



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Caracterización del material rocoso mediante ensayos de  
mecánica de rocas, caso de estudio: Andesitas del  
Cojitambo”**

Trabajo de Graduación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN MINAS**

**Autor:**

ANDRÉS NICOLÁS AGUIRRE LARRIVA

**Director:**

ERNESTO PATRICIO FEJOO CALLE

**CUENCA, ECUADOR**

**2022**

## **DEDICATORIA**

Primero a mi madre, Catalina Larriva que, gracias a sus valores y sus sacrificios me brindó la oportunidad de concluir mi formación académica de tercer nivel, igual que su apoyo incondicional estuvo en los momentos más difíciles de mi vida, siempre con una palabra de aliento y ayudándome a crecer como persona y profesional, eres mi ejemplo a seguir. A mis hermanos Adrián y Aracely Aguirre, quienes han sido mis aliados en cada una de mis metas trazadas. A mis sobrinos que los adoro con todo mi corazón. A Delfina Concepción que es como una segunda madre. Y a todos ellos, que me brindaron su apoyo incondicional en cada decisión tomada. Por un millón de razones más, les doy gracias y les debo todo lo que soy y lo que seré.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mi tutor de tesis Patricio Feijoo, por el apoyo y tiempo que me brindo en el transcurso del desarrollo de mi trabajo de grado, por sus consejos acertados que fueron una guía durante mi vida universitaria y en la preparación para ser un excelente profesional.

A mis docentes Universitarios Leonardo Núñez, Eduardo Luna, Juan Calderón, Fernando Valencia y Federico Auquilla, que fueron la base para mi aprendizaje, y gracias a sus esfuerzos diarios y conocimientos brindados, permiten la formación de nuevos profesionales en el campo de la minería.

A la persona que siempre estuvo a mi lado incondicionalmente, Camila Iñiguez con su cariño incondicional, a mis amigos Kevin, Francisco y compañeros, quienes formaron parte de mi vida creando los mejores recuerdos en esta travesía, a mi jorga quienes siempre han estado a mi lado incondicionalmente con sus consejos y apoyo.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS</b> .....	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE ANÉXOS</b> .....	<b>x</b>
<b>RESUMEN</b> .....	¡Error! Marcador no definido.i
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>3</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
1.1 Geología y su caracterización.....	3
1.2 Propiedades físicas de las rocas.....	3
1.2.1. Rocas ígneas.....	4
1.2.2. Rocas sedimentarias.....	5
1.2.3. Rocas metamórficas.....	7
1.3 Marco geomorfológico del Ecuador.....	8
1.3.1. Costa.....	8
1.3.2. Sierra.....	9
1.3.3. Oriente.....	9
1.4 Formación Azogues.....	10
1.5 El cerro Cojitambo.....	11
1.6 Génesis de las muestras.....	11
1.7 Andesitas.....	12
1.8 Resistencia a la compresión simple (RCS).....	12
1.9 Ensayo de compresión simple.....	13
1.10 Tipos de ruptura por compresión.....	14
1.10.1 Por fragmentación.....	14
1.10.2 Por fractura.....	14
1.11 Índice de carga puntual.....	15
1.12 Metodología de obtención del Is (50)......	16
1.13 Correlación entre resistencia a la compresión simple y el índice de Carga Puntual o Is (50).....	18

1.14	Densidad.....	20
1.14.1.	La densidad global.....	20
1.15	Porosidad.....	21
1.16	Absorción.....	23
1.16.1	Absorción en física.....	23
1.16.2	Absorción en química.....	23
1.17	Programación lineal.....	24
1.17.1	Historia.....	24
1.17.2	La programación matemática.....	24
1.17.3	Sistemas de desigualdades lineales, método grafico.....	25
1.17.4	Tipos de problemas de programación lineal.....	26
1.17.5	Ecuaciones lineales con dos incógnitas.....	27
	<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>28</b>
	METODOLOGÍA.....	28
2.1	Ensayo de materiales.....	28
2.2	Norma de estandarización.....	28
2.3	Número y tamaño de probetas.....	28
2.4	Equipos necesarios para los ensayos.....	28
2.5	Instrumento de recolección de datos.....	29
2.6	Ensayo de volumen.....	30
2.7	Ensayo de densidad.....	31
2.8	Ensayo de la Porosidad abierta.....	32
2.9	Ensayo de absorción.....	33
2.10	Ensayo de carga puntual (Ensayo Franklin).....	34
2.11	Ensayo en la prensa de Humboldt.....	35
2.12	Ecuación de la recta.....	36
2.13	Método grafico para resolver problemas de Programación lineal.....	38
	<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>40</b>
	EXPERIMENTACIÓN.....	40
3.1	Número de muestras y preparación.....	40
3.2	Pre-medición y enumeración de las probetas.....	42
3.3	Dimensionamiento.....	42
3.4	Ensayo de densidad en mina.....	46
3.5	Ensayo de porosidad en mina.....	50

3.6	Ensayo de absorción en mina.....	55
3.7	Determinación de la resistencia a la compresión simple. ....	59
	<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>64</b>
	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>64</b>
4.1	Análisis de resultados de la densidad, porosidad, absorción y la RCS .....	64
4.2	Análisis de los resultados obtenidos .....	66
4.2.1	Representación de la densidad ( $\rho$ ).....	66
4.2.2	Representación de la porosidad ( $\eta$ ) .....	69
4.2.3	Representación de la absorción ( $\omega$ ).....	73
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>78</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>78</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>79</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>80</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>82</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 afloramiento de roca ígnea plutónica.....	4
Figura 1.2 roca ígnea plutónica.....	5
Figura 1.3 afloramiento de caliza roca sedimentaria .....	6
Figura 1.4 caliza roca sedimentaria.....	6
Figura 1.5 rocas metamórficas comunes .....	7
Figura 1.6 rocas metamórficas .....	8
Figura 1.7 marco geomorfológico del ecuador .....	9
Figura 1.8 zona de la parroquia de cojitambo .....	10
Figura 1.9 cerro cojitambo .....	11
Figura 1.10 especificaciones de la prensa. ....	13
Figura 1.11 fracturas como resultado de compresión .....	15
Figura 1.12 clasificación de las rocas a la compresión uniaxial. ....	16
Figura 1.13 áreas transversales de una probeta.....	17
Figura 1.14 densidad, porosidad y materiales de construcción.....	21
Figura 1.15 gráfica normal con una recta separando dos regiones .....	25
Figura 1.16 área factible y no factible de una gráfica .....	26
Figura 2.1 modelo de una probeta cuadrangular .....	30
Figura 2.2 Modelo de balanza para el estudio.....	32
Figura 2.3 vaso precipitado .....	34
Figura 2.4 Ensayo de carga puntual mediante la prensa Franklin.....	35
Figura 2.5 Prensa de Humboldt.....	36
Figura 2.6 grafica de coordenadas x, y .....	37
Figura 2.7. Representación gráfica de programación lineal.....	39
Figura 3.1 Puntos de referencia UTM.....	40
Figura 3.2 Geometría de las probetas.....	41
Figura 3.3 Geometría de las probetas cortadas según las medidas .....	41
Figura 3.4 Enumeración de las probetas .....	42
Figura 3.5 Dimensionamiento de los lados “a” y “b” .....	43
Figura 3.6 Dimensionamiento del lado “c” .....	43
Figura 3.7 Medición de probetas del lado “a”.....	45
Figura 3.8 Medición de probetas del lado “b” .....	45
Figura 3.9 Medición de probetas del lado “c”.....	46

Figura 3.10 Pesado de la probeta de roca número "1" .....	48
Figura 3.11 Pesado de la probeta de roca número "20" .....	48
Figura 3.12 Pesado de la probeta de roca número "40" .....	49
Figura 3.13 Pesado de la probeta de roca número "60" .....	49
Figura 3.14 Cinco primeras probetas al horno .....	50
Figura 3.15 Temperatura promedio del horno .....	51
Figura 3.16 Peso inicial de la probeta "20" .....	51
Figura 3.17 Peso medio de la probeta "20" .....	52
Figura 3.18 Peso final de la probeta "20" .....	52
Figura 3.19 Sigüientes cinco probetas en el horno .....	54
Figura 3.20 El mismo proceso para todas las demás probetas .....	54
Figura 3.21 Vaso precipitado con 400 mm de agua .....	55
Figura 3.22 Probeta sumergida en el vaso precipitado .....	56
Figura 3.23 Primeras cinco muestras en agua por 1 hora .....	57
Figura 3.24 Probetas en papel absorbente por 5 segundos .....	58
Figura 3.25 Peso probeta seca .....	58
Figura 3.26 Peso probeta mojada .....	59
Figura 3.27 Especificaciones de la Prensa de Humboldt .....	60
Figura 3.28 Indicador digital DIR .....	60
Figura 3.29 Ruptura de probeta en la prensa de Humboldt .....	61
Figura 3.30 Probeta antes de la ruptura .....	63
Figura 3.31 Probeta rota .....	63
Figura 4.1 Valores de densidad con su respectiva $I_s(50)$ .....	66
Figura 4.2 Coordenada X, Y de absorción de la densidad .....	67
Figura 4.3 Área de influencia de densidad con su respectivo $I_s(50)$ .....	67
Figura 4.4 Valores de porosidad con su respectivo $I_s(50)$ .....	70
Figura 4.5 Área de influencia de porosidad con si respectivo $I_s(50)$ .....	71
Figura 4.6 Valores de absorción con su respectivo $I_s(50)$ (Aguirre, 2021). .....	74
Figura 4.7 Área de influencia de absorción con su respectivo $I_s(50)$ .....	75

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 2.1 Modelo para la toma de datos .....	30
Tabla 2.2 Modelo para la toma de datos de secado de probetas .....	32
Tabla 3.1 Medidas de cada probeta.....	44
Tabla 3.2 Datos de densidad de cada probeta .....	47
Tabla 3.3 Procesos de datos de secado de las probetas.....	50
Tabla 3.4 Datos de porosidad de cada probeta.....	53
Tabla 3.5 Datos de absorción de cada probeta.....	57
Tabla 3.6 Datos de absorción de cada probeta.....	62
Tabla 4.1 Resultados de todos los procesos .....	64
Tabla 4.2 Coordenada X, Y de porosidad .....	70
Tabla 4.3 Coordenada X, Y de absorción .....	74

## ÍNDICE DE ANÉXOS

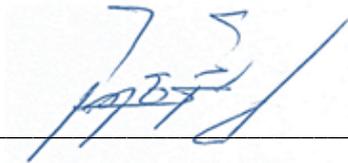
Anexo 1. Revisión y enumeración de cada probeta .....	82
Anexo 2. Pesado y enumeración de las probetas .....	82
Anexo 3. Igualdad de agua en vasos para las probetas .....	83
Anexo 4. Resultado de ruptura de una probeta .....	83
Anexo 5. Enumeración de las probetas.....	84
Anexo 6. Muestras para el horno.....	85
Anexo 7. Muestras en tiempo de secado a temperatura ambiente.....	85

**“CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ROCOSO MEDIANTE ENSAYOS  
DE MECÁNICA DE ROCAS, CASO DE ESTUDIO: ANDESITAS DEL  
COJITAMBO”**

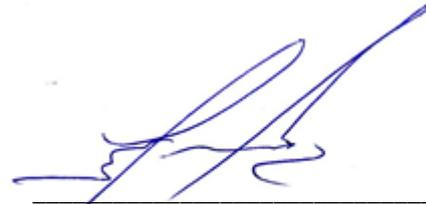
**RESUMEN**

En este trabajo se desarrolló una metodología para la caracterización del material rocoso, mediante la determinación aproximada del índice de carga puntual ( $I_s 50$ ); correlacionándolo con tres propiedades físicas de la roca: densidad, porosidad y absorción, mismas que se pueden ejecutar en el campo. Para ello, se realizaron ensayos sobre un mismo material o roca, proveniente de la zona denominada Cojitambo (Cañar - Ecuador), con una base de 60 probetas que fueron elaboradas previamente. Se determinaron ecuaciones mediante programación lineal, lo que permitió definir zonas de influencia para cada propiedad. Los resultados fueron que la roca es una andesita de clase dura, de uso ornamental y/o de construcción, por su buena resistencia a la compresión, siendo un material factible de ser trabajado gracias a sus características. La densidad, porosidad y absorción “in situ” fueron de  $2.29 \text{ g/cm}^3$  a  $2.56 \text{ g/cm}^3$ , 1.01 % a 2.49 % y 1.06 % a 3.63 %, respectivamente; estructurando una metodología de cálculo para el objetivo planteado.

**Palabras clave:** resistencia a la compresión simple, roca, densidad, porosidad.



Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle  
**Director del Trabajo de Titulación**



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas  
**Coordinador de Escuela**



Andrés Nicolas Aguirre Larriva

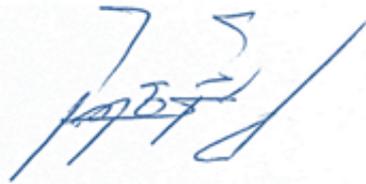
**Autor**

**“CHARACTERIZATION OF THE ROCKY MATERIAL BY TESTS OF  
ROCK MECHANICS, CASE STUDY: ANDESITAS DEL COJITAMBO”**

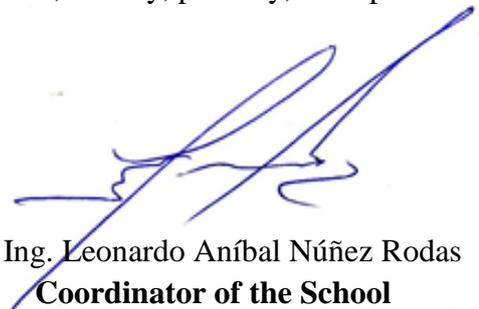
**ABSTRACT**

In this work, a methodology was developed for the characterization of the rock material, by means of the approximate determination of the point load index (Is50); correlating it with three physical properties of the rock: density, porosity and absorption, which can be carried out in the field. For this, tests were carried out on the same material or rock, from the area called Cojitambo (Cañar - Ecuador), with a base of 60 samples that were previously elaborated. Equations were determined through linear programming, which allowed to define buffers for each property. The results were that the rock is a hard class andesite, for ornamental and/or construction use, due to its good resistance to compression, being a feasible material to be worked thanks to its characteristics. The density, porosity and absorption "in situ" were from 2.29 g / cm<sup>3</sup> to 2.56 g / cm<sup>3</sup>, 1.01 % to 2.49 % and 1.06 % to 3.63 %, respectively; structuring a calculation methodology for the stated objective.

**Keywords:** Resistance to simple compression, rock, density, porosity, absorption



Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle  
**Director of the Degree Project**



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas  
**Coordinator of the School**



---

Andrés Nicolás Aguirre Larriva  
**Author**



**Language department**

**Translated by**



Andrés Nicolás Aguirre Larriva

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Enero, 2022

## **CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ROCOSO MEDIANTE ENSAYOS DE MECÁNICA DE ROCAS, CASO DE ESTUDIO: ANDESITAS DEL COJITAMBO**

### **INTRODUCCIÓN**

Para el desarrollo de explotaciones mineras y de canteras, es necesario la valoración de factores de seguridad y de estabilidad, al igual que los sistemas de fortificación en las obras o estructuras mineras. Todos estos factores se pueden determinar mediante la resistencia a la compresión simple de las rocas (RCS), gracias a este parámetro es posible realizar clasificaciones de los macizos rocosos, como Rock Mass Rating (RMR) o el índice Q, que sirven para calcular la estabilidad de las rocas, ya sea para minería subterránea o a cielo abierto.

La resistencia de una roca o de sedimentos no bien consolidados están influenciados por la mineralogía de sus partículas y por el contacto que hay entre ellas (Feijoo & Padrón, 2020). Debido a las condiciones del trabajo minero, con la finalidad de agilizar estos procesos y de disminuir gastos, causados por el alto costo de los ensayos para la determinación de la compresión simple y otras características de la roca, al igual que pérdidas de tiempo entre el envío de las muestras al laboratorio hasta la obtención de los resultados, se busca una alternativa in situ para la valoración RCS y sus propiedades físicas.

El comportamiento de una masa o macizo de roca puede presentarse de dos formas, como material rocoso que es muy fuerte y como macizo rocoso que casi siempre presenta estructuras llamadas diaclasas (fracturas, fisuras, juntas, discontinuidades, fallas de varios tamaños). Prácticamente todas las rocas que forman los kilómetros de la corteza terrestre están atravesadas por fisuras y grietas de corta extensión (Iriondo, 2014).

Es necesario analizar cada una de las propiedades de las rocas que se verán involucradas y correlacionadas entre sí, tomando en consideración que la heterogeneidad de los materiales o rocas, pueden ser un limitante para su análisis incluso en rocas aparentemente isótropas y homogéneas (Ragan, 1980), las propiedades pueden variar según el grado de cementación o por las variaciones en la composición mineralógica.

Luego de analizar las propiedades físicas de las probetas que son: densidad, porosidad y absorción; se logró correlacionarlas con su resistencia a la compresión simple en un plano cartesiano, observando una dispersión de puntos, que representan los valores de cada probeta analizada. Posteriormente mediante la utilización de programación lineal y sobre un eje, se delimito una región donde la mayoría de las probetas se encuentran dentro de un área, siendo está la solución, obteniendo cuatro ecuaciones que delimitarán una zona de interés, estas ecuaciones permitirán caracterizar el material.

## **CAPÍTULO 1**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **1.1 Geología**

Siendo la geología una ciencia muy visual, es necesario una gran cantidad de información sobre la relación que existe entre las personas y el medio ambiente, asimismo explorar la aplicación de la geología para comprender y resolver problemas que surgen a diario, convirtiéndose en una ciencia que se divide en dos áreas principales: la física y la histórica.

La geología física comprende a los materiales que componen la tierra buscando entender los diferentes procesos que actúan debajo y encima de la corteza terrestre.

La geología histórica es deducir el origen y su evolución al largo del tiempo. Esto hace que una gran parte de la geología se base en observaciones y experimentaciones en el campo, también es necesario la realización de pruebas en laboratorio que comprenden a muchos procesos básicos y principios de la física, química y la biología (Tarbuck & Lutgens, 2005).

#### **1.2 Propiedades físicas de las rocas**

Normalmente las propiedades físicas más utilizadas que sirven para definir una roca son que tan sólida, y dúctil o resistente pueden llegar a ser, esto permitirá comprender los procesos básicos geológicos como es el volcanismo, formaciones montañosas entre otros. Al examinar una roca con atención se observa cristales o granos muy pequeños denominados minerales, cada uno de ellos está compuesto con una estructura propia es decir diferentes texturas, cristalización, composición, etc.

Siendo estas propiedades aplicadas para la comprensión de nuestro planeta y en la búsqueda de recursos energéticos y soluciones a problemas ambientales. Los geólogos dividen a las rocas en tres grandes grupos básicos, relacionando los procesos que actúan sobre y dentro del planeta estos tres grandes grupos se dividen en: rocas ígneas, rocas sedimentarias y rocas metamórficas. (Tarbuck & Lutgens, 2005)

### 1.2.1. Rocas ígneas

Las rocas ígneas son formadas por roca fundida denominada magma y se puede formar a varios niveles de profundidad en el interior de la corteza terrestre y que posteriormente, por el enfriamiento del magma se genera diferentes cristalizaciones y minerales, esto permite la formación de cristales. Las rocas ígneas son de grano grueso y se denominan plutónicas, siendo ricas en cuarzo y feldespatos, las rocas ígneas de grano fino se llaman volcánicas y son muy abundantes como es el caso de los basaltos. (Tarbuck & Lutgens, 2005).



Figura 1.1 Afloramiento de roca ígnea plutónica.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).



Figura 1.2 Roca ígnea plutónica.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

### **1.2.2. Rocas sedimentarias**

En las rocas sedimentarias, la materia prima es acumulada mediante capas en la superficie terrestre, y provienen de rocas preexistentes que por los procesos de meteorización se modificaron y se disgregaron por procesos físicos y químicos, los cuales fueron transportados por el agua el viento o el hielo glacial y fueron depositados en una cuenca sedimentaria, convirtiéndolos en sedimentos gracias a la compactación y la cementación creando una masa sólida. Aquellos que son transportados como partículas son llamados sedimentos detríticos los cuales forman rocas sedimentarias detríticas como son las lutitas y las areniscas.

Dentro de la composición mineral también se puede encontrar las rocas sedimentarias químicas que surgen cuando el material disuelto en el agua se precipita, por lo que existen muchas variedades, pero la más conocida es la caliza que es rica en minerales como carbonato de calcio y son utilizados por organismos vivos. Los geólogos utilizan los sedimentos como detalles históricos de la tierra ya que forman parte de ambientes de la superficie del pasado y pueden llegar a contener fósiles que son pruebas del pasado geológico de las rocas. (Tarbuck & Lutgens, 2005)



Figura 1.3 Afloramiento de caliza, roca sedimentaria.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).



Figura 1.4 Caliza, roca sedimentaria.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

### 1.2.3. Rocas metamórficas

Estas se producen a partir de las rocas ígneas, sedimentarias e incluso a partir de rocas metamórficas, donde las rocas cambian de forma, debido a cambios en la temperatura y en las presiones que se dan dentro de la corteza terrestre, estos procesos van desde cambios ligeros hasta cambios sustanciales, por ejemplo, una lutita en su forma compactada puede convertirse en una pizarra, pero no obstante durante la metamorfosis la roca permanece esencialmente en estado sólido, los metamorfismos pueden darse en tres ambientes diferentes que son: metamorfismo térmico, metamorfismo hidrotermal y metamorfismo regional. Esto se reflejará en la textura de la roca y en su composición mineral al igual que la orientación de su cristalización. Podemos encontrar diferentes depósitos de rocas ígneas de grano grueso la más común es el mármol.(Tarbuck & Lutgens, 2005)



Figura 1.5 Rocas metamórficas comunes.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).



Figura 1.6 Roca metamórfica.

Fuente: (Tarbuck & Lutgens, 2005).

### **1.3 Marco geomorfológico del Ecuador**

El Ecuador está limitado por los países Colombia al norte y Perú al sur, se emplaza en tres regiones diferentes; El oriente o región selvática que constituye la cuenca amazónica, esta se encuentra desde los 200 hasta los 800 m.s.n.m. La Sierra que se encuentra en cordilleras occidental y real con alturas de 2500 a 2800 m.s.n.m, denominada como callejón andino, observando altas montañas que oscilan los 5500 a 6300 m.s.n.m, como por ejemplo el Chimborazo. Y por último la Costa que es la región más baja que está limitada por el Océano Pacífico, aquí se encuentra las cuencas de Guayas, Manabí, entre otros. Bajo el punto de vista geomorfológico, estas regiones obedecen las siguientes características geológicas: (Nuñez del Arco, 2003)

#### **1.3.1. Costa**

Esta representa el cerco frontal, aquí se insertan cuencas sedimentarias como la cuenca de Borbón; en el norte de Manabí, en la zona central encuentra la cuenca del Progreso y la del Golfo y, la región sur es caracterizada por llanuras, cubiertas por sedimentos terciarios y cuaternarios. (Nuñez del Arco, 2003)

### 1.3.2. Sierra

Formada por los Andes, se emplaza a lo largo de todo el país, presenta dos cadenas montañosas: la Occidental y la Central o Real, así como una región intermedia deprimida, conocida como el valle o callejón interandino. El callejón interandino da paso a formaciones de valles o cuencas, estas cuencas interandinias se encuentran rellenas de depósitos sedimentarios de origen continental, además hay una alta presencia de volcanes, por lo que se observa una gran variedad de materiales volcánicos cuaternarios que cubren las extensas áreas del sur. Este panorama se hace evidente en las cuencas en las regiones de Azuay-Cañar, Nabón, Loja y Malacatos. (Nuñez del Arco, 2003)

### 1.3.3. Oriente

Esta región está constituida por dos regiones distintas como: la cuenca Amazónica y la plataforma de Tiputini, formadas por mesetas y terrazas interrumpidas, cubiertas por sedimentos terciarios sub-horizontales, se caracteriza por ser una extensa área semi accidentada cubierta de jungla también conocida como zona subandina que comprende las estribaciones orientales de la cordillera. (Nuñez del Arco, 2003)

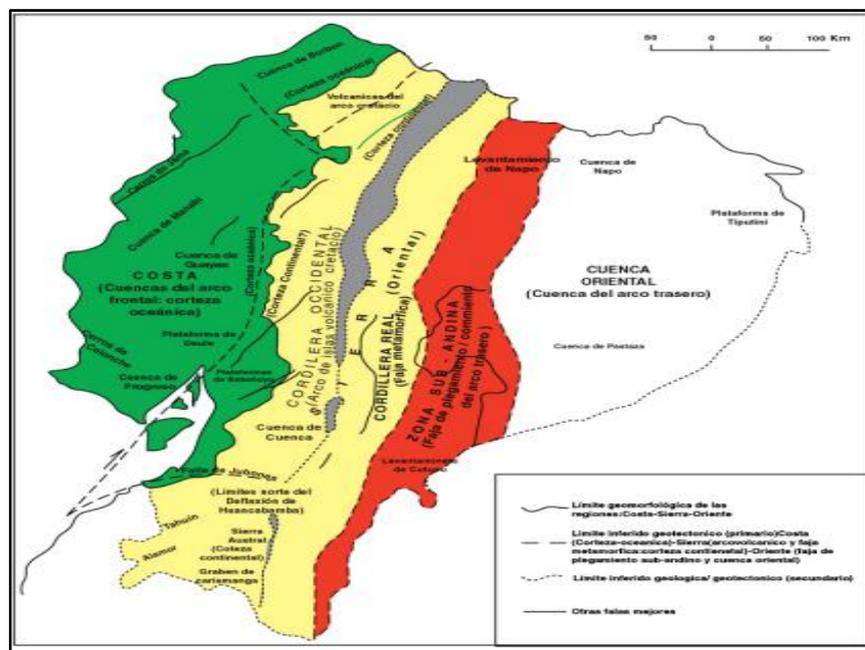


Figura 1.7 Marco geomorfológico del Ecuador.

Fuente: (Nuñez del Arco, 2003).

## 1.4 Formación Azogues

La formación Azogues es considerada del Mioceno Medio, ya que se desarrolló a través de una cuenca sedimentaria, con dos flancos aflorados que son: Biblián, que se extiende en sentido norte-sur a lo largo de la ciudad y hasta el centro del poblado de Cojitambo, está cubierta de afloramientos de areniscas que pueden ser observados en el costado occidental de la vía Cuenca-Azogues. El Cantón Cañar, ubicado en la altiplanicie de la Cordillera de Los Andes, tiene una topografía accidentada, presentando elevaciones de diferentes alturas en toda su geografía. Su litología presenta areniscas tobáceas, de color café, de grano medio grueso con presencia de limolitas, arcillas y lulitas, y en las capas superiores afloran aglomerados volcánicos muy pálidos, se sabe que esta formación es de 280 metros, y se encontraron fósiles como *Corbícula spHmesinusSp*, *atlacostoma peyeri dickersoni* y *Diplodón* siendo prácticamente similar a la formación Loyola. (Nuñez del Arco, 2003)

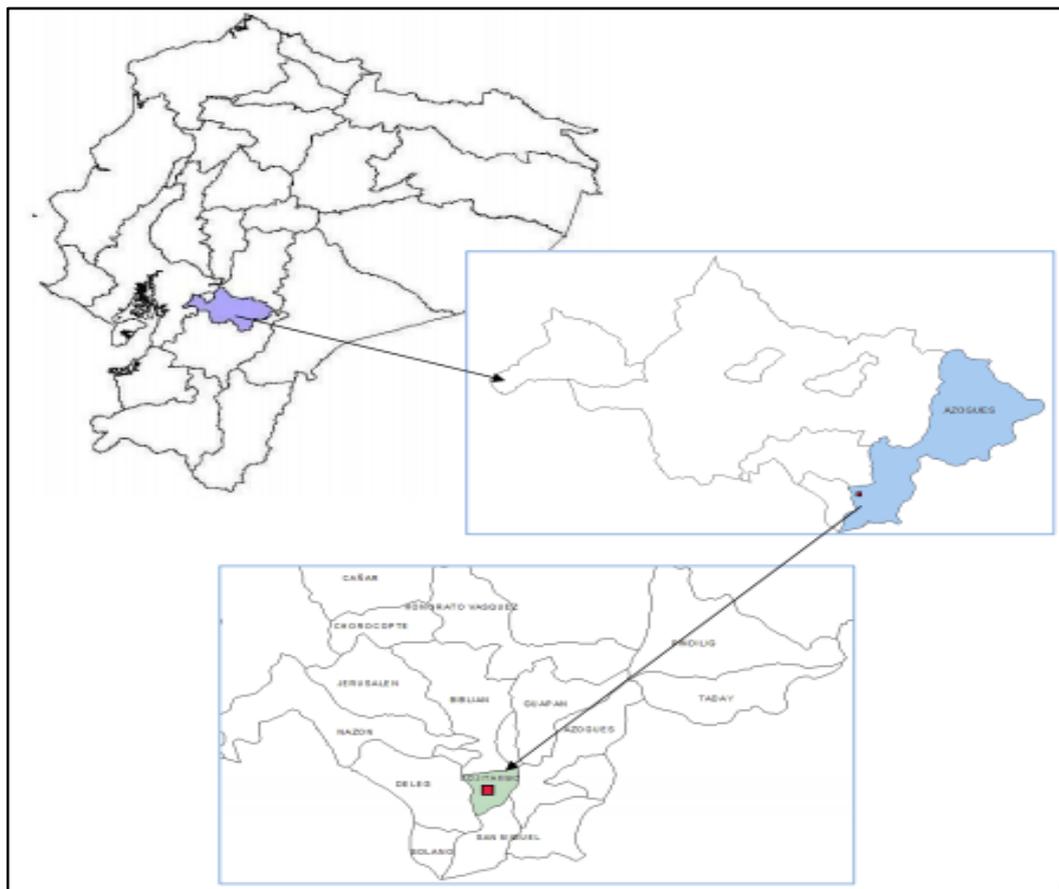


Figura 1.8 Zona de la parroquia de Cojitambo.

Fuente: (Roura, 2010).

### 1.5 El cerro Cojitambo

El Cojitambo está ubicado al oeste del cantón Azogues a una distancia de 10 km. Presenta agentes atmosféricos que modifican su suelo; posee un clima templado en el cual se presentan temperaturas cercanas a los 12°C, la mayoría de su terreno se encuentra por encima de los 3000 metros sobre el nivel del mar y posee solamente dos estaciones, verano e invierno. Provocando que su topografía sea bastante accidentada. (Castillo & Cajas, 2011)



Figura 1.9 Cerro Cojitambo.

Fuente: (Roura, 2010).

### 1.6 Génesis de las muestras

El cerro Cojitambo presenta una variedad típica de la andesita anfibólica; posee un color gris claro que se distingue perfectamente y se extiende entre los pueblos de Déleg y Chuquipata. En el cerro Cojitambo, cercano a Azogues se presenta arenisca cretácea que forma un macizo bastante homogéneo de andesita anfibólica. (Bedoya & Angel, 1961)

Se puede encontrar algunas vetas y diques de lava andesítica que rompieron la formación volcánica al igual que el cerro Cojitambo, resultando en una andesita.

Actualmente se puede observar un color gris en las partes de los peñascos del cerro, las cuales son utilizadas para pavimentos, construcción de fachadas entre otras, también se sabe que en la parte de Azogues y Biblián existen una variedad de minerales como: mármoles, tobas, carbón de piedra, mercurio y arenas auríferas. (Bedoya & Angel, 1961).

### **1.7 Andesitas**

Son rocas ígneas intermedias de color gris, poseen grano fino y su origen es volcánico; es por eso su nombre de andesita, debido a que proviene de los volcanes que están formados por los Andes de América del Sur y por estructuras que se encuentran alrededor del Océano Pacífico que tienen su misma composición.

La andesita se puede parecer a la riolita debido a la composición, por eso es necesario analizar con microscopio, la andesita suele tener una textura porfídica, en donde los cristales son claros y rectangulares son plagioclasas y cristales negros y alargados son anfíboles, la andesita contiene cuarzo en pequeñas cantidades a comparación de la riolita (Tarbuck & Lutgens, 2005).

### **1.8 Resistencia a la compresión simple (RCS)**

También conocida como resistencia uniaxial, es una medición muy importante en Mecánica de Suelos ya que permite determinar valores de la carga última del suelo, la cual se relaciona con la resistencia al corte del suelo y entrega un valor de carga que puede utilizarse en proyectos que no requieran de un resultado más preciso (Lozano, 2013).

Debido a la compleja y variable naturaleza de los suelos, existen muchos métodos de ensayo para una posible evaluación de las características de los suelos (Lozano, 2013). Sabiendo que existen diferentes tipos de métodos para la evaluación de las características del suelo, el método de la compresión simple permite identificar las características, y el comportamiento del suelo cuando es sometido a un esfuerzo. Este método será de gran utilidad para determinar el objetivo principal de esta tesis. (Lozano, 2013)

### 1.9 Ensayo de compresión simple

El propósito de este ensayo es medir la resistencia a compresión de una probeta cilíndrica de roca, sometida a una carga axial. Para realizar el ensayo, hay que disponer de una prensa de capacidad adecuada que permita aplicar la carga sobre la probeta a velocidad constante hasta que se produzca la rotura de la misma en un intervalo de tiempo entre 5 y 15 minutos, también la velocidad de carga puede establecerse entre intervalos de 0,5 a 1 MPa/s. (P. Ramirez, 1984)

La probeta se coloca entre los discos de la prensa, bien centrada. Donde se aplica una carga equivalente al 1 % de la resistencia a compresión simple estimada. En ese momento, el reloj indicador de carga se pone en cero. Se fija la velocidad de aplicación de la carga, dando comienzo la compresión, hasta que la muestra se rompe.

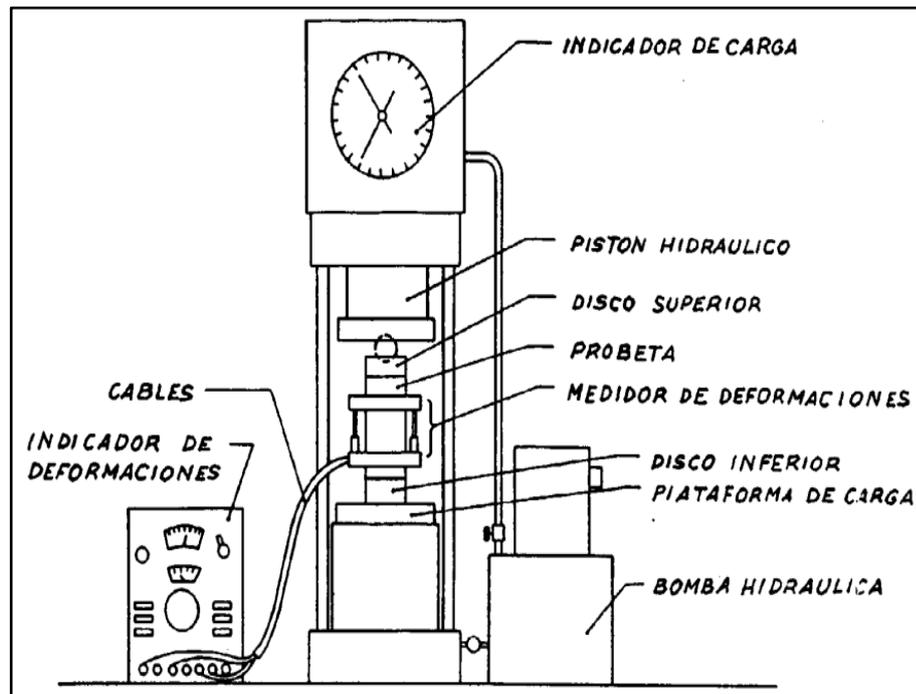


Figura 1.10 Especificaciones de la prensa.

Fuente: (P. Ramírez, 1984).

El comportamiento de las rocas es de gran importancia, ya que permiten conocer su durabilidad según sus características físicas, a la resistencia a la compresión simple, la cual se basa en su esfuerzo a tensiones de compresión hasta que la roca o el material tiende a fracturarse, básicamente es la aplicación de una fuerza máxima sobre

una muestra con un área cubica o cilíndrica, siendo interpretada en la siguiente fórmula (Feijoo & Padrón, 2020):

$$RCS = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Donde:

RCS: Resistencia a la compresión simple

P: Fuerza aplicada (kg/mm<sup>2</sup>)

A: Área de aplicación (cm<sup>2</sup>)

## **1.10 Tipos de ruptura por compresión**

Existen varios tipos de ruptura, pero los dos más conocidos por compresión son: (Benavente, 2006)

### **1.10.1 Por fragmentación**

Ocurre cuando no existe una interacción de las fisuras homogéneas, esto se da en rocas porosas donde la tensión existe en toda la roca.

### **1.10.2 Por fractura**

Siendo la más habitual debido a la anisotropía de la roca que genera fisuras microscópicas las cuales se unen y forma una fisura macroscópica durante la compresión de la roca.

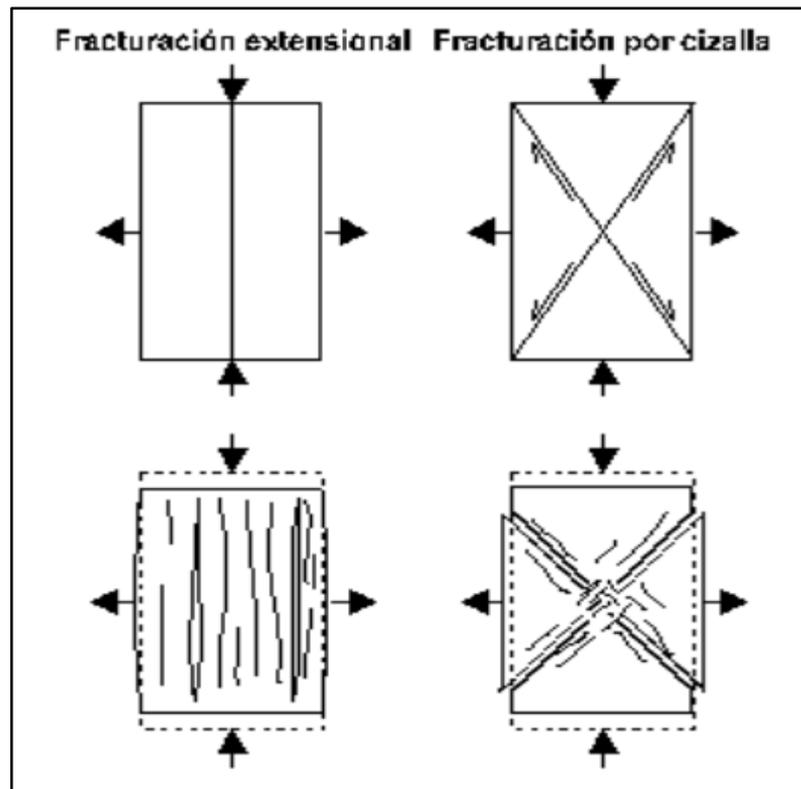


Figura 1.11 Fracturas como resultado de compresión

Fuente: (Agasco, 2007).

### 1.11 Índice de carga puntual

La prueba de carga puntual es una de las pruebas que más se usan para la determinación RCS a través de una prensa hidráulica que puede ser usada in situ o en el laboratorio, además de que requiere de muy poca o nula preparación de las muestras para las pruebas (Cordero, 2019).

El índice de carga puntual se calcula con la siguiente expresión:

$$Is = \frac{p}{De^2} \quad (2)$$

Donde:

Is: Índice de carga puntual ( $\text{kg}/\text{mm}^2$ )

P: Fuerza (kg)

De: Diámetro equivalente de la probeta (mm)

El diámetro equivalente se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$De^2 = \frac{4}{\pi} * W * D \quad (3)$$

Donde:

W: Ancho medio de la muestra (mm)

D: Distancia entre las puntas de los conos al realizar la rotura (mm)

Además, la clasificación de las rocas a la compresión uniaxial, propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas es la siguiente:

<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Clasificación</b>
> 250	Extremadamente alta
100 - 250	Muy alta
50 - 100	Alta
25 - 50	Media
5 - 25	Baja
1 - 5	Muy baja
0.25 - 1	Extremadamente baja

Figura 1. 12 Clasificación de las rocas a la compresión uniaxial.

Fuente: (Ramírez & Alejandro, 2010).

### 1.12 Metodología de obtención del Is (50).

El índice de carga puntual sin corrección se lo puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$I_s = \frac{P*1000}{De^2} \quad (4)$$

Dónde:

$P$  = Carga aplicada en kN.

$D_e$  = Diámetro del núcleo equivalente en mm.

$I_s$  = Índice de carga puntual, MPa.

(M. Navarrete, 2013).

Se toman las dimensiones de los fragmentos los cuales deben cumplir con las prescripciones que se indican a continuación:

La razón  $0.3 < D / W < 1$  que de preferencia quede cerca de 1. La distancia  $L > 0.5W$  ( $L$  distancia del extremo de la roca a las puntas).

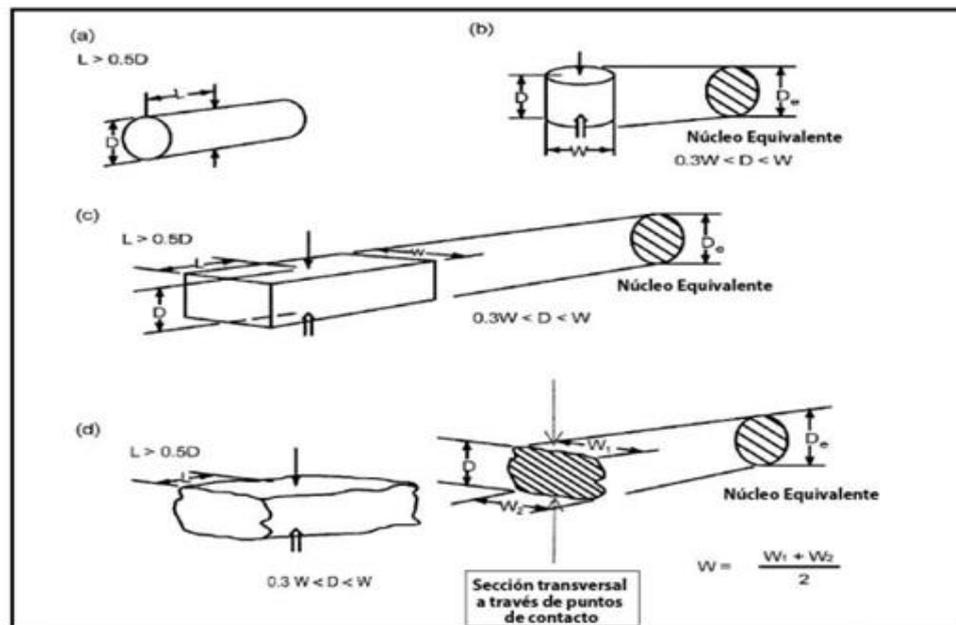


Figura 1.13 .Áreas transversales de una probeta

Fuente: (ASTM D5731, 2016)

Para fragmentos irregulares el  $I_s$  (50) se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$D_e^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (5)$$

Donde  $A = WD$  = Área transversal mínima paralela a la dirección de la carga en  $\text{mm}^2$  (M. Navarrete, 2013).

El índice de resistencia a la carga puntual corregido,  $I_s(50)$  de una muestra de roca se define como el valor del  $I_s$  que se ha medido a través de una prueba diametral con  $D = 50$  mm. Cuando una clasificación de roca es esencial, el método más fiable para obtener  $I_s(50)$  es llevar a cabo las pruebas con diámetros iguales a 50 mm o muy cercanos a dicho valor. La mayoría de las pruebas de carga puntual, son llevadas a cabo utilizando tamaños de muestras diferentes al diámetro mencionado (M. Navarrete, 2013).

Para la corrección del tamaño se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{S50} = F \times I_s \quad (6)$$

Donde,

F es el factor de corrección por tamaño y se realiza mediante la ecuación:

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (7)$$

Para las pruebas realizadas en muestras cercanas al valor de 50 mm de diámetro, la corrección se realiza mediante el uso de la ecuación siguiente:

$$F = \sqrt{\frac{D_e}{50}} \quad (8)$$

### **1.13 Correlación entre resistencia a la compresión simple y el índice de carga puntual o $I_s(50)$**

La resistencia a la compresión uniaxial es uno de los parámetros de ingeniería más importantes en mecánica de rocas. Sin embargo, la medición directa de este parámetro suele ser lenta, difícil, costosa o puede ser inmanejable para determinarlo fácilmente debido a la condición del núcleo de la muestra. (Sharo, 2019)

Las pruebas de índice de carga puntual ( $I_s(50)$ ) son mucho más sencillas de realizar porque exigen menos o ninguna preparación de la muestra y el equipo de prueba no es complicado. Además, se pueden usar en el campo. (Sharo, 2019)

El uso de la prueba de carga puntual (PLT), como prueba de predicción indirecta (USC), permite estimar el índice de carga puntual o resistencia de carga puntual, ( $I_s(50)$ ), para clasificar las rocas por su fuerza. El (PLT) usa muestras creadas

por fragmentos de rocas regulares e irregulares o muestras cilíndricas. La prueba puede realizarse en el laboratorio o in situ. (Sharo, 2019)

Una buena correlación entre la RCS y el  $I_s(50)$  puede ser de gran importancia, porque se obtienen beneficios en la realización de ensayos, siendo más rápidos y económicos, aportando seguridad en los cálculos para el análisis de macizos rocosos. (M. Galván, 2014)

Para aplicar esta correlación es necesario disponer de un buen método de determinación a la resistencia a la carga puntual. Además, es necesario realizar un número suficiente de ensayos con probetas de la misma naturaleza, pero habitualmente no se cumple esta condición por lo que es necesario aplicar un factor de corrección por tamaño  $F = (De / 50)^\alpha$ , con un  $\alpha = 0,45$ .

Dicho factor permite determinar para un solo ensayo, con una carga de rotura  $P$ , el índice de resistencia a la Carga Puntual  $I_s(50)$  a partir de la resistencia a la Carga Puntual no corregida  $I_s$  como se demuestra en la siguiente ecuación:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \gg I_s(50) = F * I_s \quad (9)$$

(M. Galván, 2014).

Así se puede comprobar que el índice de resistencia a la Carga Puntual  $I_s(50)$  puede ser obtenido al realizarse varios ensayos. La carga de rotura  $P_{50}$  mediante el ajuste de una recta en doble escala logarítmica de los valores  $P - De^2$  de ciertos ensayos proporcionara valores acordes con la mejor determinación de  $I_s(50)$ , la ecuación resultante sería la presentada a continuación:

$$P = A \cdot (De^2)^B \quad (10)$$

(M. Galván, 2014)

Suponiendo un ensayo individual que fuese correcto, en este caso el factor  $F$  de la corrección por tamaño debería ser como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^\alpha \text{ Siendo } \alpha = 2 * (1 - B) \quad (11)$$

(M. Galván, 2014)

## 1.14 Densidad

La densidad es una propiedad elemental y fundamental de los materiales, relacionada con la naturaleza de sus constituyentes y la existencia de espacios vacíos entre ellos. La densidad ( $\rho$ ) se define como la masa ( $M$ ) por unidad de volumen ( $V$ ), y se expresa en  $\text{kg/m}^3$ :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (12)$$

$\rho$  = densidad en mina en  $\text{g/cm}^3$

$M$  = masa inicial en kg

$V$  = volumen inicial en  $\text{m}^3$

Conocida la masa y el volumen de una muestra rocosa, se puede determinar de forma inmediata su densidad. En los materiales porosos tanto la masa como el volumen admiten ciertas matizaciones y, en consecuencia, se pueden establecer distintos tipos de densidad. Fundamentalmente se distingue dos tipos de densidades: “densidad de los granos minerales” y “densidad de la roca seca”. También se consideran otros tipos de densidad, obtenidos a partir de distintos ensayos, como la “densidad de la roca húmeda” (para un determinado contenido en humedad) y la “densidad corregida” o “densidad del esqueleto” (cuando el volumen de roca no incluye los poros abiertos, pero incluye los cerrados). (Rodríguez, 2010)

### 1.14.1. La densidad global

También conocida como densidad aparente, que depende de su porosidad y contenido de espacios abiertos, los materiales como piedra molida y cemento se caracterizan por su masa global, y el volumen de estos materiales incluye los poros abiertos, siendo este dato el cual nos ayuda a calcular propiedades físico mecánicas tales como la resistencia a la compresión antes descrita, pero evidentemente la densidad global de los materiales es fuertemente variable. (Agasco, 2007)

<i>global</i>	<i>Porosidad</i>	<i>Densidad</i>
<i>Acero</i>		7800-7850
<i>Granito</i>		2600-
2800	0.15-1.5	
<i>Gabro</i>		3000-
3100	0.1-0.2	
<i>Riolita</i>		2400-
2600	4.0-6.0	
<i>Basalto</i>		2800-
2900	0.1-1.0	
<i>Arenisca</i>		2000-
2600	5.0-25.0	
<i>Lutita</i>		2000-
2400	10.0-30.0	
<i>Caliza</i>		2200-
2600	5.0-20.0	
<i>Dolomia</i>		2500-
2600	1.0-5.0	
<i>Gneiss</i>		2900-
3000	0.5-1.5	
<i>Mármol</i>		2600-
2700	0.5-2.0	
<i>Cuarcita</i>		
2650	0.1-0.5	
<i>Pizarra</i>		2600-
2700	0.1-0.5	
<i>Hormigón pesado</i>		1800-2500
<i>Hormigón ligero</i>		500-1800
<i>Ladrillo</i>		1600-1800
<i>Arena</i>		1450-1650
<i>Plástico poroso</i>		20-100

Figura 1.14 Densidad, porosidad en rocas y materiales de construcción

Fuente: (Agasco, 2007)

### 1.15 Porosidad

En este caso se considera únicamente la porosidad ( $n$ ) como una propiedad física, es decir como un parámetro numérico. Se define como el volumen ocupado por los espacios vacíos ( $V_v$ ) o volumen poroso ( $V_p$ ) por unidad de volumen total de roca ( $V_t$ ), y se expresa en porcentaje a través de la siguiente ecuación:

$$n = \frac{V_v}{V_t} * 100 \quad (13)$$

$n$  = Porosidad de la roca

$V_v$  = Volumen de vacíos

$V_t$  = Volumen total de la roca

Igual que la densidad, la porosidad admite ciertas matizaciones y se establecen distintos tipos, siendo los principales: la “porosidad total” y la “porosidad abierta”.

De acuerdo con las características de los espacios vacíos contemplados, pueden considerarse otros tipos de porosidad como: cerrada, accesible a un determinado fluido, comunicada y efectiva. La porosidad total ( $n$ ) se define como el volumen total de vacíos por unidad de volumen total de la roca. En este caso deben contabilizarse todos los espacios vacíos presentes (abiertos y cerrados, accesibles y no accesibles). Su valor no se puede obtener de forma experimental, ya que se incluye entre los espacios vacíos no comunicados con el exterior (poros no accesibles). Su determinación se realiza de forma indirecta a partir del valor de ambas densidades (Rodríguez, 2010).

La porosidad total se puede obtener al momento de conocer la densidad de los granos minerales ( $\rho_s$ ) y la densidad de la roca seca ( $\rho_d$ ), a partir de la siguiente expresión:

$$n = \frac{(\rho_s - \rho_d)}{\rho_s} * 100 \quad (14)$$

La porosidad abierta se conoce también como porosidad accesible o comunicada, y se define de la misma forma como el volumen de poros abiertos ( $V_a$ ) o comunicados entre sí y con el exterior (accesibles al agua normalmente) por unidad de volumen total de roca.

$$n_o = \frac{V_a}{V_t} * 100 \quad (15)$$

Esta porosidad se determina normalmente mediante técnicas experimentales, basadas en introducir un fluido en los poros y cuantificar su volumen. El procedimiento más común es el método de la pesada hidrostática, en dicho ensayo se saturan los poros con agua normalmente al vacío y se obtiene la porosidad abierta “accesible al agua”. Otro método utilizado es por inyección de mercurio, en este caso se introduce mercurio a presión en los poros y a partir del volumen inyectado se determina la porosidad abierta (accesible al mercurio). En la mayoría de las rocas los valores obtenidos en ambos ensayos son parecidos, siendo ligeramente mayor la porosidad accesible al agua, ya que el mercurio no llega a introducirse en los poros muy pequeños ( $< 0,003$

$\mu\text{m}$ ), y dicho ensayo tampoco considera los poros con accesos muy grandes ( $> 100 \mu\text{m}$ ). (Rodríguez, 2010)

La porosidad total es, por definición, el máximo valor de porosidad que presenta un material. En el caso ideal de que todos sus poros estén conectados con el exterior de la muestra, la porosidad total y la porosidad abierta coinciden. En la mayoría de las rocas la diferencia entre ambos valores es normalmente pequeña. Esta porosidad presenta gran interés en la caracterización de las rocas destinadas a la construcción, ya que está relacionada con su capacidad de absorber agua y su comportamiento frente al deterioro. (Rodríguez, 2010)

La porosidad abierta es el parámetro más significativo de los materiales, y en particular de las rocas industriales, ya que condiciona su capacidad para almacenar fluidos, influyendo en sus propiedades físicas como químicas. Las diferencias de porosidad entre las distintas rocas son muy notables, así las rocas cristalinas se caracterizan por sus bajos valores de porosidad (alrededor el 1 %), mientras que las detríticas presentan valores mucho más altos (alrededor del 15 %). (Rodríguez, 2010)

## **1.16 Absorción**

El término absorción indica la acción de absorber. No obstante, se emplea principalmente para referirse a la retención de una sustancia por las moléculas que posee otra, bien sea en estado líquido o gaseoso. (Real Academia Española, 2013)

### **1.16.1 Absorción en física**

En física, absorción indica la pérdida de intensidad de la radiación de ondas electromagnéticas o sonoras cuando ésta traspasa un medio. Por ello, cuando se hace referencia a la absorción de las ondas sonoras, indica la existencia de dificultades para la propagación del sonido. (Real Academia Española, 2013)

### **1.16.2 Absorción en química**

La absorción en química es un proceso que consiste en la separación de uno o más componentes de un gas haciendo uso de un solvente líquido que permitirá crear una solución. (Real Academia Española, 2013)

## **1.17 Programación lineal**

### **1.17.1 Historia**

La programación lineal se planteó como un modelo matemático desarrollado durante la segunda guerra mundial para la planificación de variables como gastos de ejército, los retornos, costos de ejércitos y pérdidas de enemigos, al terminar la guerra fue utilizada en la industria para su planificación diaria. Desde entonces se dio la apertura a diferentes métodos como el algoritmo simplex por George Dantzing en 1947, entre otros. En 1984, Narendra Karmarkar introduce un nuevo método para resolver problemas de programación lineal, demostrando que puede resolver problemas de manera eficiente, lo que aportaría un enorme avance a los principios teóricos y prácticos en el área. Desde entonces, ha crecido a un ritmo muy rápido cambiando nuestras actitudes hacia la toma de decisiones, en cada área.

En el transcurso de los tiempos se formaron algunos métodos de la programación lineal estos se dividen en 5:

Método gráfico o de las rectas de nivel.

Método analítico o de los vértices.

Método Esquemático.

Método Práctico.

Método simplex.

(Hillier & Lieberman, 2010).

### **1.17.2 La programación matemática**

Desarrollada para la ciencia administrativa, busca la optimización de los recursos limitados entre las actividades de la competencia. En términos generales se define como una representación matemática orientada a la planificación de la mejor manera posible para la asignación de ese recurso o recursos. Y cuando la representación matemática utiliza funciones lineales exclusivamente, se tiene como problema un modelo matemático de programación lineal. El modelo matemático permite obtener una solución óptima de los recursos estudiados. (Hillier & Lieberman, 2010)

## Propiedades de la programación lineal

Minimizar costos.

Maximizar rendimientos.

Maximizar efectividad de producción.

Restricciones.

Limitaciones del objetivo.

### 1.17.3 Sistemas de desigualdades lineales, método gráfico

Normalmente las restricciones las podemos encontrar en forma de desigualdad, si un par ordenado  $(a, b)$  es la solución de una desigualdad en  $X$  y  $Y$ , reemplazando los valores de  $a$  y  $b$  observamos que se cumple la desigualdad.

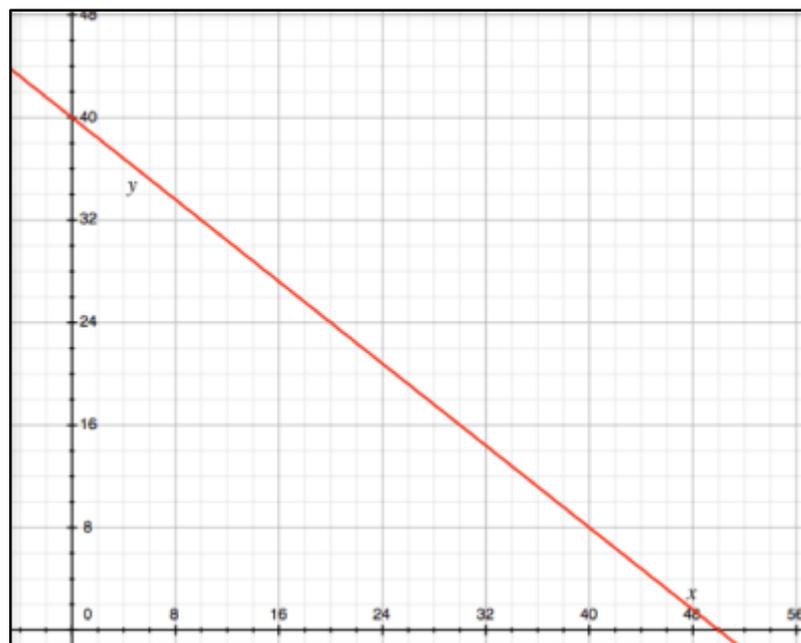


Figura 1.15 Gráfica normal con una recta separando dos regiones

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica de la ecuación normalmente separa el plano en dos o más regiones, en cada una de ellas, una estipulación es verdadera. Y todos los puntos dentro de la región son soluciones factibles de la desigualdad.

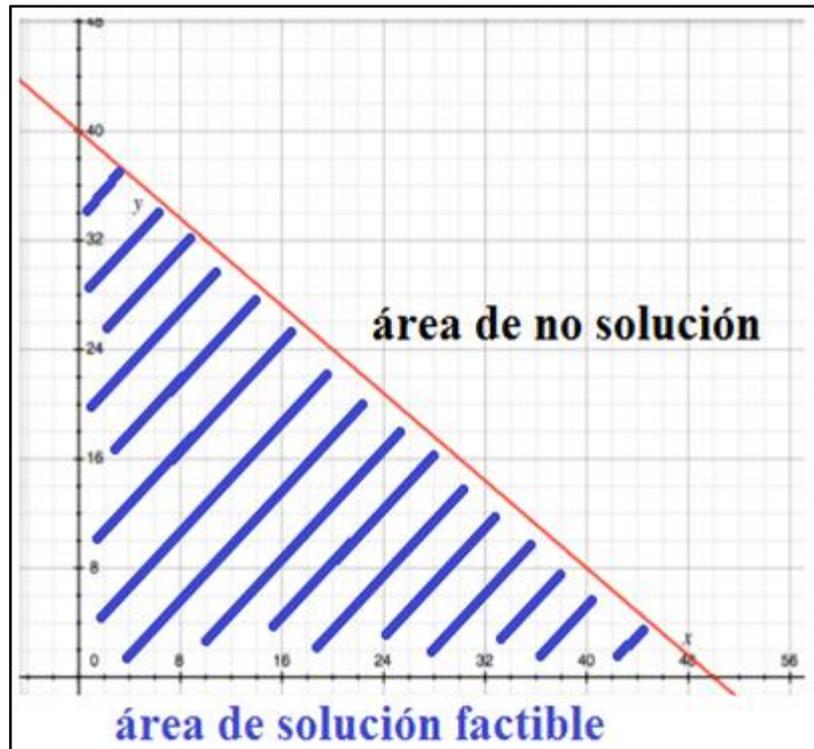


Figura 1.16 Área factible y no factible de una gráfica

Fuente: Elaboración propia.

#### 1.17.4 Tipos de problemas de programación lineal

Según sean las restricciones, se obtendrán diferentes poliedros, acotados o no, y según la función objetivo respecto del dicho poliedro se puede diferenciar situaciones según el tipo de solución que presente el problema de programación lineal y si existe la región factible, en este caso se puede encontrar: (Hillier & Lieberman, 2010)

- **Óptimo finito y único**

Solución es por un único punto con coordenadas reales.

- **Múltiples óptimos**

Un problema de Programación Lineal puede tener más de un óptimo. Además, el problema tiene un único óptimo, o bien, tiene infinitos óptimos.

- **Óptimo infinito**

Puede tener un óptimo no finito, es decir, la función objetivo puede tomar, un valor tan grande o tan pequeño como se quiera sin abandonar la región factible.

- **Región factible no acotada, óptimo finito**

La no acotación de la región factible no implica necesariamente óptimo infinito. Puede ocurrir que la función objetivo alcance el óptimo en la zona acotada de la región factible.

- **Región factible no acotada óptimo finito e infinito**

Puede darse el caso que todos los puntos de una de las semirrectas que determinan la región factible no acotada sean solución del problema.

- **No factible, factible vacía**

El conjunto de restricciones de un problema de Programación Lineal puede ser incompatible, conduciendo a una región factible vacía.

### 1.17.5 Ecuaciones lineales con dos incógnitas

Es una expresión que se la puede representar en las siguientes formas:

- $ax + by < 0$
- $ax + by > 0$
- $ax + by \leq 0$
- $ax + by \geq 0$

Una ecuación lineal con dos incógnitas es una expresión de la forma:

$$ax + by = c \quad (16)$$

Representa un sistema compatible indeterminado con un parámetro. Tiene infinitas soluciones. Las soluciones son todos los puntos de la recta de ecuación:

$$ax + by = c$$

Para resolver un sistema de inecuaciones es necesario resolver cada una de las inecuaciones que lo forman y después encontrar la intersección de todos los semiplanos de solución (región factible). La región factible, siempre será un conjunto convexo (dados dos puntos cualesquiera de ella, el segmento que los une también está contenido). (Hillier & Lieberman, 2010)

## **CAPÍTULO 2**

### **METODOLOGÍA**

#### **2.1 Ensayo de materiales**

En el presente trabajo, la investigación es de carácter exploratoria, y se desarrolla en base a la elaboración de probetas o muestras, para lo cual ha sido necesario obtener fuentes bibliográficas y científicas, donde se indique dimensiones y características de las muestras a trabajar. Los distintos ensayos servirán para:

1. Aportar información rutinaria acerca de la calidad de la roca o de control.
2. Recabar información nueva o mejor acerca del material.
3. Conocer las medidas adecuadas para la preparación de muestras.

#### **2.2 Norma de estandarización**

Como la normalización tiene una influencia en los métodos de ensayos, es de gran utilidad para el ingeniero conocer las especificaciones del uso y los métodos a aplicarse en los ensayos. Para ello, la asociación norteamericana de normas fue organizada en 1918, por la ASCE, ASME, AIMM, AIEE y la ASTM, los que desarrollaron las normas industriales aceptables para todos los grupos mediante la creación de agencias normativas que pueden coordinar sus labores.

#### **2.3 Número y tamaño de probetas**

Para el tamaño y numero de las muestras, se tomó como referencia la norma UNE. EN 13701 en la cual se sugiere varios elementos estructurales que forman parte de la misma población, entre mayor tamaño de probetas, mejores resultados, ya que una mayor cantidad de probetas más fiable serán los resultados. También podemos denotar la norma UNE-EN 12504-1:2001 que acepta la relación entre tamaño máximo del árido y el diámetro del testigo mientras sea mayor que 3, las mismas que podrán ser cubicas, prismáticas o cilíndricas.

#### **2.4 Equipos necesarios para los ensayos**

Dentro del equipo necesario para realizar los ensayos, se detallan los artículos más importantes a continuación:

- Marcador permanente.

- Regla.
- Balanza o báscula.
- Vasos precipitados.
- Horno convencional.
- Papel absorbente.
- Agua destilada.
- Termómetro.
- Bandeja metálica.

## 2. 5 Instrumento de recolección de datos

Para la recolección de datos, se elaboraron tablas en Excel que facilitaron el manejo de la información de los ensayos aplicados a cada probeta, exponiendo los siguientes valores para cada una de las probetas analizadas.

1. Lados de la probeta a, b y c.
2. Volumen total (Vt).
3. Masa inicial (Mi).
4. Densidad ( $\rho$ ).
5. Masa final (probeta seca) (Mf).
6. Porosidad ( $\eta$ ).
7. Masa de probeta en agua (Ma).
8. Absorción ( $\omega$ ).
9. Fuerza.
10. Resistencia a compresión simple (RCS).
11. Is (50).
12. Total.
13. Promedio.
14. Máximo (Max).
15. Mínimo (Min).

Tabla 2.1 Modelo para la toma de datos

TABLA DE DATOS													
muestra	a	b	c	Vt	Mi	$\rho$	Mf	$\eta$	Ma	$\omega$	fuerza	RCS	Is (50)
	cm	cm	cm	cm <sup>3</sup>	g	g/cm <sup>3</sup>	g	%	g	%	kg	MPa	MPa
1													
60													
<b>total</b>													
<b>Promedio</b>													
<b>Max</b>													
<b>Min</b>													

Fuente: Elaboración propia

## 2.6 Ensayo de volumen

Siendo el primer paso del ensayo la enumeración de las probetas, a continuación se mide cada probeta según las distintas condiciones geométricas con las que fueron cortadas.

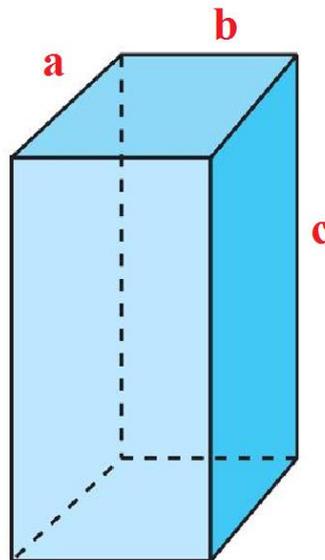


Figura 2.1 Modelo de una probeta cuadrangular

Fuente: Elaboración propia

Para calcular el volumen de un prisma cuadrangular sabemos que por principios es igual a:

$$\text{Volumen prisma} = a \times b \times c \quad (17)$$

Donde:

V = Volumen del prisma

a = Lado a del prisma

b = Lado b del prisma

c = Lado c del prisma

## 2.7 Ensayo de densidad

En la determinación de la densidad, es necesario una balanza para obtener el valor del peso en g o kg de cada probeta, siendo la masa inicial ( $M_i$ ) y aplicando la fórmula de la densidad en mina es igual a:

$$\rho = \frac{M_i}{V_i} \quad (18)$$

Donde:

$\rho$  = densidad en mina en  $\text{g/cm}^3$ .

$M_i$  = masa inicial en g.

$V_i$  = volumen inicial en  $\text{cm}^3$ .



Figura 2.2 Modelo de balanza para el estudio

Fuente: Elaboración propia

## 2.8 Ensayo de la porosidad abierta

Para determinar la masa seca es necesario colocarlas dentro de un horno a una temperatura promedio de 70°C hasta, 75 °C, las probetas se mantendrán dentro del horno un tiempo determinado (en este caso cada 4 horas), posterior a ello se pesarán cada probeta y serán introducidas nuevamente al horno hasta que su masa llegue a su mínimo de poros, tras cada pesada se anotara la diferencia del peso en porcentaje, se considera una masa constante cuando la diferencia no es superior al 0,1%.

La siguiente tabla permite obtener un registro continuo de los diferentes intervalos de tiempo en los cuales fueron pesadas cada una de las probetas con el objetivo de identificar la variación del peso en el transcurso del tiempo.

Tabla 2.2 Modelo para la toma de datos de secado de probetas

#	Mi	7:00	11:00	15:00	19:00	23:00	7:00	11:00	15:00	19:00	23:00	Mfinal
	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
1												
2												

Fuente: Elaboración propia

Ya obtenida la masa final o su masa mínima mediante la siguiente ecuación se puede llegar a obtener porosidad de la roca

$$\eta = \frac{M_i - M_f}{V_i} \times 100 \quad (19)$$

Donde

$\eta$  = porosidad en mina en %

$M_f$  = masa al fin del secado en g

$M_i$  = masa inicial en g

$V_i$  = volumen inicial en  $\text{cm}^3$

## 2.9 Ensayo de absorción

Para ellos fue necesario conocer el peso de la masa saturada bajo el agua, y la determinación de la masa saturada propuesta por las normas ASTM indica que la absorción, es el incremento en masa del agregado debido a la penetración de agua en los poros de la partícula, durante un periodo de tiempo prescrito, sin incluir el agua adherida en la superficie de las partículas, la que es expresada como un porcentaje de la masa seca.

El ensayo se basa en sumergir en agua por un tiempo determinado (en este caso por 60 minutos o 1 hora), transcurrido el tiempo, se remueve la probeta del agua, y se seca la superficie con un papel absorbente por un par de minutos, realizado todo esto, se determina la masa gracias a la siguiente relación:

$$\omega = \frac{M_a - M_i}{V_i} \times 100 \quad (20)$$

Donde:

$\omega$  = Absorción en mina en %

$M_a$  = Masa final con agua en g

$M_i$  = Masa inicial en g

$V_i$  = Volumen inicial en  $\text{cm}^3$



Figura 2.3 Vaso de precipitación

Fuente: Elaboración propia

## 2. 10 Ensayo de carga puntual (Ensayo Franklin)

Algunas veces no se dispone de probetas adecuadas para los ensayos de compresión simple, también suele suceder que el número de ensayos es muy grande y deben llevarse a cabo in situ. En ambos casos el ensayo de carga puntual puede sustituir al ensayo de compresión simple.

El ensayo de carga puntual consiste en romper un fragmento de roca entre dos puntas cónicas de acero endurecido, la muestra es colocada entre dichas puntas. Es conveniente que su diámetro no sea inferior a unos de 50 mm, ya que el volumen de la probeta influye en su resistencia. La fuerza  $P$  necesaria para romper la muestra se puede obtener leyendo el manómetro de la bomba manual que produce la presión requerida para dicha rotura.

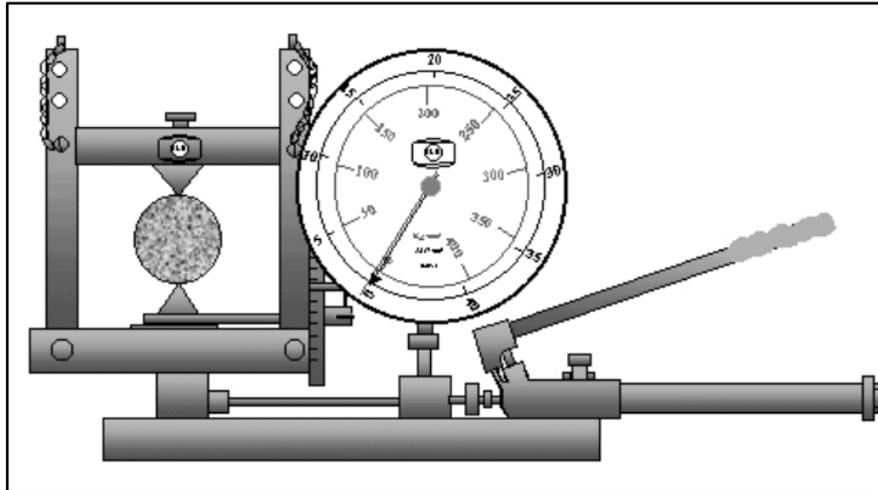


Figura 2.4 Ensayo de carga puntual mediante la prensa Franklin.

Fuente: (Ramírez 2004)

Los cálculos para la resistencia a compresión simple ( $\sigma_c$ ) de una probeta se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = \frac{P}{S} \quad (21)$$

Donde:

P= es la carga máxima a la que ha sido sometida la probeta durante el ensayo

S= es el área de la sección transversal de la probeta

(P. Ramirez, 1984).

## 2. 11 Ensayo en la prensa de Humboldt

En el ensayo de la resistencia a la compresión simple, las probetas son llevadas a laboratorio para su ejecución, utilizando la máquina de Humboldt, que tiene facultades para someter materiales a ensayos de tensión y compresión. El ensayo tiene como función comprobar la resistencia de diversos materiales en probetas con dimensiones preestablecidas según la norma ASTM, la cual ayuda a obtener los valores de la deformación y la carga o fuerza que fue aplicada al momento de su ruptura

Según (Feijoo & Padrón, 2020) algunas recomendaciones que se deben de tomar en cuenta para la aplicación de la máquina de Humboldt son las siguientes:

- Tener en cuenta las medidas adecuadas para cilindros, cubos, vigas y núcleos de mezclas.
- Rango de prueba de 2500 a 250000 lb (11 a 1112 kN) con una precisión de más o menos 0,5% de la carga indica.
- La configuración incluye platos y bases de diferente tamaño para las diferentes probetas.



Figura 2.5 Prensa de Humboldt

Fuente: Elaboración propia

## 2. 12 Ecuación de la recta

Un punto en un plano cartesiano tiene 2 coordenadas (x, y), si se conoce su pendiente que es la inclinación de la tangente en un punto, se puede encontrar la ecuación de la recta, siendo una ecuación común por el efecto de un movimiento en línea recta (fuller & tarwater, 1999).

En la gráfica se observa una recta azul con coordenadas Q (X<sub>1</sub>, Y<sub>1</sub>) y P (X<sub>2</sub>, Y<sub>2</sub>)

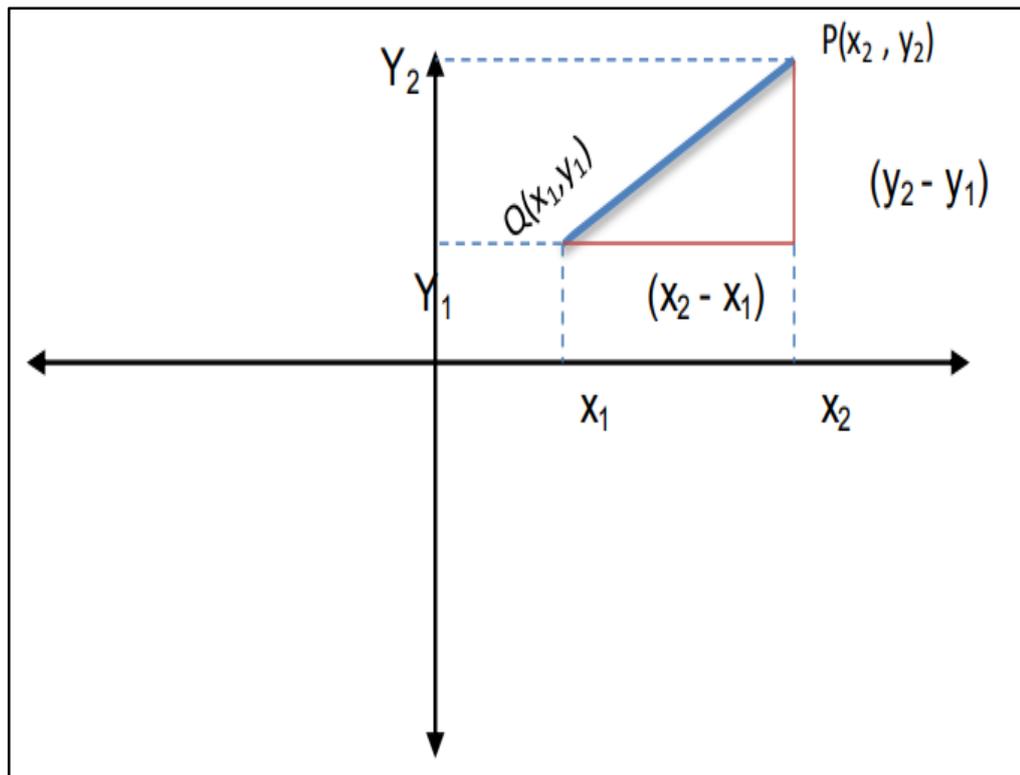


Figura 2.6 Gráfica de coordenadas x, y

Fuente: Elaboración propia

Una recta que está determinada por su pendiente ( $m$ ) y coordenadas ( $x$ ,  $y$ ):

Donde:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (22)$$

$m$  = pendiente

$(y_2, x_2)$  = coordenadas del punto P

$(y_1, x_1)$  = coordenadas del punto Q

Y la ecuación de la recta

$$y - y_1 = m (x - x_1) \quad (23)$$

Gracias a las coordenadas se puede obtener la ecuación de la recta, ante esto debemos recordar que la pendiente dada y ángulo que se forma entre la recta y el eje

X positivo, es igual al grado de inclinación, presentando la siguiente ecuación: (fuller & tarwater, 1999)

$$m = \operatorname{tg}\theta \quad (24)$$

Como la tangente es igual al cateto opuesto sobre el cateto adyacente, y acorde a la figura anterior tenemos que:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (25)$$

Se sustituye en la función tangente y nos queda la pendiente:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (26)$$

### 2. 13 Método gráfico para resolver problemas de programación lineal

La programación lineal es un procedimiento o algoritmo matemático mediante el cual se resuelve un problema indeterminado, formulando a través de ecuaciones lineales, donde las variables de dicha función están sujetas a una serie de restricciones que se expresan en un sistema para optimizar la función objetivo. (Castillo A. J., 2002)

Consiste en representar las restricciones sobre un eje de coordenada para delimitar la región donde se encuentran las posibles soluciones. Estas posibles soluciones se encontrarán en el perímetro del polígono resultante. Si nuestra función objetivo es una maximización y la línea que delimita nuestro dominio es convexa, entonces el problema no tiene solución. (Castillo A. J., 2002) Para resolverlo por el método gráfico, hay que tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Dibujar la región correspondiente al sistema.
- Encontrar los vértices de la región.
- Encontrar las ecuaciones de cada recta mediante la pendiente y sus derivadas.
- Prueba de la función objetivo en cada uno de los vértices seleccionados.
- Para una región acotada, existirá tanto un valor mínimo y valor máximo.
- Los puntos dentro o sobre el límite de la región se llamarán soluciones factibles.

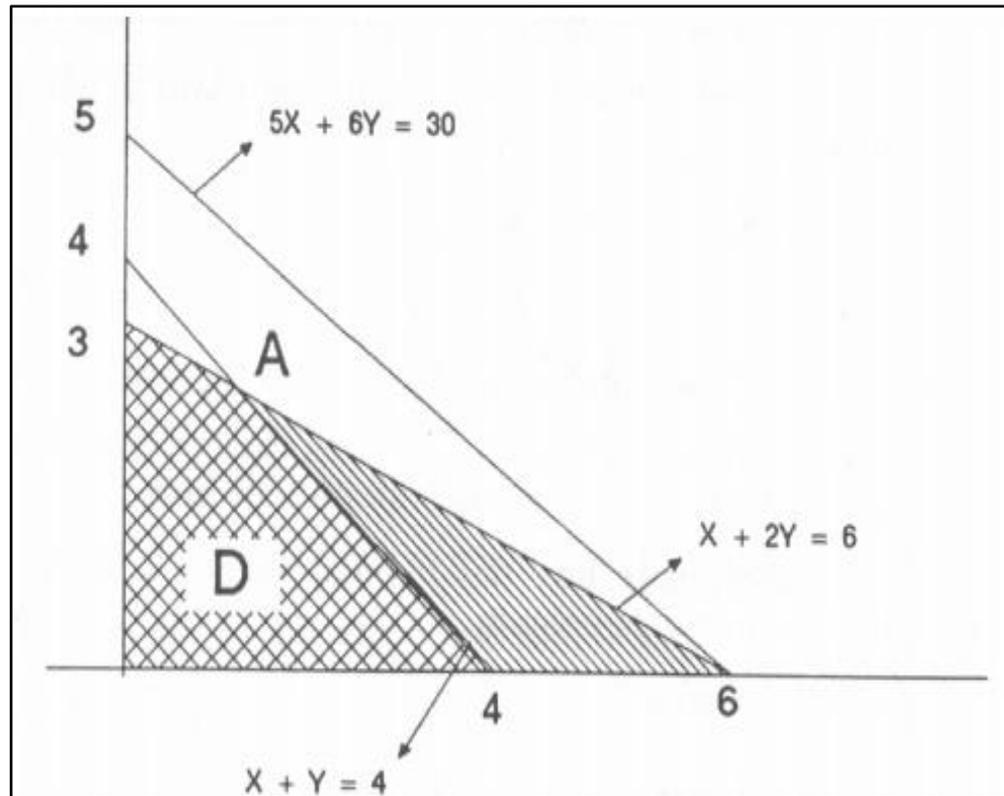


Figura 2.7. Representación gráfica de programación lineal

Fuente: (ASTM D5731, 2016)

## CAPÍTULO 3

### EXPERIMENTACIÓN

En el presente capítulo y de acuerdo con la información recolectada en el anterior capítulo, se entrega una explicación detallada que permitirá lograr los objetivos establecidos, donde se indicará el número de probetas, su preparación, procesos de corte, obtención de la densidad, porosidad y la absorción de la misma, correlacionando los datos con su índice de carga puntal y finalmente la resistencia a la compresión simple, estos datos serán expresados por medio de tablas que verificarán los procesos de cada uno de los ensayos.

#### 3.1 Número de muestras y preparación

Como primer paso se realizó la selección del material de la zona de estudio del Cojitambo con coordenadas: Este 0734849 y Norte 9695085, siendo dichas coordenadas UTM WGS84.



Figura 3.1 Puntos de referencia UTM

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, mediante una cortadora artesanal se obtuvo 60 probetas de la misma roca de la zona de estudio del Cojitambo, con características y dimensiones similares las cuales contienen medidas promedio de 5cm x 5cm x 12cm.



Figura 3.2 Geometría de las probetas

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.3 Geometría de las probetas cortadas según las medidas específicas

Fuente: Elaboración propia

### 3.2 Pre-medición y enumeración de las probetas

Al obtener las 60 probetas de la zona de Cojitambo, se realizó la numeración de cada probeta, además de revisar que ninguna probeta presentara grietas, y por último se volvieron a medir nuevamente cada una de las probetas, para corroborar que poseían iguales o similares dimensiones, ya que cada probeta al momento de ser elaboradas interviene maquinaria y la mano del hombre, lo que puede fluctuar en las medidas finales de las probetas.



Figura 3.4 Enumeración de las probetas

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Dimensionamiento

Posteriormente se realiza el dimensionamiento de las 60 muestras antes mencionadas, cada una definida como: ancho, alto y longitud, denominadas como lado a, lado b y lado c, que serán las medidas respectivamente, con las seleccionadas para el trabajo, las dimensiones de cada una de las muestras se pueden observar detalladamente a continuación en la tabla 3.1.



Figura 3.5 Dimensionamiento de los lados “a” y “b”

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.6 Dimensionamiento del lado “c”

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1 Medidas de cada probeta

Muestra	lado	lado	lado	Muestra	lado	lado	lado	Muestra	lado	lado	lado
	a	b	c		a	b	c		a	b	c
	cm	cm	cm		cm	cm	cm		cm	cm	cm
<b>1</b>	4,90	4,90	11,90	<b>21</b>	4,70	4,90	11,90	<b>41</b>	4,90	4,90	11,90
<b>2</b>	4,90	4,90	11,80	<b>22</b>	4,90	4,90	11,70	<b>42</b>	4,90	4,90	11,80
<b>3</b>	4,70	5,00	11,90	<b>23</b>	4,80	4,90	11,80	<b>43</b>	4,90	4,90	11,70
<b>4</b>	4,80	4,90	11,80	<b>24</b>	4,90	4,90	11,90	<b>44</b>	4,70	4,90	11,80
<b>5</b>	5,00	4,90	11,70	<b>25</b>	4,80	4,90	11,90	<b>45</b>	5,00	5,00	11,70
<b>6</b>	4,80	4,90	11,80	<b>26</b>	4,90	4,90	11,90	<b>46</b>	4,90	4,90	11,70
<b>7</b>	5,00	4,90	11,90	<b>27</b>	5,00	4,90	11,90	<b>47</b>	4,90	5,00	11,90
<b>8</b>	4,90	5,00	12,00	<b>28</b>	4,80	4,80	11,70	<b>48</b>	4,80	4,90	11,90
<b>9</b>	4,90	4,90	11,80	<b>29</b>	4,80	4,80	11,80	<b>49</b>	5,00	4,90	11,80
<b>10</b>	4,90	4,80	12,00	<b>30</b>	4,80	4,80	11,90	<b>50</b>	4,90	4,90	11,70
<b>11</b>	4,80	4,90	11,70	<b>31</b>	5,00	5,00	11,70	<b>51</b>	4,90	4,90	11,80
<b>12</b>	4,90	4,80	11,80	<b>32</b>	5,00	4,90	11,90	<b>52</b>	4,90	4,90	11,70
<b>13</b>	4,90	4,70	11,70	<b>33</b>	4,90	4,90	11,80	<b>53</b>	4,80	4,90	11,80
<b>14</b>	5,00	5,00	11,80	<b>34</b>	4,90	4,80	11,80	<b>54</b>	5,00	5,00	11,80
<b>15</b>	4,80	4,90	11,90	<b>35</b>	4,80	4,90	11,80	<b>55</b>	4,80	4,80	11,70
<b>16</b>	4,90	5,00	11,70	<b>36</b>	4,70	4,80	11,90	<b>56</b>	4,90	4,90	11,80
<b>17</b>	5,00	4,90	11,70	<b>37</b>	4,80	4,90	11,70	<b>57</b>	4,90	4,80	11,80
<b>18</b>	4,80	4,80	11,80	<b>38</b>	4,90	4,90	11,70	<b>58</b>	5,00	5,00	11,70
<b>19</b>	4,90	4,90	11,70	<b>39</b>	4,90	4,90	12,00	<b>59</b>	4,90	4,80	11,70
<b>20</b>	4,80	5,00	11,90	<b>40</b>	4,90	4,70	11,90	<b>60</b>	4,90	4,80	11,70

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.7 Medición de probetas del lado “a”

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.8 Medición de probetas del lado “b”

Fuente: Elaboración propia

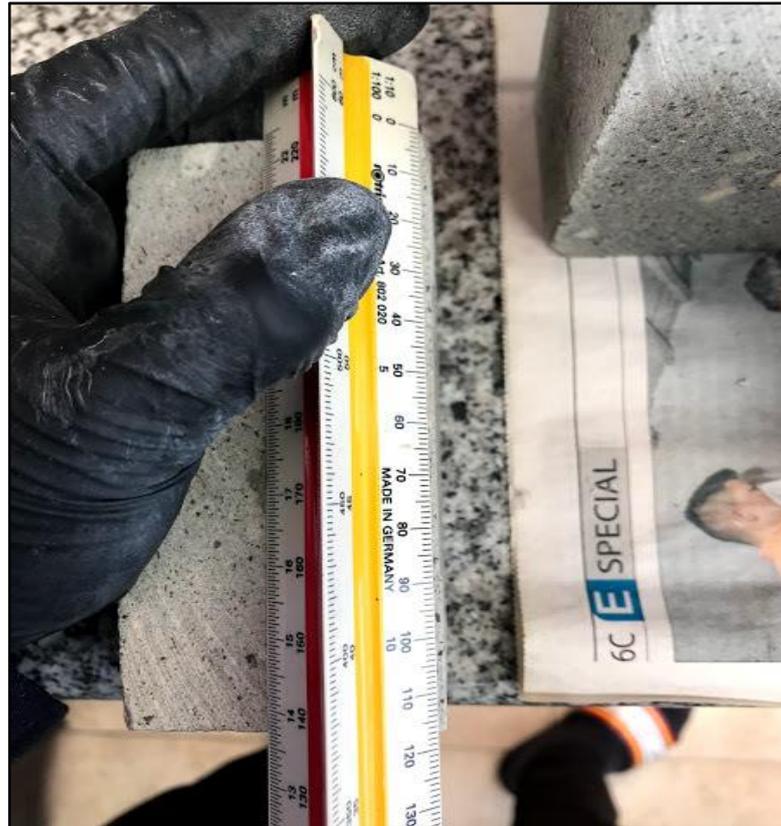


Figura 3.9 Medición de probetas del lado “c”

Fuente: Elaboración propia

### 3.4 Ensayo de densidad en mina

En esta etapa, para la obtención de la propiedad denominada densidad se procedió a pesar cada una de las probetas, para lo cual se utilizó una balanza de precisión (Camry) obteniendo la masa en gramos (peso), y gracias a las dimensiones de las probetas se obtuvieron los respectivos volúmenes.

$$\rho = \frac{M_i}{V_i} \quad (27)$$

Donde:

$\rho$  = densidad en mina en  $\text{g/cm}^3$

$M_i$  = masa inicial en g

$V_i$  = volumen inicial en  $\text{cm}^3$

Nota: El volumen de la roca de un sólido rectangular es igual a:

$$V = \text{longitud} \times \text{ancho} \times \text{altura} \text{ (cm}^3\text{)}$$

Tabla 3.2 Datos de densidad de cada probeta

Muestra	Vi cm <sup>3</sup>	Mi g	ρ g/cm <sup>3</sup>	Muestra	Vi cm <sup>3</sup>	Mi g	ρ g/cm <sup>3</sup>	Muestra	Vi cm <sup>3</sup>	Mi g	ρ g/cm <sup>3</sup>
1	285,72	693	2,425	21	274,06	691	2,521	41	285,72	691	2,418
2	283,32	692	2,442	22	280,92	703	2,503	42	283,32	686	2,421
3	279,65	697	2,492	23	277,54	682	2,457	43	280,92	683	2,431
4	277,54	693	2,497	24	285,72	692	2,422	44	271,75	680	2,502
5	286,65	701	2,445	25	279,89	695	2,483	45	292,50	672	2,297
6	277,54	694	2,501	26	285,72	687	2,404	46	280,92	682	2,428
7	291,55	694	2,380	27	291,55	726	2,490	47	291,55	706	2,422
8	294,00	708	2,408	28	269,57	685	2,541	48	279,89	695	2,483
9	283,32	680	2,400	29	271,87	680	2,501	49	289,10	699	2,418
10	282,24	700	2,480	30	274,18	695	2,535	50	280,92	688	2,449
11	275,18	674	2,449	31	292,50	732	2,503	51	283,32	682	2,407
12	277,54	694	2,501	32	291,55	703	2,411	52	280,92	688	2,449
13	269,45	691	2,564	33	283,32	683	2,411	53	277,54	688	2,479
14	295,00	696	2,359	34	277,54	698	2,515	54	295,00	696	2,359
15	279,89	694	2,480	35	277,54	691	2,490	55	269,57	682	2,530
16	286,65	686	2,393	36	268,46	678	2,525	56	283,32	690	2,435
17	286,65	691	2,411	37	275,18	677	2,460	57	277,54	677	2,439
18	271,87	690	2,538	38	280,92	674	2,399	58	292,50	709	2,424
19	280,92	704	2,506	39	288,12	692	2,402	59	275,18	692	2,515
20	285,60	696	2,437	40	274,06	691	2,521	60	275,18	685	2,489

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.10 Pesado de la probeta de roca número "1"

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.11 Pesado de la probeta de roca número "20"

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.12 Pesado de la probeta de roca número "40"

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.13 Pesado de la probeta de roca número "60"

Fuente: Elaboración propia

### 3.5 Ensayo de porosidad en mina

Para esta etapa se utilizó un horno convencional con el objetivo de secar o eliminar la humedad de la roca a una temperatura de 75°C, en un periodo de 4 horas. Este proceso se repitió con cada una de las probetas hasta que llegaron a una estabilidad o peso mínimo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que algunas probetas no tuvieron la misma cantidad de agua y puede que tome más tiempo en estabilizarse, en ese caso el tiempo en el horno será mayor. Cuando el valor pesado se repita más de tres veces se toma el último, como el valor de la masa final como se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Procesos de datos de secado de las probetas

Muestra	Mi	7:00	11:00	15:00	19:00	23:00	7:00	11:00	15:00	19:00	23:00	Mf
	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
1	693	692	691	690	689	689	689	688	688	688	688	688
2	692	690	689	688	688	687	687	687	687	687	687	687

Fuente: Elaboración propia

Ya con una masa inicial y una masa final se puede obtener una porosidad de la roca en porcentaje (%). El tiempo necesario para esta etapa estuvo en el orden de 4 a 5 días por muestra.



Figura 3.14 Cinco primeras probetas al horno

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.15 Temperatura promedio del horno

Fuente: Elaboración propia

Aquí podemos observar el cambio de peso de la probeta número "20" en las siguientes 72 horas pesadas hasta conseguir su peso mínimo (figuras 3.16, 3.17, 3.18):



Figura 3.16 Peso inicial de la probeta "20"

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.17 Peso medio de la probeta "20"

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.18 Peso final de la probeta "20"

Fuente: Elaboración propia

La porosidad en mina de las diferentes probetas la obtenemos mediante la siguiente relación.

$$\eta = \frac{M_i - M_f}{V_i} \times 100 \quad (28)$$

Dónde:

$\eta$  = porosidad en mina en %

$M_f$  = masa al fin del secado en g

$M_i$  = masa inicial en g

$V_i$  = volumen inicial en  $\text{cm}^3$

Tabla 3. 4 Datos de porosidad de cada probeta

Muestra	Mi	Mf	H	Muestra	Mi	Mf	$\eta$	Muestra	Mi	Mf	$\eta$
	g	g	$\text{g/cm}^3$		g	g	$\text{g/cm}^3$		g	g	$\text{g/cm}^3$
<b>1</b>	693	688	2,425	<b>21</b>	691	688	2,521	<b>41</b>	691	687	2,418
<b>2</b>	692	687	2,442	<b>22</b>	703	698	2,503	<b>42</b>	686	682	2,421
<b>3</b>	697	692	2,492	<b>23</b>	682	677	2,457	<b>43</b>	683	680	2,431
<b>4</b>	693	687	2,497	<b>24</b>	692	689	2,422	<b>44</b>	680	677	2,502
<b>5</b>	701	694	2,445	<b>25</b>	695	691	2,483	<b>45</b>	672	668	2,297
<b>6</b>	694	688	2,501	<b>26</b>	687	683	2,404	<b>46</b>	682	678	2,428
<b>7</b>	694	688	2,380	<b>27</b>	726	721	2,490	<b>47</b>	706	703	2,422
<b>8</b>	708	701	2,408	<b>28</b>	685	680	2,541	<b>48</b>	695	691	2,483
<b>9</b>	680	674	2,400	<b>29</b>	680	676	2,501	<b>49</b>	699	695	2,418
<b>10</b>	700	694	2,480	<b>30</b>	695	690	2,535	<b>50</b>	688	683	2,449
<b>11</b>	674	670	2,449	<b>31</b>	732	728	2,503	<b>51</b>	682	679	2,407
<b>12</b>	694	689	2,501	<b>32</b>	703	698	2,411	<b>52</b>	688	682	2,449
<b>13</b>	691	686	2,564	<b>33</b>	683	680	2,411	<b>53</b>	688	684	2,479
<b>14</b>	696	691	2,359	<b>34</b>	698	693	2,515	<b>54</b>	696	693	2,359
<b>15</b>	694	689	2,480	<b>35</b>	691	688	2,490	<b>55</b>	682	678	2,530
<b>16</b>	686	681	2,393	<b>36</b>	678	675	2,525	<b>56</b>	690	687	2,435
<b>17</b>	691	687	2,411	<b>37</b>	677	674	2,460	<b>57</b>	677	674	2,439
<b>18</b>	690	684	2,538	<b>38</b>	674	670	2,399	<b>58</b>	709	705	2,424
<b>19</b>	704	697	2,506	<b>39</b>	692	689	2,402	<b>59</b>	692	689	2,515
<b>20</b>	696	691	2,437	<b>40</b>	691	686	2,521	<b>60</b>	685	681	2,489

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el mismo procedimiento para todas las probetas es decir para las 60.



Figura 3.19 Sigüientes cinco probetas en el horno

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.20 El mismo proceso para todas las demás probetas

Fuente: Elaboración propia

### 3.6 Ensayo de absorción en mina

Para la tercera etapa, como primer paso, se dejaron las probetas por 7 días expuestas a la intemperie con el objetivo que las muestras adquieran humedad ambiente, y se establezca su condición inicial (este proceso se lo hizo igual para la porosidad). Pasada la semana, se ejecutó la prueba que consiste en introducir la probeta en un vaso precipitado con capacidad de un litro, y se llenó de agua hasta 400 ml, luego se introdujo la probeta por una hora exacta, obteniendo una nueva masa de la probeta.

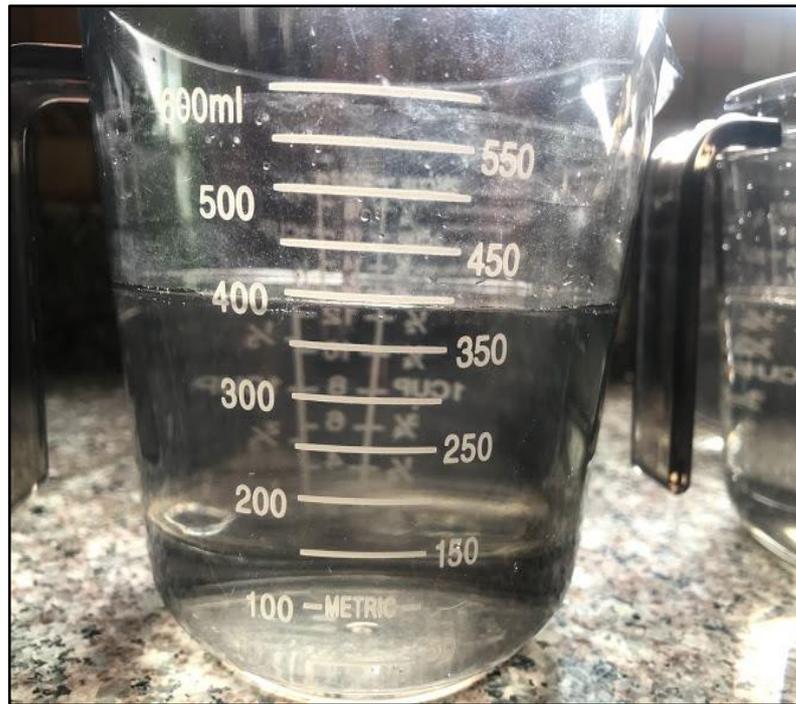


Figura 3.21 Vaso de precipitación con 400 mm de agua

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.22 Probeta sumergida en el vaso de precipitación

Fuente: Elaboración propia

Al momento que es introducida la probeta en el agua, tendrá un tiempo de 60 minutos exactos por probeta, cuando se culminaron los 60 minutos, se colocaron las muestras en un papel absorbente por 5 segundos, y posteriormente pesadas. Obteniendo una masa inicial y una masa final para obtener el porcentaje de la absorción, utilizando la siguiente relación:

$$\omega = \frac{Ma - Mi}{Vi} \times 100 \quad (29)$$

Dónde:

$\omega$  = absorción en mina en %

Ma = masa final con agua en g

Mi = masa inicial en g

Vi = volumen inicial en  $\text{cm}^3$

Tabla 3.5 Datos de absorción de cada probeta

Muestra	Mi	Ma	$\omega$	Muestra	Mi	Ma	$\omega$	Muestra	Mi	Ma	$\omega$
	g	g	%		g	g	%		g	g	%
1	693	700	3,15	21	691	698	3,65	41	691	698	3,50
2	692	699	3,53	22	703	709	3,56	42	686	693	3,53
3	697	706	4,29	23	682	688	3,60	43	683	691	3,56
4	693	701	4,32	24	692	701	3,85	44	680	687	3,31
5	701	707	3,49	25	695	702	3,93	45	672	678	3,08
6	694	700	3,60	26	687	696	4,20	46	682	688	3,56
7	694	700	3,43	27	726	732	3,43	47	706	714	3,77
8	708	714	3,74	28	685	691	3,71	48	695	703	3,93
9	680	688	4,24	29	680	688	4,05	49	699	707	3,80
10	700	707	3,90	30	695	703	4,38	50	688	696	4,27
11	674	682	4,00	31	732	739	3,08	51	682	690	3,53
12	694	703	4,68	32	703	710	3,43	52	688	691	2,85
13	691	697	3,34	33	683	693	4,24	53	688	695	3,60
14	696	705	4,41	34	698	706	3,96	54	696	704	3,73
15	694	700	3,57	35	691	700	3,96	55	682	691	4,45
16	686	693	3,49	36	678	685	3,35	56	690	698	3,53
17	691	698	3,49	37	677	687	4,36	57	677	686	3,96
18	690	696	3,68	38	674	681	3,56	58	709	716	3,42
19	704	711	4,27	39	692	700	3,47	59	692	699	3,63
20	696	705	4,20	40	691	697	3,65	60	685	691	3,63

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.23 Primeras cinco muestras en agua por 1 hora

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.24 Probetas en papel absorbente por 5 segundos

Fuente: Elaboración propia

Se observa la diferencia de peso seca y mojada en la muestra (figuras 3.25, 3.26)



Figura 3.25 Peso probeta seca

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.26 Peso probeta mojada

Fuente: Elaboración propia

### 3.7 Determinación de la resistencia a la compresión simple

Finalmente, obtenidos todos estos resultados, tras realizar los ensayos anteriormente descritos, se procedió a mantener las probetas a temperatura ambiente por 14 días, con el objetivo de que retomen el peso inicial y eliminar el agua absorbida, hasta que las mismas vuelvan a sus condiciones originales de ser posible.

Finalmente, las probetas, inician con el proceso de carga puntual en una prensa, posteriormente se procedió a romperlas mediante el uso de la prensa de Humboldt, la cual determino la fuerza de ruptura dando como resultado una fuerza en Kgf, con la que se logró una relación en MPa de la resistencia a la compresión simple de la roca (RCS), mediante la siguiente relación:



Figura 3.27 Especificaciones de la Prensa de Humboldt

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.28 Indicador digital DIR

Fuente: Elaboración propia

Dónde:

$$RCS = \frac{p}{de} \times g \quad (30)$$

RCS = resistencia a la compresión simple  $N/mm^2 = MPa$

P = fuerza de ruptura de probeta kg

de = diámetro del núcleo equivalente cm

de = lado a x lado b de la probeta  $cm^2$

g = gravedad en  $kg/cm^3$



Figura 3.29 Ruptura de probeta en la prensa de Humboldt

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36 Datos de absorción de cada probeta

Muestra	P	RCS	Is(50)	Muestra	P	RCS	Is(50)	Muestra	P	RCS	Is(50)
	kg	MPa	MPa		kg	MPa	MPa		kg	MPa	MPa
<b>1</b>	24801	101,33	4,22	<b>21</b>	27891	118,81	4,95	<b>41</b>	11108	45,39	1,89
<b>2</b>	17702	72,33	3,01	<b>22</b>	20122	82,21	3,43	<b>42</b>	11242	45,93	1,91
<b>3</b>	26797	111,86	4,66	<b>23</b>	24379	101,68	4,24	<b>43</b>	12040	49,19	2,05
<b>4</b>	14334	59,79	2,49	<b>24</b>	26509	108,31	4,51	<b>44</b>	10339	44,04	1,84
<b>5</b>	28384	113,65	4,74	<b>25</b>	15196	63,38	2,64	<b>45</b>	13987	54,88	2,29
<b>6</b>	14999	62,56	2,61	<b>26</b>	14581	59,58	2,48	<b>46</b>	12057	49,26	2,05
<b>7</b>	14207	56,89	2,37	<b>27</b>	18800	75,28	3,14	<b>47</b>	13919	55,73	2,32
<b>8</b>	20855	83,51	3,48	<b>28</b>	27224	115,91	4,83	<b>48</b>	15824	66,00	2,75
<b>9</b>	21036	85,95	3,58	<b>29</b>	28295	120,47	5,02	<b>49</b>	14769	59,14	2,46
<b>10</b>	22871	95,39	3,97	<b>30</b>	19770	84,18	3,51	<b>50</b>	10511	42,95	1,79
<b>11</b>	21688	90,46	3,77	<b>31</b>	27081	106,27	4,43	<b>51</b>	13952	57,01	2,38
<b>12</b>	15861	66,15	2,76	<b>32</b>	21058	84,32	3,51	<b>52</b>	13565	55,42	2,31
<b>13</b>	25101	106,92	4,46	<b>33</b>	24459	99,93	4,16	<b>53</b>	12800	53,39	2,22
<b>14</b>	17949	70,43	2,93	<b>34</b>	28473	118,76	4,95	<b>54</b>	17058	66,94	2,79
<b>15</b>	16784	70,00	2,92	<b>35</b>	18012	75,13	3,13	<b>55</b>	10010	42,62	1,78
<b>16</b>	20308	81,31	3,39	<b>36</b>	25891	112,58	4,69	<b>56</b>	11060	45,19	1,88
<b>17</b>	23128	92,61	3,86	<b>37</b>	28625	119,39	4,97	<b>57</b>	11825	49,32	2,06
<b>18</b>	17772	75,67	3,15	<b>38</b>	25910	105,86	4,41	<b>58</b>	13542	53,14	2,21
<b>19</b>	17726	72,42	3,02	<b>39</b>	14560	59,49	2,48	<b>59</b>	10802	45,05	1,88
<b>20</b>	16325	66,73	2,78	<b>40</b>	14359	61,16	2,55	<b>60</b>	14359	59,89	2,50

Fuente: Elaboración propia

Finalmente podemos observar la relación que existe entre la resistencia a la compresión simple de la probeta con el índice de carga puntual, y de este modo obtener el Is (50).

$$RCS = 24 \cdot Is (50) \quad (31)$$

$$Is (50) = \frac{RCS}{24}$$



Figura 3.30 Probeta antes de la ruptura

Fuente: Elaboración propia



Figura 3.31 Probeta rota

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizará los resultados obtenidos en cada uno de los procesos detallados anteriormente, para poder llegar a una correlación entre la resistencia a la compresión simple de la roca y sus tres propiedades que son densidad, porosidad y absorción.

#### 4.1 Análisis de los resultados de densidad, porosidad, absorción y RCS

De las muestras obtenidas de la zona de Cojitambo con las respectivas dimensiones mencionadas, y los procesos descritos se procedió a determinar los cálculos de la densidad, porosidad y absorción de las probetas, al igual que la fuerza de la roca y su RCS, obteniendo la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Resultados de todos los procesos

Muestra	a	b	c	Vi	Mi	$\rho$	Mf	$\eta$	Ma	$\omega$	P	RCS	Is(50)
	cm	cm	cm	cm <sup>3</sup>	g	g/cm <sup>3</sup>	g	%	g	%	kg	MPa	MPa
1	4,90	4,90	11,90	285,72	693	2,425	688	1,75	700	2,45	24801	101,33	4,22
2	4,90	4,90	11,80	283,32	692	2,442	687	1,76	699	2,47	17702	72,33	3,01
3	4,70	5,00	11,90	279,65	697	2,492	692	1,79	706	3,22	26797	111,86	4,66
4	4,80	4,90	11,80	277,54	693	2,497	687	2,16	701	2,88	14334	59,79	2,49
5	5,00	4,90	11,70	286,65	701	2,445	694	2,44	707	2,09	28384	113,65	4,74
6	4,80	4,90	11,80	277,54	694	2,501	688	2,16	700	2,16	14999	62,56	2,61
7	5,00	4,90	11,90	291,55	694	2,380	688	2,06	700	2,06	14207	56,89	2,37
8	4,90	5,00	12,00	294,00	708	2,408	701	2,38	714	2,04	20855	83,51	3,48
9	4,90	4,90	11,80	283,32	680	2,400	674	2,12	688	2,82	21036	85,95	3,58
10	4,90	4,80	12,00	282,24	700	2,480	694	2,13	707	2,48	22871	95,39	3,97
11	4,80	4,90	11,70	275,18	674	2,449	670	1,45	682	2,91	21688	90,46	3,77
12	4,90	4,80	11,80	277,54	694	2,501	689	1,80	703	3,24	15861	66,15	2,76
13	4,90	4,70	11,70	269,45	691	2,564	686	1,86	697	2,23	25101	106,92	4,46
14	5,00	5,00	11,80	295,00	696	2,359	691	1,69	705	3,05	17949	70,43	2,93
15	4,80	4,90	11,90	279,89	694	2,480	689	1,79	700	2,14	16784	70,00	2,92
16	4,90	5,00	11,70	286,65	686	2,393	681	1,74	693	2,44	20308	81,31	3,39
17	5,00	4,90	11,70	286,65	691	2,411	687	1,40	698	2,44	23128	92,61	3,86
18	4,80	4,80	11,80	271,87	690	2,538	684	2,21	696	2,21	17772	75,67	3,15
19	4,90	4,90	11,70	280,92	704	2,506	697	2,49	711	2,49	17726	72,42	3,02
20	4,80	5,00	11,90	285,60	696	2,437	691	1,75	705	3,15	16325	66,73	2,78
21	4,70	4,90	11,90	274,06	691	2,521	688	1,09	698	2,55	27891	118,81	4,95

22	4,90	4,90	11,70	280,92	703	2,503	698	1,78	709	2,14	20122	82,21	3,43
23	4,80	4,90	11,80	277,54	682	2,457	677	1,80	688	2,16	24379	101,68	4,24
24	4,90	4,90	11,90	285,72	692	2,422	689	1,05	701	3,15	26509	108,31	4,51
25	4,80	4,90	11,90	279,89	695	2,483	691	1,43	702	2,50	15196	63,38	2,64
26	4,90	4,90	11,90	285,72	687	2,404	683	1,40	696	3,15	14581	59,58	2,48
27	5,00	4,90	11,90	291,55	726	2,490	721	1,71	732	2,06	18800	75,28	3,14
28	4,80	4,80	11,70	269,57	685	2,541	680	1,85	691	2,23	27224	115,91	4,83
29	4,80	4,80	11,80	271,87	680	2,501	676	1,47	688	2,94	28295	120,47	5,02
30	4,80	4,80	11,90	274,18	695	2,535	690	1,82	703	2,92	19770	84,18	3,51
31	5,00	5,00	11,70	292,50	732	2,503	728	1,37	739	2,39	27081	106,27	4,43
32	5,00	4,90	11,90	291,55	703	2,411	698	1,71	710	2,40	21058	84,32	3,51
33	4,90	4,90	11,80	283,32	683	2,411	680	1,06	693	3,53	24459	99,93	4,16
34	4,90	4,80	11,80	277,54	698	2,515	693	1,80	706	2,88	28473	118,76	4,95
35	4,80	4,90	11,80	277,54	691	2,490	688	1,08	700	3,24	18012	75,13	3,13
36	4,70	4,80	11,90	268,46	678	2,525	675	1,12	685	2,61	25891	112,58	4,69
37	4,80	4,90	11,70	275,18	677	2,460	674	1,09	687	3,63	28625	119,39	4,97
38	4,90	4,90	11,70	280,92	674	2,399	670	1,42	681	2,49	25910	105,86	4,41
39	4,90	4,90	12,00	288,12	692	2,402	689	1,04	700	2,78	14560	59,49	2,48
40	4,90	4,70	11,90	274,06	691	2,521	686	1,82	697	2,19	14359	61,16	2,55
41	4,90	4,90	11,90	285,72	691	2,418	687	1,40	698	2,45	11108	45,39	1,89
42	4,90	4,90	11,80	283,32	686	2,421	682	1,41	693	2,47	11242	45,93	1,91
43	4,90	4,90	11,70	280,92	683	2,431	680	1,07	691	2,85	12040	49,19	2,05
44	4,70	4,90	11,80	271,75	680	2,502	677	1,10	687	2,58	10339	44,04	1,84
45	5,00	5,00	11,70	292,50	672	2,297	668	1,37	678	2,05	13987	54,88	2,29
46	4,90	4,90	11,70	280,92	682	2,428	678	1,42	688	2,14	12057	49,26	2,05
47	4,90	5,00	11,90	291,55	706	2,422	703	1,03	714	2,74	13919	55,73	2,32
48	4,80	4,90	11,90	279,89	695	2,483	691	1,43	703	2,86	15824	66,00	2,75
49	5,00	4,90	11,80	289,10	699	2,418	695	1,38	707	2,77	14769	59,14	2,46
50	4,90	4,90	11,70	280,92	688	2,449	683	1,78	696	2,85	10511	42,95	1,79
51	4,90	4,90	11,80	283,32	682	2,407	679	1,06	690	2,82	13952	57,01	2,38
52	4,90	4,90	11,70	280,92	688	2,449	682	2,14	691	1,07	13565	55,42	2,31
53	4,80	4,90	11,80	277,54	688	2,479	684	1,44	695	2,52	12800	53,39	2,22
54	5,00	5,00	11,80	295,00	696	2,359	693	1,02	704	2,71	17058	66,94	2,79
55	4,80	4,80	11,70	269,57	682	2,530	678	1,48	691	3,34	10010	42,62	1,78
56	4,90	4,90	11,80	283,32	690	2,435	687	1,06	698	2,82	11060	45,19	1,88
57	4,90	4,80	11,80	277,54	677	2,439	674	1,08	686	3,24	11825	49,32	2,06
58	5,00	5,00	11,70	292,50	709	2,424	705	1,37	716	2,39	13542	53,14	2,21
59	4,90	4,80	11,70	275,18	692	2,515	689	1,09	699	2,54	10802	45,05	1,88
60	4,90	4,80	11,70	275,18	685	2,489	681	1,45	691	2,18	14359	59,89	2,50

Fuente: Elaboración propia

## 4.2 Análisis de los resultados obtenidos

Luego de evaluar los resultados, se estableció que las propiedades del mineral se encuentran dentro de una serie de valores que varían entre un rango, pero si se grafican todos los valores, con sus respectivos  $I_s(50)$ . Podemos observar que no cabe la posibilidad de obtener una línea de tendencias por su dispersión en el plano.

### 4.2.1 Representación de la densidad ( $\rho$ )

En la siguiente grafica se presenta la densidad en mina con su respectivo  $I_s(50)$ , donde se encuentra un rango de valores entre los 2.29 a los 2.56g/cm<sup>3</sup>

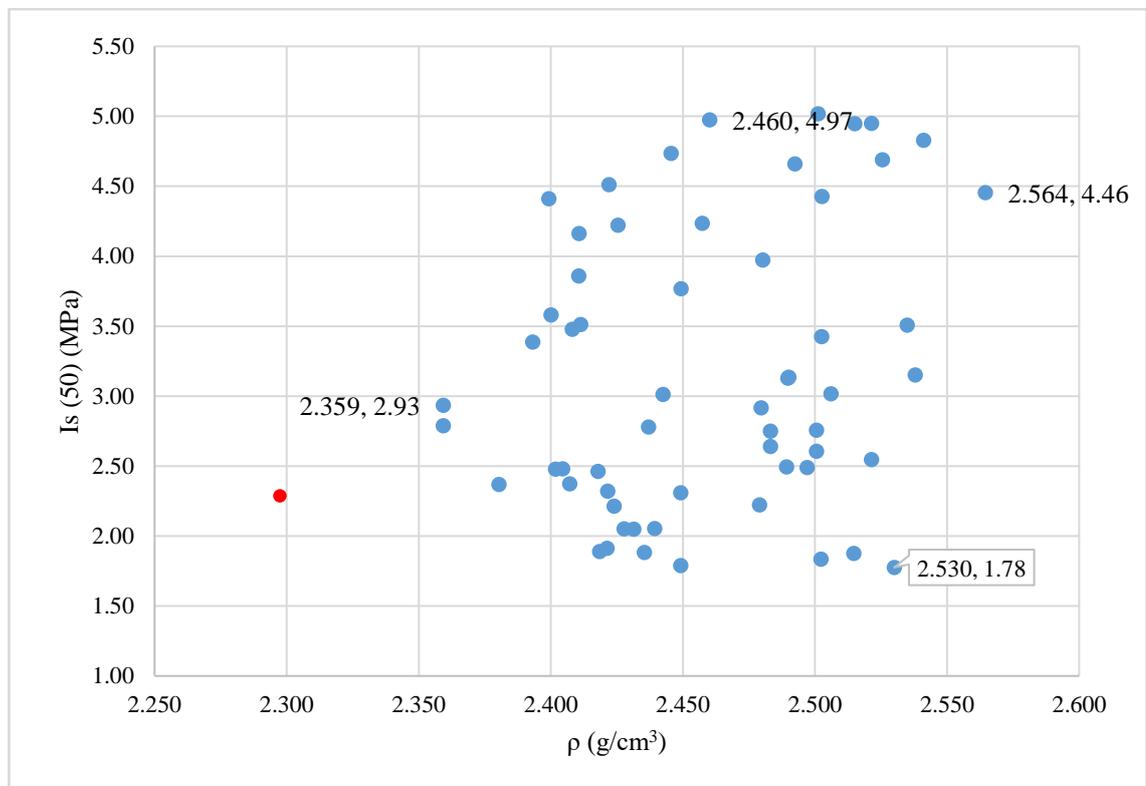


Figura 4.1 Valores de densidad con su respectiva  $I_s(50)$

Fuente: Elaboración propia

En esta situación se obtiene un área de influencia, la cual se define mediante una aplicación de inecuaciones lineales con puntos o coordenadas que ayudaran a obtener dicha área.

*Nota: un punto que se encuentra en rojo es eliminado ya que es un valor que se ubica fuera de los rangos obtenidos en las pruebas, esto se debe a que al momento*

de realizar la carga puntual en la prensa de Humboldt la probeta no tuvo la misma resistencia y su composición ya que era arcillosa; por ese motivo no es tomado en cuenta. Al igual que en la gráfica de la densidad se repite el punto rojo en las propiedades físicas de absorción y porosidad.

Los puntos y/o coordenadas para la obtención del área de influencia fueron tomados con relación al gráfico.

puntos	Is(50) (MPa)	p (%)
a	2,359	2,93
b	2,46	4,97
c	2,564	4,46
d	2,53	1,78

Figura 4.2 Coordenadas X, Y de absorción de la densidad

Fuente: Elaboración propia

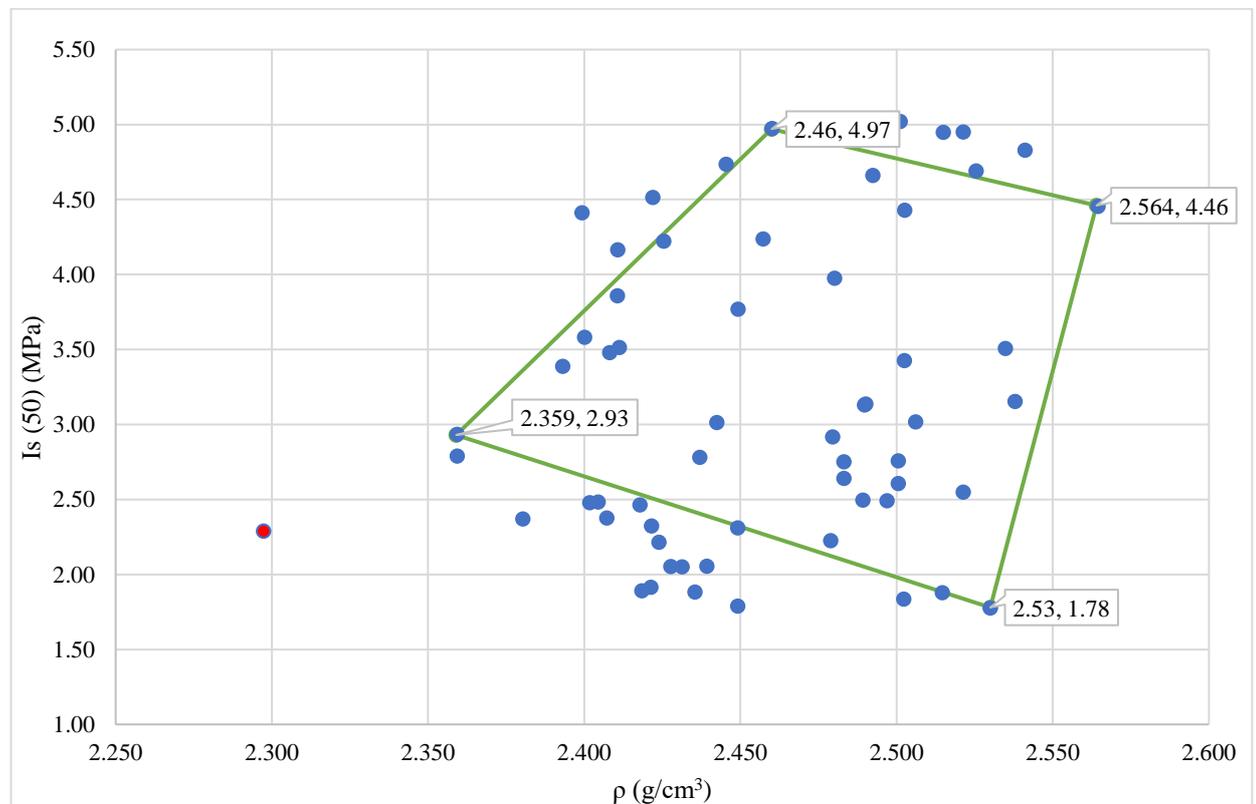


Figura 4.3 Área de influencia de densidad con su respectivo Is (50)

Fuente: Elaboración propia

Usando la ecuación punto- pendiente de la recta se determina que:

$$y - y_1 = m (x - x_1) \quad (33)$$

Donde m es la pendiente de la recta:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Obteniendo la pendiente del punto a al punto b

$$m_{ab} = \frac{4,97 - 2,93}{2,46 - 2,359} = 20,20$$

Se obtiene la ecuación de la recta de la densidad donde:

$$y - 2,93 = 20,20(x - 2,359)$$

$$y = 20,20x - 47,6518 + 2,93$$

Remplazando:

$$y = I_s(50)$$

$$x = p$$

La ecuación de la recta es igual a:

$$I_s(50) = 20,20p - 47,6518 + 2,93$$

*Nota: hay que recordar que nuestra restricción está limitada por el valor mínimo y el máximo de la densidad, siendo 2.29 y 2.56g/cm<sup>3</sup> respectivamente según la tabla 4.1 por lo tanto nuestra ecuación tiene que cumplir una restricción que es:*

$$2.29 \leq p \leq 2.56$$

Por lo tanto:

$$I_s(50) \leq 20,20p - 44,7 \quad (35)$$

Se repite este proceso para los 3 puntos consiguientes y se obtiene que:

Para los puntos b y c es igual:

$$m_{bc} = \frac{4,46 - 4,97}{2,564 - 2,46} = -4,90$$

$$y - 4,97 = -4,90(x - 2,46)$$

$$y = -4,90x + 12,054 + 4,97$$

$$y = -4,90x + 17,024$$

$$Is(50) \leq -4,90p + 17,024 \quad (36)$$

Para los puntos c y d:

$$mcd = \frac{1,78 - 4,46}{2,53 - 2,564} = 78,82$$

$$y - 4,46 = 78,82(x - 2,564)$$

$$y = 78,82x - 202,094 + 4,46$$

$$y = 78,82x - 197,63$$

$$Is(50) \geq 78,82p - 197,63 \quad (37)$$

Y para los puntos d y a:

$$mda = \frac{1,78 - 2,93}{2,53 - 2,359} = -6,72$$

$$y - 1,78 = -6,72(x - 2,53)$$

$$y = -6,72x + 17 + 1,78$$

$$y = -6,72x + 18,78$$

$$Is(50) \geq -6,72p + 18,78 \quad (38)$$

Ecuaciones de la densidad

$$\begin{cases} Is(50) \leq 20,20p - 44,72 \\ Is(50) \leq -4,90p + 17,024 \\ Is(50) \geq 78,82p - 197,63 \\ Is(50) \geq -6,72p + 18,78 \end{cases}$$

#### 4.2.2 Representación de la porosidad ( $\eta$ )

Para el análisis de los datos de porosidad en mina, estos presentan valores desde 1,017 % hasta 2,49 %, y si los graficamos con los valores de  $Is(50)$ , se puede ver que,

al igual que la densidad no se puede graficar una línea de tendencia, pero si una de zona de influencia.

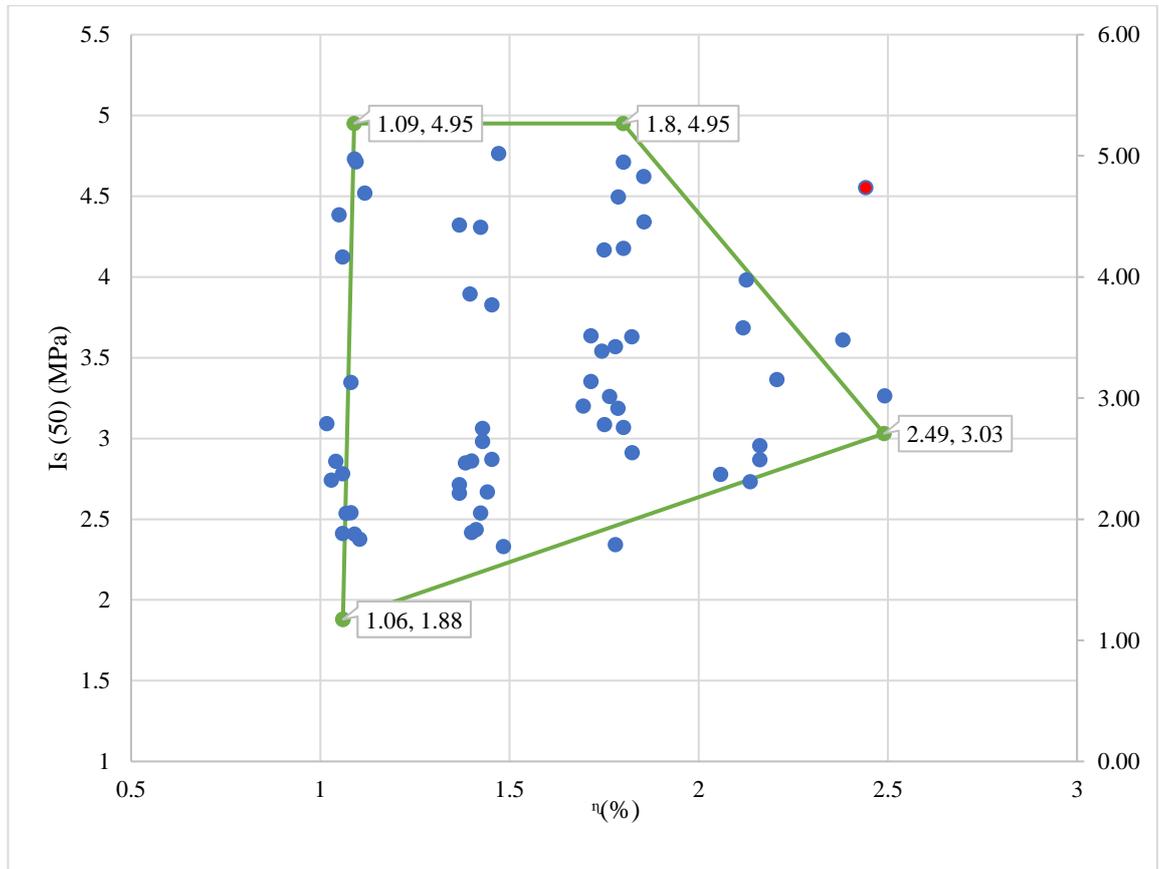


Figura 4.4 Valores de porosidad con su respectivo Is (50)

Fuente: Elaboración propia

Los puntos y/o coordenadas para la obtención del área de influencias fueron tomados con relación al gráfico.

puntos	Is(50) (MPa)	$\eta$ (%)
a	1,06	1,88
b	1,09	4,95
c	1,8	4,95
d	2,49	3,03

Tabla 4.2 Coordenadas X, Y de porosidad

Fuente: Elaboración propia

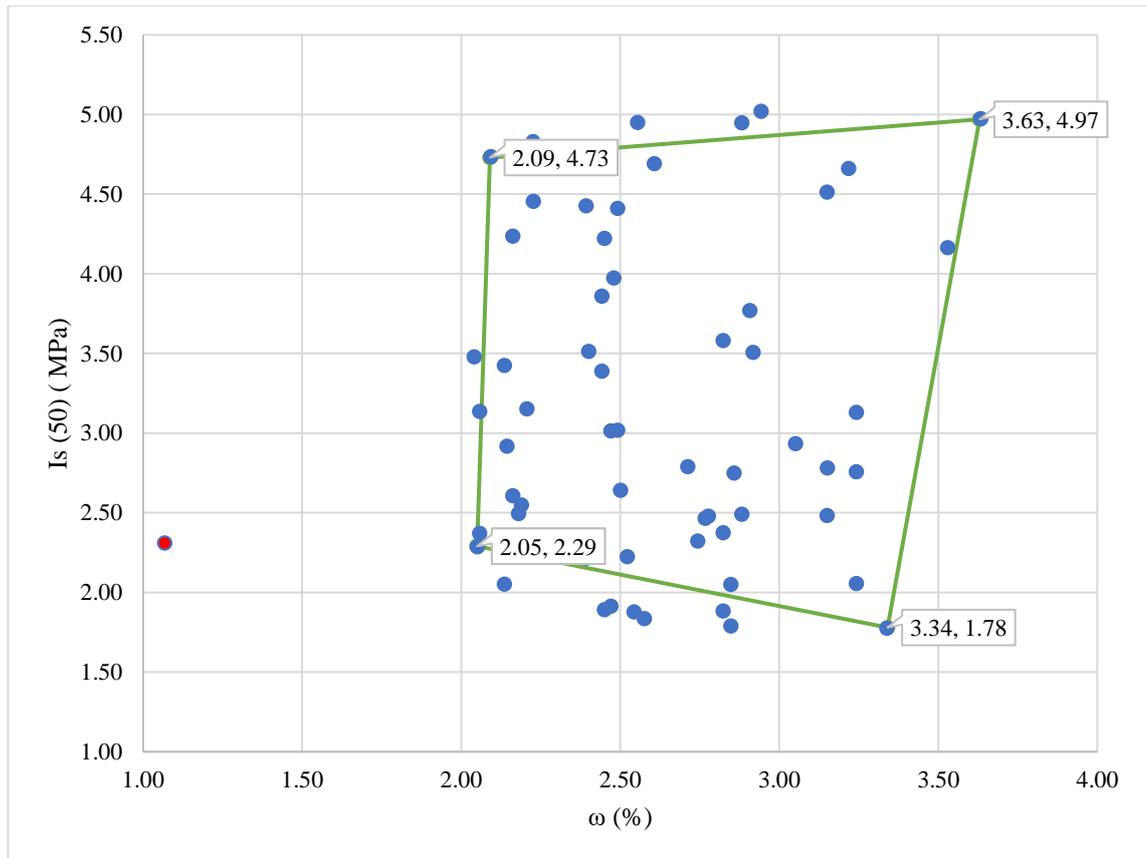


Figura 4.5 Área de influencia de la porosidad con su respectivo  $I_s(50)$

Fuente: Elaboración propia

De igual forma usando la ecuación punto-pendiente de la recta se puede determinar las ecuaciones de la porosidad, dando como resultado:

Para los puntos a y b:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m_{ab} = \frac{4,95 - 1,88}{1,09 - 1,06} = 102,33$$

$$y - y_1 = m (x - x_1)$$

$$y - 1,88 = 102,33(x - 10,6)$$

$$y = 102,33x - 108,46 + 1,88$$

$$y = 102,33x - 106,58$$

$$Is(50) = 102,33n - 106,58 \quad (39)$$

Para los puntos b y c es igual:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m_{bc} = \frac{4,95 - 4,95}{1,8 - 1,09} = 0$$

$$y - y_1 = m (x - x_1)$$

$$y - 4,95 = 0 (x - 1,09)$$

$$y = 4,95$$

$$Is(50) = 4,95 \quad (40)$$

Para los puntos c y d:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m_{cd} = \frac{3,03 - 4,95}{2,49 - 1,8} = -2,78$$

$$y - y_1 = m (x - x_1)$$

$$y - 4,95 = -2,78 (x - 1,8)$$

$$y = -2,78x + 5 + 4,95$$

$$y = -2,78x + 9,954$$

$$Is(50) = -2,78n + 9,954 \quad (41)$$

Y para los puntos d y a:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m_{da} = \frac{1,88 - 3,03}{1,06 - 2,49} = 0,80$$

$$y - y_1 = m (x - x_1)$$

$$y - 3,03 = 0,80 (x - 2,49)$$

$$y = 0,80x - 1,992 + 3,03$$

$$y = 0,80x + 1,038$$

$$Is(50) = 0,80n + 1,038 \quad (42)$$

Sabiendo que nuestra restricción es igual a:

$$1,017 \leq n \leq 2,56$$

Ecuaciones de la porosidad

$$\left\{ \begin{array}{l} Is(50) \leq 102,33n - 106,58 \\ Is(50) \leq 4,95 \\ Is(50) \leq -2,78n + 9,954 \\ Is(50) \geq 0,80n + 1,038 \end{array} \right.$$

### 4.2.3 Representación de la absorción ( $\omega$ )

De igual manera los datos de absorción en mina presentan un rango de valores de entre 1,06% a 3,63%, y al igual que en las propiedades anteriores se grafica una zona de influencia y aplicando las coordenadas podemos obtener las ecuaciones restantes.

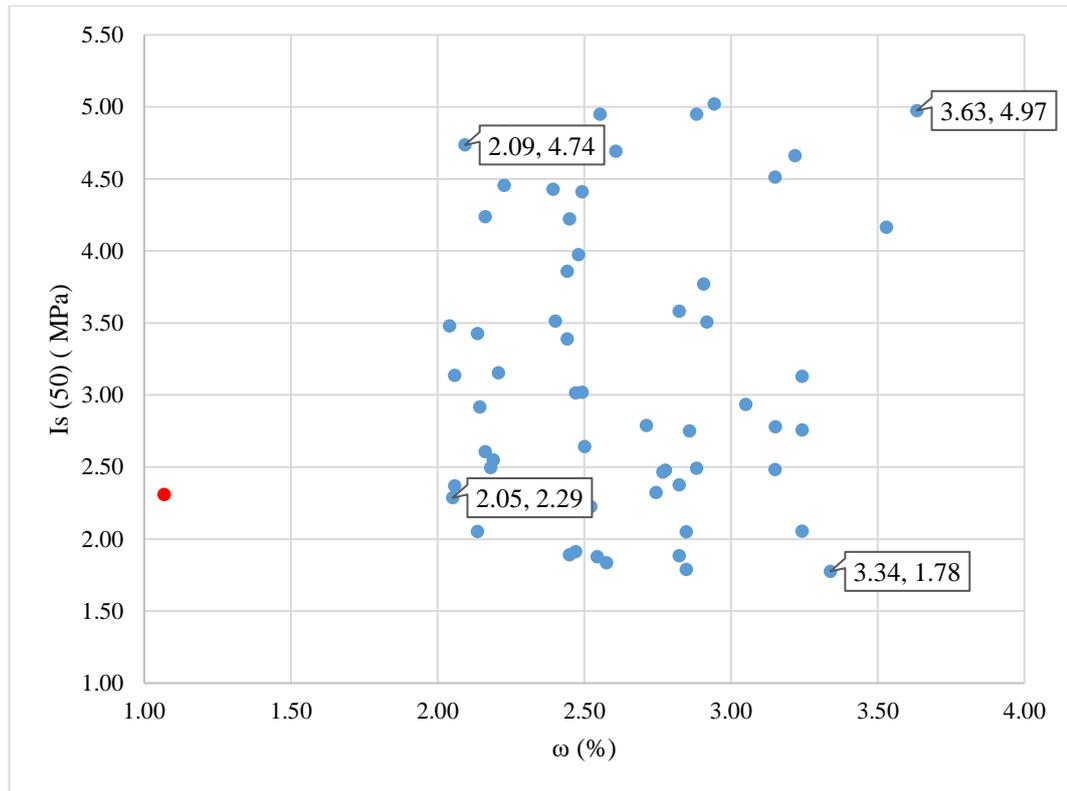


Figura 4.6 Valores de absorción con su respectivo  $I_s(50)$  (Aguirre, 2021).

Fuente: Elaboración propia

Los puntos y/o coordenadas para la obtención del área de influencias fueron tomados con relación al gráfico.

puntos	$I_s(50)$ (MPa)	$\omega$ (%)
a	2,05	2,29
b	2,09	4,73
c	3,63	4,97
d	3,34	1,78

Tabla 4.3 Coordenadas X, Y de absorción

Fuente: Elaboración propia

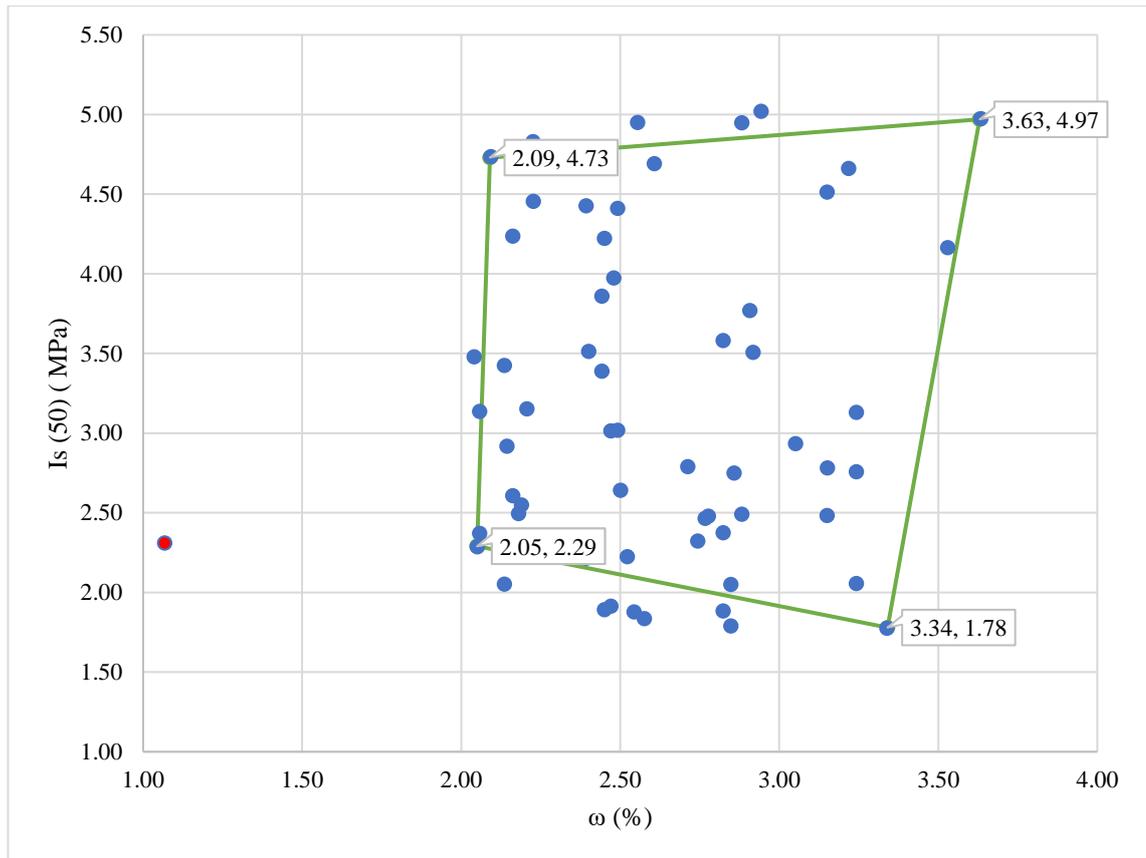


Figura 4.7 Área de influencia de absorción con su respectivo  $I_s(50)$

Fuente: Elaboración propia

Y por último usando de nuevo la ecuación punto-pendiente de la recta se puede determinar las rectas de la absorción:

Para los puntos a y b:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m_{ab} = \frac{4,73 - 2,29}{2,09 - 2,05} = 61$$

$$y - y_1 = m (x - x_1)$$

$$y - 2,29 = 61(x - 2,05)$$

$$y = 61x - 125,05 + 2,29$$

$$y = 61x - 122,76 \quad (43)$$

Para los puntos b y c es igual:

$$Is(50) = 61\omega - 122,76$$

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m_{bc} = \frac{4,97 - 4,73}{3,63 - 2,09} = 0,1558$$

$$y - y_1 = m (x - x_1)$$

$$y - 4,73 = 0,16 (x - 2,09)$$

$$y = 0,16x - 0,3344 + 4,73$$

$$y = 0,16x + 4,40$$

$$Is(50) = 0,16\omega + 4,40 \quad (44)$$

Para los puntos c y d:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m_{cd} = \frac{1,78 - 4,97}{3,34 - 3,63} = 11$$

$$y - y_1 = m (x - x_1)$$

$$y - 4,97 = 11 (x - 3,63)$$

$$y = 11x - 39,93 + 4,97$$

$$y = 11x - 34,96$$

$$Is(50) = 11\omega - 34,96 \quad (45)$$

Y para los puntos d y a:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m_{da} = \frac{2,29 - 1,78}{2,05 - 3,34} = -40$$

$$y - y_1 = m (x - x_1)$$

$$y - 1,78 = -40 (x - 3,34)$$

$$y = -40x + 1,336 + 1,78$$

$$y = -40x + 3,116$$

$$Is(50) = -40\omega + 3,116 \quad (46)$$

Sabiendo que nuestra restricción es igual a:

$$1,07 \leq n \leq 3,63$$

Ecuaciones de la porosidad

$$\left\{ \begin{array}{l} Is(50) = 61\omega - 122,76 \\ Is(50) = 0,16\omega + 4,40 \\ Is(50) = 11\omega - 34,96 \\ Is(50) = -40\omega + 3,116 \end{array} \right.$$

Dadas las condiciones y debido a los datos analizados, se propone que para la caracterización del material rocoso, se deben establecer condiciones, en este caso de cada una de las áreas de influencia, obtenidas de la densidad, porosidad y absorción con sus respectivas correlaciones con el  $Is(50)$ . Estas condiciones las podemos esquematizar mediante inecuaciones y en consecuencia cuando obtengamos datos de nuevas probetas, se podrá caracterizar, siempre que se cumpla con las inecuaciones presentadas. A continuación esquematizamos dichas condiciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} Is(50) \leq 20,20p - 44,72 \\ Is(50) \leq -4,90p + 17,024 \\ Is(50) \geq 78,82p - 197,63 \\ Is(50) \geq -6,72p + 18,78 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} Is(50) \leq 102,33n - 106,58 \\ Is(50) \leq 4,95 \\ Is(50) \leq -2,78n + 9,954 \\ Is(50) \geq 0,80n + 1,038 \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} Is(50) = 61\omega - 122,76 \\ Is(50) = 0,16\omega + 4,40 \\ Is(50) = 11\omega - 34,96 \\ Is(50) = -40\omega + 3,116 \end{array} \right.$$

Los valores de  $Is(50)$  deben presentarse en MPa, los valores de densidad ( $\rho$ ) en  $g/cm^3$  y los valores de porosidad ( $\eta$ ) y absorción ( $\omega$ ) en %.

Para la roca estudiada, la cual presenta valores de  $Is(50)$  entre 1.77 y 5.01 MPa, la resistencia a la compresión simple se valora entre 42.48 y 120.24 MPa.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- La metodología planteada permite determinar que la roca del Cojitambo tiene una densidad en mina que va desde los 2.29 a 2.56 g/cm<sup>3</sup>, una porosidad entre el 1.01 al 2.49 % y una absorción de 1.06 al 3.63 %.
- El índice de carga puntual de la roca del Cojitambo, varía desde 1.77 a 5.01 MPa, lo cual permite determinar que la RCS está entre los 42.48 y 120.24 MPa, lo que categoriza al material rocoso como una clase de roca dura.
- Este tipo de roca puede ser usada para elementos ornamentales o de construcción, debido a que su resistencia a la compresión simple, mantendría una durabilidad en el tiempo.
- Una vez evaluados los resultados, que se han obtenido en las experiencias llevadas a cabo, es posible el empleo del procedimiento planteado, para la valoración de la resistencia a la compresión simple (RCS) de las rocas y caracterizarla por medio de la densidad en mina, porosidad en mina y absorción en mina.
- Se logró aplicar la teoría y los conceptos de densidad, porosidad y absorción sin la necesidad de un laboratorio y solo con probetas de rocas de similares características y propiedades, además se obtuvo la resistencia a la compresión simple de la roca, sus costos de elaboración y ahorro de tiempo fueron positivos y en menor tiempo.

### **Recomendaciones**

- Realizar más pruebas con diferentes tipos de rocas y de esta forma verificar la metodología planteada.
- Lo idóneo sería realizar el ensayo con un mayor número de probetas, para poder obtener con más exactitud la valoración de la resistencia a la compresión simple (RCS) de las rocas y su zona de influencia.
- Hay que tomar en cuenta que en el proceso de absorción y porosidad hay que ser exactos en el tiempo y la temperatura para que los datos sean reales y constantes.
- Las probetas deben mantener una temperatura y humedad constante, para evitar alteraciones de su estado natural.
- En proyectos mineros, la determinación de la resistencia a la compresión de la roca es un ensayo súper importante por lo que se necesita datos reales para correlacionarlos.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Agasco, R. (2007). Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación. Universidad de Granada. España. Obtenido de <https://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm>
- Bedoya, M., & Angel, N. (1961). El cojitambo. 293. Quito, Ecuador . Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/17951/1/EI%20Cojitambo.pdf>
- Benavente, D. (2006). Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales. Universidad de Alicante. (U. A. CSIC-UA, Recopilador) Obtenido de [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25571/1/2006\\_Benavente\\_Utilizacion\\_rocas\\_minerales\\_industriales.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25571/1/2006_Benavente_Utilizacion_rocas_minerales_industriales.pdf)
- Castillo, A. J. (20 de febrero de 2002). Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería Y Ciencia´. España. Obtenido de <http://www.dia.fi.upm.es/~jafernan/teaching/operational-research/LibroCompleto.pdf>
- Castillo, W. G., & Cajas, Z. P. (2011). Las ruinas del Cojitambo, herencia Cañari-Inca que se ofrece al turismo. 57. Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/1976>
- Cordero, P. D. (Enero de 2019). Manual de prácticas de laboratorio de Mecánica de Rocas (Parte I). Mexico. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/16473/Material%20did%C3%A1ctico.pdf?sequence=3>
- Feijoo, P., & Padrón, J. (2020). La resistividad de rocas y su relación con la resistencia a compresión simple en mina. Cuenca, Ecuador. Obtenido de <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/296>
- fuller, G., & tarwater, D. (1999). Geometría analítica. Mexico: Pearson Educación . Obtenido de <https://geometriaunicaes.files.wordpress.com/2012/04/geometria-analitica-7-ed.pdf>
- Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). Introducción a la investigación de operaciones. novena edición. (M. G. Educación, Ed.) Mexico D.F. Obtenido de [https://dudasytareas.files.wordpress.com/2017/05/hillier\\_lieberman.pdf#page=51&zoom=100,0,0](https://dudasytareas.files.wordpress.com/2017/05/hillier_lieberman.pdf#page=51&zoom=100,0,0)
- Iriondo, M. H. (2014). Introducción a la geología. (324, Ed.) Buenos Aires , Argentina: Editorial Brujas. Obtenido de <https://www.digitaliapublishing.com/a/35442/introduccion-a-la-geologia--2a-ed.->
- Lozano, A. M. (2013). Apuntes y Manuales de laboratorio de Mecánica de Suelos. Queretaro.
- M. Galván, J. S. (Enero de 2014). Correlación entre la resistencia a compresión simple y el índice de carga puntual  $I_s$  (50) en Calizas de la Comunidad Valenciana (España). Obtenido de

file:///C:/Users/HP/Downloads/CorrelacinRCSyPLTencalizasdeLaComunidad Valenciana\_GalvnM.SeronJ.B.PreciadoJ.I.\_27\_07\_2010\_.pdf

- M. Navarrete, W. M. (26 de Septiembre de 2013). Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/297678520\\_Caracterizacion\\_de\\_propiedades\\_fisico-mecanicas\\_de\\_rocas\\_igneas\\_utilizadas\\_en\\_obras\\_de\\_infraestructura](https://www.researchgate.net/publication/297678520_Caracterizacion_de_propiedades_fisico-mecanicas_de_rocas_igneas_utilizadas_en_obras_de_infraestructura)
- Nuñez del Arco, E. (2003). Geología del Ecuador. 253. Guayaquil. Obtenido de <https://fdocuments.ec/document/libro-geologia-del-ecuador-por-ing-nunez-del-arco.html>
- P. Ramirez, L. d. (1984). Mecanica de rocas aplicada a la mineria metalica subterranea. Obtenido de [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/48474228/Mecanica\\_de\\_Rocas\\_en\\_Mineria\\_Metalica\\_Subterranea-LIBRO.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DMecanica\\_de\\_rocas\\_aplicada\\_a\\_la\\_mineria.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Cre](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/48474228/Mecanica_de_Rocas_en_Mineria_Metalica_Subterranea-LIBRO.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DMecanica_de_rocas_aplicada_a_la_mineria.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Cre)
- Ragan, D. M. (1980). Geología estructural . Barcelona, España.
- Real Academia Española. (2013). Conceptos. En el Diccionario de la lengua Española (edición tricentenario). Obtenido de <https://dle.rae.es/absorci%C3%B3n?m=form> significados:
- Rodriguez, F. J. (2010). Propiedades disicas: densidad y porosidad . Departamento de Geología .
- Roura, O. M. (2010). Estudio geológico-geoténico de la inestabilidad del suelo que afecta el Cojitambo. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/2523>
- Sharo, A. A.-S. (Abril de 2019). Correlation between unconfined compression strength and point load index for selected rocks from jordan. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Abdulla\\_Sharo/publication/335757675\\_Sharo\\_A\\_A\\_and\\_Al-Shorman\\_B\\_2019\\_Correlation\\_between\\_unconfined\\_compression\\_strength\\_and\\_point\\_load\\_index\\_for\\_selected\\_rocks\\_from\\_Jordan\\_Proceedings\\_of\\_the\\_International\\_Civil\\_Enginee](https://www.researchgate.net/profile/Abdulla_Sharo/publication/335757675_Sharo_A_A_and_Al-Shorman_B_2019_Correlation_between_unconfined_compression_strength_and_point_load_index_for_selected_rocks_from_Jordan_Proceedings_of_the_International_Civil_Enginee)
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la Tierra una introduccion a la Geologia. 736. Madrid: Pearson Educación S.A. Obtenido de <http://www.xeologosdelmundo.org/wp-content/uploads/2016/03/TARBUCK-y-LUTGENS-Ciencias-de-la-Tierra-8va-ed.-1.pdf>

## ANEXOS



Anexo 1. Revisión y enumeración de cada probeta

Fuente: Elaboración propia



Anexo 2. Pesado y enumeración de las probetas

Fuente: Elaboración propia



Anexo 3. Igualdad de agua en vasos para las probetas

Fuente: Elaboración propia



Anexo 4. Resultado de ruptura de una probeta

Fuente: Elaboración propia



Anexo 1. Enumeración de las probetas

Fuente: Elaboración propia



Anexo 2. Muestras para el horno

Fuente: Elaboración propia



Anexo 3. Muestras en tiempo de secado a temperatura ambiente

Fuente: Elaboración propia