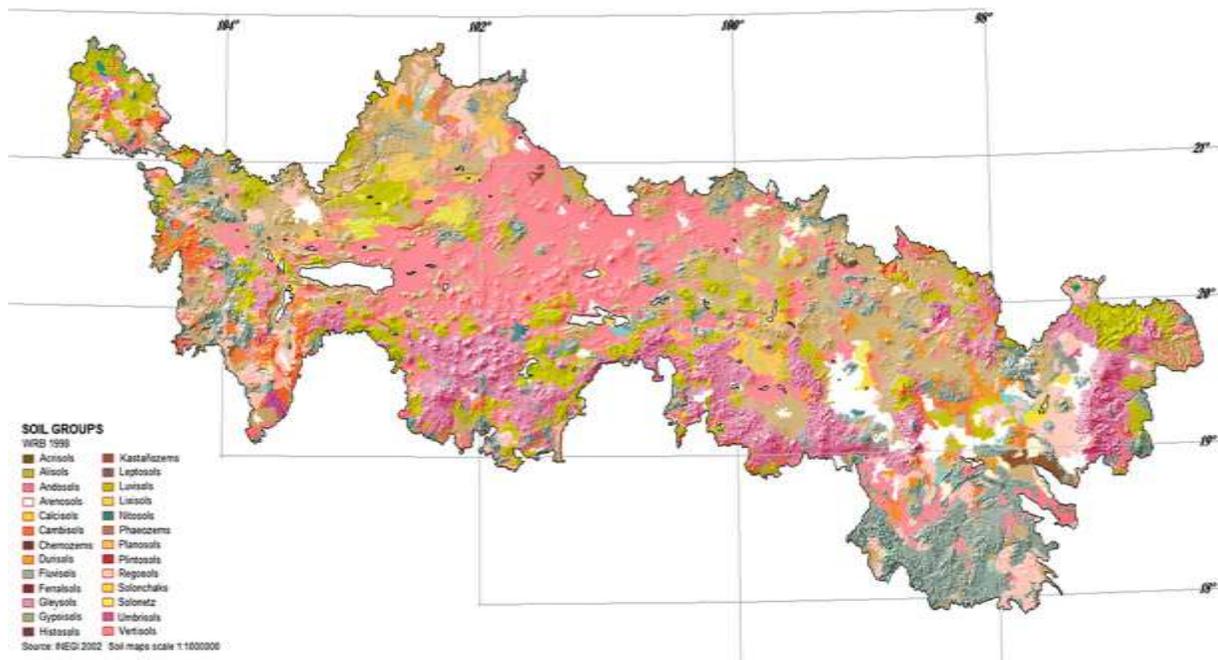
## 6. METODOLOGÍA

El presente trabajo se desarrolló en el laboratorio de física de suelos y en el laboratorio de biogeoquímica pertenecientes al Departamento de Ciencias Ambientales y del Suelo, del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

### 6.1 ÁREA DE ESTUDIO.

La zona de estudio donde se extrajeron las muestras a estudiar, se localiza en el municipio de Zinacantepec, Estado de México dentro del Parque Nacional Nevado de Toluca (Figura 13); el cual se encuentra dentro de la provincia geológica conocida como la Faja Volcánica Transmexicana. El relieve de esta zona geológica es abrupto principalmente; fue creado por numerosos cuerpos volcánicos.

La mayoría de los suelos que se encuentran en la Faja Volcánica Transmexicana fueron formados a partir de material volcánico producto de las diferentes actividades volcánicas de la zona. Los suelos que se encuentra en esta zona son Andosoles, sin embargo, Ahrens et al., 2013 mencionan que los Phaeozems son los suelos que mayor abundancia tienen en la zona (Figura 13) Estos suelos se forman a partir de materiales volcánicos recientes que han acumulado materia orgánica y no han tenido el tiempo suficiente para el desarrollo de minerales de arcilla (p.e. Halocita), por tanto, en estos suelos hay una mayor abundancia de materiales no cristalinos. La cristalización de arcillas en la Faja conduce a la formación de suelos texturalmente diferenciados; Andosoles en las cuencas hidrográficas y vertisoles en los valles.



**Figura 13. Suelos predominantes de la provincia geológica Faja Volcánica Transmexicana tomado de Ahrens et al., (2013).**

Dentro del Parque Nacional Nevado de Toluca, se encuentra el volcán Nevado de Toluca, también conocido con el nombre de "Xinantécatl" (hombre desnudo en náhuatl). El edificio volcánico se encuentra emplazado en un basamento de rocas volcanosedimentarias metamorfozadas de edad

Jurásico-Cretácico, ignimbritas de composición riolítica del Eoceno y derrames andesíticos del Mioceno como se muestra en la siguiente figura (García et al., 2002)

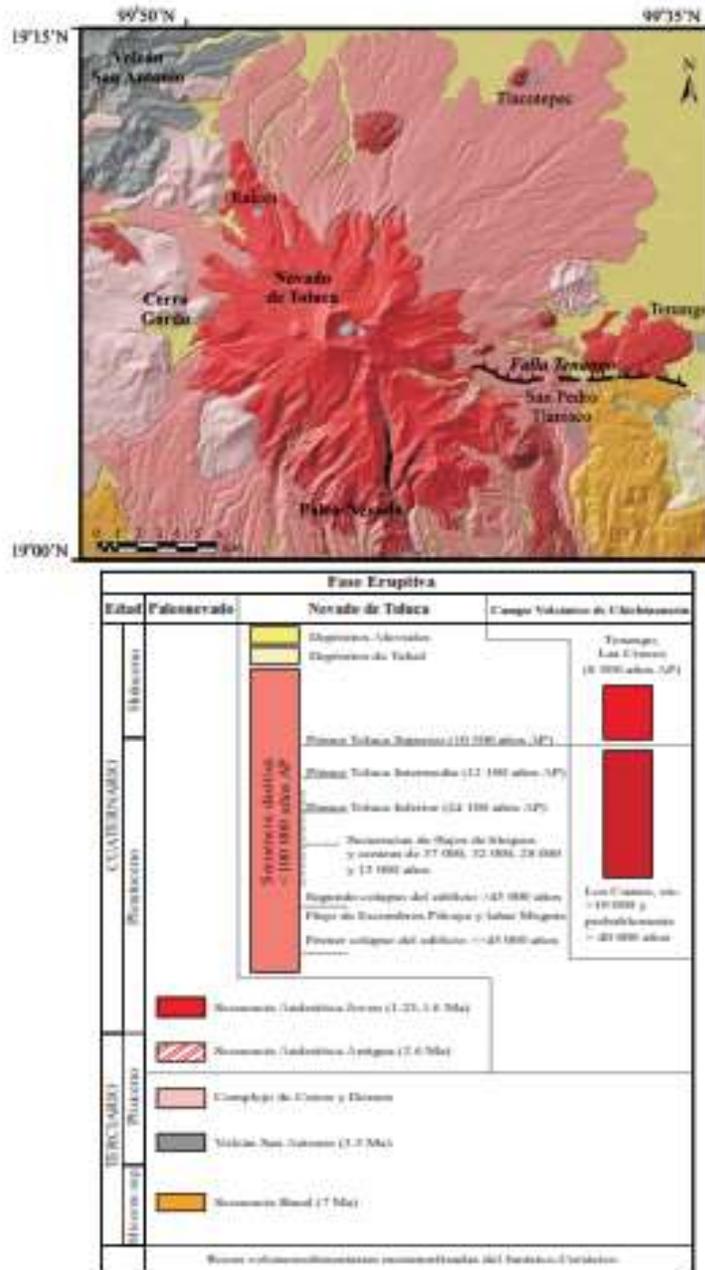
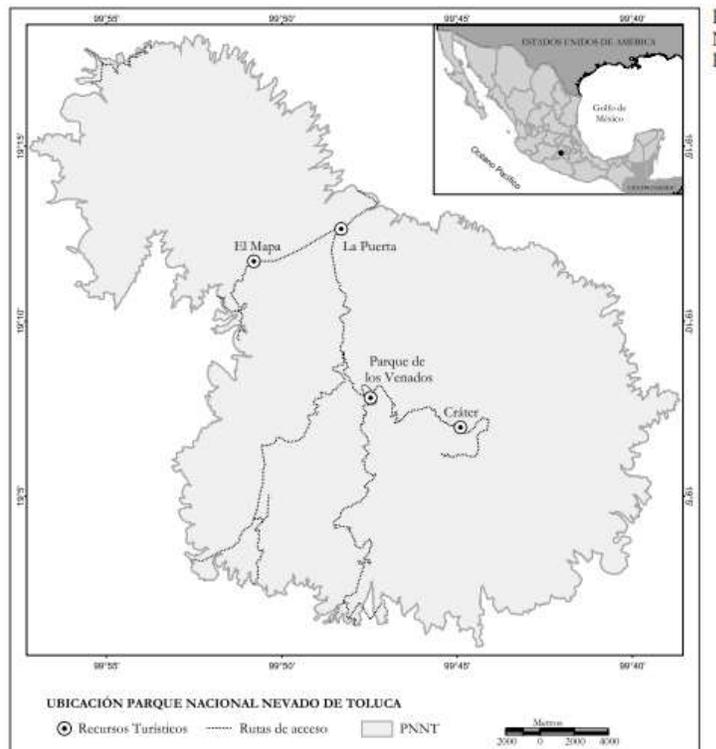


Figura 14. Mapa Geológico de la zona del volcán Nevado de Toluca tomado de Macías (2005) y García et al., 2002.

El clima actual en estas localidades es templado húmedo, con una temperatura anual que oscila entre 4 y 12 °C y una precipitación anual de 1100 mm. La vegetación presente incluye pinos, oyameles, ailes, cedros, encinos y algunos pastos. De acuerdo con la WRB (FAO-ISRIC-SICS, 1999) los suelos modernos que predominan son Andosoles y Cambisoles (Gama et al., 2006)

Los suelos más abundantes en la zona de estudio son andosoles derivados de las cenizas volcánicas y cocas ígneas calcialcalinas (andesitas y dacitas), sus texturas varían de arcillosas a arenosas, presentan diferentes colores variados (húmico, mólico y ócrico). Los andosoles se localizan principalmente en área boscosas, donde reciben un suministro de materia orgánica, presentan un pH ácido, son ricos en minerales con altos contenidos de aluminio, calcio, fósforo y magnesio; debido a su textura limosa y son susceptibles a la erosión cuando no tienen una cobertura vegetal en los relieves más abruptos (Aceves, 1996)

Es importante mencionar que el sitio de estudio se encuentra dentro de los límites del área natural protegida del volcán Nevado de Toluca (Figura 15). Forma parte de una región que no ha sido afectado en gran medida por la actividad humana y que están sujetas a regímenes especiales de estudios para la protección, conservación y desarrollo para servicios ambientales. La zona del volcán Nevado de Toluca fue decretada como área natural protegida en el año 2013 por medio de la ley general de equilibrio ecológico, protección al ambiente y la ley general de desarrollo forestal sustentable (Reformas 2013) (CONANP, 2015).

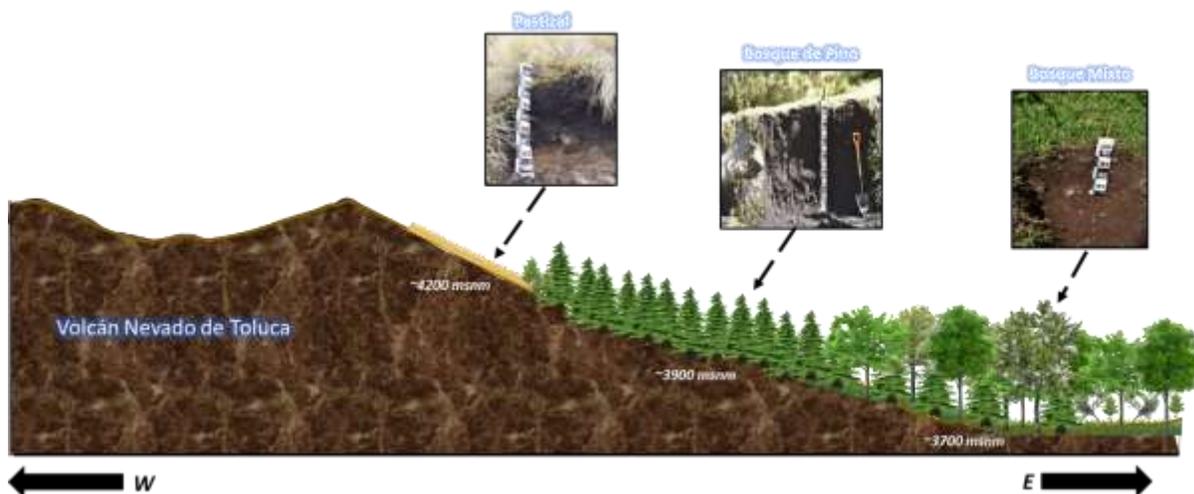


**Figura 15. Mapa de Área Natural Protegida Nevado de Toluca tomado de Bernal et al., (2011).**

## 6.2 MUESTREO DE SUELOS.

Se recolectaron cinco muestras del suelo superficial en diferentes altitudes asociadas a distintas coberturas vegetales a una profundidad de 0-30 cm con una pala de acero inoxidable. La muestra de mayor altitud que corresponde a una cobertura vegetal de pastizal, la segunda muestra corresponde a una cobertura de bosque pino y la tercera muestra corresponde a una cobertura de

bosque de pino-encino (figura 16). En cada uno de los puntos se recogieron cinco submuestras y de esta se realizaron muestras compuestas que fueron almacenadas en un refrigerador a una temperatura de  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 16.** Perfil donde se muestra las diferentes altitudes donde se recogieron las muestras. A mayor altitud se tiene la muestra de cobertura vegetal de pastizal, en una altitud media la cobertura de pino y en una altitud más baja la cobertura de bosque mixto.

## A. ANÁLISIS DE LABORATORIO (PROPIEDADES FÍSICAS)

### 6.3 COLOR.

Para determinar el color se tomó la muestra con humedad de campo y se colocó en una placa de porcelana. Se comparó el color de la muestra con las tablas de color Munsell para obtener su clave. La muestra en la placa de porcelana, se dejó secar al aire, y se realizó el mismo procedimiento de comparación con las tablas. Registrándose así, tanto el color con humedad de campo, como el color de la muestra secada al aire. (Flores y Alcalá, 2010)

### 6.4 HUMEDAD

Se determino por gravimetría, colocando un gramo de suelo en una cápsula de porcelana y se secó a una temperatura de  $105^{\circ}\text{C}$  durante 48 horas para obtener el peso constante. Se aplicó la ecuación uno para obtener los diferentes porcentajes de humedad. Las muestras se analizaron por duplicado (Flores y Alcalá, 2010).

### 6.5 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD APARENTE, REAL Y POROSIDAD

#### a. Densidad aparente.

Para determinar la densidad aparente, se pesó 20 g de suelo y se colocaron en una probeta de 200 ml. Posteriormente, se agregó 100 ml de agua destilada con una bureta a la probeta. Se tomó la lectura de lo que desplazó el suelo cuando se le añadió el agua destilada a la probeta. La masa del suelo y el volumen desplazado del suelo, se hicieron los cálculos con la ecuación dos.

#### b. Densidad real y porosidad

El funcionamiento de los picnómetros de gas se basa en la ley de Boyle-Mariotte aplicado al comportamiento de los gases ideales. Para poder aplicarlo es necesario usar un gas cuyo comportamiento puede describirse como un gas ideal, en este caso es el helio. Por ello, el helio es un gas apropiado para calcular el verdadero volumen del esqueleto sólido de los suelos (CEDEX, 2010)

Para determinar la densidad real y la porosidad se colocaron en un cilindro metálico 10 g de suelo con humedad de campo ya tamizado con un tamiz de 2 mm de abertura. El cilindro se ingresó al equipo Micromeritic Accupyc II 1340 y se toma lectura.

### 6.6 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE PARTÍCULAS CON HUMEDAD DE CAMPO.

Se tamizaron las muestras con un tamiz de 2mm de abertura y se tomaron 20 g de suelo tamizado. La muestra se colocó en un vaso de precipitados tipo Berzilus de 600 ml y se agregó 50 ml de agua destilada y 35 ml de peróxido de hidrógeno al 30% (para la destrucción de la materia orgánica). Se dejó que el peróxido de hidrógeno reaccionara durante seis días. Se hicieron triplicados por cada muestra (Figura 19).



**Figura 17. Destrucción de la materia orgánica en las muestras**

Cuando se observó que las muestras tuvieran un mínimo contenido de materia orgánica, se pasó a baño María. La temperatura de éste fue incrementándose gradualmente (40-80°C). Posteriormente los vasos fueron colocados en una placa de calentamiento cuya temperatura fue cercana a los 95°C con el fin de eliminar el peróxido residual. Este lavado se realizó cinco veces para todas las muestras.

Al concluir la eliminación del peróxido de hidrógeno, se colocaron las muestras en vasos de plástico para centrifugar a 1300 rpm durante 11 minutos y se eliminó el sobrenadante con una jeringa. Después, se agregó 10 ml de hexametáfosfato de sodio como dispersante y se selló la boquilla del recipiente con Parafilm con su respectiva tapa para que se agitaran en un periodo de 12 horas (figura 20).



**Figura 18. Frascos sellados con Parafilm para agitación durante 12 horas.**

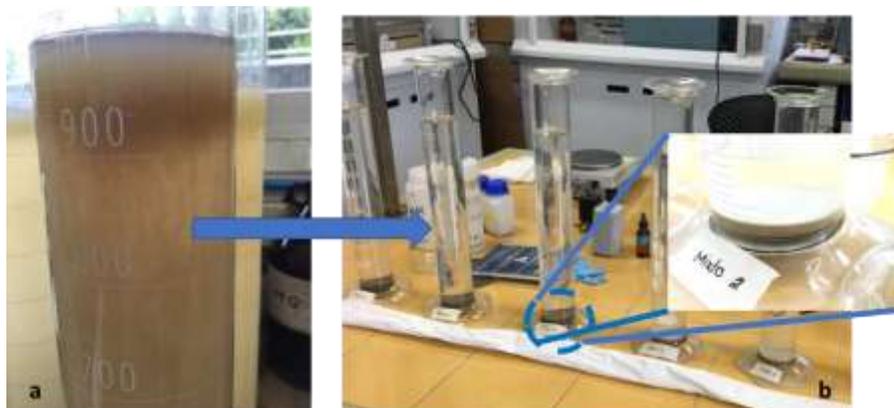
Después se tamizó la muestra con un tamiz de  $63\ \mu\text{m}$  de abertura, para separar la fracción arenosa. El material fino que pasó por el tamiz se colocó en probetas de 1000 ml donde se agregó 10 ml del dispersante y se aforó hasta los 1000 ml. La arena se recuperó en una cápsula de porcelana y se secó en la estufa a  $105^\circ\text{C}$ .

Para el material en las probetas se calculó el tiempo de caída de los limos, utilizando la ley de Stokes (ecuación 4), para obtener la arcilla en suspensión con una pipeta de 25 ml (Figura 21). Los tiempos de caída para las muestras resultaron ser de seis horas. La arcilla extraída con la pipeta fue colocado en una charola de aluminio y se secó en la estufa a  $105^\circ\text{C}$ .



**Figura 19. Pipeta de 25 ml que se utilizó para extraer la fracción arcilla**

Al resto del material fino en la probeta, se le agregó 10 ml de cloruro de magnesio y un mililitro de ácido clorhídrico al 10% para flocularlo (Figura 22). Este fenómeno se define como el proceso de formación de partículas de mayor tamaño (flóculos) de una fase sólida dispersa en suspensión, por agregación de las partículas más finas (Porta *et al.*, 2003).



**Figura 20. (a) Inicio de la floculación y (b) material floculado en el fondo de la probeta.**

Al cabo de 12 horas, el sobrenadante se eliminó de la probeta mientras que el material floculado se recuperó en charola de aluminio y se secó en la estufa a 105°C. Cuando las arenas y las arcillas estuvieran completamente secas, se pesaron en la balanza y se registró el peso de cada una de estas.

## 6.7 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO DE ALTA FRECUENCIA.

Es importante realizar la calibración del equipo de ultrasonido para conocer la potencia real (potencia calorimétrica) con la que el equipo está trabajando para realizar los cálculos de energía de manera correcta.

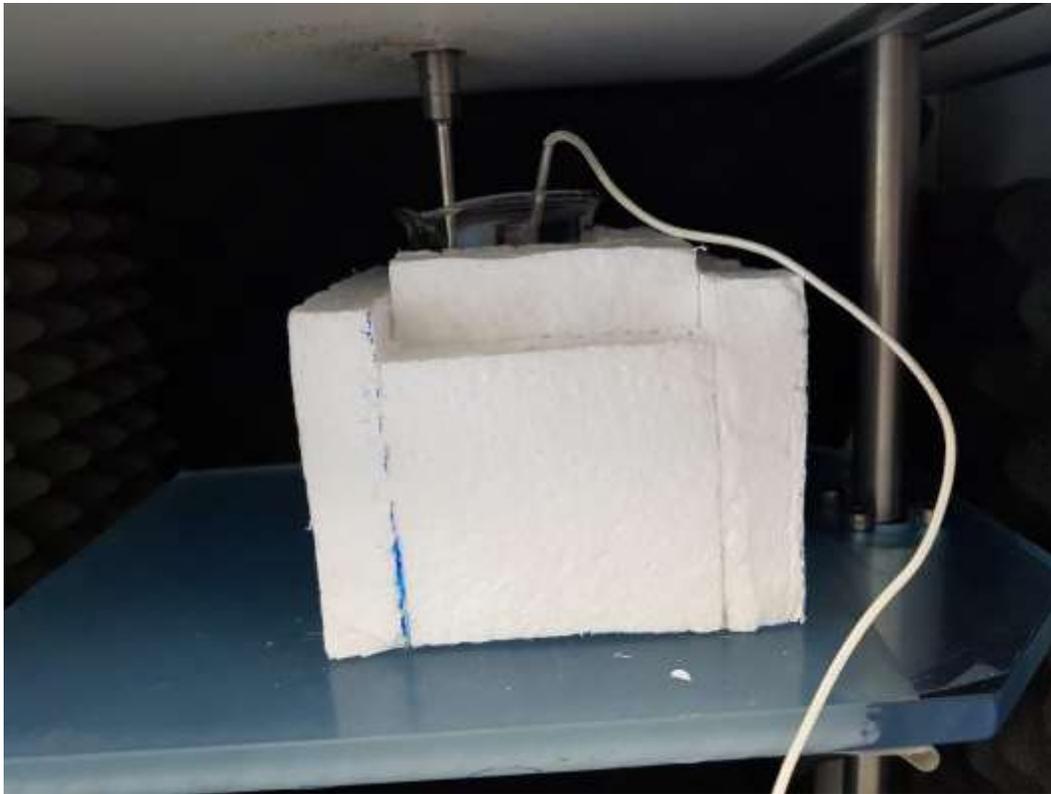
Para conocer la potencia es necesario utilizar la ecuación 7 adaptada por North 1976 y descrita por Morra *et al.*, 1991 y Roscoe *et al.*, 2000:

$$P_c = \left\{ \left[ (m_a * C_{e_a} + C_{cont}) * \frac{\Delta T}{\Delta t} \right] + H \right\} \quad (10)$$

Sin embargo, es necesario calcular el calor del contenedor y la entalpía. Para calcular la primera variable ( $C_{cont}$ ) se realizó acorde Roscoe *et al.*, 2000 y Morra *et al.*, 1991, el cual se especifica a continuación: Se utilizaron dos vasos de precipitados; uno fue llenado con 50 ml ( $m_1$ ) de agua destilada a temperatura ambiente ( $T_2$ ) y otro fue llenado con la misma cantidad de agua destilada ( $m_2$ ) y fue calentado en una parrilla a 50°C ( $T_1$ ) y se mide la temperatura de equilibrio ( $T_3$ ), esta se refiere a la temperatura constante que alcanza el agua cuando se mezclan el agua de los vasos en un intervalo de tiempo de 5 minutos. Este procedimiento se repitió 10 veces y los cálculos se hicieron con la siguiente fórmula:

$$C_{cont} = \left\{ \frac{m_1 C_{e_a} (T_1 - T_2)}{T_3 - T_2} \right\} - (m_2 C_{e_a}) \quad (11)$$

Para la entalpía se agregaron 100 ml de agua destilada a un vaso de precipitados, este se aisló en una caja de poliestireno (aislante térmico) y así evitar la pérdida de calor a través de las paredes del vaso (Figura 23). Cuando el agua se calentó, con el sonotrodo introducido en vaso, se tomó la lectura de la temperatura en diferentes intervalos de tiempo: Cada 10 segundos durante tres minutos, 30 segundos durante una hora y cada cinco minutos durante tres horas. Con los datos obtenidos se realizó la Gráfica de la temperatura con respecto al tiempo para obtener la función de cambio de temperatura con respecto al tiempo y así derivarla para encontrar la tasa de enfriamiento ( $\frac{\Delta T}{t_d}$ ).



**Figura 21. Aislante térmico para evitar la pérdida de calor a través de las paredes del vaso**

La ecuación de la tasa de enfriamiento fue multiplicada por la masa del agua (100 ml) y el calor específico del agua y así obtener la ecuación de entalpía:

$$H = (m_a C e_a) \frac{\Delta T}{t_d} \quad (12)$$

Para una potencia nominal, a una amplitud del 100% y un ciclo completo, se calculó el área a través de la cual se expulsa la energía del sonificador, este dato multiplica por la densidad acústica del equipo y da como resultado 32.51W.

### 6.8 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE PARTÍCULAS A TRAVÉS DE ULTRASONIDO DE ALTA FRECUENCIA.

Para esto es necesario conocer el volumen de la muestra a dispersar ya que es una variable que se toma en cuenta para el cálculo de energía (ecuación 10). Se agregaron 20 g de suelo a 80 ml de agua destilada y se registró el volumen desplazado por la muestra, dando como resultado un volumen total 92 ml para Pastizal, 94 ml para Pino y 95 ml para Mixto.

Se colocaron las muestras en el equipo de ultrasonido a diferentes tiempos, como se observa en la tabla 11. La energía fue calculada con la ecuación 13 descrita en el marco teórico, se comenzó con un tiempo menor a un minuto para obtener la energía más baja e ir incrementado el tiempo al doble

para que exista una proporcionalidad con la energía que se estuviera liberando durante la dispersión.

Al concluir la sonificación, la mezcla dispersada se tamizó a través de una malla de  $63\ \mu\text{m}$  de abertura para separar la arena. Esta se secó a  $65^\circ\text{C}$ . Los materiales finos se vaciaron en las probetas de 1000 ml donde se agitaron y se dejaron pasar 6 horas que es tiempo de caída de los limos. Es importante no dejar reposar 12 horas, ya que, al no tener ningún dispersante, podrían volver a formarse agregados y sedimentarse dentro de la fracción limo, por tanto, sobreestimar el contenido de limos y subestimar el contenido de arcillas. Los cálculos fueron realizados de manera similar al método de pipeta.

Se extrajeron 25 ml de la fracción arcilla y se secó a  $65^\circ\text{C}$  (para hacer los cálculos). Después se recuperó el resto de la fracción arcilla de las probetas, de tal manera, que estas solo contuvieran la fracción limo (Figura 24). Toda la fracción arcilla se secó a  $65^\circ\text{C}$ . Se realizó lo mismo con la fracción limo.



**Figura 22. Fracción arcilla recuperada en los vasos de precipitados y el restante (fracción limo) se encuentra en las probetas.**

Una vez secas las fracciones, se realizó lo siguiente:

Fracción arena: Se registró el peso y las arenas fueron guardadas en pequeñas bolsas de plástico.

Fracción Limo: Se realizó el mismo procedimiento que la fracción arcilla.

Fracción arcilla: Se molió en un mortero de ágata, después se pasó a través de un tamiz de 80  $\mu\text{m}$  de abertura y se colocaron en bolsas de plástico (Figura 25).



**Figura 23. Muestra molida en mortero de ágata y tamiz 80  $\mu\text{m}$  de abertura.**

## B. ANÁLISIS DE LABORATORIO (PROPIEDADES QUÍMICAS)

### 6.9. POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.

Se pesaron 10 g de cada una de las muestras y se colocaron en diferentes vasos de precipitados, se agregó 25 ml (relación 1 a 2.5) de agua destilada y se agitaron durante 20 minutos. Después de la agitación, se introdujo el electrodo para realizar la lectura de las muestras. Cada muestra se analizó por duplicado con un potenciómetro (*Thermo Scientific*).

#### 6.9.1. DETERMINACIÓN DE MATERIAL NO CRISTALINO (POTENCIAL DE HIDROGENO).

Se preparó 100 ml de NaF (1N), se agregó en el vaso de precipitados 50 g de este reactivo donde se añadió 1000 ml de agua destilada. Se dejó reposar durante tres días. Al tercer día, se tomó 50 ml para tomar lectura del pH (7.5-7.8). Se le agregaron 3 gotas de 0.25% de fenolftaleína para titular a rosa y llegar al punto final (8.2- 8.3).

En un vaso de precipitados se agregó un gramo de suelo y se colocó el electrodo dentro, posteriormente se le añadió la solución de NaF (pH 8.26) y se comenzó a tomar lectura del pH durante un intervalo de 10 minutos con el potenciómetro (*Thermo Scientific*). Este procedimiento fue similar para las muestras.

### 6.10 CARBONO ORGÁNICO EN DIFERENTES FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS.

La concentración de carbono orgánico total (COT) de las muestras no dispersadas y posteriormente en cada una de las fracciones granulométricas se realizó en el laboratorio de Biogeoquímica de Suelos perteneciente al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad de la UNAM Campus Morelia.

El análisis de COT se realizó mediante combustión seca y detección coulométrica (Huffman, 1977) en un equipo modelo CM5012 marca UIC, Inc. Todas las muestras fueron secadas en estufa a 70°C por 72 horas y posteriormente fueron molidas y tamizadas a través de una malla 100 (0.149 mm) que sirvió para evitar la presencia de raíces y restos vegetales (Etchevers et al., 2005).

Una vez determinada a la concentración de carbono en las muestras previas y posteriores a la dispersión, se procedió a estandarización la concentración de carbono orgánico asociado a las partículas minerales con respecto al carbono orgánico previo a la dispersión ultrasónica mediante las siguientes ecuaciones:

$$PCO_x = fm_x * CO_x \quad (12)$$

Donde:  $PCO_x$ : es el porcentaje relativo de carbono en fracción mineral x (arena, limo o arcilla);  $fm_x$ : es la concentración de cada fracción mineral en porcentaje;  $CO_x$ : es la concentración de carbono orgánico total en cada fracción mineral en porcentaje.

$$CO_{fm} = PCO_{sr} + PCO_{li} + PCO_{ac} \quad (13)$$

Donde:  $CO_{fm}$ : es el carbono orgánico asociado a la fracción mineral en porcentaje.

$$CO_l = COT - CO_{fm} \quad (14)$$

Donde:  $CO_l$ : es la concentración del carbono orgánico no asociado a la fracción mineral; COT: es la concentración del carbono orgánico total en la muestra completa en porcentaje.

## 7. RESULTADOS.

### A. PROPIEDADES FÍSICAS

#### 7.1 COLOR.

En la siguiente tabla se muestra el tipo de color de las muestras acorde a las tablas de Munsell:

**Tabla 3. Color de las muestras con humedad de campo y secadas al aire.**

Muestra	Color en húmedo	Clave	Color en seco	Clave
Pastizal	Negro	10 YR 2/1	Grisáceo pardo muy oscuro	10 YR 3/2
Pino	Negro	10 YR 2/1	Grisáceo pardo muy oscuro	10 YR 3/2
Mixto	Grisáceo pardo muy oscuro	10 YR 3/2	Café olivo	10 YR 4/4

Se observó una variación de color en las tres muestras cuando se secaron a temperatura ambiente. Lo cual puede sugerir que el contenido de agua, y con ello la pérdida de materiales no cristalinos y/o materia orgánica, influye de manera directa en los tonos de las tres muestras.

#### 7.2 HUMEDAD

Se obtuvieron los siguientes resultados de humedad, de acuerdo a la ecuación 1:

**Tabla 4. Promedio del porcentaje de humedad obtenido en las muestras**

Muestras	Humedad (%)
Pastizal	43.37
Pino	74.98
Mixto	42.15

En las tablas se puede observar que las muestras de pastizal y mixto tienen un porcentaje de humedad, sin embargo, la muestra de pino presenta un porcentaje mayor al 70% siendo esta la que tiene un mayor contenido en agua.

#### 7.3 DETERMINACIÓN DE DENSIDAD APARENTE, REAL Y POROSIDAD

##### a. Densidad Aparente

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con la ecuación 2.

**Tabla 5. Densidad aparente de las muestras**

Muestras	Masa (g)	Volumen ( $cm^3$ )	Densidad aparente ( $\frac{g}{cm^3}$ )
Pastizal	20	23	0.870
Pino	20	32	0.625
Mixto	20	32	0.625

Con los datos obtenidos, se observa que la densidad de las muestras es baja. Sin embargo, en la muestra de pastizal (ubicada a mayor altitud) posee una densidad mayor a comparación de las otras dos muestras (a menor altitud) en la cual su densidad es el mismo valor, pero menor a la muestra de pastizal.

#### b. Densidad real y porosidad

Los resultados obtenidos con el picnómetro de gas fueron los siguientes:

**Tabla 6. Densidad real y porosidad de las muestras.**

Muestras	Densidad real ( $\frac{g}{cm^3}$ )	% Porosidad
Pastizal	1.79	44.3
Pino	1.54	35.1
Mixto	1.73	42.5

Flores y Alcalá (2010) describen la interpretación de la porosidad de la siguiente manera:

- Muy Baja (<30%)
- Baja (30%-40%)
- Media (40%-50%)
- Alta (50%-60%)
- Muy Alta (>70%)

De acuerdo con los datos obtenidos, la porosidad posee valores similares en dos sitios (pastizal y mixto) y el sitio de pino posee una porosidad menor. Además, se logró observar que los valores de densidad real tienen el mismo comportamiento que la porosidad, es decir, los sitios de pastizal y mixto su valor fue similar mientras tanto en la muestra de pino fue menor.

#### 7.4 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE PARTÍCULAS CON HUMEDAD DE CAMPO.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de textura:

**Tabla 7. Porcentaje de las fracciones granulométricas de las muestras**

Muestras	% arenas	% limos	% arcillas
Pastizal	71.46	19.08	9.46
Pino	48.47	35.48	15.94
Mixto	40.82	36.14	23.04

De acuerdo con los datos obtenidos, la muestra de suelo de pastizal posee un mayor porcentaje en la fracción arena (71.46%), mientras que en los dos sitios de estudio restantes se puede apreciar que la fracción arena y limo son los que poseen un mayor porcentaje. Estos porcentajes se grafican en el triángulo de texturas y se obtiene la siguiente clasificación: Pastizal corresponde a un suelo franco-arenoso y la muestra de pino y mixto corresponden a suelos con textura franca.

### 7.5 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE ULTRASONIDO DE ALTA FRECUENCIA.

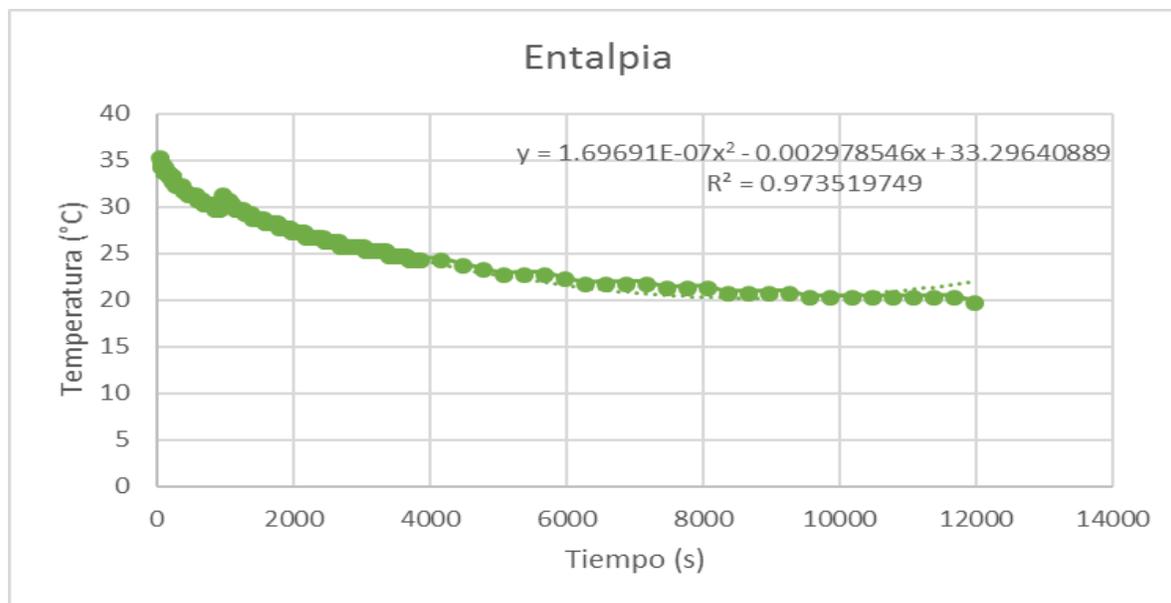
Primero se realizó el cálculo del calor del contenedor y los resultados se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 8. Datos obtenidos del calor del contenedor (medido 10 veces) aplicando la ecuación 8**

Muestras	$C_{cont} \left(\frac{J}{^{\circ}C}\right)$
C1	445.32
C2	348.83
C3	422.63
C4	313.95
C5	355.42
C6	302.71
C7	355.42
C8	355.23
C9	324.14
C10	391.12
<b>Promedio</b>	<b>361.48</b>

\* $C_{cont}$ : **Calor del contenedor**

Como se observa en la tabla anterior, el promedio del calor del contenedor fue 361.48 J/°C. Después se determinó la entalpía. Primero se realizó la gráfica de los datos obtenidos en las mediciones (figura 28). Posteriormente, se derivó y se multiplicó por la masa del agua (100 g) y el calor específico (4.186 J/g °C) manejando una amplitud del 100% en un solo ciclo.



**Figura 24. Gráfica del decremento de la temperatura con respecto al tiempo. En la esquina superior se muestra la ecuación obtenida al graficar estos datos.**

Para aplicar la ecuación calorimétrica (ecuación 7), se conoce la masa del agua (100 g), el calor específico del agua, calor del contenedor y la función de entalpía a una amplitud de 100% (tabla 10).

Se calculó la variable ( $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ ) que se refiere al tiempo de calentamiento del agua durante la sonificación.

Con los datos anteriores, se realizó el cálculo de la potencia calorimétrica obteniendo como resultado 8.884 W. Se observó que la potencia calorimétrica es menor que la potencia nominal del equipo, esto también fue descrito en el trabajo de Herrera *et al.*, 2005.

**Tabla 9. Ecuación de entalpía a una amplitud de 100% en un solo ciclo.**

Vibración de amplitud	Entalpía
100	$1.4206x10^{-4}x + 1.24659$

## 7.6 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE PARTÍCULAS A TRAVÉS DE ULTRASONIDO DE ALTA FRECUENCIA.

En la siguiente tabla se muestra los tiempos de dispersión para cada muestra:

**Tabla 10. Tiempos y energía para cada una de las muestras.**

Energía (J/ml)	Tiempo (s) (Pastizal)	Tiempo (s) (Mixto)	Energía (J/ml)	Tiempo (s) (Pino)
4.30	46	46	4.44	47
8.60	1'32	1'32	8.88	1'34
17.20	3'04	3'04	17.76	3'08
34.41	6'08	6'08	35.53	6'16
68.83	12'16	12'16	71.07	12'32
137.66	24'32	24'32	142.14	25'04

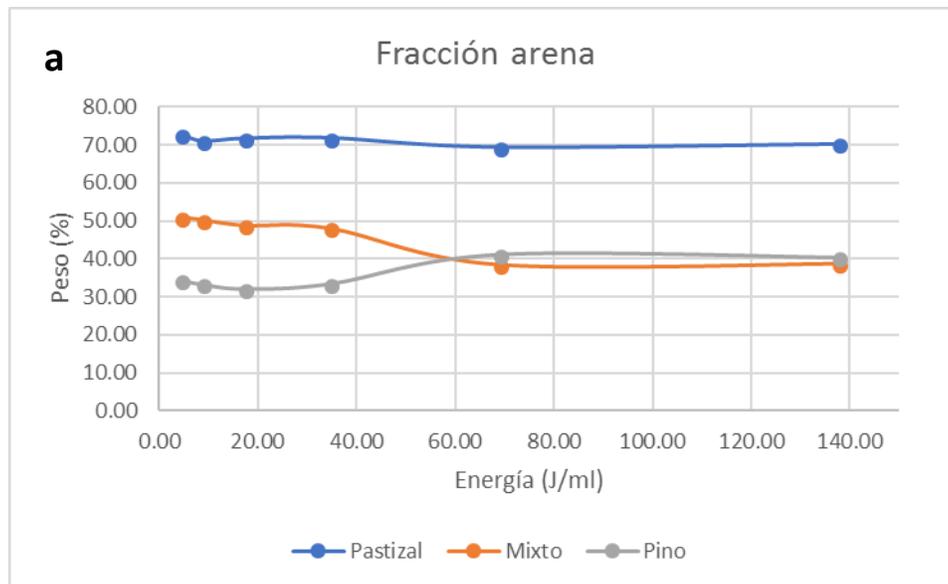
A continuación, se muestra los resultados obtenidos con la dispersión ultrasónica:

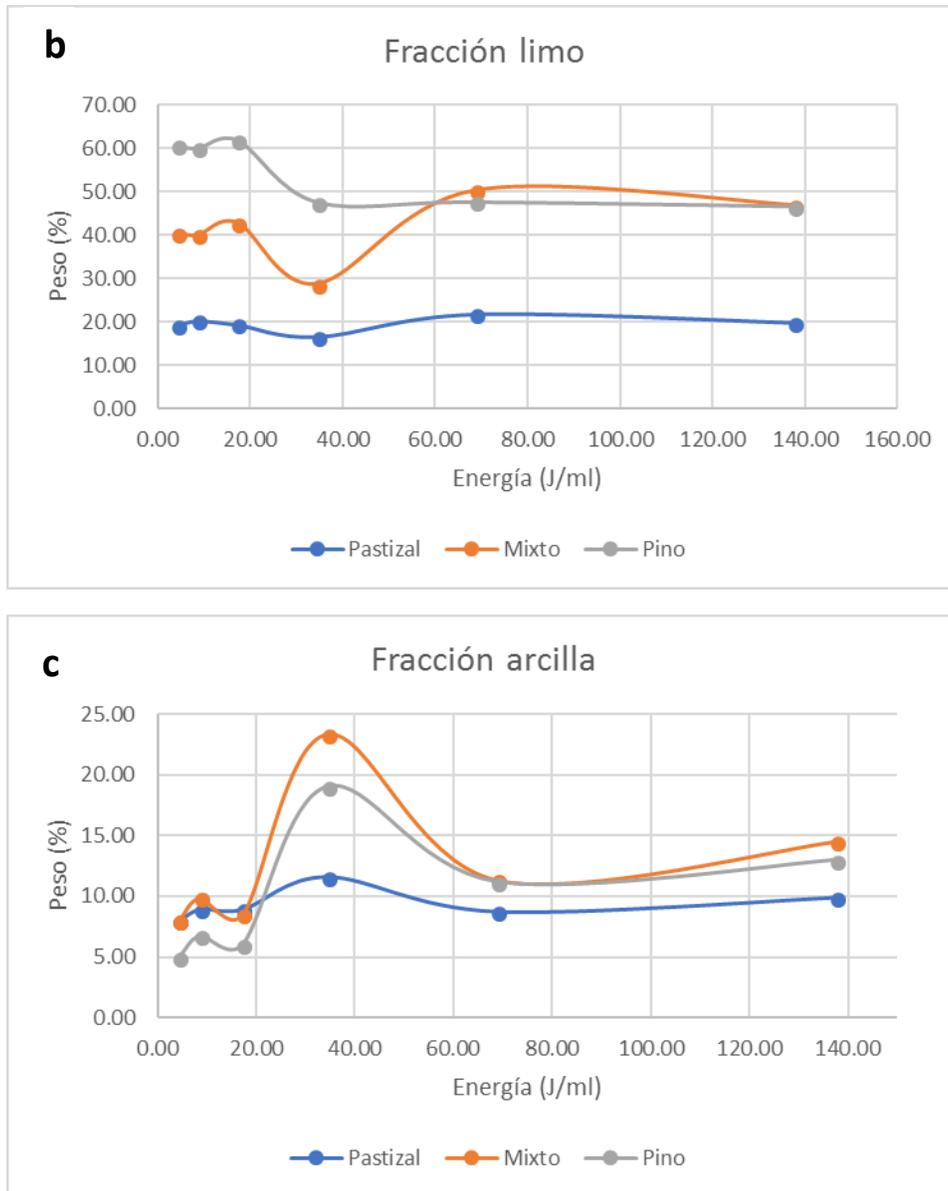
**Tabla 11. Diferentes fracciones granulométricas obtenidas a distintos niveles de energía.**

Muestras	Energía 4.30 J/ml		
	% Arenas	% Limos	% Arcillas
Pastizal	72.74	19,26	7.99
Pino	50.97	40.98	8.04
Mixto	34.39	60.67	4.94
<b>Energía 8.60 J/ml</b>			
Pastizal	70.98	20.06	8.95
Pino	50.23	39.93	9.83
Mixto	33.27	60.02	6.71
<b>Energía 17.20 J/ml</b>			
Pastizal	71.65	19.39	8.95
Pino	48.76	42.75	8.49
Mixto	32.11	61.89	6.00
<b>Energía 34.41 J/ml</b>			
Pastizal	71.77	16.64	11.58
Pino	48.00	28.72	19.01

<b>Mixto</b>	33.42	47.56	23.28
<b>Energía 68.83 J/ml</b>			
<b>Pastizal</b>	69.38	21.86	8.76
<b>Pino</b>	41.23	47.60	11.17
<b>Mixto</b>	38.39	50.31	11.30
<b>Energía 137.66 J/ml</b>			
<b>Pastizal</b>	70.18	19.90	9.91
<b>Pino</b>	40.45	46.59	12.96
<b>Mixto</b>	38.66	46.87	14.47

Con los resultados anteriores, se graficó el comportamiento de cada fracción para describir su comportamiento





**Figura 25. Gráficas del comportamiento de los porcentajes de las fracciones contra la energía de dispersión: (a) fracción arena, (b) fracción limo y (c) fracción arcilla.**

En las gráficas se observó que en la energía de 34.41 J los porcentajes de las fracciones tienden a tener un comportamiento constante y antes dicha energía el comportamiento de las arenas tienden a disminuir mientras que la de las fracciones finas tienden a aumentar. En la siguiente tabla se realizó una comparación entre los datos obtenidos en el método de pipeta contra el método de dispersor ultrasónico:

**Tabla 12. Resultados obtenidos del fraccionamiento del suelo con el método de la pipeta contra el método de dispersor ultrasónico (energía más cercana a los valores del método tradicional).**

Muestras	Método de pipeta			Ultrasonido (34.41 J/ml)		
	% Arenas	% Limos	% Arcillas	% Arenas	% Limos	% Arcillas
<b>Pastizal</b>	71.46	19.08	9.46	71.77	16.64	11.58
<b>Pino</b>	48.57	35.48	15.94	48.00	28.72	19.01
<b>Mixto</b>	40.82	36.14	23.04	33.42	47.56	23.28

Como se puede observar en la tabla 13 los resultados obtenidos en ambos métodos son similares.

## B. PROPIEDADES QUÍMICAS

### 7.7 POTENCIAL DE HIDRÓGENO Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.

Los resultados obtenidos se observan en la siguiente tabla:

**Tabla 13. pH y Conductividad eléctrica de las muestras**

Muestras	pH	Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
Pastizal	<b>4.63</b>	<b>74.98</b>
Pino	<b>5.51</b>	<b>77.50</b>
Mixto	<b>6.43</b>	<b>636.70</b>

Los valores de pH para las tres muestras son de carácter ácido y su conductividad eléctrica señala un bajo contenido de sales. Sin embargo, se observa un incremento de esto dos parámetros conforme disminuye la altitud por lo cual es en el bosque mixto donde los suelos tienden a la neutralidad e incrementan su conductividad eléctrica.

#### 7.7.1 DETERMINACIÓN DE MATERIAL NO CRISTALINO (POTENCIAL DE HIDROGENO).

Se presentan en la siguiente tabla los resultados obtenidos en la técnica

**Tabla 14. Incremento y estabilización del pH durante un intervalo de tiempo de 10 minutos**

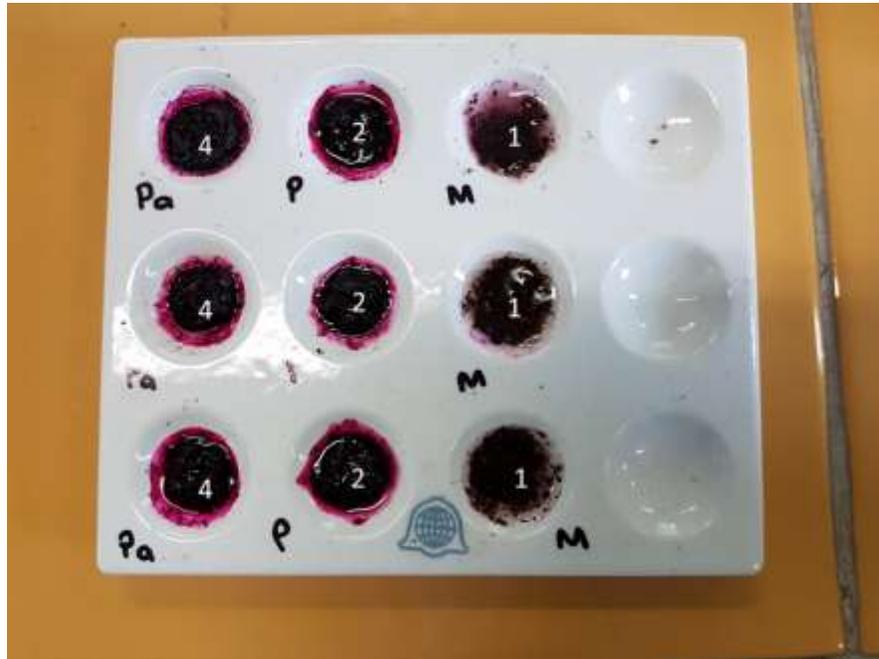
Muestras	pH										
	0 min	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	7 min	8 min	9 min	10 min
<b>Pastizal</b>	11.05	11.06	11.07	11.09	11.10	11.12	11.13	11.14	11.14	11.14	11.14
<b>Pino</b>	10.91	10.92	10.93	10.99	11.01	11.02	11.02	11.03	11.02	11.02	11.02
<b>Mixto</b>	9.12	9.13	9.14	9.17	9.20	9.23	9.26	9.29	9.30	9.31	9.31

Para corroborar esto, se colocó un gramo de suelo en una placa de porcelana. Se le añadieron cuatro gotas de fenoltaleína y cuatro de fluoruro de sodio (1N). Al momento se les tomó una fotografía y otra fotografía a los 10 minutos para observar la intensidad de color en la reacción (Figura 26). Se utilizó una escala de tipo Linkert (establecimiento de rangos), con el propósito de clasificar la propiedad de color (Figura 27). Los rangos de color son los siguientes:

0. Nula

1. Baja
2. Media
3. Fuerte
4. Muy fuerte

Al comparar las fotografías con la escala y los resultados obtenidos de pH, se puede apreciar que la muestra de pastizal es la que contiene una mayor cantidad de materiales no cristalinos, mientras que la muestra de mixto es la que tiene una menor cantidad de materiales no cristalinos.



B

Figura 26. Muestras con la fenolftaleína y fluoruro de sodio a los 10 minutos de reacción.

\*Pa: Pastizal, P: Pino y M: Mixto



Figura 27. Escala de tipo Linkert aplicado a la intensidad de color de reacción de la fenolftaleína y Fluoruro de sodio. Donde el 0 indica un color de reacción nula, el 1 una reacción baja, el 2 media, el 3 fuerte y el 4 muy fuerte.

### 7.8 CARBONO ORGÁNICO EN DIFERENTES FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS.

La concentración de carbono orgánico total en las muestras no dispersadas fue mayor en el suelo del bosque de pino mientras que el menor valor se registró en el pastizal (tabla 15).

Tabla 15. Porcentaje de carbono orgánico de las muestras.

Sitio	Carbono orgánico total (%)

Pastizal	<b>4.91</b>
Pino	<b>8.74</b>
Mixto	<b>7.88</b>

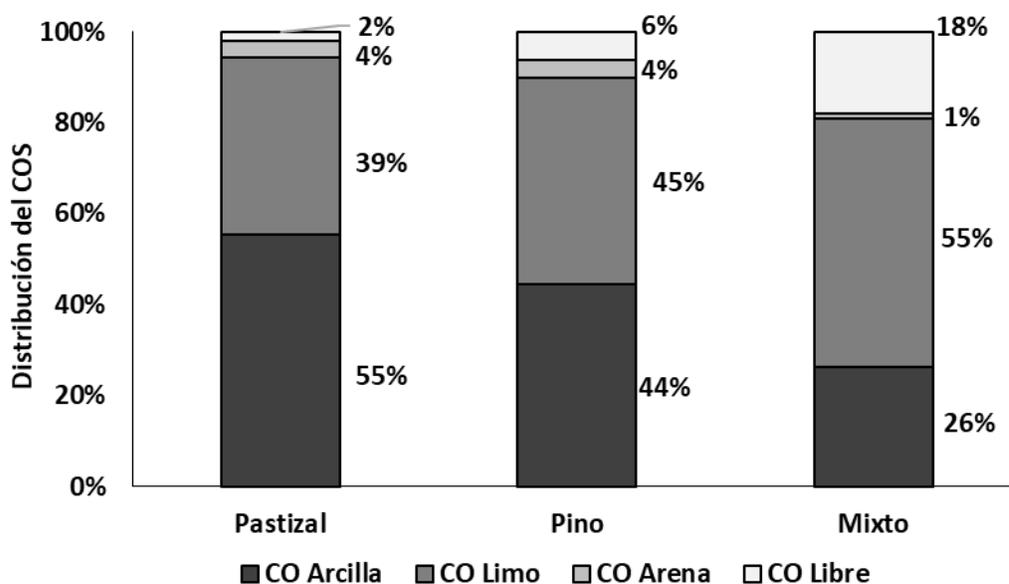
Se cuantificó la concentración de carbono orgánico en las fracciones minerales posterior a su dispersión con ultrasonido a la potencia de 34.41 J/ml, misma que tuvo la mejor correlación con el análisis granulométrico por el método de pipeta. De acuerdo a los datos obtenidos se observa que la concentración de carbono orgánico varía entre fracciones minerales donde consistentemente en la facción arena se presenta la menor concentración (<1%) mientras que en la fracción arcillas existe una mayor concentración de carbono orgánico a excepción del suelo del bosque mixto (tabla 16).

**Tabla 16. Porcentaje de carbono orgánico en las diferentes fracciones granulométricas de las muestras.**

Energía	%CO			
		arena	limo	arcilla
34.41 J/ml	Pastizal	0.25	11.5	23.5
	Pino	0.67	13.8	20.5
	Mixto	0.24	9.03	8.89

**\*CO: Carbono orgánico.**

Con base en la distribución de las partículas minerales y la concentración de CO en cada una de ellas podemos observar que en el CO no asociado a las fracciones minerales y el carbono asociado a limos aumentan en el sentido pastizal>bosque de pino> bosque mixto. Mientras que el carbono asociado a arcillas y arenas disminuyen en el mismo sentido (Figura 30)



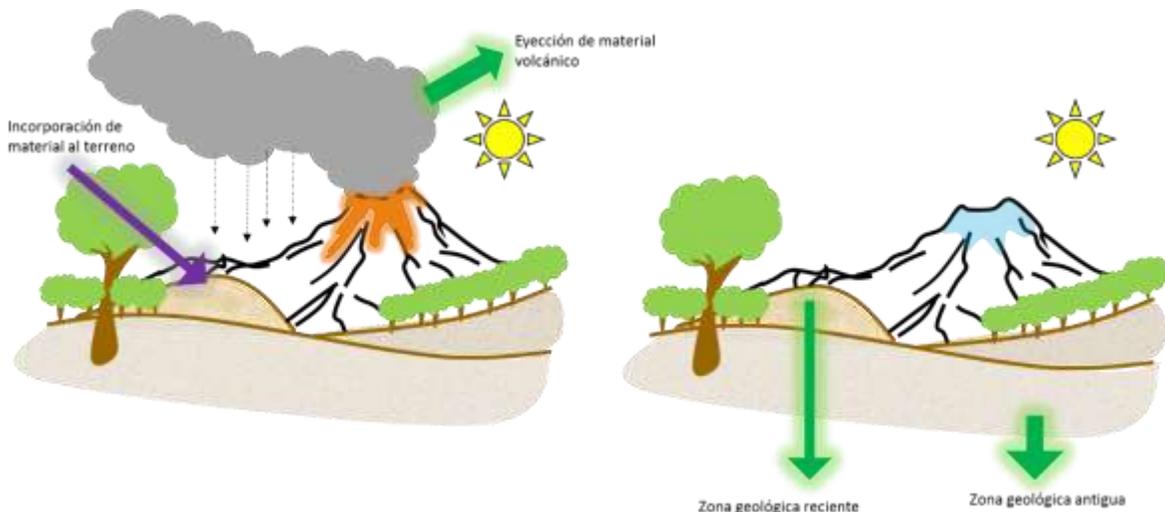
**Figura 28. Distribución de carbono orgánico en las diferentes fracciones granulométricas de los tres sitios de estudios. \*CO: Carbono orgánico**

## 8. DISCUSIÓN.

### 8.1. ESTANDARIZACIÓN DEL MÉTODO DE DISPERSIÓN PARA SUELOS DE ORIGEN VOLCÁNICO

En comparación con el trabajo reportado de Matus et al., (2005) quienes realizaron un estudio con Andosoles de la faja volcánica transmexicana donde reportaron una mayor cantidad de energía para poder dispersar el suelo (910 J/ml); esto se debió a que en ese trabajo no reportaron la calibración del equipo ultrasónico que utilizaron, por tanto, puede inferirse que trabajaron con la potencia nominal del equipo. Sin embargo, en el trabajo de Baez et al., (2014), los cuales analizaron suelos de origen volcánico, llegaron a la conclusión que se requiere una energía mayor a 1600 J/ml para dispersar un material rica en materiales no cristalinos y ricas en carbón. Sin embargo, al comparar los trabajos anteriores con este proyecto, se encontró que para dispersar suelos volcánicos se requirió una energía de 34.41 J/ml, es decir, se logró dispersar estos suelos a energías bajas.

En caso de la textura, en ambos métodos, se pudo observar que la muestra de pastizal tiene un mayor contenido de arena y que conforme se va disminuyendo la altitud, los porcentajes de materiales finos van incrementando como se observó en la muestra de suelo mixto. Esto quiere decir que el material más joven se encuentra en la parte superior y que el material más evolucionado se encuentra en la parte inferior. Esto se describe en el trabajo de Campos, (1998) donde menciona que al incrementar la fracción arcilla, se puede inferir de una zona geológica es más antigua y cuando se presenta un porcentaje mayor en las arenas es una zona geológica más reciente (Figura 31).



**Figura 29. Incorporación de material volcánico al suelo (zona geológica reciente) y la zona donde no hay una incorporación de material volcánico (zona geológica antigua).**

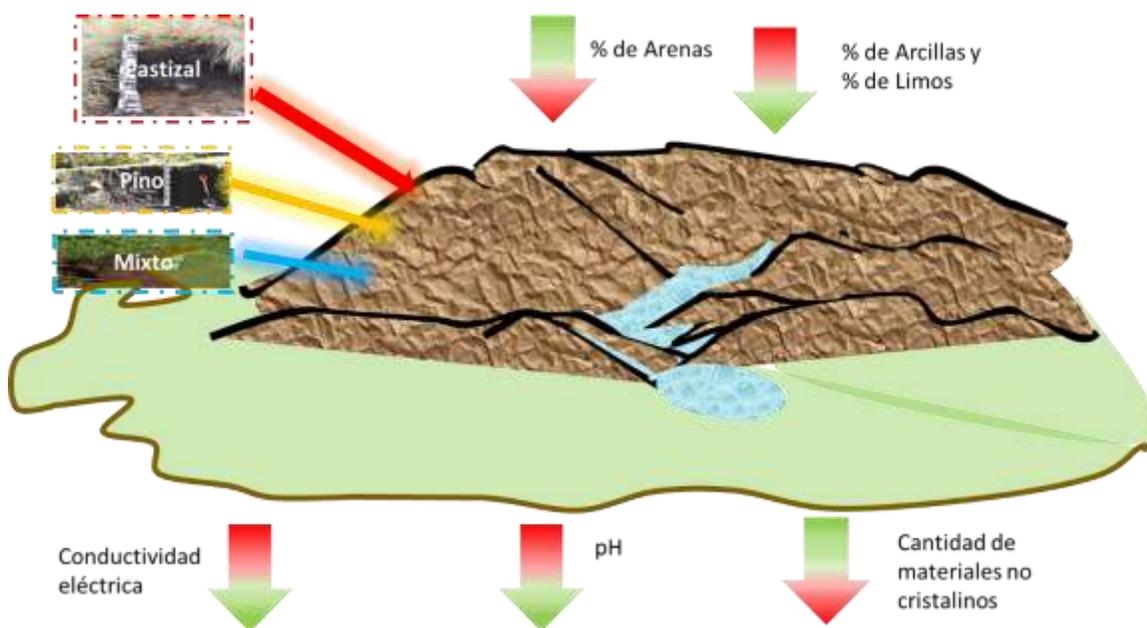
En este proyecto, se logró demostrar que a bajas energías con el equipo de ultrasonido de alta frecuencia UP100, podemos obtener una dispersión similar al método tradicional de Pipeta de suelos volcánicos, los cuales, al tener una gran cantidad de materia orgánica, tienen una mayor estabilidad en los agregados, y por tanto, se requiere una mayor energía. Por otra parte, el haber realizado y descrito el proceso de calibración del equipo es importante ya que nos indica la potencia real con la cual el equipo trabajó y así conocer la energía que aplicó al momento de dispersar la muestra, y por consecuencia, se obtuvieron datos más precisos. Otra ventaja del proyecto es que

no se utilizó ningún agente químico para la dispersión lo cual es importante, ya que los resultados que se obtengan de los análisis de carbono orgánico no van a presentar ninguna alteración.

## 8.2. DISTRIBUCIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA EN SUELOS VOLCÁNICOS BAJO DIFERENTES ESPECIES VEGETALES.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede observar que las propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados varían de acuerdo a su posición altitudinal, lo cual es consistente con lo reportado por Cepeda et al. (2007), Sin embargo, este factor no es el único que puede influir sobre las propiedades de los suelos, ya que en bosques templados de altitudes tropicales existe una fuerte correlación de la altitud con el tipo de vegetación (Challenger y Caballero, 1998), la cual es fuente de la materia orgánica y puede regular algunos rasgos de los suelos (van Breemen y Buurman, 2003)

De manera general las muestras de mayor altitud y relacionadas con pastizales montanos, muestran una mayor cantidad de material no cristalino, conductividad eléctrica más baja, pH más ácido y textura más gruesa lo cual indica que estos suelos muestran menor grado de desarrollo y por lo tanto una mayor predominancia de materiales menos intemperizados (materiales no cristalinos) (Shoji et al., 1993; Campos et al., 2001). Se observó que el pH, la conductividad eléctrica, la cantidad de materiales no cristalinos y los porcentajes de las fracciones varían con la latitud, esto se puede ser una consecuencia del grado de meteorización, la cobertura vegetal, etc.



**Figura 30. Comportamiento del pH, cantidad de materiales no cristalinos y de la conductividad eléctrica conforme a la altitud (incluye porcentaje de fracción arcillosa).**

A excepción de los demás parámetros, la concentración de carbono orgánico muestra un patrón definido por el gradiente altitudinal. La cantidad de materia orgánica, expresada como carbono orgánico, que se encuentra presente en los suelos es consecuencia de la tasa de producción de residuos por parte de la vegetación y su tasa de descomposición (Kögel-Knabner et al., 2002). La concentración de carbono orgánico puede ser resultado de la variación de la altitud en la que se

encuentran las muestras, es decir que esté relacionada con la distribución y tipo de partículas minerales en los suelos o que sea efecto de la vegetación quien hace que existan variaciones en la concentración de este elemento.

La concentración de carbono total mostró un patrón donde en el bosque de pino hubo la mayor concentración seguido del bosque mixto y por último el pastizal. Lo cual no coincide directamente con la distribución de partículas minerales o la cantidad de minerales no cristalinos. Sin embargo, si observamos la distribución del carbono entre las fracciones minerales en bajo cada tipo de vegetación, podemos observar que, en el pastizal, aunque existe el menor porcentaje de arcillas cerca más del 50% del C orgánico se encuentra unido a ellas, lo cual ha sido explicado como uno de los principales mecanismos de estabilización de la materia orgánica (Six et al., 2002; Von Lutzow et al., 2006) mientras que el carbono orgánico libre es aproximadamente 2%. Este patrón se modifica en los otros suelos, bajo pino representa 44% y 6%, mientras que en el bosque mixto representa 26% y 18% respectivamente.

Es cuando analizamos al interior de la relación del carbono orgánico del suelo con las partículas minerales cuando podemos encontrar nuevamente un patrón relacionado con el gradiente altitudinal, los suelos en la posición más elevada tienen menos carbono orgánico el cual permanece más estable y que es también donde las comunidades microbianas pueden tener poca materia orgánica disponible (Von Lutzow et al., 2006) en contraste con el bosque mixto donde los suelos se encuentran enriquecidos de arcillas pero presentan poca concentración de C orgánico por lo cual la cantidad relativa de materia orgánica estabilizada es menor y hay tres veces más carbono orgánico libre el cual puede ser susceptible de ser descompuesto por la comunidad microbiana. Estas observaciones no hubieran sido posibles sin la efectividad del método de dispersión por ultrasonido de las partículas minerales del suelo.

## 9. CONCLUSIÓN

De acuerdo con los objetivos establecidos y los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se puede concluir lo siguiente:

- a. La metodología de dispersión ultrasónica de partículas resultó ser eficiente para la caracterización de la materia orgánica en suelos de origen volcánico.
- b. Se logró desarrollar un método de calibración para el equipo de ultrasonido de alta frecuencia y así obtener la potencia real con la cual el equipo trabaja.
- c. Con los resultados obtenidos de la metodología de textura por el método de la pipeta y los resultados de la metodología de dispersión ultrasónica, se logró comparar dichos datos, y así se pudo observar que se obtuvieron valores similares entre ambos métodos.
- d. Con las fracciones obtenidas con la metodología de dispersión ultrasónica, se logró cuantificar la cantidad de carbono orgánico asociado a las partículas minerales, obteniendo así una disminución del carbono asociado a la fracción arcilla y arena y un incremento de éste en la fracción limo de acuerdo al orden siguiente: pastizal, pino y mixto.

Por tanto, se puede mencionar que las características del terreno, la posición en su altitud y la cobertura vegetal influyen en las propiedades físicas, químicas y la concentración de carbono orgánico en el suelo.

## 10. ANEXO

### 10.1 COMPORTAMIENTO DE LA POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA VIBRACIÓN DE AMPLITUD

Como se sabe, la potencia ultrasónica que el equipo va emitir depende directamente del porcentaje de amplitud de onda. Para este ensayo es importante medir las diferentes potencias que se obtengan del equipo al estar variando la amplitud.

El procedimiento se realizó acorde con Roscoe et al. (2000) que fue descrito por Morra et al. (1991). El volumen que se utilizó fue 100 ml de agua destilada, se utilizó el mismo vaso de precipitados de 100 ml de cristal, por tanto, la capacidad calorífica del contenedor tendrá el mismo valor descrito en la textura por dispersión ultrasónica. El calor específico del agua es una constante. Dicho lo anterior, la ecuación de entalpía y el cambio de temperatura con respecto al tiempo son las variables que van a variar al momento de cambiar la vibración de amplitud.

Se colocó un volumen de 100 ml de agua destilada en el vaso de precipitado. Posteriormente, se sumergió el sonotrodo a una altura de 3 cm. Después se dejó calentar un intervalo de tiempo de 30 minutos, durante el proceso de calentamiento se midió la temperatura (Figura 33). Se realizó el mismo procedimiento que en la entalpía (descrito en calibración del equipo ultrasónico)



**Figura 31 Montaje del desarrollo experimental para medir la temperatura de calentamiento**

Para cada amplitud la ecuación de entalpía fue diferente como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 17. Función de entalpía acorde a la vibración de amplitud.**

Vibración de amplitud (%)	Entalpía
100	$1.4206x10^{-4}x + 1.24659$
80	$1.1801x10^{-4}x + 1.03058$
60	$8.4115x10^{-5}x + 0.76273$
40	$5.5155x10^{-5}x + 0.48272$
20	$3.6079x10^{-5}x + 0.31972$

Por último, se utilizó la ecuación 7 descrita por North (1976), para calcular las diferentes potencias que se obtuvieron con las diferentes amplitudes. Estos resultados se describen la siguiente tabla:

**Tabla 18. Potencia obtenida acorde a la vibración de la amplitud de la onda.**

Vibración de amplitud (%)	Potencia (W)
100	8.884
80	5.538
60	3.666
40	2.418
20	1.560

Como se observa en estos resultados, la potencia va disminuyendo conforme se va reduciendo el porcentaje amplitud del procesador ultrasónico. Esto va a influir en los futuros análisis de dispersión ultrasónica de suelos, ya que para cada suelo la potencia va a ser diferente al momento de realizar el ensayo.

## 10. REFERENCIAS

- Aceves, F. (1996), Geología y Geomorfología del Volcán Nevado de Toluca, tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, División de Estudios de Posgrado, U.N.A.M., México, 17-18 p
- Alcalá, R., Flores, L. (2010) Manual de procedimientos analíticos, Departamento de edafología (U.N.A.M.), México, 5-20.
- Anderson, D.W., Saggar, S., Bettany, J.R., Stewart, W.B. (1981) Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter: the nature and distribution of forms of carbón, nitrogen and sulfur, Canadian Journal of Soil Science 45: 767-772.
- Baez, A., Hidalgo, C.I., Matus, F., Prat, C., Etchevers, J. (2011) Fraccionamiento y acumulacion de carbono organico en tres suelos volcanicos degradados de Mexico, en Gallardo Lancho J.F. (ed.) Materia organica edafica y captura de carbono en sistemas iberoamericanos. Salamanca : SiFyQA, 61-78.
- Bosch, M., Costa, J.L., Néstor, F., Aparicio, V. C., Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo, Ciencia del suelo, 30: 95-105.
- Buey, C.S. (2008) La picnometría de Helio. Fundamentos físicos, normativa, descripción del equipo y procedimiento experimental, Centro de estudios y experimentación de obras públicas, Ingeniería civil 151: 1-41
- Burt, R. (2004) Soil survey laboratory methods manual, Natural resources conservation service, Nebraska.
- Busacca, A.J., Aniku, J.R., Singer, M.J. (1984) Dispersion of soils by an ultrasonic method that eliminates probe contact, Soil Science Society of America Journal. 48: 1125-1129
- Challenger, A., J. Caballero. (1998). Utilización y Conservación de los Ecosistemas Terrestres de México: Pasado, Presente y Futuro. CONABIO, Instituto de Biología. Sierra Madre, México, D. F. 847 p.
- Campos, A. (1998), El suelo, México, INE-SEMARNAP, 181-192

- Candan, F., Broquen, P. (2009) Aggregate stability and related properties in NW Patagonian Andisols, *Geoderma* 154: 42,47.
- Casanova, E. (2005) Introducción a la ciencia del suelo, Consejo de desarrollo científico y humanístico, Caracas.
- Cepeda, J. M., Restrepo, A.P., Lozano, X. (2007), Relaciones entre la geomorfometría y las propiedades físicas de los suelos de la zona central del humedal de Florida, *Revista de topografía Azimut*, (1).
- Christensen, B.T., (1992), Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates, *Advances of Soil Science* 20: 1-90.
- Christensen, B. T. (1985) Carbon and nitrogen in particle size fractions isolated from Danish arable soils by ultrasonic dispersion and gravity-sedimentation, *Acta Agriculture Scandinavica* 35: 175-187.
- CONANP, (2015) Área de protección flora y fauna Nevado de Toluca, [En línea]: <http://nevadotoluca.conanp.gob.mx/> consultado el día 15 de enero del 2018
- Danlgren, R.A., Saigus, M., Ugolini F.C. (2004) The nature, properties and management of volcanic soils, *Advances Agronomy* 82: 113-182.
- Dungait, J.A.J., Hopkins, D.W., Gregory, A.S., Whitmore, A.P. (2012) Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology* 18: 1781-1796
- Edwards A.P., Bremner, J.M. (1967) Dispersion of soil particles by sonic vibration, *Journal of Soil Science* 18: 47-63.
- Etchevers, J., Monreal, C., Hidalgo, C., Acosta, M., Padilla, J., López, R. (2005). Manual para la determinación de carbono en la parte aérea y subterránea de sistemas de producción de laderas. Colegio de Postgraduados. México. 29.
- FAO, (2001) Soil carbon sequestration for improved land management, *World soil reports* 96. Italia, 58

- Galicia, L., Chávez, B., Kolb, M., Jasso, R.I., Rodríguez, L.A., Solís, L., Guerra de la Cruz, V., Pérez, E., Villanueva, A. (2018) Perspectivas del enfoque socioecológico en la conservación, el aprovechamiento y o de servicios ambientales de los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, 24.
- García, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Capra, L., Garduño, V.H., Espíndola, J.M., 2002, *Geology of Nevado de Toluca volcano and surroundings areas, Central México: Boulder, Colorado, Geological Society of America* 89: 1-26
- Gregorich E. G., Kachanoski, R. G., Voroney, R.P. (1998) Ultrasonic dispersion of aggregates: distribution of organic matter in size fractions. *Journal of Soil Science* 68: 395-403.
- Genrich, D.A., Bremmer J.M. (1972a) A reevaluation of the ultrasonic-vibration method of dispersing soils, *Soil Science Society of America Journal*. 36; 944-947
- Gómez, E., Tobon, C., (2012), Dinámica del agua en Andosoles bajo condiciones de ladera, *Revista Facultad Nacional de Agronomía. Medellín* 65; 6765-6777
- Huffman EWD. (1977). Performance of a new carbon dioxide coulometer. *Microchemical Journal* 22:567573 DOI 10.1016/0026-265X(77)90128-X.
- Huygens, D., Boeckx, P., Van Cleemput, O., Oyarzún, C., Godoy, R., (2005), Aggregate and soil organic carbón dynamics in South Chilean Andisols, *Biogeosciences* 2, 159-174.
- INEGI, (2006), *Guía para la interpretación de cartografía edafológica: Capítulo 3 Unidades y subunidades de suelo, México*, 23-24.
- Jaramillo, D., (2002), *Introducción a la ciencia del suelo, Medellín, Colombia*, 97-100 & 165-167.
- Krasilnikov, P., Gutierrez, M.C., Ahrens, R.J., Cruz, C.O., Sedov, S., Solleiro, E., (2013), *The soils of Mexico, Springer, Nueva York*, 112-115.

- Kögel-Knabner, I. (2002) The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as input to soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 34: 139-162.
- MacTavish, D.C., Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., (2009), Use of sonication to determinate the size distribution of soil particles of organic matter *Canadian Journal of Soil Science*. 89: 413-419.
- Martínez, J., Vitola, J., Sandoval, S.P., (2007), Fundamentos teórico-prácticos del ultrasonido, *Tecnura*, 20: 4-18.
- Martínez, E., Fuentes, J.P., Acevedo, E., (2008), Carbono orgánico y propiedades del suelo, *R.C. Suelo. Veg.* 8: 68-96.
- Matus, F., Herrera, R., Smulders, F., (2005). Determinación absoluta de la potencia y energía disipada en agua pura por una sonda de ultrasonido, *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 5: 23-29.
- Matus, F., Maire, C., (2000), Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno, *Agricultura Técnica Chillán*, 60:112-126.
- Mayer, H., Mentler, A., Papakyriakon, M., Rampazzo, N., Marxer, Y., Blum, W.E.H., (2002), Influence of vibration amplitude on the ultrasonic dispersion of soils, *International Agrophysics* 16: 53-60.
- Mentler, A., Mayer, H., M., Straub, P., Blum, W.E.H., (2002), Characterisation of soil aggregate stability by ultrasonic dispersion, *International Agrophysics* 18: 39-45
- Morra M.J., Blank, R.R., Freeborn, L.L., Shanfi, B., (1991), Size fraction of soil organo-mineral complexes using ultrasonic dispersion. *Soil Science* 152: 294-303.
- North, P.F., (1976) Towards and absolute measurement of soil stability using ultrasound, *Journal Soil Science* 27: 451-459.

- Osman, K., (2013), Soils: Principles, properties and management, Springer, Nueva York, 73-74.
- Peña, V.M., Vázquez, L., Siebe, C. (2009) Soil organic carbon stocks and forest productivity in volcanic ash soils of different age (1835–30,500 years B.P.) in Mexico. *Geoderma* 149: 224-234
- Porta, J., Acevedo, M., Roquero, C., (2003), Edafología para la agricultura y medio ambiente, Mundi-Prensa, Madrid, 45-60.
- Raine, S. R., So, H.B., (1994), Ultrasonic dispersion of soil in water effect of suspension properties on energy dissipation and soil dispersion, *Acoust. Journal of Soil Science. Res.*, 32: 1157-1174.
- Ruiperez, C., Calafate, R., Mulas, R., Lafuente, F., López, O., Turrión, M.B., (2004), El fraccionamiento granulométrico de la materia orgánica como índice de su comportamiento y evolución de los suelos, *Cuadernos de la sociedad Española de Ciencias forestales*, 20: 221-226.
- Roscoe, R., Buurman, P., Velthorst, E.J., (2000), Disruption of soil aggregates by varied amounts of ultrasonic energy in fractionation of organic matter of a clay Latosol: carbon, nitrogen and  $\delta^{13}\text{C}$  distribution in particle-size-fractions, *European Journal of Soil Science*. 51: 445-454.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgreen, R. (1993), *Volcanic Ash Soils: Genesis, Properties and Utilization*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 189-197.
- Silva, J., Deenik, J., Yost, R., Bruland, G., Crown, S., (2014) Improving clay content measurement in oxidic and volcanic ash soils of Hawaii by increasing dispersant concentration and ultrasonic energy levels, *Geoderma* 237: 211-223.
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., Paustian, K., (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241, 155-176.
- Smith, T., Smith, R., (2007), *Ecología*, Pearson Education, Madrid, 94-97.

- Tarbuck, E., Lutgens, F., (2005), Ciencias de la tierra, Pearson Education, Madrid, 8 Edición, 176-197.
- Van Breemen, N., Buurman, P. (2003). Soil formation. Kluwer Academic Publishers, 404.
- Von Lützow, M., Kogel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H. (2006) Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review. European Journal of Soil Science 57: 426-445