



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

**“Correlación entre el Índice de Carga Puntual y la Resistencia
a la Compresión Simple en material rocoso del sector
Cojitambo”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERA EN MINAS

Autora:

EMILY GEOVANA VÁSQUEZ GUERRERO

Director:

ING. ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

CUENCA - ECUADOR

2022

DEDICATORIA

Este trabajo de graduación va dedicado a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de mi carrera universitaria.

A mi hermano Luis Enrique y a mi hermana Lisseth a quienes quiero mucho, por compartir momentos significativos conmigo y por siempre estar dispuestos a escucharme y apoyarme. A la memoria de mi abuelito Enrique Guerrero, quién me enseñó a siempre seguir adelante y me inspiró a seguir esta carrera. A mis abuelitas y abuelito por aconsejarme y apoyarme en mis estudios. A mis amigas Guadalupe y Lisseth quienes nunca me dejaron sola y supieron escucharme cuando las necesitaba.

Este triunfo les dedico a mis padres Geovanny y Patricia por ser los principales motores de mis sueños, gracias a ellos por siempre confiar en mí, creer en mí y en mis expectativas, gracias a mi madre por siempre acompañarme en cada una de las agotadoras y largas noches de estudio; gracias a mi padre por siempre desear lo mejor para mí y luchar para que lo tuviera. Gracias a sus consejos puedo superar cualquier obstáculo que se presente. Ellos son mi mayor motivación para nunca rendirme y seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios, por haberme permitido culminar una de mis metas, ya que tengo la certeza de que siempre va a estar conmigo.

Mi profundo agradecimiento a la Universidad del Azuay, a toda la facultad de ciencia y tecnología, especialmente a mis profesores al Ing. Leonardo Núñez, Ing. Eduardo Luna, Ing. Fernando Valencia, Ing. Federico Auquilla, Doc. Juan Calderón, Ing. Gil Álvarez e Ing. Iván Mendoza quienes compartieron sus conocimientos e hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada uno de ustedes por su dedicación, paciencia, apoyo incondicional y amistad.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento al Ing. Patricio Feijoo, principal colaborador durante todo este proceso, quien con su dirección, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo, así mismo quiero darle las gracias por brindarme su apoyo y conocimiento durante mi vida universitaria.

ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN.....	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1.....	3
MARCO TEÓRICO	3
1.1 Génesis de las muestras	3
1.1.1 Cojitambo.....	3
1.1.2 Geología local	4
1.1.2.1 Formación Biblián	4
1.1.2.2 Formación Loyola.....	5
1.2 Propiedades de los minerales.....	5
1.2.1 Color.....	7
1.2.2 Textura	9
1.2.3 Composición química	9
1.2.4 Estructura	9
1.2.5 Isotropía y Anisotropía.....	10
1.2.6 Resistencia de la roca	10
1.2.7 Dureza	11
1.2.8 Densidad.....	12
1.2.9 Humedad	13
1.2.10 Porosidad.....	13
1.2.11 Plasticidad	15
1.2.12 Permeabilidad.....	15
1.3 Andesitas	16
1.3.1 Clasificación.....	17
1.3.1.1 Dacitas	17
1.3.1.2 Andesitas con biotita y hornblenda.....	18
1.3.1.3 Andesitas con piroxeno.....	18

1.3.2	Propiedades de la andesita	18
1.3.3	Usos de la andesita	19
1.4	Proceso de rotura	19
1.4.1	Procesos de rotura macroscópica	20
1.4.2	Procesos de rotura microscópica	20
1.5	Índice de carga puntual.....	20
1.5.1	Ensayo de carga puntual (Ensayo de Franklin).....	21
1.5.2	Alcance de la máquina de Franklin.....	22
1.5.3	Resumen del método	22
1.5.4	Importancia del uso	22
1.5.5	Aparato.....	22
1.5.6	Preparación para las muestras	24
1.6	Obtención del Is (50).....	25
1.7	Resistencia a la compresión simple.....	27
1.8	Correlación entre la resistencia de la compresión simple y el índice da carga puntual	31
CAPÍTULO 2.....		33
EXPERIMENTACIÓN		33
2.1.	Descripción de las muestras	34
2.2.	Preparación de muestras	36
2.2.1.	Numeración de muestras	37
2.2.2.	Medición de muestras	39
2.2.2.1	Medición de las muestras que se usarán para determinar el Is ₅₀ ..	39
2.2.2.2	Medición de las muestras que se usarán para determinar la RCS	41
2.3.	Proceso de ruptura de muestras	43
2.4.	Determinación de la resistencia a la compresión simple.....	44
2.5.	Determinación del índice de carga puntual	46
CAPÍTULO 3.....		50
ANÁLISIS DE RESULTADOS		50
3.1	Análisis de resultados del Índice de Carga Puntual.....	51
3.2	Análisis de resultados de la Resistencia a la Compresión Simple.....	53
3.3	Propuesta de Correlación.....	56
3.4	Comparación entre correlaciones de diferentes autores	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		64
CONCLUSIONES.....		¡Error! Marcador no definido.

RECOMENDACIONES.....	¡Error! Marcador no definido.
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
ANEXOS.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cerro Cojitambo	4
Figura 1.2. Formaciones presentes en Cojitambo	5
Figura 1.3. Propiedades de los minerales.....	7
Figura 1.4. Isotropía y anisotropía	10
Figura 1.5. Porosidad según la conexión	14
Figura 1.6. Plasticidad.....	15
Figura 1.7. Diagrama QAPF de la andesita	17
Figura 1.8. Diferentes andesitas	18
Figura 1.9. Esquema de la máquina de Franklin.....	23
Figura 1.10. Configuraciones de carga y muestras para diferentes rocas	25
Figura 1.11. Resistencia a la compresión.....	27
Figura 1.12. Desarrollo de las fracturas extensionales.....	29
Figura 1.13. Prueba de compresión simple	29
Figura 2.1. Ubicación cantonal del área de estudio	33
Figura 2.2. Geología del área de estudio.....	34
Figura 2.3. Formaciones presentes en el área de estudio	35
Figura 2.4. Dimensiones de las muestras denominadas P5.....	36
Figura 2.5. Dimensiones de las muestras denominadas P7.....	36
Figura 2.6. Dimensiones de las muestras denominadas P9.....	37
Figura 2.7. Numeración de las muestras P5.....	37
Figura 2.8. Numeración de las muestras P7.....	38
Figura 2.9. Numeración de las muestras P9	38
Figura 2.10. Muestras marcadas en el centro.....	44
Figura 2.11. Máquina preparada para colocar la muestra	44
Figura 2.12. Colocación de la muestra para ser sometida a la rotura	45
Figura 2.13. Muestra sometida a la rotura	45
Figura 2.14. Rotura de la muestra	45
Figura 2.15. Máquina preparada con las puntas cónicas.....	46
Figura 2.16. Ubicación de las muestras entre las puntas cónicas	46
Figura 2.17. Muestra sometida a rotura por las puntas cónicas	47
Figura 2.18. Rotura de las muestras usando las puntas cónicas.....	47
Figura 3.1. Prensa Humboldt modelo CM-2500-DI	50
Figura 3.2. Correlación entre el Is50 y RCS	58

Figura 3.3. Gráfica de las 9 correlaciones entre el I_{s50} y RCS..... 62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Color de la roca de acuerdo a la época.....	8
Tabla 1.2. Color de la roca de acuerdo a la edad	8
Tabla 1.3. Composición de las rocas.....	9
Tabla 1.4. Escala de Mohs de dureza de los materiales	12
Tabla 1.5. Densidad de los minerales.....	13
Tabla 1.6. Permeabilidad de los minerales.....	16
Tabla 1.7. Propiedades físicas y químicas de la andesita.....	19
Tabla 1.8. Clasificación de las rocas según la resistencia a la compresión.....	30
Tabla 2.1. Resultados de la medición de las muestras P5 que se usaron para determinar el I_{S50}	39
Tabla 2.2. Resultados de la medición de las muestras P7 que se usaron para determinar el I_{S50}	40
Tabla 2.3. Resultados de la medición de las muestras P9 que se usaron para determinar el I_{S50}	40
Tabla 2.4. Resultados de la medición de las muestras P5 que se usarán para determinar la RCS	41
Tabla 2.5. Resultados de la medición de las muestras P7 que se usaron para determinar la RCS	42
Tabla 2.6. Resultados de la medición de las muestras P7 que se usaron para determinar la RCS	42
Tabla 2.7. Resultados de las fuerzas expresadas en kilonewtons de las 60 muestras	48
Tabla 3.1. Resultados del $I_{S(50)}$ de las 60 muestras.....	52
Tabla 3.2. Resultados de la RCS de las 60 muestras.....	54
Tabla 3.3. Valores para realizar la propuesta de correlación	56
Tabla 3.4. Correlaciones creadas por diferentes autores	59
Tabla 3.5. Resultados de las correlaciones usando el I_{S50} de las 60 muestras	60

ÍNDICE DE ANEXOS

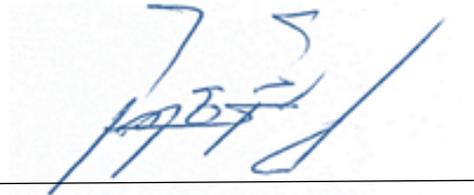
Anexo 1. Numeración de las muestras.....	69
Anexo 2. Medición de las muestras	69
Anexo 3. Muestras después del proceso de rotura.....	70
Anexo 4. Muestras siendo retiradas del lugar donde se las mando a cortar	70

**“CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL Y LA
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN MATERIAL ROCOSO DEL
SECTOR COJITAMBO”**

RESUMEN

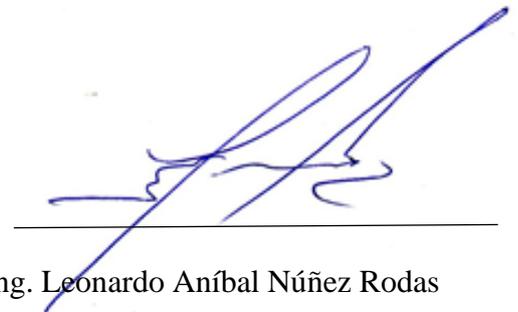
Para el desarrollo del presente proyecto se analizaron un total de 120 muestras del sector denominado Cojitambo (Cañar-Ecuador), las cuales presentaron diferentes dimensiones. Las primeras 40 muestras fueron de 5cm x 10cm x 10cm, las 40 siguientes tuvieron dimensiones de 7cm x 10cm x 10cm y las últimas 40 muestras fueron de 9cm x 10cm x 10cm.; posterior a ello, se midieron y codificaron cada una de ellas para diferenciarlas. Del primer grupo, sobre las primeras 20 muestras se realizaron ensayos para determinar el $I_{s(50)}$ y en las 20 restantes se determinó la resistencia a la compresión simple, así con cada uno de los otros dos grupos. Con los resultados obtenidos se establecieron correlaciones entre el Índice de Point Load Test $I_{s(50)}$ y la compresión simple, en relación al dimensionamiento de las probetas, obteniendo como resultado final una fórmula de dichas correlaciones.

Palabras clave: Índice de carga puntual, resistencia a la compresión simple, andesitas, Cojitambo.



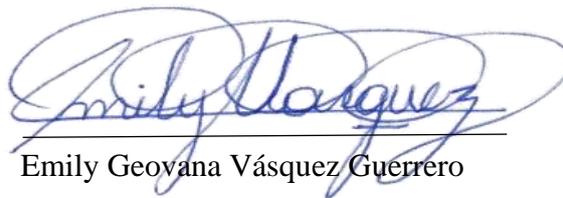
Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Director del Trabajo de Titulación



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



Emily Geovana Vásquez Guerrero

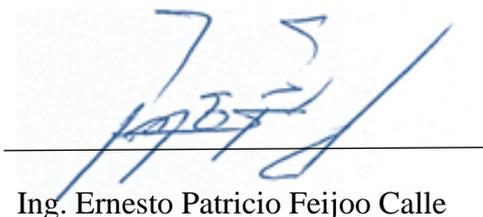
Autora

**“CORRELATION BETWEEN POINT LOAD INDEX AND SIMPLE
COMPRESSIVE STRENGTH IN ROCK MATERIAL OF THE COJITAMBO
SECTOR”**

ABSTRACT

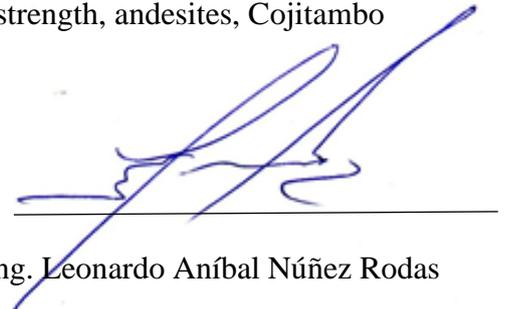
This study investigated a total of 120 samples with different dimensions that were analyzed from the zone called Cojitambo (Cañar-Ecuador). The first 40 samples were 5cm x 10cm x 10cm, the next 40 had dimensions of 7cm x 10cm x 10cm x 10cm and the last 40 samples were 9cm x 10cm x 10cm x 10cm. After that all samples were measured and coded to differentiate them. From the first group, 20 samples were tested to determine the Is50 and the remaining 20 were tested to determine the resistance to simple compression, this process was carried out with the other two groups. With the results of the samples, correlations were established between the Point Load Test Index Is (50) and the simple compression, in relation to the dimensioning of the samples, obtaining as a final result a formula for these correlations.

Key words: point load index, simple compressive strength, andesites, Cojitambo



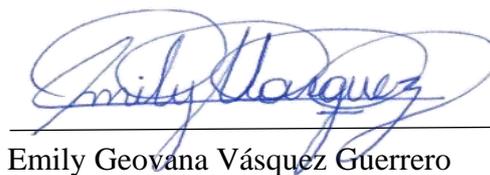
Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Director of the Degree Project



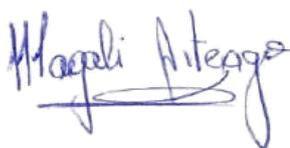
Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinator of the School

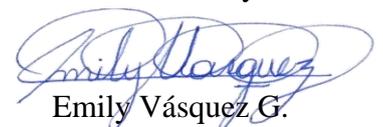


Emily Geovana Vásquez Guerrero

Author



Translated by



Emily Vásquez G.

Emily Geovana Vásquez Guerrero

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Septiembre, 2022

“CORRELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN MATERIAL ROCOSO DEL SECTOR COJITAMBO”

INTRODUCCIÓN

En las actividades mineras que se pueden dar tanto a cielo abierto como en subterráneo es importante conocer el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple, para poder conocer el tipo de material y tomar decisiones para el avance de la explotación minera. Para realizar los procesos antes mencionados se deben enviar muestras de roca a laboratorios para que sean analizadas y reporten la resistencia de la roca; este proceso puede llegar a ser demorado ya que el tiempo de entrega de los resultados puede ser extenso, además conforme se avanza en la explotación de la mina se deben enviar muestras al laboratorio lo que puede convertir a este proceso en costoso.

Para evitar los problemas antes mencionados, en este trabajo investigativo se determinó la correlación entre el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple, lo cual favorecerá a la obtención de respuestas rápidas.

Para estimar la resistencia a la compresión simple y el índice de carga puntual de una roca, se pueden usar métodos o ensayos que se realizan en el campo o en laboratorio. En el presente trabajo se obtuvieron dos valores mediante el uso de la máquina de compresión “Humboldt”.

Por otro lado, diferentes autores han determinado correlaciones entre el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple. Por ejemplo, en 1972 Franklin y Bosh

mediante diferentes ensayos obtuvieron una correlación la cual hasta el día de hoy es muy utilizada, sin embargo, existen diversos factores que afectan a esta correlación, por ejemplo las diferencias que existen entre rocas blanda y duras. El autor Mark en 2002 halló una correlación usando un software llamado CMRR, que fue diseñado para facilitar la entrada de los datos, su funcionamiento es sencillo y da respuestas rápidas.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Génesis de las muestras

1.1.1 Cojitambo

El cerro Cojitambo está limitado al norte con el cantón Biblián, por la quebrada de Pizhumaza, colina de Zhunzhi y la loma de Mururco. Se han dado varias teorías sobre cómo se originó, los geólogos manifiestan que pertenece a la era cuaternaria y que en el gran cataclismo de la formación de los Andes se creó el Cojitambo, quedando solo los escombros de su estado primitivo y que su altura debió ser mucho mayor dada la gran cantidad de materiales encontrados a sus alrededores, por otro lado también hay la teoría que manifiesta que el origen de este cerro es eminentemente volcánico y esto se comprueba por el aspecto que presenta, pues se dice que fue un volcán activo y que por los constantes cambios geológicos de la tierra se cerró su cráter y se produjo una gran explosión que trajo como consecuencia el enorme derrumbe de material constitutivo, que podemos observar en dirección sureste (Gobierno Provincial de Cañar, 2015).

La topografía del suelo es bastante accidentada, con algunas planicies pequeñas un poco inclinadas, los agentes atmosféricos modificadores del suelo, como los vientos, las lluvias, han producido grandes erosiones, disminuyendo gran parte de terrenos cultivables. Como la mayor parte del terreno se encuentra a los 3000 metros de altura sobre el nivel del mar la temperatura fluctúa entre los 11° y 12° grados centígrados, de manera que su clima es templado y con dos estaciones variables entre verano e invierno. (Fernández , 2018)



Figura 1.1: Cerro Cojitambo

Fuente: (Rosales, 2015)

1.1.2 Geología local

El cerro está formado por roca volcánica que se levanta en medio de la arenisca de Azogues, su formación se produjo cuando se hundieron las capas de la formación sedimentaria a su lado. Los pedazos de andesita se acumularon en su mayor parte al pie del cerro y algunos rodaron sobre las faldas del terreno adyacente encontrándose ahora esparcidos por los campos y hasta el pueblo de Chuquipata (Rodríguez, 2012).

El cerro Cojitambo presenta una variedad típica de la andesita anfibólica de un color gris claro y se distinguen perfectamente bien por los cristallitos de anfíbola, mica negra y los fragmentos más grandes de la plagioclasa (andesina) blanca. Además, en esta zona se encuentran las Formaciones de Biblián y Loyola

1.1.2.1 Formación Biblián

Se encuentra formada por areniscas y lutitas que se encuentran organizadas en secuencia de grano, también, existe la presencia de andesitas interestratificados. Esta formación

presenta características de un ambiente fluvial y puede alcanzar en ciertos lugares un espesor mayor a 500 m. (Ureña , 2021).

1.1.2.2 Formación Loyola

Está compuesta por lutitas negras ricas en pirita con intercalaciones de granos de areniscas finas que tienen una coloración amarillenta por la meteorización. (Ureña , 2021).

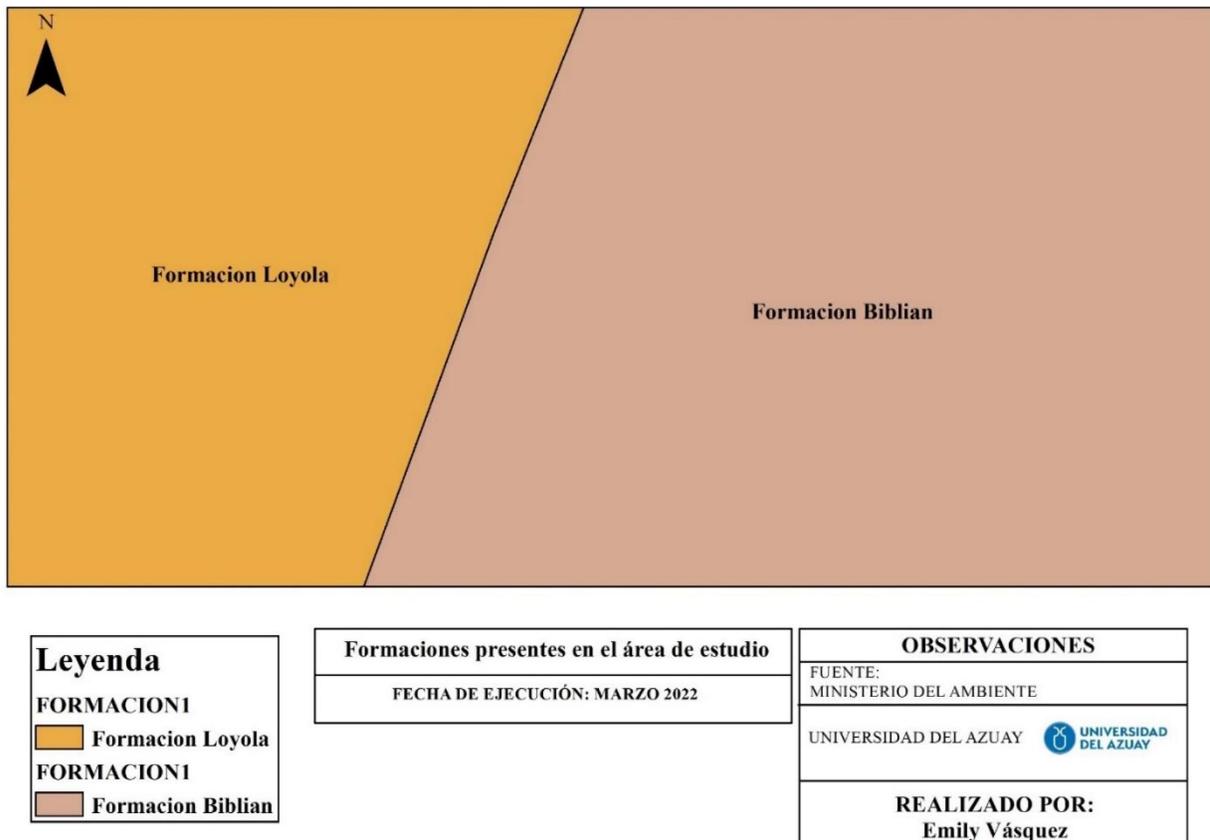


Figura 1.2: Formaciones presentes en Cojitambo

Fuente: Elaboración propia

1.2 Propiedades de los minerales

Son el conjunto de características que hacen que el mineral se comporte de una manera determinada ante factores como: luz, calor, tenacidad, dureza y color. Las propiedades de los materiales se clasifican generalmente como físicas, químicas y mecánicas, aunque en

el campo de la construcción, ornamentación y restauración también pueden incluirse las propiedades relacionadas con su trabajabilidad. (Torres , 2014),

Los materiales que se necesitan para elaborar un determinado producto se diferencian entre sí y se eligen en función de sus propiedades. Las propiedades de los materiales se pueden agrupar en base a distintos criterios (Universidad de Granada, 2015).

- Propiedades sensoriales.
- Propiedades fisicoquímicas.
- Propiedades mecánicas.
- Propiedades tecnológicas.

Dentro de las propiedades físicas se incluyen densidad, porosidad, permeabilidad, capacidad calorífica, conductividad y expansión térmica, etc. Entre las propiedades químicas pueden incluirse la resistencia a soluciones ácidas y alcalinas, y a las reacciones inducidas por la presencia de sales. Las propiedades mecánicas incluyen la resistencia a la compresión, tensión, flexión e impacto y penetración por otro cuerpo y por otras acciones que involucran la generación de fuerzas, como la cristalización de hielo y sales en el interior del sistema poroso de los materiales y los cambios volumétricos de los mismos debido a cambios de temperatura. (Torres , 2014)

Las propiedades que tienen las rocas determinan que son sólidas y que jamás se adaptan a la forma de un recipiente o contenedor como lo hacen los gases o los líquidos, además pueden estar formadas de granos minerales unidos. Conocer las propiedades de las rocas es importante ya que ayuda a saber con qué tipo de roca se va a trabajar y los procedimientos que podríamos aplicar. (Ochoa, 2018)

Estas propiedades, que en última instancia resultan de la composición química y mineralógica de los materiales, de su textura y de su estructura, permiten caracterizar la resistencia de los materiales a los agentes de deterioro. (Torres , 2014)

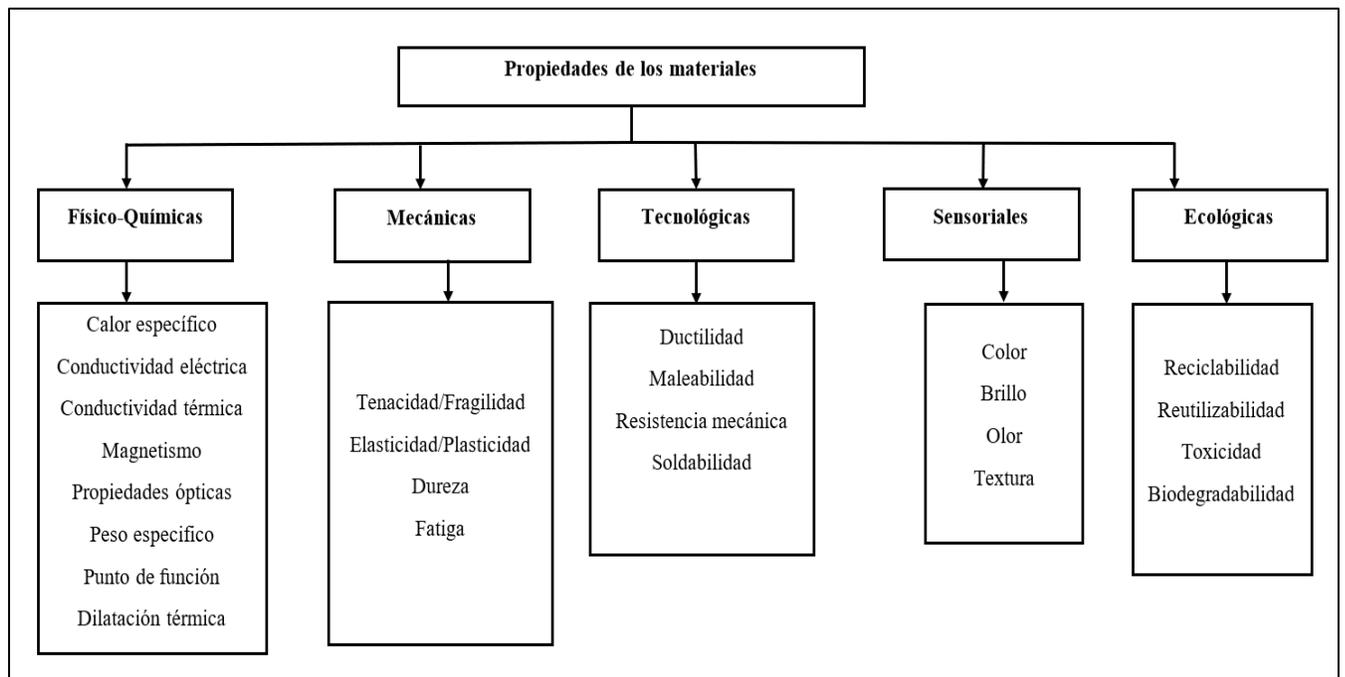


Figura 1.3: Propiedades de los minerales

Fuente: (Búa, 2014)

Una misma propiedad de un material puede medirse en distintos aparatos, bajo distintas condiciones experimentales y utilizando probetas de muestras de distintas dimensiones y formas. Esto supone generalmente obtener resultados distintos para una misma propiedad, por lo que éstas deben medirse siguiendo normativas que aseguren que los datos obtenidos son comparables con los obtenidos en otros laboratorios. (Torres , 2014).

1.2.1 Color

Las rocas pueden presentar diferentes tipos de colores, pero los geólogos no usan esta propiedad para identificar qué roca es. El color de una roca es el reflejo de los minerales que la conforman, es decir, si una roca es rica en hierro va tener tonalidades rojizas y si es rica en feldespato va a tener tonalidades rosadas, mientras que una roca rica en clorita y minerales de alteración de óxidos va a tener tonalidades verdosas. (Ochoa, 2018)

Tabla 1.1: Color de la roca de acuerdo a la época

Periodo, época		Color
Cuaternario	Q	amarillo muy claro
Terciario	T	amarillo, al ocre
Cretácico	K	verde claro
Jurásico	J	azul
Triásico	TR	violeta
Pérmico	P	color café o azul
Carbonífero	C	gris
Devónico	D	color café
Silúrico	S	verde-azul
Ordovícico	O	verde oscuro
Cámbrico	Cb	gris-verde

Fuente: (Ochoa, 2018)

Tabla 1.2: Color de la roca de acuerdo a la edad

Roca	Color
Intrusiva joven	rosada
Intrusiva antigua	rojo
Vulcanitas, extrusivas joven	violeta clara
Vulcanitas, extrusivas antiguas	violeta
Caliza	azul
Sedimentos no consolidados	amarillo

Fuente: (Vinuesa, 2014)

1.2.2 Textura

Es una característica que usan los geólogos para identificar los diferentes tipos de rocas que existen en la naturaleza debido a que la textura está relacionada con el origen y formación de la roca. La textura va a depender del tipo de roca que se esté analizando por ejemplo las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas tienen su textura y características propias. Las rocas ígneas se caracterizan por tener textura fanerítica, porfídica y afanítica. (Ochoa, 2018)

1.2.3 Composición química

Es una propiedad importante que define la composición de la roca y el origen. La composición de las rocas va a depender del contenido o porcentaje de sílice, de acuerdo a las Tabla 1.3 (Ochoa, 2018).

Tabla 1.3: Composición de las rocas

Tipo de Roca	% de sílice
Rocas ultramáficas o ultra básicas	menos del 45% de sílice
Rocas básica o máficas	del 45% al 52% de sílice
Rocas intermedias	del 52% al 63% de sílice
Rocas ácidas o félsicas	más del 63% de sílice.

Fuente: (Díaz, 2004)

1.2.4 Estructura

La estructura de las rocas se refiere a lo que se encuentra en el macizo rocoso, esto depende si una roca es ígnea sedimentaria o metamórfica, del ambiente geológico y del origen. Los geólogos usan esta propiedad para definir el ambiente geológico de formación y entorno mismo. Por ejemplo, los flujos de lavas y las rocas ígneas suelen presentarse a manera de estructuras columnares cuando se enfrían. Los depósitos fluviales suelen presentarse como conglomerados en los bordes de los ríos y las rocas sedimentarias suelen presentar una estructura de capas. (Ochoa, 2018)

1.2.5 Isotropía y anisotropía

Estos dos conceptos se utilizan para poder calificar el comportamiento de los materiales respecto de las direcciones del espacio. Un material es isótropo cuando sus propiedades físicas se mantienen constantes a través del tiempo sin cambiar su magnitud esto es independiente del ángulo en el que se esté midiendo, estos materiales son usados para la determinación de las propiedades mecánicas de las rocas. El material es anisótropo cuando la propiedad varía según la dirección considerada, en este caso es una propiedad vectorial, las propiedades físicas varían de acuerdo con la orientación en la cual se realizan las medidas. (Universidad de Granada, 2015)

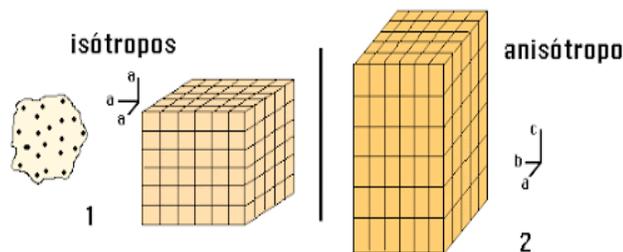


Figura 1.4: Isotropía y anisotropía

Fuente: (Muñoz, 2017)

1.2.6 Resistencia de la roca

Se debe conocer la resistencia del material, ya que es la carga bajo la cual se rompe y se desintegra el material. Otra definición que existe es que la resistencia es aquella se da cuando al aumentar la carga se observa una grieta, pero esta definición no se puede aplicar a un trozo de roca que está rodeada de otros trozos de roca en los macizos rocosos. La resistencia determina la competencia de la roca matriz para mantener unidos sus componentes la cual depende principalmente de la composición mineral y del grado de alteración. (Rodríguez, 2012)

La actividad minera está relacionada con la mecánica de rocas, pero uno de los problemas que existe es al momento de determinar las propiedades de las rocas cuando estas se encuentran sometidas a esfuerzos compresivos, por esto existen diferentes ensayos que

crean curvas esfuerzo-deformación lo cual permite determinar las propiedades. (Flores & Tinoco , 2019)

1.2.7 Dureza

La dureza de un material es la resistencia que opone el material a su deformación plástica superficial, a ser rayado o atravesado. Se puede definir también como dureza a la propiedad de la capa superficial del material para resistir toda deformación elástica, plástica o destrucción. (Galbarro, 2020)

Existen muchos métodos de evaluar la dureza como:

- La resistencia al rayado.
- La resistencia a la compresión.
- La resistencia a la abrasión.
- La resistencia al rebote.
- La resistencia al impacto.

Generalmente la dureza de los materiales aumenta a medida que la resistencia a la compresión aumenta. Dado que las rocas son materiales frágiles pueden presentar débil o moderada resistencia al impacto, por lo que son materiales trabajables con herramientas de impacto; esto permite en la mayor parte de los casos un buen acabado. Lo mismo puede decirse de su buena trabajabilidad por pulido, particularmente en rocas como calizas y mármoles, aunque existen rocas que resisten bien la raya y la abrasión. (Universidad de Granada, 2015)

Tabla 1.4: Escala de Mohs de dureza de los materiales

Escala de Mohs de dureza de los materiales	
1	Talco
2	Yeso
3	Calcita
4	Fluorita
5	Apatito
6	Feldespatos
7	Cuarzo
8	Topacio
9	Corindón
10	Diamante

Fuente: (Ingemecánica ,2020)

1.2.8 Densidad

La densidad es una propiedad física de la materia, definida como la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, por lo que, sus unidades serán unidades de masa sobre unidades de volumen, típicamente g/ml, g/cm³, kg/m³ o lb/pie³ (Flores & Tinoco , 2019).

La densidad natural o húmeda es la relación entre la masa de una muestra sin cambios y el volumen que la misma ocupa, su fórmula es la siguiente:

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

Donde

ρ : densidad de la muestra

m: masa de la muestra

v: volumen de la muestra

Tabla 1.5: Densidad de los minerales

Mineral	Densidad (kg/m³)
Anfíboles	2980-3200
Augita	3200-3400
Arenisca	2300
Biotita	2900
Calcita	2710
Dolomita	2870
Magnetita	5170-5180
Moscovita	2830
Olivino	3250-3400

Fuente: (Padrón, 2020)

1.2.9 Humedad

La humedad es la razón en porcentajes entre la masa del agua que está en los poros y la masa de las partículas sólidas que conforman la roca (Fajardo & Espinoza , 2020).

$$\%w = \frac{M_w}{M_s} * 100 \quad (2)$$

Donde

%w: porcentaje de humedad

Mw: masa de agua contenida en los poros

Ms: masa de agua contenida en las partículas solidas

1.2.10 Porosidad

Se expresa con la letra n y es la razón entre el volumen de los espacios vacíos entre la roca y el total volumen aparente de la roca (Galván & Restrepo, 2016).

Su fórmula es la siguiente

$$n = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{muestra}}} * 100 \quad (3)$$

Dónde

n: porosidad

V_{poros} : volumen de los poros

V_{muestra} : volumen de la muestra

Según (Archie, 1952) se considera los siguientes valores de porosidad:

- Muy baja: menor al 4%
- Baja: de 4 a 8%
- Media de 8 a 16%
- Alta de 16 a 32%
- Muy alta: mayor al 32%

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 (Larriva , 2022).

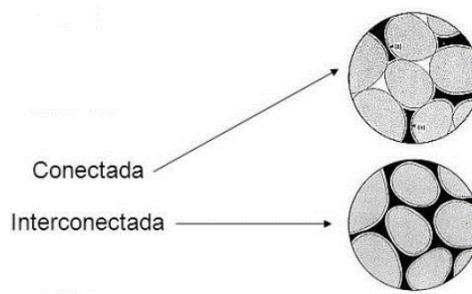


Figura 1.5: Porosidad según la conexión

Fuente: (Vélez, 2018)

1.2.11 Plasticidad

La plasticidad es una propiedad ligada con la elasticidad, sin llegar a ser opuesta. Cuando se deforma un material elástico, éste puede recuperar su forma, pero si se rebasa un cierto límite, el material quedará deformado (Toral , 2020).

En los materiales elásticos, en particular en muchos metales dúctiles, un esfuerzo uniaxial de tracción pequeño provoca un comportamiento elástico. Eso significa que pequeños incrementos en la tensión de tracción provoca pequeños incrementos en la deformación, si la carga se vuelve cero de nuevo el cuerpo recupera exactamente su forma original, es decir, se tiene una deformación completamente reversible (Padrón , 2020).

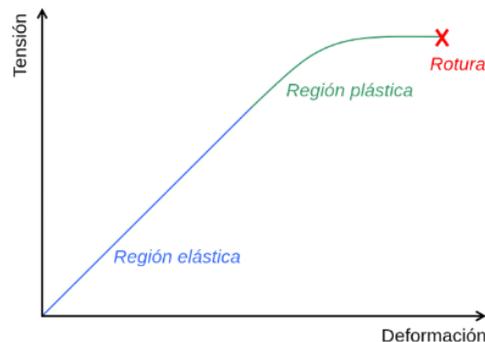


Figura 1.6: Plasticidad

Fuente: (Montaleza, 2017)

1.2.12 Permeabilidad

Es la propiedad de un material poroso que facilita que los fluidos atraviesen las rocas, esta se produce bajo un gradiente de potencia (Navarrete , y otros, 2013).

Se mide con la siguiente formula:

$$K = \frac{u * Q * L}{\Delta p * A_{prob}} * 100 \quad (4)$$

Dónde

K: permeabilidad

u: viscosidad del fluido

Q: caudal del fluido

L: longitud del mineral

Aprob: sección transversal del mineral

Δp : variación de la presión

Tabla 1.6: Permeabilidad de los minerales

Tipo de Roca	Coefficiente de Permeabilidad (cm/s)
Ígneas	
Basalto	10^{-4} a 10^{-5}
Diabasa	10^{-5} a 10^{-7}
Gabro	10^{-4} a 10^{-5}
Granito	10^{-3} a 10^{-5}
Metamórficas	
Cuarcita	10^{-5} a 10^{-7}
Esquisto	10^{-4}
Gneis	10^{-3} a 10^{-4}
Mármol	10^{-4} a 10^{-5}
Pizarra	10^{-4} a 10^{-7}
Sedimentarias	
Arenisca	10^{-2} a 10^{-4}
Caliza	10^{-2} a 10^{-4}
Dolomita	$4,6 \times 10^{-9}$ a $1,2 \times 10^{-8}$
Lutita	10^{-3} a 10^{-4}

Fuente: (Flores y Tinoco, 2020)

1.3 Andesitas

El sector Cojitambo está formado por andesitas. Las cuales son la segunda roca volcánica más común en la corteza terrestre, el primero es el basalto. La andesita es una roca volcánica caracterizada por una textura hipocristalina con abundantes fenocristales de plagioclasa entre los félsicos y anfíbol, biotita o piroxenos entre los máficos. El QAPF proyecta andesitas y basaltos en el mismo campo composicional, el índice de color mayor de 35 habitualmente en los basaltos y la presencia de vidrio abundante no muy

habitual en basaltos, permite diferenciar ambos tipos litológicos en una muestra de mano (Ambramson , 1996).

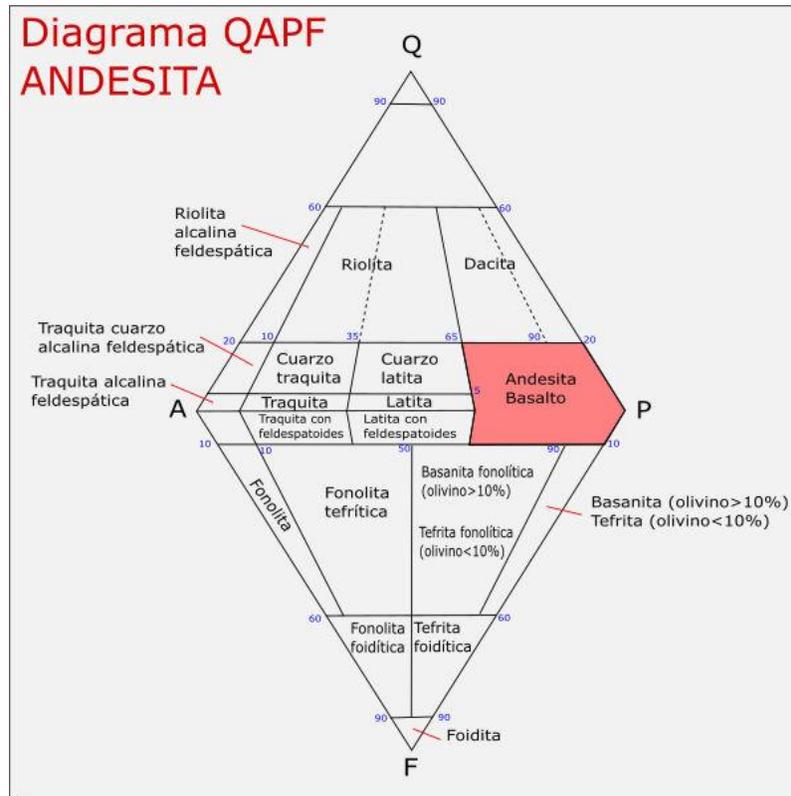


Figura 1.7: Diagrama QAPF de la andesita

Fuente: (GEOLOGIAWEB, 2009)

1.3.1 Clasificación

Las andesitas son de composición intermedia entre las riolitas y las dioritas.

Pueden dividirse en tres clases de acuerdo al orden de los minerales que la integran:

1.3.1.1 Dacitas

Son rocas compuestas de plagioclasa, con biotita, hornblenda y piroxeno. Las dacitas de plagioclasa con piroxeno son las más comunes y su contenido es rico en hierro. Pueden además reservar pequeñas partículas de cuarzo y sillimanita. No siempre se les clasifica como andesitas, pero se encuentran en el mismo escalafón según su composición química.

1.3.1.2 Andesitas con biotita y hornblenda

Hay presencia notable de los minerales ferromagnésicos. La biotita, mineral máfico del grupo de las micas trioctaédricas, y la hornblenda.

1.3.1.3 Andesitas con piroxeno

Ricas en hierro y magnesio. Conforman el grupo de rocas ígneas volcánicas más numerosas, son oscuras y espesas. En la mineralogía se conoce además la andesita basáltica, rica en olivino y otros minerales ferromagnésicos, característicos del basalto. La andesita puede diferenciarse fácilmente del basalto por su alto contenido de sílice o vidrio (Piedra , 2008).



Figura 1.8: Diferentes andesitas

Fuente: (Departamento de Petrología y Geoquímica, 2008)

1.3.2 Propiedades de la andesita

La andesita se caracteriza por ser una roca ígnea extrusiva, por su origen asociado con volcanismo, entra en el grupo de las rocas volcánicas, además, es representante de las rocas ígneas intermedias con una composición química intermedia (53 al 63% de SiO_2).

A pesar de que la andesita se considera como una roca extrusiva, también puede tener un origen intrusivo a manera de roca subvolcánica, en estructuras que se conocen como diques y también filones o sills. En cuanto a las propiedades físicas y químicas representativas de la andesita, se pueden mencionar las siguientes (Maldonado , 2021)

Tabla 1.7: Propiedades físicas y químicas de la andesita

ANDESITA	PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS
Tipo de roca	Extrusiva (volcánica), Subvolcánica
Color	Gris claro, gris oscuro, a veces verdoso
Textura volcánica	Afanítica (microcristalina), vesicular
Textura subvolcánica	Porfídica
Grado de cristalinidad	Holocristalina
Densidad o pesos específico	2.65 a 2.7 gr/cm ³
Composición química	del 52 al 63 % de SiO ₂
Quimismo	Roca intermedia
Dureza de Mohs	menor a 6
Origen y formación	Volcánico, magmático
Ambiente geológico	Magmático, volcánico

Fuente: (Geoquímica, 2017)

1.3.3 Usos de la andesita

- Se obtiene productos de ripio y arena que se usan como complemento del concreto.
- Como roca triturada para relleno y lastre de carreteras.
- En países desarrollados sirven como agregado de alta densidad en escudos de concreto de reactores nucleares.
- Si tienen textura porfídica con cristales mayores a 5mm, se los puede usar como rocas ornamentales y formar baldosas.
- A veces como rocas ornamentales para esculturas o hacer sillars de roca (Maldonado , 2021).

1.4 Proceso de rotura

El proceso de rotura macroscópica de la roca es complejo ya que pueden intervenir factores microscópicos que dificultan el análisis de la rotura y su compresión. (Ureña , 2021).

1.4.1 Procesos de rotura macroscópica

1. **Rotura por tracción:** Este tipo de rotura hace que una cierta sección de la roca esté sometida a una tracción pura o casi pura.
2. **Rotura por esfuerzo cortante:** Se produce cuando una parte de la superficie de la roca está sometida a esfuerzos cortantes suficientemente altos para que una cara de la superficie se deslice respecto a la otra.
3. **Rotura por compresión:** Se presenta en volúmenes de roca comprimidos intensamente, microscópicamente se producen grietas de tracción y planos de corte que progresan delimitando el volumen fragmentado por la compresión. Las rocas más densas bajo compresión isotrópica pueden colapsar bajo compresiones muy elevadas por su cambio de estructura cristalina.
4. **Rotura por flexión:** Se produce cuando una cierta sección de la roca está sometida a flexión. La sección está sometida a unas tensiones normales (Ceballos, 2016).

1.4.2 Procesos de rotura microscópica

1. **Fracturas o formación de superficies libres:** Consiste en la apertura de una grieta con la formación de una superficie libre, para lo cual hay que aportar una “energía específica de superficie” por unidad de área creada o según el crecimiento de una grieta ya existente a causa de una tensión de tracción.
2. **Deslizamiento:** Se produce cuando por efecto de un cortante, un plano reticular, o una banda de planos se deslizan.

1.5 Índice de carga puntual

La prueba de carga puntual es la prueba que más se usa 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 de la siguiente manera:

$$I_s = \frac{p}{De^2} \quad (5)$$

Donde:

I_s: índice de carga puntual (kg/mm²).

P: fuerza (kg).

De: diámetro equivalente de la probeta (mm).

El diámetro equivalente se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$De^2 = \frac{4}{\pi} * W * D \quad (6)$$

Donde:

W: ancho medio de la muestra (mm).

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

1.5.1 Ensayo de carga puntual (Ensayo de Franklin)

Pueden existir algunos problemas para desarrollar el ensayo, por ejemplo: no disponer de material suficiente para preparar las probetas según las normas establecidas para el desarrollo de los ensayos de compresión simple o tener demasiadas muestras que no resulte factible el transporte de las mismas, siendo más conveniente elaborarlas “in situ”. (Flores & Tinoco , 2019)

El ensayo de carga puntual consiste en romper un fragmento de roca entre dos puntas conicas de acero endurecido, la muestra es colocada entre dichas puntas, es conveniente que su diametro no sea inferior a 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 manometro de la bomba manual que produce la presion requerida para dicha rotura (Ureña , 2021).

1.5.2 Alcance de la máquina de Franklin

- El método de ensayo cubre los lineamientos, requisitos y procedimientos para la determinación del índice de carga en la roca.
- Las muestras pueden tener diámetro desde 30 a 85 mm.
- Este método de prueba se aplica a rocas de resistencia media (resistencia a la compresión de más de 15 MPa).
- Todos los valores observados y calculados deberán ajustarse a las directrices para los dígitos significativos y redondeo de datos.

1.5.3 Resumen del método

- Esta prueba de índice se realiza sometiendo una muestra de roca a una carga, cada vez mayor hasta que el fallo se produzca por la fractura de la muestra.
- También el índice de carga puntual se utiliza para clasificar las rocas. Es un método común que permite conocer la estimación de la resistencia a la compresión uniaxial.

1.5.4 Importancia del uso

- La prueba de carga puntual se utiliza para reducir el tiempo y el costo de las pruebas de resistencia a la compresión, cuando es utilizada en el campo.
- Las muestras de rocas pueden ser diametrales y axiales; en forma de bloques o bultos irregulares, sin importar la forma en que se realice el ensayo.

1.5.5 Aparato

- El equipo de carga puntual se compone de un sistema de carga típicamente compuesto por un bastidor de carga, un sistema de medición para indicar la carga P , además debe ser resistente a golpes y vibraciones para que la precisión en las pruebas no se vea afectada.

- Las puntas cónicas tienen un ángulo de 60° y el radio de las puntas es de 5 mm. Las puntas deberán ser de material duro tal como carburo de tungsteno o de acero endurecido; con el objeto de que permanezcan en buen estado durante la prueba y si debido al tiempo se desgastan estas podrán ser remplazadas.

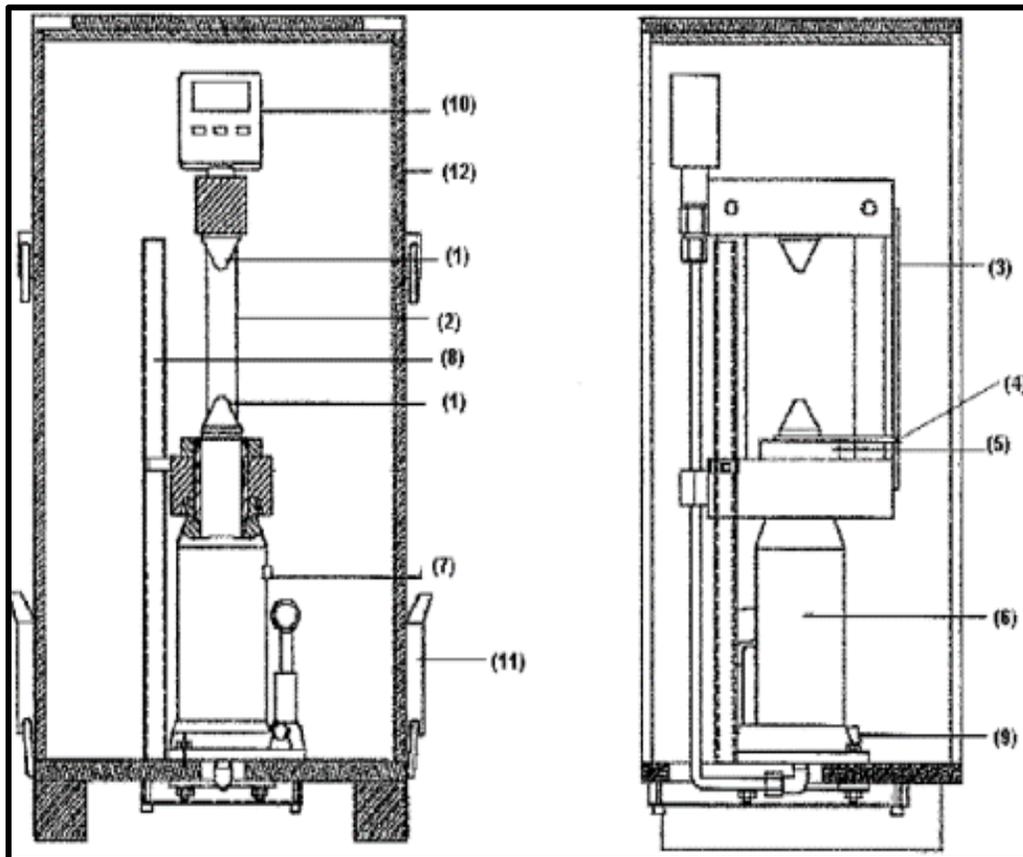


Figura 1.9: Esquema de la máquina de Franklin

Fuente: (Flores y Tinoco, 2017)

Los números referidos anteriormente son:

- 1) Dos puntas cónicas.
- 2) Dos columnas marco de la cruceta fija.
- 3) Escala.
- 4) Puntero escala.

- 5) Un perno.
- 6) El cuerpo de la bomba hidráulica.
- 7) Tapón de llenado de aceite.
- 8) Mango de la bomba.
- 9) Válvula de liberación de presión.
- 10) Lectura de la presión digital.
- 11) Lectura de aceite en la prensa.
- 12) Cubierta superior probador de carga puntual.

1.5.6 Preparación para las muestras

- La prueba de carga puntual es una prueba externa de la muestra en la que la dimensión no podrá ser inferior de 30 mm ni superior de 85 mm. Por lo tanto, se determinó que las probetas de ensayo tendrán una dimensión aproximada de 50 mm.
- En cuanto al tamaño y forma de las probetas pueden ser cilíndricas, cúbicas, paralelepípedos o muestras irregulares; y estas deben cumplir con las recomendaciones en cuanto a las dimensiones. Las superficies de las muestras deberán estar libres de irregularidades que pueden generar concentraciones de esfuerzos, no se requiere de ningún tratamiento especial de las muestras como el secado.

El contenido de agua de las muestras puede afectar significativamente el valor de la resistencia de la roca. Por lo tanto, el ensayo debe especificar el contenido de agua en el programa de pruebas de carga puntual. (Flores & Tinoco , 2019).

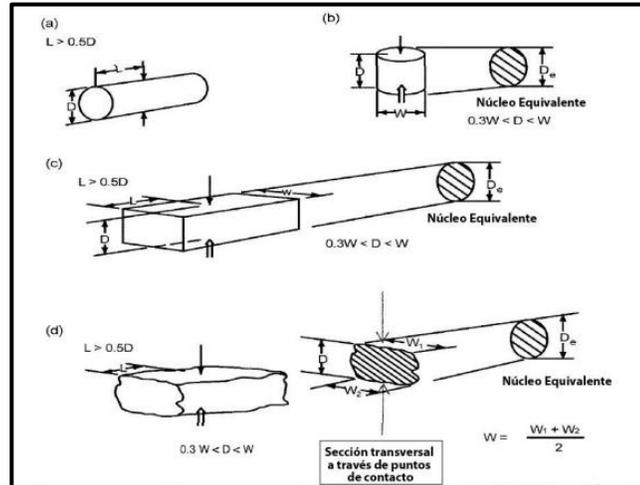


Figura 1.10: Configuraciones de carga y muestras para diferentes rocas

Fuente: (Flores y Tinoco, 2019)

1.6 Obtención del I_s (50)

Con el manómetro instalado se puede medir la presión requerida y por medio del mismo, la fuerza correspondiente que va dirigida hacia el pistón y que es necesaria para romper la muestra. (Flores & Tinoco , 2019)

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

$$I_s = \frac{P * 1000}{De^2} \quad (7)$$

Donde:

P: Carga aplicada en kN.

De: Diámetro del núcleo equivalente en mm.

Is: Índice de carga puntual, MPa.

(Navarrete , y otros, 2013)

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

$$De^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (8)$$

Donde

A: Área transversal mínima paralela a la dirección de la carga en mm^2

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 milímetros 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 (Navarrete , et al., 2013).

Para la corrección del tamaño se utiliza la siguiente ecuación:

$$I_{S50} = F \times I_s \quad (9)$$

Donde:

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

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (10)$$

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

$$F = \sqrt{\frac{D_e}{50}} \quad (11)$$

1.7 Resistencia a la compresión simple

La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) es el esfuerzo de compresión axial máximo que puede tolerar una muestra cilíndrica recta de material antes de fracturarse. Se conoce también como la resistencia a la compresión simple de un material porque el esfuerzo de confinamiento se fija en cero, además permite mediante la determinación del esfuerzo caracterizar y clasificar la roca matriz. Es una medición importante en mecánica de suelos porque ayuda a determinar los valores de la carga última del suelo, esta medición está relacionada con la resistencia al corte del suelo y además entrega un valor de carga que se puede utilizar en proyectos que no requieren de resultados precisos. Existen diferentes métodos para identificar las características del suelo, pero el método de compresión simple ayuda a identificar las características y el comportamiento del suelo cuando es sometido a un esfuerzo (Ureña , 2021).

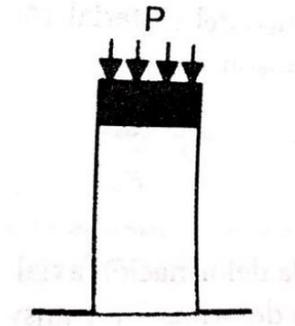


Figura 1.11: Resistencia a la compresión

Fuente: (Vinuesa, 2019)

La obtención de la resistencia a la compresión simple se puede dar mediante:

En campo

- Pruebas.
- Ensayos sencillos.

En Laboratorio

- Ensayos mecánicos.

- El ensayo de compresión uniaxial.

Este último ensayo es el más utilizado para determinar la resistencia mecánica de las rocas, y se basa en diferentes normas como la ASTM (American Society of Testing Materials), así mismo este ensayo permite estimar aparte de la resistencia a la compresión simple, las constantes elásticas como son el Módulo de Young y el Módulo de Poisson. (Flores & Tinoco , 2019)

La fórmula para obtener la resistencia a la compresión simple es:

$$R. C. U: \frac{\text{Fuerza a la que falla la roca}}{\text{Área de aplicación de la fuerza}} \quad (12)$$

La resistencia a la compresión simple se mide por sus valores que van desde 10 a 2000 kg/cm², siendo esto una ayuda para determinar la resistencia de la roca es decir si esta es muy baja o la resistencia es muy alta. También se puede representar el tipo de roca gracias a su petrografía; sin embargo, es difícil la determinación de la resistencia a la compresión, por lo cual se ha logrado desarrollar un tipo de prueba menos complicada llamada Is₅₀, siendo esta de bajo costo y pudiendo obtener datos aproximados (Vera , 2019).

La resistencia a la compresión es la carga por unidad de área a la que el material se rompe por fracturación o por cizalla. Esta propiedad es muy importante en la mecánica de materiales, tanto en situación no confinada (uniaxial) como confinada (triaxial).

Para (Benavente, 2006) los casos en los que las rocas se rompen por compresión son por fragmentación y fractura.

- **Fragmentación:** Se da cuando no existe una interacción entre las fisuras y estas son homogéneas, se da en rocas porosas.
- **Fractura:** La fracturación es generada por la anisotropía de las rocas y la concentración de fisuras que estas presentan, estas fracturas se dan cuando se ha llegado a la resistencia máxima que soportan las rocas.

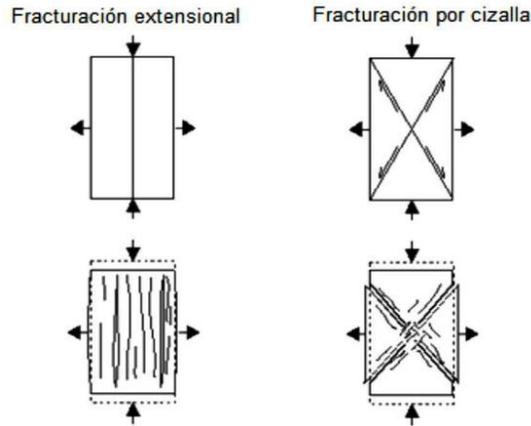


Figura 1.12: Desarrollo de las fracturas extensionales

Fuente: (Vera, 2019)

El instrumento utilizado para medir la resistencia a la compresión es una prensa hidráulica, en donde la tensión aplicada debe ser uniaxial en todos sus puntos. Al presentarse fricciones tanto en las probetas como en las placas de la prensa aparecen tensiones cortantes en las proximidades de sus superficies (Padrón , 2020).

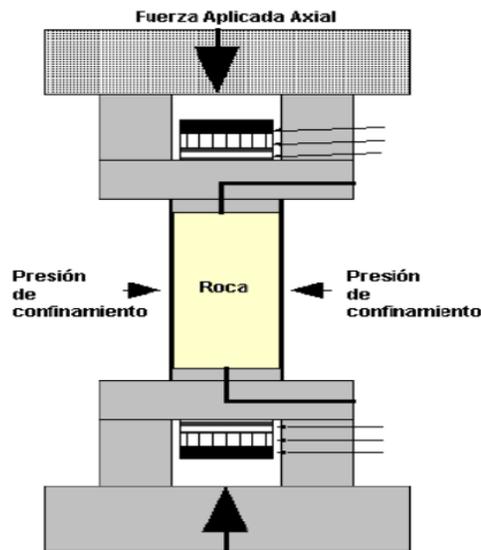


Figura 1.13: Prueba de compresión simple

Fuente: (Monge y Ramírez, 2004)

La resistencia a la compresión es función de las fuerzas cohesivas y friccionales, mismas que están condicionadas por la magnitud de los esfuerzos confinantes, la velocidad con la que se aplica la carga de rotura, agua presente en los poros, el ángulo de fricción en la mayoría de rocas varía entre 25 ° y 45°; estos factores hacen que el valor de la resistencia no sea único, incluso en rocas isótropas y homogéneas ya que pueden variar según el grado de cementación o mineralogía de las rocas.

Tabla 1.8: Clasificación de las rocas según la resistencia a la compresión

Resistencia a la Compresión en MPa	Descripción	Ejemplo de Roca
1-25	Resistencia muy baja	Yeso, sal de roca
25-50	Resistencia baja	Carbón, limonita, esquisto
50-100	Resistencia media	Arenisca, pizarra, lutita
100-200	Resistencia alta	Mármol, granito, gneis
>200	Resistencia alta	Cuarcita, gabro, basalto

Fuente: (Flores y Tinoco, 2019)

Existen dos situaciones en las que se produce la ruptura de la roca:

- **Fragmentación:** Se origina cuando la fisura es homogénea y no posee interacción entre las fisuras.
- **Fractura:** Se genera por la concentración local de fisuras microscópicas que se mezclan elaborando una fisura macroscópica durante la aplicación de la carga respectiva

(Flores & Tinoco , 2019)

La resistencia a la compresión simple se expresa con los símbolos C_o ó σ_c

$$C_o = \frac{P}{A} \text{ ó } \sigma_c = \frac{P}{A} \quad (13)$$

Donde:

P: carga puntual.

A: la sección sobre la que se aplica el esfuerzo.

1.8 Correlación entre la resistencia de la compresión simple y el índice de carga puntual

La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) es un parámetro importante en mecánica de rocas, pero su medición puede ser lenta, difícil, costosa o puede ser difícil de determinar con facilidad. 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. El uso de la prueba de carga puntual (PLT), como prueba de predicción indirecta (USC), permite estimar el índice de carga puntual o resistencia a la carga puntual, I_s (50), para clasificar las rocas por su fuerza. La (PLT) usa muestras creadas por fragmentos de rocas regulares e irregulares o muestras cilíndricas provenientes de testigos. (Feijoo & Román , 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. Estas pruebas son mucho más sencillas de realizar porque exigen menos o ninguna preparación de la muestra y el equipo de prueba no son complicados.

Para aplicar esta correlación es necesario disponer de un buen método de determinación de 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.

$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^\alpha, \text{ con un } \alpha = 0.45 \quad (13)$$

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:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \gg I_s(50) = F * I_s \quad (14)$$

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 proporcionará valores acordes con la mejor determinación de I_s (50), la ecuación resultante sería la presentada a continuación:

$$P = A \cdot (De^2)^B \quad (14)$$

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

$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^\alpha \text{ siendo } \alpha = 2 * (1 - B) \quad (15)$$

(Navarrete , y otros, 2013)

CAPÍTULO 2

EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se explicó de manera detallada el proceso que se usó para cumplir los objetivos planteados. En primer lugar, se describieron las muestras, y fueron numeradas para diferenciar una de otras. Posteriormente se obtuvo la resistencia a la compresión simple y el índice de carga puntual.

Las muestras fueron obtenidas del cerro Cojitambo ubicado en cantón Biblián, por la quebrada de Pizhumaza, colina de Zhunzhi y la loma de Mururco.

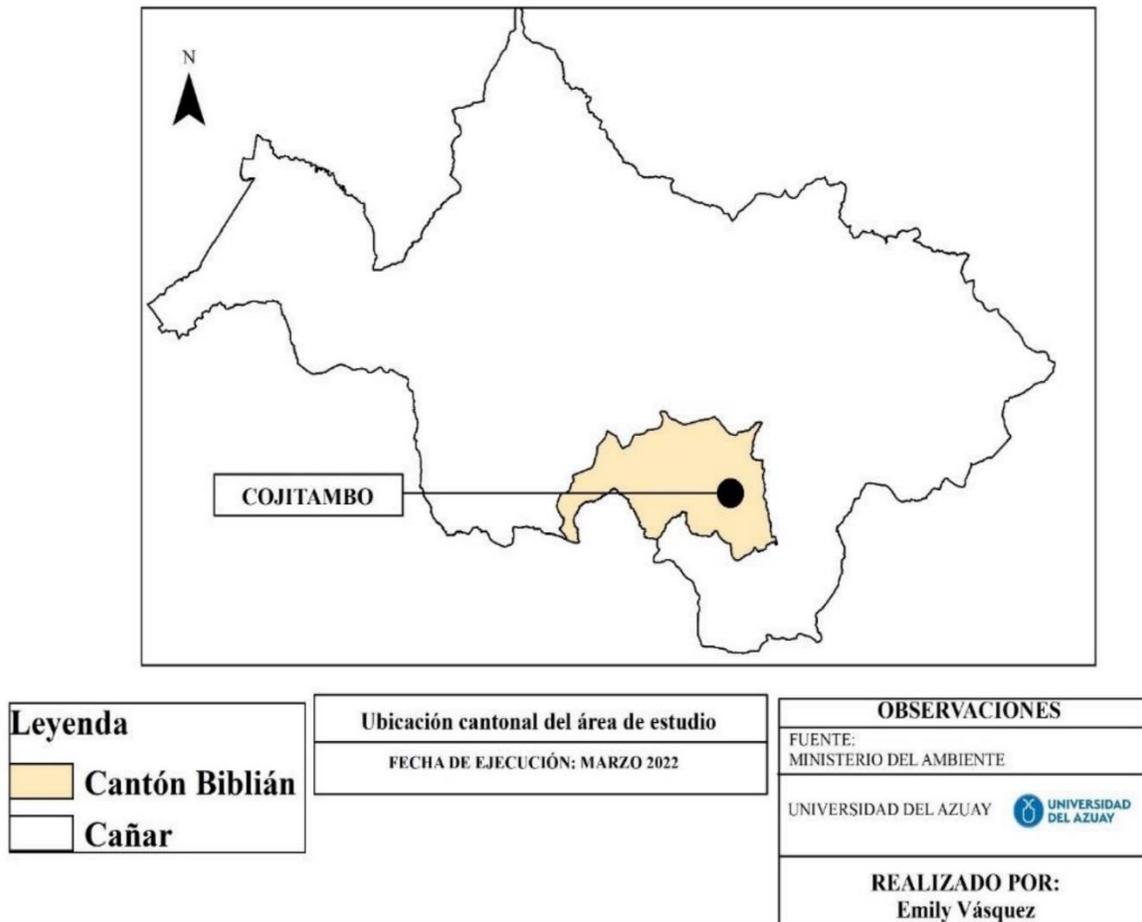


Figura 2.1: Ubicación cantonal del área de estudio

Fuente: Elaboración propia

2.1.Descripción de las muestras

Como se mencionó anteriormente las muestras obtenidas fueron de Cojitambo que está ubicado en el cantón Biblián. La geología de esta zona presenta areniscas, arcillas, andesitas, como se puede observar en la figura 2.2

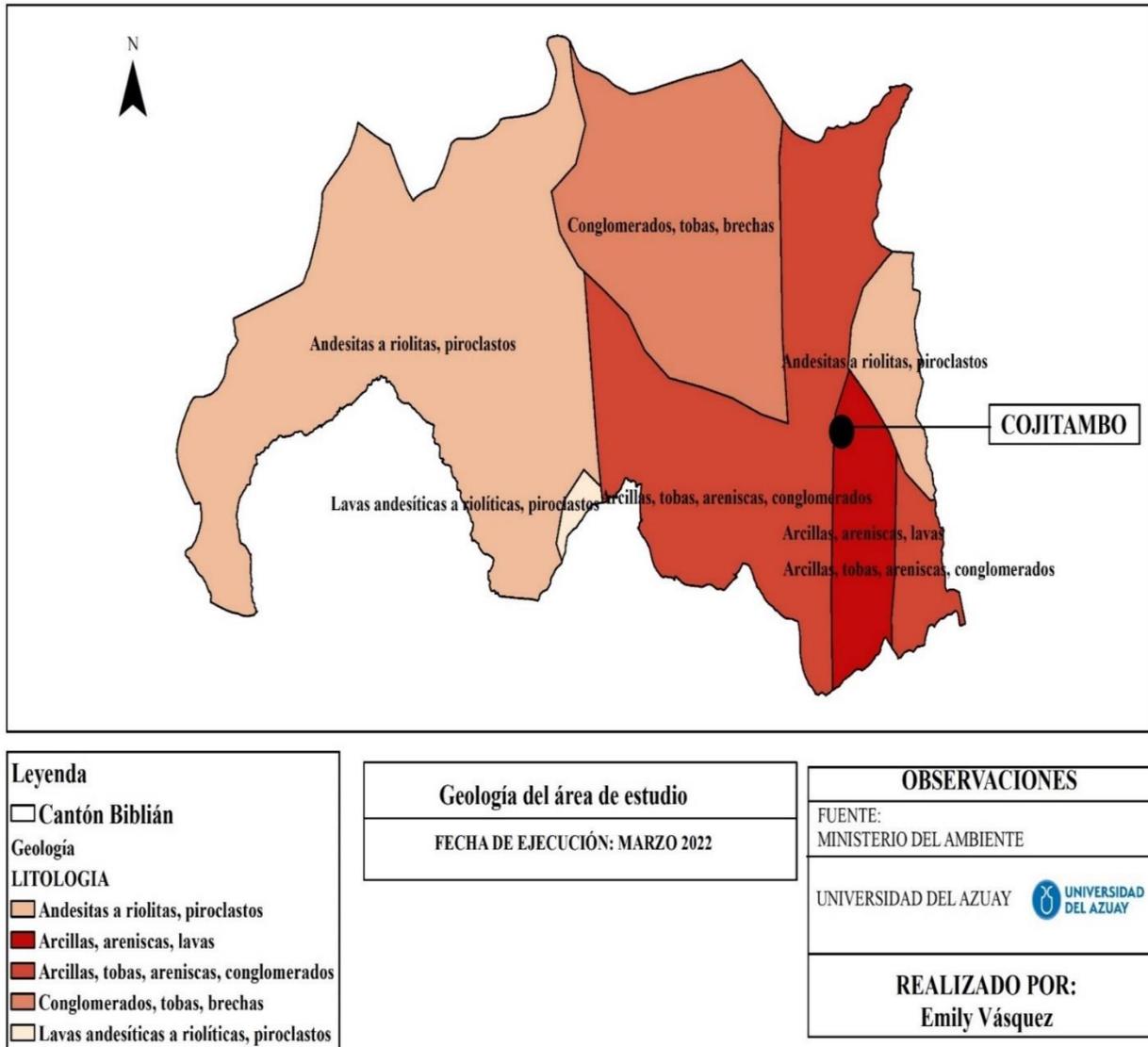


Figura 2.2: Geología del área de estudio

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a las formaciones presentes en la zona de estudio, como se puede observar en figura 2.3 se encuentra la formación Biblián que va desde el norte de Biblián hasta aproximadamente El Valle de Cuenca, esta formación descansa sobre la Formación Yunguilla y sobre el grupo de rocas del Grupo Saraguro. El estudio de (Steinmann, 1977) indica que las rocas existentes en la zona son areniscas finas y gruesas, además de encontrarse conglomerados; se debe recalcar que existe mayor predominancia de sedimentos gruesos que contienen cuarzo.

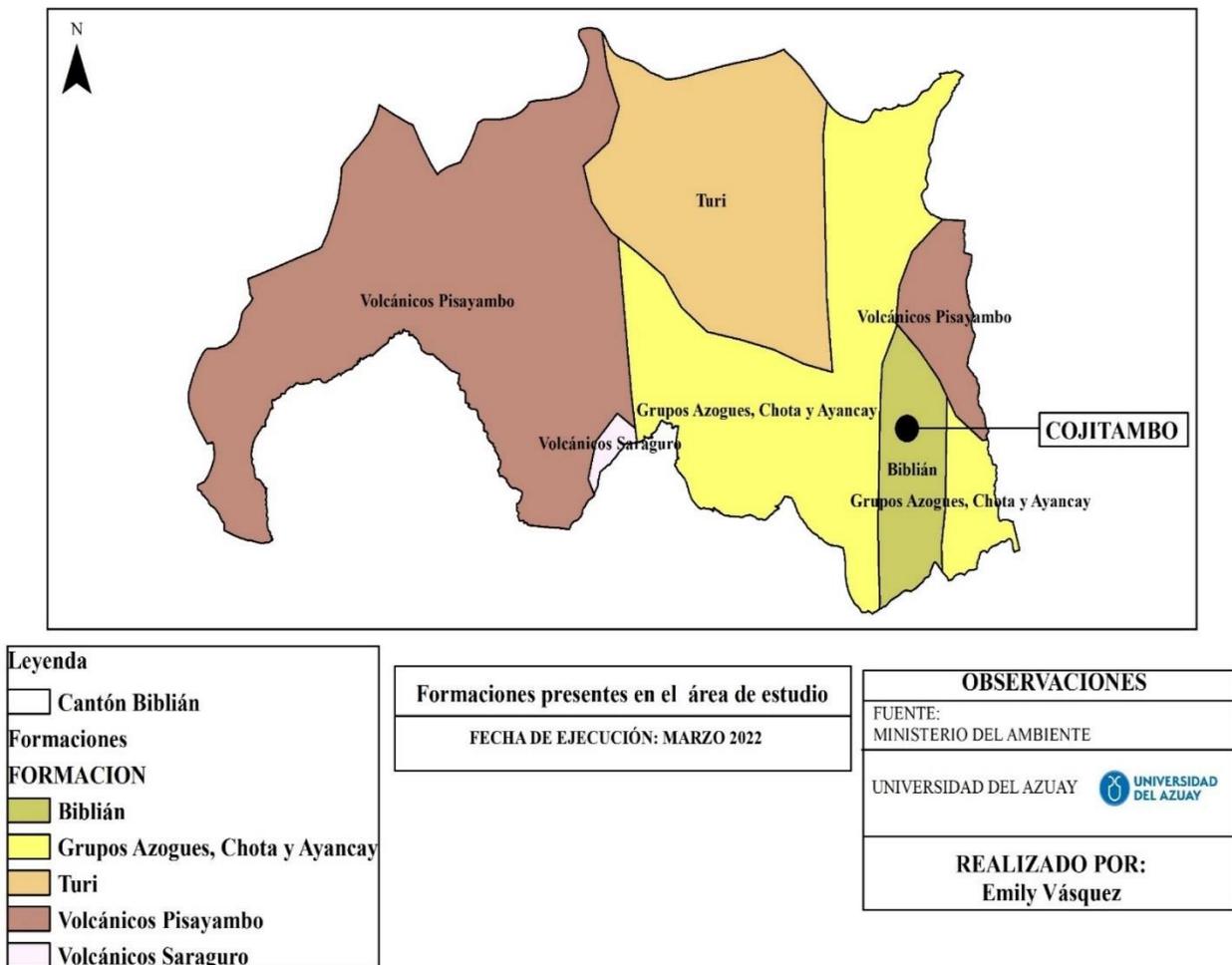


Figura 2.3: Formaciones presentes en el área de estudio

Fuente: Elaboración propia

2.2.Preparación de muestras

Para la ejecución de este trabajo usaron un total de 60 muestras con las siguientes especificaciones: Las primeras 20 muestras fueron de 5 cm x 10 cm x 10 cm (figura 2.4), las 20 siguientes tuvieron dimensiones de 7 cm x 10 cm x 10cm (figura 2.5) y las últimas 20 muestras fueron de 9 cm x 10 cm x 10 cm.

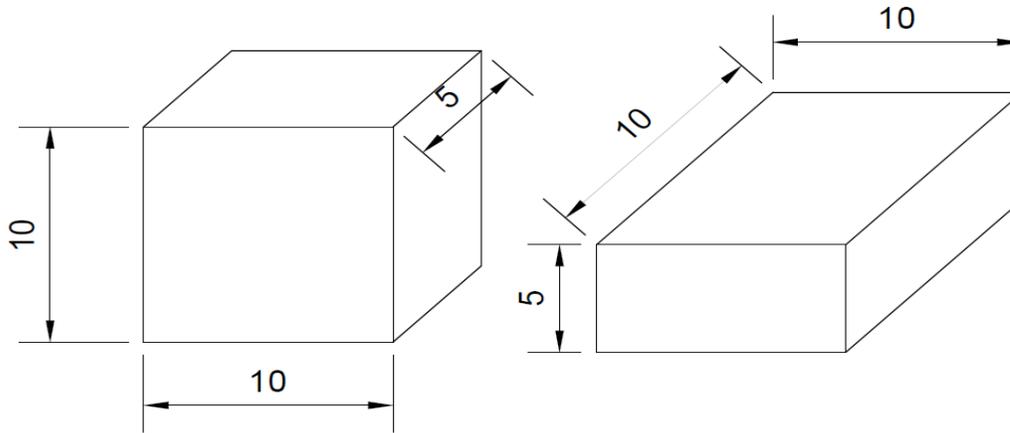


Figura 2.4: Dimensiones de las muestras denominadas P5

Fuente: Elaboración propia

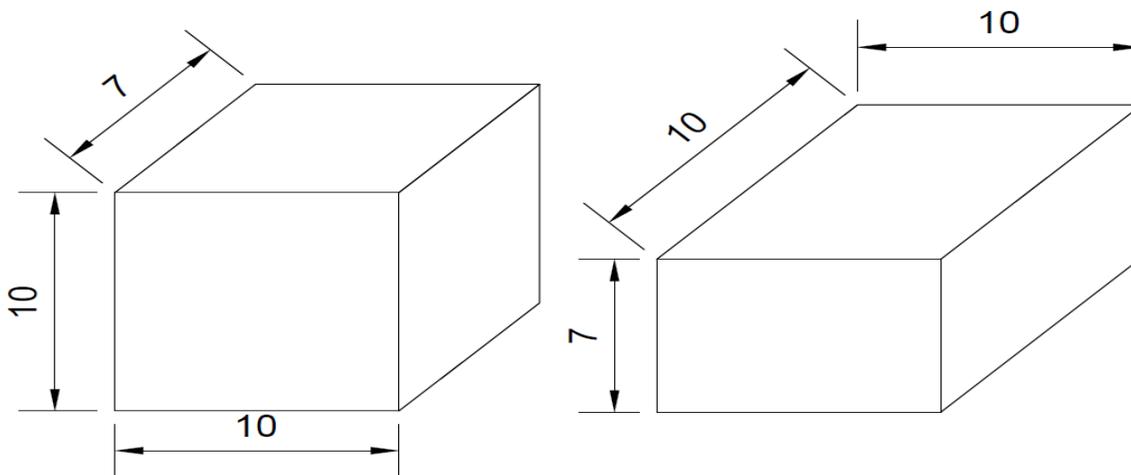


Figura 2.5: Dimensiones de las muestras denominadas P7

Fuente: Elaboración propia

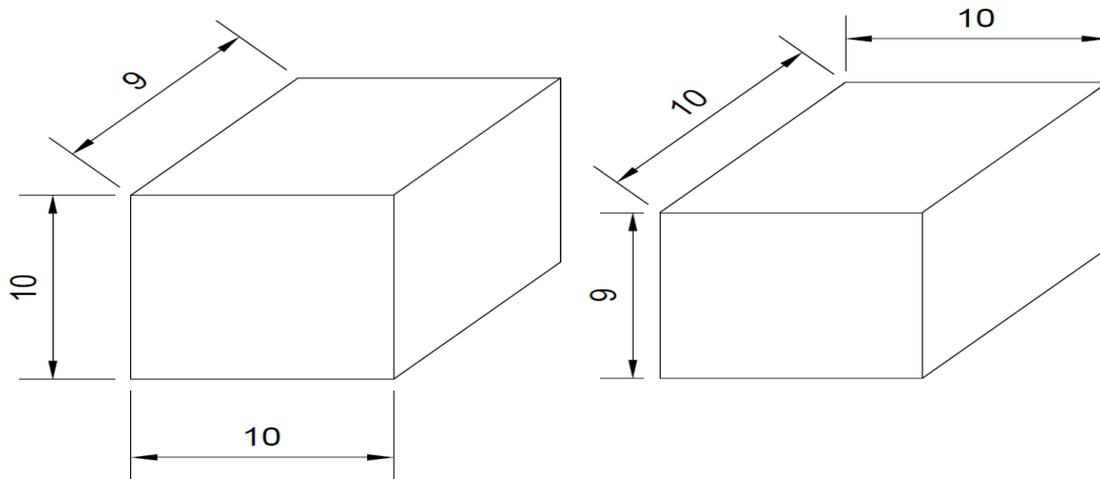


Figura 2.6: Dimensiones de las muestras denominadas P9

Fuente: Elaboración propia

2.2.1. Numeración de muestras

Después de que se obtuvieron las muestras con las dimensiones antes dichas, se procedió a numerarlas dependiendo de sus dimensiones. Las muestras de 5x10x10 se denominaron como P5, las de 7x10x10 como P7 y las muestras que tienen las dimensiones 9x10x10 fueron las P9.



Figura 2.7: Numeración de las muestras P5

Fuente: Elaboración propia

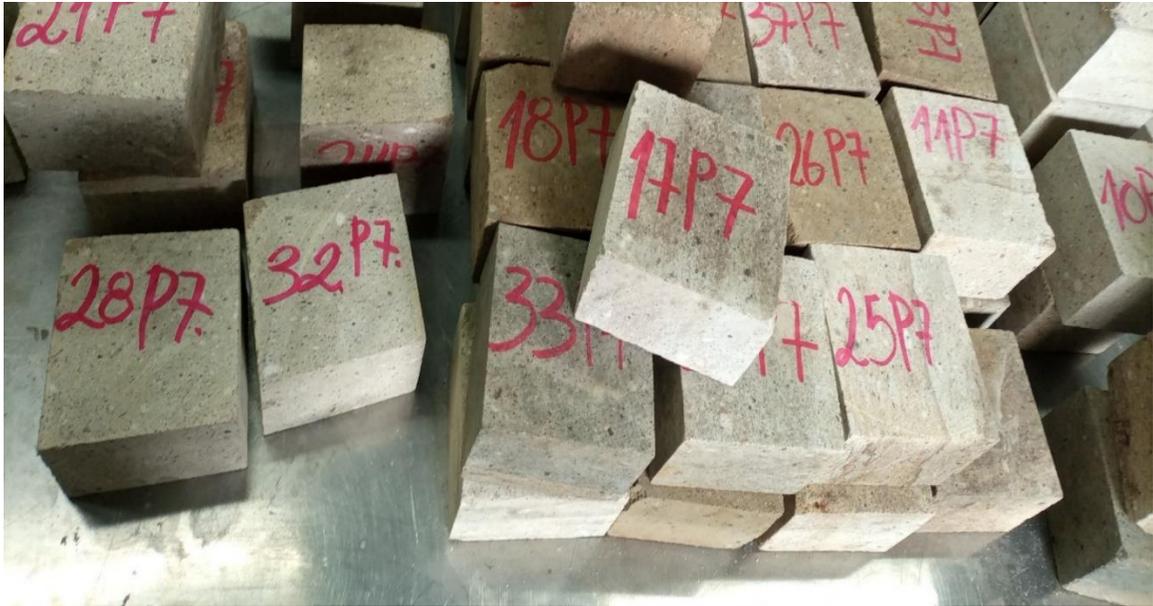


Figura 2.8: Numeración de las muestras P7

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.9: Numeración de las muestras P9

Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Medición de muestras

Finalmente se midieron 120 muestras que se distribuyeron de la siguiente manera: 60 muestras se usaron para determinar el I_{s50} , y las 60 muestras restantes fueron para determinar la resistencia a la compresión simple. El objetivo de este proceso fue conocer las mediciones exactas de cada una y asegurar que no existan variaciones con las medidas que se solicitó al taller donde se las mando a cortar. Se obtuvieron los siguientes resultados.

2.2.2.1 Medición de las muestras que se usarán para determinar el I_{s50}

Las 60 muestras fueron distribuidas de la siguiente manera:

- 20 muestras P5
- 20 muestras P7
- 20 muestras P9

Tabla 2.1: Resultados de la medición de las muestras P5 que se usaron para determinar el I_{s50}

Muestra	x	y	z
	cm	cm	cm
1P5	9.9	10.22	5.05
2P5	9.97	9.88	5.11
3P5	9.99	9.88	4.94
4P5	9.99	9.98	4.70
5P5	9.96	9.89	4.94
6P5	9.86	9.89	5.08
7P5	9.86	9.97	4.86
8P5	9.85	9.91	4.84
9P5	9.97	10.05	4.94
10P5	9.94	10.05	5.16
11P5	10.01	9.89	4.73
12P5	9.99	10.09	5.22
13P5	9.93	9.88	4.94
14P5	10.02	10.14	5.21
15P5	10.05	9.84	5.16
16P5	9.99	10.01	5.19
17P5	9.87	9.91	5.22
18P5	9.99	9.88	5.13
19P5	10.15	9.9	5.09
20P5	10.08	10.02	5.15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.2: Resultados de la medición de las muestras P7 que se usaron para determinar el I_{S50}

Muestra	x	y	z
#	cm	cm	cm
1P7	10.19	9.95	6.83
2P7	9.97	9.99	6.89
3P7	10.03	9.92	6.88
4P7	10.06	10.13	6.83
5P7	9.82	10.27	7.06
6P7	9.93	9.79	6.96
7P7	9.9	9.87	7.05
8P7	10.15	10.16	6.83
9P7	9.92	10.27	6.82
10P7	10.17	10.11	6.82
11P7	10.18	10.22	6.83
12P7	9.93	10.04	6.83
13P7	9.93	10.07	6.79
14P7	9.95	10.16	6.83
15P7	9.94	10.22	6.81
16P7	9.86	9.86	6.88
17P7	9.99	9.89	6.79
18P7	9.94	10.04	6.83
19P7	10.02	9.99	6.79
20P7	10.03	9.93	6.83

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.3: Resultados de la medición de las muestras P9 que se usaron para determinar el I_{S50}

Muestra	x	y	z
#	cm	cm	cm
1P9	9.96	10.08	8.83
2P9	10.11	9.9	8.82
3P9	9.89	9.87	8.83
4P9	9.97	9.98	8.86
5P9	9.92	9.94	8.78
6P9	9.74	10.14	8.94
7P9	9.86	9.93	8.88
8P9	9.88	9.91	8.94
9P9	9.91	9.91	8.99
10P9	9.91	9.91	8.87
11P9	9.91	10	9
12P9	9.91	9.91	8.97

13P9	9.86	9.94	8.79
14P9	9.87	10.14	8.83
15P9	10.14	9.61	9.18
16P9	9.88	9.95	8.85
17P9	9.9	9.94	8.71
18P9	10.07	10.09	9.04
19P9	10.08	9.81	8.9
20P9	9.94	9.91	9.16

Fuente: Elaboración propia

2.2.2.2 Medición de las muestras que se usarán para determinar la RCS

Las 60 muestras estuvieron distribuidas de la siguiente manera:

- 20 muestras P5
- 20 muestras P7
- 20 muestras P9

Tabla 2.4: Resultados de la medición de las muestras P5 que se usarán para determinar la RCS

Muestra	x	y	z
#	cm	cm	cm
1P5	9.97	10.08	5.08
2P5	9.99	9.88	4.94
3P5	9.9	10	5.24
4P5	10.24	9.88	4.94
5P5	10.09	10.22	5.19
6P5	9.92	10.14	5.09
7P5	10.02	10.21	5.18
8P5	9.88	9.92	4.94
9P5	9.86	10.22	5.99
10P5	10.05	9.93	5.06
11P5	10.14	9.94	5.95
12P5	9.9	10.19	5.21
13P5	10.14	9.93	4.94
14P5	9.98	9.94	4.84
15P5	9.99	10.09	5.09
16P5	9.89	9.75	4.9
17P5	10.08	10.12	5.17
18P5	9.96	10.19	5.16
19P5	9.83	10.01	5.21

20P5	10.08	9.78	5.27
------	-------	------	------

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.5: Resultados de la medición de las muestras P7 que se usaron para determinar la RCS

Muestra	x	y	z
#	cm	cm	cm
1P7	10.13	9.92	6.98
2P7	9.93	10.09	6.79
3P7	10.05	10.12	6.83
4P7	10.18	10.17	6.82
5P7	10.28	10.21	6.77
6P7	10.06	10.01	6.81
7P7	10.18	9.65	7.11
8P7	10.22	10.11	6.86
9P7	9.88	10.14	6.88
10P7	10.14	9.9	6.92
11P7	9.96	10.13	7.14
12P7	10.08	10.09	6.87
13P7	9.88	10.01	6.78
14P7	9.94	9.91	6.75
15P7	9.98	10.14	6.84
16P7	10.04	9.87	6.79
17P7	10.07	9.89	6.75
18P7	9.96	9.93	6.99
19P7	9.98	9.86	7.03
20P7	10.1	10.05	6.8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.6: Resultados de la medición de las muestras P7 que se usaron para determinar la RCS

Muestra	x	y	z
#	cm	cm	cm
1P9	9.85	9.94	8.74
2P9	10.08	9.89	9.01
3P9	10.11	10.08	8.78
4P9	9.98	9.92	8.81
5P9	10.08	9.09	8.91
6P9	10.08	9.94	8.89

7P9	10.04	10.17	8.97
8P9	9.78	9.63	9.41
9P9	10.01	9.89	8.88
10P9	9.73	10.18	9.06
11P9	10.22	9.94	8.81
12P9	9.86	9.95	8.83
13P9	9.99	9.83	8.74
14P9	9.88	9.91	8.86
15P9	10.25	9.99	8.84
16P9	9.89	9.92	8.83
17P9	9.84	9.93	8.89
18P9	9.97	10.22	8.88
19P9	9.93	9.89	8.82
20P9	9.97	10.03	8.79

Fuente: Elaboración propia

2.3. Proceso de ruptura de muestras

Una vez finalizada la preparación de muestras se procedió a encontrar el centro de estas, tanto de la parte superior como en la inferior, con el fin de colocar las muestras de manera correcta en la máquina. Este procedimiento se aplicó tanto en las muestras que se usaron para determinar la resistencia a la compresión simple y las que se usaron para determinar el índice de carga puntual.



Figura 2.10: Muestras marcadas en el centro

Fuente: Elaboración propia

2.4.Determinación de la resistencia a la compresión simple

Para determinar la resistencia a la compresión simple las muestras fueron llevadas al laboratorio para determinar la fuerza necesaria para existir una fractura. Mediante la aplicación de fórmulas se determinó la resistencia a la compresión



Figura 2.11: Máquina preparada para colocar la muestra

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.12: Colocación de la muestra para ser sometida a la rotura

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.13: Muestra sometida a la rotura

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.14: Rotura de la muestra

Fuente: Elaboración propia

2.5. Determinación del índice de carga puntual

Las 60 muestras fueron llevadas a laboratorio para obtener el valor de su rotura, esta fuerza y la aplicación de las fórmulas nos ayudó a determinar el índice de carga puntual.



Figura 2.15: Máquina preparada con las puntas cónicas

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.16: Ubicación de las muestras entre las puntas cónicas

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.17: Muestra sometida a rotura por las puntas cónicas

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.18: Rotura de las muestras usando las puntas cónicas

Fuente: Elaboración propia

Las fuerzas (P) obtenidas en el proceso de ruptura de las 60 muestras, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.7: Resultados de las fuerzas expresadas en kilonewtons de las 60 muestras

Muestra	P
#	kN
1	17.454
2	19.434
3	21.905
4	25.763
5	22.226
6	18.213
7	15.965
8	16.885
9	6.454
10	9.669
11	16.81
12	7.778
13	21.685
14	17.843
15	17.004
16	18.384
17	16.822
18	15.577
19	11.508
20	19.38
21	28.865
22	24.849
23	28.071
24	25.3
25	18.373
26	25.351
27	19.978
28	28.015
29	17.311
30	27.594
31	18.503
32	16.78
33	10.05

34	23.868
35	31.427
36	13.472
37	23.098
38	11.414
39	9.102
40	9.369
41	28.547
42	28.157
43	39.873
44	26.655
45	31.192
46	33.304
47	31.357
48	38.749
49	41.435
50	30.875
51	26.014
52	40.223
53	39.684
54	33.227
55	28.52
56	37.655
57	34.464
58	32.634
59	30.146
60	28.85

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente trabajo fue de carácter investigativo, cuyo objetivo principal fue determinar la correlación existente entre el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple de material rocoso del sector Cojitambo. Para realizar dicha operación se procedió a utilizar la Prensa Humboldt modelo CM-2500-DI (Figura 3.1) para determinar las fuerzas en las cuales las muestras fueron fracturadas.



Figura 3.1: Prensa Humboldt modelo CM-2500-DI

Fuente: Elaboración propia

3.1 Análisis de resultados del Índice de Carga Puntual

En la primera etapa se determinó el índice de carga puntual. Se utilizaron 60 muestras, de las cuales 20 de ellas presentaron medidas de 10x10x5 cm, 20 de 10x10x7 cm y 20 de 10x10x9 cm, las cuales mediante el uso de puntas cónicas en la máquina Humboldt se fracturaron y se determinó la fuerza P, además, cumplieron con la relación $\left(\frac{y}{x} = \frac{D}{L}\right) = 1$ a 1.4.

Luego de realizar las pruebas en la máquina antes mencionada, mediante Excel 2019 se calculó el De^2 de cada muestra utilizando la siguiente fórmula:

$$De^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (16)$$

Para el cálculo de Is de cada muestra se utilizó la siguiente fórmula:

$$Is = \frac{P}{De^2 * 10.2 * 9.81 \text{ m/s}^2} \quad (17)$$

Donde:

P= fuerza que se necesita para romper la muestra

De^2 = diámetro de la muestra

Finalmente se aplicó la siguiente fórmula para calcular el índice de carga puntual o $Is_{(50)}$ de las 60 muestras.

$$Is_{(50)} = \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45} * Is \quad (18)$$

Una vez aplicadas las fórmulas anteriores, se obtuvieron los resultados del índice de carga puntual de cada muestra (Tabla 3.1), que sirvieron para proponer la caracterización del macizo rocoso.

Tabla 3.1: Resultados del $I_{s(50)}$ de las 60 muestras.

N° de muestras	Is50
#	MPa
1	2.9905173
2	2.9965555
3	3.0374339
4	3.1549804
5	3.1859969
6	3.1903054
7	3.1983748
8	3.2042547
9	3.2201067
10	3.2888298
11	3.3241986
12	3.3450631
13	3.351384
14	3.3547247
15	3.3653377
16	3.3836469
17	3.3961822
18	3.3991637
19	3.4081736
20	3.4152711
21	3.4449064
22	3.457764
23	3.4648163
24	3.4859748
25	3.5144756
26	3.5256619
27	3.5299226
28	3.5348436
29	3.5723014
30	3.6474156
31	3.6490466
32	3.6536829
33	3.7128329
34	3.7147422
35	3.7658102

36	3.7954035
37	3.8042995
38	3.8211213
39	3.8238022
40	3.8334446
41	3.8651578
42	3.9142316
43	3.9327522
44	3.9374768
45	3.976034
46	3.9794152
47	3.9872663
48	3.9959283
49	4.0165024
50	4.0310457
51	4.0777912
52	4.0872131
53	4.1017372
54	4.1061945
55	4.1166245
56	4.1237287
57	4.1506507
58	4.1718843
59	4.1872988
60	4.1998597

Fuente: Elaboración propia

3.2 Análisis de resultados de la Resistencia a la Compresión Simple

En la segunda etapa se ejecutaron las pruebas de resistencia a la compresión simple usando la máquina de compresión Humboldt, esta máquina tiene facultades para someter materiales a ensayos de tensión y compresión. La presión obtenida se logra mediante placas o mandíbulas asociadas por tornillos o sistema hidráulico, la máquina de ensayos tiene como función comprobar la resistencia de diversos tipos de materiales, para esto posee un sistema que aplica cargas controladas sobre una probeta y mide en forma gráfica la deformación, y la carga al momento de su ruptura (Figura 3.1).

Luego de realizar las pruebas de laboratorio, mediante Excel se aplicó la siguiente fórmula para determinar la resistencia a la compresión simple.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (19)$$

Donde:

σ_c = Resistencia a la Compresión Simple

F_c = Fuerza a la que falla la muestra

A = Área de aplicación

Los resultados de los valores de resistencia a la compresión se los puede observar en la siguiente tabla

Tabla 3.2: Resultados de la RCS de las 60 muestras

N° de muestra	RCS
#	(MPa)
1	46.25
2	46.94
3	47.31
4	47.33
5	48.20
6	48.53
7	49.22
8	49.93
9	50.05
10	50.84
11	51.87
12	51.93
13	53.18
14	53.24
15	53.32
16	53.35
17	53.41
18	53.81

19	53.84
20	54.03
21	54.04
22	54.54
23	54.78
24	55.15
25	55.44
26	55.99
27	56.15
28	56.67
29	56.70
30	57.32
31	57.51
32	57.92
33	58.00
34	58.00
35	58.01
36	58.02
37	58.45
38	58.47
39	58.52
40	59.14
41	59.78
42	59.89
43	60.01
44	60.60
45	61.11
46	61.53
47	61.63
48	62.05
49	62.71
50	62.87
51	63.00
52	63.69
53	63.81
54	63.81
55	64.03
56	64.37
57	64.37

58	64.37
59	64.49
60	64.85

Fuente: Elaboración propia

3.3 Propuesta de Correlación

Para establecer la propuesta de correlación se realizó una gráfica (Figura 3.2) con los datos de la Tabla 3.3. El eje X son los valores del I_{s50} y el eje Y son los valores de las RCS.

Tabla 3.3: Valores para realizar la propuesta de correlación

N°	I_{s50}	RCS
#	(MPa)	(MPa)
	x	y
1	2.9905173	46.25
2	2.9965555	46.94
3	3.0374339	47.31
4	3.1549804	47.33
5	3.1859969	48.20
6	3.1903054	48.53
7	3.1983748	49.22
8	3.2042547	49.93
9	3.2201067	50.05
10	3.2888298	50.84
11	3.3241986	51.87
12	3.3450631	51.93
13	3.351384	53.18
14	3.3547247	53.24
15	3.3653377	53.32
16	3.3836469	53.35
17	3.3961822	53.41
18	3.3991637	53.81
19	3.4081736	53.84
20	3.4152711	54.03
21	3.4449064	54.04
22	3.457764	54.54
23	3.4648163	54.78
24	3.4859748	55.15
25	3.5144756	55.44

26	3.5256619	55.99
27	3.5299226	56.15
28	3.5348436	56.67
29	3.5723014	56.70
30	3.6474156	57.32
31	3.6490466	57.51
32	3.6536829	57.92
33	3.7128329	58.00
34	3.7147422	58.00
35	3.7658102	58.01
36	3.7954035	58.02
37	3.8042995	58.45
38	3.8211213	58.47
39	3.8238022	58.52
40	3.8334446	59.14
41	3.8651578	59.78
42	3.9142316	59.89
43	3.9327522	60.01
44	3.9374768	60.60
45	3.976034	61.11
46	3.9794152	61.53
47	3.9872663	61.63
48	3.9959283	62.05
49	4.0165024	62.71
50	4.0310457	62.87
51	4.0777912	63.00
52	4.0872131	63.69
53	4.1017372	63.81
54	4.1061945	63.81
55	4.1166245	64.03
56	4.1237287	64.37
57	4.1506507	64.37
58	4.1718843	64.37
59	4.1872988	64.49
60	4.1998597	64.85

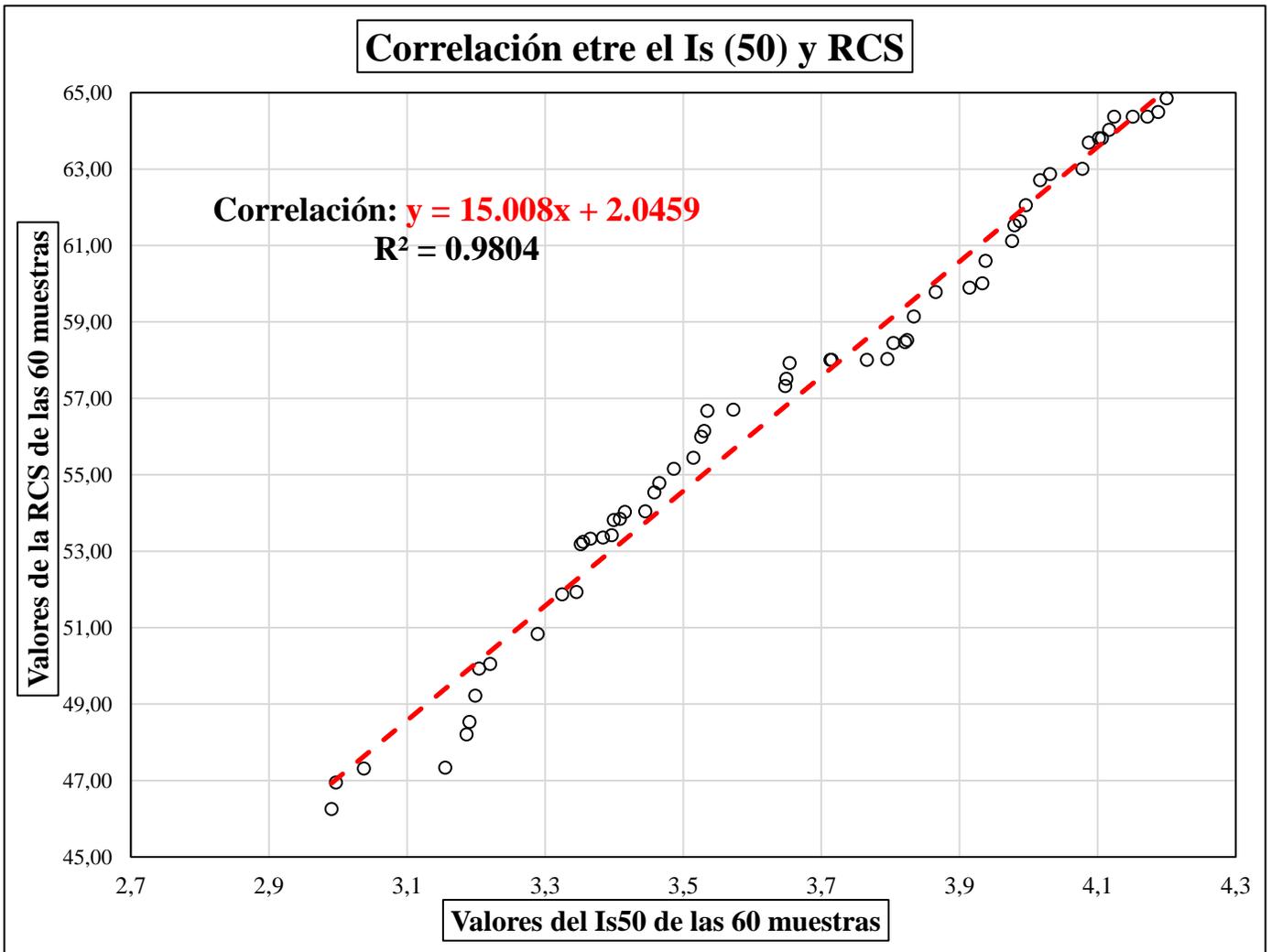


Figura 3.2: Correlación entre el Is50 y RCS

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.2 se obtuvo la siguiente ecuación que llega a ser la correlación entre el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple.

$$y = 15.008x + 2.0459 \quad (19)$$

Si expresamos la anterior ecuación en términos de Is50 y RCS queda de la siguiente manera:

$$\sigma_c = 15.008 * Is_{50} + 2.0459 \quad (20)$$

Donde:

σ_c = resistencia a la compresión simple

I_{S50} = índice de carga puntual

Además, se afirmó que el ajuste del modelo es bueno, ya que el valor del $R^2 = 0.9804$ es cercano a 1, es decir que existe un ajuste lineal casi perfecto, ya que los datos están cercanos a la línea de tendencia.

3.4 Comparación entre correlaciones de diferentes autores

Durante los últimos años, diferentes autores han desarrollado correlaciones entre el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple. Para determinar a qué correlación se parece la ecuación 20 o se acerca a ésta, se eligieron 8 correlaciones diferentes, la correlación 1 es la que se determinó en este trabajo.

Tabla 3.4: Correlaciones creadas por diferentes autores

N° Correlación	Autor	Año	Correlación
Correlación 1	Emily Vásquez.	2022	$\sigma_c = 15.008 * I_{S50} + 2.0459$
Correlación 2	Franklin, J.A y Bosh, E.	1972	$\sigma_c = 24 * I_{S50}$
Correlación 3	Chau, K.T y Wong, R.H.C.	1996	$\sigma_c = 12.50 * I_{S50}$
Correlación 4	Rusnak, J. y Mark, C.	2000	$\sigma_c = 21 * I_{S50}$
Correlación 5	Thuro y Plinninger, R.J.	2001	$\sigma_c = 19.9 * I_{S50}$
Correlación 6	Thuro y Plinninger, R.J.	2001	$\sigma_c = 18.7 * I_{S50}$
Correlación 7	Akram, M. y Bakar, M.Z.A.	2007	$\sigma_c = 13.295 * I_{S50}$
Correlación 8	Akram, M. y Bakar, M.Z.A.	2007	$\sigma_c = 11.076 * I_{S50}$
Correlación 9	Cobanoglu, I. y Celik, S.B.	2008	$\sigma_c = 8.66 * I_{S50} + 10.85$

Fuente: Elaboración propia

Para poder graficar las 9 correlaciones, se usó los resultados del I_{S50} de las 60 muestras y se reemplazó en cada ecuación respectivamente, dando como resultado la siguiente tabla.

Tabla 3.5: Resultados de las correlaciones usando el I_{50} de las 60 muestras

	I_{50}	Correlación 1	Correlación 2	Correlación 3	Correlación 4	Correlación 5	Correlación 6	Correlación 7	Correlación 8	Correlación 9
1	2.99	46.25	71.77	37.38	62.80	59.51	55.92	39.76	33.12	36.75
2	3.00	46.94	71.92	37.46	62.93	59.63	56.04	39.84	33.19	36.80
3	3.04	47.31	72.90	37.97	63.79	60.44	56.80	40.38	33.64	37.15
4	3.15	47.33	75.72	39.44	66.25	62.78	59.00	41.95	34.94	38.17
5	3.19	48.20	76.46	39.82	66.91	63.40	59.58	42.36	35.29	38.44
6	3.19	48.53	76.57	39.88	67.00	63.49	59.66	42.42	35.34	38.48
7	3.20	49.22	76.76	39.98	67.17	63.65	59.81	42.52	35.43	38.55
8	3.20	49.93	76.90	40.05	67.29	63.76	59.92	42.60	35.49	38.60
9	3.22	50.05	77.28	40.25	67.62	64.08	60.22	42.81	35.67	38.74
10	3.29	50.84	78.93	41.11	69.07	65.45	61.50	43.72	36.43	39.33
11	3.32	51.87	79.78	41.55	69.81	66.15	62.16	44.20	36.82	39.64
12	3.35	51.93	80.28	41.81	70.25	66.57	62.55	44.47	37.05	39.82
13	3.35	53.18	80.43	41.89	70.38	66.69	62.67	44.56	37.12	39.87
14	3.35	53.24	80.51	41.93	70.45	66.76	62.73	44.60	37.16	39.90
15	3.37	53.32	80.77	42.07	70.67	66.97	62.93	44.74	37.27	39.99
16	3.38	53.35	81.21	42.30	71.06	67.33	63.27	44.99	37.48	40.15
17	3.40	53.41	81.51	42.45	71.32	67.58	63.51	45.15	37.62	40.26
18	3.40	53.81	81.58	42.49	71.38	67.64	63.56	45.19	37.65	40.29
19	3.41	53.84	81.80	42.60	71.57	67.82	63.73	45.31	37.75	40.36
20	3.42	54.03	81.97	42.69	71.72	67.96	63.87	45.41	37.83	40.43
21	3.44	54.04	82.68	43.06	72.34	68.55	64.42	45.80	38.16	40.68
22	3.46	54.54	82.99	43.22	72.61	68.81	64.66	45.97	38.30	40.79
23	3.46	54.78	83.16	43.31	72.76	68.95	64.79	46.06	38.38	40.86
24	3.49	55.15	83.66	43.57	73.21	69.37	65.19	46.35	38.61	41.04
25	3.51	55.44	84.35	43.93	73.80	69.94	65.72	46.72	38.93	41.29
26	3.53	55.99	84.62	44.07	74.04	70.16	65.93	46.87	39.05	41.38
27	3.53	56.15	84.72	44.12	74.13	70.25	66.01	46.93	39.10	41.42
28	3.53	56.67	84.84	44.19	74.23	70.34	66.10	47.00	39.15	41.46
29	3.57	56.70	85.74	44.65	75.02	71.09	66.80	47.49	39.57	41.79
30	3.65	57.32	87.54	45.59	76.60	72.58	68.21	48.49	40.40	42.44
31	3.65	57.51	87.58	45.61	76.63	72.62	68.24	48.51	40.42	42.45
32	3.65	57.92	87.69	45.67	76.73	72.71	68.32	48.58	40.47	42.49

33	3.71	58.00	89.11	46.41	77.97	73.89	69.43	49.36	41.12	43.00
34	3.71	58.00	89.15	46.43	78.01	73.92	69.47	49.39	41.14	43.02
35	3.77	58.01	90.38	47.07	79.08	74.94	70.42	50.07	41.71	43.46
36	3.80	58.02	91.09	47.44	79.70	75.53	70.97	50.46	42.04	43.72
37	3.80	58.45	91.30	47.55	79.89	75.71	71.14	50.58	42.14	43.80
38	3.82	58.47	91.71	47.76	80.24	76.04	71.45	50.80	42.32	43.94
39	3.82	58.52	91.77	47.80	80.30	76.09	71.51	50.84	42.35	43.96
40	3.83	59.14	92.00	47.92	80.50	76.29	71.69	50.97	42.46	44.05
41	3.87	59.78	92.76	48.31	81.17	76.92	72.28	51.39	42.81	44.32
42	3.91	59.89	93.94	48.93	82.20	77.89	73.20	52.04	43.35	44.75
43	3.93	60.01	94.39	49.16	82.59	78.26	73.54	52.29	43.56	44.91
44	3.94	60.60	94.50	49.22	82.69	78.36	73.63	52.35	43.61	44.95
45	3.98	61.11	95.42	49.70	83.50	79.12	74.35	52.86	44.04	45.28
46	3.98	61.53	95.51	49.74	83.57	79.19	74.42	52.91	44.08	45.31
47	3.99	61.63	95.69	49.84	83.73	79.35	74.56	53.01	44.16	45.38
48	4.00	62.05	95.90	49.95	83.91	79.52	74.72	53.13	44.26	45.45
49	4.02	62.71	96.40	50.21	84.35	79.93	75.11	53.40	44.49	45.63
50	4.03	62.87	96.75	50.39	84.65	80.22	75.38	53.59	44.65	45.76
51	4.08	63.00	97.87	50.97	85.63	81.15	76.25	54.21	45.17	46.16
52	4.09	63.69	98.09	51.09	85.83	81.34	76.43	54.34	45.27	46.25
53	4.10	63.81	98.44	51.27	86.14	81.62	76.70	54.53	45.43	46.37
54	4.11	63.81	98.55	51.33	86.23	81.71	76.79	54.59	45.48	46.41
55	4.12	64.03	98.80	51.46	86.45	81.92	76.98	54.73	45.60	46.50
56	4.12	64.37	98.97	51.55	86.60	82.06	77.11	54.82	45.67	46.56
57	4.15	64.37	99.62	51.88	87.16	82.60	77.62	55.18	45.97	46.79
58	4.17	64.37	100.1	52.15	87.61	83.02	78.01	55.47	46.21	46.98
59	4.19	64.49	100.5	52.34	87.93	83.33	78.30	55.67	46.38	47.11
60	4.20	64.85	100.8	52.50	88.20	83.58	78.54	55.84	46.52	47.22

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3.5 se puede observar los resultados obtenidos al remplazar en cada correlación el I_{s50} que se obtuvo de las 60 muestras, demostrando que los valores más altos de RCS son los resultados de la correlación 2 y los más bajos son los resultados de la correlación 8.

Por medio de la tabla anterior se creó la siguiente figura que representa en diferentes colores las 8 correlaciones existente y en color rojo la correlación 1 que es la que se creó en este trabajo y la principal.

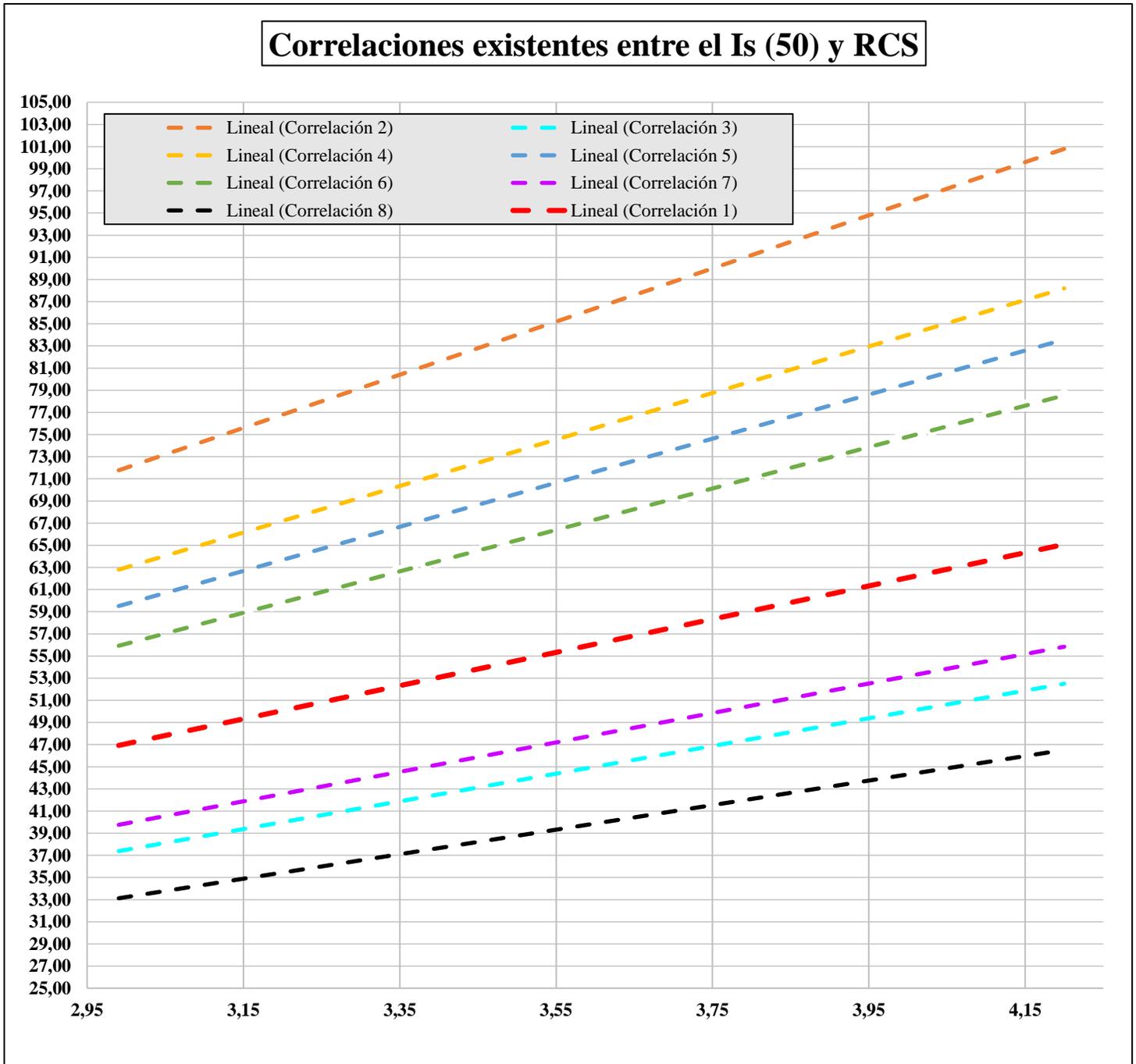


Figura 3.3: Gráfica de las 9 correlaciones entre el Is₅₀ y RCS

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3.3 se observa la gráfica de las 9 correlaciones creadas por diferentes autores, siendo la de color rojo la correlación entre el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple que se determinó en este trabajo y la que se encuentra en la mitad de la correlación 6 que se determinó mediante ensayos usando rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, y la correlación 7 que se determinó mediante 200 ensayos obteniendo este resultado para rocas duras.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Los resultados de la RCS están en un rango de 45 a 65 MPa, lo que quiere decir que estamos trabajando con rocas de resistencia media.
- Los resultados del $I_{s(50)}$ de las muestras están en un rango de 2.98 a 4.20 MPa.
- Una vez analizados los resultados obtenidos en la experimentación con las diferentes muestras, se reconoce como factible el proceso para la determinación del índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple.
- La gráfica que se creó usando los resultados del índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple demuestra que los datos se apegan a la línea de tendencia y que el ajuste del modelo es bueno.
- Los resultados obtenidos al remplazar en cada correlación el I_{s50} demuestran que los valores más altos de RCS son los resultados de la correlación 2 y los más bajos son los resultados de la correlación 8.
- La correlación creada en este trabajo se encuentra en el medio de la correlación 6 y 7.
- La metodología aplicada en esta experimentación, nos permite conocer la resistencia a la compresión simple y el índice de carga puntual de la roca de manera rápida y económica, generando una ventaja con respecto a las muestras enviadas al laboratorio, ya que la determinación de cada una se la puede realizar en el campo.
- Esta investigación es necesaria en el área minera para el estudio geotécnico y comportamiento de los macizos rocosos, pues existen numerosas variables por resolver según las experiencias. La eficiencia del modelo planteado requiere de una serie de pruebas con distintos materiales, pues es necesario una profundización en el conocimiento de los diferentes materiales rocosos.

Recomendaciones

- En proyectos mineros es importante la determinación de la compresión de la roca, por lo que se recomienda enviar inicialmente las muestras al laboratorio para partir de datos reales y poder correlacionarlos.
- Es conveniente que las muestras a experimentar sean lo más homogéneas e isotropas posibles, puesto que un cambio brusco en su estructura podría generar variaciones tanto en la determinación de la resistencia a la compresión simple, así como en el índice de carga puntual.
- Se recomienda realizar pruebas del mismo tipo, en materiales o rocas de diferentes sitios para tratar de generalizar el procedimiento y conseguir una correlación que sirva para diferentes tipos de material rocoso.
- Revisar que el equipo de prensa se encuentre en estado óptimo, ya que al existir una falla puede causar que los resultados finales se alteren y que la correlación no sea precisa.
- Apoyarse en otros estudios, ya que pueden servir de guía para determinar una buena correlación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambramson , W. (1996). *Litología y Estructura Geológica*. Canada: Geology Books. Obtenido de <http://desastres.medicina.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0101/doc0101-parte05.pdf>
- Ceballos, I. (2016). Correlación de la resistencia a compresión uniaxial con la humedad y porosidad eficaz. *Dyna*, 83(198), 9-15. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/496/49647009001.pdf>
- Cordero , D. (2019). *Propiedades de los minerales y su aplicación en diferentes industrias*. Obtenido de Universidad de Alicante : <https://web.ua.es/es/lpa/minerales-visu/propiedades/propiedades.html>
- Fajardo , L., & Espinoza , X. (2020). *Análisis de la granulometría y su relación con la resistencia a compresión simple en rocas. [Tesis de grado, Universidad del Azuay]*. Repositorio institucional de la Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10414/1/16041.pdf>
- Feijoo , P., & Román , M. (2019). Correlación entre la deformación y la resistencia a la compresión en rocas: Un diagnóstico de campo. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 23(91), 12-17. Obtenido de <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/112/109>
- Fernández , V. (2018). *Cojitambo paisaje natural y arqueológico como fuente de turismo [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]*. Repositorio institucional de la Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15543/1/UPS-CT007634.pdf>
- Flores , J., & Tinoco , A. (2019). *Construcción de la “Máquina de Franklin”, pruebas y correlación con ensayos de laboratorio en compresión de rocas. [Tesis de grado, Universidad del Azuay]*. Repositorio institucional de la Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8954/1/14599.pdf>
- Galbarro, H. R. (2020). *ingemecanica*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html>
- Galván , M., & Restrepo, I. (2016). Correlación de la resistencia a compresión uniaxial con la humedad y porosidad eficaz en rocas 1. *DYNA*, 83(198), 9-15. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v83n198/v83n198a01.pdf>
- Gobierno Provincial de Cañar. (2015). *Prefectura de Cañar* . Obtenido de http://www.gobiernodelcanar.gob.ec/public_html/paginas/complejo-arqueologico-cojitambo.92

- Larriva , N. (2022). *Caracterización del material rocoso mediante ensayos de mecánica de rocas, caso de estudio: Andesitas del Cojitambo. [Tesis de grado, Universidad del Azuay]*. Repositorio institucional de la Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/11590/1/17121.pdf>
- Maldonado , Y. (2021). Obtenido de GEOLOGÍAWEB.
- Navarrete , M., Martínez , W., Alonso, E., Lara , C., Bedola , A., Chávez , H., . . . Arteaga , C. (2013). Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura. *Revista ALCONPANT*, 3(2), 133-143. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/297678520_Caracterizacion_de_propiedades_fisico-mecanicas_de_rocas_igneas_utilizadas_en_obras_de_infraestructura
- Ochoa, J. (2018). *GEOLOGIAWEB*. Obtenido de <https://geologiaweb.com/tipos-de-rocas/caracteristicas-propiedades-rocas/>
- Padrón , J. (2020). *Correlación entre la resistividad de la rocas y la resistencia a la compresión simple. [Tesis de grado, Universidad del Azuay]*. Repositorio institucional de la Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10023/1/15653.pdf>
- Piedra , L. (2008). *Andesitas* . Obtenido de Departamento de Petrología y Geoquímica (Universidad Complutense de Madrid): Departamento de Petrología y Geoquímica (Universidad Complutense de Madrid)
- Rodriguez, R. (2012). *Mecánica de Rocas*. Obtenido de Universidad Nacional de Cajamarca: https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=dW5jLmVkdS5wZXxvc mJhc2F8Z3g6MmZiNTU1NmNkMjU3OWFl&fbclid=IwAR2rqi6hmjiky dQZg_ZQ5EDWnhk0FnxAA24wxIxzP5uNfblZCj9rHqS5iSw
- Toral , C. (2020). *Velocidad de corte en rocas y su relación con la resistencia a la compresión simple. [Tesis de grado, Universidad del Azuay]*. Repositorio institucional de la Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9967/1/15597.pdf>
- Torres , D. (2014). *Propiedades de los materiales*. Obtenido de edu.xunta.ga: https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/146497174/contido/2_propiedades_de_los_materiales.html
- Universidad de Granada. (2015). *Propiedades de las rocas de construcción y ornamentación* . Obtenido de [urg.es: https://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm](https://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA05.htm)
- Ureña , C. (2021). *Caracterización del material rocoso mediante granulometría e índice de carga puntual. [Tesis de grado, Universidad del Azuay]*. Repositorio

institucional de la Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10802/1/16345.pdf>

Vera , C. (2019). *Correlación de la distribución de partículas mediante el proceso de fragmentación para la determinación para la determinación de la Resistencia a la comprensión simple de rocas. [Tesis de grado, Universidad del Azuay].* Repositorio institucional de la Universidad del Azuay. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8833/1/14489.pdf>

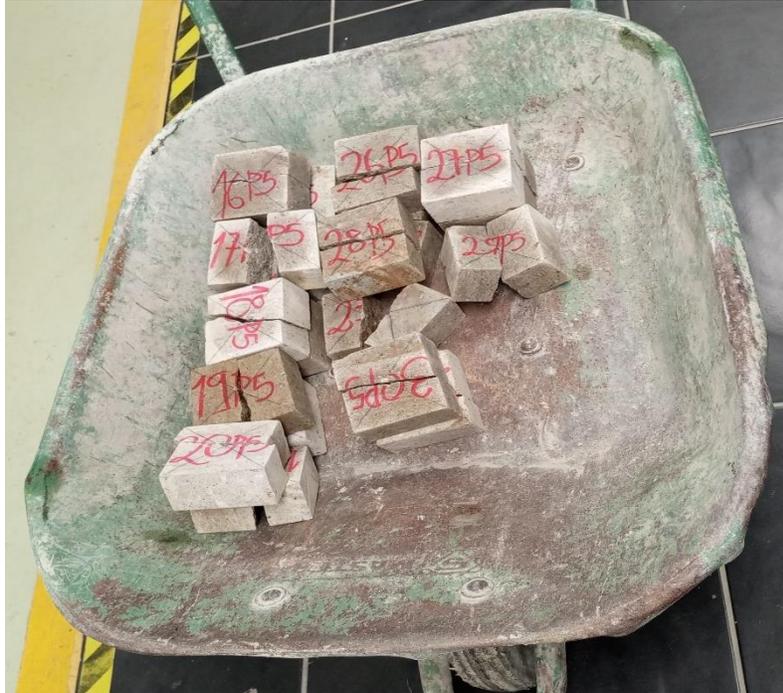
ANEXOS



Anexo 1: Numeración de las muestras



Anexo 2: Medición de las muestras



Anexo 3: Muestras después del proceso de rotura



Anexo 4: Muestras siendo retiradas del lugar donde fueron cortadas