



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

# LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional de Estudios Superiores,  
Unidad Morelia

Caracterización física, hídrica y mecánica de  
un depósito de flujo piroclástico enriquecido  
en pómez del volcán El Chichonal, Chiapas

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADA EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A

Itzayana Torres Velazquez

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Antonio Pola Villaseñor  
CO-DIRECTOR DE TESIS: M.I. Pedro Martín Pacheco Valdovinos

MORELIA, MICHOACÁN

FEBRERO, 2020



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.



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

**MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE**  
DIRECTORA  
DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
**PRESENTE**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 09** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **09 de octubre del 2019**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno (a) **Itzayana Torres Velazquez** de la Licenciatura en Geociencias, con número de cuenta **415070311** con la tesis titulada: "Caracterización física, hídrica y mecánica de un depósito de flujo piroclástico enriquecido en pómez del volcán El Chichonal, Chiapas" *bajo* la dirección como **tutor** del Dr. Antonio Pola Villaseñor y como **co-tutor** el MI. Pedro Martín Pacheco Valdovinos.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

<b>Presidente:</b>	Dra. María del Sol Hernández Bernal
<b>Vocal:</b>	Dr. Gabriel Vázquez Castro
<b>Secretario:</b>	Dr. Antonio Pola Villaseñor
<b>Suplente 1:</b>	Dr. Luis Rafael Olmos Navarrete
<b>Suplente 2:</b>	Dr. Javier Martínez Martínez

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Morelia, Michoacán a, 13 de enero del 2020.

  
**DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ**  
SECRETARIO GENERAL

**CAMPUS MORELIA**

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta  
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)56.23.73.00, Extensión Red UNAM: 80614  
[www.enesmorelia.unam.mx](http://www.enesmorelia.unam.mx)

## **Dedicatoria**

*Con cariño para mis padres y mi abue,  
por su paciencia y apoyo incondicional♥*

## **Agradecimientos institucionales**

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme formar parte de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, que, a lo largo de cinco años, me ha ofrecido los mejores servicios educativos y administrativos, así como las mejores instalaciones, para mi formación académica y personal.

Agradezco a mi Tutor de tesis el Dr. Antonio Pola Villaseñor, por su apoyo y confianza durante mi estadía en la Unidad de Petrofísica, así como la motivación día a día y los conocimientos transmitidos, en el aspecto laboral, personal y deportivo.

Agradezco a mi Co-Tutor el M. I. Pedro Martín Pacheco Valdovinos, por su apoyo, regaños y amistad. Ha sido un gran apoyo en el transcurso de esta investigación.

Agradezco a mis sinodales la Dra. Ma. Del Sol Hernández Bernal, Dr. Gabriel Vázquez Castro, Dr. Luis Rafael Olmos Navarrete y Dr. Javier Martínez Martínez, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

Agradezco a todos los profesores con los que tuve el placer de tomar clases durante la carrera en Geociencias: cada uno me dejó un gran aprendizaje. En especial, agradezco a la Dr. Ma. Del Sol Hernández Bernal por el gran apoyo a lo largo de la carrera universitaria, por transmitir con tanta pasión sus conocimientos, e inspirarme a ser mejor.

Agradezco el apoyo económico brindado al Proyecto de colaboración bilateral México – Unión Europea (268074). *Cooperation in Geothermal energy research Mexico-Europe for development of Enhanced Geothermal Systems and Superhot Geothermal Systems (GEMex). Workpage 6. Task 6.1. - Rock, fracture and reservoir fluid properties. Título del proyecto: Physic – mechanical, hydric, and thermal characterization of different rocks and its implications in geothermal fields.*

## **Agradecimientos personales**

Agradezco a las personas más importantes en mi vida: mi familia. Por todo el apoyo que me han brindado en esta etapa, su confianza, paciencia, cariño, regaños, y lo más importante, por alimentar a esta tesista. Este trabajo no habría podido ser posible sin ellos. Gracias infinitas.

Agradezco a Pedro Luis, por su apoyo, cariño y comprensión durante este proceso.

Agradezco a mis compañeros de laboratorio, los gordos, por la gran amistad y apoyo brindado a lo largo del mi estadía en la Unidad de Petrofísica: a Ángel A. Ramírez por siempre apoyarme en mis pruebas de laboratorio y por la paciencia ante estas; a J. Guadalupe Correa, por su gran amistad y apoyo en los cortes de rocas; a Hugo Sereno, por su gran apoyo moral y apoyo en los cálculos que a veces no me salían; a Carmen A. por su amistad y regaños cuando no estudiaba bien mis metodologías; y a Mauricio Soto, por siempre tener un café para mí en días de sueño.

Agradezco a mis compañeros de generación por compartir momentos divertidos en las prácticas de campo, por las posadas navideñas y las deliciosas carnes asadas. Que, a pesar del tiempo, las áreas de especialización y conflictos durante la carrera, seguimos compartiendo momentos juntos. En especial a Carmen, por su gran amistad.

Agradezco al entrenador de atletismo José Álvarez, porque indirectamente ha sido de apoyo en este proceso, ya que mi desarrollo deportivo ha sido un pilar muy importante para mí desarrollo personal y académico, durante la carrera universitaria.

Por último, agradezco a todas las personas que han estado apoyándome desde siempre, a mis mejores amigas y amigos, por confiar en mí y echarme porras en todo momento: Adriana, Zuri, Claudia, Paula, Azalea, Liz y Dano.

## Índice

Resumen .....	11
<i>Abstract</i> .....	12
1. Introducción .....	13
1.1. Antecedentes .....	14
1.2. Justificación .....	15
1.3. Objetivos.....	17
1.4. Localización.....	17
2. Marco tectónico – geológico .....	18
2.1 Contexto geológico.....	19
2.2 Contexto tectónico.....	24
3. Metodología.....	27
3.2. Petrografía .....	28
3.3 Propiedades físicas .....	39
3.3.1 Densidad .....	39
3.3.2 Porosidad .....	47
3.4 Propiedades hídricas .....	59
3.4.1 Permeabilidad .....	59
3.4.2 Absorción por inmersión en agua a presión atmosférica.....	68
3.4.3 Evaporación.....	70
3.4.4 Capilaridad .....	73
3.5 Propiedades mecánicas.....	77
3.5.1 Prueba de carga puntual y carga puntual modificada .....	78
3.5.2 Compresión simple .....	82

3.5.3 Compresión triaxial .....	87
4. Resultados y discusiones .....	91
3.1 Preparación de especímenes .....	28
3.1.1 Corte de especímenes.....	28
3.1.2 Secado, etiquetado y medición de los especímenes .....	29
4.1 Descripción petrográfica.....	91
4.2 Propiedades físicas .....	94
4.2.1 Densidad .....	95
4.2.2 Porosidad .....	96
4.3 Propiedades hídricas.....	100
4.3.1 Permeabilidad .....	101
4.3.2 Absorción por inmersión en agua a presión atmosférica.....	105
4.3.3 Evaporación.....	107
4.3.4 Capilaridad .....	109
4.4 Propiedades mecánicas.....	111
4.3.1 Carga Puntual .....	112
4.3.2 Compresión simple y triaxial con medición de deformaciones axial y transversal .....	114
4.5 Discusión general.....	117
5. Conclusiones.....	120
6. Bibliografía.....	123



## Lista de figuras

- Figura 1. Mapa de localización del volcán El Chichonal, en la cual se aprecian las carreteras y comunidades más cercanas al volcán. .... 18*
- Figura 2. a) Se observan estructuras geológicas, así como los diferentes tipos de roca y productos volcánicos que afloran en la zona del volcán Chichonal. b) Ubicación del lugar en que se obtuvieron las muestras de roca, dentro de los depósitos piroclásticos de la erupción de 1982. (García-Palomo, 2004; Layer et al., 2009; Garduño-Monroy et al., 2015; Scolamacchia y Capra, 2015). .... 21*
- Figura 3. Columna estratigráfica de los depósitos emitidos por el volcán Chichonal. Los depósitos señalados con las letras A, B, C corresponden a los únicos depósitos del volcán con contenido de pómez, en particular el depósito señalado con la letra C es el depósito en estudio. (Espíndola et al. 2000; Macías, 2005). .... 23*
- Figura 4. Se muestran las placas tectónicas que interactúan con el estado de Chiapas: al norte la placa Norteamericana, al noreste la placa del Caribe con una componente lateral y al sur la placa de Cocos, dentro de esta placa se encuentra la Trinchera mesoamericana y asimismo la cresta de Tehuantepec ) (García-Palomo, 2004; Mora et al., 2007; Layer et al., 2009). .... 25*
- Figura 5. Modificado de (Garduño-Monroy et al., 2015). Modelo digital de elevación (INEGI), en el cual se distinguen las diferentes estructuras geológicas que caracterizan la fisiografía a los alrededores del volcán Chichonal. .... 27*
- Figura 6. a) cortadora de banco utilizada en los cortes de los especímenes irregulares. b) máquina de extracción de testigos, c) cortadora de corte para dar proporción a los especímenes cilíndricos de acuerdo a las normas. .... 29*
- Figura 7. Características de la morfología de los elementos que componen una roca (Stow, 1997). .... 32*
- Figura 8. Muestra de una página del manejo de los colores en la tabla de colores que ofrece Munsell. a) se muestra un ejemplo de gama de colores de Munsell. b) asignación de nombre y nomenclaturas correspondientes a cada color de la figura 1a (Munsell, 2009). .... 33*

<i>Figura 9. Diagramas ternarios en los que se grafican tres elementos que constituye la roca para clasificar a la roca de acuerdo al contenido de cristales, vidrio y fragmentos de roca.</i>	34
<i>Figura 10. Procedimiento durante la separación de los elementos que constituyen la roca. a) roca escaneada y humedecida, sin ningún análisis. b) separación de todos los elementos de la roca. c) separación de los anfíboles. d) separación de las plagioclasas. e) separación de los piroxenos. f) separación de los poros.</i>	35
<i>Figura 11. Representación gráfica de la relación gravimétrica y volumétrica, partiendo de una roca seca. a) representación de la fase gaseosa y sólida en un espécimen. b) relación de volúmenes y masas de acuerdo a las fases: <math>V_t</math>=volumen total, <math>V_v</math>= volumen de vacíos, <math>V_s</math>= volumen de la roca sólida, <math>m_t</math>= masa total, <math>m_v</math>= masa de vacíos, <math>m_s</math>= masa de la roca sólida</i>	40
<i>Figura 12. Se aprecia el espécimen antes de introducir a la celda, posteriormente el espécimen dentro de la celda y, por último, las partículas de helio entrando en todos los poros del espécimen.</i>	42
<i>Figura 13. Representación de las celdas internas del picnómetro de helio, conectadas por una válvula (Santiago y Raya, 2008; Suárez, 2014).</i>	42
<i>Figura 14. Pasos a seguir durante el procedimiento para obtención de la densidad real. a) los cuatro especímenes con los que trabajó en esta prueba. b) mediciones del espécimen con la ayuda de un Vernier para obtener el volumen aparente de la muestra. c) secado de especímenes en el horno. d) pesado del espécimen en báscula de precisión marca Sartorius, modelo PRACTUM. e) obtención de densidad real mediante el picnómetro de Helio ULTRAPYC 1200e.</i>	46
<i>Figura 15. a) porosidad primaria o intergranular, la cual está indicado entre los elementos de la roca con la flecha negra. b) porosidad secundaria o inducida, la cual está indicado entre las fracturas con la flecha negra.</i>	47
<i>Figura 16. La imagen muestra los tres tipos de porosidad en 2D: poros accesibles, no accesibles e interconectados. Se puede observar que los poros conectados pueden mostrar</i>	

*diferente estructura que depende del tipo de roca (formación). Es importante mencionar que en 3D, los poros aparentemente aislados pueden resultar conectados con otros. .... 50*

*Figura 17. Las fuerzas atractivas entre moléculas del líquido son causantes de la tensión superficial y pueden ser fuerzas de cohesión o de adhesión, dependiendo de la naturaleza del líquido. a) cuando las fuerzas cohesivas predominan, el líquido sobre la superficie tiende a mantenerse unido. b) cuando las fuerzas adhesivas predominan, el líquido sobre la superficie tiende a extenderse. .... 51*

*Figura 18. Relación de volumen intruído con respecto al radio de poro. En la imagen se muestra la clasificación de poros según su tamaño (ver Martínez-Martínez et al., 2017 para su revisión). La línea de intrusión se relaciona directamente con la extrusión, ya que la intrusión representa una primera aproximación de la forma de los poros, como lo son los poros cuello de botella, estos usualmente son representados en una línea escalonada de intrusión de Hg; la línea de extrusión por su parte, estos poros los representa con una extrusión de menos del 50% de Hg. .... 53*

*Figura 19. Características del sistema poroso. a) tipos de poros. b) representación gráfica de la tortuosidad. .... 54*

*Figura 20. a) tres de los cuatro especímenes que se trabajaron en esta prueba. b) espécimen después de haber sido sometido a la prueba de porosimetría de mercurio. c) en el lado izquierdo se encuentra el porosímetro de mercurio acompañado por la computadora en cual se trabajó durante la prueba. De lado derecho se encuentra la campana de vacío, es esta cámara se manipula todo el mercurio y sus desechos. .... 56*

*Figura 21. a) cámara de vacío. b) distribución de muestras dentro de la cámara de vacío. c) especímenes después de ser saturados en la cámara de vacío y colocados en un recipiente con agua. d) peso saturado. e) peso hidrostático sobre una canastilla dentro de una cubeta de agua. .... 58*

*Figura 22. Relación de la permeabilidad por intrusión de gas con respecto al diferencial de presiones. La línea verde representa la línea de tendencia de los cinco puntos de permeabilidad, mientras que el punto rojo representa la permeabilidad al líquido cuando la presión es igual cero (ver Suárez, 2014). .... 63*

<i>Figura 23. Los círculos representan la relación del diferencial de presión con respecto a los valores de permeabilidad del gas de cada prueba. Hay que recordar que la ecuación lineal de los cinco puntos cuando el diferencial de presiones es igual a cero representa la permeabilidad del flujo de agua.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 24. a) especímenes sometidos a permeabilidad de nitrógeno (alta pureza, 99.99 %). b) mediciones del diámetro de los especímenes. c) mediciones de la longitud de los especímenes. d) equipo de permeabilidad. A la izquierda de la imagen se encuentra la computadora en donde se encuentra instalado el software del permeámetro (GasPerm), del lado derecho se encuentra el permeámetro de nitrógeno. e) se muestra la celda en la que se introduce el espécimen. ....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 25. En la gráfica se puede identificar un cambio en la pendiente. La primera pendiente está relacionada principalmente con macro poros (&gt;100 <math>\mu\text{m}</math>), y la segunda pendiente, la cual es menos prolongada que la primera, se relaciona con los meso y micro poros (&lt;100 <math>\mu\text{m}</math>).....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 26. Gráfica representativa de evaporación: antes del cambio de evaporación se considera como la fase de evaporación lenta y después del cambio de evaporación se considera fase de evaporación lenta. ....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 27. a) especímenes que se utilizaron en la prueba. b) evaporación de los especímenes a las 24 horas. ....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 28. Gráfica representativa de capilaridad, en la que se indica Cc1 para la primera pendiente de la curva y Cc2 para la segunda pendiente de la curva de absorción por capilaridad. ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 29. a) especímenes que se utilizaron en el ensayo. b) y c) medición de diámetro y altura. d) y e) inicio del ensayo con 3 mm de agua de la altura de los especímenes.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 30. a) punzones en contacto con el fragmento de roca, antes de iniciar el ensayo. b) equipo utilizado en el ensayo. El manómetro de la izquierda marca los N, mientras que el manómetro de la derecha marca los kN c) algunos de los fragmentos de rocas, después de ser fallados. ....</i>	<i>81</i>

<i>Figura 31. a) especímenes antes de ser sometidos a carga. b), c), d) especímenes con diferentes formas de fallas.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 32. a) espécimen compuesto por una membrana en la que se le colocan los medidores de formación transversal y lateral (The GDS LVDT Local Strain Transducers). b) gráfica de esfuerzo axial contra deformación transversal y axial, para obtener el coeficiente de Poisson. ....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 33. Diferentes métodos por los cuales se obtiene el módulo de Young. a) módulo tangente. b) módulo promedio. c) módulo secante.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 34. Elementos principales de las pruebas de compresión triaxial. a) elementos que componen la celda de carga. b) espécimen sometido a esfuerzos normales (<math>\sigma_1</math>) y de confinamiento (<math>\sigma_3</math>), también se ilustra la envolvente del círculo de Mohr-Coulomb en la que se muestra gráficamente cómo se obtiene la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna (<math>\phi</math>). ....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 35. Metodología utilizada en las pruebas de compresión simple y triaxial, diferenciadas únicamente por el confinamiento en el caso de la triaxial. a) especímenes utilizados en la prueba. b) se le coloca membrana al pvc y se introduce el espécimen. c) espécimen con membrana, después de sacar el tubo de pvc. d) Espécimen sobre la base de la celda, con el medidor de deformación radial. d) Medidor de deformación axial. f) celda triaxial montada sobre el pedestal y lista para iniciar la prueba. ....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 36. Diagrama ternario para rocas piroclásticas, en cual se identifican los elementos que contienen la roca en estudio: 88.72% vidrio, 11.28% de fragmentos de roca y 0% de fragmentos de roca. ....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 37. Imágenes petrográficas en nicoles cruzados. a) minerales de plagioclasas (Pl) y anfíboles (Am), dentro de una matriz de vidrio y rodeada por poros. b) minerales de plagioclasas con maclado polisintético y de plagioclasas zoneadas c) clinopiroxeno fracturado. d) aglomeración de plagioclasas zoneadas.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 38. Distribución de tamaños de radio de poros vs la frecuencia de cada uno y comportamiento del Hg al intruir y extruir de la roca.....</i>	<i>99</i>

<i>Figura 39. Gráficas de permeabilidad vs presión media. En la mayoría de las gráficas se muestran cuatro corridas, excepto en las más permeables, en las cuales solo se realizó una corrida. Las líneas de tendencia para cada corrida tocan el eje “y”, del cual se obtiene el valor de <math>k_L</math>.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 40. Comparación de valores de permeabilidad vs porosidad abierta o conectada, de la pómez de este estudio, y rocas del volcán de Colima (Farquharson et al., 2015).....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 41. Curvas de absorción representativas de cada espécimen utilizado en la prueba de absorción. Se distingue un cambio en las curvas, el cual está representado por una mayor absorción de agua en menor tiempo y una menor cantidad de agua en un mayor tiempo. ....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 42. Se representa gráficamente el porcentaje de masa evaporada (<math>E_r</math>) vs raíz del tiempo de secado de la roca. Se distingue el tiempo crítico (<math>T_c</math>) y el contenido de humedad crítico (<math>C_c</math>), que representa un cambio en la evaporación de la roca (evaporación lenta- evaporación rápida. ....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 43. Relación de masa absorbida por capilaridad con la raíz del tiempo. En la imagen se puede observar el cambio promedio de pendiente que están relacionados con los coeficientes promedio de la capilaridad. ....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 44. a) especímenes fallados. b) visualización de la forma de la falla longitudinalmente, ....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 45. Curvas de esfuerzo-deformación de los especímenes ensayados. a) Relación de las deformaciones en axiales y transversales con respecto al esfuerzo ejercido durante la prueba. Con esta relación se obtuvo los coeficientes de Poisson. b) relación esfuerzo contra la deformación axial, para obtener los módulos de Young. En la imagen se aprecia los especímenes con sus fracturas después de la falla, así como el esfuerzo de confinamientos y el esfuerzo al que se generó la falla. ....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 46. Círculos de Mohr, cohesión y ángulo de fricción interna, obtenidos a partir de los esfuerzos aplicados a los especímenes (Tabla 13). ....</i>	<i>117</i>

*Figura 47. Gráfica que representa algunas de las metodologías utilizadas, las cuales se relacionan con el tamaño y distribución de poros. Así como la relación de porosidad y resistencia..... 118*

### **Lista de tablas**

*Tabla 1. Dimensiones de los especímenes de acuerdo a cada prueba de laboratorio..... 29*

*Tabla 2. Ejemplo de manejo de diferencial de presión, flujo y apertura de válvula durante la prueba de permeabilidad en la prueba de cinco puntos. .... 65*

*Tabla 3. Porcentajes totales y normalizados de los elementos que componen la roca en estudio..... 92*

*Tabla 4. Valores de masa, volumen aparente y real, así como densidad aparente y real. Calculando un valor final (promedio) de cada densidad y su desviación estándar. .... 95*

*Tabla 5. Comparación de los valores de densidad real y aparente, de los resultados obtenidos de la pómez en estudio y los valores de pómez del Volcán de Colima. Cabe resaltar que los valores de densidad real para la pómez del volcán de colima, fueron estimados a partir de sus valores de densidad aparente y porosidad total, tomados de (Farquharson et al., 2015)..... 96*

*Tabla 6. Valores obtenidos a través del porosímetro: porosidad total accesible al Hg y rangos en los que se distribuyen los radios de poros, así como la tortuosidad. .... 98*

*Tabla 7. Valores de porosidad cerrada ( $\eta_0$ ), abierta ( $\eta_c$ ) y total ( $\eta_t$ ), década espécimen, así como su valor promedio y desviación estándar correspondientes..... 100*

*Tabla 8. Rangos de permeabilidad al líquido (kL) en mD y m<sup>2</sup>. Los valores de permeabilidad obtenidos por la intrusión de gas dependen de algunos factores como la cantidad de fluido al inicio y durante la prueba, además del estado y distribución de presiones en el sistema (ver la diferencia de las pendientes en cada una de las gráficas [Figura 3]). .... 102*

*Tabla 9. Datos de absorción de agua, estos representan una relación lineal en la que se diferencian los cambios de pendiente de las gráficas. .... 106*

<i>Tabla 10. Datos generales de evaporación en el punto en el cambia de evaporación rápida a evaporación rápida: tiempo crítico (Tc) vs evaporación relativa en Tc.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 11. Valores de los coeficientes de capilaridad obtenidos de las gráficas que se presentan en la Figura 6. ....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 12. Se presenta una comparación entre los valores obtenidos a través de la metodología que establece la norman ASTM y Kahrman. ....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 13. Descripción de la forma de la grieta de falla de los especímenes ensayados. ..</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 14. Valores de módulo de Young por método del promedio y coeficiente de Poisson correspondiente. ....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 15. Valores promedio y desviación estándar de todas las propiedades físicas, hídricas y mecánicas. * UCS Karahman a partir del índice de resistencia a carga puntual. ....</i>	<i>120</i>



## **Resumen**

En general, las propiedades físicas, el comportamiento hídrico y la resistencia mecánica de las rocas dependen del tipo de roca y su génesis. Además, las rocas son materiales anisótropos heterogéneos y la caracterización de sus propiedades podrían representar una tarea difícil. Las propiedades físicas, hídricas y mecánicas de las rocas dependen, entre otras, de la composición mineral, así como del tamaño y la forma del sistema poroso. Las características anteriores definen el comportamiento hídrico y mecánico de las rocas cuando diferentes fluidos interactúan con el sistema poroso y cuando la roca está bajo diferentes esfuerzos. De esta manera, el estudio de las características físicas de las rocas es de gran importancia no solo para caracterizar el comportamiento hídrico y mecánico, sino también para conocer la evolución de las propiedades a través de la construcción de correlaciones entre diferentes propiedades.

La presente investigación se centra en la caracterización física, hídrica y mecánica de una roca pómez del volcán El Chichonal (Chiapas, México). Con esta investigación, se pretende mejorar la comprensión de las relaciones existentes entre las propiedades físico-mecánicas-hídricas de las rocas blandas utilizando diferentes técnicas de laboratorio, como la intrusión de helio, mercurio, nitrógeno y agua en el sistema poroso. Por otro lado, los parámetros mecánicos de las muestras, como el módulo de Young, la relación de Poisson, la cohesión y el ángulo de fricción se obtuvieron mediante pruebas de carga puntual, así como pruebas uniaxiales y triaxiales. La deformación en la muestra se midió utilizando Transductores diferenciales variables lineales (LVDT). Todas las pruebas se basaron en normativas internacionales como UNE-EN y ASTM.

Los datos resultantes de la prueba de picnometría muestran un alto valor de densidad de real en comparación con la densidad aparente, lo que lleva a obtener altos valores de porosidad (> 40%). Los resultados de la intrusión de Mercurio muestran dos tamaños de poro principales (meso y macro), esto último también se refleja en las pruebas de capilaridad y evaporación. Los valores de porosidad también están relacionados con los altos valores de permeabilidad (> 1500 mD) y los bajos valores de los parámetros mecánicos, debido a que los poros funcionan como una zona de debilidad para la transmisión de tensiones.

## **Abstract**

*In general, the physical properties, the hydric behaviour and the mechanical strength of rocks depend on the type of rock and its genesis. Besides, rocks are heterogeneous-anisotropic materials and the characterisation of its properties could represent a difficult task. The physical, hydric and mechanical properties of rocks rely among others on the mineral composition as well as the size and shape of the porous system. The above characteristics define the hydric and mechanical behaviour of rocks when different fluids interact with pores and when rock is under different stresses. In this way, the study of the physical features of rocks is of great importance not only to characterise the hydric and mechanical behaviour but also to know the evolution of properties through the construction of correlation between different properties.*

*The present investigation is focused on the physical, hydric and mechanical characterisation of a pumice rock from El Chichonal Volcano (Chiapas, Mexico). With this investigation, it is pretended to enhance the understanding of the relationships between the physical-mechanical-hydric properties of soft rocks using different laboratory techniques, such as the intrusion of Helium, Mercury, Nitrogen and water into the porous system. On the other hand, mechanical parameters of specimens, such as Young Modulus, Poisson Ratio, Cohesion and Friction Angle were obtained through point load test as well as uniaxial and triaxial tests. Deformation on the specimen was measured using Linear Variable Differential Transducers (LVDTs). All the tests were based on international standards such as UNE-EN and ASTM.*

*The resulting data from the pycnometry test shows a high value of grain (real) density compared with the bulk density, which leads to obtaining high values of porosity (>40%). The results from Mercury intrusion shows two main pore sizes (meso and macro), this last is also reflected on the capillarity and evaporation tests. The high values of porosity are also related to the high values of permeability (>1500 mD) and the low values of the mechanical parameters, due to pores function as a weakness zone for the transmission of stresses.*

## 1. Introducción

La petrofísica y la mecánica de rocas, nacen a partir de conceptos muy diferentes. Por un lado, la petrofísica inicia con las ecuaciones obtenidas por Archie en los años 40, que obtuvo la relación entre la porosidad, resistividad y saturación. Por otro lado, la mecánica de rocas nace de necesidad de los ingenieros civiles para conocer el comportamiento de las rocas en construcciones como túneles o puentes (Das, 2014).

La petrofísica es la ciencia que estudia cuantitativamente las propiedades de la roca y sus interacciones con fluidos (Tiab y Donaldson, 2015). Actualmente se vincula con los procesos de la ingeniería en petróleo, geofísica y geología. Por otra parte, la mecánica de rocas se ocupa del estudio teórico y práctico de las propiedades y comportamiento mecánico de los materiales rocosos y de su respuesta ante la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico (Vallejo, 2002). Este comportamiento dependerá de las propiedades o cualidades físicas de las rocas (p.ej. densidad aparente, porosidad) las cuales se derivan de los minerales que las forman, de sus poros (forma y distribución) y de la naturaleza de los fluidos que rellenan sus poros (Ordóñez, 1996).

En conjunto, las propiedades físicas, hídricas y mecánicas describen las características de una roca. Estas características basadas en sus propiedades físicas, como su composición mineral y su sistema poroso. El sistema poroso permite el paso o no de un fluido, por lo que mediante este fluido se pueden obtener valores como la permeabilidad, coeficientes capilares y coeficientes de evaporación. Por lo anterior, se dice que las propiedades físicas están relacionadas con las propiedades hídricas, y estas a su vez se reflejan en el comportamiento mecánico (esfuerzo-deformación) (Hernández-Gutiérrez y Santamarta, 2015; Vallejo, 2002).

Como ya se mencionó anteriormente, el sistema poroso permite el movimiento del agua en las rocas, sin embargo, es el agua una de las principales causas de su deterioro; en particular afecta la superficie de las rocas que están expuestas a la intemperie, reduce su resistencia, además de aumentar la presión de poro (Alonso et al., 2012). Cabe resaltar que las rocas, en particular las rocas volcánicas se encuentran con frecuencia en condiciones meteorológicas y de alteración (p. ej. hidrotermal) que favorecen a su degradación y entre

otras cosas, generan cambios progresivos en las propiedades físicas y mecánicas (Pola et al., 2010). De manera muy general las características físicas de las rocas volcánicas son heredadas de la génesis de cada depósito, un ejemplo claro son los depósitos ignimbríticos, los cuales están constituidos con materiales propios de una erupción volcánica, así como por materiales ajenos a estos depósitos. Presentan un carácter granular, heterogéneo, anisótropo y con diferentes grados de soldamiento. Otro ejemplo claro son las rocas de origen volcánico, como las dacitas o pómez (Spieler et al., 2004; Farquharson et al., 2015) que presentan porosidades grandes (mayores a 50%), los cuales presentan una gran complejidad dada por su anisotropía y heterogeneidad, arrojando valores bajos de resistencia.

### **1.1. Antecedentes**

El volcán Chichón o Chichonal fue descrito por primera vez por Friedrich Müllerried en 1933 (ver Müllerried, 1933 para mayor detalle). Tras su exploración y descripción morfológica, se reconoce al Chichón en el catálogo de volcanes activos del mundo (Mooser et al., 1958). El Chichón permaneció sin estudiar por casi medio siglo después de la descripción morfológica mencionada anteriormente. Sin embargo, las investigaciones se retoman en 1970 por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), analizando el potencial geotérmico del volcán. La única investigación científica que se realizó fue una encuesta del vulcanismo y metalogénesis del Estado de Chiapas la cual fue realizada por Damon y Montesinos en 1978 .

El volcán estuvo inactivo aproximadamente 600 años, sorprendiendo a la sociedad con un periodo eruptivo en 1982; siendo en marzo y abril los meses con mayor actividad (Espíndola, 1999). Derivado de lo anterior, aumentaron las investigaciones en la zona, principalmente en rama de la geología y geología estructural, con las cuales se caracterizaron las erupciones emitidas por el volcán (p.ej. volumen total de magma, petrología, mineralogía, tamaño y distribución de depósitos) (Duffield et al., 1984; Varekamp et al., 1984). Hoy en día, existen investigaciones más recientes que describen la historia eruptiva del volcán e introducen contextos geológicos y tectónicos del área de asentamiento ( p. ej. Macías, 2005; Mora et al., 2007; Manea y Manea, 2008; Layer et al., 2009), así como construcción de

columnas estratigráficas basándose en descripciones en campo y análisis de isótopos (Espíndola et al, 2000; Garduño-Monroy et al., 2015).

Por otro lado, es importante mencionar que las rocas volcánicas constituyen una excepción en el conocimiento de la mecánica de rocas debido a la anisotropía y heterogeneidad de estas rocas. Terzaghi en 1958 fue el primero en resaltar las propiedades atípicas de los materiales volcánicos de Sasuma (Kenia), al igual que Marsal al estudiar las propiedades de los materiales volcánicos del valle de México en 1960, o Jiménez Salas al describir las propiedades de los materiales volcánicos de Fernando Poo (Guinea Ecuatorial) en 1963. Los autores mencionados anteriormente, coinciden que los suelos volcánicos presentan diferentes propiedades y comportamiento geotécnico, de acuerdo con los criterios establecidos para los suelos más habituales para las obras de ingeniería (Hernández-Gutiérrez, L.E. y Santamarta, 2015). Por tal razón la mecánica de suelos como la de rocas, es desarrollada con mayor frecuencia en los países más avanzados de Europa y América, en donde los terrenos volcánicos son objeto de estudio en la evaluación de la estabilidad de acantilados y cavidades subterráneas de materiales piroclásticos, con la finalidad de estudiar su idoneidad como materiales de construcción (Rotonda et al., 2010).

A pesar de que existen amplias áreas de terrenos volcánicos presentes en el Pacífico (p.ej. Japón, Nueva Zelanda, América Central, del Sur, México), hay estudios limitados sobre las propiedades mecánicas de estos terrenos. Gran parte del territorio mexicano presenta rocas de origen volcánico y se tienen muy pocos registros que describen sus propiedades físicas y mecánicas. Por ejemplo, Pola et al. (2016) realizó estudios referentes a la génesis de algunas rocas ignimbríticas presentes en la región de Cuitzeo, Michoacán y lo ha relacionado con su propiedades físicas y mecánicas.

## **1.2. Justificación**

Las rocas presentan diferentes propiedades que son producto de su origen, estructura y composición química y determinan su comportamiento. Estas propiedades se derivan entre otras, de las características de los minerales que la conforman, así como el tamaño, forma y

volumen de su sistema poroso. Estas características también definen el comportamiento hídrico cuando el sistema interactúa con distintos fluidos. En general, las propiedades físicas, el comportamiento hídrico y la resistencia mecánica de las rocas, varían de acuerdo al tipo roca y su petrogénesis, por lo que no son fáciles de determinar.

El tipo de estudio de las propiedades físicas de las rocas depende de su aplicación, ya sea en obras de ingeniería civil (p.ej. edificios, túneles) o de extracción de recursos naturales (p.ej. agua, gas, petróleo). En este sentido, el estudio de las características físicas de las rocas es de gran importancia para conocer su comportamiento hídrico y mecánico, así como la evolución de estos parámetros y generan correlaciones entre ellos.

La investigación se basó en trabajo de gabinete y pruebas de laboratorio. Y se trabajaron con rocas de interés para la Unidad de Petrofísica de la ENES, Unidad Morelia. Por lo que se enfoca en la caracterización física, hídrica y mecánica de un flujo piroclástico del volcán El Chichonal, del cual solo se tomaron fragmentos de rocas pómez (sin tomar en cuenta la matriz del depósito). La complejidad del sistema poroso de una roca pómez en conjunto con los valores bajos de resistencia, hacen a este tipo de roca un material de investigación interesante, con el cual se puede ampliar el entendimiento de la relación entre las propiedades físico-mecánicas de rocas suaves.

En general, las propiedades físicas e hídricas se estudiarán con base en pruebas de laboratorio: como la intrusión de helio, mercurio, nitrógeno y agua a través del sistema poroso, así mismo, el comportamiento mecánico se estudiará con base en pruebas de compresión simple y triaxial. La resistencia máxima y deformaciones volumétricas se estudiarán mediante el análisis de los módulos elásticos y relación de Poisson. Los resultados serán analizados y comparados entre sí con la finalidad de obtener correlaciones del tipo “esfuerzo-deformación” vs “propiedades físicas e hídricas”. Con esta investigación se pretende ampliar el conocimiento que existe entre las distintas propiedades de las rocas. Muchas de las investigaciones han sido enfocadas al estudio de rocas volcánicas más competentes (p.ej. andesitas, basaltos, ignimbritas) que cuentan con un sistema poroso limitado ( $\eta < 20\%$ ) y poco atractivo para estudiarlo. La pómez, por el contrario, cuenta con un sistema poroso de mayor complejidad ( $\eta > 50\%$ ). Si bien una roca pómez no es de gran utilidad en las obras civiles o en la extracción de recursos naturales, los resultados de las pruebas

pueden ser aplicados por ejemplo a rocas con algún grado de alteración que haya modificado su sistema poroso. Finalmente, los resultados de este trabajo contribuirán en la construcción de la base de datos de la Unidad de Petrofísica de la ENES, Unidad Morelia.

### **1.3. Objetivos**

#### **General**

Caracterizar física, hídrica, y mecánicamente un flujo de pómez del volcán Chichonal, mediante pruebas de laboratorio, para correlacionar cuantitativamente y cualitativamente sus valores entre cada propiedad.

#### **Específicos**

1. Implementar pruebas de laboratorio con base en estándares internacionales de acuerdo a las propiedades de interés: físicas (p. ej. volumen, densidad, porosidad), hídricas (p. ej. permeabilidad, adsorción, capilaridad) y mecánicas (p. ej. compresión uniaxial, compresión triaxial).
2. Comparar procedimientos y resultados de las pruebas de laboratorio con otros depósitos de pómez.

### **1.4. Localización**

El volcán El Chichonal, también llamado Chichón, se localiza al noroeste del Estado de Chiapas, específicamente en la región montañosa que colinda con las comunidades de Xochimilco, Chapultenango e Ixtacomitán (Figura 1), aproximadamente a 25 km de la localidad de Pichucalco y a 75 km de distancia con referencia a la Ciudad de Villahermosa (Tabasco). El edificio volcánico tiene una altura aproximada de 600 m.

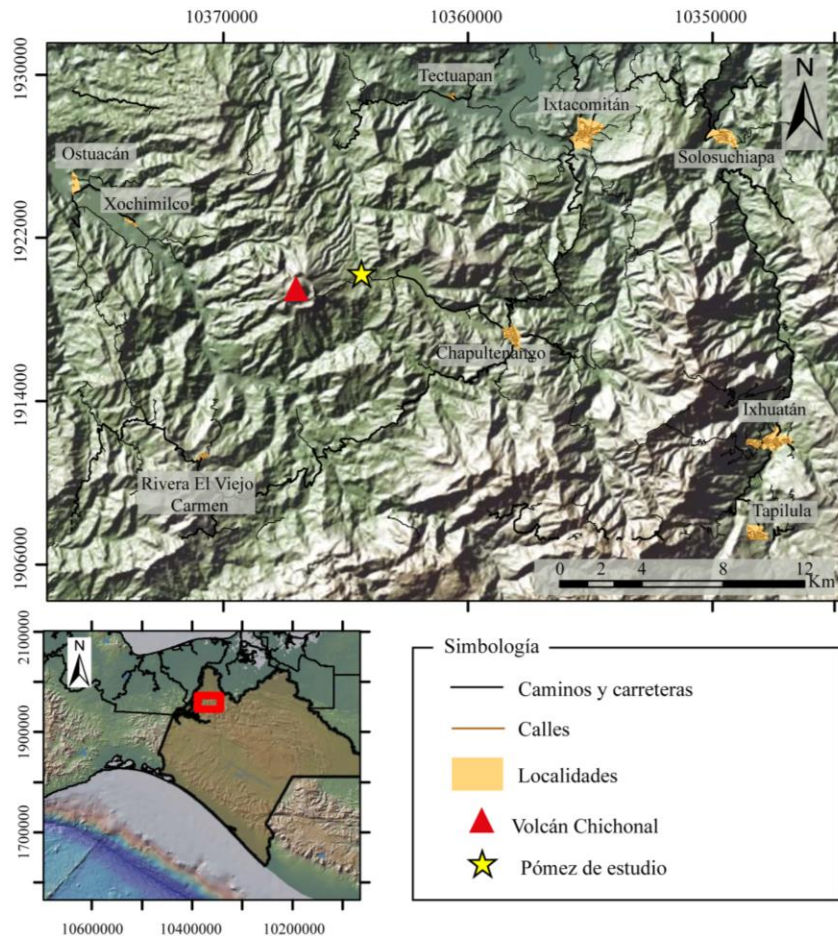


Figura 1. Mapa de localización del volcán El Chichonal, en la cual se aprecian las carreteras y comunidades más cercanas al volcán.

## 2. Marco tectónico – geológico

El volcán Chichonal pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra de Chiapas y Guatemala, y a su vez a la subprovincia de las Sierras del norte de Chiapas, que está formada por montañas alargadas y plegadas con una orientación preferencial de este - oeste y noroeste-sureste, intersectadas por fallas con orientación este-oeste. Su elevación desciende gradualmente de 2,000 a 500 msnm en dirección noreste (INEGI, 2009; Garduño-Monroy et al., 2015). Y presenta un clima cálido húmedo, con temperaturas que van de 30°C a 17.5°C (INEGI, 2018).



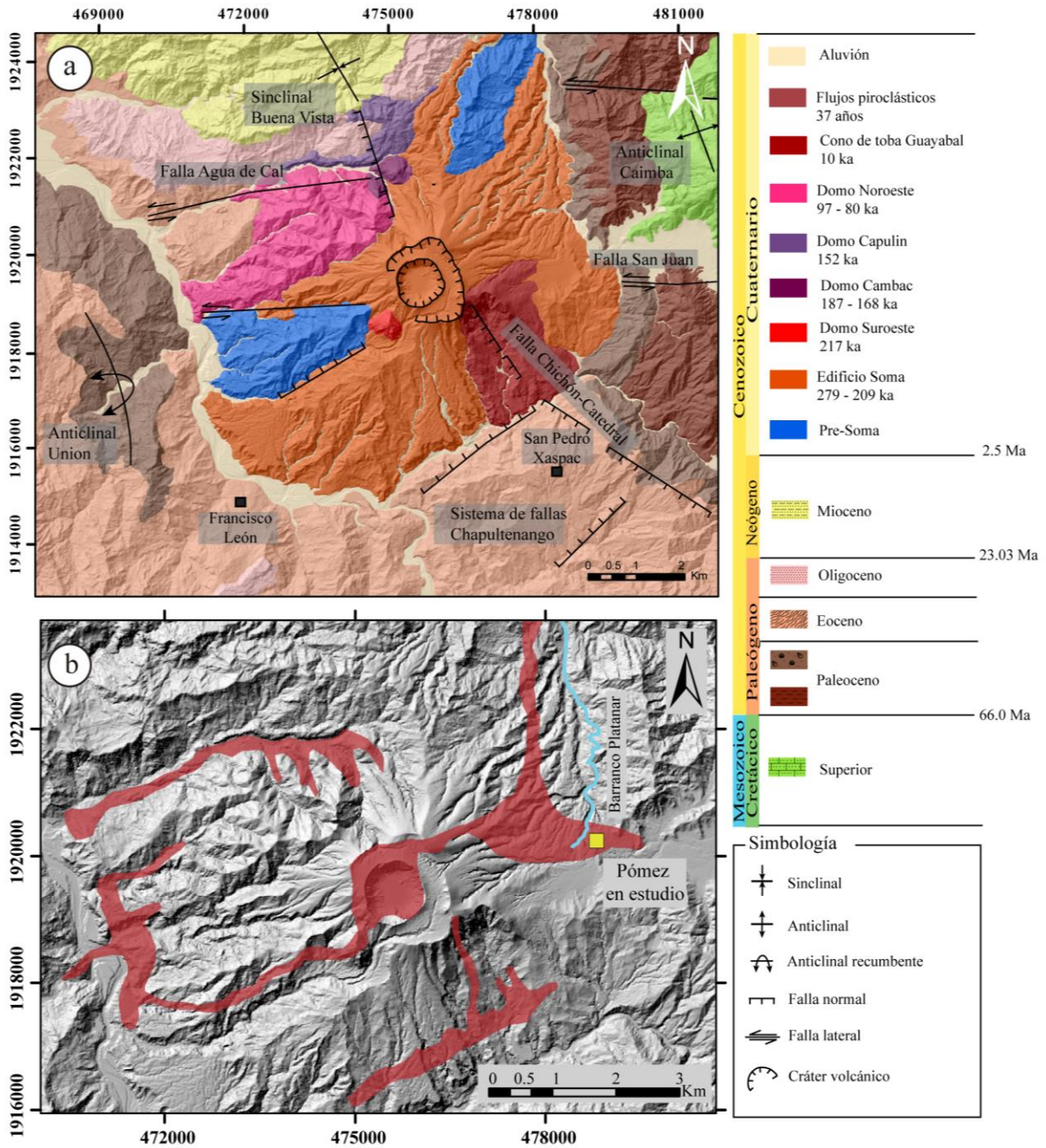
## 2.1 Contexto geológico

La geología del estado de Chiapas ha sido descrita por varios autores (p.ej. Guzmán et al., 2005; Mora et al., 2007; Garduño-Monroy et al., 2015). De manera general, las rocas que constituyen la columna estratigráfica de la región, se pueden agrupar de acuerdo a su edad en tres grandes grupos:

1. El primer grupo corresponde a las rocas más antiguas con edades Pre-Mesozoicas. Está constituido por rocas metamórficas (p.ej. gneis, esquistos y anfibolitas), y sedimentarias (p.ej. conglomerados, lutitas, areniscas, calizas, dolomías), con edades que van desde el Tónico hasta el Pérmico (De la Rosa et al., 1989). Las rocas más antiguas pertenecen a este grupo, que corresponden a un gneis granodiorítico y granito gnéisico rosa, con edades de 780 a 702 Ma, respectivamente.
2. El segundo grupo corresponde a rocas con edades Mesozoicas. Está constituido por una secuencia de rocas sedimentarias (p. ej. areniscas, lutitas, conglomerados, dolomías) con edades que van desde el Triásico-Jurásico a Cretácico (De la Rosa et al., 1989; Guzmán et al., 2005). Las rocas más antiguas de este grupo corresponden a los lechos rojos de la Formación Todos los Santos con una edad aproximada de 183 Ma (De la rosa et al., 1989).
3. El tercer grupo corresponde a rocas con edades Cenozoicas. Está constituido por una secuencia de rocas sedimentarias (p.ej. calizas, margas, lutitas, conglomerados) y volcánicas (p.ej.), con edades que van desde Paleoceno hasta el presente (De la rosa et al., 1989). Particularmente, en este grupo se han distinguido dos episodios de intensa actividad volcánica asociados a los volcanes El Chichón, Tzontehuitz y Nicolás Ruiz (Arco Volcánico Chiapaneco; CVA por sus siglas en inglés). Este arco volcánico tiene una edad que va del Plioceno al presente y se ubica entre la Faja

Volcánica Transmexicana y el arco volcánico de Centroamérica (Guzmán et al., 2005).

Localmente el volcán Chichonal de base a cima está constituido por un basamento de evaporitas y yesos con edades del Jurásico-Cretácico Temprano; calizas dolomíticas del Cretácico Temprano a Medio (Macías, 2005; Layer et al., 2009); evaporitas y limolitas del Cretácico Superior; areniscas y lutitas del Paleógeno; por último, areniscas y rocas calcáreas del Neógeno (Garduño-Monroy et al., 2015)( Figura 2a). La actividad volcánica comenzó con la emisión de domos formando un complejo de domo traquiandesítico con una edad entre 209 y 275 mil años; este complejo fue destruido, dejando un cráter tipo soma de 1.5 km de diámetro. La actividad continuó con la emisión de la siguiente serie de domos (Garduño-Monroy et al., 2015): domo suroeste con una edad de 217 mil años, domo Cambac con una edad de 168-187 mil años, domo Capulín con una edad de 152 mil años, y un domo noroeste con una edad de 80-97 mil años (Figura 2a).



Posteriormente se emplazaron los depósitos de la actividad volcánica del Chichonal. De acuerdo a lo que describe en bibliografía (p. ej. Espíndola, 1999; Macías, 2005; Layer et al., 2009; Scolamacchia y Capra, 2015) el edificio volcánico ha sido construido por al menos 11 erupciones explosivas: 3700, 3100, 2500, 2500, 2000, 1900, 1600, 1550, 1250, 900, 550 años. La mayor parte de la secuencia estratigráfica corresponden a depósitos piroclásticos (p. ej. bloques, cenizas) con intervalos de recurrencia de aproximadamente 700 años (Espíndola et al. 2000; Macías, 2005). Entre la secuencia piroclástica se encuentran tres unidades, que de manera general están compuestas por depósitos de flujos piroclásticos y caída de pómez, todos con edades holocénicas (unidad A con 37 años (erupción de 1982), unidad B con 550 años y unidad C 900 años (Sigurdsson et al, 1984; Macías et al., 1997; Espíndola et al., 2000; Andrews et al., 2008; Scolamacchia y Capra, 2015) (Figura 3).

- 1) Unidad A: está compuesta principalmente por depósitos constituidos de roca pómez color gris, líticos accidentales y lapilli acrecional. A esta unidad se asocian a corrientes piroclásticas de densidad (por siglas en inglés PDC), diluidos, bloques y cenizas. Esta unidad representa la actividad más reciente del volcán, la cual corresponde a la erupción de 1982, y esta aflora alrededor del cráter.
- 2) Unidad B: está compuesta principalmente de un depósito de roca pómez color amarillo. En esta unidad se observa en asociación con un depósito de flujo gris superpuesto de bloques y cenizas.
- 3) Unidad C: está compuesta por un depósito de flujo de piedra pómez masivo sostenido por clastos blancos con abundantes troncos de árboles carbonizados. Observada en varios afloramientos alrededor del cráter, con las mejores exposiciones a lo largo del barranco de Platanar; puede alcanzar hasta 15 m de espesor en los sitios al norte del cráter.

En particular, las muestras de roca recolectadas pertenecen a la unidad A y al flujo F2 descrita por Macías en 1997. Este flujo, se describe como un depósito piroclástico, que en su parte basal es gris oscuro a verde oscuro y rica en líticos. En los flancos del soma se encuentra representado por un depósito gris pálido, formado por abundante pómez suspendida en una matriz arenosa. Es uno de los afloramientos más representativos de la unidad (UTM X= 478,804; Y= 1, 920,241; Z= 664) (Figura 2b).

Edad (años)	Litología	Descripción de depósito
37		Caídas, oleadas y flujos piroclásticos
A		Paleosuelo
550		Depósito de caída, color amarillo rico en pómez
B		Paleosuelo
795 ± 50		Flujo piroclástico de pómez
900		
C		Cerámica y objetos de obsidiana
1250		Flujos de ceniza y oleadas piroclásticas de color gris con una caída de ceniza a la base con una caída de ceniza a la base
		Paleosuelo
1550		Flujo de bloques y cenizas con chimeneas de desgasificación y leña carbonizada
		Horizonte retrabajado
1600		Flujo de ceniza café oscuro masivo rico en líticos y fragmentos de troncos de carbón
		Paleosuelo
1720 ± 70		Oleada piroclástica café
1900		Paleosuelo
1885 ± 75/70		Oleada piroclástica rica en lapilli acrecional y estructuras de carga
2000		Fragmentos de cerámica
		Flujo de ceniza gris con carbón y cerámicas
2500		
3100		Flujo de bloques y ceniza de color rosado con carbón y chimeneas de desgasificación
		Flujo de ceniza con carbón diseminado
3700		Lava porfírica gris del Soma compuesta con fenocristales de hornblenda plagioclasa
		Flujos de bloques y ceniza del Soma, masivos y endurecidos
209 000 ± 19 000		Traquiandesita porfírica de los domos Soma

Figura 3. Modificado de Espíndola et al. 2000; Macías, 2005. Columna estratigráfica de los depósitos emitidos por el volcán Chichonal. Los depósitos señalados con las letras A, B, C corresponden a los únicos depósitos del volcán con contenido de pómez, en particular el depósito señalado con la letra C es el depósito en estudio.

## 2.2 Contexto tectónico

El Estado de Chiapas se localiza dentro de una zona que es dominada principalmente por la interacción de tres placas: la Placa Norteamérica, la Placa del Caribe y la Placa de Cocos (Authemayou et al., 2011; Duffield et al., 1984; Garduño-Monroy et al., 2015; Mora et al., 2007). La placa de Cocos subduce a la placa Norteamericana y a la placa del Caribe y su dinámica está bien representada por dos desplazamientos principales: desplazamiento lateral formado por la migración de la Placa del Caribe hacia el este, con respecto a la Placa Norteamericana y un desplazamiento convergente caracterizado por la subducción de las Placas de Cocos debajo de la placa norteamericana (Mora et al., 2007; Manea y Manea, 2008) (Figura 4).

El sistema de fallas más representativo de la región es el sistema Montagua-Polochic, el cual es un sistema de fallas lateral-izquierdo. De acuerdo a diferentes autores (p. ej. (Duffield et al., 1984; Mora et al., 2007; Authemayou et al., 2011; Garduño-Monroy et al., 2015), este sistema es considerado como la dinámica del borde continental con componente lateral izquierdo de la placa del Caribe y la placa Norteamericana (Figura 4). Los mismos autores afirman que la falla Polochic termina en el macizo de Chiapas o Batolito de Chiapas (p. ej. Juárez, 2008; Garduño-Monroy et al., 2015) (Figura 4) mientras que la falla Montagua aparentemente no continúa hacia el oeste de su traza superficial. Por otro lado, y de acuerdo con las características dinámicas del sistema, la región es considerada como una gran zona de deformación en las que otras provincias tectónicas están relacionadas (p. ej. Graben del Norte de América Central [sur del sistema Motagua-Polochic]).

Con base en lo que se afirma en la bibliografía integrada anteriormente, el volcán Chichonal se localiza en un arco volcánico no común, el cual se rige por una compleja dinámica de la tectónica de la región. El origen del volcán se ha relacionado con la trinchera Mesoamericana, la cual es el producto de la subducción de la placa de Cocos debajo de la placa Norteamericana (Layer et al., 2009). La trinchera Mesoamericana se extiende desde México hasta Costa rica. En México, particularmente en Chiapas, está representada por la cresta de Tehuantepec (Manea y Manea, 2008), su geometría se relaciona con la subducción de la Placa de Cocos con un ángulo de 40° grados (Manea, 2008; Layer et al., 2009) (Figura 4).

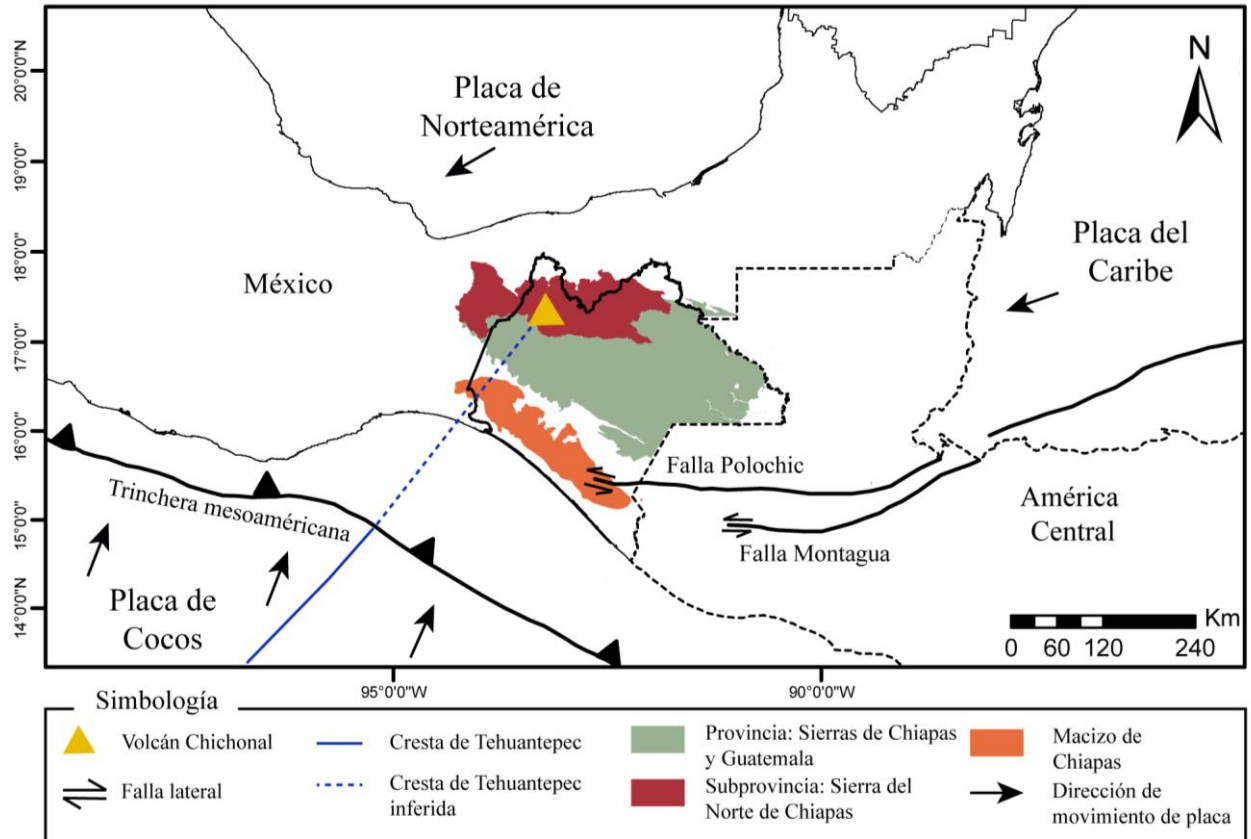


Figura 4. Modificado de García-Palomo, 2004; Mora et al., 2007; Layer et al., 2009. Se muestran las placas tectónicas que interactúan con el estado de Chiapas: al norte la placa Norteamericana, al noreste la placa del Caribe con una componente lateral y al sur la placa de Cocos, dentro de esta placa se encuentra la Trincheras mesoamericana y asimismo la cresta de Tehuantepec.

El análisis estructural de las rocas sedimentarias del basamento del volcán Chichonal indican que el régimen tectónico que ha controlado el emplazamiento y la actividad del volcán ha estado activo desde el Mioceno hasta el Reciente (Guzmán-Speziale et al., 1989). Localmente la zona donde se sitúa el volcán se puede dividir en tres sectores de acuerdo a sus características estructurales (Garduño-Monroy et al., 2015):

- 1) Sector constituido por una serie de sierras localizadas en el sureste de la región: esta área se localiza al sur del volcán El Chichonal (Figura 5). Se caracteriza por montañas con una altura que va de 100 a 500 msnm (García-Palomo, 2004; Layman y Ahr, 2004).



- 2) Sector constituido por tierras bajas y llanura costera del Golfo: se localiza a 70 km al norte del volcán el Chichonal (Figura 5), extendiéndose hacia el Golfo de México, con una altitud máxima de 10 msnm (Garduño-Monroy et al., 2015).
  
- 3) Sector constituido por los volcanes El Chichonal y Catedral: estos elementos se localizan alrededor del Chichonal, está constituido por una serie de montañas con una altura que va de 100 a 600 msnm. Presenta una topografía formada por pliegues; siendo anticlinales los máximos topográficos y sinclinales los mínimos topográficos (Garduño-Monroy et al., 2015). Particularmente, destacan los anticlinales La Unión y sinclinal Buena Vista, los cuales presentan una orientación preferencial noroeste-sureste (Macías, 2004; Garza, 2015;). Los ejes de los pliegues son desplazados por fallas con movimiento lateral izquierdo (García -Palomo, 2004; Garduño-Monroy et al., 2015) (Figura 5).

En este sector también se distinguen los volcanes El Chichonal y Catedral, con edades de ~276 ka y 1.6 Ma (Garduño-Monroy et al., 2015), respectivamente. Al noroeste del Chichonal, se encuentra el volcán Catedral, el cual es un edificio volcánico erosionado, presenta un anfiteatro con depósitos piroclásticos y ha sido afectado por fallas y fracturas con orientación noroeste (Figura 5). Por otro lado, El Chichonal se encuentra dentro de un pliegue isoclinal afectado por fallas y fracturas con orientación preferencial noroeste - sureste. Algunos autores como García-Palomo, 2004 y Layer et al., 2009 sugieren que el área del Chichonal, es afectado principalmente por dos sistemas de fallas: 1) Sistema de fallas San Juan con movimiento lateral izquierdo y orientación este-oeste que pasa debajo del Chichonal. 2) Sistema de fallas normales Chichón-Catedral o Chapultenango, con orientación noreste-suroeste y producen una geometría de bloques en semi-graben encima de donde se ha emplazado el volcán Chichonal. De acuerdo a Macías et al. (2010), esta falla ha generado la mayor actividad volcánica del cráter.



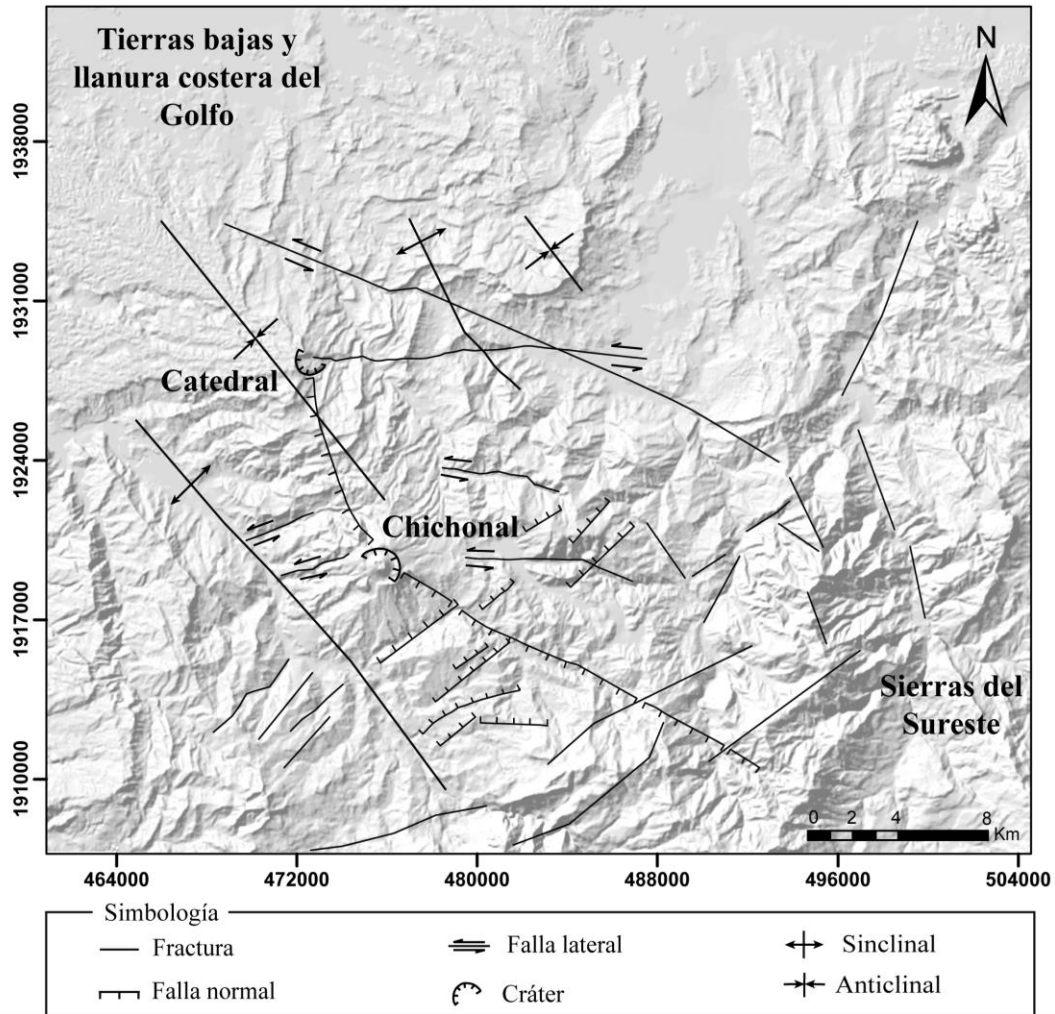


Figura 5. Modificado de Garduño-Monroy et al., 2015. Modelo digital de elevación (INEGI), en el cual se distinguen las diferentes estructuras geológicas que caracterizan la fisiografía a los alrededores del volcán Chichonal.

### 3. Metodología

La metodología de este trabajo de tesis se ha construido con base en las normas internacionales (ASTM, ISRM, UNE-EN), y en los procesos que se han adaptado con base en bibliografía reciente (p. ej. Alonso, 2002; Alonso, 2010; Suárez, 2014) y a las condiciones particulares de la Unidad de Petrofísica. La metodología de cada prueba se describe de manera puntual, y se resaltan las características más importantes de cada una. Esta

metodología se ha implementado con la finalidad de obtener resultados comparables, en precisión y calidad, con los obtenidos en otros trabajos o laboratorios.

### **3.1 Preparación de especímenes**

Las muestras de roca recolectadas en campo presentan tamaños y formas irregulares, lo que dificulta la realización de pruebas de laboratorio en estas, debido a que en los equipos deben introducirse muestras de forma y dimensiones específicas. Por lo anterior, las muestras de roca se cortan en formas geométricas llamadas especímenes de roca. Cada prueba exige especímenes de tamaño y formas definidas dentro de la normativa de cada prueba. Para obtener los especímenes se hace uso de maquinaria de corte especializada para cortar las muestras en especímenes. Posteriormente los especímenes son secados y etiquetados de acuerdo a metodologías establecidas dentro de la Unidad de Petrofísica.

#### **3.1.1 Corte de especímenes**

El corte de muestras de rocas se realiza de acuerdo a la prueba de laboratorio para la cual se utilice el espécimen, cada prueba de laboratorio requiere de especímenes de diferentes dimensiones (tamaño y forma) (*Tabla*) las cuales varían de acuerdo al tipo de prueba a realizar, por lo que los cortes se realizan con base a normas nacionales e internacionales (p. ej. ASTM, UNE-EN). Para los cortes de rocas se utilizan diferentes máquinas de acuerdo a las dimensiones de los especímenes: para los cortes más grandes se utiliza una cortadora de banco con disco de diamante marca *Controls*, modelo 55-CO210/DZ (a), para cortes de rocas más pequeñas se utiliza una cortadora de corte fino marca *Controls*, modelo 45-D03589 (Figura 6c), y para cortes cilíndricos se utiliza una máquina para extracción de testigos de roca marca Husqvarna, modelo DMS 340-ATS (b). En la siguiente tabla se anexan las dimensiones de cada espécimen de acuerdo a la prueba de laboratorio.

Tabla 1. Dimensiones de los especímenes de acuerdo a cada prueba de laboratorio

Prueba de laboratorio	Dimensiones (cm e in)
Lámina delgada	Rectángulo 4.5 x 2.5 cm (lado x lado)
Análisis textural	Rectángulo de 6 x 6 cm (lado x lado)
Densidad	Cilindro de 1 x 1 in (diámetro x altura)
Porosidad	Cilindro de 1 x 1 in (diámetro x altura)
Permeabilidad	Cilindro de 1 x 2.2 in (diámetro x altura)
Carga puntual	Fragmentos irregulares de roca
Compresión simple	Cilindro 2 x 2.2 in (diámetro x altura)
Compresión triaxial	Cilindro x 2.2 in (diámetro x altura)

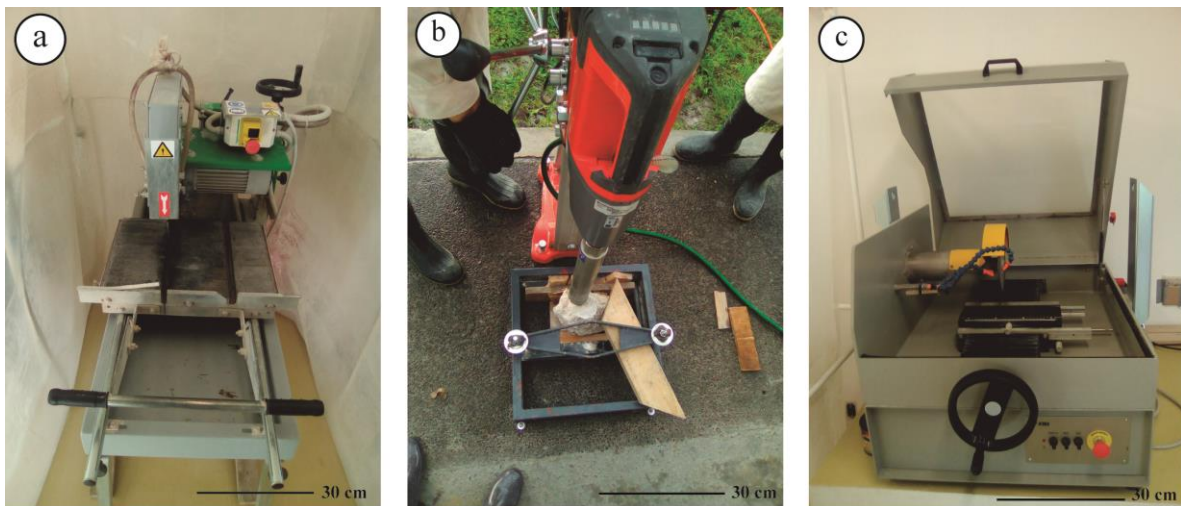


Figura 6. a) cortadora de banco utilizada en los cortes de los especímenes irregulares. b) máquina de extracción de testigos, c) cortadora de corte para dar proporción a los especímenes cilíndricos de acuerdo a las normas.

### 3.1.2 Secado, etiquetado y medición de los especímenes

El secado de los especímenes es un paso fundamental antes de iniciar las pruebas que se presentan en este trabajo, las cuales ya cuentan con una metodología para el secado de los especímenes. También es importante etiquetar los especímenes siguiendo una metodología, en este caso se realizó, de acuerdo a una metodología establecida en la Unidad de Petrofísica

y mecánica de rocas. Por otra parte, es importante obtener las dimensiones de cada uno de los especímenes (diámetro-altura), dado que en la mayoría de las pruebas de laboratorio (p. ej. densidad, permeabilidad) son un requisito fundamental para realizar la prueba.

De acuerdo al procedimiento técnico de la Unidad de Petrofísica, todas las muestras deben ser etiquetadas para evitar confusiones o errores de identificación.

### **Procedimiento técnico**

1. *Etiquetado de los especímenes:* se etiquetaron los especímenes de la siguiente forma aabb-ccddee, donde:  
aa: dos primeras letras del nombre del proyecto  
bb: número de sitio de muestreo  
cc: número de muestra o bloque de roca  
dd: dos primeras letras de la prueba en la que se empleará el espécimen.  
ee: número de espécimen obtenido de cada muestra o bloque de roca.
2. *Obtención de dimensiones de los especímenes:* se midieron los diámetros de los especímenes en la parte superior, media e inferior y se promedian. En cuanto a sus alturas, se miden cuatro alturas tomando la medición desde cuatro lados diferentes del espécimen y se promedian las alturas.
3. *Secado de los especímenes:* cada espécimen se seca en un horno ventilado a una temperatura de  $60 \pm 5$  °C. El secado tendrá que ser verificado mediante pesados continuos hasta tener una masa constante (se considera que ha alcanzado la masa constante cuando la diferencia entre dos pesadas efectuadas en un intervalo de 24 horas no es superior al 0.1 % de la masa de la muestra).
4. *Pesado de los especímenes:* el espécimen seco se introdujo en un desecador marca *Kimble*, hasta que el espécimen presente una temperatura ambiente. Posteriormente, se pesó cada espécimen en una balanza analítica marca *Santorius*, modelo *PRACTUM 224-12*, de 200 g de rango y 0,0001 g de precisión.

*Nota:* este procedimiento se realiza justo antes de iniciar cada prueba. Si los especímenes se utilizan en más de una prueba, se deben secar las veces que sean necesarias.

## **3.2. Petrografía**

La petrografía es una rama de la petrología, que se encarga de la descripción física de las rocas mediante la observación (SGM, 2017), lo que permite identificar los componentes de la roca, tales como minerales, componentes de la matriz y espacios vacíos, así como la distribución de los cristales o granos de la roca a escala macroscópica y microscópica (Raith et al., 2012).

### **3.2.1 Descripción macroscópica**

La descripción en muestra de mano se hizo de acuerdo a información de la morfología de los granos o elementos que componen las rocas sedimentarias, que describe Stow (1997,) debido a la similitud del proceso de depósito de rocas sedimentarias y rocas volcánicas piroclásticas. Dicha información fue de gran apoyo para describir las características (p.ej. forma, redondez) de las rocas en estudio y los elementos que la componen. Por otra parte, la asignación de colores que presentan las rocas se hizo de acuerdo a la tabla de colores de Munsell, 2009 (); este autor presenta una gama de colores, que permite asignar el color más acertado a cada elemento en la descripción en muestra de mano. La descripción de muestra de mano representa un primer paso en la atribución de propiedades físicas, como el color, la textura, estructura (contenido de elementos y distribución), así como una descripción básica de minerales.
















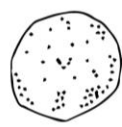





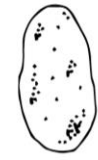
Aspecto		Tipo						
Forma		 Esférica	 Equidimensional	 Tabular	 Como disco			
		 Alargado	 Afilado	 Como barra				
					Biogenico			
Redondez	Alta Esfericidad							
	Baja Esfericidad							
		Muy anguloso	Anguloso	Sub anguloso	Sub redondeado	Redondeado	Muy redondeado	

Figura 7. Características de la morfología de los elementos que componen una roca (Stow, 1997).

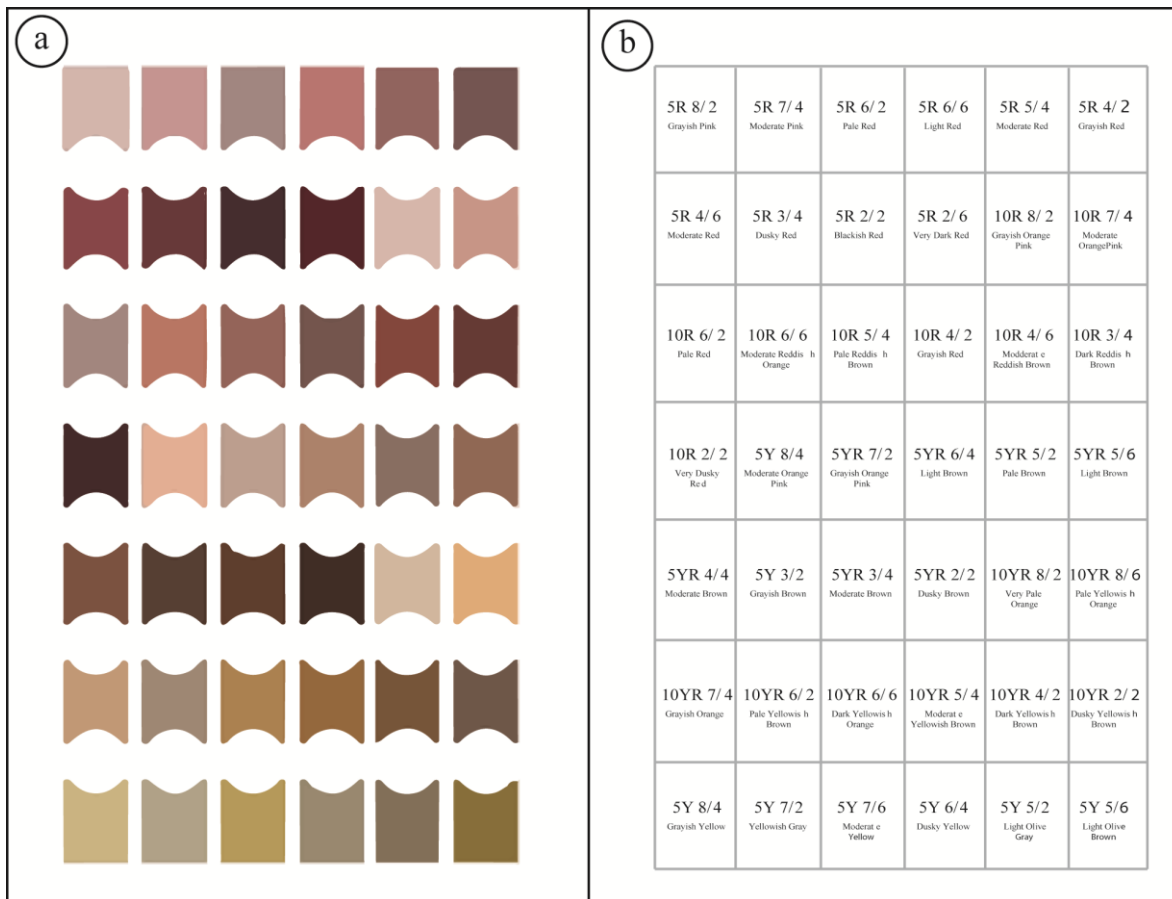


Figura 8. Muestra de una página del manejo de los colores en la tabla de colores que ofrece Munsell. a) se muestra un ejemplo de gama de colores de Munsell. b) asignación de nombre y nomenclaturas correspondientes a cada color de la figura 1a (Munsell, 2009).

Por otra parte, la clasificación de la roca se realizó mediante el análisis de porcentaje de minerales y matriz. De acuerdo a la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS, por sus siglas en inglés), recomienda determinar los componentes una roca (p.ej. minerales, vidrio, fragmentos de roca) y graficar los porcentajes de tres de esos componentes en diagramas triangulares apropiados para determinar el nombre correcto (Winter, 2001). Las rocas piroclásticas usualmente se clasifican de acuerdo al tamaño de los fragmentos del depósito y en algunos casos se utiliza el porcentaje de vidrio, fragmentos de rocas y cristales (Maitre et al., 2005) (Figura 9).

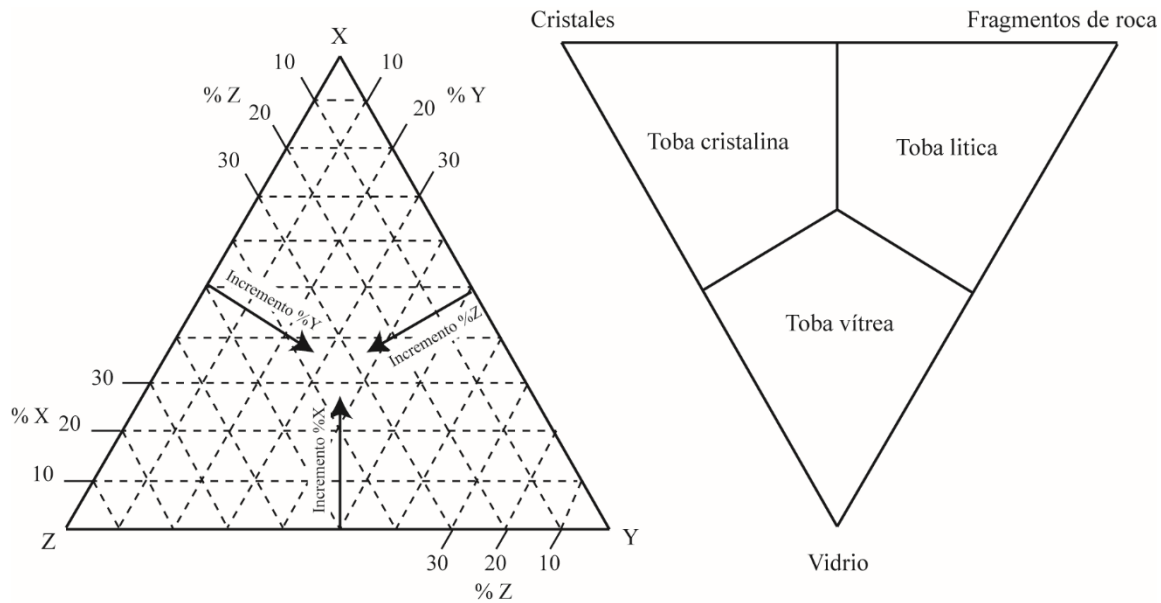
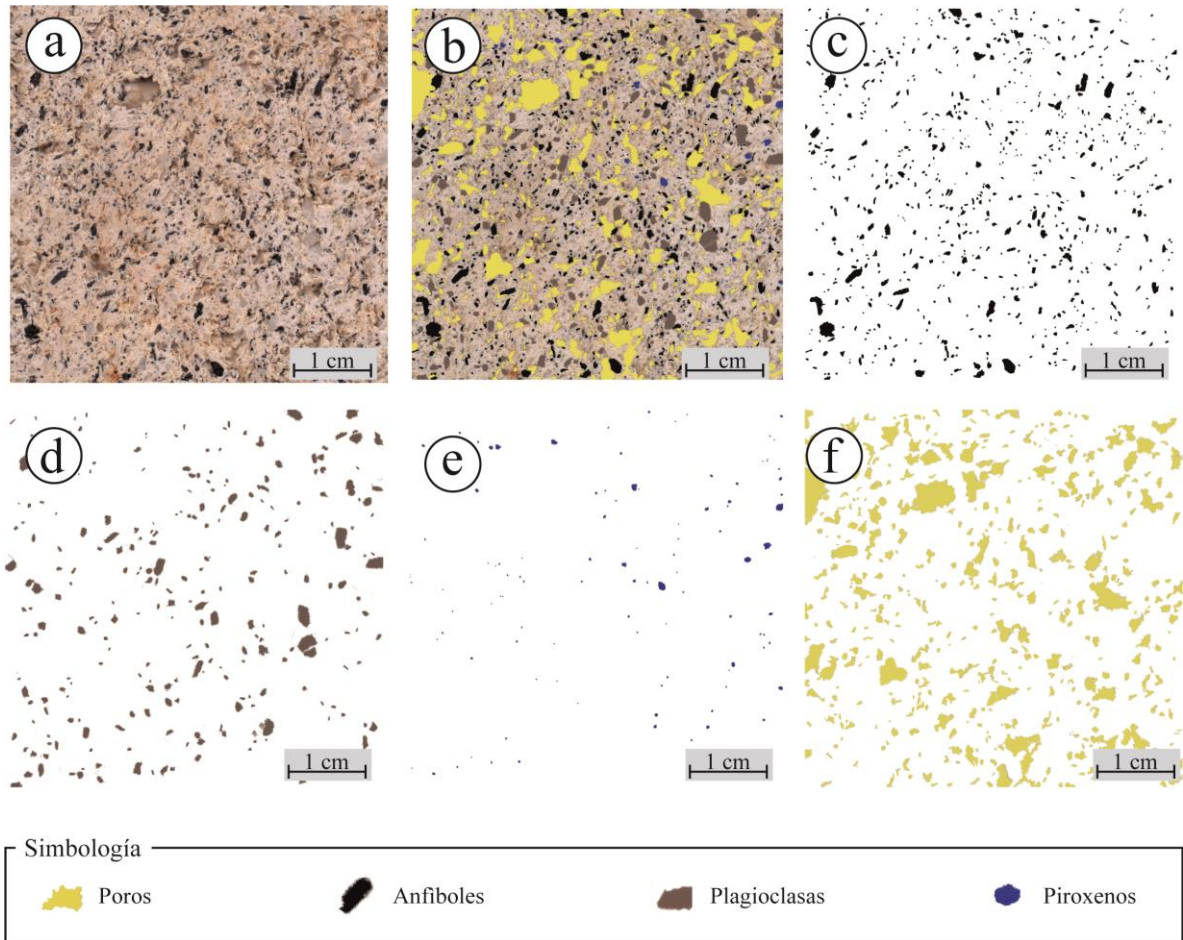


Figura 9. Diagramas ternarios en los que se grafican tres elementos que constituye la roca para clasificar a la roca de acuerdo al contenido de cristales, vidrio y fragmentos de roca.

### Procedimiento técnico para el análisis textural

1. *Preparación de las muestras:* se humedecieron cuatro muestras en forma de laja para resaltar los minerales, se escanearon mediante un escáner marca HP modelo x y se guardaron con resolución de 600 ppp (Figura 10a).
2. *Depuración de imágenes:* las imágenes escaneadas se depuraron mediante el software de Adobe Photoshop. Se separaron los elementos de la roca en cuatro grupos: plagioclasas, anfíboles, piroxenos y poros. De cada grupo se obtuvieron imágenes en formato jpg para una posterior manipulación (Figura 10c, d, e y f).
3. *Adquisición de porcentajes de elementos:* las imágenes obtenidas en Photoshop para cada grupo, se manipularon mediante el software *Image J*. En este, se binarizó la imagen y se obtuvo el respectivo porcentaje para cada grupo de elementos.
4. *Análisis de datos:* se analizaron los datos de porcentajes totales de plagioclasas, anfíboles, poros y mediante la resta de estos elementos se obtuvo el porcentaje de matriz respecto a los otros elementos. Posteriormente se normalizaron los porcentajes para la clasificación de la roca en un diagrama ternario.





*Figura 10. Procedimiento durante la separación de los elementos que constituyen la roca. a) roca escaneada y humedecida, sin ningún análisis. b) separación de todos los elementos de la roca. c) separación de los anfíboles. d) separación de las plagioclasas. e) separación de los piroxenos. f) separación de los poros.*

### 3.2.2 Descripción microscópica

De acuerdo al Servicio Geológico Mexicano, la petrografía se ocupa de la descripción y clasificación de las rocas mediante la observación microscópica de secciones o láminas delgadas en un microscopio petrográfico, clasificándolas según su textura y composición mineralógica. Este tipo de análisis permite obtener características de los cristales y su relación entre ellos (SGM, 2017).

Las propiedades ópticas de los minerales siguen patrones según las propiedades electromagnéticas de la luz. La luz se comporta como una onda de vibración que se transporta en el espacio en todas direcciones y con diferentes longitudes. Según el comportamiento de la luz a través del cristal, los minerales pueden ser: opacos, cuando no dejan pasar la luz; translucidos, cuando parte de la luz los atraviesa; o transparentes, cuando atraviesa toda luz. El microscopio emite la luz en distintas direcciones de manera normal o puede focalizar su vibración en un único plano perpendicular a la propagación.

#### Propiedades de luz natural o nícoles paralelos

La luz emitida por el microscopio está constituida por ondas que vibran en direcciones aleatorias. En luz polarizada, la luz vibra en una dirección definida. En los microscopios es generada por un filtro de polarización que reduce la luz de las direcciones de vibración aleatorias de la fuente natural o artificial a la luz que vibra en una sola dirección, perpendicular a la dirección de transmisión. Algunas de las propiedades que se identificaron por medio de luz natural son las siguientes:

**Forma:** Es el desarrollo de las caras que presenta el mineral, estas se clasifican en tres:

- 1) **Eudral.** Cuando presenta caras están bien definidas y desarrolladas.
- 2) **Subedral.** Cuando presenta solo una de las caras parcialmente definidas.
- 3) **Anedral.** Cuando no presenta ninguna de las caras irregulares.

**Pleocroísmo:** Es el cambio o intensidad de color que presenta un mineral cuando se gira la platina del microscopio, debido a la absorción de la luz por el mineral en diferentes orientaciones (Raith et., al 2012).

**Relieve:** Es el aspecto de los contornos marcados con apariencia como si estuvieran más altos o más bajos que los minerales adyacentes. Esto se debe a que algunos minerales tienen mayor o menor índice de refracción que sus alrededores. Este va de relieve marcado a sin relieve: relieve marcado para los minerales con bordes muy marcados, poco marcado para los minerales con los bordes poco marcados y sin relieve, para los minerales que no se distinguen en nícoles cruzados (Raith et., al 2012).

### **Propiedades de la luz polarizada o nícoles cruzados**

La luz atraviesa entre dos polarizadores (o nícoles), colocados de forma que los planos de vibración de luz que pueden atravesarlos son perpendiculares entre sí. La luz polarizada contiene la mitad de energía luminosa que la luz natural. Algunas de las propiedades que se identificaron por medio de luz polarizada son las siguientes:

**Macla:** Se generan por el intercrecimiento de dos o más porciones de cristal individual de una misma especie mineral, según una relación de simetría definida controlada por la estructura cristalina. Existen diferentes tipos de macla, tales como macla polisintética, múltiple y simple (Raith et., al 2012).

**Birrefringencia:** Es la medida cuantitativa de la doble refracción (diferencia entre el índice de refracción máximo y mínimo) que se genera en un mineral cuando un haz de luz polarizada penetra en el interior de un cristal, se descompone en dos rayos que vibran en dos planos perpendiculares entre sí y con velocidades diferentes. Cuando estos rayos salen del cristal, interfieren entre sí y generan colores de interferencia. Estos se definen como la variación de color que presentan algunos minerales debido a la anisotropía de cada uno, generado por la combinación de ondas. Un mismo mineral puede presentar diferentes colores dependiendo la densidad, sistema cristalino y de su birrefringencia. Y de acuerdo a la tabla de Michel Levy, los colores se pueden identificar en orden 1, 2 y 3, dependiendo su intensidad, siendo tercer orden para los colores intensos y primer orden para los opacos (Raith et., al 2012).

La descripción de las láminas delgadas se realizó mediante el uso del microscopio petrográfico marca OPTIKA modelo B-1000POL y con base en (Raith et al., 2012), que

describe las características micro texturales y mineralógicas (p. ej. forma, color, pleocroísmo, relieve, extinción) de los cristales observados en láminas delgadas.

### **Procedimiento técnico para descripción microscópica**

1. *Preparación de los especímenes:* se desbasta una de las superficies del testigo, sobre una base de vidrio utilizando agua y abrasivo de carburo de silicio Buehler N° 240, 400, 600 y 1000, hasta dejar la superficie plana y pulida. Es importante mencionar que se utiliza una base diferente de vidrio para cada número de abrasivo. Por otra parte, se desbasta una de las caras de un portaobjetos con el abrasivo N° 600 sobre una base de vidrio. Posteriormente, tanto la muestra como el portaobjetos son lavados utilizando un sistema de ultrasonido Fisher Scientific para retirar los residuos de abrasivo.
2. *Secado de los especímenes:* el espécimen limpio se pone a secar sobre una plancha Isotemp por una hora y a una temperatura de  $\sim 100^{\circ}\text{C}$ , hasta evaporar el agua por completo.
3. *Pegado y cortado de los especímenes:* el espécimen y el portaobjetos son pegados por el lado de sus caras desbastadas respectivamente, utilizando resina UV (que seca que al entrar en contacto con los rayos del sol) teniendo cuidado de no dejar burbujas de aire atrapadas dentro de la misma. Una vez pegado el espécimen al portaobjetos, es cortado por el lado no desbastado hasta dejarla con un espesor de  $\sim 30\ \mu\text{m}$ , para lo cual se utiliza una cortadora de precisión.
4. *Manipulación de los especímenes pegados al portaobjetos:* el espécimen es nuevamente desbastado con abrasivos de carburo de silicio (N° 400, N° 600 y/o N° 1000) hasta dejar una lámina y sus minerales, listos para su observación.
5. *Adquisición y manipulación de los resultados:* las láminas delgadas se describieron de acuerdo a la literatura descrita anteriormente, y se obtuvieron fotografías de los minerales con el microscopio petrográfico Olympus.

### 3.3 Propiedades físicas

Las propiedades físicas son cualquier propiedad medible y visible de las rocas (Tiab y Donaldson, 2015), las cuales son heredadas del proceso de formación o emplazamiento y de los procesos de meteorización y alteración (p. ej. hidrotermal) por los que ha sido afectadas las rocas (p. ej. color, textura, porosidad, densidad). De manera muy general, las características físicas de una roca juegan un papel importante en el comportamiento mecánico, que incluye la resistencia máxima y la deformación (cuando la roca está sometida a cargas o esfuerzos).

#### 3.3.1 Densidad

La *densidad* ( $\rho$ ) es una propiedad física de todos los materiales, la cual está relacionada con la naturaleza de sus constituyentes y la existencia entre los espacios vacíos (Alonso, 2010). Está definida por la relación entre la masa ( $m$ ) de la roca y su volumen ( $V$ ) de la misma, y se puede expresar en  $\text{kg/m}^3$ , sin embargo, para este trabajo de investigación se tomó en unidades  $\text{g/cm}^3$ :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

En general, se puede establecer la densidad de una roca a partir de las relaciones de masa y volumen de una roca seca, tomando en cuenta dos fases: gaseosa y líquida (Figura 11).

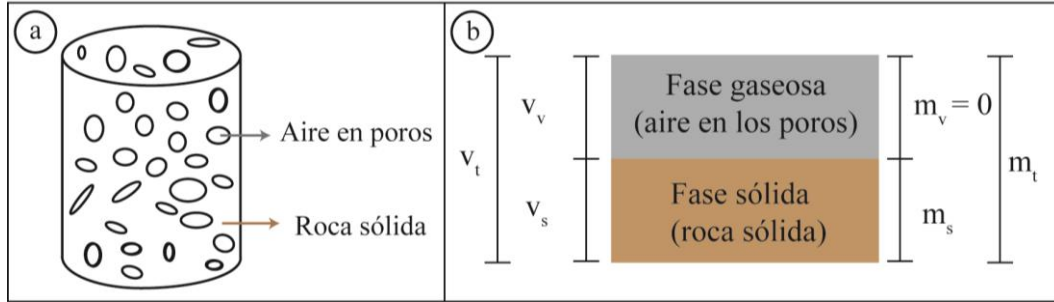


Figura 11. Representación gráfica de la relación gravimétrica y volumétrica, partiendo de una roca seca. a) representación de la fase gaseosa y sólida en un espécimen. b) relación de volúmenes y masas de acuerdo a las fases:  $V_t$ =volumen total,  $V_v$ = volumen de vacíos,  $V_s$ = volumen de la roca sólida,  $m_t$ = masa total,  $m_v$ = masa de vacíos,  $m_s$ = masa de la roca sólida

La roca sólida está compuesta por poros, los cuales pueden ser abiertos (accesibles y comunicados con el exterior) y cerrados (no accesibles y no se comunican con el exterior). Estas variaciones de poros permiten obtener diferentes valores del volumen y por lo tanto también de la densidad. Para fines de este trabajo se utilizan dos diferentes tipos de densidades: densidad aparente y densidad real (Santiago y Raya, 2008).

- 1) **Densidad aparente ( $\rho_b$ ):** se define como la relación de la masa del material seco ( $m_s$ ) y el volumen total de roca ( $V_t$ ) es decir, el volumen incluyendo su parte sólida ( $V_s$ ) y todos sus espacios vacíos (Alonso, 2010). En inglés esta densidad es llamada bulk density:

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_t} \quad (2)$$

Donde:

$m_s$ : masa de la fase sólida

$V_t$ : volumen total de la roca

- 2) **Densidad real ( $\rho_r$ ):** se define como la masa del material seco ( $m_s$ ) por unidad de volumen de la parte sólida de la roca ( $V_s$ ), es decir, el volumen sin tomar en cuenta los espacios vacíos ( $V_v$ ) (Alonso, 2010.)

$$\rho_r = \frac{m_s}{V_s} \quad (3)$$

Donde:

$\rho_r$ : densidad real

$m_s$ : masa de la fase sólida

$V_s$ : volumen de la fase sólida

### **Principios básicos: picnómetro de helio**

El término picnometría se deriva de la palabra griega *Puknos* (densidad). El picnómetro determina el volumen real de un sólido, utilizando el principio de desplazamiento de líquidos de Arquímedes y la ley de expansión de gases de Boyle: un gas puede penetrar en los poros de un material, lo cual proporciona mediciones de volumen con gran exactitud. Debido a que el helio pertenece a los gases nobles, no reacciona con las partículas de la roca, lo cual provee mediciones de volumen con gran exactitud (Santiago y Raya, 2008). Por otro lado, su radio atómico de 31 pm (pm = picómetro =  $1 \times 10^{-12}$  m), permite penetrar en poros y grietas de hasta 0.003  $\mu\text{m}$  (Figura 12).

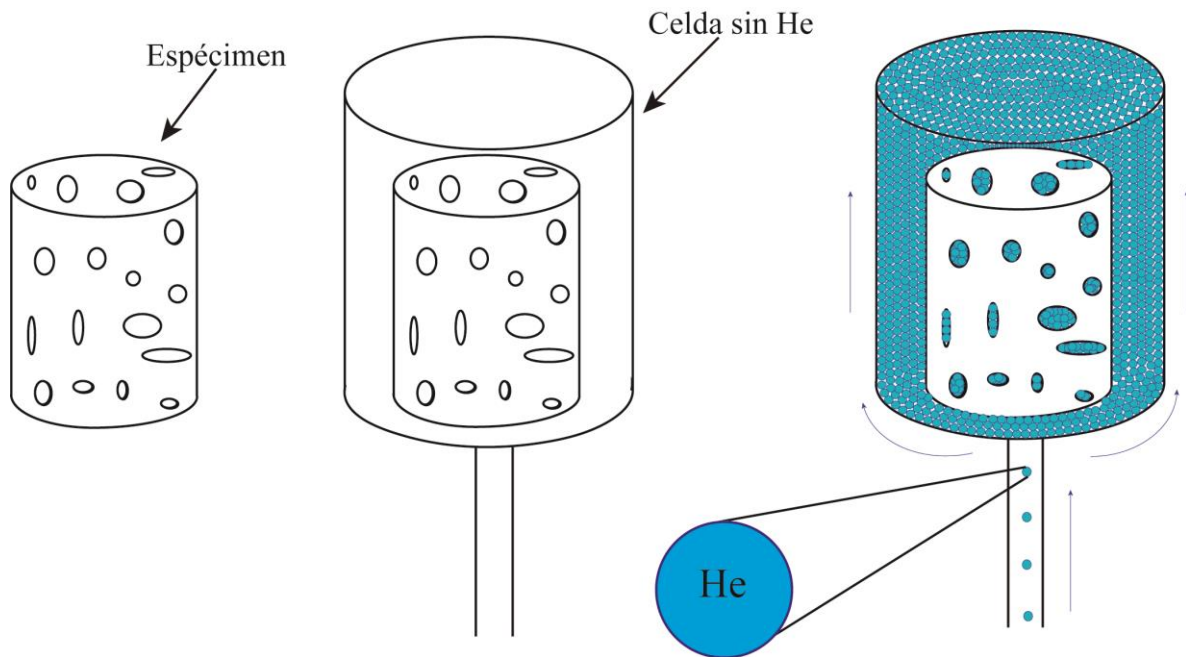


Figura 12. Se aprecia el espécimen antes de introducir a la celda, posteriormente el espécimen dentro de la celda y, por último, las partículas de helio entrando en todos los poros del espécimen.

El picnómetro utilizado presenta dos celdas internas conectadas por una válvula: una celda porta muestras (contiene el espécimen estudiado) y una celda de expansión (Figura 13), ambas con volumen conocido. El picnómetro de gas mide la caída de presión cuando a un gas sometido a una presión conocida en el interior de una celda porta muestras se le permite fluir a la celda de expansión. Esta caída de presión es inversamente proporcional al volumen de la muestra estudiada (Buey y Raya, 2008; Suárez, 2014).

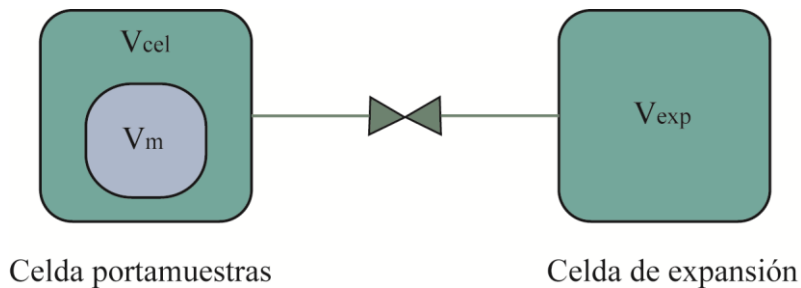


Figura 13. Representación de las celdas internas del picnómetro de helio, conectadas por una válvula (Santiago y Raya, 2008; Suárez, 2014).



La celda porta muestras y la celda de expansión se encuentran a presión atmosférica y temperatura ambiente, mientras la válvula que las conecta se encuentra cerrada. Este estado se representa con las siguientes ecuaciones que parte de la ecuación de los gases ideales:

Para celda porta muestras

$$P_1 (V_{cel} - V_m) = n_{cel} \cdot R \cdot T_{atm} \quad (4)$$

Para celda de expansión

$$P_{atm} \cdot V_{exp} = n_{exp} \cdot R \cdot T_{atm} \quad (5)$$

Donde:

$V_{cel}$ : volumen de la celda portamuestras

$V_{exp}$ : volumen de la celda de expansión

$V_m$ : volumen de la muestra o espécimen

$R$ : constante de los gases ideales (0.082)(atm · L/mol · K)

$n_{exp}$ : número de moles de Helio en la celda de expansión

$n_{cel}$ : número de moles de Helio en la celda portamuestras

$T_{atm}$ : temperatura atmosférica

$P_{atm}$ : presión atmosférica

Posteriormente se incrementa la presión ( $P_1$ ) de la celda portamuestras con la muestra en su interior hasta un valor (134 kPa), permitiendo que el sistema se equilibre. Una vez equilibrado el sistema se abre la válvula que conecta a las celdas, igualando la presión entre ellas ( $P_2$ ). Entonces se registra y calcula el volumen de la muestra a partir de la ecuación fundamental del picnómetro de gas (ecuación 4) (Santiago y Raya, 2008; Suárez, 2014).

$$V_m = V_{cel} - \frac{V_{exp}}{\frac{P_{1g}}{P_{2g}} - 1} \quad (6)$$

Donde:

$V_m$ : volumen de la muestra o espécimen

$V_{cel}$ : volumen de la celda portamuestras

$V_{exp}$ : volumen de la celda de expansión

$P_{1g}: P_1 - P_{atm}$  } presiones manométricas referidas  
 $P_{2g}: P_2 - P_{atm}$  } a la presión atmosférica

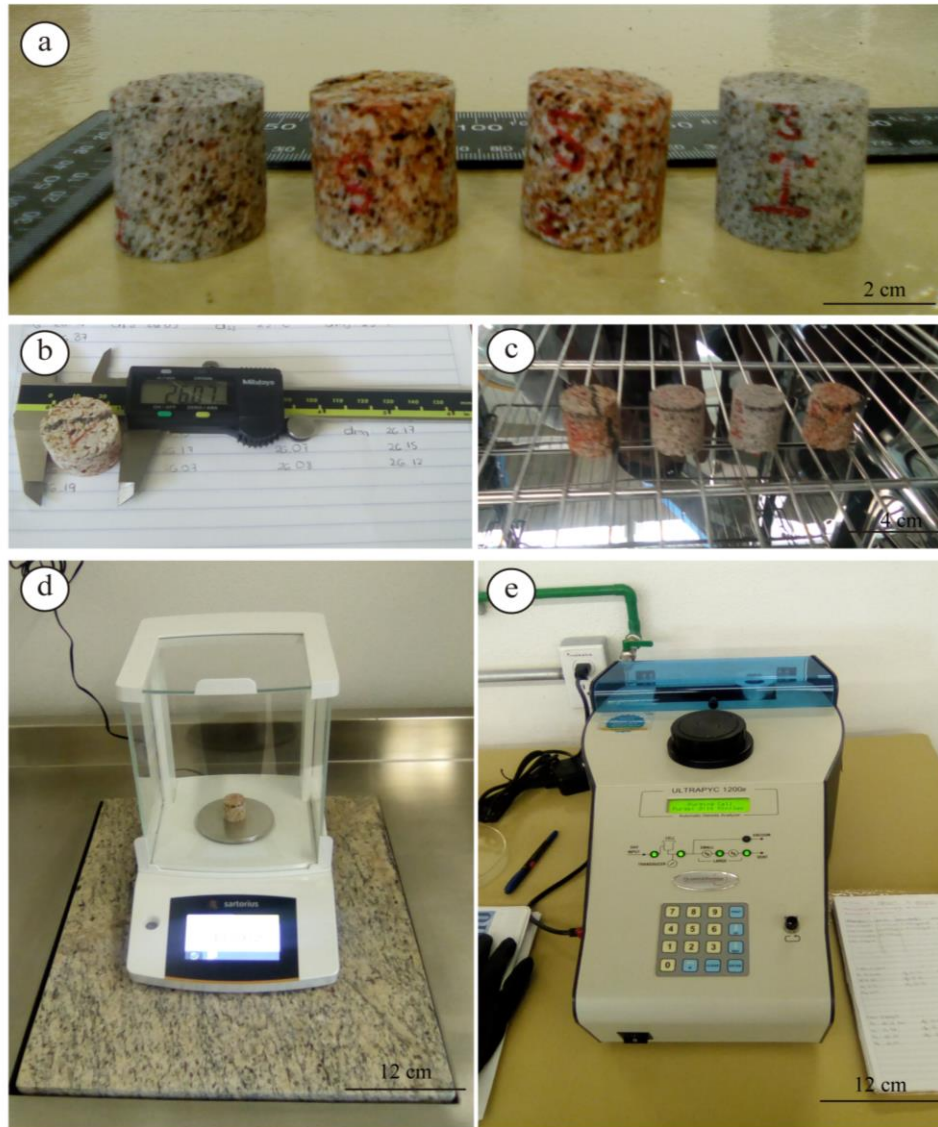
### Procedimiento técnico de picnómetro de helio

Esta prueba se realizó de acuerdo a lo que establece la norma europea UNE-EN-1936: 2007 en un picnómetro de helio marca *Quantachrome*, modelo *ULTRAPYC 1200e*.

1. *Obtención de volumen*: se obtuvieron las medidas de sus lados. Se midió el diámetro superior, intermedio e inferior, tres veces cada uno y se promediaron. Posteriormente se sacaron cuatro medidas de la altura y se promediaron. Esto para obtener un volumen aparente y posteriormente relacionarlo con el volumen real de la muestra (Figura 14b).
2. *Manipulación y colocación de la muestra*. Con la finalidad de minimizar errores de cálculo, es conveniente que el tamaño de la muestra sea lo más adecuado para rellenar alguno de los diferentes tamaños de celda (porta muestras) que se utilizan. En este caso se utilizaron las celdas del tamaño mediano de acuerdo a las medidas de la muestra (1 x 1”).
3. *Verificación de la presión del gas y manipulación del equipo*. Una vez colocado y asegurado el espécimen dentro de la celda, se verifica que las presiones del gas

de entrada que viene del tanque almacenador, de izquierda a derecha sea de 26.5 psi 2500 psi, respectivamente. Después se introduce el nombre y peso del espécimen de acuerdo a la metodología que se establece en el procedimiento técnico del laboratorio.

4. *Obtención de la densidad.* La cantidad de helio que introduce el equipo a la celda, es un volumen ya conocido, de acuerdo al tamaño de celda que se esté empleando, así que el volumen desplazado será el volumen real de la muestra. Una vez determinado el volumen del sólido que conforma el espécimen y contando con la masa del espécimen, se puede determinar la densidad real, cálculo que el equipo realiza automáticamente. El instrumento realiza el mismo procedimiento de tres a quince veces; el instrumento automáticamente calcula la desviación porcentual, de todo el ensaye. Esto permite una comparación relativa entre procedimientos y analiza con precisión la variación dentro de la muestra utilizada, en este caso, la desviación estándar con la que trabaja el equipo es de 0.003.
5. *Adquisición y manipulación de los resultados.* Los resultados de densidad real que obtiene el equipo se guardaron de manera automática en un formato predeterminado por el fabricante en donde se incluyen todos los datos introducidos al aparato, así como todos los valores obtenidos durante todo el ensaye, estos se guardaron en un archivo de extensión pdf.



*Figura 14. Pasos a seguir durante el procedimiento para obtención de la densidad real. a) los cuatro especímenes con los que trabajó en esta prueba. b) mediciones del espécimen con la ayuda de un Vernier para obtener el volumen aparente de la muestra. c) secado de especímenes en el horno. d) pesado del espécimen en báscula de precisión marca Sartorius, modelo PRACTUM. e) obtención de densidad real mediante el picnómetro de Helio ULTRAPYC 1200e.*

### 3.3.2 Porosidad

La *porosidad* ( $n$ ) es la relación entre el volumen ocupando los espacios vacíos ( $V_v$ ) y el volumen total de roca ( $V_t$ ), y se expresa en porcentaje y en general con la siguiente ecuación:

$$n(\%) = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad (7)$$

La porosidad de una roca puede clasificarse de acuerdo a dos criterios: su origen y el grado de comunicación (características de los espacios vacíos de los poros) (Alonso, 2010; Pérez, 2011; Suárez, 2014).

1) De acuerdo a su origen:

- **Porosidad primaria o intergranular:** se origina durante el depósito del material que da lugar a la roca (Figura 15a).
- **Porosidad secundaria o inducida:** se origina como consecuencia de procesos de meteorización, generando grietas y degradación de la roca (Figura 15b).

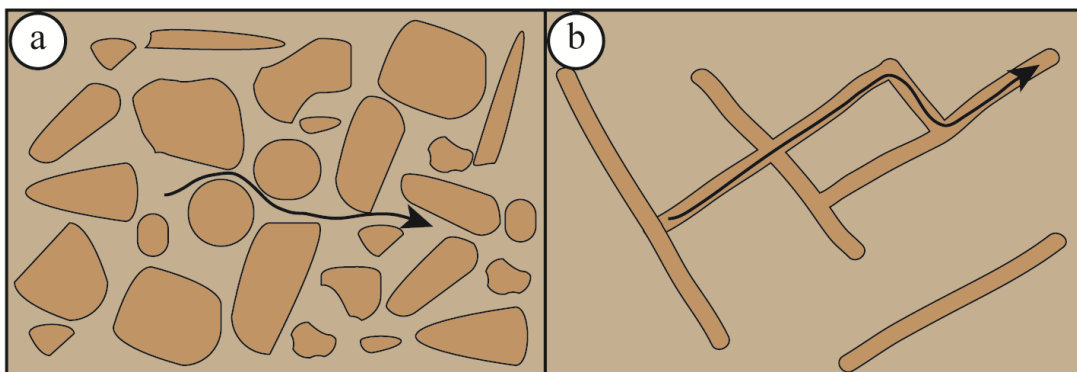


Figura 15. a) porosidad primaria o intergranular, la cual está indicado entre los elementos de la roca con la flecha negra. b) porosidad secundaria o inducida, la cual está indicado entre las fracturas con la flecha negra.

2) De acuerdo al grado de comunicación:

- **Porosidad abierta ( $n_o$ ):** se define como la relación entre el volumen de poros abiertos y volumen total de la roca. Incluye todos los poros que se encuentren interconectados (Alonso, 2010; Pérez, 2011) (Figura 16). Esta porosidad se calcula por medio de la relación de porcentaje entre el volumen de los poros abiertos y el volumen del espécimen, la cual se expresa con la siguiente expresión (norma española UNE-EN 1936: 2007):

$$n_o = \left( \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \right) \times 100 \quad (8)$$

Donde:

$n_o$ : porosidad abierta (%)

$m_d$ : masa del espécimen seca (gr)

$m_h$ : masa del espécimen sumergido en agua (gr)

$m_s$ : masa del espécimens saturado (gr)

- **Porosidad total ( $n$ ):** es la relación entre el volumen total de poros y el volumen aparente de la roca. Esta porosidad contabiliza todos los espacios vacíos de la roca, es decir la suma de los poros abiertos y poros cerrados. Este valor no se obtiene de manera experimental, ya que incluye los espacios vacíos que no se comunican con el exterior, es decir los poros no accesibles. Su obtención se realiza de forma indirecta a partir de las densidades (Alonso, 2010; Suárez, 2014) (Figura 16). Esta porosidad se calcula por medio de la relación de densidad aparente entre la densidad real (3.2.3), la cual se expresa con la siguiente expresión (norma española UNE-EN 1936: 2007):

$$n_t = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}\right) * 100 \quad (9)$$

Donde:

$n_t$ : porosidad total

$\rho_b$ : densidad aparente

$\rho_r$ : densidad real

- **Porosidad cerrada ( $n_c$ ):** se define como la relación entre el volumen de poros no accesibles por un fluido y el volumen aparente de la roca. Incluye todos los poros no interconectados (Alonso, 2010) (Figura 16). Esta porosidad se obtuvo a partir de la porosidad total y la porosidad abierta, utilizando la siguiente expresión:

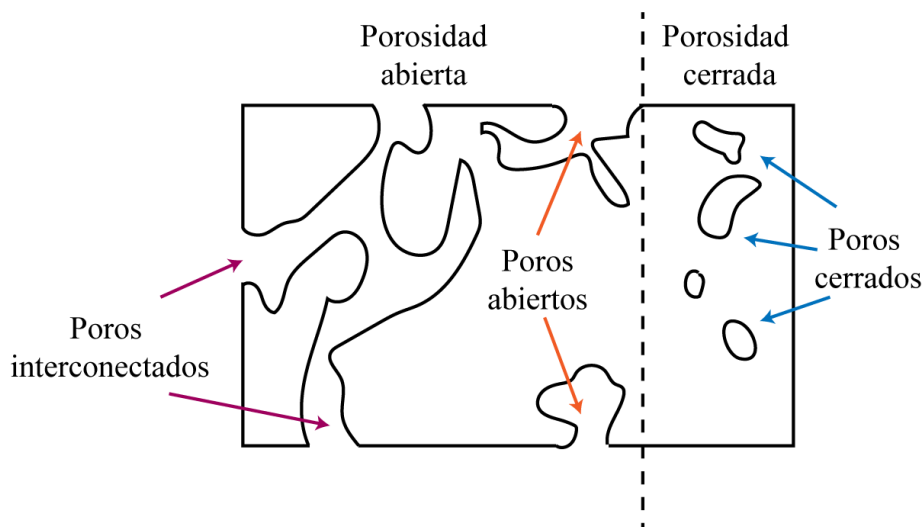
$$n_c = (n_t - n_0) * 100 \quad (10)$$

Donde:

$n_c$ : porosidad cerrada

$n_0$ : porosidad abierta

$n_t$ : porosidad total



*Figura 16. La imagen muestra los tres tipos de porosidad en 2D: poros accesibles, no accesibles e interconectados. Se puede observar que los poros conectados pueden mostrar diferente estructura que depende del tipo de roca (formación). Es importante mencionar que en 3D, los poros aparentemente aislados pueden resultar conectados con otros.*

### **Principios básicos: porosímetro de mercurio**

La porosimetría por inyección de mercurio es una técnica indirecta que permite obtener el sistema poroso y su distribución en función del tamaño aparente de acceso a los poros de las rocas, partiendo de la teoría que implemento Washburn en 1992, en donde sugiere obtener la distribución del tamaño de los poros, a partir de datos de intrusión de mercurio (presión – volumen) (Alonso, 2002).

El equipo se basa en los fenómenos de capilaridad generados por los líquidos que no mojan los sólidos con los que están en contacto (Figura 17). Así, un líquido como el mercurio que no penetra espontáneamente en los conductos capilares, precisa una presión “ $p$ ” para su intrusión a los poros, que es inversamente proporcional al radio “ $r$ ” de los mismos (Alonso, 2002):



$$r = \frac{2\sigma \cos \alpha}{p} \quad (11)$$

Donde:

$\sigma$ : tensión superficial del mercurio

$\alpha$ : ángulo de contacto sólido – líquido

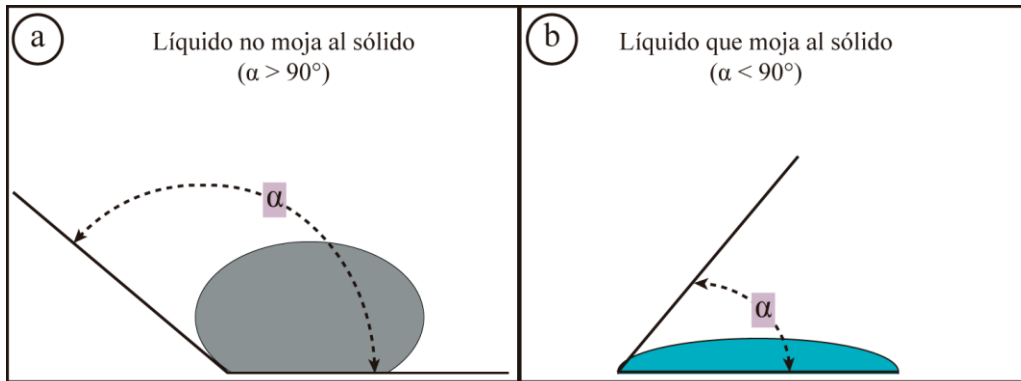


Figura 17. Las fuerzas atractivas entre moléculas del líquido son causantes de la tensión superficial y pueden ser fuerzas de cohesión o de adhesión, dependiendo de la naturaleza del líquido. a) cuando las fuerzas cohesivas predominan, el líquido sobre la superficie tiende a mantenerse unido. b) cuando las fuerzas adhesivas predominan, el líquido sobre la superficie tiende a extenderse.

En el caso de conductos cilíndricos ideales, de acuerdo con los valores normalmente aceptados para los materiales rocosos ( $\sigma$ : 480 dinas/cm y  $\alpha$ : 141.3°), dicha relación es:

$$r = \frac{7.5 \times 10^6}{p} \quad (12)$$

Donde:

$r$ : radio de los capilares ( $\mu\text{m}$ )

$p$ : presión (dinas/cm<sup>2</sup>)

El porosímetro inyecta mercurio a presión y registra el volumen de mercurio intruído en los poros a la respectiva presión. Para cada intervalo de presión considerado, el volumen de mercurio intruído nos indica el volumen de poros que la muestra representa un determinado intervalo de tamaño de acceso (Alonso, 2002).

Las presiones aplicadas por el porosímetro alcanzan una presión máxima de 33, 000 psi para mediciones 0.001 a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro de poro. Estas presiones se trabajan en dos rangos diferentes: baja y alta presión. La baja presión intrusiona el mercurio en los poros más grandes, es decir de tamaños de poros de un rango de 4 a 100  $\mu\text{m}$ ; por otro lado, la alta presión permite la intrusión de mercurio en los poros más pequeños, de tal manera obtiene la familia de un rango de 4 a 0.001  $\mu\text{m}$  (Alonso, 2002).

Esta prueba, permite obtener los valores de tamaños de poros predominantes en las rocas. La porosidad se divide en rangos de acuerdo a su tamaño (Figura 18): microporosidad con radio de poros  $<0.001 \mu\text{m}$ ; mesoporosidad con radio de poros entre 1 y 100  $\mu\text{m}$ ; y macroporosidad con radio de poros  $>100 \mu\text{m}$  (Martínez-Martínez et. al., 2017).

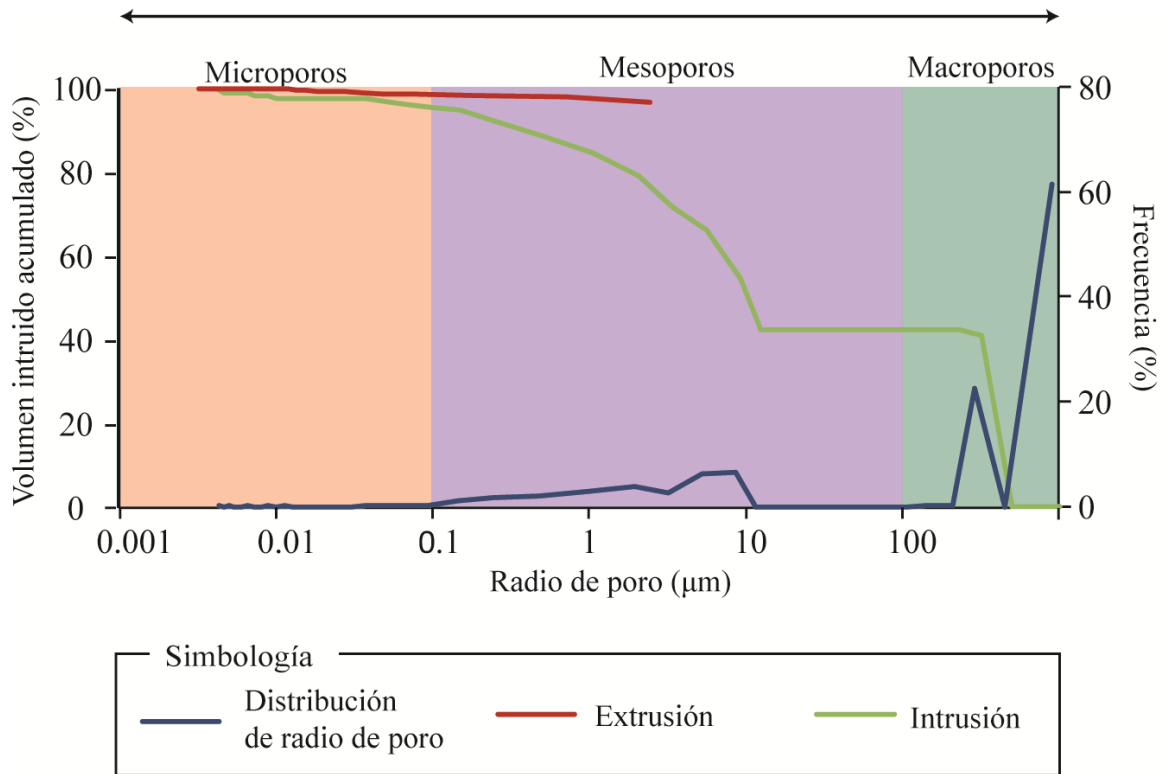


Figura 18. Relación de volumen intruido con respecto al radio de poro. En la imagen se muestra la clasificación de poros según su tamaño (ver Martínez-Martínez et al., 2017 para su revisión). La línea de intrusión se relaciona directamente con la extrusión, ya que la intrusión representa una primera aproximación de la forma de los poros, como lo son los poros cuello de botella, estos usualmente son representados en una línea escalonada de intrusión de Hg; la línea de extrusión por su parte, estos poros los representa con una extrusión de menos del 50% de Hg.

Otros parámetros se obtienen mediante esta prueba, son el tipo y tortuosidad de los poros. Por una parte, el modelo de las formas de poros parte de la suposición de que la roca se constituye de varios tubos capilares de diferentes tamaños, distinguiendo dos tipos de poros (Figura 19a): poros tipos *throat* o cuello de botella, y los poros tipos *chamber* o cámara; y estos en conjunto forman el sistema poroso (Benavente, 2006). Este modelo permite explicar la porosidad atrapada en la porosimetría de mercurio, mediante la observación de histéresis en las gráficas de extrusión (Benavente, 2006). Por otra parte, la tortuosidad es una medida de la complejidad geométrica de un medio poroso. Y se define como la relación de la distancia real recorrida entre dos puntos, incluida cualquier curva encontrada, dividida por la distancia en línea recta (Figura 19b).

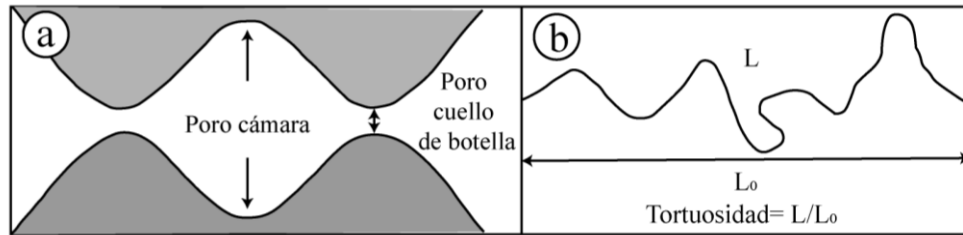


Figura 19. Características del sistema poroso. a) tipos de poros. b) representación gráfica de la tortuosidad.

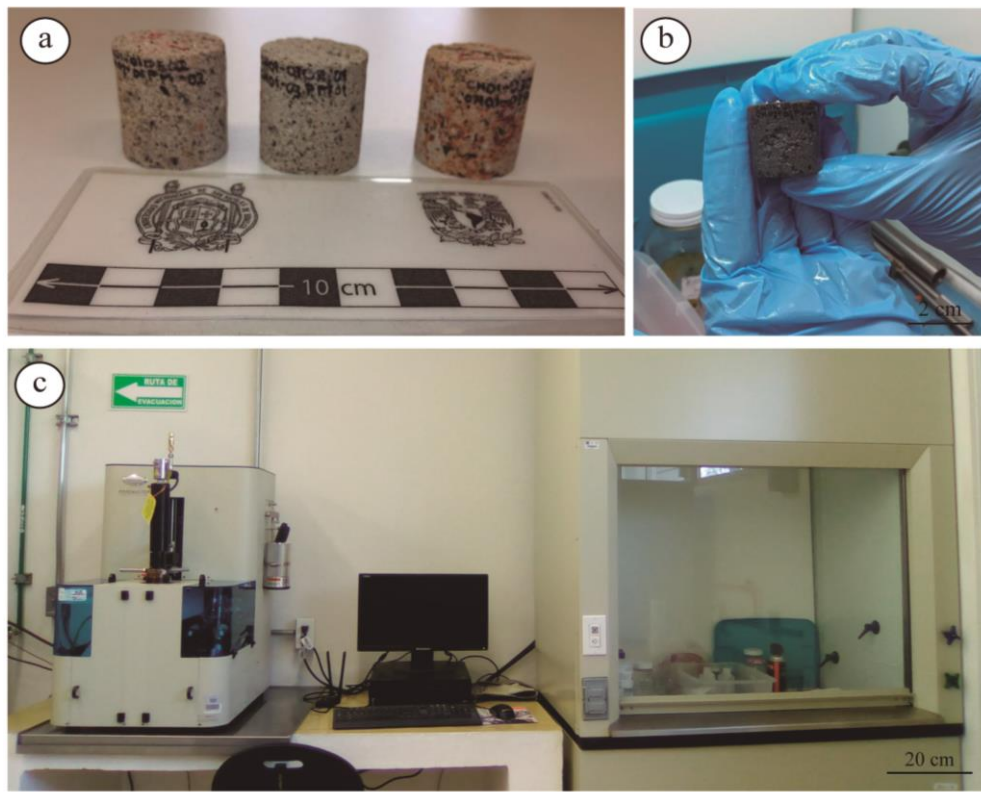
### Procedimiento técnico

Esta prueba permitió la determinación de la porosidad efectiva de los especímenes de las rocas en estudio, por medio de un porosímetro de mercurio marca *Quantachrome*, modelo *PoreMaster 33*.

1. *Manipulación del equipo:* para realizar esta prueba requiere de dos usuarios: uno que controlará el software del equipo y la otro que manipulará el espécimen, estas acciones se realizaron con el uso de botas plásticas y cerradas y guantes de látex de alta resistencia para protegerse del contacto directo con el mercurio. El usuario que manipuló el software introdujo el peso y volumen aparente del espécimen, así como el nombre y la celda con la que se trabajó (alta o baja presión). El espécimen se colocó primero en la celda de baja presión y al finalizar esta, se pasó a la celada de alta presión.
2. *Manipulación y colocación de la muestra en celda de baja presión:* la persona que manipuló el espécimen, como primer punto, prendió el equipo del porosímetro y el tanque de gas, enseguida colocó el espécimen en una celda de cristal de baja presión.
3. *Manipulación del programa PoreMaster:* el equipo comenzó a intrusionar el mercurio en el espécimen, con una presión inicial de 0.5 psi, que fue aumentando de gradualmente, lo cual fue reflejado en una gráfica que arrojaba el software y en esta se pueden ir apreciando los cambios de pendientes, hasta la estabilización de la

misma, lo que indico la ausencia en el aumento de la presión y por ende la intrusión del mercurio. Cuando el equipo llegó a esta estabilización, automáticamente comenzó la extrusión del mercurio. Este procedimiento se repitió en la celda de alta presión.

4. *Manipulación y colocación de la muestra en celda de alta presión:* se cambió el espécimen a la de celda de alta presión, la cual trabaja con aceite.
5. *Manipulación del programa PoreMaster para celda de alta presión:* se modificó en el software los datos de la nueva celda que se utilizó (celda de alta presión).
6. *Adquisición y manipulación de resultados:* la intrusión del mercurio en los poros del espécimen, estima las presiones capilares de la misma, siendo el tamaño de poro inversamente proporcional a la presión aplicada (entre baja y alta), de esta manera, el software arroja tres gráficas: la primera en la que se muestran los valores en la celda de presión baja, la segunda muestra los valores de la celda de presión alta y, por último, una combinación de los valores adquiridos en las celdas. Los resultados se recolectaron de manera automática y fueron exportados en diferentes formatos (p. ej. csv, txt, pdf) para su manipulación y visualización gráfica.



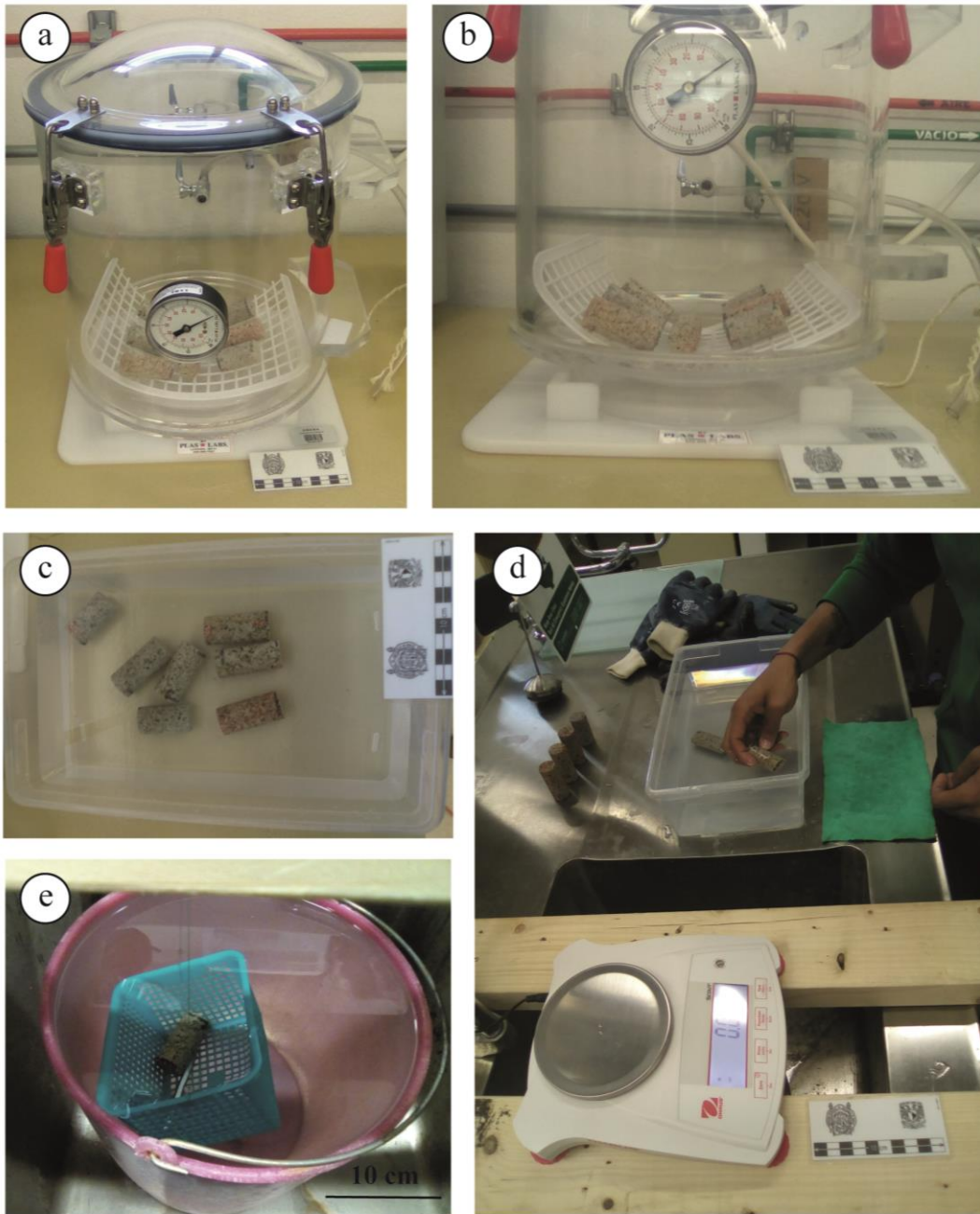
*Figura 20. a) tres de los cuatro especímenes que se trabajaron en esta prueba. b) espécimen después de haber sido sometido a la prueba de porosimetría de mercurio. c) en el lado izquierdo se encuentra el porosímetro de mercurio acompañado por la computadora en cual se trabajó durante la prueba. De lado derecho se encuentra la campana de vacío, es esta cámara se manipula todo el mercurio y sus desechos.*

### **Principios básicos de porosidad abierta por el método de absorción de agua al vacío**

Esta prueba se realizó de acuerdo la norma europea UNE-EN 1936: 2007, que determina mediante técnicas experimentales, basadas en extraer todo el aire presente en los poros de la roca e introducir agua con una bomba de vacío (se tendrá que llegar hasta 2 kPa). Una vez, obtenidos los pesos (secos, saturados), la porosidad abierta será el resultado de la relación de pesos y volúmenes.

## Procedimiento técnico

1. *Colocación de los especímenes:* los especímenes se colocaron dentro de una cámara de vacío y se acomodaron con una distancia aproximadamente de 2 cm entre cada uno.
2. *Manipulación del equipo:* se disminuye la presión de la cámara de vacío hasta aproximadamente 2 kPa. Esta presión se mantuvo durante aproximadamente dos horas, para eliminar el aire contenido en los poros abiertos de los especímenes. Se introdujo lentamente agua destilada en la cámara de vacío, hasta saturar los especímenes de 2-3 cm por encima. Durante este proceso se mantiene la presión de 2 kPa. Después de haber sumergido los especímenes, se restableció la presión atmosférica de la cámara de vacío. Se dejaron los especímenes bajo esas condiciones durante aproximadamente  $24 \pm 2$  horas.
3. *Extracción de los especímenes del equipo:* se sacaron los especímenes de la bomba de vacío y se colocaron en un recipiente para obtener su peso hidrostático y saturado, estos dos pesos se obtienen uno seguido del otro, por cada espécimen. Utilizando una báscula marca Ohaus Scout, con 0.01 g de precisión.
4. *Pesado de los especímenes:* El peso hidrostático se obtuvo, colocando a una báscula un hilo con un recipiente sumergido en una cubeta con agua; a este recipiente de la cubeta se le colocó el espécimen y se tomó el peso que indicó la báscula. Para obtener el peso saturado, se secó el espécimen con un trapo húmedo y se colocó directamente sobre la báscula.
5. *Adquisición y manipulación de los resultados:* los valores de los pesos hidrostáticos y saturados, se registraron de manera manual en formato xlsx para su manipulación.



*Figura 21. a) cámara de vacío. b) distribución de muestras dentro de la cámara de vacío. c) especímenes después de ser saturados en la cámara de vacío y colocados en un recipiente con agua. d) peso saturado. e) peso hidrostático sobre una canastilla dentro de una cubeta de agua.*



### 3.4 Propiedades hídricas

Se denominan propiedades hídricas en las rocas, al movimiento del agua (p.ej. dirección, velocidad del flujo), tanto en fase líquida como en fase gaseosa a través de un medio rocoso, y se relacionan con las propiedades físicas (Benavente, 2006). Este se puede describir mediante las siguientes propiedades: la permeabilidad que depende de los poros interconectados y de la forma de su estructura: poros conectados y lineales suelen favorecer a una mayor permeabilidad dentro de un flujo laminar, mientras que un sistema tortuoso favorece un flujo turbulento; capilaridad del movimiento del agua líquida debido a las fuerzas capilares; y la evaporación que se representa por el transporte del vapor de agua a través de los poros de mayor tamaño.

#### 3.4.1 Permeabilidad

La *permeabilidad* ( $k$ ) para rocas está definida como la capacidad que tiene una roca para el paso de fluidos a través de la red de poros interconectados. Esta propiedad depende de la porosidad efectiva (porosidad interconectada) y las características de los poros (p. ej. tamaño, forma, distribución) (Romaña, 2014). En general existen dos tipos de permeabilidad de acuerdo a su génesis:

- **Permeabilidad primaria o de matriz:** se hereda del proceso de depósito de las rocas. Rocas piroclásticas no soldadas suelen ser más permeables que las mismas rocas soldadas
- **Permeabilidad secundaria:** se originan de diferentes procesos externos derivados de la meteorización de la roca (p. ej. alteración por hidrotermalismo, fracturación (Suárez González, 2014).

La permeabilidad se puede expresar utilizando como unidad de medida es el Darcy (D) o bien el  $\text{m}^2$ , donde  $1\text{D} = 0.9869\text{E}-12 \text{ m}^2$ . Se dice que una roca tiene la permeabilidad de un Darcy cuando un fluido con una viscosidad de un centipoise avanza a una velocidad de 1 cm/s bajo un gradiente de presión de 1 atm/cm. En aplicaciones geológicas el Darcy se considera demasiado alto para la mayoría de las rocas, por lo tanto, se expresa en milésimas de Darcy (mD), donde  $1000 \text{ mD} = 1 \text{ D}$ . (Tiab y Donaldson, 2015).

Los cálculos de la permeabilidad se derivan de la ley de Darcy, para líquidos bajo condiciones en estado estacionario y flujo laminar, y se expresa con la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\mu \cdot Q \cdot L}{A \cdot \Delta P} \quad (13)$$

Donde:

*k*: permeabilidad (D)

*μ*: viscosidad dinámica del líquido saturado (cP)

*Q*: caudal del líquido (cm<sup>3</sup>/s)

*L*: longitud de la probeta cilíndrica (cm)

*A*: superficie de la sección transversal del cilindro (cm<sup>2</sup>)

*ΔP*: gradiente de presión en el interior del cilindro (atm)

### **Principios básicos: permeámetro de nitrógeno**

En este caso el permeámetro determina la permeabilidad de un gas (nitrógeno) a través de un medio poroso, por lo que las condiciones de la ecuación de Darcy cambian ligeramente: el gas fluye de extremo a extremo del espécimen, su presión disminuye, el gas se expande y su velocidad aumentará. El permeámetro utiliza la ecuación de Darcy para el flujo laminar horizontal ideal de gas bajo condiciones isotérmicas de estado estacionario, para cual la ecuación se expresa de la siguiente manera (Suárez, 2014):

$$k_g = \frac{2\mu_g \cdot ZT \cdot Q_g \cdot L \cdot P_{atm}}{A \cdot T \cdot (P_1^2 - P_2^2)} \quad (14)$$

Donde:

*k<sub>g</sub>*: permeabilidad al N<sub>2</sub> a una *p<sub>m</sub>* determinada (D)

*μ<sub>g</sub>*: viscosidad del g (cP)

$Z$ : factor de compresibilidad de  $N_2$  promedio (/)

$T$ : temperatura media de  $N_2$  que fluye (K)

$Q_g$ : caudal de  $g$  atmosférico en  $p$  (cm/s)

$L$ : longitud de la probeta cilíndrica (cm)

$p_{atm}$ : presión atmosférica o barométrica (atm)

$A$ : superficie de la sección transversal del cilindro (cm<sup>2</sup>)

$P_1^2 - P_2^2$ : gradiente de presión en el interior del cilindro (atm)

$T_g$ : temperatura base

Klinkenberg, (1941) examinó si la permeabilidad de un medio poroso medido con fluido daba los mismos valores cuando se medía con gas y descubrió que la permeabilidad medida a "baja presión" (condiciones de laboratorio) daba mayor permeabilidad que las mediciones con líquidos. También descubrió que la permeabilidad al gas es proporcional a  $1 / P_m$ , y que la diferencia entre las mediciones de gas y líquido aumenta al disminuir la permeabilidad.

Esto ocurre porque no se han cumplido las condiciones de la ley de Darcy, es decir: el fluido es compresible y tiene una velocidad medible en las paredes de los poros (los flujos viscosos tienen una velocidad cero en las paredes de los poros) (Klinkenberg, 1941). El flujo de gas en los poros es más rápido que el flujo de líquido ya que los líquidos experimentan una mayor resistencia al flujo, o arrastre, que los gases en los poros, a este efecto se le conoce como velocidad de deslizamiento o deslizamiento de gas. Este fenómeno de velocidad de deslizamiento se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$b = \frac{4K_a \cdot \lambda_m \cdot P_m}{r_k} \quad (15)$$

El efecto de deslizamiento del gas en rocas de baja permeabilidad a bajas presiones medias, se pueden corregir utilizando la ecuación de Klinkenberg estándar (Klinkenberg, 1941; Nolen-Hoeksema, 2014).

$$k_g = k_L \cdot \left(1 + \frac{b}{P_m}\right) \quad (16)$$

Para conocer la permeabilidad al líquido consiste en extrapolar las mediciones de presión media infinita del gas y el punto de intersección al eje de permeabilidad al gas, corresponde a la permeabilidad al líquido (Figura 22) (punto en el cual se asume que el gas se comporta como líquido). El punto de intersección se puede encontrar con la siguiente ecuación:

$$k_L = \frac{k_g}{\left(1 + \frac{b}{P_m}\right)} \quad (17)$$

Donde:

$k_g$ : permeabilidad al gas (D)

$k$ : permeabilidad al líquido (D)

$b$ : factor de corrección de velocidad de deslizamiento (Atm)

$P_m$ : presión media del núcleo (Atm)

$k$ : constante 1

$\lambda_m$ : largo medio de la molécula (m)

$r_k$ : radio de poro (m)

Para poder obtener tal punto de intersección, el equipo cuenta con opciones mediante las cuales se puede obtener el valor de la permeabilidad, las cuales se mencionan a continuación:

- Automático: permite obtener el valor de permeabilidad al gas del espécimen. En esta función el software controla las condiciones de la prueba. Esta prueba podría ser la base (punto de control) para la implementación de pruebas futuras (pruebas de cinco puntos).
- Flujo establecido: permite obtener valores de permeabilidad con base en el control manual de las condiciones.

*Nota: el diferencial de presión (DP) debe ser mayor a 0.5 psi y dependerá del flujo que se le introduzca en la muestra*

- Prueba de 5 puntos con base en flujo establecido: permite obtener el valor de la permeabilidad al gas y al líquido. Al igual que en el punto anterior esta prueba permite obtener valores de permeabilidad con base en el control manual de las condiciones. La permeabilidad del gas será obtenida en cinco diferentes diferenciales de presiones. La permeabilidad del líquido estará representada por la ecuación empírica (de los cinco puntos) cuando el diferencial de presión sea igual a cero (Figura 22).

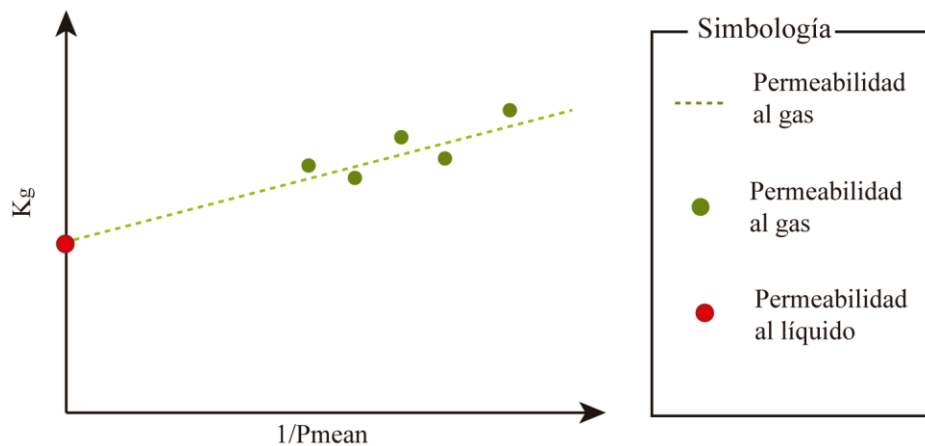


Figura 22. Relación de la permeabilidad por intrusión de gas con respecto al diferencial de presiones. La línea verde representa la línea de tendencia de los cinco puntos de permeabilidad, mientras que el punto rojo representa la permeabilidad al líquido cuando la presión es igual a cero (ver Suárez, 2014).

En especímenes muy porosos las condiciones establecidas por la Ley de Darcy (Flujo laminar) muchas veces no se cumplen. En estos casos se tendrá que recurrir a las pruebas manuales, específicamente a las pruebas tipo *backward*. Esta prueba condiciona el diferencial de presión (se tendrá una presión de entrada y otra de salida) por medio de una válvula. La finalidad es controlar el diferencial de presión y establecer las condiciones de flujo de la forma más conveniente para el tipo de roca. Se propone que se establezca un rango de permeabilidad controlado por las siguientes condiciones:

- Establecer cuatro pruebas de cinco puntos. La primera con un diferencial de presión mínimo, el cuál es controlado por el flujo que va del mínimo al máximo y apertura de la válvula que va de la máxima a la mínima (está varía de 15 a 0). La segunda prueba

con un diferencial de presión máxima y la tercera con un diferencial intermedio, ambas siguiendo las mismas reglas para el control del flujo y la válvula. Por último, la cuarta prueba, con una variación en el diferencial de presión, que se distribuye del mínimo al máximo obtenidos en las tres pruebas anteriores, controlando únicamente el flujo, ya que la válvula se mantiene completamente abierta. En la Tabla y en la Figura 23 se presentan ejemplos de esta técnica utilizada en un espécimen de este estudio.

Tabla 2. Ejemplo de manejo de diferencial de presión, flujo y apertura de válvula durante la prueba de permeabilidad en la prueba de cinco puntos.

<b>Espécimen</b>	<b>Diferencial de presión (psi)</b>	<b>Flujo (ccn/min)</b>	<b>Apertura de válvula</b>
<b>CH01-01PH01</b>	0.5	345	14.73
		400	14.2
		480	13.6
		550	13.1
		600	12.9
	1.13	400	14.72
		450	14.1
		485	13.8
		530	13.45
		580	13.15
	0.79	190	14.73
		250	13.07
		330	12.2
		410	11.7
		500	11.1
	0.5	110	14.73
	0.8	210	
	1.08	330	
	1.2	450	
	1.4	600	

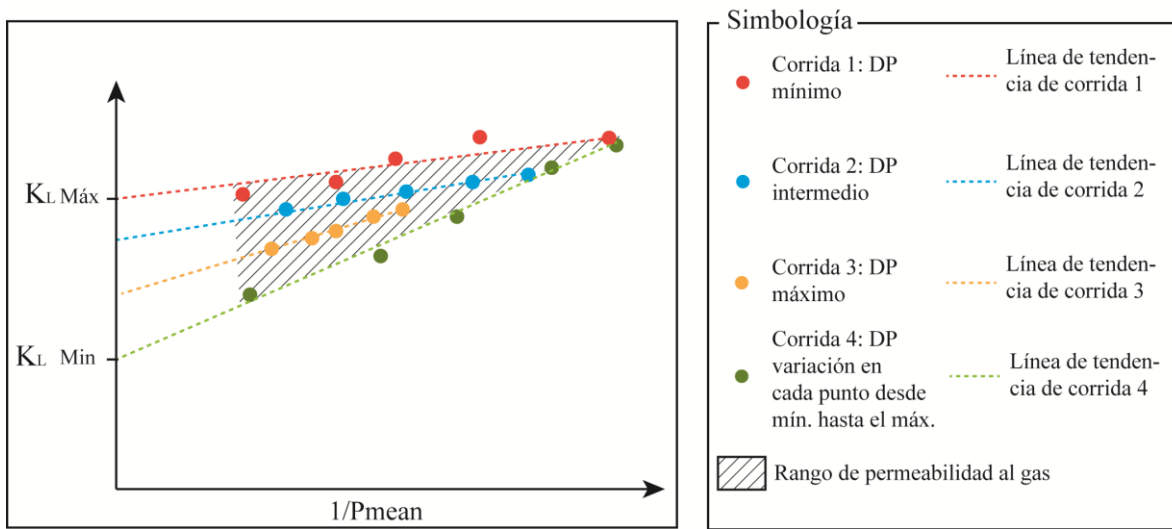


Figura 23. Los círculos representan la relación del diferencial de presión con respecto a los valores de permeabilidad del gas de cada prueba. Hay que recordar que la ecuación lineal de los cinco puntos cuando el diferencial de presiones es igual a cero representa la permeabilidad del flujo de agua.

### Procedimiento técnico

Esta prueba se realizó por medio de un permeámetro marca *Floxlab*, modelo *Steady-State gas permeameter system*.

1. *Encendido del equipo*: se divide en tres pasos fundamentales, se prende la computadora y se abre el software con el que trabaja el equipo; se abre la válvula del tanque de nitrógeno, la válvula de encendido y después la válvula de presión; por último, se hace una corrección de la celda respecto la presión atmosférica y se introducen los siguientes datos del espécimen: peso, altura, diámetro y etiqueta.
1. *Colocación del espécimen*: se coloca el espécimen en el soporte del núcleo. Una vez introducido el espécimen dentro de la celda, se ajusta con un par de pedestales: 1) el pedestal superior es el que introduce el flujo al espécimen y mide la presión de entrada, mientras que 2) el pedestal inferior es el que recibe el flujo y mide la presión de salida (Figura 24e). Cabe mencionar que la diferencia de presiones deberá respetar



las condiciones establecidas por la ley de Darcy para un flujo laminar. Y se aplicó la presión de confinamiento máxima de 150 psi para mantener la muestra en su lugar.

2. *Manipulación del equipo antes de iniciar la prueba:* se agregan los datos del espécimen al software: nombre, dimensiones (diámetro y altura), y el tipo de prueba para esta prueba fue los cinco puntos en *backward*, esto permite obtener el valor de permeabilidad cinco veces a diferentes cantidades de flujo.
3. *Inicio de la prueba:* se inicia la prueba aplicando un flujo de gas suficiente para que la presión sobre la roca aumente a tal punto que la diferencia entre la presión de entrada y la presión de salida (DP) sea de mínimo 0.5 psi. El flujo aumenta de acuerdo a los valores que introduce el operador del software, ya que la presión depende del flujo de gas que deje pasar la muestra a través del espécimen. Cuando se tiene la presión mínima ya mencionada, se da la orden al equipo para calcular un primer valor de la permeabilidad. Automáticamente el equipo cambió a la siguiente prueba, siendo el operador el que controló la cantidad de flujo de entrada, el cual va en aumento y se correlaciona con la presión que se ejerce sobre el espécimen en cada prueba, llegando hasta 600 Ncc/min de flujo en la prueba cinco.
4. *Adquisición y manipulación de los resultados:* los resultados se recolectan de manera automática en formato *xlsx* para su manipulación y visualización gráfica.

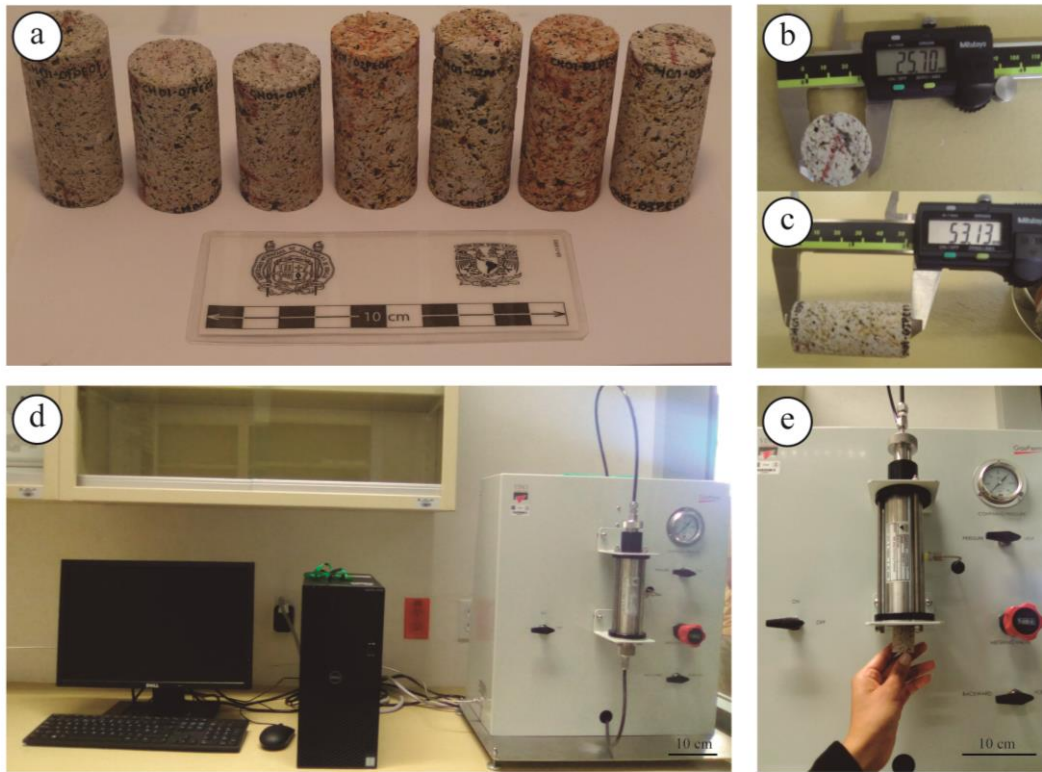


Figura 24. a) especímenes sometidos a permeabilidad de nitrógeno (alta pureza, 99.99 %). b) mediciones del diámetro de los especímenes. c) mediciones de la longitud de los especímenes. d) equipo de permeabilidad. A la izquierda de la imagen se encuentra la computadora en donde se encuentra instalado el software del permeámetro (GasPerm), del lado derecho se encuentra el permeámetro de nitrógeno. e) se muestra la celda en la que se introduce el espécimen.

### 3.4.2 Absorción por inmersión en agua a presión atmosférica

Esta prueba se realizó de acuerdo la norma europea UNE-EN 13755:2002. Esta prueba permite cuantificar el comportamiento del material de los especímenes, cuando se sumergen totalmente en agua a presión atmosférica, analizando la cantidad de agua que absorbe a periodos de tiempos determinados. Esta absorción se calcula en porcentaje con la siguiente expresión:

$$A_b = \left( \frac{m_s - m_d}{m_d} \right) \times 100 \quad (18)$$

Donde

$A_b$ : absorción del agua

$m_s$ : masa del espécimen saturado (g)

$m_d$ : masa de la probeta seca (g)

$m_i$ : masas sucesivas de la probeta durante la prueba (g)

Los resultados se representan en una gráfica en la que se relaciona linealmente la masa absorbida (g) en un determinado tiempo ( $\sqrt{h}$ ). Los cambios de pendiente de la gráfica representan los coeficientes de absorción (cambios de ganancia de masa respecto al tiempo), los cuales son útiles para relacionar o identificar diferentes tamaños de poros de manera muy general. La primera pendiente se relaciona con los poros de mayor de tamaño en un corto tiempo de inmersión y la segunda pendiente con los poros de menor tamaño en un tiempo mayor (Figura 25) (Fort, 1996; Siegesmund & Snethlage, 2011) .

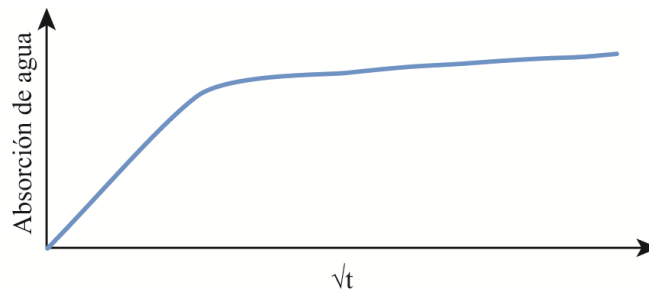


Figura 25. En la gráfica se puede identificar un cambio en la pendiente. La primera pendiente está relacionada principalmente con macro poros ( $>100 \mu\text{m}$ ), y la segunda pendiente, la cual es menos prolongada que la primera, se relaciona con los meso y micro poros ( $<100 \mu\text{m}$ ).

### Procedimiento técnico

1. *Colocación de especímenes*: se colocan los especímenes en un recipiente con una distancia de al menos 15 mm entre cada una.
2. *Inicio de la prueba*: el procedimiento se establece de acuerdo a lo que se especifica la norma. Una vez colocados los especímenes en un recipiente a la separación indicada, se agregó agua dentro del recipiente hasta cubrir la mitad de los especímenes y se dejó con esa cantidad de agua durante  $60 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$ . Después de ese tiempo, se volvió a añadir agua dentro del recipiente, hasta cubrir tres cuartas

partes de la altura de los especímenes, y se volvió a dejar esa cantidad de agua durante  $60 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$ . Por último, se añadió más agua dentro del recipiente hasta dejar completamente sumergidos bajo una lámina de agua de  $25 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  los especímenes, y se dejó esa cantidad de agua durante  $48 \text{ horas} \pm 2 \text{ horas}$ . Se sacaron las probetas del agua, se secaron rápidamente con un trapo húmedo y se pesaron en una báscula marca Ohaus Scout con  $0.01 \text{ g}$  de precisión. Los especímenes se pesaron cada  $24 \pm 2 \text{ horas}$ , hasta que los especímenes saturados tengan una masa de al menos  $0.1\%$  de variación entre dos días seguidos o  $24 \text{ horas}$ .

3. *Adquisición y manipulación de resultados*: durante cada pesada de los especímenes se anotan los pesos correspondientes de cada espécimen, se registran de manera manual en formato xlsx para su manipulación y visualización gráfica.

### **3.4.3 Evaporación**

La *evaporación del agua* es un fenómeno que se asocia a la transformación de agua en estado líquido a estado de vapor y la facilidad con la que esta sale de la roca. Es importante caracterizar la evaporación ya que está estrechamente relacionada con la textura, distribución y tamaño de poros.

El estudio del proceso de evaporación en las rocas es complicado (se rompe la atracción entre las moléculas de agua y la superficie del sólido [cohesión]), básicamente porque depende de las condiciones del sitio en el que se desarrolle la prueba (temperatura, humedad). Si se quisiera normalizar o controlar las mediciones de la evaporación, se tendrían que establecer condiciones estables.

La implementación de la prueba de evaporación sugiere se divida en las siguientes dos fases (Fort, 1996):

1. *Tiempo crítico de secado*: en esta fase la pérdida de masa por evaporación se relaciona con la pérdida del agua contenida en los poros de mayor diámetro ( $>10 \mu\text{m}$ ). La evaporación es constante y rápida (en nuestras muestras se representan en la primera en las primeras 48 horas), y tiene lugar en la superficie de los especímenes. Se

presenta un movimiento de agua líquida de la zona interna hacia la externa a través el sistema poroso (Figura 26).

2. En esta segunda fase la movilidad del agua ya no es en estado líquido sino en estado gaseoso, en el cual la velocidad de secado es más lenta, ya que el proceso de evaporación se realiza en el interior y no en la superficie de los especímenes. Esta segunda fase está relacionada con los poros de menor tamaño (<10  $\mu\text{m}$ ), ya que se necesita una mayor succión para que la molécula del agua se evapore al exterior en forma de gas (Figura 26).

La evolución de la pérdida de masa por el proceso de evaporación se visualiza gráficamente con base en la relación de disminución de masa con la raíz del tiempo. El punto de inflexión de la gráfica representa la separación entre las dos fases de evaporación (contenido de agua crítico y tiempo crítico de secado). La relación que se usa para construir la gráfica es la siguiente:

$$E_r: \left( \frac{m_i - m_s}{m_t - m_d} \right) * 100 \quad (19)$$

Donde:

$E_r$ : evaporación relativa (%)

$m_i$ : masas sucesivas del espécimen durante la prueba (g)

$m_s$ : masa del espécimen saturado (g)

$m_d$ : masa del espécimen seco (g)

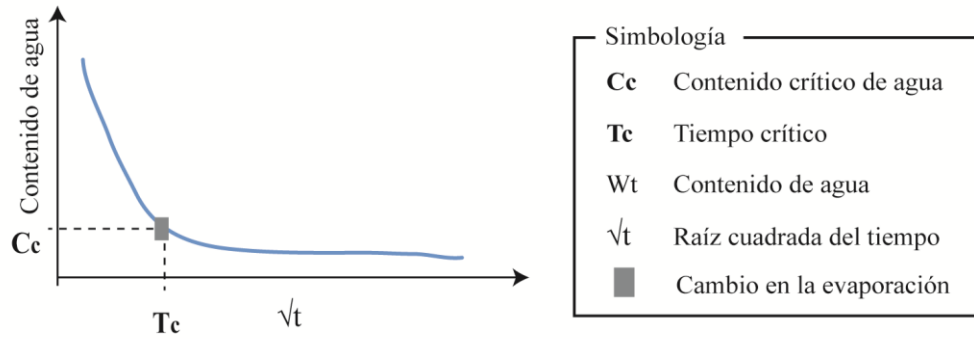


Figura 26. Gráfica representativa de evaporación: antes del cambio de evaporación se considera como la fase de evaporación lenta y después del cambio de evaporación se considera fase de evaporación lenta.

### Procedimiento técnico

Esta prueba se realizó de acuerdo al procedimiento técnico de la Unidad de Petrofísica, para determinar la evaporación del agua en los especímenes de roca en estudio.

1. *Inició y colocación de los especímenes:* después de saturar los especímenes mediante la prueba de absorción por inmersión de agua a presión atmosférica (apartado 3.3.2), se vacía el agua del recipiente y rápidamente se pesaron los especímenes. Y se colocan los especímenes a una distancia mínima de 15 mm entre cada uno (Figura 27b).
2. *Pesado de los especímenes durante la prueba:* los especímenes se pesan en los siguientes intervalos de tiempo: 0, 3, 5, 8, 12, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 240, 330, 480, 1440, 1920 y 2880 minutos.
4. *Adquisición y manipulación de los resultados:* durante cada pesada de los especímenes, se anotan los pesos correspondientes de cada espécimen, se registran de manera manual en formato xlsx para su manipulación y visualización gráfica.

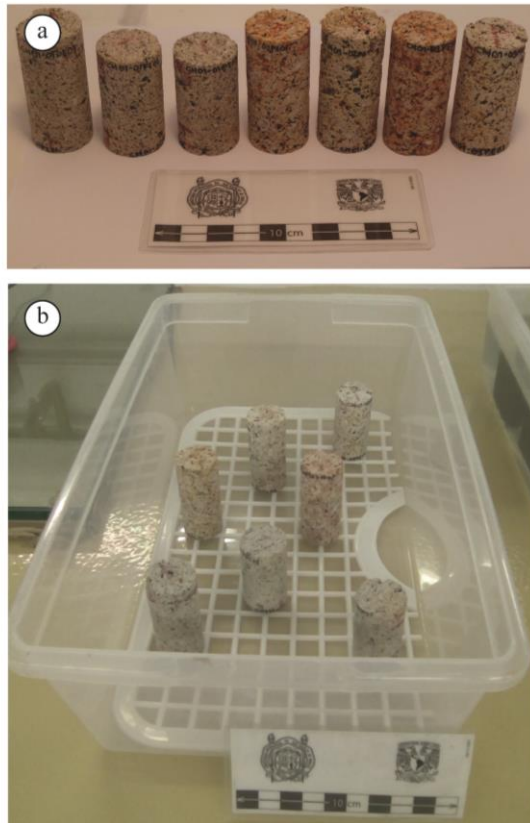


Figura 27. a) especímenes que se utilizaron en la prueba. b) evaporación de los especímenes a las 24 horas.

### 3.4.4 Capilaridad

La *capilaridad* ( $C$ ) o *imbibición capilar*, es una propiedad de los líquidos que moja ( $\theta < 90^\circ$ ), en contacto con un tubo capilar de radio “ $r$ ”, tiende a ascender a través de él por la tensión superficial líquido-gas, debido a la succión que se genera por la diferencia de presión dentro y fuera del líquido ( $\Delta p$ ), definida por la ecuación de Laplace (Benavente, 2006):

$$\Delta p = \frac{4\sigma \cos\theta}{r} \quad (10)$$

Donde:

$$\begin{aligned}\Delta p &= \text{diferencia de presión (atm)} \\ \sigma &= \text{tensión superficial del liquido (N/m)} \\ \theta &= \text{ángulo de contacto líquido – sólido}\end{aligned}$$

Esta diferencia de presión tiende a subir hasta alcanzar el equilibrio hidrostático, es decir, cuando el peso por unidad de área del capilar es igual a la presión capilar ( $\Delta p = \rho gr$ ), por lo que la altura de ascenso del agua en un capilar de radio “ $r$ ” se obtiene con la siguiente ecuación (ecuación de Jurin) (Fort, 1998; Benavente, 2006):

$$h = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho gr} \quad (11)$$

Donde:

$$\begin{aligned}\sigma &= \text{tensión superficial del liquido (N/m)} \\ \theta &= \text{ángulo de contacto líquido – sólido} \\ \rho &= \text{densidad del fluido (kg/m}^3\text{)} \\ g &= \text{aceleración de la gravedad (m/s}^2\text{ )}\end{aligned}$$

El proceso de capilaridad está dado por la fuerza de absorción capilar, la cual depende mayormente del diámetro de poro y de la geometría del sistema de poros; la mayor absorción de agua la realizan los poros con radios de 0.1 a 1000  $\mu\text{m}$  ( Benavente, 2006; Siegesmund y Sneathlage, 2011) y gráficamente se relaciona con la primera pendiente de la curva de acuerdo a la norma, por lo que la parte más recta de la gráfica se relaciona con los poros con diámetro (Figura 27).



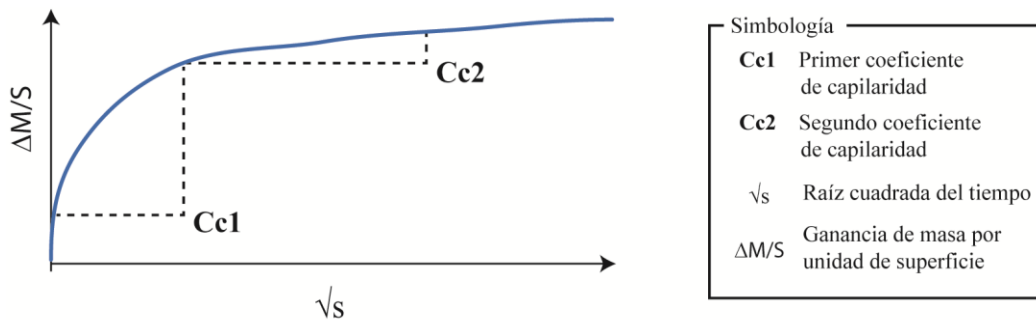


Figura 28. Gráfica representativa de capilaridad, en la que se indica Cc1 para la primera pendiente de la curva y Cc2 para la segunda pendiente de la curva de absorción por capilaridad.

### Método: determinación de coeficiente de absorción de agua por capilaridad

Este coeficiente se determinó con base a la norma europea UNE-EN 1925:1999. La absorción de agua en la roca por capilaridad se cuantifica con el coeficiente de absorción capilar. Este coeficiente representa la velocidad de absorción del agua, es decir la cantidad de agua capilar que absorbe un material, es directamente proporcional al coeficiente de capilaridad (C) y la raíz cuadrada del tiempo ( $\sqrt{s}$ ).

Para obtener el coeficiente de capilaridad primero se calcula la superficie (S) de la base en contacto con el agua, utilizando la siguiente ecuación:

$$S = \pi \cdot r^2 \quad (22)$$

Donde:

$$r^2 = \text{radio al cuadrado (cm}^2\text{)}$$

Posteriormente se obtiene la ganancia de masa por unidad de superficie en función del tiempo ( $\Delta M/S$ ), utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta M/S = \frac{m_i - m_d}{S} \quad (23)$$

Donde:

$m_i$ : masa del espécimen en función del tiempo (gr)

$m_d$ : masa del espécimen seco (gr)

Y por último se obtiene el coeficiente de absorción capilar (C) con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{\Delta M/S}{\sqrt{t}} \quad (24)$$

Donde:

$\Delta M/S$ : ganancia de masa por unidad de superficie (gr)

$\sqrt{t}$ : raíz cuadrada del tiempo (segundos)

#### **Procedimiento técnico:**

1. *Colocación de los especímenes*: se colocan los especímenes en un recipiente con una distancia de al menos 2 cm entre cada una.
2. *Inicio de la prueba*: Se agrega agua hasta cubrir los especímenes  $3 \pm 1$  mm de agua (Figura 29d y e). Rápidamente se pone un cronómetro para contar el tiempo a partir de que se agregó el agua al recipiente con los especímenes. El nivel de agua mencionado anteriormente se mantiene a lo largo de la prueba, y se añade agua cada que sea necesario.
3. *Pesado de los especímenes*: cada cierto intervalo de tiempo se saca el espécimen, se seca ligeramente de la parte sumergida para retirar los excesos de agua y se pesa en una báscula marca Ohaus Scout con 0.01 g de precisión. Después de pesar se vuelve a colocar cada espécimen en el recipiente con agua, hasta cumplir con cada uno de los intervalos que se mencionaran a continuación: 3, 5, 8, 12, 16, 20, 25, 30, 35, 50, 60, 90, 990 minutos.
5. *Adquisición y manipulación de los resultados*: durante cada pesada de los especímenes se anotaron los pesos correspondientes de cada espécimen, se registraron de manera manual en formato .xlsx para su manipulación y visualización gráfica.

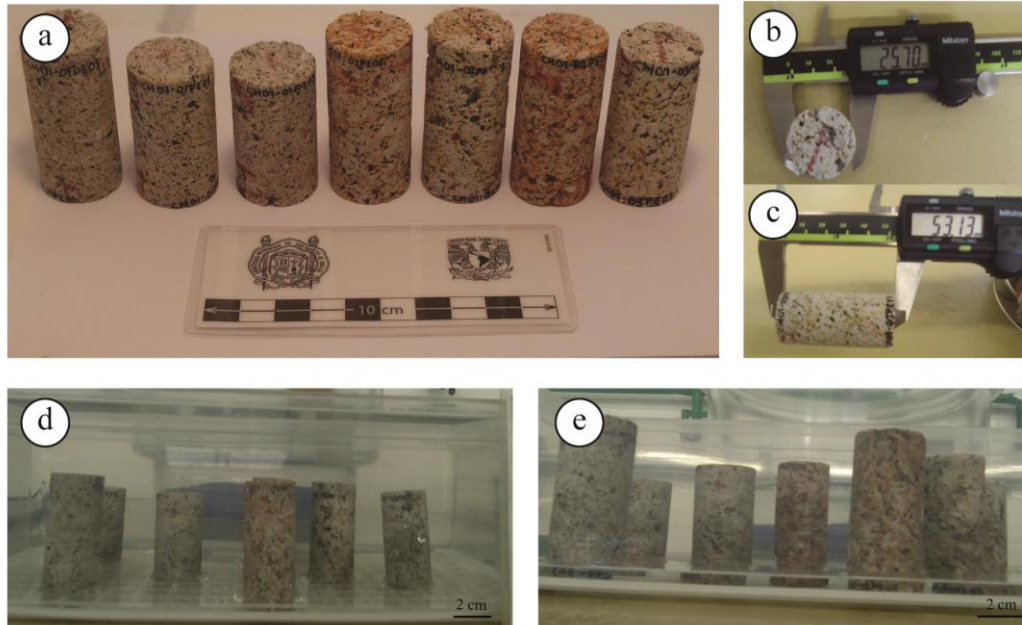


Figura 29. a) especímenes que se utilizaron en el ensayo. b) y c) medición de diámetro y altura. d) y e) inicio del ensayo con 3 mm de agua de la altura de los especímenes.

### 3.5 Propiedades mecánicas

El comportamiento mecánico de las rocas está dado por su resistencia y deformación. La resistencia se define como el esfuerzo (fuerza que actúa sobre un área) que soporta una roca para determinadas deformaciones (Vallejo, 2002). A su vez, la deformación es el resultado de aplicar esfuerzos a un material, el cual cambia su forma como respuesta a la aplicación de fuerzas. En general, las propiedades mecánicas y su evolución dependen en gran medida de las características físicas de los materiales.

Bibliográficamente se ha resaltado la estrecha relación que hay entre la porosidad con la resistencia debido a que se puede observar que la distribución y el tamaño de poros condicionan la relación esfuerzo-deformación de una roca, y a la relación entre el sistema poroso con el modo de fracturamiento debido a que una orientación de la porosidad produce una orientación de fracturamiento similar. En este sentido, el diseño de las pruebas mecánicas depende de algunos factores internos como las propiedades físicas de la roca y otros externos como el estado de esfuerzo del sitio donde proviene la roca que depende directamente de las

condiciones tectónicas que incidan en el lugar. La resistencia, según las condiciones geológicas, se puede evaluar con base en la implementación de una serie de pruebas mecánicas.

La evaluación de la resistencia cuando la roca no está sometida a esfuerzos de confinamiento se puede realizar mediante la prueba de carga puntual y prueba de compresión simple. A diferencia de la carga puntual, la resistencia a compresión simple permite conocer el valor de resistencia de las rocas al momento de ruptura de estas. A diferencia de la anterior, la carga puntual permite estimar el valor a resistencia compresión simple por medio de un índice de resistencia a compresión simple, el cual sirve como aproximación para comenzar a implementar pruebas de compresión simple. Por otro lado, si se quiere evaluar el estado de esfuerzos de la roca en profundidad, se tendrán que diseñar una serie de pruebas a compresión en tres direcciones, donde los esfuerzos de confinamiento ( $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ) van a depender de la posición de las características geométricas y espaciales de la secuencia estratigráfica, así como de la posición del manto freático (en caso de haberlo).

### **3.5.1 Prueba de carga puntual y carga puntual modificada**

La prueba de carga puntual se realizó de acuerdo a la norma ASTM D5731-05, la cual permite estimar un índice de resistencia a la compresión uniaxial (Broch y Franklin, 1972; Navarrete et al., 2013) con el uso de ecuaciones empíricas que proporcionan un índice. Una de las principales ventajas de la prueba es que los especímenes pueden ser irregulares siempre y cuando las dimensiones se mantengan dentro de los límites prescritos (ASTM D5731-05) y se realice una corrección por el tamaño (Broch y Franklin, 1972). La prueba se realizó de acuerdo a la norma ASTM D5731-05, la cual se utiliza para obtener la resistencia a la carga puntual no corregida ( $I_s$ ) y corregida ( $I_{50}$ ). Para obtener  $I_s$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_s = \frac{P}{D_e} \quad (25)$$

Donde:

$I_s$ : Índice de resistencia a carga puntual sin corregir (MPa)

$P$ : carga a la que fallo la roca (kN)

$D_e$ : diámetro equivalente (mm)

Debido a que la prueba brinda una estimación al valor de la compresión simple, a la ecuación anterior se le hace una corrección, de tal forma de aproximar el valor  $I_s$  que se obtendría de una muestra de 50 mm. Para esta corrección se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (26)$$

$$I_{S50} = F \cdot I_s \quad (27)$$

Donde:

$I_{S50}$ : índice de resistencia a carga puntual corregida (MPa)

$F$ : factor de corrección (AD)

$I_s$ : índice de resistencia a carga puntual sin corregir (MPa )

*Nota:* La estimación y evaluación de la resistencia de rocas muy porosas o muy suaves, básicamente porque los punzones del sistema podrían clavarse dentro de la roca. En particular, las rocas piroclásticas (p. ej. pómez) suelen presentar valores  $I_s$  muy alejados de los valores reales de compresión simple, por lo que Kahraman, propone la ecuación para obtener un valor de compresión simple de rocas piroclásticas en condiciones secas:

$$UCS = 2.68^{0.931} \cdot I_{S50} \quad (28)$$

Donde:

*UCS: resistencia a compresión uniaxial (MPa)*

*Is<sub>50</sub>: índice de resistencia a carga puntual corregida (MPa)*

### **Procedimiento técnico**

1. *Selección de especímenes:* se eligen los fragmentos de roca con dimensiones adecuadas (relación del espesor (W) y el diámetro (D) mayor de 1).
2. *Colocación de especímenes:* cada fragmento de roca se coloca de manera individual entre los dos punzones de la máquina, de tal forma que se pueda establecer contacto a lo largo de su diámetro (D) (Figura 30a). La distancia (W) entre los puntos y el extremo libre más cercano debe ser al menos 0.5 D.
3. *Manipulación del equipo:* el quipo trabaja con dos medidores de carga que registran la falla el espécimen (Figura 30b), el primero registra la carga en N y el segundo en kN. Después de introducir la roca entre los punzones, se incrementa la carga de forma constante hasta producir la falla o rotura en un intervalo 10 a 60 segundos. Por último, se registró la carga (P) de ruptura de ambos medidores (N y kN).
4. *Adquisición y manipulación de los datos:* El registro de las características de cada prueba (número de muestra, dimensiones, presión en N y presión en kN) tendrá que venir acompañado de una tabla en xlsx para su manipulación y visualización gráfica.

*Nota:* Los fragmentos de roca no cumple la relación de espesor y diámetro, sin embargo, los datos obtenidos fueron de gran utilidad en la implementación de la prueba de compresión simple.

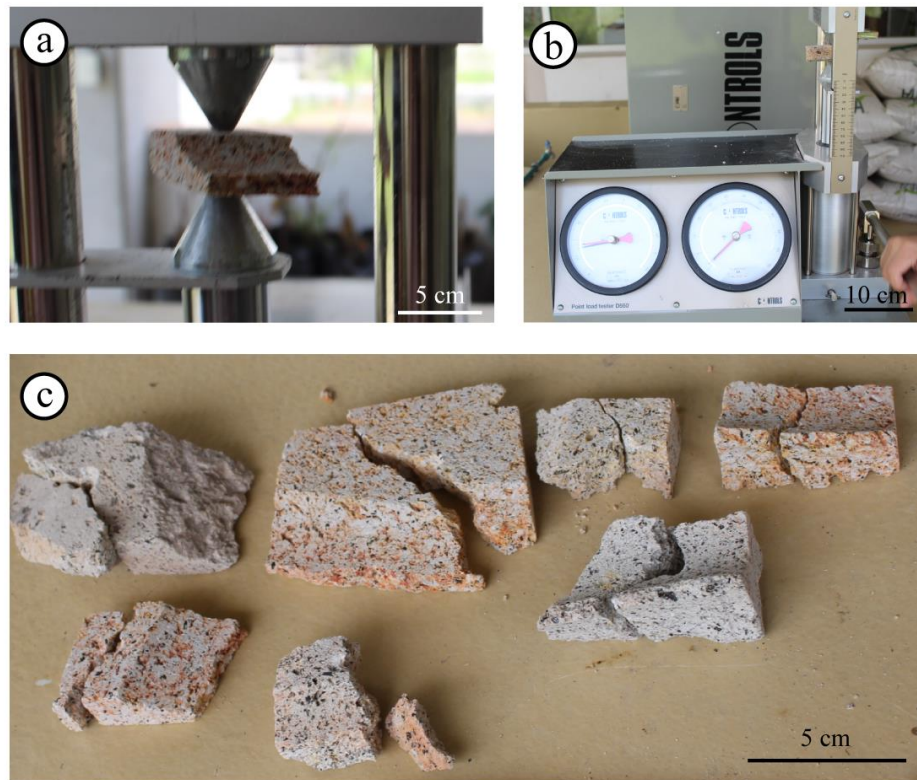


Figura 30. a) punzones en contacto con el fragmento de roca, antes de iniciar el ensayo. b) equipo utilizado en el ensayo. El manómetro de la izquierda marca los N, mientras que el manómetro de la derecha marca los kN c) algunos de los fragmentos de rocas, después de ser fallados.

### Prueba de carga puntual modificada

La prueba de carga puntual modificada se realizó con la finalidad de evaluar el modo de fracturamiento que depende de la distribución y tamaño de los elementos (p. ej. minerales y poros). Se basa en aplicar una fuerza sobre el espécimen que se apoya en una superficie cóncava. La finalidad es hacer fracturar el espécimen para poder apreciar el tipo de fractura en la roca ensayada. El procedimiento técnico se describe a continuación:

### Procedimiento técnico

1. *Selección de especímenes:* se midieron los diámetros (D) y espesores (W) de los especímenes utilizados. Estos fueron 8 discos con un diámetro de 1".



2. *Colocación de especímenes*: se coloca cada espécimen entre el punzón de la parte superior y la base cóncava de la parte inferior de tal forma que se establezca contacto a lo largo del diámetro de la roca (D) (Figura 31b, c y d).
3. *Manipulación del equipo*: La carga se incrementa de forma constante hasta producir la falla o rotura entre los 10 y 60 segundos.
5. *Adquisición y manipulación de los resultados*: El registro de las características de cada prueba (número de muestra, dimensiones, fuerza en N y fuerza en kN) tendrá que venir acompañado de una tabla en xlsx para su manipulación y visualización gráfica. Además, se tendrá que llevar un registro fotográfico de todo el proceso, con la finalidad de hacer una descripción detallada del modo de fractura.

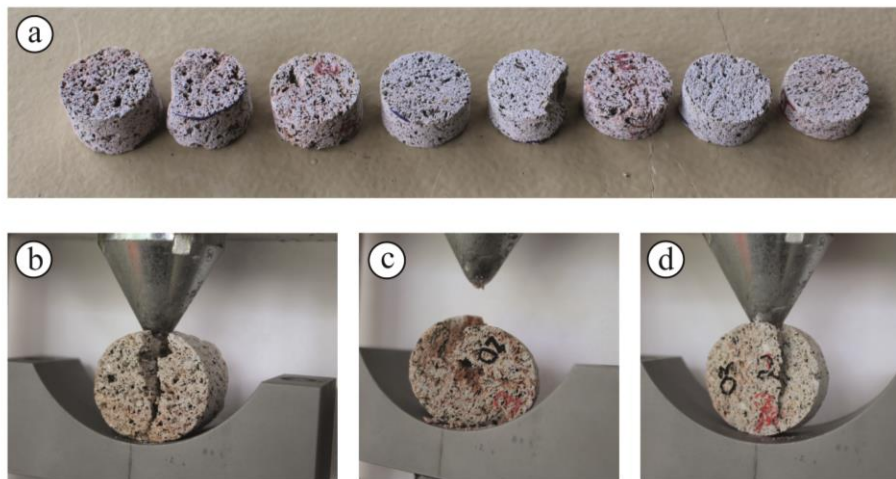


Figura 31. a) especímenes antes de ser sometidos a carga. b), c), d) especímenes con diferentes formas de fallas

### 3.5.2 Compresión simple

La compresión simple también se conoce como ensayo uniaxial, permite determinar la resistencia de la roca no confinada ( $\sigma_c$ ) al momento de la falla del espécimen. Las relaciones del esfuerzo vs deformación axial y la deformación transversal vs deformación axial permiten determinar constantes elásticas como son el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). El módulo de Young (E) se define por la relación lineal elástica entre el esfuerzo aplicado



y la deformación producida en la dirección de aplicación del esfuerzo, por su parte, el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) se define como la relación entre la deformación transversal y la deformación axial (ver Figura 32 y ASTM D7012-14). El valor de resistencia a compresión simple se calcula con la siguiente ecuación:

$$\sigma_u = \frac{P}{A} \quad (29)$$

Donde:

$\sigma_u =$  resistencia a compresión simple (MPa)

$P =$  carga de falla (kPa)

$A =$  área de sección transversal ( $\text{mm}^2$ )

Por otra parte, el coeficiente de Poisson se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones o gráficamente como se muestra en la Figura 32b (Vallejo, 2002; ASTM D7012-14).

Para obtener  $\varepsilon_a$ :

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L} \quad (30)$$

Donde:

$\varepsilon_a =$  deformación axial unitaria

$L =$  longitud axial original

$\Delta L =$  cambio de longitud axial

Para obtener  $\varepsilon_t$ :

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta D}{D} \quad (31)$$

Donde:

$\varepsilon_t$  = deformación lateral o transversal unitaria

$D$  = diametro original

$\Delta D$  = cambio de diámetro transversal

Finalmente, para obtener  $\nu$ , se utiliza la siguiente ecuación:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_t} \quad (32)$$

Donde:

$\nu$  = módulo de Poisson

$\varepsilon_a$  = deformación axial (mm)

$\varepsilon_t$  = deformación lateral (mm)

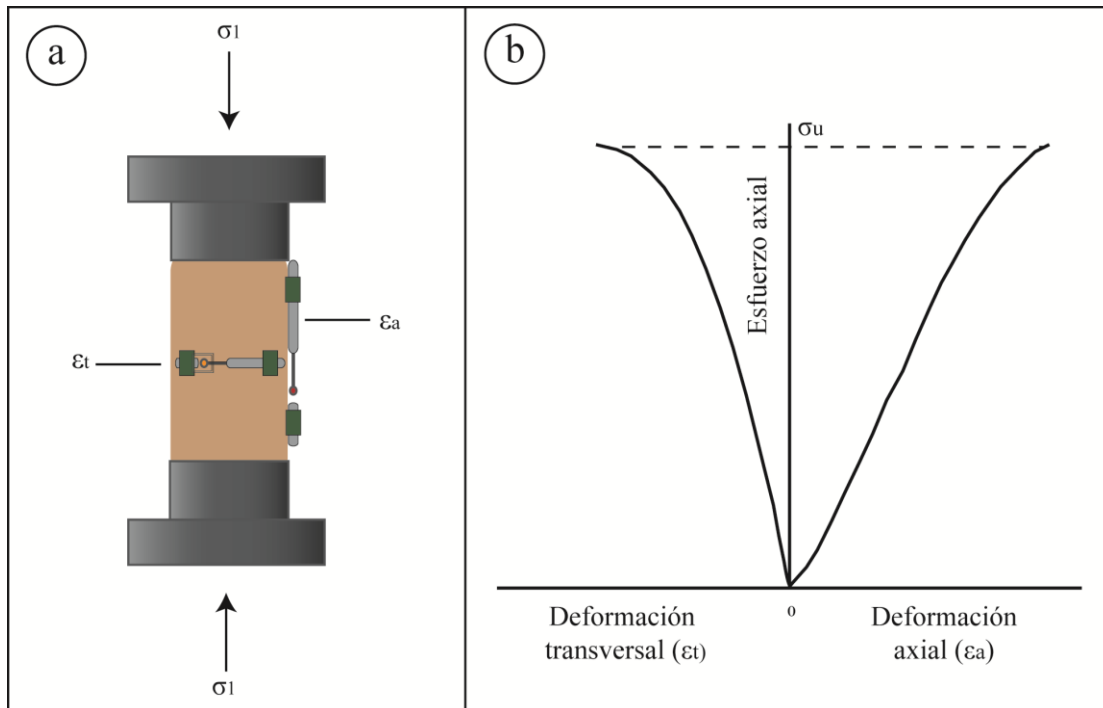


Figura 32. a) espécimen compuesto por una membrana en la que se le colocan los medidores de formación transversal y lateral (The GDS LVDT Local Strain Transducers). b) gráfica de esfuerzo axial contra deformación transversal y axial, para obtener el coeficiente de Poisson.

Por otra parte, el módulo de Young puede ser calculado a partir de diferentes métodos, uno de los más comunes y el que se utilizó en este trabajo es a partir del módulo de Young promedio, también conocido como medio, de la pendiente de la recta de la curva de esfuerzo –deformación, dividiendo el cambio de la tensión por el cambio de la deformación (ASTM D7012-14) (ecuación 31).

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_a} \quad (33)$$

Donde:

$E = \text{módulo de Young}$

$\Delta\sigma = \text{cambio del esfuerzo (MPa)}$

$\Delta\varepsilon_a = \text{cambio de la deformación axial (mm)}$

La ecuación anterior debe ser calculada a partir de los siguientes métodos:

- Módulo tangente ( $E_t$ ): se obtiene a un nivel determinado de carga, expresado en porcentaje de la resistencia, generalmente se toma 50 % (Figura 33a).
- Módulo promedio ( $E_{av}$ ): se obtiene a partir de la inclinación promedio de la parte recta de la curva esfuerzo-deformación. (Figura 33b).
- Módulo secante ( $E_s$ ): se obtiene midiendo desde el esfuerzo inicial hasta el último esfuerzo final que resistió la roca, tomando solo dos puntos (Figura 33c).

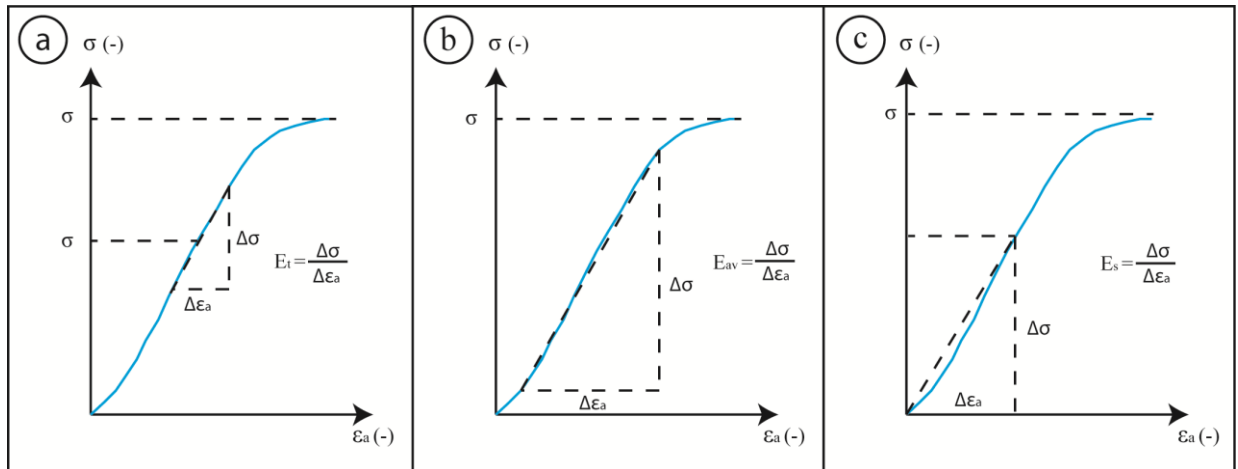


Figura 33. Diferentes métodos por los cuales se obtiene el módulo de Young. a) módulo tangente. b) módulo promedio. c) módulo secante.

### Procedimiento técnico

El ensayo se realizó con base en la norma ASTM D7012-14, por medio de la implementación del marco de compresión y prensa de carga *GDS* de rigidez virtual infinita y capacidad de carga de 250 kN. El procedimiento técnico sigue los siguientes pasos básicos:

1. *Colocación del espécimen:* al espécimen se le colocó una membrana impermeable (neopreno) la cual se adhirió a la superficie del espécimen, dicha membrana encamisa el espécimen y sirvió de base para colocar los medidores de deformación local sobre la muestra en posición axial y transversal. La membrana se ajustó al pedestal y al cabezal superior por medio de un anillo plástico (o 'ring) en la parte de contacto superior e inferior Figura 35c y d.
2. *Montura del espécimen sobre la prensa:* se coloca el marco de carga y espécimen dentro de la prensa de carga *GDS*. Después de montar el marco sobre la prensa, se conectan los cables de los sensores de desplazamiento.
3. *Manipulación del software GDSLab:* Se abre el programa de la prensa (*GDSLab*) y se revisa que todos los valores estén bajo el siguiente criterio: los valores de los sensores de deformación local tendrán que tener un valor cercano a  $0 \pm 2.5\text{mm}$ ,

mientras que los medidores de desplazamiento general de la celda de carga tendrán que tener un valor cercano a 0 kPa.

4. *Establecimiento de precarga del espécimen:* se aseguró el contacto del pistón de carga con el cabezal superior (este a su vez está en contacto directo con el espécimen), cuando la lectura de carga en el software registro un valor cercano a 0.05 kPa.
5. *Inicio de la prueba:* Se inicia la prueba estableciendo un valor del esfuerzo normal máximo ( $\sigma_1=q$ ) en un determinado tiempo (se selecciona con base en las características del material y con lo que se establece en las normas) y se lleva a la falla del espécimen.
6. *Adquisición y manipulación de los resultados:* los resultados se recolectan de manera automática en formato xlsx para su manipulación y visualización gráfica.

### 3.5.3 Compresión triaxial

La comprensión triaxial representa condiciones de las rocas *in situ* sometidas a esfuerzos confinantes, mediante la aplicación de presión uniforme alrededor del espécimen. Los resultados de al menos tres ensayos permiten obtener la envolvente de resistencia de la roca, mediante una gráfica del estado de esfuerzos (Vallejo, 2002). El estado de esfuerzos de cada espécimen se grafica con base en el criterio de falla de Mohr-Coulomb, esta teoría sostiene que un material falla debido a una combinación de esfuerzo normal ( $\sigma$ ) y cortante ( $\tau_f$ ), por lo que la relación entre estos esfuerzos está dada por la siguiente ecuación (Vallejo, 2002; Das, 2013):

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (34)$$

Donde:

$\tau_f$  = esfuerzo cortante en el plano de falla (MPa)

$\sigma$  = esfuerzo normal en plano de falla (MPa)

$c$  = cohesión

$\phi$  = ángulo de fricción interna

La expresión anterior permite obtener el valor de cohesión ( $c$ ), el cual representa la fuerza de unión que existe entre las partículas minerales de una roca así como también permite determinar el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), el cual representa la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficie de contacto de las partículas de la roca. Los valores de estos dos parámetros se pueden obtenerse también de manera gráfica, marcando una línea recta tangente a por lo menos tres círculos (círculos de Mohr) (Sánchez, 2008). Después de definir la recta, su cohesión estará dada por la coordenada en donde la recta intersecta la ordenada y el ángulo de esa recta representará su ángulo de fricción interna (Figura 34b) (Sánchez, 2008; Das, 2013).

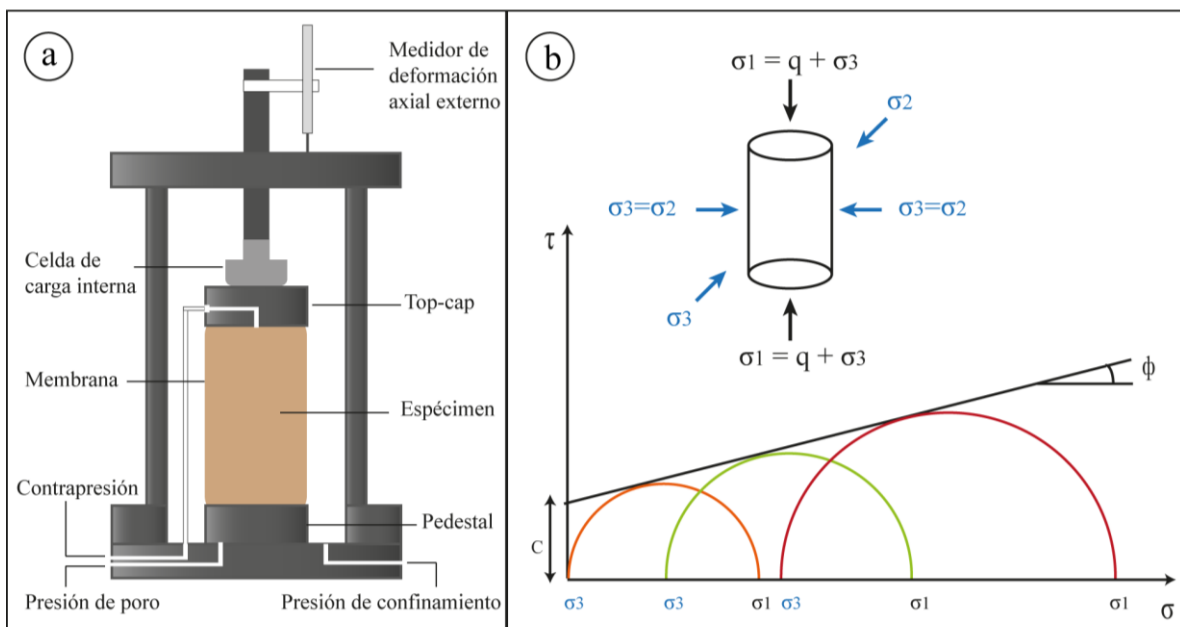


Figura 34. Elementos principales de las pruebas de compresión triaxial. a) elementos que componen la celda de carga. b) espécimen sometido a esfuerzos normales ( $\sigma_1$ ) y de confinamiento ( $\sigma_3$ ), también se ilustra la envolvente del círculo de Mohr-Coulomb en la que se muestra gráficamente cómo se obtiene la cohesión ( $C$ ) y el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ).

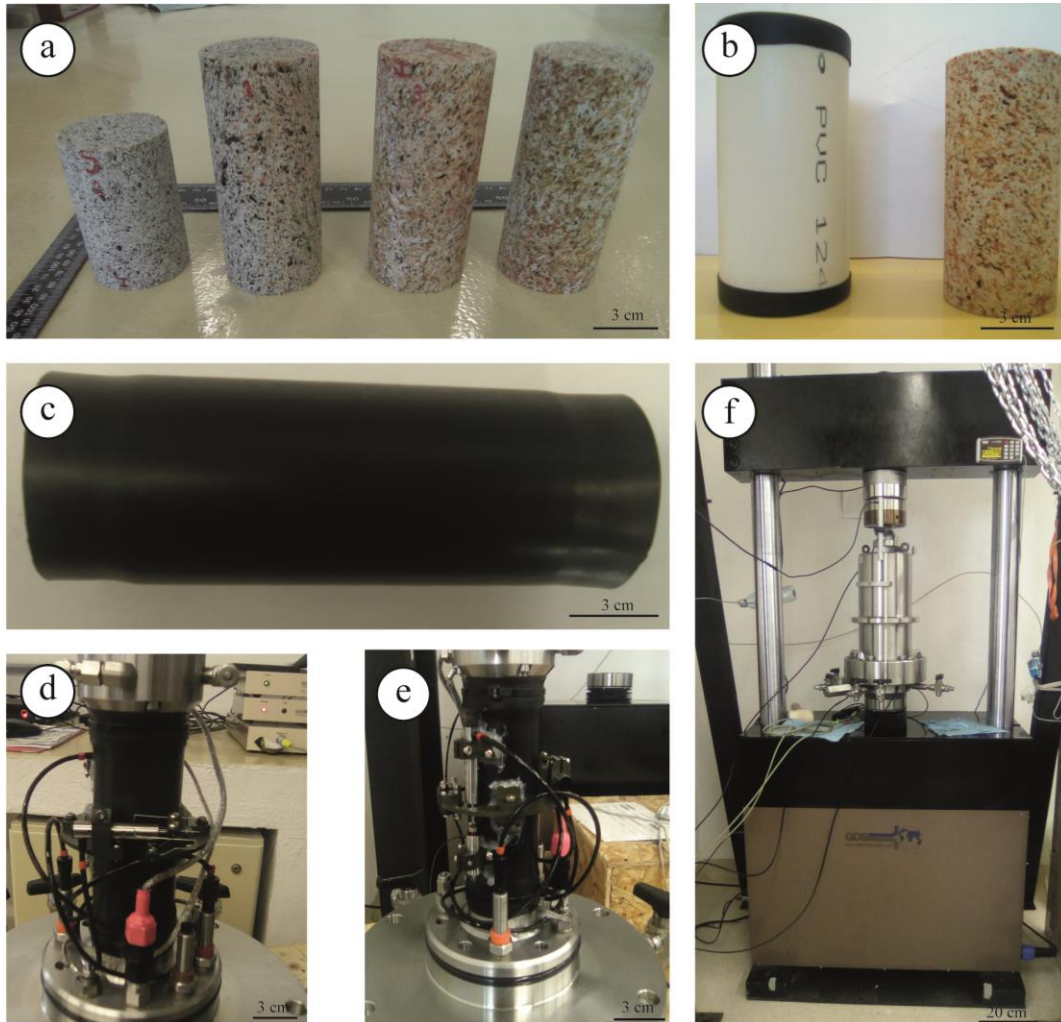
## Procedimiento técnico

El ensayo se realizó con base en la implementación de la celda de carga triaxial y prensa de carga *GDS* con base en la norma ASTM D7012-14, el procedimiento técnico se basa en los siguientes pasos básicos

1. *Colocación del espécimen*: al espécimen se le colocó una membrana impermeable (neopreno) la cual se adhirió a la superficie del espécimen, dicha membrana encamisó el espécimen y sirvió de base para colocar los medidores de deformación local sobre la muestra en posición axial y transversal. La membrana se ajustó al pedestal y al cabezal superior por medio de un anillo plástico (o *ring*) en la parte de contacto superior e inferior (Figura 35c y d).
2. *Montura del espécimen*: se coloca la celda de carga triaxial y espécimen dentro de la prensa o marco de carga *GDS*, cuidando que no se mueva el espécimen dentro de la celda. Después de montar el marco sobre la prensa, se conectan los cables de los sensores de desplazamiento, así como los medidores de transmisión de onda, tierra y válvula de confinamiento y presión de poro, en caso de ser necesario y de acuerdo a las condiciones que se requieren para cada tipo de prueba.
3. *Confinamiento del espécimen*: el confinamiento del espécimen se llevó a cabo por medio de un gel de silicona de características similares a un aceite (densidad relativa de 0.96 y viscosidad de 50 cSt a 25 °C) el cual se empleó por no tener conductividad eléctrica. El gel de silicona se introdujo a la cámara triaxial por medio de una manguera la cual es conectada a la válvula de presión de confinamiento.
4. *Manipulación del software GDSLab*: Se abre el programa de la prensa (*GDSLab*) y se revisa que todos los valores estén bajo el siguiente criterio: los valores de los sensores de deformación local tendrán que tener un valor cercano a  $0 \pm 2.5\text{mm}$ , mientras que los medidores de desplazamiento general de la celda de carga tendrán que tener un valor cercano a 0 kPa.
5. *Aplicación de esfuerzos*: se aplica en dos partes: en la primera, se realiza el esfuerzo de confinamiento ( $\sigma_2=\sigma_3$ ) en un determinado tiempo; y en la segunda parte se aplica el esfuerzo normal máximo ( $\sigma_1=q+ \sigma_3$ ) en un determinado tiempo y se lleva a la falla del espécimen.

*Nota:* tanto el esfuerzo de confinamiento, como el esfuerzo desviador se seleccionan con base en las características del material y con lo que establece en la norma.

7. *Adquisición y manipulación de los resultados:* los resultados se recolectan de manera automática en formato xlsx para su manipulación y visualización gráfica.



*Figura 35. Metodología utilizada en las pruebas de compresión simple y triaxial, diferenciadas únicamente por el confinamiento en el caso de la triaxial. a) especímenes utilizados en la prueba. b) se le coloca membrana al pvc y se introduce el espécimen. c) espécimen con membrana, después de sacar el tubo de pvc. d) Especimen sobre la base de la celda, con el medidor de deformación radial. e) Medidor de deformación axial. f) celda triaxial montada sobre el pedestal y lista para iniciar la prueba.*



## **4. Resultados y discusiones**

Los resultados y discusiones que se presentan en este capítulo han sido generados con base en la implementación de la metodología descrita en el capítulo 3. Los resultados se presentan gráficamente por medio de imágenes y tablas, las cuales son un complemento de lo incluido a lo largo del texto. El contenido de este capítulo se presenta en el mismo orden con el que se presentaron los ensayos realizados en el capítulo de la metodología.

### **4.1 Descripción petrográfica**

La descripción macroscópica y microscópica ha sido elaborada con base en la descripción detallada de 23 muestras de mano y 5 láminas delgadas, respectivamente. En la que se atribuyeron diferentes rasgos a la roca, partiendo de lo general en la descripción macroscópica (p.ej. color, textura) hasta los rasgos particulares (p.ej. minerales) en la descripción microscópica.

A nivel macroscópica, la descripción en muestra de mano, es masiva con textura vítrea, en algunas muestras el color varía de gris amarillento (5Y 7/2), naranja muy pálido (10YR 8/6) y naranja grisáceo (10YR 7/4), lo que sugiere procesos de oxidación o intemperismo. El sistema poroso está constituido por vesículas con tamaños  $\leq 15$  mm y forma equidimensional – alargada. Muestran redondez que va de sub-anguloso a sub-redondeado. En general, los especímenes presentan gran cantidad de minerales como anfíboles, cuarzos, plagioclasas y una variación de óxidos. En la mayoría de los especímenes se observaron micro fracturas y poros grandes ( $\leq 15$  mm) con direcciones preferenciales. Algunas de las fracturas están condicionadas por la interconexión de los poros y distribución de los minerales. De acuerdo a la variedad de tamaño de poros y minerales de la roca, así como la orientación preferencial que presentan estos, se considera que la roca en estudio es una roca anisotrópica y heterogénea. Por otro lado, la variación de colores, sugiere diferentes grados de intemperismo, siendo el color gris amarillento el que no presenta intemperismo y el color naranja grisáceo el que presenta mayor intemperismo. Por lo que los especímenes se separaron de acuerdo a su meteorización de la siguiente forma: CH01-01 para meteorización menor, CH01-02 para meteorización media y CH001-03 para mayor meteorización.

Por otro lado, el análisis textural permitió obtener porcentajes de los elementos que componen la roca (Tabla 1). El mayor porcentaje lo ocupan los poros con 21.03%, las plagioclasas 4.16%, anfíboles 4.27% y piroxenos 0.28%. Estos porcentajes permitieron obtener el porcentaje de la matriz (vítrea). Para clasificar la roca se tomaron en cuenta el vidrio (matriz), los cristales (anfíboles, plagioclasas y piroxenos) y los fragmentos de roca. Lo cual permitió graficar estos valores y obtener que la roca se clasifica como una toba vítrea (Figura 36).

*Tabla 1. Porcentajes totales y normalizados de los elementos que componen la roca en estudio.*

	<b>Total (%)</b>	<b>Valores normalizados (%)</b>
<b>Poros</b>	21.03	
<b>Anfíboles</b>	4.27	11.28
<b>Plagioclasas</b>	4.16	
<b>Piroxenos</b>	0.28	
<b>Matriz</b>	70.27	88.72

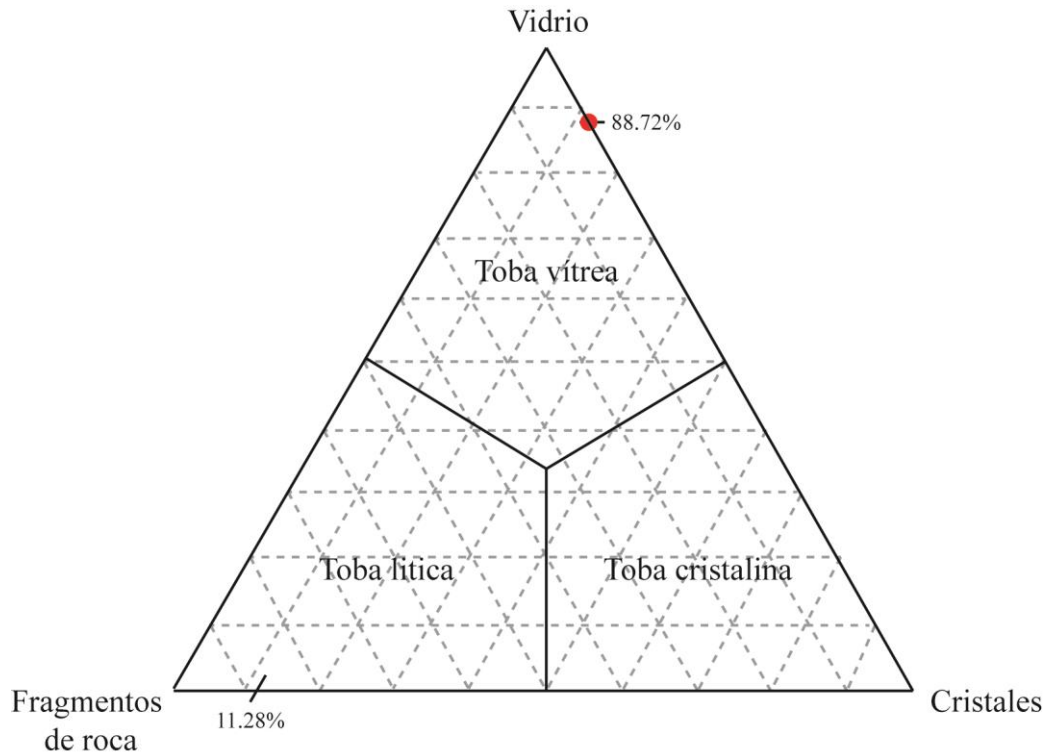


Figura 36. Diagrama ternario para rocas piroclásticas, en cual se identifican los elementos que contienen la roca en estudio: 88.72% vidrio, 11.28% de fragmentos de roca y 0% de fragmentos de roca.

A nivel microscópico, se observaron tres minerales mayoritarios predominantes: plagioclasa, anfíbol y ortopiroxeno, inmersos en una matriz de vidrio con textura vesicular. Las características de los minerales de manera individual, se describen a continuación:

- *Anfíboles*. Presentan forma eudral y subedral, en su mayoría presentan mayor fracturación los cristales con forma subedral. En general presentan un tamaño  $\leq 2$  mm. En nícoles cruzados se observó un color de interferencia de primer y segundo orden. En nícoles paralelos, se identificó relieve marcado y pleocroísmo de café a negro (Figura 37a).
- *Plagioclasas*. Presentan forma eudral y subedral, en su mayoría fracturados. Se distinguen dos tamaños preferenciales:  $\leq 500$   $\mu\text{m}$ , los cuales se encuentran fragmentados y distribuidos en toda la superficie de la lámina delgada;  $\leq 2$  mm, los cuales presentan dirección preferencial paralela a los anfíboles. En nícoles cruzados, se observó un color de interferencia de primer orden, maclado polisintético y

zoneamiento, así como aglomeración de estos minerales. En nícoles paralelos se identificó un relieve marcado y sin pleocroísmo (Figura 37a y b).

- *Ortopiroxenos*. Presenta forma subedral, con inclusiones de plagioclasas zoneadas de un tamaño  $\leq 100 \mu\text{m}$ . En nícoles cruzados se observó un color de interferencia de primer a segundo orden y no se observó maclado. En nícoles paralelos se identificó un pleocroísmo de café oscuro a verde oscuro (Figura 37d).

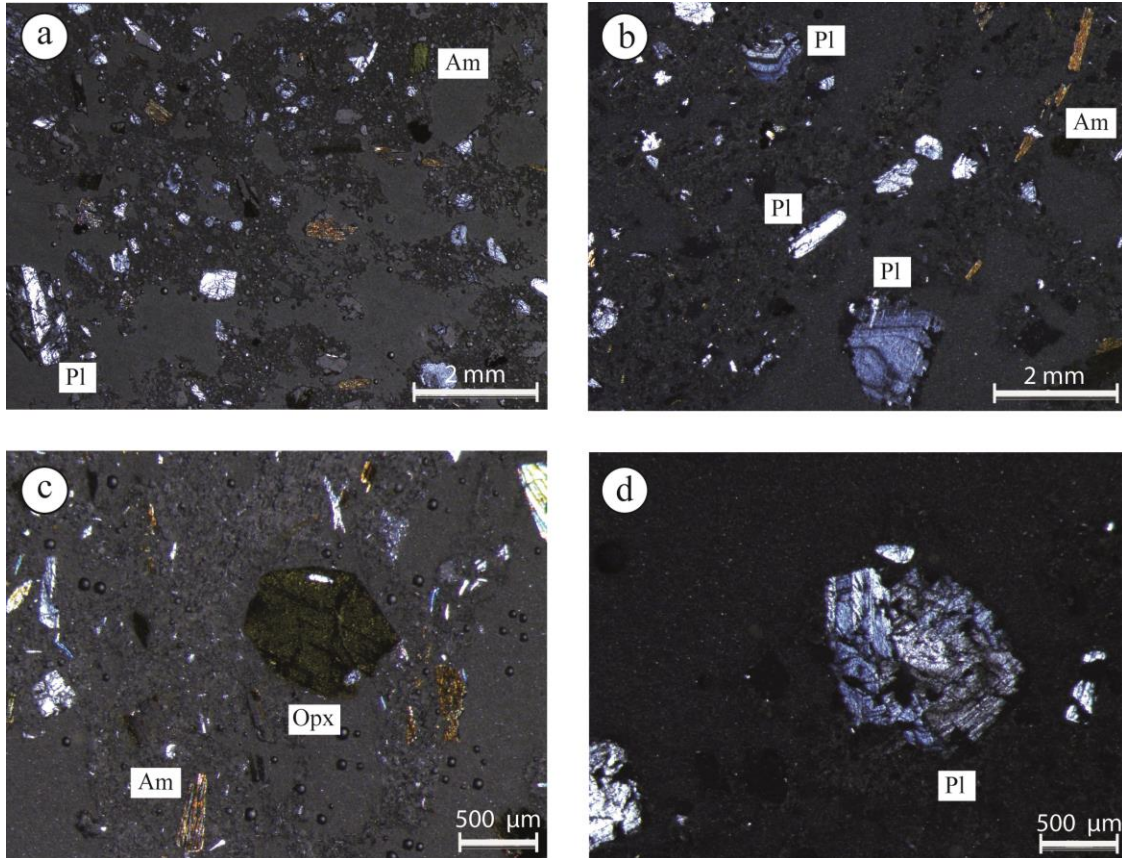


Figura 37. Imágenes petrográficas en nícoles cruzados. a) minerales de plagioclasas (Pl) y anfíboles (Am), dentro de una matriz de vidrio y rodeada por poros. b) minerales de plagioclasas con maclado polisintético y de plagioclasas zoneadas c) clinopiroxeno fracturado. d) aglomeración de plagioclasas zoneadas.

## 4.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de las rocas como son la densidad y porosidad influyen en las propiedades hídricas y mecánicas de las mismas. Estas propiedades están definidas por la permeabilidad, capilaridad y elasticidad. En el caso de las propiedades hídricas, están

definidas por la interacción de los minerales que conforman las rocas, los poros contenidos en las rocas y el flujo de agua en ellos. En tanto, que las propiedades mecánicas, están definidas por el sistema poroso y su distribución, la densidad de los minerales, el fracturamiento y microfracturamiento no perceptible a simple vista.

#### 4.2.1 Densidad

Como se muestra en la (Tabla 2), los valores de densidad aparente fueron obtenidos mediante la determinación de la masa y volumen de cada espécimen (Tabla 2) varían en un rango que va de 0.9125 a 1.0096 g/cm<sup>3</sup>, con un valor promedio de 0.9125 g/cm<sup>3</sup>. Por otro lado, los valores de densidad real varían en un rango que va de 2.20 a 2.34 g/cm<sup>3</sup>. Como se esperaba, los valores de ambas densidades varían muy poco entre especímenes, por lo que se espera que el porcentaje de porosidad total presente la misma homogeneidad entre especímenes.

*Tabla 2. Valores de masa, volumen aparente y real, así como densidad aparente y real. Calculando un valor final (promedio) de cada densidad y su desviación estándar.*

<b>Especimen</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>V<sub>b</sub> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>r</sub> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ρ<sub>b</sub> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ρ<sub>r</sub> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	
<b>CH01-01PH01</b>	28.07	30.56	12.67	0.91	2.20	
<b>CH01-01PH02</b>	24.22	26.16	10.93	0.92	2.21	
<b>CH01-01PH03</b>	22.74	24.92	10.24	0.91	2.21	
<b>CH01-02PH01</b>	30.72	30.54	13.11	1.00	2.33	
<b>CH01-02PH02</b>	28.71	29.85	12.34	0.96	2.31	
<b>CH01-02PH03</b>	30.47	30.18	12.97	1.00	2.33	
<b>CH01-03PH01</b>	27.19	27.96	11.55	0.9721	2.34	
				<b>Promedio/ desvest</b>	0.95 ± 0.04	2.28 ± 0.06

Una de las características de gran interés en la pómez de este estudio es su densidad, la cual, de acuerdo a las características de su sistema poroso y contenido mineral observado

en muestra de mano, se consideraba que sería mayor que las de las pómez convencionales (pómez comerciales para limpieza del hogar), que son conocidas usualmente por una densidad menor a la del agua ( $1 \text{ g/cm}^3$ ). Sin embargo, al comparar los resultados de la roca en estudio con resultados obtenidos en pómez del volcán de Colima (Farquharson et al., 2015), se observó que tanto los valores de densidad aparente, como los valores de densidad real, son similares (Tabla 3). Y la pequeña diferencia de estos, se considera que se deriva de la génesis (contenido de sílice, volátiles (Thomas et al., 1994) y su composición mineralógica.

*Tabla 3. Comparación de los valores de densidad real y aparente, de los resultados obtenidos de la pómez en estudio y los valores de pómez del Volcán de Colima. Cabe resaltar que los valores de densidad real para la pómez del volcán de colima, fueron estimados a partir de sus valores de densidad aparente y porosidad total, tomados de (Farquharson et al., 2015)*

	<b>Pómez volcán Chichonal</b>	<b>Pómez Volcán de Colima</b>			
$\rho_b \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$0.95 \pm 0.04$	1.09	1.08	1.04	1.06
$\rho_r \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$2.28 \pm 0.06$	2.69	2.69	2.56	2.56

#### **4.2.2 Porosidad**

La porosidad juega un papel muy importante en la caracterización de cualquier unidad de roca, debido a que el sistema poroso es el encargado de condicionar las características del comportamiento hídrico y mecánico. De acuerdo a lo que describe en el capítulo de metodología, existen tres tipos de porosidades: porosidad efectiva, que considera la porosidad abierta ( $\eta_0$ ) y la interconectada, y esta la porosidad cerrada ( $\eta_c$ ), que es la porosidad no accesible. El tipo de porosidad, o algunas de ellas en conjunto, condicionan diferentes procesos: por una parte, los espacios vacíos interconectados o abiertos ( $\eta_0$ ) y la distribución de tamaño de poros, condicionan el flujo de fluidos a través de la roca, los cuales pueden atribuir características de permeabilidad, capilaridad y evaporación; y por otra parte, los espacios vacíos totales (abiertos  $\eta_0$  y cerrados  $\eta_c$ ) definen el comportamiento mecánico, que permite atribuir características de esfuerzos-deformación, como el módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Al final de esta sección se mencionan los valores obtenidos para la porosidad total ( $\eta_t$ ), porosidad cerrada ( $\eta_c$ ) y porosidad abierta ( $\eta_0$ ), así como los diferentes tamaños de radio de poros predominantes, de acuerdo la obtención mediante el porosímetro de mercurio (0.001-100  $\mu\text{m}$ ) y absorción a vacío ( $\approx 0.1$ -1000  $\mu\text{m}$ ).

### **Porosimetría efectiva por intrusión de mercurio**

Los resultados obtenidos con el porosímetro de mercurio presentan un promedio de 4.25 % de porosidad efectiva (accesible al Hg). Cabe recordar que el rango de medida del porosímetro va de 0.001 a 100  $\mu\text{m}$ . Como se ha descrito en la sección de metodología los rangos de presión para la intrusión de mercurio son directamente relacionados con el tamaño de poro, es decir las familias de poros que tienen un rango de tamaño de 4 a 100  $\mu\text{m}$  se obtienen por medio de baja presión, mientras que las familias que van de 4 a 0.001  $\mu\text{m}$  se obtienen con alta presión. El rango total de medida se puede dividir en sub rangos (Tabla 4) con la finalidad de tener una mejor caracterización (p. ej. visualización gráfica) de la distribución del tamaño de poro. La roca en estudio en general, presenta un mayor porcentaje de porosidad en el subrango que va de 10 a 100  $\mu\text{m}$  (Tabla 4). Otro parámetro importante que se obtuvo mediante el porosímetro de mercurio, fue la tortuosidad de los poros, la cual varía de 2.18 a 2.21 (Tabla 4) y esta se relaciona con el llenado de los poros durante la intrusión del mercurio. Cabe recordar que la tortuosidad es un parámetro importante para representar la complejidad estructural de un medio poroso, sobre todo cuando se quiere estudiar los fenómenos de transporte. La definición básica de la tortuosidad podría incluir lo siguiente: medida de la desviación que presenta el sistema poroso real con respecto a un sistema equivalente de tubos capilares.

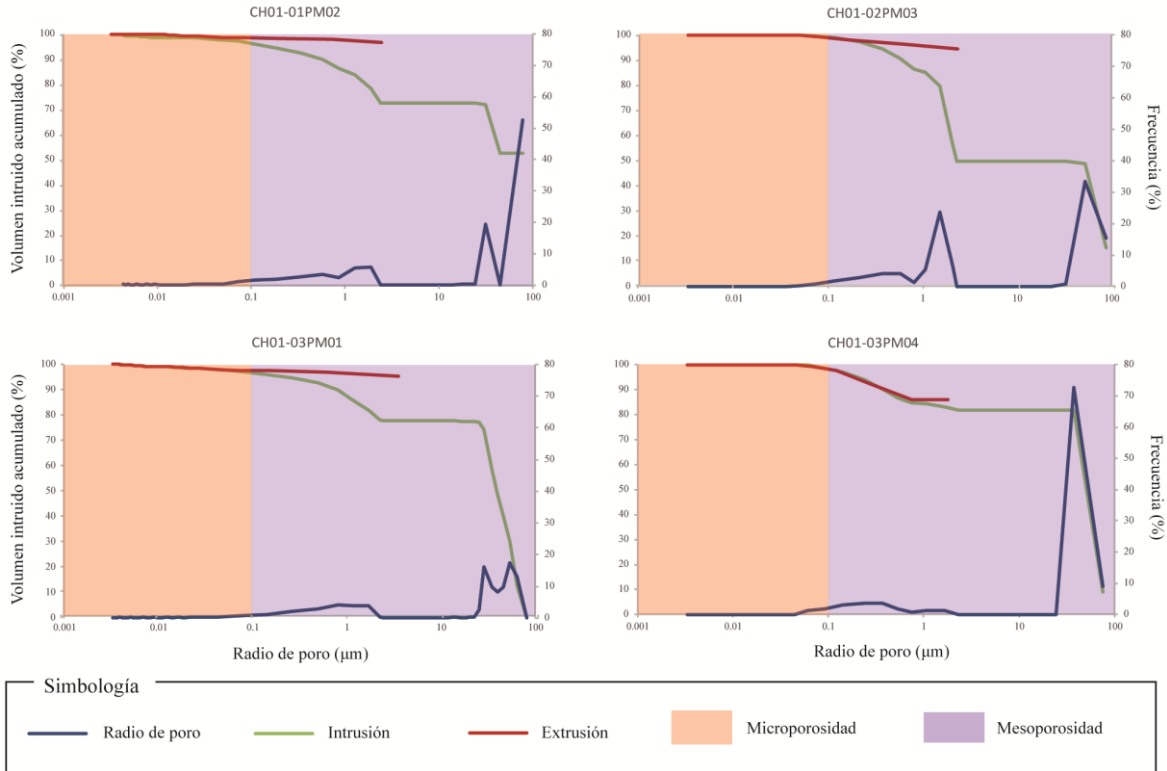
De acuerdo a los porcentajes obtenidos en los rangos de radio de poros, se atribuye a la roca una mesoporosidad (0.1-100  $\mu\text{m}$ ), con dos familias de poros predominantes (de 1 a 10 y de 10 a 100  $\mu\text{m}$ ) (Figura 38). Por otro lado, es importante mencionar que las características del equipo no permiten caracterizar poros de radio mayor a 100  $\mu\text{m}$  (macroporosidad), por lo que los poros de ese tamaño no pudieron ser tomados en cuenta con este método.

Por otra parte, se obtuvieron valores en porcentaje de volumen de Hg intruído y extruído durante la prueba, estos valores se representan gráficamente mediante dos curvas (intrusión y extrusión) (Figura 38), de las cuales se interpretan dos aspectos importantes: 1) Las curvas de intrusión, presentan escalonamientos (Figura 38), en los que se distingue mayor volumen de Hg intruído en el espécimen, lo que indica que las muestras fallaron durante la prueba. Por lo que los resultados de porosimetría presentan errores asociados a la falla del espécimen, es por eso que los valores de porosidad son tan pequeños. 2) Las curvas de extrusión presentan una forma casi horizontal, lo que indica que los poros son tipo cuello de botella y dentro de los poros se quedó contenido el mayor volumen de Hg.

*Tabla 4. Valores obtenidos a través del porosímetro: porosidad total accesible al Hg y rangos en los que se distribuyen los radios de poros, así como la tortuosidad.*

Especimen	Frecuencia de radio de poro (%)					Porosidad Hg (%)	Tortuosidad ( $\tau$ )
	<0.01	0.01-0.1	0.1-1	1 a 10	10-100		
<b>CH01-01PM01</b>	1.55	2.43	12.14	11.26	72.63	4.14	2.18
<b>CH01-02PM01</b>	0.00	1.01	13.85	35.47	49.66	7.03	2.15
<b>CH01-03PM01</b>	0.89	3.13	10.29	7.83	77.85	4.15	2.21
<b>CH01-03PM04</b>	0.00	3.03	12.73	2.42	81.82	1.68	
<b>promedio/desvest</b>	0.81 $\pm$ 0.77	2.19 $\pm$ 1.08	12.09 $\pm$ 1.78	18.18 $\pm$ 15.06	66.71 $\pm$ 14.99	4.25 $\pm$ 2.18	2.18 $\pm$ 0.02





*Figura 38. Distribución de tamaños de radio de poros vs la frecuencia de cada uno y comportamiento del Hg al intruir y extruir de la roca.*

### Porosidad al vacío

En general y de acuerdo con los conceptos básicos (ver sección de metodología) la porosidad abierta está constituida por los poros que se encuentran conectados con la superficie del espécimen, mientras que la porosidad cerrada está constituida por los poros aislados. Los valores de porosidad abierta ( $\eta_0$ ) varían en un rango de 33.55 a 54.29%, mientras que los valores de la porosidad cerrada ( $\eta_c$ ) varían en un rango de 9.42 a 24.88%, así mismo la porosidad total ( $\eta_t$ ) varía de 57.40 a 58.29%. El análisis básico de los valores en conjunto (Tabla 5) indica que el mayor porcentaje de poros se encuentra conectado y muy pocos de ellos se encuentran aislados. En general los valores son de cierta manera lógicos y esperados, se tiene que recordar que en rocas volcánicas extrusivas la interconexión de los poros depende, entre otras cosas, del proceso de fragmentación del magma (separación de fases) y el mecanismo de emplazamiento (p. ej. flujos piroclásticos). Por otro lado, es importante mencionar que esta prueba permite la lectura de macroporos con un radio mayor a 100  $\mu\text{m}$ .

Tabla 5. Valores de porosidad cerrada ( $\eta_0$ ), abierta ( $\eta_c$ ) y total ( $\eta_t$ ), década espécimen, así como su valor promedio y desviación estándar correspondientes.

Espécimen	$\eta_0$ (%)	$\eta_c$ (%)	$\eta_t$ (%)
<b>CH01-01PE01</b>	33.55	24.88	58.43
<b>CH01-01PE02</b>	38.98	19.16	58.15
<b>CH01-01PE03</b>	49.36	9.42	58.79
<b>CH01-02PE01</b>	41.10	15.87	56.96
<b>CH01-02PE02</b>	49.06	9.43	58.50
<b>CH01-02PE03</b>	42.64	14.16	56.80
<b>CH01-03PE01</b>	48.20	10.39	58.59
<b>Promedio/desvest</b>	43.27 $\pm$ 5.95	43.27 $\pm$ 5.95	58.03 $\pm$ 0.80

### 4.3 Propiedades hídricas

Las propiedades hídricas, como ya se ha mencionado, están directamente relacionadas con las propiedades físicas, especialmente con el sistema poroso, su distribución y forma. La caracterización hídrica de la roca en estudio se realizó con base en la implementación de pruebas de permeabilidad, absorción por inmersión a presión atmosférica, evaporación y capilaridad. Estos ensayos en general permitieron cuantificar la distribución y dirección del flujo del agua a través del sistema poroso. La permeabilidad está directamente asociada a la porosidad efectiva y su arreglo geométrico. Por ejemplo: dos rocas con un mismo porcentaje de porosidad efectiva, pero con un arreglo diferente en su sistema poroso, podrían tener diferentes valores de permeabilidad. Por otro lado, la absorción capilar y por presión atmosférica se hace más afectiva cuando la roca contiene poros con cierto rango de tamaño (macroporos  $>1 \mu\text{m}$ ).

### 4.3.1 Permeabilidad

La permeabilidad obtenida en este ensaye fue la permeabilidad absoluta, por medio de un solo fluido a través de la roca (Tiab y Donaldson, 2015). La cual depende principalmente por la porosidad interconectada (porosidad abierta), debido a que permite el paso del fluido (nitrógeno de alta pureza en nuestro caso) a través de la roca. Sin embargo, este paso a través de la roca, está condicionado por factores como el tamaño, la forma de los poros y la tortuosidad. Entre mayor porcentaje de poros interconectados en la roca, mayor podría ser la permeabilidad, siempre y cuando se cumpla la ley de Darcy (flujo laminar).

Los resultados de permeabilidad se obtuvieron con base en la implementación de la prueba de cinco puntos (ver sección de metodología). Esta prueba mide la permeabilidad del gas correspondiente a la diferencia de presiones en cinco puntos, mientras que la diferencia de presiones se manipula de acuerdo al flujo de intrusión, el cual está relacionado con la arquitectura del sistema poroso de cada roca. Se tiene que recordar que el flujo del gas a través del espécimen tiene que cumplir la ley de Darcy (flujo laminar). Una vez seleccionado el rango de presiones para cada punto, el software recolecta los valores de permeabilidad al gas y al líquido de manera automática (Figura 39). Los valores obtenidos presentan un valor promedio de 966.42 mD y una desviación estándar de 406.60 mD (Tabla 6), a los cuales se les atribuye una permeabilidad de media a alta (Tiab & Donaldson, 2015), esto quiere decir que la interconexión y arquitectura del sistema poroso facilita el paso del fluido. Por otra parte, la desviación estándar, indica una gran heterogeneidad entre cada espécimen, esto se corrobora con dos de los especímenes (Figura 39f y g), ya que presentaron permeabilidades muy altas y un rango corto (10 psi) de presiones de entrada y salida, de tal forma que solo se realizó una corrida en esos especímenes. Lo anterior, indica un sistema poroso más complejo (forma y tamaño de poros). Por lo que, con rocas porosas como el caso de estudio, es necesario trabajar con presiones bajas (menores a 45 psi) de entrada y salida, para cumplir la ley de Darcy (flujo laminar).

*Tabla 6. Rangos de permeabilidad al líquido (kL) en mD y m<sup>2</sup>. Los valores de permeabilidad obtenidos por la intrusión de gas dependen de algunos factores como la cantidad de fluido al inicio y durante la prueba, además del estado y distribución de presiones en el sistema (ver la diferencia de las pendientes en cada una de las gráficas [Figura 3]).*

<b>Espécimen</b>	<b>Permeabilidad (mD)</b>	<b>Permeabilidad (m<sup>2</sup>)</b>
<b>CH01-01PE01</b>	616.94	6.07E-13
<b>CH01-01PE02</b>	359.06	3.54E-13
<b>CH01-01PE03</b>	815.05	8.04E-13
<b>CH01-02PE01</b>	935.39	9.22E-13
<b>CH01-02PE02</b>	1385.2	1.36E-14
<b>CH01-02PE03</b>	811.95	8.00E-13
<b>CH01-03PE01</b>	1841.40	1.81E-14
<b>Promedio/desvest</b>	966.42 ± 496.60	9.53E-13 ± 4.89E-13

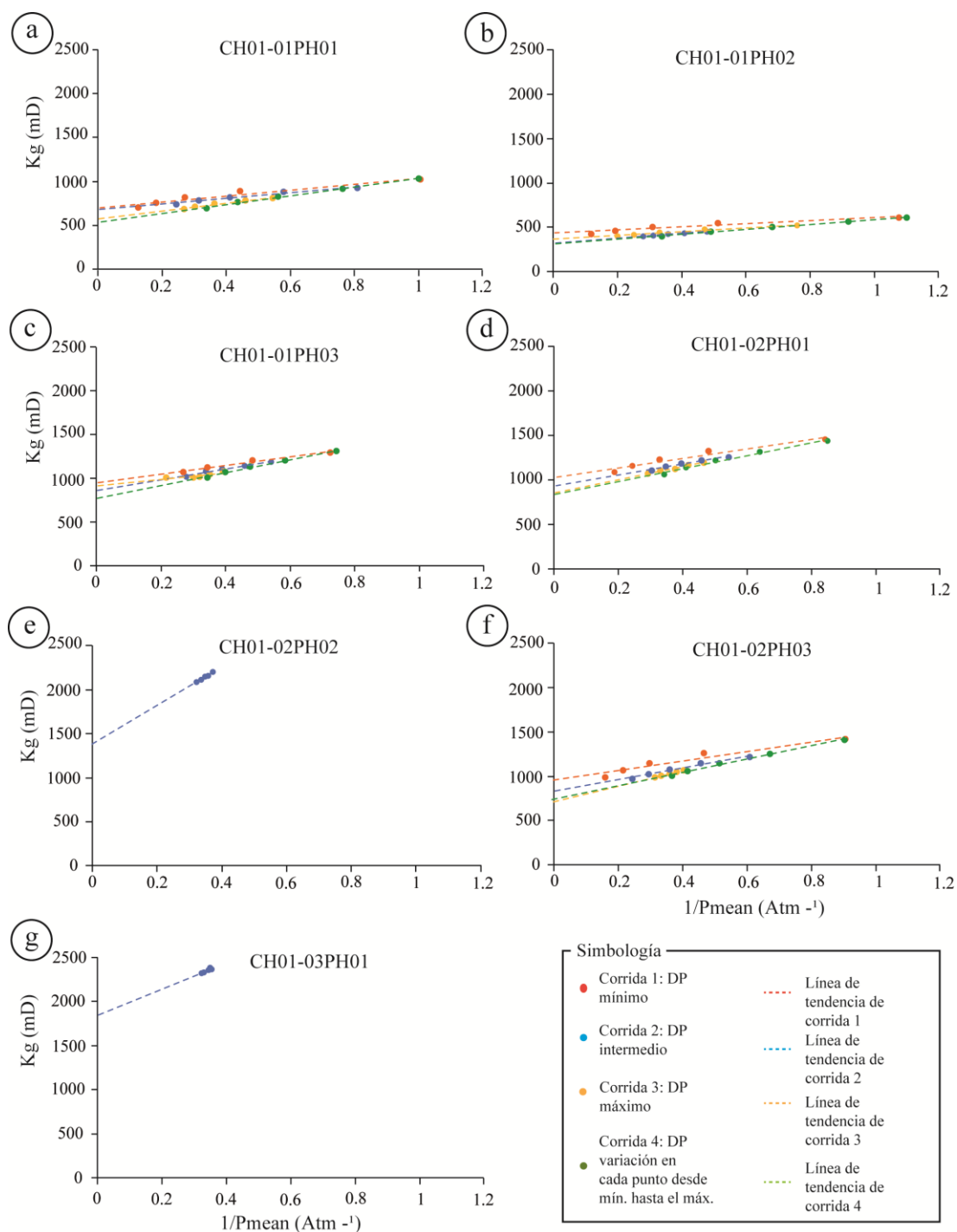


Figura 39. Gráficas de permeabilidad vs presión media. En la mayoría de las gráficas se muestran cuatro corridas, excepto en las más permeables, en las cuales solo se realizó una corrida. Las líneas de tendencia para cada corrida tocan el eje “y”, del cual se obtiene el valor de  $k_L$ .

De acuerdo con lo que se describió anteriormente, las propiedades hídricas normalmente están estrechamente relacionadas con las propiedades físicas: al aumentar el contenido de poros, poros conectados, aumentan los valores de permeabilidad. Por otro lado, se tiene que tomar en cuenta que hay interconexión de poros, sobre todo en sistemas complejos, que no podrían contribuir en los resultados de la permeabilidad, además los valores de permeabilidad también están relacionados con factores externos como la distribución de presiones a lo largo del espécimen. Esto se puede afirmar con base en una gráfica de permeabilidad contra la porosidad efectiva (Figura 40).

Como se aprecia en la Figura 40, las rocas que presentan alta porosidad interconectada ( $> 10\%$ ), presentan en general mayor permeabilidad ( $k$ ), que las rocas con porosidades menores al  $10\%$ . Cabe mencionar que la porosidad interconectada o efectiva es la que se obtuvo mediante la porosidad al vacío. Si se comparan valores de permeabilidad en rocas que contienen el mismo rango de porosidad (rocas volcánicas como escoria y pómez) se puede apreciar lo siguiente: 1) en general los valores de permeabilidad de nuestras muestras son similares a las pómez recolectadas en el volcán de Colima, en particular con una fase de alteración; 2) los valores en general muestran una tendencia (a mayor porosidad interconectada, mayor permeabilidad), por el contrario, la dispersión corresponde a características particulares de cada espécimen. Como ejemplo podemos mencionar las características de microfracturamiento y oxidación que muestran los especímenes CH01-02 y CH01-03 tal como se indica en la sección 3.3.1. 3) La dispersión de los valores en la figura podrían ser otro indicador de la heterogeneidad y anisotropía de los especímenes.

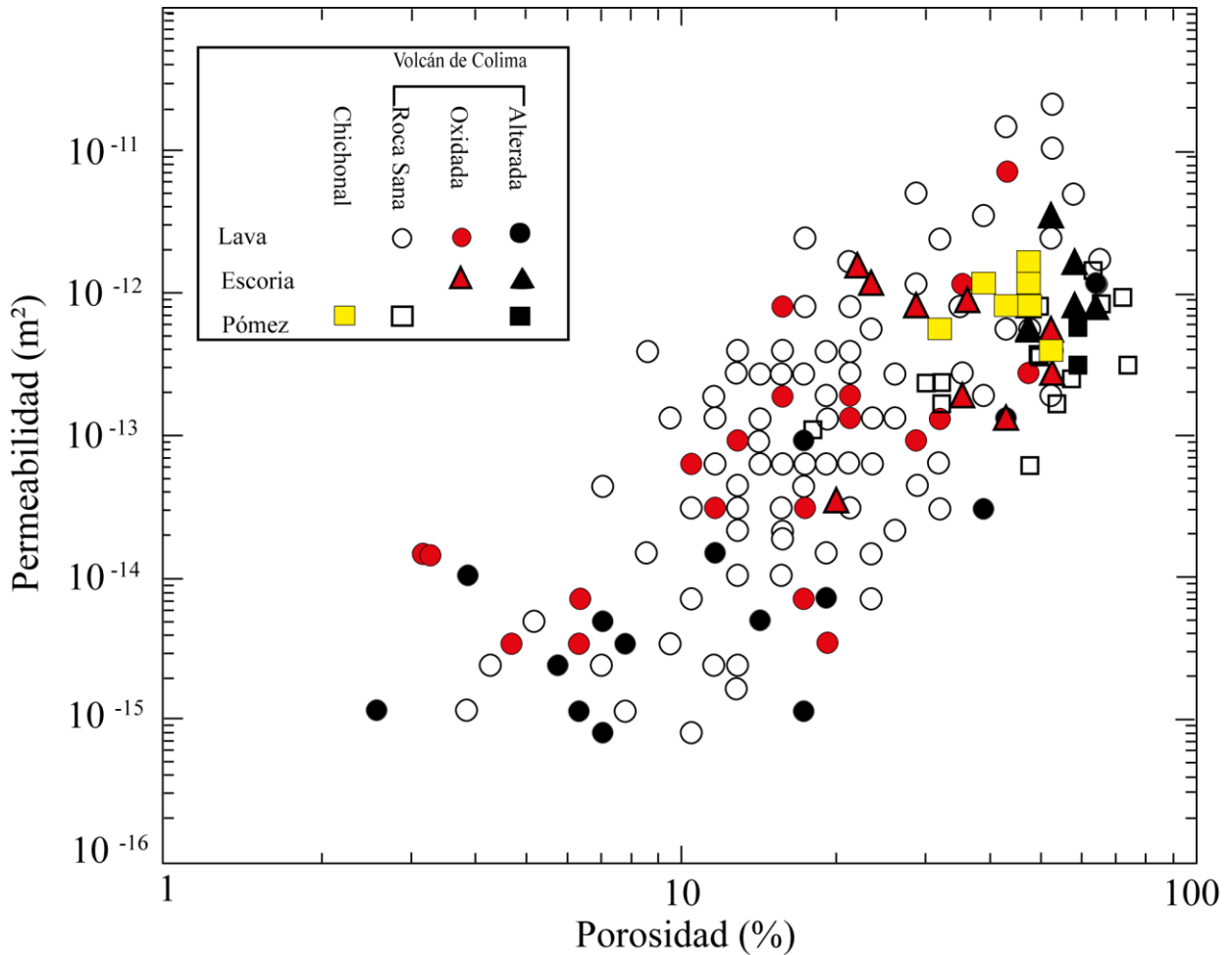


Figura 40. Comparación de valores de permeabilidad vs porosidad abierta o conectada, de la pómez de este estudio, y rocas del volcán de Colima (Farquharson et al., 2015).

#### 4.3.2 Absorción por inmersión en agua a presión atmosférica

La absorción por inmersión atmosférica, al igual que en la permeabilidad, está limitado principalmente por la porosidad interconectada (porosidad abierta) y el tamaño de los poros. El comportamiento de la absorción ha sido representado porcentualmente mediante el porcentaje de absorción de agua ( $A_b$ ). La Figura 41 representa la relación de la variación de masa de agua absorbida (g) con respecto al tiempo ( $\sqrt{h}$ ) (ver metodología). Los resultados de  $A_b$  varían en un rango de 33.09 a 84.69% (Tabla 7) y un valor final promedio de absorción de 52.56%, que representa la cantidad de agua que puede albergar la roca.

Las curvas de absorción (Figura 41) presentan dos pendientes: la primera pendiente corresponde a la absorción inicial, está es más rápida y se relaciona con los poros de mayor tamaño; mientras que la segunda pendiente corresponde a la absorción lenta, que corresponde a la entrada de agua en los poros más pequeños y de difícil acceso. Estas curvas y coeficientes nos brindan información de la interconectividad de los poros, ya que los poros interconectados favorecen a la absorción del agua, y también brindan información de que afectos que podría tener la roca cuando este bajo la acción de la lluvia o escorrentías superficiales. Por último, la dispersión de los valores que se obtuvieron en la absorción se debe a la heterogeneidad y anisotropía de la roca e indican un sistema poroso complejo, es decir, una gran variedad en los tamaños de poros.

*Tabla 7. Datos de absorción de agua, estos representan una relación lineal en la que se diferencian los cambios de pendiente de las gráficas.*

<b>Espécimen</b>	<b>Ab (%)</b>
<b>CH01-01AB01</b>	22.0883
<b>CH01-01AB02</b>	84.6908
<b>CH01-01AB03</b>	83.0179
<b>CH01-02AB01</b>	45.7671
<b>CH01-02AB02</b>	45.0181
<b>CH01-02AB03</b>	42.0947
<b>CH01-03AB01</b>	45.2262
<b>Promedio/desvest</b>	52.55 ± 22.93



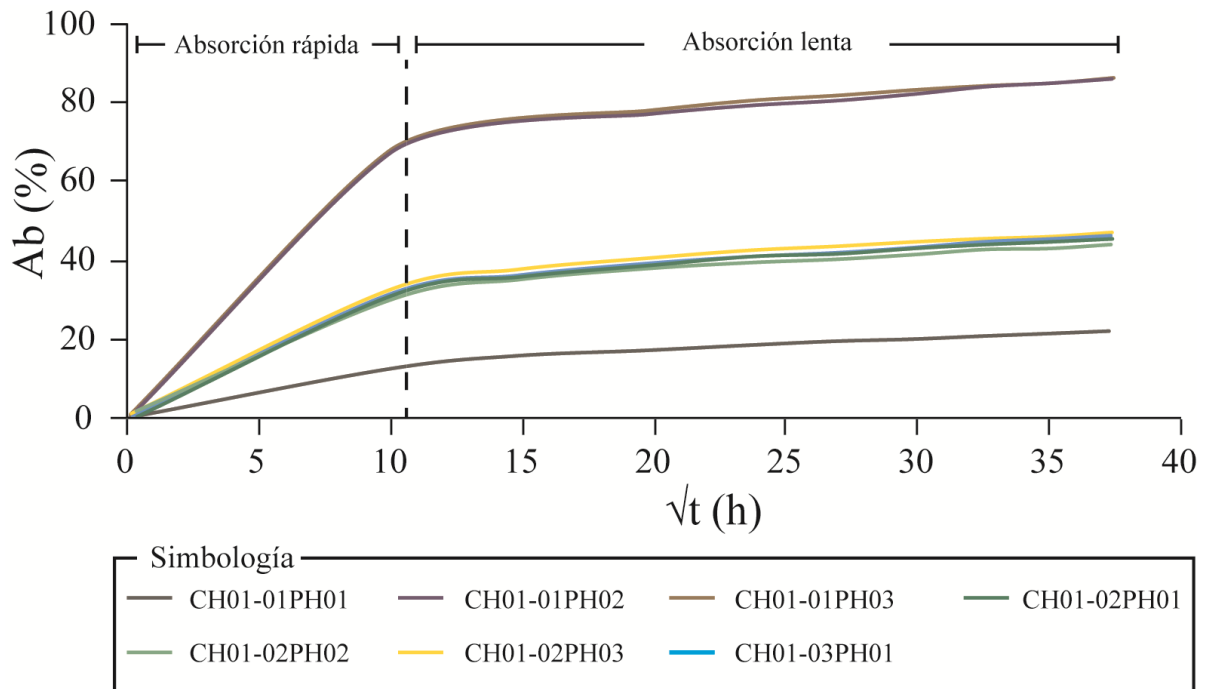


Figura 41. Curvas de absorción representativas de cada espécimen utilizado en la prueba de absorción. Se distingue un cambio en las curvas, el cual está representado por una mayor absorción de agua en menor tiempo y una menor cantidad de agua en un mayor tiempo.

### 4.3.3 Evaporación

La evaporación al igual que la absorción a presión atmosférica, permiten validar la distribución del tamaño de poros que presenta la roca. El rango de tamaño de poros más eficiente para la evaporación está entre 1 y 1000  $\mu\text{m}$  (poros más pequeños suelen dificultar la evaporación). Los resultados de la evaporación son representados gráficamente con la relación de la evaporación relativa contra la raíz del tiempo. Esta relación permite identificar el tiempo crítico de secado ( $T_c$ ) y el contenido de humedad crítica ( $C_c$ ), los cuales representan un cambio en la evaporación del agua en el espécimen (ver metodología). Como se puede observar en la Figura 42, el valor de  $T_c$  se presenta en el tiempo 5.65  $\sqrt{h}$ , con un valor de evaporación relativa que varía de 86.04 a 92.09% (Tabla 8). Estos valores representan gráficamente el punto de inflexión, que a su vez representa el cambio de velocidad de la evaporación (rápida - lenta).

Los resultados de esta prueba permiten resaltar que el tamaño y contenido de poros, además de su forma geométrica están relacionados con la eficiencia en el proceso de evaporación. De acuerdo a lo que se describe gráficamente en la Figura 42, se puede resaltar que el comportamiento general de la roca por evaporación se debe básicamente a dos rangos de poros; una vez que se evapora toda la masa de agua de los poros más grandes, hay un cambio de pendiente y después sigue una tendencia que corresponde a la evaporación del rango de poros más pequeños. En estos poros más pequeños es en donde se retiene el agua y la evaporación se lleva a cabo en forma de gas, permitiendo que las sales que contiene el agua cristalicen dentro del poro y generen fracturas pequeñas dentro de la roca, las cuales juegan un papel fundamental en el desarrollo de la degradación.

*Tabla 8. Datos generales de evaporación en el punto en el cambia de evaporación rápida a evaporación rápida: tiempo crítico (Tc) vs evaporación relativa en Tc.*

<b>Espécimen</b>	<b>Tc (h<sup>1/2</sup>)</b>	<b>Evaporación relativa (%)</b>
<b>CH01-01PE01</b>	5.65	90.29
<b>CH01-01PE02</b>	5.65	92.09
<b>CH01-01PE03</b>	5.65	91.02
<b>CH01-02PE01</b>	5.65	88.44
<b>CH01-02PE02</b>	5.65	88.34
<b>CH01-02PE03</b>	5.65	88.89
<b>CH01-03PE01</b>	5.65	86.04
<b>Promedio/desvest</b>	5.65 ± 0.00	89.30 ± 2.00

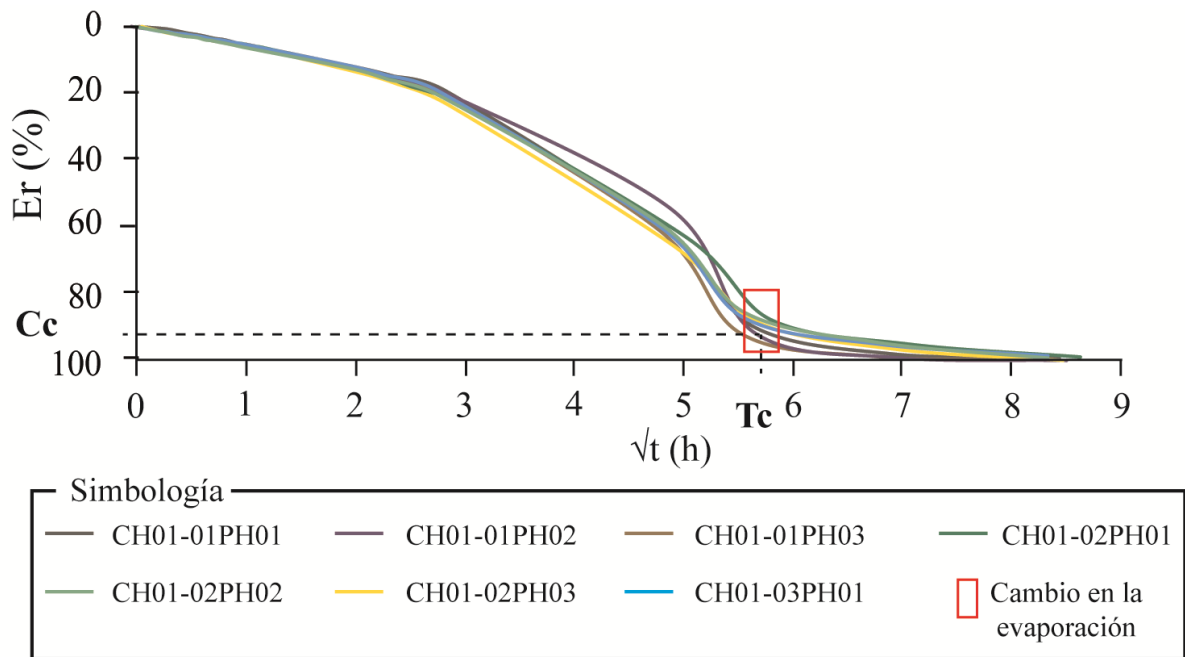


Figura 42. Se representa gráficamente el porcentaje de masa evaporada ( $E_r$ ) vs raíz del tiempo de secado de la roca. Se distingue el tiempo crítico ( $T_c$ ) y el contenido de humedad crítico ( $C_c$ ), que representa un cambio en la evaporación de la roca (evaporación lenta-evaporación rápida).

#### 4.3.4 Capilaridad

Los valores representativos de la capilaridad son los coeficientes de capilaridad  $C_{c1}$  y  $C_{c2}$ , los cuales representan cambios en el comportamiento de la movilidad del agua en los especímenes (ver metodología). La capilaridad es más efectiva en diámetros de poros en un rango de 0.1 a 10 000  $\mu\text{m}$ . Los valores de  $C_{c1}$  se encuentran en un rango de 0.16 a 1.37, mientras que los valores de  $C_{c2}$  se encuentran en un rango de 0.044 a 0.07 (Tabla 9). Estos dos coeficientes están relacionados con algunas características físicas como la textura, tortuosidad y sobre todo las características del sistema poroso. Datos bibliográficos (Schubert y Kluckner, 2015) resaltan la relación lineal que existe entre el aumento de la porosidad con el aumento de los coeficientes de capilaridad. Como conceptos generales se puede mencionar que los coeficientes de capilaridad se han usado como parámetros experimentales en la evaluación de la cristalización y disolución de sales (Angeli et al., 2006). Valores numéricos de los coeficientes de capilaridad para muestras con porcentaje de porosidad de aproximados al 50 % varían (caso de estudio) son más altos que los valores que presentan las muestras de roca con baja porosidad.

En la Figura 43 se puede observar que los coeficientes se relacionan con el ascenso del agua a través de todo el sistema poroso. Los cambios de pendiente en la gráfica, representan el ascenso de agua en diferentes tamaños de poros. La primera pendiente corresponde al ascenso del agua en los poros de mayor tamaño, que como se distingue en la gráfica, se realiza en un tiempo aproximado de 48 horas. La segunda pendiente representa el ascenso del agua en los poros de menor tamaño, que como se distingue en la gráfica se realiza en un tiempo aproximado de 92 horas. Sin embargo, esto no representa una alta capilaridad, debido a que los poros de mayor diámetro absorben mayor cantidad de agua, pero su altura es más baja, caso contrario con los poros de diámetro más pequeño en los que absorben menos cantidad de agua, pero su columna es de mayor altura. Es por eso que los coeficientes de capilaridad de esta roca en estudio son bajos, debido a que presenta mayor porcentaje de macroporos que microporos, siendo los microporos los que favorecen a la ascensión capilar.

*Tabla 9. Valores de los coeficientes de capilaridad obtenidos de las gráficas que se presentan en la Figura 42.*

<b>Espécimen</b>	<b>Cc1</b>	<b>Cc2</b>
<b>CH01-01CC01</b>	0.24	0.05
<b>CH01-01CC02</b>	0.21	0.04
<b>CH01-01CC03</b>	0.31	0.05
<b>CH01-02CC01</b>	0.36	0.06
<b>CH01-02CC02</b>	0.35	0.06
<b>CH01-02CC03</b>	0.15	0.04
<b>CH01-03CC01</b>	0.30	0.05
<b>Promedio/desvest</b>	$0.28 \pm 0.07$	$0.05 \pm 0.00$

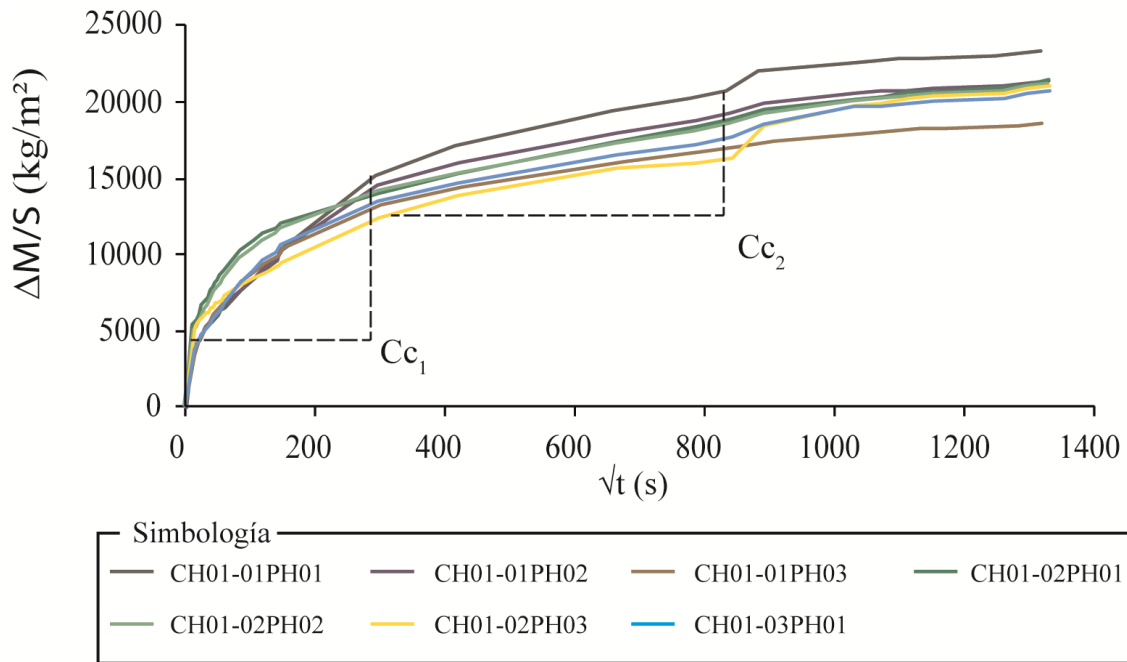


Figura 43. Relación de masa absorbida por capilaridad con la raíz del tiempo. En la imagen se puede observar el cambio promedio de pendiente que están relacionados con los coeficientes promedio de la capilaridad.

#### 4.4 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas se relacionan directamente con las propiedades físicas. En particular, la porosidad condiciona la resistencia y el modo de fracturamiento: la distribución de los poros de cierta manera condiciona la fractura. Algunas de las propiedades mecánicas de la roca en estudio se obtuvieron mediante ensayos de carga puntual, resistencia a compresión simple y resistencia a compresión triaxial. Como primer paso se obtuvieron valores de resistencia a la compresión simple aproximados mediante la prueba de carga puntual; como segundo paso se analizó el modo de fracturamiento a partir de la prueba de carga puntual modificada. Los parámetros elásticos de la roca (módulo de Young, coeficiente de Poisson) se obtuvieron con base en la medición de deformaciones axial y transversal directamente en los especímenes de roca y han sido representados mediante gráficas esfuerzo-deformación y gráficas deformación axial-deformación transversal respectivamente, mientras que los valores del ángulo de fricción interna y la cohesión se obtuvieron mediante de la representación gráfica del estado de esfuerzos en tres direcciones

de al menos tres especímenes de roca. Los valores de las pruebas y su discusión general se presentan de manera puntual de la siguiente manera:

### 4.3.1 Carga Puntual

Los resultados de la prueba de carga puntual permitieron obtener valores similares a los que se obtienen a compresión simple. Cabe resaltar que estos valores son de gran importancia, para el diseño e implementación de las pruebas futuras de compresión simple. Se obtuvo un valor promedio del índice de resistencia a carga puntual de  $2.2 \pm 0.8$  MPa (Tabla 10) a partir de la metodología establecida en la norma ASTM D5731-05. Posteriormente se realizó una corrección al índice de carga puntual obtenido, dicha corrección se realizó con base en la investigación de Kahraman (2014), en la cual se establece que a partir de porosidades mayores a 18% los resultados del índice de resistencia a carga puntual no son confiables en rocas piroclásticas (tal es el caso de la pómez en estudio). Debido a que la roca en estudio presenta una porosidad promedio de 58%, el valor empírico promedio que se tomó en cuenta en esta prueba fue el valor obtenido mediante la ecuación de Kahrman, con un valor de  $3.1 \pm 0.1$  MPa (Tabla 10). Cabe mencionar que los resultados obtenidos mediante la metodología establecida por la norma ASTM D5731-05, fueron poco confiables debido a la forma de los punzones del instrumento de medición, ya que estos se clavan en los poros de la roca, y fractura localmente la roca.

*Tabla 10. Se presenta una comparación entre los valores obtenidos a través de la metodología que establece la norma ASTM y Kahrman.*

Especímen	Índice de Carga puntual (MPa)	
	Norma ASTM (2005)	Kahraman (2014)
CH01-01PL01	1.91	3.15
CH01-01PL02	2.43	3.29
CH01-01PL03	2.35	3.27
CH01-01PL04	2.77	3.38

<b>CH01-02PL01</b>	2.45	3.29
<b>CH01-02PL04</b>	2.35	3.26
<b>CH01-02PL02</b>	2.91	3.42
<b>CH01-03PL01</b>	0.45	2.78
<b>CH01-03PL02</b>	2.99	3.44
<b>CH01-03PL03</b>	0.41	2.77
<b>Promedio/desvest</b>	2.2 ± 0.8	3.1 ± 0.1

### **Carga puntual modificada**

La carga puntual modificada permitió observar las fracturas de los especímenes ensayados al momento de la falla Figura 44a. Lo anterior sirvió de preámbulo para inferir el tipo de fracturamiento que pudieran presentar los especímenes de roca pómez mediante el ensaye de resistencia a compresión simple al momento de ser llevados a la falla Figura 44b. Para esto se realizaron ensayes en ocho tapones de cilindros, obteniendo diferentes características en la forma de fracturarse (Tabla 11.).

*Tabla 11. Descripción de la forma de la grieta de falla de los especímenes ensayados.*

<b>No.</b>	<b>Especimen</b>	<b>Descripción</b>
1	CH01-01MP01	Fractura en cuña y rugosa
2	CH01-01MP02	Fractura recta con poca rugosidad
3	CH01-01MP03	Fractura en cuña en la parte superior, con poca rugosidad
4	CH01-02MP01	Fractura curvada y poco rugosa
5	CH01-02MP02	Fractura recta, poco rugosa
6	CH01-02MP03	Fractura aproximadamente de 45° a lo ancho (espesor).
7	CH01-03MP01	Fractura que parte en dos el espécimen a través del espesor, poco rugosa.

8	CH01-03MP02	Fractura en cuña en la parte superior, y parte en aprox. 45° a través del espesor y poco rugosa
---	-------------	---



Figura 44. a) especímenes fallados. b) visualización de la forma de la falla longitudinalmente,

#### 4.3.2 Compresión simple y triaxial con medición de deformaciones axial y transversal

La compresión simple y triaxial permiten determinar valores de resistencia y deformación de la roca, bajo la aplicación de esfuerzos en una y tres direcciones respectivamente. Adicionalmente, se midió deformación axial y transversal en los especímenes al momento de realizar las compresiones ya mencionadas. De esta manera se obtuvieron valores de resistencia a compresión simple, resistencia a compresión triaxial, constantes elásticas como son el coeficiente de Poisson y el módulo de Young, además de parámetros mecánicos como la cohesión y ángulo de fricción interna. Los valores de resistencia a compresión obtenidos van de 4.15 a 7.15 MPa, dependiendo del confinamiento (Tabla 12 ) (Figura 7). Algunas de las muestras con baja resistencia están relacionadas con fracturas preexistentes.

Por otro lado, las constantes elásticas se obtuvieron de acuerdo a la metodología establecida en el apartado 3.4.2 (Normas ASTM), en este sentido los valores del Módulo de Young ( $E_{av}$ ) varían en un rango de 304.20 a 2776.74 MPa con su respectivo coeficiente Poisson que varía de 0.050 a 0.115 (Tabla 13). Como se observa en la tabla 10 se obtuvieron valores muy similares a compresión simple y compresión triaxial: el valor promedio a compresión a simple es de 5.64 MPa y el valor promedio a compresión triaxial de 5.43 MPa. La similitud de estos valores está dada por las características (p.ej. fracturas, óxidos)



individuales de los especímenes que se sometieron a cada prueba. En el caso de la compresión simple, el espécimen no presentaba fracturas, en cambio, los especímenes que se sometieron a compresión triaxial presentaban de una a dos fracturas que atravesaban de lado a lado el espécimen, así como una gran cantidad de óxidos (50%), por lo que se infiere que estas características fueron las detonantes de la baja resistencia. Además, durante la prueba de compresión simple se rompió la cámara del espécimen, lo que contribuyó en los resultados finales. Cabe recordar que la resistencia de cualquier espécimen depende en gran medida del contenido de poros, minerales y su distribución espacial, además del estado de saturación (esfuerzos efectivos) y al igual que el estado de esfuerzo al que está sometido (Esfuerzos de confinamiento).

*Tabla 12. Valores de módulo de Young por método del promedio y coeficiente de Poisson correspondiente.*

<b>Especimen</b>	<b>Prueba</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b><math>E_{av}</math></b>	<b><math>\nu_{av}</math></b>	<b><math>\phi</math></b>	<b>C</b>
<b>CH01-01TX01</b>	<b>UCS</b>	5.648	304.200	0.050	No aplica	No aplica
<b>CH01-02TX01</b>	<b>Triaxial</b>	7.155	2776.740	0.006	14°	1.5
<b>CH01-03TX01</b>	<b>Triaxial</b>	4.199	1856.580	0.002		
<b>CH01-03TX02</b>	<b>Triaxial</b>	4.948	889.600	0.115	No aplica	No aplica
<b>Promedio/desvest</b>			1456.78 ± 1088	0.040 ± 0.050	14°	1.5

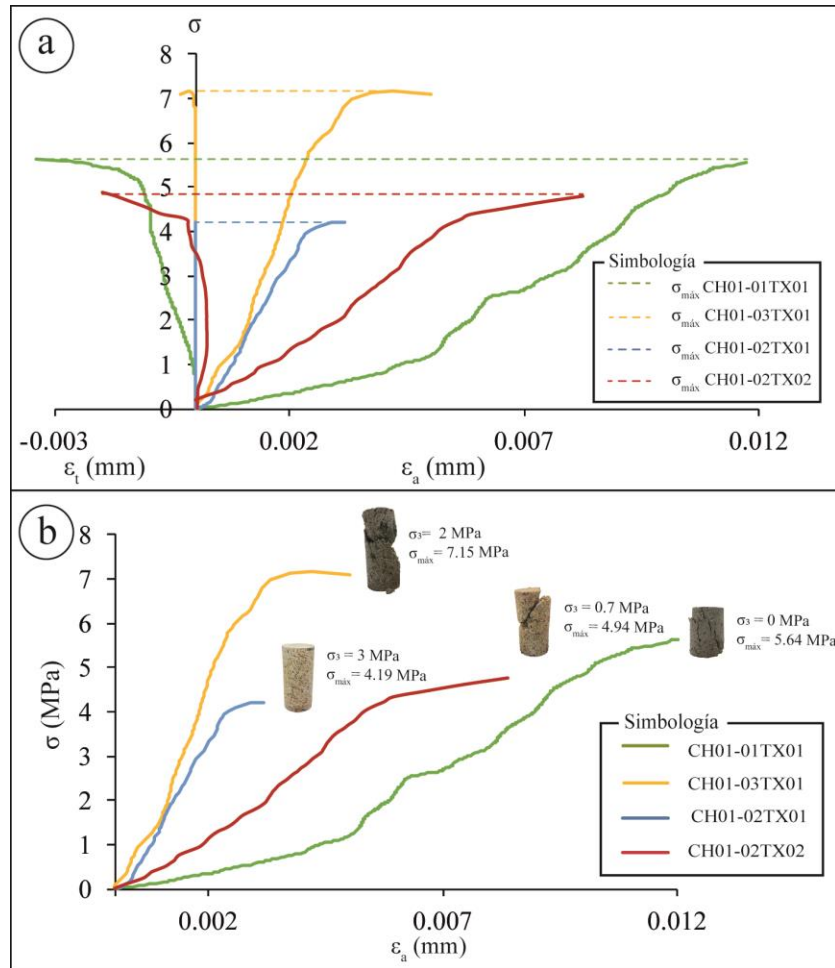


Figura 45. Curvas de esfuerzo-deformación de los especímenes ensayados. a) Relación de las deformaciones en axiales y transversales con respecto al esfuerzo ejercido durante la prueba. Con esta relación se obtuvo los coeficientes de Poisson. b) relación esfuerzo contra la deformación axial, para obtener los módulos de Young. En la imagen se aprecia los especímenes con sus fracturas después de la falla, así como el esfuerzo de confinamientos y el esfuerzo al que se generó la falla.

Finalmente, la prueba de compresión triaxial fue fundamental para obtener la envolvente de Mohr-Coloumb, a partir de círculos que representan el estado de esfuerzo de cada prueba. La Figura 46 muestra gráficamente esfuerzos aplicados a los tres especímenes, los valores de cohesión ( $C=1.5$ ) y el valor del ángulo de fricción interna ( $\phi=14^\circ$ ). Cabe mencionar que el círculo del espécimen CH01-03TX01 es más bajo de lo esperado y cae dentro de la envolvente, ya que era un espécimen que presentaba fracturas previas al ensaye. Por otro lado, los valores altos de porosidad, tanto abierta como cerrada (58%), se relacionan

directamente con los valores bajos de resistencia y cohesión: a mayor porosidad menor cohesión (Tabla 12). Finalmente, se puede mencionar que, en un espécimen con fracturas preexistentes, la eficiencia de los esfuerzos tangenciales va a depender de la orientación de las fracturas (con respecto al esfuerzo normal).

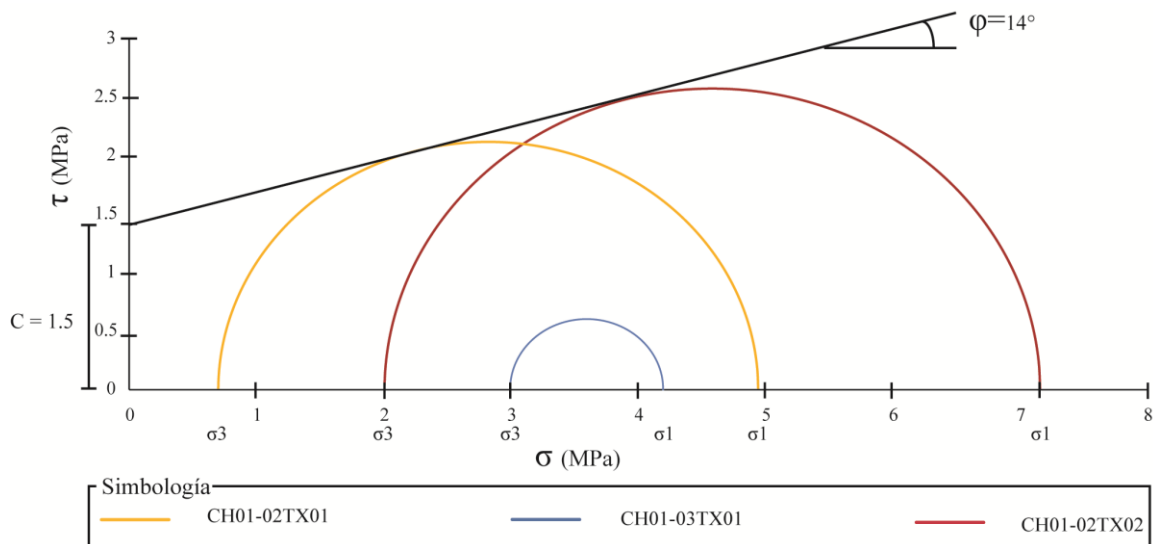


Figura 46. Círculos de Mohr, cohesión y ángulo de fricción interna, obtenidos a partir de los esfuerzos aplicados a los especímenes.

#### 4.5 Discusión general

En este apartado se discuten las generalidades de los resultados, a partir de la metodología implementada (Figura 47). Las metodologías utilizadas en este estudio, fueron de gran importancia para corroborar datos entre sí, debido a que cada una tiene diferentes limitaciones. Para conocer los porcentajes de poros fueron útiles principalmente la diferencia de densidades y la porosidad al vacío. Por su parte, la interconexión de los poros se corroboró con la permeabilidad al gas. Mientras que, para obtener la distribución de tamaño de poros se utilizó la Porosimetría de mercurio, y esta distribución de poros condiciona el comportamiento hídrico en pruebas como evaporación y capilaridad. Por último, para obtener valores de resistencia y deformación, se utilizó la compresión simple y triaxial.

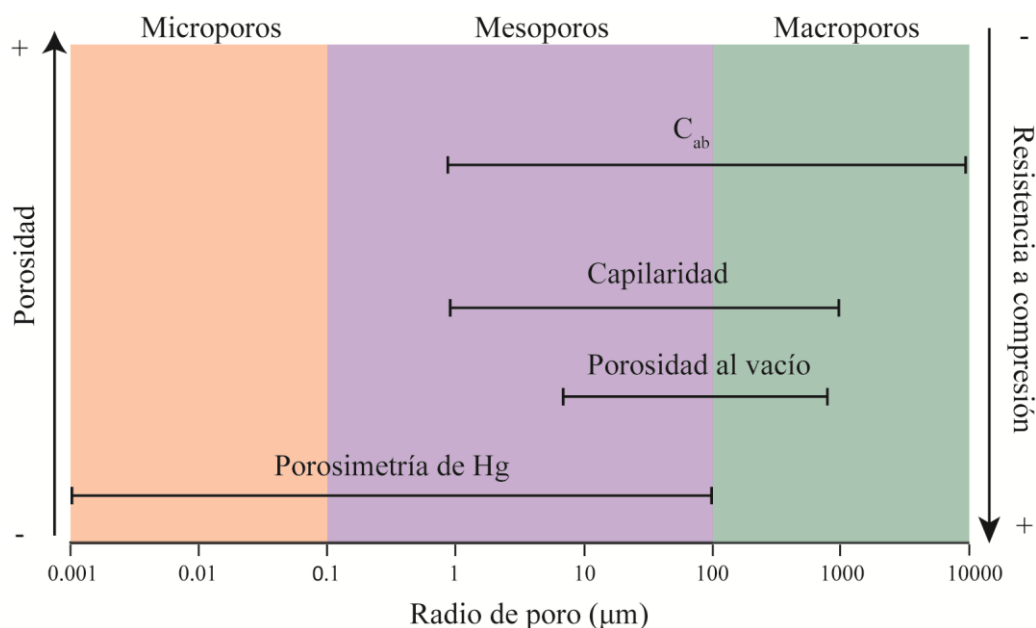


Figura 47. Gráfica que representa algunas de las metodologías utilizadas, las cuales se relacionan con el tamaño y distribución de poros. Así como la relación de porosidad y resistencia.

La densidad real y aparente muestra una diferencia de más del 50%, la cual depende en gran medida de la densidad de sus minerales y en su mayoría del sistema poroso de la roca. Ya que esta presenta una porosidad total promedio de 58% (Tabla 13), que justifica la diferencia de densidades. Así mismo, esta porosidad presenta dos rangos de distribución de poros: mesoporos (1-100  $\mu\text{m}$ ) y macroporos ( $> 100 \mu\text{m}$ ). Esta distribución se demostró con la porosimetría de mercurio y principalmente con el comportamiento hídrico que presentó la roca en pruebas como capilaridad, que permite obtener rango de poros de 1 a 1000  $\mu\text{m}$ , complementando radios de poros que el porosímetro de mercurio no permite obtener. El comportamiento capilar, se verificó con el comportamiento de evaporación de la roca, presentando un comportamiento similar, resaltando que la roca presenta dos familias de poros predominantes.

Por otro lado, la porosidad total, se divide en dos: abierta y cerrada, con valores de 44.75 % y 13.37% (Tabla 13), respectivamente. La porosidad abierta se tomó como la porosidad interconectada, que es la que se encarga del paso de fluidos a través de la roca,

siendo que mayor cantidad de poros se encuentran conectados, se obtuvieron permeabilidades de medias a altas las cuales van de 359.06 a 1841.40 mD, que corrobora la alta interconectividad de los poros de la roca. A sí mismo está permeabilidad se relaciona con los coeficientes de capilaridad y de absorción a presión atmosférica, ya que los especímenes que presentan coeficientes más grandes, corresponden a los especímenes con mayor permeabilidad, que a su vez coinciden con los especímenes de mayor porosidad abierta o interconectada, por lo que se corrobora que estos parámetros están directamente relacionados.

Los valores altos de porosidad, están directamente relacionados con los valores bajos de resistencia, resultados que están en concordancia con los valores de deformación axial y transversal medidos en los especímenes de roca. Esta situación es debida a que los poros fungen como zonas de debilidad, ya que reducen la sección en la que se ejercen los esfuerzos y concentran tensiones en los límites de su estructura. De esta forma, cuando se ejerce esfuerzos sobre el espécimen, este alcanza una resistencia menor con deformaciones axiales mayores (Tabla 13), lo que se corrobora con los valores bajos de las constantes elásticas: módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

Por otro lado, todos los valores obtenidos de las propiedades mencionadas anteriormente, se relacionan con diferentes grados de meteorización. En la densidad real los especímenes con menor meteorización presentan menor densidad, así como menor porosidad abierta, la cual en permeabilidad se toma como la porosidad interconectada y por lo tanto se refleja en los valores bajos de permeabilidad, en comparación a los valores altos de permeabilidad de los especímenes CH01-02 Y CH01-03. Y en la evaporación estos especímenes presentan mayor porcentaje de evaporación en su tiempo crítico, y en absorción por inmersión atmosférica también presentan valores más altos. Por último, en las propiedades mecánicas se presentaron inconvenientes en la metodología, y los valores obtenidos, para los especímenes CH01-02 Y CH01-03, se les atribuyen valores más bajos de resistencia. Por lo que el grado de meteorización influye en las propiedades físicas, hídricas y mecánicas de las rocas.

Tabla 13. Valores promedio y desviación estándar de todas las propiedades físicas, hídricas y mecánicas. \* UCS Karahman a partir del índice de resistencia a carga puntual.

Propiedad		Pómez Chichonal
<i>Propiedades físicas</i>		
$\rho_b$ (gr/cm <sup>3</sup> )		0.95 ± 0.04
$\rho_r$ (gr/cm <sup>3</sup> )		2.28 ± 0.06
Porosidades (%)	$\eta_o$	44.75 ± 4.18
	$\eta_c$	13.37 ± 4.30
	$\eta_t$	58.13 ± 0.32
Frecuencia de radio de poro ( $\mu$ m)	<0.01	0.81 ± 0.77
	0.01-0.1	2.19 ± 1.08
	0.1-1	12.09 ± 1.78
	1 a 10	18.18 ± 15.06
	10-100	66.71 ± 14.99
Tortuosidad ( $\tau$ )		2.18 ± 0.02
<i>Propiedades hídricas</i>		
Permeabilidad (mD)		966.42 ± 496.60
$C_{ab}$ (%)		52.55 ± 22.93
$E_r$ (%)		89.30 ± 2.00
Coeficiente capilar	Cc1	2.80 ± 0.77
	Cc2	0.05 ± 0.00
<i>Propiedades mecánicas</i>		
*USC (Karahman)		3.1 ± 0.1
USC (MPa)		5.648 ± 0.00
E (MPa)		1456.78 ± 1088.15
$\nu$		0.04 ± 0.05
C		1.14
$\Phi$		14°

## 5. Conclusiones

- La implementación de nuestra metodología ha sido eficaz en la caracterización física e hídrica detallada de las muestras de pómez del volcán el Chichonal. En particular, con base en que las pruebas hayan sido diseñadas de acuerdo a las normas

internacionales (p. ej. ASTM, UNE-EN), nuestros resultados pudieron ser comparados con resultados de otras investigaciones.

- Los resultados de densidad de sólidos obtenidos por medio de la intrusión de gas sugieren valores altos de densidad promedio, la cual es  $2.28 \text{ g/m}^3$ , que al ser comparados con rocas con una génesis similar (depósitos piroclásticos), presentan densidades similares que van de  $2.56$  a  $2.69 \text{ g/m}^3$ . Lo que podría indicar una similitud en el estilo eruptivo.
- Se caracterizó el sistema poroso en radios de poro menor a  $100 \text{ }\mu\text{m}$ , obteniendo dos familias de poros predominantes, sus características geométricas como la forma y tortuosidad: en general las muestras están constituidas por dos familias de poros ( $1$  a  $10 \text{ }\mu\text{m}$  y  $10$  a  $100 \text{ }\mu\text{m}$ ), con forma de cuello de botella.
- Las familias de poros dentro del rango de la técnica de mercurio ha sido posible corroborarlas con base en su comportamiento hídrico. El comportamiento hídrico caracterizado en pruebas de capilaridad y evaporación, el cual permitió identificar las familias de poros predominantes, que se distinguen en cambios de pendientes que se expresan en tales pruebas. Esto indica una gran facilidad de almacenar y transportar agua a través de la roca.
- La confiabilidad de los resultados de permeabilidad obtenidos con base en la implementación de la técnica de intrusión de gas depende en gran medida de la selección del tipo de prueba. Cabe señalar que la condición esencial de cualquier prueba es respetar las leyes de Darcy: La prueba de los cinco puntos (cinco valores de permeabilidad obtenidos con cinco diferencias presiones diferentes) logra expresar fielmente el comportamiento hídrico de la roca sometida a diferentes presiones. Las separaciones de los diferenciales de presión están estrechamente relacionadas con

características del sistema poroso como la tortuosidad, fracturas pre existentes y principalmente con la forma de la porosidad conectada.

- En general, en la bibliografía se ha resaltado que la resistencia mecánica de cualquier roca depende del contenido de elementos y su distribución. En este sentido, la resistencia a compresión simple, en conjunto con otras características físicas como la densidad, la porosidad y el estudio del sistema poroso sugieren que la resistencia de nuestras muestras depende del alto porcentaje de poros, mientras que el modo de fracturamiento y deformación va a depender del tamaño, forma, distribución y en general de la composición del sistema poroso. Por otro lado, las muestras que presentan resistencia baja contenían micro-fractura previas, así como una mayor intemperización, lo que generó una menor resistencia en los especímenes con mayor intemperización.
- La heterogeneidad y anisotropía de la roca en estudio es representada principalmente con la dispersión o desviaciones estándar de los valores de las propiedades en general. Siendo propiedades como la porosidad abierta o interconectada, la evaporación, la capilaridad y la permeabilidad, las propiedades que presentaron mayor dispersión de valores entre cada espécimen. Por otro lado, las gráficas de esfuerzo contra deformación (constantes elásticas) de diferentes especímenes sometidos a carga, presentan diferencia de pendiente, lo que indica una variación en las características del sistema de poroso de cada espécimen pertenecientes a la misma unidad de roca.
- El valor del índice de resistencia a compresión simple (Prueba de Carga Puntual), no es fiable si se calcula con la ecuación propuesta en la norma ASTM D5731-05, se tiene que buscar otras correcciones que se adapten a las particularidades de la roca y, aun así, la prueba de carga puntual arroja valores menores que los valores obtenidos a compresión simple debido a la forma de los punzones, ya que estos se clavan en los poros de la roca, y fractura localmente la roca.



- La porosidad es la propiedad que mayor influencia tiene dentro de la caracterización de este estudio. Ya que condiciona tanto el comportamiento hídrico como las respuestas de la roca ante esfuerzos compresivos. El comportamiento hídrico está condicionado principalmente por la porosidad abierta o interconectada, ya que facilita el acceso de fluidos a través de la roca, esto se relaciona con valores de medios a altos de permeabilidad el cual varía de 359.06 a 1841 mD. Por otra parte, el comportamiento mecánico, es condicionado tanto por la porosidad abierta que va de 33.55% a 49.36% como por la cerrada que va de 9.42% a 24.88%, ya que todos los poros afectan la distribución de las tensiones a través del espécimen.
- Estratigráficamente la roca en estudio pertenece a un flujo piroclástico del último periodo eruptivo del volcán El Chichonal. Tal flujo piroclástico de acuerdo a Macías, 1997 se describe rica en líticos en su parte basal y en los flancos del soma se encuentra representado por un depósito formado por abundante pómez suspendida en una matriz arenosa. Este estudio fue enfocado en los fragmentos de pómez, que de acuerdo a Scolamacchia y Capra 2015, este flujo se encuentra distribuido en las laderas del volcán, las cuales presentan poca vegetación en superficie, lo que contribuye a la meteorización de este flujo. En particular, la roca estudiada, presenta características en su sistema poroso que favorece a dicha meteorización. En general, los macroporos presentes en la superficie del afloramiento sufren procesos de degradación y los mesoporos contribuyen al almacenamiento de humedad generada por el agua que retiene. Por otra parte, la interconectividad de estos poros permite el transporte del agua meteórica a través de los poros abiertos e interconectados.

## 6. Bibliografía

- Alonso, F. J., Alonso, L., y Vázquez, P. (2012). Propiedades hídricas y anisotropía en rocas sedimentarias porosas. *Geotemas (SGE)*, 13/(October), 249.
- Alonso Rodriguez, F. J. (2002). *Porosimetría por inyección de mercurio*. Departamento de

*Geología, Universidad de Oviedo.* recuperado de [http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/4888/mod\\_resource/content/1/T3b-PorosimetriaMercurio.pdf](http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/4888/mod_resource/content/1/T3b-PorosimetriaMercurio.pdf)

Alonso Rodriguez, F. J. (2010). *La porosidad como propiedad física: propiedades densidad y porosidad.* Oviedo.

Alonso Rodriguez, F. J. (2010). *La Porosidad Como propiedad física: propiedades densidad y porosidad.* Oviedo. Recuperado de [http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/4887/mod\\_resource/content/1/T3b-DensidadPorosidad.pdf](http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/4887/mod_resource/content/1/T3b-DensidadPorosidad.pdf)

Andrews, B. J., Gardner, J. E., y Housh, T. B. (2008). Repeated recharge , assimilation , and hybridization in magmas erupted from El Chichón as recorded by plagioclase and amphibole phenocrysts. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, 415–426. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.02.017>

Angeli, M., Bigas, J. P., Menendez, B., Hebert, R., y David, C. (2006). Influence of capillary properties and evaporation on salt weathering of sedimentary rocks. *Proceedings of the International Conference on Heritage, Weathering and Conservation, HWC 2006*, 1, 253–259.

Authemayou, C., Brocard, G., Teyssier, C., Labric, T. S., Gutiérrez, A., Chiquín, E. N., y Morán, S. (2011). The Caribbean – North America – Cocos Triple Junction and the dynamics of the Polochic – Motagua fault systems : Pull - up and zipper models, 30, 1–23. <https://doi.org/10.1029/2010TC002814>

Benavente, D. (2006). Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales. Recuperado de <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/25571>

Broch, E., y Franklin, J. A. (1972). The point-load strength test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*, 9(6), 669–676. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(72\)90030-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(72)90030-7)

Damon, P., y Montesinos, E. (1978). Late Cenozoic volcanism and metallogenesis over an active Benioff zone in Chiapas, Mexico. *Arizona Geological Society Digest*, 11, 155–

- De Santiago Buey, C. de, y Raya García, M. (2008). Análisis del peso específico y porosidad de materiales porosos mediante picnometría de helio. *Ingeniería Civil*, (151), 95–103.
- Duffield, W. A., Tilling, R. I., y Canul, R. (1984). Geology of el chichon volcano, chiapas, mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 20, 117--132.
- Espindola, J. M. (1999). La actividad volcánica / J.M. Espíndola Castro.
- Espindola, J. M., Macías, J. L., Tilling, R. I., y Sheridan, M. F. (2000). Volcanic history of El Chichón Volcano ( Chiapas , Mexico ) during the Holocene , and its impact on human activity. *Bulletin of Volcanology*, 62, 90–104.
- Farquharson, J., Heap, M. J., Varley, N. R., Baud, P., y Reuschlé, T. (2015a). Permeability and porosity relationships of edifice-forming andesites: A combined field and laboratory study. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 297, 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.03.016>
- Farquharson, J., Heap, M. J., Varley, N. R., Baud, P., y Reuschlé, T. (2015b). Permeability and porosity relationships of edifice-forming andesites: A combined field and laboratory study. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 297, 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.03.016>
- García Palomo, A. (2004). El Chichón volcano , Strike-slip faults and K-alkaline volcanism at El Chicho southeastern Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 136, 247–268. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.04.001>
- Garduño-Monroy, V. H., Macías, J. L., y Molina Garza, R. S. (2015). Geodynamic Setting and Pre-volcanic Geology of Active Volcanism in Chiapas, 1–23. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25890-9>.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson.
- Guzmán-Speziale, M., Valdés-González, C., Molina, E., y Gómez, J. M. (2005). Seismic activity along the Central America volcanic arc: Is it related to subduction of the Cocos plate?. *Tectonophysics*, 400(1-4), 241-254.

<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.03.006>

- Hernández-Gutiérrez, L.E., y Santamarta, J. C. (2015). *Ingeniería Geológica en terrenos volcánicos* (Ilustre Co). Madrid.
- Juárez-Salazar, J. (2008). “ *Geología , petrología y geoquímica del Macizo de Chiapas , área de Motozintla de Mendoza*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Klinkenberg, L. J. (1941). The permeability of porous media to liquids and gases. In *Drilling and production practice*. American Petroleum Institute.
- Layer, P. W., Jones, D., Macías, J. L., Arce, J. L., y Mora, J. C. (2009). El Chichón volcanic complex , Chiapas , México : Stages of evolution based on field mapping and 40 Ar / 39 Ar geochronology. *Geofísica Internacional*, 48(1), 33–54.
- Layman, J. M., y Ahr, W. M. (2004). Porosity Characterization Utilizing Petrographic Image Analysis: Implications for Rapid Identification and Ranking of Reservoir Flow Units, Happy Spraberry Field, Garza County, Texas.
- Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J., Bonin, B., y Bateman, P. (Eds.). (2005). *Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge University Press.
- Luhr, J. F., Carmichael, I., y Varekamp, J. C. (1984). The 1982 eruptions of El Chichon volcano, Chiapas., Mexico: mineralogy and petrology of the anhydrite-bearing pumices. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 23, 69--108.
- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la sociedad geológica mexicana*, 379–424.
- Macías, J. L., Sheridan, M. F., y Espíndola, L. M. (1997). Reappraisal of the 1982 eruptions of El Chichón Volcano, Chiapas, México: new data from proximal deposits. *Bulletin of Volcanology*, 58(6), 459–471.
- Manea, M. y Manea, V. C. (2008). On the origin of El Chichón volcano and subduction of Tehuantepec Ridge : A geodynamical perspective, 175, 459–471. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.02.028>

- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., Jiménez Gutiérrez, S., García-del-Cura, M. A., y Ordóñez, S. (2017). Stone weathering under Mediterranean semiarid climate in the fortress of Nueva Tabarca island (Spain). *Building and Environment*, 121, 262–276. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.034>
- Mooser, F., Meyer-Abich, H., y McBirney, A. R. (1958). *Catalogue of the Active Volcanoes of the World Including Solfatara Fields: Catalogue of the Active Volcanoes and Solfatara Fields of Central America*. International Volcanological Association.
- Mora, J. C., Jaimes-Viera, M. C., y Garduño-Monroy, V. H. (2007). Geology and geochemistry characteristics of the Chiapanecan Volcanic Arc ( Central Area ), Chiapas Mexico, 162. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.12.009>
- Müllerried, F. K. G. (1933). El Chichón, único volcán en actividad descubierto en el estado de Chiapas. *Memorias de La Sociedad Científica Antonio Alzate*, 54, 411–416.
- Navarrete, M., Molina, W. M., Alonso-Guzmán, E. M., Lara-Gómez, C., Bedolla-Arroyo, J. A., Chávez, H., y Arteaga, J. C. (2013). Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura. *Revista ALCONPAT*, 3(2), 129-139.
- Nolen-hoeksema, R. (2014). El flujo de fluidos a través de los poros. *Oilfield Review*, 26(3), 68–70.
- Pérez-Pacheco, G. (2011). *Influencia de parámetros petrofísicos en la determinación indirecta de la permeabilidad absoluta en rocas de yacimientos petroleros*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pola, A., Crosta, G. B., Castellanza, R., Agliardi, F., Fusi, N., Barberini, V., Norini, G., y Villa, A. (2010). Relationships between porosity and physical mechanical properties in weathered volcanic rocks. In *ISRM International Workshop on Rock Mechanics and Geoengineering in Volcanic Environments*. International Society for Rock Mechanics.
- Raith, M. M., Raase, P., y Reinhard, J. (2012). *Guide to thin section microscopy*. Second Edition. Book. University of Bonn. Recuperado de [http://www.dmg-home.de/pdf/Guide-print quality.pdf](http://www.dmg-home.de/pdf/Guide-print%20quality.pdf)

- Romaña, J. (2014). *Los Límites de la Ley de Darcy*. Bdigital.Unal.Edu.Co. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/45359/1/200722150.2014.pdf%0Ahttp://www.bdigital.unal.edu.co/45359/>
- Rotonda, T., Tommasi, P., y Boldini, D. (2010). Geomechanical Characterization of the Volcaniclastic Material Involved in the 2002 Landslides at Stromboli. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136, 389–401.
- Schubert, W., y Kluckner, A. (2015). *Future development of rock mechanics*. Medienfabrik Graz GmbH.
- Scolamacchia, T., y Capra, L. (2015). El Chichón Volcano: Eruptive History. In *Active Volcanoes of Chiapas (Mexico): El Chichón and Tacaná* (pp. 45-76). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Siegesmund, S., & Snethlage, R. (2011). *Stone in Architecture* (Four editi). Bamberg, Germany: Springer Berlin Heidelberg.
- Sigurdsson, H., Carey, S. N., y Espíndola, J. M. (1984). The 1982 eruptions of El Chichón Volcano, Mexico: Stratigraphy of pyroclastic deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 23(1–2), 11–37. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90055-6](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90055-6)
- Speziale-Guzmán, M. (1989). boundary between the Caribbean and the correlate with other geological and geophysical Guzmgn Speziale et al .: North America-Cocos-Caribbean Triple Junction Fig . 1 . The North America-Cocos-Caribbean plates triple junction area and its tectonic and loca. *Tectonics*, 8(5), 981–997.
- Spieler, O., Kennedy, B., Kueppers, U., Dingwell, D. B., Scheu, B., y Taddeucci, J. (2004). The fragmentation threshold of pyroclastic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 226(1–2), 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.07.016>
- Stow, D. (1997). *Sedimentary Rocks in the Field*. *Sedimentary Geology* (Vol. 109). [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(96\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(96)00039-5)
- Suárez-González, A. (2014). *Estudio del potencial de almacenamiento de CO2 en rocas de facies Cretácicas de la formación Boñar a partir de ensayos de densidad, porosidad y*

*permeabilidad*. Universidad de León.

Thomas, N., Jaupart, C., y Vergnolle, S. (1994). On the vesicularity of pumice. *Journal of Geophysical Research*, 99(B8), 633–644.

Tiab, D., y Donaldson, E. C. (2015). *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. Gulf professional publishing.

Varekamp, J. C., Luhr, J. F., y Prestegard, K. L. (1984). The 1982 eruptions of El Chichón Volcano (Chiapas, Mexico): character of the eruptions, ash-fall, and gasphase. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 23(1-2), 39-68.

Winter, J. D. (2001). *An introduction to igneous and metamorphic petrology* (Vol. 697). New Jersey: Prentice hall.