

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE  
HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**ANÁLISIS DE LAS VETILLAS Y LA RELACIÓN QUE EJERCEN SUS  
CARACTERÍSTICAS SOBRE SU RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN  
UNIDAD MINERA YAULIYACU, 2019.**

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR: JULIO CESAR MITMA SALVATIERRA

**AYACUCHO – PERÚ**

**2019**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta investigación principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional. A mi padre por el ser un ejemplo y mentor de mi existencia. A mi esposa por ser la compañera de mi vida y a mis hijos que son mi fuente de inspiración para seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradecer a mi familia por el apoyo incondicional que me han brindado.

Esta investigación representa el fin de cinco años de aprendizaje y ha presentado desafíos y obstáculos los cuales he podido superar gracias al apoyo directo e indirecto de varias personas.

A la Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga Ayacucho. A todos mis docentes quienes me brindaron sus valiosos conocimientos, experiencias durante mi formación profesional.

A mis amigos y compañeros de la Universidad con los que tuve oportunidad de compartir y hacer llevadero este camino, con los que compartí muchos de los buenos y malos momentos, dentro y fuera de las salas de clases.

A todos les expreso mis infinitos agradecimientos por aportar en este importante proceso de mi vida.

## RESUMEN EJECUTIVO

La Unidad minera Yauliyacu tiene un macizo rocoso con un comportamiento mecánico determinado en gran medida por sus abundantes vetillas cuya resistencia menor a la de la roca intacta incide en la estabilidad de la roca. En este contexto se enmarca la presente investigación de título, en la cual se estudia el comportamiento de vetillas ante ensayos de tracción directa y la influencia que ejercen sus características sobre su resistencia y deformación.

Se analizó el resultado de 19 ensayos de tracción directa en vetillas. Las resistencias a la tracción y forma de ruptura fueron graficadas versus porcentaje de minerales duros, espesor, rugosidad y ángulo de vetilla con respecto al plano ortogonal a la dirección del esfuerzo aplicado. La deformación de las vetillas fue caracterizada por el strain total, el stress del punto de fluencia, el módulo de elasticidad y módulo secante en el punto de 50% de esfuerzo aplicado y módulo secante en el 50% de deformación. Estos parámetros fueron igualmente graficados en función de las características de la vetilla recién mencionados.

Los resultados del análisis muestran que las vetillas de calcopirita tienden a tener menor resistencia a la tracción directa que vetillas de pirita de 1-4 mm de espesor. Por otro lado, las vetillas de pirita de mayor espesor tienen menor resistencia, mientras que la situación de las de calcopirita según el espesor no es clara.

El JRC no mostró influencia en la resistencia, incluso en las vetillas más inclinadas. Por su parte, el ángulo de la vetilla con respecto al plano ortogonal a la dirección del esfuerzo tampoco muestra mayor incidencia en la resistencia a la tracción.

Las relaciones encontradas fueron comparadas con resultados de ensayos de tracción indirecta realizados anteriormente. Ambos ensayos coinciden en que la presencia de minerales duros tiende a aumentar la resistencia y en que la ruptura suele darse por el medio del relleno de la vetilla.

Se concluye que las características microscópicas de las vetillas, como el tamaño y forma de los cristales, también pueden influir en su comportamiento ante esfuerzos de tracción.

## CONTENIDO

CAPÍTULO 1: ASPECTOS METODOLÓGICOS	1
<b>1.1 INTRODUCCIÓN</b>	1
1.2 PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2.1 FORMULACION DEL PROBLEMA GERENAL	2
1.2.2 FORMULACION DE LOS PROBLEMAS ESPECIFICOS	2
1.3 PLANTEAMIENTO DE LA HIPOTESIS	2
1.3.1 FORMULACION DE LA HIPOTESIS GENERAL	3
1.3.2 FORMULACION DE LAS HIPOTESIS ESPECÍFICOS	3
<b>1.4 JUSTIFICACIÓN</b>	3
1.5 OBJETIVOS	3
1.5.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
1.6 ANTECEDENTES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	4
1.7 ALCANCE	4
1.8 TIPOS DE VARIABLES	5
1.9 INDICADORES	5
1.10 METODOLOGIA DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	5
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO	7
2.1 UBICACIÓN Y ACCESO	7
2.1.1 CLIMA	7
2.2 GEÓLOGICO GENERAL	9
2.2.1 ESTRATIGRAFIA	11
2.2.2 SECTOR OCCIDENTAL	12
2.2.3. SECTOR ORIENTAL	24
CAPITULO 3: PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	33
3.1 VETILLAS DE LA MINA YAULIYACO	33
3.2 GENERALIDADES	33
3.3 CLASIFICACIÓN DE VETILLAS	35
3.3.1 Según espesor de la vetilla	35
3.3.2 Según traza de la vetilla	35
3.3.3 Clasificación genética	36

CAPITULO 4: ENSAYOS GEOTÉCNICOS DE TRACCIÓN	44
4.1 ENSAYO DE TRACCIÓN DIRECTA	44
4.1.1 Resistencia a la tracción directa	46
4.1.2 Medición de deformación en el ensayo de tracción directa	47
4.2 ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA	48
CAPITULO 5: DESCRIPCIÓN DE POST ENSAYO DE VETILLAS	50
IDENTIFICACIÓN DE VETILLA	51
5.1 DESCRIPCIÓN MINERALOGÍA DEL RELLENO Y HALO	52
5.1.1 Relleno mineralógico	52
5.1.2 Porcentaje de minerales duros	52
5.1.3 Presencia de halo	53
5.2 DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	53
5.2.1 Rugosidad	53
5.2.2 Espesor	55
5.2.3 Espesor Halo	56
5.2.4 Ángulo	56
5.3 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO	57
5.3.1 Modo de ruptura	59
5.3.2 Resistencia	62
5.3.3 Deformación	62
5.4.3.1 Normalización del strain según el espesor de cada vetilla	64
CAPITULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
6.1 RESULTADOS INDIVIDUALES	67
6.2 ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE PARÁMETROS MINERALÓGICOS	71
6.2.1 Subtipo de vetillas	71
6.2.1.1 Resistencia según subtipo de vetilla	71
6.2.1.2 Clase de Ruptura Según Subtipo de Vetilla	72
6.2.2 Presencia de Halo	74
6.2.3 Porcentaje de minerales duros	75
6.3 Espesor	78
6.3.1 Resistencia Versus Espesor	78
6.3.2 Rugosidad de la Vetilla	83
6.3.3 Ángulo de Vetilla	88

6.4	ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN SEGÚN PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y MINERALÓGICOS	91
6.4.1	Stress Límite de Comportamiento Elástico	91
6.4.2	Módulo de Elasticidad	92
6.4.3	Módulo Secante o Pendiente de la Secante en el 50% del stress aplicado	93
6.4.4	Módulo de Deformación o Pendiente de la Secante en el 50% de la de Formación	94
6.4.5	Strain Total	95
	CONCLUSIONES	97
	RECOMENDACIÓN	100
	REFERENCIAS	101
	ANEXO	103

# CAPÍTULO 1: ASPECTOS METODOLÓGICOS

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La Unidad Minera Yauliyacu se constituyó como la principal empresa en la historia de la minería en la sierra central del Perú. Desde el año 1997 y como consecuencia del proceso de privatización de Centromin Perú.

En la Unidad Minera Yauliyacu se extrae mineral polimetálico y produce concentrados de zinc, plomo, bulk y cobre, los que se encuentran en vetillas que forman un enrejado poli-direccional o stockwork, lo que además produce en la roca distintos grados de alteración.

Un aspecto de gran importancia para la eficiente explotación de la mina corresponde a la geotecnia, que influye tanto en la fragmentación de la roca como en temas de estabilidad de labores. La mayoría de las operaciones en la Unidad Minera se realizan en roca de mena primaria, la cual es masiva y competente, y al ser sometida a altos esfuerzos se falla de forma frágil (Rojas y otros, 2001).

En esta roca predomina la presencia de vetillas o fracturas selladas por rellenos minerales (Brzovic y Villaescusa, 2007), las que han sido clasificadas en 3 categorías, según su etapa de formación, y 15 clases según su mineralogía de relleno y halo. Estas estructuras geológicas son un factor importante que determina cómo se comporta el macizo rocoso bajo distintos regímenes de stress, pues el desarme de la roca se produce más fácilmente aprovechando las discontinuidades que generando nuevas fracturas, independientemente de la litología de la roca intacta. Las vetillas sobresalen en esta especial influencia, como lo muestran algunos estudios, tanto por su baja resistencia como por su abundancia.

El presente trabajo busca ser un aporte a la caracterización del macizo rocoso de la Mina Yauliyacu para generar un modelo geotécnico que permita estimar su comportamiento ante diferentes estados de stress. En él, específicamente, se analizan los resultados de ensayos de tracción directa aplicados a distintos tipos de vetillas para encontrar cómo influyen los parámetros mineralógicos y geométricos de estas, tales como espesor y rugosidad, sobre la resistencia a la tracción presentada en cada caso.



## **1.2 PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la Unidad Minera Yauliyacu existe muy poca investigación de la caracterización del macizo rocoso, por este motivo se tiene zonas de muy compleja excavación, a razón de esto se tienen tiempos mayores de operación.

Se generan pocos modelos geotécnicos que permitan estimar el comportamiento ante diferentes estados de stress. Específicamente existe muy poco análisis de los resultados de ensayo de tracción directa aplicados a distintos tipos de vetillas para encontrar la influencia de los parámetros mineralógicos y geométricos de estas, tales como espesor, rugosidad y mineralógico, sobre la resistencia a la tracción que se presenta en cada zona donde se encuentran las Vetillas.

### **1.2.1 FORMULACION DEL PROBLEMA GERENAL**

¿Cuál es la influencia de los parámetros geométricos, como espesor, rugosidad, y mineralógicos en la resistencia a la tracción de vetillas de la Unidad Minera Yauliyacu?

### **1.2.2 FORMULACION DE LOS PROBLEMAS ESPECIFICOS**

- a. ¿Cuál es la resistencia a la tracción y gráficos de stress vs strain de vetillas de la Unidad Minera Yauliyacu mediante resultados de ensayos de tracción?
- b. ¿Qué relación existe entre los parámetros geométricos y contenido mineralógico de las vetillas y los resultados de los ensayos, resistencia a la tracción y deformación?

## **1.3 PLANTEAMIENTO DE LA HIPOTESIS**

En la Unidad Minera Yauliyacu hasta la fecha ha venido operando con poca información del análisis de la caracterización de macizo rocoso teniendo deficiencia en el análisis de las vetillas, si se llega a realizar un análisis de los modelos geotécnicos, se sabrá el comportamiento de diferentes estados de stress. Esto con los ensayos a tracción directa, gráficos de stress vs strain, aplicados a distintos tipos de vetillas se encontrara los parámetros mineralógicos y geométricos y del macizo rocoso. Siendo menos complejo el avance de las excavaciones en la Unidad Minera Yauliyacu.

### **1.3.1 FORMULACION DE LA HIPOTESIS GENERAL**

Los parámetros geométricos, como espesor y rugosidad, y mineralógicos, influyen de manera positiva en la resistencia a la tracción de vetillas de la Unidad Minera Yauliyacu.

### **1.3.2 FORMULACION DE LAS HIPOTESIS ESPECÍFICOS**

**a.** La resistencia a la tracción y gráficos de stress vs strain de vetillas de la Unidad Minera Yauliyacu se relaciona directamente a los resultados de ensayos de tracción.

**b.** Los parámetros geométricos y contenido mineralógico de las vetillas, se relacionan directamente a los resultados de los ensayos de resistencia a la tracción y deformación.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

La identificación y descripción de vetillas se aborda con un análisis tanto de su geometría, como desde sus parámetros geotécnicos, lo cual en el presente estudio se realiza en dos temas relacionados pero independientes entre sí, el primero: una caracterización geométrica de acuerdo a los parámetros de tracción, definidos y aplicados en el trabajo a las Fallas principales donde recomienda extender tal caracterización a las estructuras. Segundo se determina la relación entre el tipo de litología y el tipo de vetilla y halo que se desarrolla.

Esta información es muy importante, ya que puede ser considerada para la planificación minera, pudiendo prevenir o atenuar posibles grandes pérdidas.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Análisis de las vetillas y la influencia que ejercen sus características geométricas, como espesor, rugosidad y mineralógicos en la resistencia a la tracción de la Unidad minera Yauliyacu, 2019.

## **1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- a.** Determinar cuál es la resistencia a la tracción y gráficos de stress vs strain de vetillas de la Unidad Minera Yauliyacu mediante resultados de ensayos de tracción.
- b.** Encontrar qué relación existe entre los parámetros geométricos y contenido mineralógico de las vetillas y los resultados de los ensayos, resistencia a la tracción y deformación.

## **1.6 ANTECEDENTES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

Para la realización de este estudio se ha dividido el trabajo en diferentes etapas, las cuales se exponen a continuación:

Recopilación y revisión de bibliografía de todos los antecedentes de relacionados a ensayos geotécnicos en vetillas de la Unidad Minera Yauliyacu. Esto será un aporte a la discusión de resultados, además de contextualizar sobre la geología del yacimiento en estudio.

Registro de resistencia a la tracción directa, modo de ruptura de la muestra y gráficos de stress/strain, obtenidos de los resultados de los ensayos de tracción directa y de la descripción post-ensayo de las muestras.

Descripción post-ensayo de las muestras que tiene por objetivo capturar de forma detallada toda la información útil que se desprende de la vetilla. Identificación de los minerales presentes y registro de espesor, rugosidad, etc. Este paso se detalla en las siguientes secciones.

Análisis gráfico de datos mediante el software Excel. A partir de la visualización, ordenamiento y resumen de estos, podrán encontrarse relaciones que permitan interpretar el comportamiento de las vetillas.

Finalmente, una etapa de interpretación y discusión de los resultados obtenidos.

## **1.7 ALCANCE**

De acuerdo con los antecedentes disponibles se definieron los siguientes alcances del estudio:

- a.** Establecer la metodología y criterios previamente propuestos para la representación del análisis. Solo se desarrolla el estudio en las excavaciones horizontales de las vetas de la

Unidad Minera Yauliyacu.

- b. Realizar el estudio solo en la zona donde se muestren este tipo de macizo rocoso con vetillas.
- c. Las pruebas de tracción se realiza en la misma Unidad Minera Yauliyacu.

Para cumplir con lo señalado, al margen de la observación y medición de las vetillas, se consideró el uso de técnicas del software Excel que faciliten la toma de decisiones.

## **1.8 TIPOS DE VARIABLES**

### **Variable Dependiente:**

- La resistencia a la tracción de vetillas.

### **Variable Independiente:**

- Los parámetros geométricos, como espesor y rugosidad

## **1.9 INDICADORES**

### **Indicador dependiente**

- Resistencia a la tracción.

### **Indicador independiente**

- Resultados de los ensayos de Stress del punto de influencia, módulo de elasticidad y modulo secante.

## **1.10 METODOLOGIA DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

**TIPO DE INVESTIGACIÓN:** correlacionales, experimental.

El diseño de la investigación a utilizarse es de carácter experimental en las muestras con los ensayos de tracción del macizo rocoso, ya que se refiere a un estudio en el que se manipulan las variables independientes para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes, dentro de una investigación de control para el investigador.” (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio, 2014).

**a. NIVEL DE INVESTIGACIÓN:** descriptivo y analítico.

**Población: parámetros geométricos.**

La población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones.” (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio, 2014).

**b. Muestra: resultados de los ensayos.**

La muestra es un subgrupo de la población o universo que se utiliza por economía de tiempo y recursos esto implica definir la unidad de muestreo y de análisis, se requiere delimitar la población para generalizar resultados y establecer parámetros.” (Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio, 2014).

**c. Recolección de datos:** sobre los parámetros geométricos y mineralógicos de la Unidad Minera Yauliyacu.

**d. Unidad de análisis:** vetillas de la Unidad Minera Yauliyacu.

## **CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 UBICACIÓN Y ACCESO**

La Unidad Minera Yauliyacu inició sus actividades en 1919 cuando formaba parte de la compañía Cerro de Pasco Mining Corporation. Se constituyó como la principal empresa en la historia de la minería en la sierra central del Perú. Desde el año 1997 y como consecuencia del proceso de privatización de Centromin Perú, es parte de nuestro Grupo, con la denominación inicial de Empresa Minera Yauliyacu S.A.

La Mina Yauliyacu se ubica en el distrito de Chicla, provincia de Huarochiri, departamento de Lima. Geográficamente se localiza en la zona central, flanco Oeste de la Cordillera Occidental de los andes, entre las coordenadas 11° 30' Latitud Sur y 76° 10' Latitud Oeste, a una altura promedio de 4,250 m.s.n.m. Se llega por carretera asfaltada siguiendo la ruta Lima – Huancayo de la carretera Central, con una distancia aproximada de 129 Km. en un tiempo aproximado de recorrido de tres horas.

La mina se encuentra situada en el cinturón volcánico de la Cordillera Occidental Andina, muestra un relieve relativamente empinada, cuyas pendientes evidencian profunda erosión. Es observable que el relieve ha sido modelado por acción glaciaria mostrándose en cotas muy elevadas presencia de nieve perpetua. El afluente principal de la zona representa el río Rímac surca de este a oeste drenando dendríticamente hacia el Océano Pacífico.

#### **2.1.1 CLIMA**

Como en toda región de la sierra del Perú, se presentan dos estaciones:

- a. De diciembre a abril, en estos meses se presentan intensas precipitaciones fluviales y el clima es frígido.
- b. De mayo a noviembre, es una estación seca, de temperatura casi uniforme, las lluvias son esporádicas presentándose en el mes de junio un intenso frío, acompañado de heladas durante la noche.



## **2.2 GEÓLOGICO GENERAL**

La Mina Yauliyacu es productora de zinc, plomo, plata y cobre. Para la elaboración de esta parte de la Geología se ha utilizado el Informe de Reserva Anual de Yauliyacu del año 2.017. La mineralogía es constituida por esfalerita, galena, tetraédrica y calcopirita como minerales de mena de mayor abundancia; los minerales de ganga están representados principalmente por pirita, calcita y cuarzo.

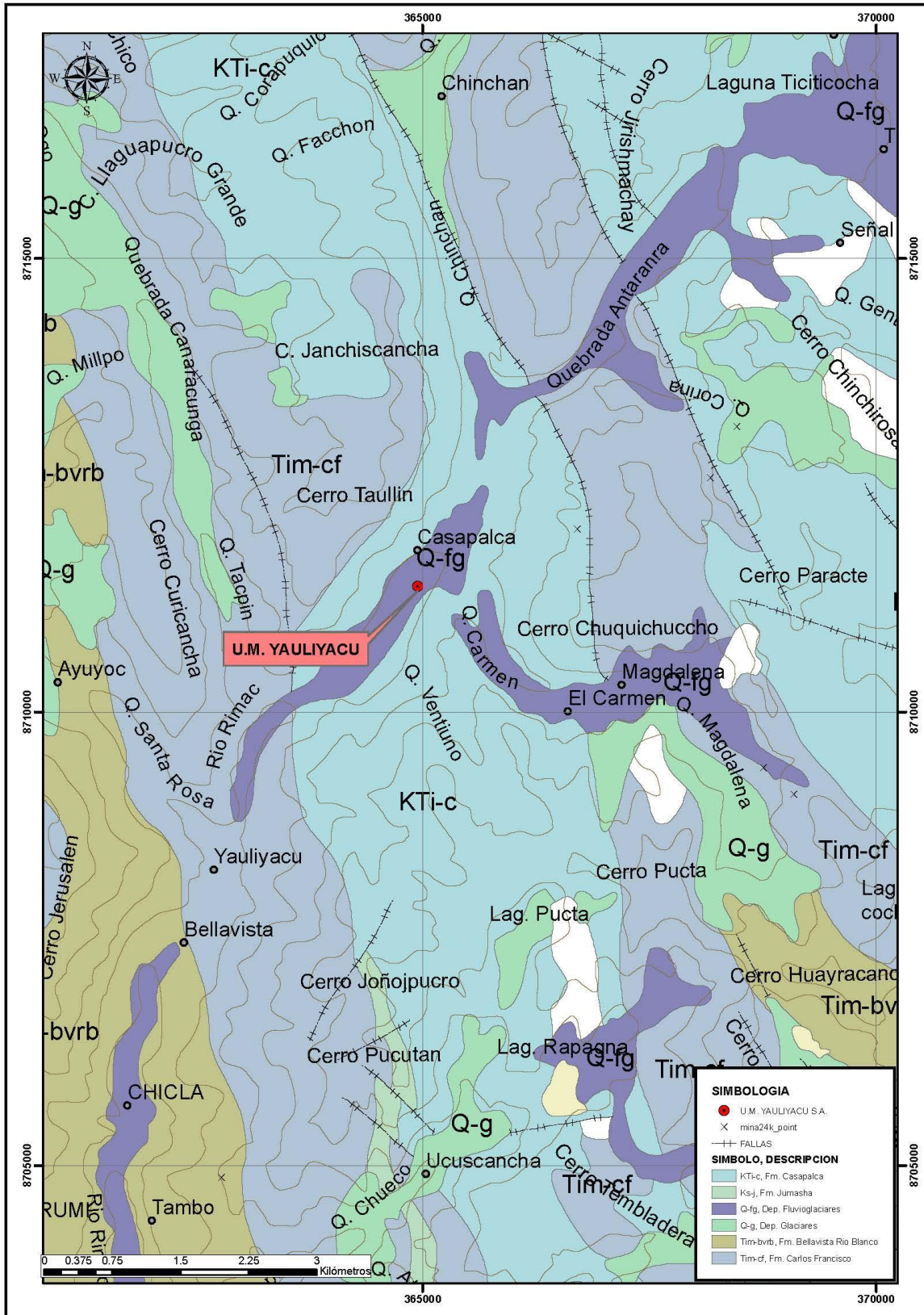
El yacimiento se emplaza en rocas volcánicas andesíticas de la formación Carlos Francisco y areniscas calcáreas de la formación Casapalca, con estructuras mineralizadas del tipo vetas y cuerpos controlados por dos sistemas Nor-Este y Este-Oeste, con algunas inflexiones Norte-Sur, cuyos eventos de mineralización ocurrieron en el terciario mediante una actividad hidrotermal de baja sulfuración, originando muchas vetillas de estructuras rellenas y reemplazadas por sulfuros.

La alteración hidrotermal de las rocas encajonantes es silicificación, piritización, sericitización en zonas aledañas a las vetas y propilitización a cierta distancia de ellas.

El control principalmente es estructural, con moderada influencia del control litológico en sedimentos gruesos de la formación Casapalca.

El plano geológico de Yauliyacu se encuentra detallado en el plano 2.1, así mismo el plano geológico de estratigrafía se detalla en el plano 2.2.





Plano 2.2 Geológico de Yauliyacu

## 2.2.1 ESTRATIGRAFIA

### GENERALIDADES

La estratigrafía de la región estudiada corresponde a dos sectores estratigráficos, uno occidental y otro oriental.

El sector occidental corresponde a una faja de terreno de 45 Km. de ancho aproximadamente, que se le observa a lo largo de la zona media y alta del Flanco Occidental Andino; su límite oriental coincide aproximadamente con la Divisoria Continental, mientras que su límite occidental guarda relación con la zona marginal oriental del batolito costanero. En esta zona se ha desarrollado el ciclo de sedimentación mesozoica seguido por una acumulación continental volcanoclástica del Cenozoico, afectada por las diversas fases del ciclo geotectónico andino.

El sector oriental corresponde al sector EN del cuadrángulo de Matucana y columna estratigráfica comprende las unidades formacionales descritas por MCLAUGHLIN (1924) y ARRISON (1940,1943,1951,1953) quienes fueron los pioneros de los estudios geológicos en la región andina del centro del país. En dicho sector, los terrenos más antiguos corresponden al Grupo Excelsior de edad Paleozoico inferior a medio.

Sobre el Grupo Excelsior en discordancia, una gruesa secuencia de sedimentos continentales y marinos se depositaron con algunas interrupciones entre el Permiano y el Cretáceo superior; luego se sucede la tectónica andina en varias fases y como consecuencia de procesos erosivos post-tectónicos, molasas rojas, sobre las que yacen discordantemente rocas volcánico sedimentarias correspondientes a varios episodios volcánicos.

En el área de estudio, las unidades formacionales de facies de cuan están presentes en afloramientos cretáceos que constituyen fajas de terreno cubiertas generalmente por rocas volcánico-sedimentarias del Terciario, pero que en el lado oriental infrayacen en discordancia a las capas rojas de la formación Casapalca.

A continuación se describen las diferentes unidades formacionales reconocidas en el área de estudio.

Cabe señalar que algunas formaciones reconocidas sobre el terreno no han sido individualizadas en el mapa geológico por el poco espesor y por la escala a que se realiza el trabajo; pero sí se les describe en el informe.

## 2.2.2 SECTOR OCCIDENTAL

### **Formación Chimú**

Esta unidad es la más antigua del Cretáceo, aflora aisladamente en la zona media y alta del Flanco Occidental Andino del área de estudio.

Inicialmente fue descrita por STAPPENBECK (1929), bajo la denominación de “Cuarcitas del Wealdiano”?. Su designación como formación fue dada por BENAVIDES (1956), en la localidad típica de Baños del Alto Chicama.

Litológicamente, la formación Chimú consiste en areniscas cuarcíticas gris blanquecinas con textura granular de fina a media, estratificación en capas de 30 cm. a 1m. y que intercalan ocasionalmente lutitas grises.

Hacia el tope de la formación, predominan las areniscas cuarcíticas; es así como se ha reconocido en los afloramientos del área de Huanchurina (sector NO del cuadrángulo de Matucana), en el anticlinal de Larhuacata y en el área de Huarochirí-Garhuapampa; pero en el sector SO de esta última localidad se exponen las lutitas grises en igual o mayor proporción que las areniscas cuarcíticas grises. Los afloramientos reconocidos con esta litología son el de Marhuayque y el que se observa en el área de confluencia de la quebrada Sucuca con el río Mala. En esta sección, HARRISON ha calculado 455m. que corresponderían al miembro inferior de la formación y 300m. para el miembro superior. Estructuralmente, la formación se presenta en anticlinales y sinclinales agudos y algunas unidades con pliegues pequeños disarmónicos.

Esta formación infrayace concordantemente a las calizas de la formación Santa; por el piso no se conoce bien su relación, pero es probable que parte del miembro inferior que aflora cerca de Santiago de Anchucalla corresponda a sedimentos del Jurásico Superior (Titoniano).

**Edad y Correlación.-** No se han encontrado fósiles pero por su posición estratigráfica se le asigna al Valanginiano Inferior a Medio.

Corresponde a la formación homónima que tiene amplio desarrollo a lo largo de la Cordillera Occidental de la región andina norte, pues los afloramientos más próximos al área de estudio se encuentran en el sector EN de la hoja de Canta.

En una correlación más amplia, se le puede considerar equivalente, en la región sur, con los miembros superiores del Grupo Yura del área de Arequipa, asimismo con parte de la formación

Chachacumane de los cuadrángulos de Pachia y Palca (WILSON y GARCIA 1963), Maure (MENDIVIL, 1965) y Tarata (JAEN, 1965).

### **Formación Santa**

Esta formación fue descrita por V. BENAVIDES (1956) en el Callejón de Huaylas; tiene amplia distribución en la región andina norte, conjuntamente con los afloramientos de las formaciones Chimu y Carhuaz, ya que se encuentran en forma concordante entre ambas.

En el área de estudio, la formación Santa tiene una relación similar a la indicada anteriormente; ha sido reconocida parcialmente en los afloramientos indicados para la formación Chimú. También se ha reconocido unidades calcáreas pero mal expuestas o perturbadas estructuralmente en el area de Quinocay-Viscas-Quiripa, en donde con estudios más detallados puede mapearse separadamente de la formación Carhuaz.

Litológicamente, la formación consiste en calizas gris oscuras, con venillas de calcita, en capas delgadas de 20 a 40 cm; ocasionalmente con lutitas gris margosas. El espesor se estima en 80 m.

**Edad y Correlación .-**En el área estudiada no se encontraron fósiles pero Benavides (1956) encontró, en la localidad típica *Buchotrionia gerthii*, *Paraglauconia studeri*, etc. Que le permitieron ubicarla en el Valanginiano superior.

La formación Santa del área de estudio corresponde a la formación calcárea del Grupo Goyllarisquizga que se desarrolla a lo largo de la Cordillera Occidental del norte y centro del país. Por el lado occidental se correlaciona con la formación Pamplona del Area de Lima.

### **Formación Carhuaz**

Fue designada también por V. BENAVIDES (1956) a 3 Km. de Carhuaz, con una litología predominante lutácea.

En el área de estudio la formación Carhuaz aflora principalmente en los flancos del anticlinal de Jarhuanca, que se ubica en el ángulo EN de la hoja de Huarochirí, consiste en areniscas gris verdosas, gris blanquecinas, con ocasionales intercalaciones de lutita negruzca y caliza margosa negruzca; esta litología se alterna con unidades de limolita y arenisca marrón rojizo, que contienen ocasionalmente capas de calizas y margas. Su grosor se estima en 250m., yace discordantemente sobre calizas de la formación Santa y debajo de la formación Farrat.

Otro afloramiento de regular extensión y potencia es el del área de Viscas-Quiripa Quinocay-Pilas; consiste de una gruesa secuencia de lutitas pizarrosas friables y laminadas, con

intercalaciones de areniscas grises y pardas; ocasionalmente con unidades delgadas de caliza y margas color gris negruzco; también contienen esporádicamente, limonitas, areniscas rojizas y capas irregulares de volcánicos. Esta secuencia litológica tiene un espesor estimado de 800 m. y está afectada por un moderado grado de metamorfismo. Cerca de Viscas, la secuencia contiene capas de yeso. En esta área, su relación no es muy clara con la formación infrayacente por encontrarse replegadas y falladas; por el lado este, está cubierta por calizas

equivalentes a la Formación Imperial o Pariahuanca; en cambio por el lado oeste yace debajo de paquetes no diferenciados de la serie volcánica equivalente tentativamente al Volcánico Quilmaná.

En el área de Carhuapampa (EN de la hoja de Hurochirí) es probable que también esté presente esta formación pero no ha sido reconocida; sin embargo, más al este y norte de Tanta, la Formación Carhuaz, que yace concordante entre las formaciones Santa y Farrat, se extiende con areniscas y limolitas rojizas hacia la hoja de Yauyos.

En el alforamiento de la quebrada Huanchurina (NO de la hoja de Matucana), la secuencia de la Formación Carhuaz está fallada y cubierta por depósitos cuaternarios, pero se reconocen unidades de limolitas y areniscas pardo rojizas.

**Edad y Correlación.**-No se ha encontrado fósiles en los afloramientos del área de estudio; pero por las características litoestratigráficas y posición estratigráfica semejante a la localidad típica, se le asigna al Valanginiano superior-Aptiano, pues V. BENAVIDES (1956) en el Callejón de Huaylas, encontró Valanginites broggi que es indicativo del Valanginiano superior. La formación aquí descrita corresponde a la Formación Carhuaz que ha sido mapeada en la región andina del norte del país, asimismo se le correlaciona con una unidad similar que aflora al este del cuadrángulo de Yauyos. Hacia el este se correlaciona con las unidades clásticas inferiores del grupo Goyllarisquizga.

### **Formación Farrat**

Esta formación fue descrita por STAPPENBECK (1929) en la hacienda Farrat con una litología de cuarcitas sobre la Formación Carhuaz. En el área de estudio la Formación se presenta, por lo general, pobremente expuesta como una cobertura de depósitos superficiales, debido a fallamiento o erosión.

En el anticlinal de Jarhuanca, se ha encontrado 40m. de areniscas cuarcíticas blanquecinas en capas medianas y hacia el tope, areniscas calcáreas gris blanquecinas, en capas medianas y gruesas. Yace concordantemente sobre la Formación Carhuaz y debajo de las calizas pariahuanca.

**Edad y Correlación.-** Por sus relaciones estratigráficas se le asigna, a la Formación Farrat, una edad probablemente Aptiano superior, siendo equivalente con los afloramientos de la Formación Farrat que han sido mapeados en la región andina del norte, también se correlaciona con la parte superior del Grupo Goyllarisquiza del sector oriental (zona de plataforma del Cretáceo).

**Ambiente de Sedimentación del Grupo Goyllarisquiza.-** Las características litológicas y faunísticas de las formaciones Chimú, Santa, Carhuaz, y Farrat, sugiere un ambiente deposicional en cuenca somera pero con transgresiones y regresiones cambiantes, por eso la Formación Chimú, debió ocurrir en ambiente litoral; la Formación Santa en ambiente nerítico o salobre con poca profundidad; la Formación Carhuaz en ambiente deltaico y parcialmente invadido por aguas someras y finalmente la Formación Farrat nuevamente en ambiente litoral a deltaico que corresponde a la regresión marina del Aptiano.

### **Formación Pariahuanca**

V. BENAVIDES (1956), describe a esta unidad que aflora cerca del pueblo de Pariahuanca, y que consiste en 100 m. de caliza masiva en capas gruesas.

En el área de estudio se ha reconocido a la Formación Pariahuanca en el flanco oriental del anticlinal de Jarhuanca (ángulo EN de la hoja de Huarochirí); consiste de 50m. de caliza masiva en capas gruesas, ocasionalmente delgadas, de color gris claro; morfológicamente presenta crestas prominentes. Yace en aparente concordancia sobre la Formación Carhuaz y debajo de las calizas Chulec, estando atravesadas por diques gris verdosos.

**Edad y Correlación.-** No se han encontrado fósiles, pero, en la localidad típica V. BENAVIDES (1956), encontró el género Parahoplites, que indica al Aptiano - Albiano inferior. Se le correlaciona con las unidades litológicas similares mapeadas por varios autores en la región andina del norte y centro del país, con el nombre de Formación Inca. En el sector costanero se le relaciona con parte de la Formación Imperial.

### **Formación Imperial**

En la zona marginal oriental al batolito costanero se ha reconocido pequeños afloramientos de rocas calcáreas que provisionalmente se les considera equivalentes a la Formación Imperial, que

el autor describe como una secuencia de edad Aptiano-Albiano medio, expuesta en la zona costanera y zona baja del Flanco Occidental Andino.

Esta formación se ha reconocido en el valle de Mala, al EN de Alloca, en la cabecera de la quebrada Mariatana; donde se estima que tiene más de 200m.

Cronológicamente la parte inferior de esta formación se le puede correlacionar con la formación Pariahuanca del sector andino.

### **Formación Chúlec**

Esta unidad fue descrita inicialmente por MCLAUGHLIN (1924), en la región central del país, como miembro inferior de las calizas Machay; posteriormente V. BENAVIDES (1956), la elevó a la categoría de “formación”.

En el área de estudio se ha reconocido esta formación en la quebrada Huanchurina, (sector NO de la Hoja de Matucana), la cual se extiende hasta cerca de la mina Venturosa y hacia el sur hasta las cabeceras de la quebrada Cancha; en el primer caso se ha mapeado junto con las calizas de las formaciones Pariahuanca y Pariatambo; en el segundo caso se ha mapeado toda la secuencia calcárea del Cretáceo en forma indiferenciada.

Litológicamente consiste en calizas grises con capas medianas que se intercalan con niveles de capas delgadas, de 5 a 30 cm., y con capas gruesas ocasionalmente se intercalan calizas margosas y margas color pardo grisáceo. En un horizonte se encontró amonites y lamelibranquios (*Ostrea* y *Liopistha*). El grosor se estima en 200 m.

Esta formación también se ha reconocido con una litología similar en afloramientos expuestos en el ángulo EN de la hoja de Huarochirí y en el ángulo SE de la hoja de Matucana, donde también se encontró horizontes fosilíferos con amonites. En esta localidad está bien expuesta la relación de concordancia de la formación Chúlec sobre Pariahuanca y debajo de Pariatambo.

**Edad y Correlación.-** Los fósiles encontrados en la formación Chúlec, dentro del área de trabajo, son comunes a los de otras localidades del centro del país; se asocia a amonites de la zona *Knemiceras raimondii*, de la parte basal del Albiano medio, correlacionable con la parte inferior de la formación Crisnejas (Andes del norte).

### **Formación Pariatambo**

Esta formación fue descrita inicialmente por MCLAUGHLIN (1924) como miembro superior de la formación Machay; V. BENAVIDES (1956), la elevó a la categoría de “formación”.

En el área de estudio se encuentran las localidades donde los autores anteriores han descrito a la Formación Chúlec. Litológicamente, consiste en calizas y margas bituminosas de color negruzco e intercalan calizas oscuras en capas delgadas con tendencia a desprenderse en forma de lajas; tiene horizontes con bastante Oxytropidoceras. El grosor de la formación se estima en 80m.

Sobreyace e infrayace concordantemente a las formaciones Chúlec y Jumasha, respectivamente contrastando por su color negruzco.

**Edad y Correlación.-** Se ha encontrado el amonite *Oxytropidoceras carbonarium* (GABB) que caracteriza la parte superior del Albiano medio. Esta unidad tiene amplia distribución en la región andina central y septentrional del país hacia la región del Marañón se le correlaciona con la parte superior de la formación Crisnejas.

### **Formación Jumasha**

Esta formación fue descrita por MCLAUGHLIN (1924) en los acantilados Jumasha de la laguna Punrun.

En el área de estudio, la formación Jumasha consiste en calizas grises y gris amarillentas, estratificadas en capas medianas y gruesas, donde se encontraron restos de fósiles mal conservados. Se le ha mapeado en el NO de la hoja de Matucana, en los núcleos anticlinales fallados del área de Sangrar-Túnel Trasandino-laguna Jupay y en los núcleos de sinclinales del área entre la mina Venturosa y laguna Acococha. Al sur de este último lugar, se expone en los flancos de la quebrada Pancha, hasta el río Rimac (sector de Tambo de viso), una potente secuencia de rocas calcáreas en capas delgadas, medianas y ocasionalmente gruesas, de color gris claro y oscuro, alternando subordinadamente con horizontes delgados de margas y lutitas gris amarillentas.

Esta unidad está plegada y fallada en sus límites occidental y oriental y se considera que gran parte de ella corresponde a la formación Jumasha con posibilidad de que haya parte de la formación Celendín; por esta razón en el mapa este afloramiento ha sido mapeado como calizas cretáceas indiferenciadas.

Otros afloramientos de calizas Jumasha ocurren en fajas alargadas al pie de fallas longitudinales NO-SE; ellos están presentes en el valle del río Rimac en el sector de Puente El

Infiernillo; también al oeste y NO de Yuracmayo, en el valle del Río Blanco.



En el sector SE de la hoja de Matucana y al NE de la hoja de Huarochirí, se le encuentra a la formación Jumasha en posición concordante sobre la formación Pariatambo; su grosor en este lugar puede llegar a los 300 m. Pequeños afloramientos calcáreos del área de Calahuaya y quebrada Mariatana del sector marginal oriental del batolito, son considerados como pertenecientes a la formación Jumasha.

**Edad y Correlación.**-En el área de estudio no se han encontrado fósiles que precisen su edad, pero por su posición concordante sobre la formación Pariatambo y debajo de Celendín se le asigna edad Albiano superior-Turoniano.

### **Formación Celendín**

V. BENAVIDES (1956), describió con este nombre, en la localidad de Celendín a una secuencia lutácea y calcárea del Cretáceo superior.

Esta formación ha sido reconocida en una franja entre la laguna Jupay e Iscumachay (límite norte de la hoja de Matucana).

Su litología consiste en calizas y margas de color gris, en parte amarillentas y negruzcas; la estratificación es en capas delgadas.

La formación Celendín marca el fin de la sedimentación marina del Mesozoico, la cual tuvo un amplio desarrollo a lo largo de la facies de cuenca, y plataforma que actualmente está ocupada por la Cordillera Occidental.

La formación Celendín descansa discordantemente sobre la formación Jumasha, pero en el afloramiento indicado anteriormente está en contacto fallado con las capas rojas Casapalca y con posición vertical e invertida. Estratigráficamente su tope infrayace discordantemente a dichas capas rojas Casapalca.

**Edad y Correlación.**- En el área de estudio no se tuvo oportunidad de encontrar fósiles, pero BENAVIDES (1956); WILSON (1967) y otros, encontraron en la región andino norte amonites típicos de edad Coniaciano-Santoniano. Se le correlaciona con la formación Vivian del oriente peruano.

### **Volcánico Quilmaná**

El autor asignó con este nombre a una unidad volcánica que aflora en la zona costanera y parte baja del Flanco Occidental Andino.

En el área de estudio, correspondiente a la zona marginal oriental del batolito costanero, se ha encontrado constituyendo afloramientos de rocas volcánicas consistentes en derrames y tobas

andesíticas y metavolcánicas consistentes en derrames y tobas andesíticas y metavolcánicas generalmente de color gris verdoso a pardo; presentan pseudoestratificación con buzamientos de alto ángulo.

Su relación con el piso y techo no es clara pues en unos casos están fallados y en otros, sus afloramientos están como remanentes en contacto con rocas del Batolito de la Costa o bien cubiertos discordantemente por los volcánicos del Terciario.

Los afloramientos reconocidos y que se les asigna a este grupo son:

- Area de Calahuaya en las cabeceras del valle de Chilca, con extensión hacia la quebrada Mariatana y en el valle de Mala, (entre Viscas y Coñe).
- Valle de Lurín entre Antioquía y Cruz de Laya.

**Edad y Correlación.-** Se le asigna la misma edad que a los volcánicos de la localidad original, es decir, Cretáceo superior y se le correlaciona lateralmente con las formaciones Jumasha y Celendín.

Regionalmente se le correlaciona a una parte del Grupo Casma del área de Lima y de la costa norte. Ambiente de Sedimentación del Cretáceo medio y superior.- Las características de las formaciones Pariahuanca, Chúlec, Pariatambo, Jumasha, Celendín y Quilmaná del sector occidental, sugieren un ambiente de sedimentación, correspondiente a la transgresión marina que se inició en el Albiano, por lo cual el ambiente deposicional comienza con un mar somero

correspondiente a la formación Pariahuanca, luego la formación Chúlec tuvo lugar en un ambiente nerítico a batial, y durante la sedimentación de Pariatambo la transgresión del Albiano alcanzó su mayor significación con deposición en un ambiente reductor. Luego a la formación Jumasha ocurre en un mar nerítico de relativa profundidad. Finalmente la formación Celendín tuvo lugar en un mar somero también de relativa profundidad. Hacia el lado occidental de la cuenca se desarrollaron contemporáneamente erupciones volcánicas submarinas que con relativa intermitencia se sucedieron durante el Cretáceo superior.

### **Volcánico Tantará**

Se ha reconocido con este nombre en el cuadrángulo de Huarochirí, entre la quebrada Mariatana y el puente entre Viscas-Alloca, (Foto N° 2), a una secuencia de rocas volcánicas consistentes en derrames andesíticos gris oscuros, flujos de brecha volcánica y lava fluvial violácea; se estima un grosor de 500 m. y yace discordantemente sobre sedimentos y volcánicos cretáceos. Su relación con la secuencia volcánica superior es en aparente concordancia.

Se le considera como la prolongación de los volcánicos Tantará, descritos por el aurote en la parte baja del Flanco Occidental Andino, en los cuadrángulos de Lunahuaná, Tantará, Tupe y Castrovirreyna. Su relación con el cuerpo intrusivo de Mariatana no ha sido bien observado, pero es probable que la parte basal del Volcánico Tantará sea afectada por esta roca intrusiva.

**Edad y Correlación.-** Precisar la edad de esta unidad volcánica, que aflora en la zona marginal del Batolito de la Costa es un problema. Probablemente se trata de la fase volcánica post-tectónica asociada a la fase tectónica peruana, en cuyo caso, es contemporánea con la sedimentación continental clástica correspondiente a las capas rojas Casapalca.

Sin embargo, también hay la posibilidad de que se trate de volcánicos correspondientes a la fase tectónica incaica. De acuerdo a los datos que se tienen a la fecha, se les relaciona a esta última fase, por lo que al Volcánico Tantará se le ubica en el Eoceno superior.

### **Grupo Rimac**

Con este nombre se ha cartografiado a un conjunto de unidades de rocas volcánicas y sedimentarias constituído por andesitas, flujos de brecha, andesitas tufáceas o tufos andesíticos, con ocasionales intercalaciones de areniscas tufáceas.

Aflora ampliamente en el sector occidental de la hoja de Matucana y Huarochirí, habiendo tendido un gran desarrollo entre los valles Santa Eulalia, Rímac y parte alta de Lurín.

Localmente se puede diferenciar varias unidades litológicas, pero debido a los cambios laterales se requiere de mayor tiempo para su seguimiento regional, en consecuencia se ha mapeado el conjunto; sin embargo, literalmente se puede describir de abajo hacia arriba, la siguiente secuencia :

**a) Serie Volcánico-Sedimentaria.-** Esta secuencia est constituída por lavas y brechas andesíticas de color gris azulado a verdoso, con bastante oxidación, por el contenido de pirita, tobas andesíticas y algunas intercalaciones de areniscas. En el valle de Lurín, sector de Ceuz de Laya, se presenta aparentemente estratificada, con un color violáceo por alteración, sobre los volcánicos de Quilmaná y aparentemente afectada por intrusivos dioríticos pertenecientes al Batolito Andino.

**b) Serie Sedimentaria-Tobácea.-** Se le encuentra en la parte media del Grupo Rímac y est constituída por unidades, predominantemente sedimentarias con contenido volcánico, así como por areniscas limolíticas, gris verdosa y tobas redepositadas de color gris violáceo.

Entre Cruz de Laya y Langa se encuentran, es esta serie, tobas riolíticas porfiroides

con estratificación masiva y subhorizontal.

**c) Serie Tobácea.-**Aquí se incluye unidades de tobas pardo grisáceas a blanquecinas de composición riolítica y dacítica. Esta unidad es muy característica en la secuencia del Grupo Rimac que aparece al este de Huarochirí.

**d) Serie Volcánico-sedimentaria.-**Esta serie constituye la parte superior del Grupo Rimac. En langa se muestra bien estratificada y en ella se observa limolitas gris verdosa, con coloraciones rojizas y anaranjadas; areniscas feldespáticas con cuarzo y matriz tobácea en estratificación delgada y sobre ellos una secuencia de volcánicos tobáceos porfiroides de color violáceo, con plagioclasas, ortosas y volcánicos oscuros igualmente porfiroides, bien alterados.

En general en el Grupo Rimac hay volcánicos y sedimentos pero con predominio de la facies tobácea y un alto porcentaje de minerales ferromagnesianos que por alteración dan, a las rocas, coloración rojizovioláceo. Se extiende regionalmente en la parte occidental de ambos cuadrángulos.

**Edad y Correlación .-**Sus equivalentes, hacia el este, son las formaciones Carlos Francisco y Bellavista- Río Blanco. Hacia el nor-este de la hoja de Matucana, la serie superior del Grupo Rimac es reemplazada por la secuencia denominada como Grupo Colqui, el cual descansa concordantemente sobre la serie inferior del indicado Grupo Rimac.

Todas estas unidades litoestratigráficas están enmarcadas entre dos discordancias: una inferior que las separa del Mesozoico y una superior que las separa de los volcánicos Millotingo. El Grupo Rimac es correlacionable con el Grupo Sacsaguero, del sector de Castrovirreyna-Huancavelica, de probable edad Eoceno-Oligoceno.

### **Grupo Colqui**

Con este nombre se designa a una gruesa secuencia de unidades volcánicas con derrames andesíticos gris porfiríticos que alternan, en menor proporción, con tufos finos redepositados, gris verdosos; tufos lapillíticos pardo blanquecinos; aglomerado volcánico y ocasionalmente con capas de calizas y arenisca tufácea gris verdosa y violácea.

Esta litología, que aflora en el área de la mina Colqui, está afectada por pliegues, fallas e intrusiones ígneas; se extiende hacia el SE, al área de Sheque, y más al sur hasta el valle del río Rimac, donde descansa condordante sobre el Grupo Rimac.

En el área de la mina Colqui del techo al piso (U. PETERSEN y N. DIAZ), han reconocido las siguientes unidades locales.

- Volcánico masivo de composición andesítica, color pardo rojizo, con 150m. aproximadamente de grosor.
- Volcánico de estratificación delgada de color abigarrado, con niveles calcáreos en la base; espesor aprox. 150 m.
- Volcánico masivo constituido por tufos, aglomerados y horizontes de andesita tufácea. Se estima un espesor de 400 m.
- Volcánico sedimentario tufáceo de color abigarrado, con tufo lapillítico blanquecino, areniscas, andesitas tufáceas en capas medianas y delgadas, ocasionalmente capas de caliza y limolita gris rojiza; aprox. 200 m. de grosor.
- Volcánico masivo con unos 100 m. de espesor.

En el área de Sheque y río Suncho se reconoce que el grupo Colqui tiene unidades con ciertas diferencias; de la base al techo se reconoce :

- Volcánicos andesíticos tufáceos, gris pardos.
- Calizas silicificadas.
- Limolitas pizarrosas rojizas e intercalaciones con horizontes de volcánicos andesíticos.
- Areniscas tufáceas gris verdosas.
- Derrames andesíticos
- Areniscas tufáceas y tufos verde claro
- Derrames andesíticos cerca al núcleo del sinclinal de Carhuaz, además ocasionalmente tufos andesíticos pardo rojizos. Esta secuencia forma parte del flanco occidental del sinclinal de Sheque.

**Edad y Correlación.-** El Grupo Colqui es correlacionable con las formaciones Bellavista y Río Blanco que afloran en los sinclinales de Río Blanco y de la mina Santa Fé, más extensamente se correlaciona con las unidades sedimentario-tobácea del Grupo Sacsacero; en consecuencia estas formaciones son equivalentes, en edad, a la parte superior del citado Grupo, que pertenece al Eoceno-Oligoceno.

### **Volcánico Millotingo**

Se designa así a una secuencia de rocas volcánicas, mayormente lávicas, cuyos centros de emisión han aportado una sucesión de derrames andesíticos y riódacíticos, ocasionalmente traquiandesíticos, en forma de diques y capas.

Se desarrolla ampliamente en la parte alta, entre Matucana y la mina Millotingo, de donde toma su nombre; allí la secuencia es volcánico-sedimentaria y en ella se observa lo siguiente:

- Arenisca constituida por material volcánico, de estructura brechoide y coloraciones rojizas; y andesitas verde violáceas, que se intercalan con horizontes conglomerádicos de color violáceo que intemperizan a color blanquecino. Se estima un grosor de 1,000 m.

**Edad y Correlación.** - Aunque en la parte noreste de la hoja de Matucana yace en aparente concordancia sobre los grupos Colqui o Rimac, localmente hay una ligera discordancia que marca la separación regional entre el Terciario inferior y el Terciario medio. Siendo correlacionable con la formación Castrovirreyna del área de Huancavelica; al Volcánico Millotingo se le ubica en el Oligoceno superior-Mioceno inferior.

### **Formación Huarochirí**

Con este nombre se designa a una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas consistentes en tobas riolíticas y riódacíticas, sucedidas por una laternancia de areniscas y limolitas tobáceas, aglomerados y ocasionalmente horizontes de tobas pardo blanquecinas, andesitas tobáceas y bancos de traquiandesita. Su grosor se estima en 600 m.

Las tobas riolíticas o riódacíticas están relacionadas a centros volcánicos dómicos que se les reconoce por la posición anormal que presentan con respecto a bancos pseudoestratificados que alternan con unidades de areniscas y limolitas color gris verdoso y rojizo. Hacia la base se observa que las tobas pasan a composiciones andesíticas de color gris violáceo. Esta formación presenta varios bancos de tobas pardo blanquecinas alternando con la secuencia sedimentario-volcánica. Las mejores exposiciones están entre Langa alturas de Huarochirí -Los Olleros- San Lázaro (Foto N° 4), (NO de la hoja de Huarochirí); también al norte de Cruz de Laya y área de Tupicocha otros afloramientos predominantemente tobáceo-riolíticos están al SE de Ayaviri, en el sector SE de la hoja de Huarochirí.

**Edad y Correlación.**- Yace aparentemente en discordancia sobre los volcánicos Millotingo, pero en otros afloramientos está sobre la serie volcánica del Grupo Rímac.

Es importante señalar que la serie tobácea-riolítica, que aflora entre San Pedro de los Olleros-Calahuaya-Mariatana, yace en discordancia erosional sobre rocas intrusivas del Batolito Costanero. En estas tobas NOBLE (1957), por estudios radiométricos, ha determinado una edad de 26.1 MA., lo cual indica una edad del comienzo del Mioceno.

Se correlaciona con los volcánicos Caudalosa del sector de Huancavelica, con la posibilidad de que las unidades superiores correspondan a la serie de sedimentaria tobácea de la formación Auquivilca del Mioceno superior SALAZAR (inérito).

### 2.2.3. SECTOR ORIENTAL

Este sector comprende la Divisoria Continental y la zona alta de la vertiente oriental de la Cordillera Occidental y corresponde a la parte oriental y nororiental de la hoja de Matucana. Las unidades geológicas allí observadas se describen a continuación.

#### **Grupo Excelsior**

En el área de estudio, el Grupo Excelsior, está representado por las rocas más antiguas; se encuentra formando el núcleo del domo de Yauli. Estructuralmente presenta anticlinales de orientación NO-SE, dentro de una franja de afloramientos que comprende el área de Yauli-Carahuacra San Cristobal, y que consiste en lutitas pizarrosas, filitas negruzcas y areniscas esquistosas finamente estratificadas. Esta secuencia presenta los efectos de un metamorfismo regional, conteniendo numerosos lentes de cuarzo, los cuales son de mayor espesor en los núcleos de los anticlinales. Al sureste de San Cristobal, las filitas se alternan con horizontes de mármol. El grosor de la secuencia es desconocido.

**Edad y Correlación .-** En base a la fauna encontrada por HARRISON (1943), la serie metamórfica del Grupo Excelsior, ha sido determinada como de edad devoniana o más antigua.

Las rocas del Grupo Excelsior presentan los efectos de intenso plegamiento y fracturamiento, debido a la acción de la orogénesis Hercínica, además toda la secuencia posterior reposa en disconformidad.

Corresponde a la serie superior del Paleozoico inferior mapeada a lo largo de la Cordillera Oriental como Grupo Excelsior y en el sur del país como Grupo Cabanillas.

#### **Grupo Mitu**

Este grupo fue estudiado por MC LAUGHLIN (1924), en la localidad de Mitu (Goyllarisquizga), departamento de Pasco.

En el área de estudio el Grupo Mitu está presente en los alrededores de Morococha y en el domo de Yauli- San Cristobal. Está representado por un miembro de rocas clásticas rojizas de facies continental, tales como areniscas, conglomerados y brecha volcánica y por un miembro superior de rocas volcánicas denominado “Volcánico de Catalina”.

La serie clástica yace discordantemente sobre las rocas del Grupo Excelsior y está cubierta por los volcánicos Catalina, pero al SE de Morococha hay una unidad arenosa y conglomerádica, de color rojizo, de unos 200 m. de espesor, que yace sobre dichos volcánicos.

Los volcánicos Catalina afloran en el núcleo del anticlinal de Morococha, pero en forma más amplia se exponen en los alrededores del domo de Yauli-San Cristobal. Yacen generalmente sobre la serie clástica rojiza del miembro inferior, pero localmente reposan sobre las filitas Excelsior. Consisten en derrames lávicos de dacita y andesita de color gris a verde, los que por intemperismo tomar un color marrón; hacia arriba existen brechas y aglomerados volcánicos.

El grosor del Grupo Mitu es muy variable debido a la distribución irregular de la serie clástica y volcánica. Así en Morococha MC LAUGHLIN estimó 760m. de espesor para los volcánicos Catalina. Al oeste de San Cristobal los volcánicos Catalina tienen 800 m.

**Edad y Correlación** .-El Grupo Mitu fue ubicado por MC LAUGHLIN dentro del Carbonífero superior, pero por estudios posteriores se le considera en el Permiano medio. Corresponde a la serie molásica post-Tectónica hercínica.

### **Grupo Pucará**

El Grupo Pucará yace discordantemente sobre la serie clásica del Grupo Mitu o sobre los volcánicos Catalina. En la región central del país se designa con este nombre genérico a un conjunto de rocas calcáreas del Triásico superior - Jurásico inferior.

MC LAUGHLIN (1924), sugirió como nombre al término “Calizas Pucará”. Más tarde JENKS (1951), propuso el nombre de Grupo Pucará para estas mismas calizas.

El Grupo Pucará está expuesto en los alrededores de Morococha y Yauli, y más al sur constituye los núcleos de los anticlinales de Churria-Ruricocha y de Sultucocha, teniendo encima la serie marina cretácica que constituye el Grupo Goyllarisquizga.

Otros afloramientos que destacan se encuentran en el sector EN de la hoja de Matucana, al SE y norte de Pachachaca, por donde pasa la Carretera Central extendiéndose ampliamente al cuadrángulo de La Oroya.



El Grupo Pucará consiste en una secuencia monótona de calizas gris claras, blanquecinas, en capas delgadas y medianas alternan ocasionalmente, con unidades de margas interestratificadas con areniscas calcáreas, lutitas gris violáceas y rojizas y niveles de calizas dolomíticas.

En el área de Morococha se intercalan horizontes volcánicos como: el basalto Montero y la Traquita Sacsacancha; allí generalmente la caliza contiene mineralización en vetas, mantos y cuerpos irregulares.

Este grupo infrayace concordantemente a la serie arenosa del Grupo Goyllarisquizga. Al sureste de Pachachaca y al este del anticlinal de Chumpe las calizas que yacen sobre el Grupo Mitu se intercalan con horizontes de derrames basálticos. En cambio, las calizas del lado oeste de este mismo anticlinal, no tienen volcánicos, pero sí un horizonte delgado con nódulos silíceos, que se intercalan con margas, lutitas y capas tufáceas; esta serie calcárea ha sido considerada como equivalente a la formación Aramachay del cuadrángulo de Huancayo.

La potencia del Grupo Pucará es variable; en el área de Morococha, TERRONES (1949), ha calculado un espesor de 431 m; en los alrededores del domo de Yauli, su espesor se estima en 300m; en cambio más hacia el este (fuera del área) en los alrededores de La Oroya HARRISON (1943), ha determinado 1,400 m.

**Edad y Correlación.-** En los pocos afloramientos reconocidos se localizaron fósiles (braquiópodos y ostreas) pero mal conservados; sin embargo, por su semejanza litológica y posición estratigráfica similar a la secuencia calcárea de la región central, se le asigna edad Triásico superior-Liásico. Se le correlaciona con las formaciones Utcubamba, Chilingote y Suta del norte del país.

### **Grupo Goyllarisquizga**

Originalmente, este grupo fue llamado “areniscas Goyllarisquizga Jatunhuasi” (MCLAUGHLIN 1924), luego JENKS (1951), le dió el nombre de formación Goyllarisquizga;

posteriormente WILSON (1963) la elevó a la categoría de “Grupo “involucrado toda la serie clástica y calcárea que está debajo de la caliza albiana. En consecuencia, la secuencia de areniscas de color pardo amarillento con algunas intercalaciones de cuarcitas y lutitas grises y rojizas que afloran en el área de estudio, son equivalente a las unidades de la cuenca del Cretáceo, representadas por las formaciones Oyón, Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat. La secuencia del Grupo Goyllarisquizga está expuesta al norte, noreste y sureste de Morococha (Foto N° 5); en esta área destacan derrames o diques de diabasa y basalto; algunos de los cuales han sido mapeados. El

espesor del Grupo Goyllarisquizga ha sido calculado por otros autores en aproximadamente 400 m.

Otros afloramientos de la serie clásica del Grupo Goyllarisquizga se exponen en los flancos de los pliegues del lado oeste del anticlinal de Chumpe, hasta cerca de la Divisoria Continental, consistiendo en areniscas cuarcíticas blanquecinas con intercalación de lutitas y limolitas rojizas en la base y con areniscas calcáreas y lutitas grises en la parte superior, su grosor se estima en 250m. Yacen concordantemente sobre el Grupo Pucará y debajo de las calizas de la formación Chúlec.

Edad y Correlación.- Esta unidad no es fosilífera pero por infrayacer al Albiano se considera como parte del intervalo Neocomiano-Aptiano, correspondiendo, en la parte occidental, a las formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat.

### **Formaciones Chúlec, Pariatambo y Jumasha**

Estas formaciones tienen características litológicas, faunísticas y posición estratigráfica similares a las que se presentan en la zona occidental de la cuenca del Cretáceo; sin embargo su grosor es más reducido y con ligeras variaciones litológicas. Estas secuencias calcáreas cretáceas están expuestas formando parte de las estructuras del norte de Morococha del suroeste del anticlinal de Morococha; del oeste del anticlinal de Chumpe con extensión de afloramientos hasta la Divisoria Continental de Ticlio y NO de esta localidad, así como de las estructuras de los nevados de Huallacancha Colquepucro donde las formaciones no han sido separadas; en cambio en el resto de afloramientos se han cartografiado separadamente las formaciones Chúlec Pariatambo y Jumasha.

Una sección, al suroeste de la laguna Huayllacocha, presenta en la base unos 200 m. de caliza gris a marrón claro en capas medianas, con algunas intercalaciones de caliza margosa y lutita gris parda (Formación Chúlec). Yace en discordancia sobre las areniscas del Grupo goyllarisquizga.

Hacia arriba sigue, concordantemente 50 m. de calizas y margas negras bituminosas, en capas delgadas, con Oxitropidoceras (Formación Pariatambo). Esta unidad es muy representativa, lo que permite diferenciar a las calizas Chúlec de las calizas Jumasha que se suceden encima y en concordancia; esta última formación consiste en capas medianas a gruesas e intercalan ocasionalmente capas de calizas margosas, lutitas y calizas dolomíticas; en esta formación no se

encontró fósiles, en cambio en las calizas margosas y bituminosas de Pariatambo se ha encontrado Oxitropidoceras en varios afloramientos.

Por estas consideraciones se le asigna a las formaciones Chúlec, Pariatambo y Jumasha de la zona oriental, una edad que va entre el Albiano medio y el Cenomaniano.

En el tope, las calizas Jumasha infrayacen discordantemente a las capas rojas de la Formación Casapalca.

La secuencia calcárea descrita anteriormente corresponde a las unidades formacionales que han sido mapeadas en la región andina, central y norte asimismo se correlaciona con las formaciones Chúlec, Pariatambo, Pulluicane, Quillquiñán y Otusco de la región norte (Cajamarca y Amazonas).

### **Formación Casapalca**

Una gruesa secuencia de rocas clásticas, rojizas, se exponen en una franja que se observa a lo largo de la parte alta de la Cordillera Occidental. Así en las cabeceras del valle del río Rimac (Mina Casapalca) se encuentra la localidad típica donde MC LAUGHLIN (1924), le asignó el nombre de Formación Casapalca. Dicha unidad yace en discordancia erosional sobre las calizas de la Formación Jumasha.

En el sector norte de la hoja de Matucana, descansa sobre las lutitas, margas y calizas de la Formación Celendín (Iscumachay-Sangrar), siendo generalmente los contactos anormales por fallamientos.

En el tope, está cubierta, discordantemente por la serie volcánica-piroclástica de la Formación Carlos Francisco.

A la formación Casapalca, de ambiente continental, localmente se le ha dividido en un miembro inferior denominado “Casapalca” y un miembro superior llamado “El Carmen”, los mismos que, aunque no están diferenciados en el mapa, en el presente informe se les describe separadamente.

**Miembro inferior “Casapalca”.-** Consiste en intercalaciones de areniscas, limolitas y lutitas rojizas, que ocasionalmente, alternan con areniscas calcáreas y areniscas guijarrosas marrón claro; la estratificación es en capas delgadas y medianas, con algunos horizontes que presentan estratificación cruzada. Dentro de la secuencia cruzada. Dentro de la secuencia destacan, por lo menos, tres niveles de calizas blanquecinas en capas gruesas y uno o dos paquetes conglomerados con cantos de cuarcita y caliza en matriz limo-arcillosa. Esta secuencia, que se reconoce en la

sección al suroeste de Pomacocha, se encuentra plegada y fallada lo que confunde la relación de unidades. En la quebrada de Hyricancha hay una unidad de unos 30m. de conglomerados cuarcítico y calcáreo, en la parte media de la secuencia, constituida por limolitas y areniscas rojizas. En el área de Casapalca también aflora una potente secuencia de capas rojas con unidades de conglomerado y caliza pero que por plegamiento y fallamiento están aparentemente en posición anormal. Para este miembro

otros autores han estimado un espesor de 1,300 m. **Miembro superior “El Carmen”.**- Consiste en bancos de 2 a 5m. de conglomerado cuarcítico, algo calcáreo de matiz rosácea con cantos redondeados de 1 a 10 cm. de diámetro; en menor proporción existen gravas pequeñas y algunos bloques grandes dentro de una matriz areno-limosa; ocasionalmente se intercalan capas de areniscas y limolita rojiza. Entre los elementos del conglomerado raramente se encuentran rocas ígneas.

Este miembro se encuentra expuesto mayormente en los núcleos de los sinclinales y anticlinales entre el área de Casapalca-Buculic-Cotay y por el sureste hasta la laguna Pacushmoc. La mejor exposición se encuentra en la sección entre Pomacocha y Cotay donde presenta contacto transicional, sobre las capas rojas, estimándose un espesor que varía entre 100 a 250 m.

Otro afloramiento de la serie clástica de capas rojas se expone en el sinclinal de Socopecan, al norte de Morococha; allí consiste de una litología similar al miembro inferior de la formación Casapalca, su espesor no pasa los 900 m., y yace sobre las calizas de la formación Jumasha.

**Edad y Correlación.**- En el área de estudio no se han encontrado charofitas que ayuden a precisar la edad de la formación Casapalca, pero por sus relaciones estratigráficas y tectónicas se le limita, en la región central del país, entre el Cretáceo superior y el Eoceno medio.

#### **Formación Carlos Francisco**

En la zona alta de la Cordillera Occidental aflora una gruesa secuencia de rocas volcánico-sedimentaria que yace, en aparente concordancia, sobre la formación Casapalca. Esta formación fue designada por McKINTRY y STILL, geólogo de la ex Cerro de Pasco Copper Corp., en el área de Casapalca, donde fue dividida en tres miembros, que pueden ser mapeados a una escala adecuada y con el tiempo necesario para individualizarlos regionalmente.

**Miembro Tablachaca.**- Este miembro consiste en una secuencia de conglomerado con elementos volcánicos de 5 a 10 cm. de diámetro y en menor proporción gravas y cantos hasta de 50 cm. con matriz areno-limosa se intercalan areniscas, limolitas rojizas y calizas arenosas. Hacia

el tope pasa a intercalaciones de tobas, brechas tobáceas, aglomerados, limolitas rojizas y ocasionales rocas porfiríticas de composición andesítica. Es importante señalar que el conglomerado basal del miembro Tablachaca yace en concordancia aparente sobre el miembro “El Carmen”, de la formación Casapalca con el que, en algunos casos, es fácil de confundir. La mejor exposición de este conglomerado está en el sinclinal de Joise y Yaulicopa y en el valle del Rimac, antes del cruce con la carretera a la mina Casapalca.

La litología del miembro Tablachaca no es uniforme, pues en el afloramiento del nevado Uco, al noroeste de Ticlio, yace sobre areniscas y limolitas del miembro inferior de la formación Casapalca y consiste en areniscas y limolitas tobáceas de color gris violáceo a gris verdoso. El grosor del miembro Tablachaca es variable; así en los afloramientos de la franja de la mina Casapalca hacia el cerro Uco y hacia la mina Santa Fe tiene aproximadamente 700 m. y hacia el suroeste, es decir, en el sinclinal río Blanco-Bellavista, su espesor alcanza los 400 m.

**Miembro Carlos Francisco.-** En las mismas localidades indicadas anteriormente destaca morfológicamente un conjunto de derrames andesíticos porfiroideos y afaníticos de color gris y por intemperismo verdoso y violáceo; intercalan ocasionalmente flujos de brecha volcánica y pórfidos masivos que dan el aspecto local de cuerpos hipabisales. Esta serie volcánica tiene un espesor estimado de 400 a 1,000 m. y yace concordantemente sobre el miembro Tablachaca.

**Miembro Yauliyacu.-** Este miembro se caracteriza por tobas rojizas con algunas intercalaciones de tobas lapillíticas gris verdosa, y marrones; ocasionalmente se presentan capas de andesitas, limolitas y areniscas tobáceas.

El miembro Yauliyacu tiene un grosor estimado que varía entre 400 y 900m. Yace concordantemente sobre los volcánicos Carlos Francisco; se observa que el flanco occidental del sinclinal de Río Blanco su grosor es menor, comparando con el flanco oriental.

### **Formaciones Bellavista y Río Blanco**

Ambas formaciones han sido mapeadas como una sola unidad litológica por presentar condiciones rocosas y cambio de facies similares tanto en sentido O-E como NO-SE.

#### **Formación Bellavista**

Se denomina Formación Bellavista a una serie sedimentaria que se expone en la localidad del mismo nombre. Consiste en calizas margosas, pardo amarillentas con intercalaciones de calizas negras silicificadas, tobas finas andesitas tobáceas, lutitas y limolitas gris verdosas a pardo rojizas. Hacia el suroeste del sinclinal de Río Blanco la facies consiste de una secuencia de 200 m. de

volcánicos con capas subordinadas de caliza, en el noreste del sinclinal indicado alcanza un grosor de 300 m. Esta litología predominantemente sedimentaria yace concordante sobre el miembro Yauliyacu, de la Formación Carlos Francisco; pasa en forma gradacional a la Formación Río Blanco.

### **Formación Río Blanco**

En ambos flancos del sinclinal de Río Blanco aflora una potente secuencia de tobas redepositadas, lapillíticas y areniscas tobáceas de color abigarrados, que se intercalan con aglomerados finos, brechas tobáceas y ocasionalmente con horizontes de tobas andesíticas y dacíticas así como con capas de calizas, generalmente con estratificación delgada. En el valle del río Rimac se estima un espesor de más de 600 m.

Ambas formaciones, Bellavista y Río Blanco se extienden hacia el NO y SE del valle del Rimac, pero su litología monótona y cambiante lateralmente, hacen muy problemático el mapeo.

**Edad y Correlación.-** La edad de las formaciones Carlos Francisco, Bellavista y Río Blanco, es difícil de precisar, ya que carecen de fósiles; pero cabe resaltar que esta potente secuencia volcánico sedimentaria, de la parte alta de la Cordillera Occidental, definitivamente en post-Capas Rojas Casapalca y por lo tanto su edad más probable es defines del Eoceno al Oligoceno; en consecuencia las formaciones arriba indicadas, se correlacionan con el Grupo Sacsaquero que aflora extensamente en la parte alta de la Cordillera Occidental y con los Grupos Rimac y Colqui de la facies occidental.

El ambiente de sedimentación guarda relación con un complejo de centros volcánicos que aportaban en forma intermitente, flujos de lava y material volcánico explosivo que caía o era transportado hacia las cuencas continentales.

### **Volcánico Pacococha**

Se designa con este nombre a un conjunto de derrames volcánicos andesíticos y basálticos con algunas intercalaciones de flujos de brecha volcánica y andesita tobáceas; esta litología está generalmente relacionada a centros volcánicos, debido a la tendencia divergente de los derrames o bien a su posición anormal con respecto al resto de la secuencia de rocas volcánicas. Los afloramientos que se han mapeado están al oeste de Pacococha, de donde toma el nombre, y en la línea de cumbres de la Divisoria Continental, al este de Colqui y de la mina Caridad.

**Edad y Correlación.-** No se puede precisar su edad, pero por constituir el tope de la secuencia volcánica terciaria y estar intruída por algunos cuerpos hipabisales jóvenes, que la han mineralizado, es probable que su edad pueda estar entre el Mio-Plioceno.

### **Depósitos Cuaternarios**

En la parte alta de la Cordillera Occidental, así como en el Flanco Occidental Andino del área de estudio se han mapeado los siguientes depósitos cuaternarios:

**a) Depósitos Glaciares.-** Comprende a los depósitos morrénicos antiguos a recientes que se encuentran en las cabeceras de los valles glaciares o bien cubriendo el fondo o márgenes de los mismos hasta una utilidad de 3,800 m.s.n.m.

**b) Depósitos Fluvioglaciares.-** Corresponde al material acarreado por los ríos de ambas vertientes de la zona andina en estudio; esto guarda relación con el proceso erosivo activado por el sensible levantamiento andino y las etapas de glaciación. Como consecuencia se han formado terrazas de material aluvional en las márgenes de los ríos, las más recientes junto al lecho; en algunos casos se han producido inundaciones que han permitido la formación de depósitos fangosos (bofedales).

**c) Depósitos Aluviales.-** Estos depósitos formados por gravas y arenas con cantos rodados se encuentran en los cursos medio e inferior de los ríos que bajan hacia la costa. Se encuentra formando terrazas aluvionales en las márgenes de los lechos.

**d) Depósitos Coluviales y de Deslizamiento.-** Los primeros son los depósitos que se encuentran al pie de las escarpas de las laderas de los cerros como material de escombros constituídos por gravas y bloques sub-angulosos con matriz areniscosa y limosa.

Los depósitos de deslizamiento corresponden a pequeños fenómenos geodinámicos reconocidos en las laderas de algunos valles.

## CAPITULO 3: PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

### 3.1 VETILLAS DE LA MINA YAULIYACO

#### 3.2 GENERALIDADES

Entre los tipos de discontinuidades, tales como fracturas y fallas, también se ubican las vetillas. Éstas corresponden a discontinuidades geológicas rellenas y selladas por minerales producto de la acción de fluidos hidrotermales los cuales además, alteran la roca caja generando halos en ella.

Las vetillas presentes en el yacimiento han sido ampliamente estudiadas, dado que contienen más del 30% de la mineralización de Cu del yacimiento (Brzovic y Benado, 2003) e influyen en la estabilidad del macizo rocoso. Según se ha observado en estudios de fragmentación del macizo rocoso, las vetillas encontradas en las frentes de trabajo son definidas en más de un 60% por vetillas.

Yauliyacu presenta un denso enrejado polidireccional (stockwork) de vetillas selladas con rellenos competentes, impermeables y soldados a la roca (como el que se muestra en la **Figura 3.1**, en comparación con vetillas encontradas en minas subterráneas, que pueden presentar rellenos de baja cohesión. La mineralogía de la vetilla puede consistir en un mineral único o en grupos de minerales con proporciones variables, entre los que se encuentra anhidrita, bornita, calcopirita, carbonato, cuarzo, molibdenita, sericita, etc.

Según su ambiente de formación, cada vetilla adquiere características que permite distinguirlas. Así, por ejemplo, cuando la roca de caja se encuentra a altas temperaturas y por tanto tiene un comportamiento dúctil, como sucede en la etapa de alteración y mineralización tardimagmática, las vetillas tendrán bordes sinuosos e irregulares.

Finalmente, estas discontinuidades han sido clasificadas según sus características mineralógicas, halo y su origen genético, lo que permite clarificar la evolución del yacimiento y el ambiente de origen de las vetillas. En la presente sección se exponen los tipos de vetillas presentes en la Mina Yauliyacu según la clasificación propuesta por (Brzovic y Benado, 2003).





**Figura 3.1.** Stockwork compuesto por vetillas tipo TM de cuarzo con y sin halo de alteración. Como escala se tiene que la separación entre pernos es de 1 m.

Los elementos que caracterizan a la vetilla son su traza, relleno, sutura, interfase y halo (ver Figura 3.2). Éstos se definen a continuación:

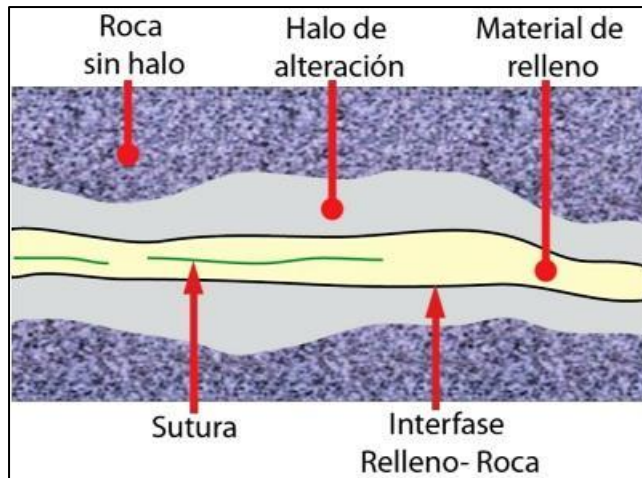
**Material de relleno:** conjunto de minerales que sellan la estructura. Éste define el espesor y la resistencia relativa de la vetilla. El espesor puede variar de menos de 1 mm a varios centímetros (Karzulovic, 2001).

**Sutura:** parte del relleno, generalmente de minerales más blandos que el resto de la vetilla. Corresponde a una heterogeneidad orientada dentro de la vetilla y no todas las vetillas la poseen.

**Interfase:** corresponde a la zona de contacto entre el relleno y la roca caja, ya sea fresca o alterada.

**Halo de alteración:** zona de la roca caja próxima al relleno, la cual ha sido alterada debido a cambios químicos durante de la acción de los fluidos hidrotermales que generaron a la vetilla. Su potencia puede variar a lo largo de la vetilla. Según su geometría pueden ser simples y dobles o complejos.

**Traza de la vetilla:** superficie imaginaria que pasa por el centro de la vetilla, la cual puede ser recta o sinuosa.



**Figura 3.2.** Esquema de una vetilla y los respectivos elementos que la caracterizan.

### 3.3 CLASIFICACIÓN DE VETILLAS

Las vetillas del yacimiento son agrupadas de acuerdo a su espesor o potencia, a su extensión y a su composición, alteración y relaciones de contacto entre ellas. Estos parámetros permiten realizar distintas clasificaciones, las cuales se exponen a continuación:

#### 3.3.1 Según espesor de la vetilla

La clasificación de vetillas según el espesor es desarrollada por la Superintendencia de Geología de la Mina Yauliyacu y expuesto en Estándares y Metodología de Trabajo para Geología de Minas:

**Vetas:** estructuras rectilíneas de longitud mayor 4,5 cm (largo de la preparación microscópica), y espesor superior a los 3 mm.

**Vetillas:** estructuras lineales, de espesor comprendido entre 1 a 3 mm, y longitud igual o mayor a los 2,5 cm, con relleno continuo en toda su longitud.

**Microvetillas:** longitud variable y ancho inferior a 1 mm, con trazado generalmente rectilíneo y relleno discontinuo. Sólo visibles en rocas de grano muy fino y aspecto afanítico.

#### 3.3.2 Según traza de la vetilla

Las vetillas del yacimiento también pueden ser agrupadas según la extensión de su traza. Esta clasificación, extraída de (Brzovic 2001), contiene las 3 clases siguientes:

- **Mayores:** aquellas que se extienden por al menos 5 m de largo (el ancho de 2 labores).
- **Intermedias:** son aquellas mayores a 2,5 m (el ancho aproximado de una labor).
- **Menores:** aquellas que no alcanzan a cruzar la labor.

### 3.3.3 Clasificación genética

Según los rasgos que caracterizan la mineralización de las vetillas, tales como las relaciones de contacto entre ellas, su mineralogía metálica y no metálica y los halos de alteración, (Brzovic y Benado, 2003) realizan la clasificación genética, con el objetivo de caracterizar el macizo rocoso geotécnicamente.

#### a. Etapa Tardimagmática (TM)

Las estructuras de esta etapa, relacionada a la consolidación del intrusivo, se encuentran en las zonas de alteración potásica. Su formación se habría producido en un ambiente semidúctil, lo que se manifiesta en la forma sinuosa de la mayoría de las vetillas. La presencia de cuarzo, biotita, feldespato potásico y anhidrita en las vetillas y en sus halos de alteración, se asocia a la alteración potásica. Los feldespatos y minerales máficos de la roca caja sufren pertitización y biotización, respectivamente. Entre la mineralogía metálica destaca la presencia de calcopirita, bornita, pirita y molibdenita.

Las vetillas de categoría TM se dividen en 8 subtipos (ver ejemplos de cada uno en la Figura 3.3 que pueden ser sin halo o con halo silíceo o biotítico, generalmente simétrico, con un espesor variable, con mineralización metálica en sutura o disseminada. Los subtipos son los siguientes:

**V1:** vetilla de magnetita, con halo. Bordes nítidos de magnetita de color oscuro. Puede tener también cuarzo, biotita en cantidades bajas, trazas de anhidrita, calcopirita y clorita. El halo es difuso.

**V2:** vetillas de cuarzo biotita, sin halo. Puede presentar anhidrita y clorita minoritaria, mineralización disseminada de sulfuros como la calcopirita, pirita y bornita y molibdenita subordinada.

**V3:** vetillas de cuarzo biotita, con halo. Presentan también anhidrita, calcopirita y clorita minoritaria. Puede presentar trazas de bornita y molibdenita. La biotita se puede presentar como una sutura junto a sulfuros. El halo es generalmente silíceo y difuso, a veces biotítico y puede tener trazas de sulfuros diseminados. Si es silíceo, tiene color claro. Si es biotítico, se ve difuso debido al contraste de color con la roca caja.

**V4:** vetillas de anhidrita, con halo, biotita y sulfuros diseminados. El halo es silíceo-biotítico donde la biotita se encuentra diseminada en el halo silíceo. La interfaz vetilla-halo es nítida y la interfaz halo-roca es difusa.

**V5:** vetillas de cuarzo mayoritario, sin halo. Minerales metálicos diseminados (calcopirita, pirita, bornita, molibdenita).

**V6:** vetillas de anhidrita mayoritaria, sin halo. Predomina la anhidrita por sobre los minerales metálicos (calcopirita, bornita y molibdenita) y el cuarzo.

**V7:** vetillas de sulfuros mayoritarios, sin halo. Los sulfuros se presentan en cantidades mayoritarias (calcopirita, bornita, molibdenita). Principalmente, calcopirita masiva. Pueden presentar una traza discontinua, si son vetillas delgadas (0,1- 0,3 mm), ya que los sulfuros pueden alternar con los no metálicos, principalmente biotita. Generalmente de bordes nítidos.

**V8:** vetillas de turmalina. Presencia de anhidrita, cuarzo y sulfuros subordinados. Sus bordes son nítidos y puede o no presentar halo.

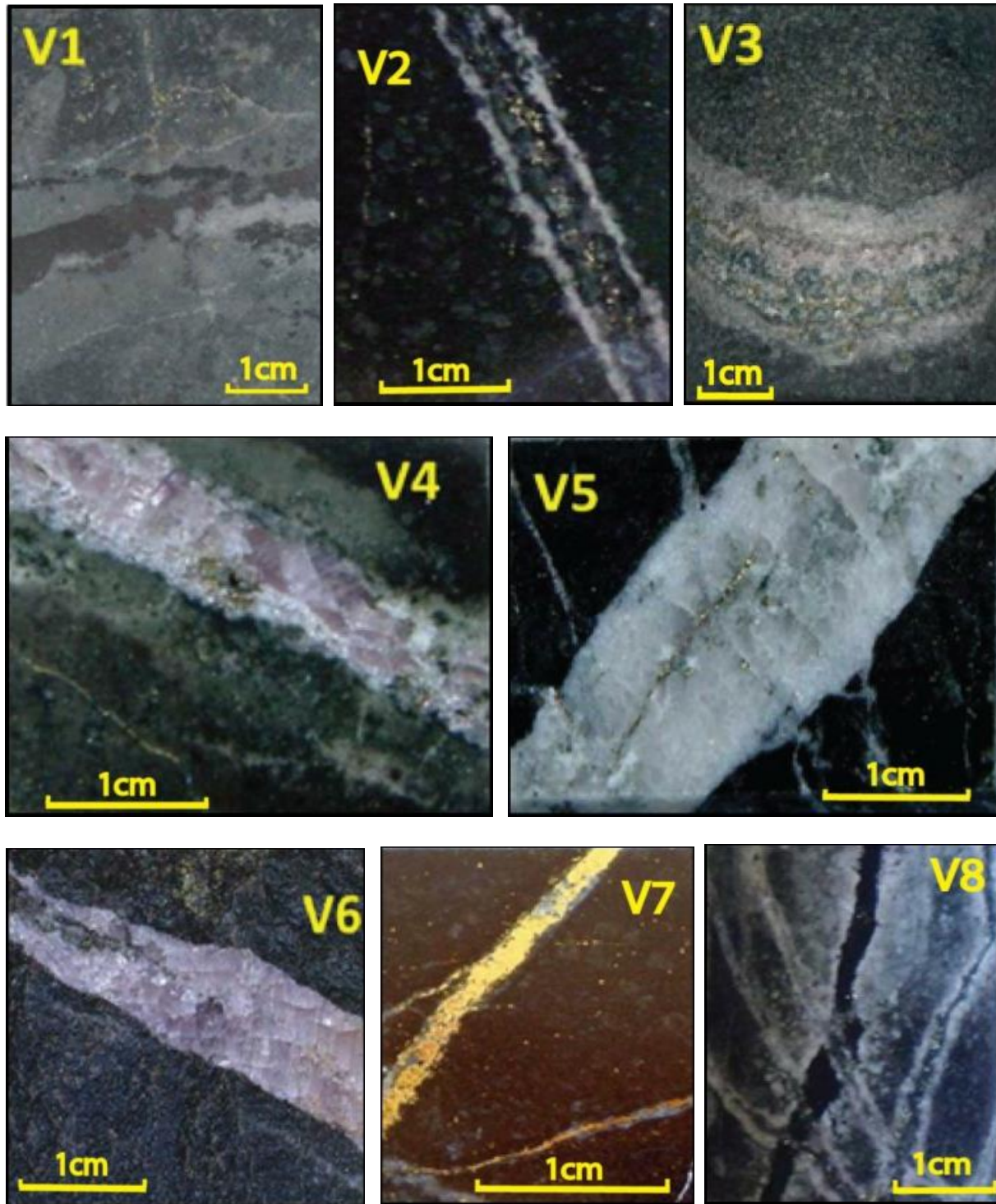


Figura 3.3. Ejemplos de vetillas típicas del tipo tardimagmática (TM).

## **b. Etapa Hidrotermal Principal (HP)**

En esta etapa la acción de fluidos tardimagmáticos y aguas meteóricas producen una alteración fílica a través de vetillas de sulfuros y de sus halos de alteración de diferentes espesores, los cuales agregan cuarzo, sericita y clorita a la roca caja. Las vetillas tienen bordes continuos y rectos, pues se forman en condiciones de roca frágil. En ellas predominan minerales metálicos como calcopirita, pirita y molibdenita, y pueden presentar cuarzo, sericita, clorita y anhidrita. Sus halos pueden ser simples o complejos, con o sin sulfuros diseminados, como se muestra en la Figura 3.4.

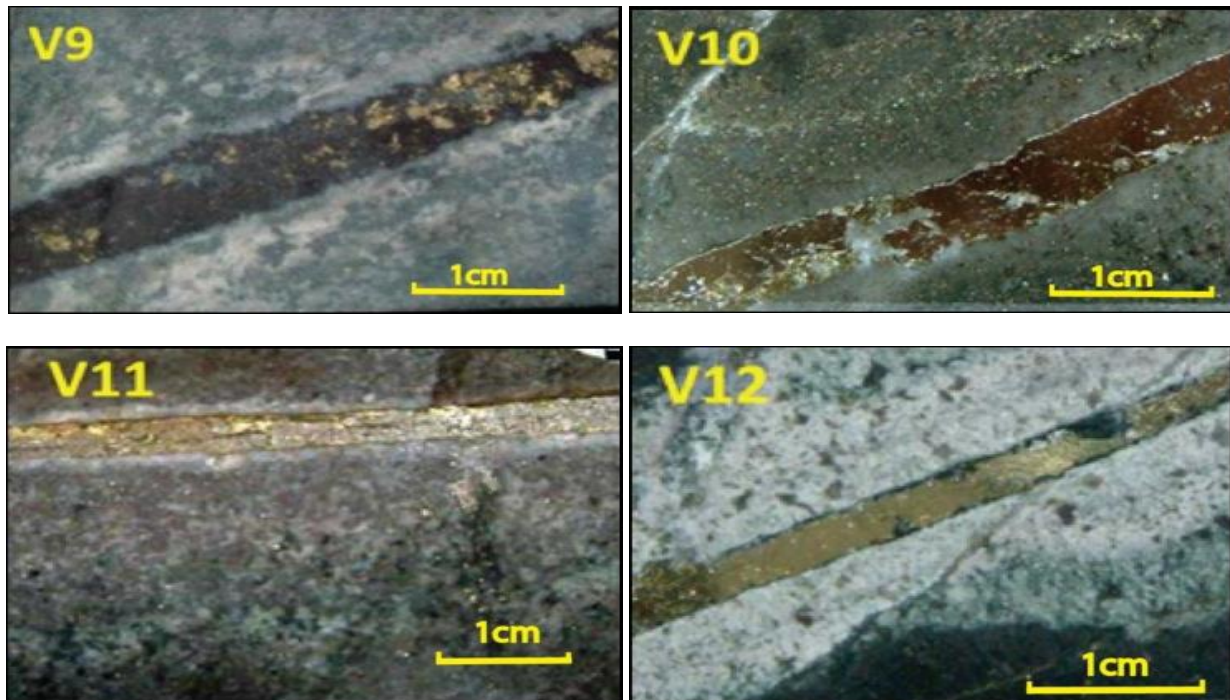
Esta categoría se divide en los siguientes cuatro subtipos:

**V9:** vetilla de magnetita mayoritaria, con halo simple. Su mineralogía es principalmente magnetita, en menores cantidades posee calcopirita y pirita. En contacto sinuoso con el relleno se presenta un halo simple y generalmente asimétrico de sericita con calcopirita más pirita diseminada. La presencia de clorita y cúmulos de biotita en el halo le da un aspecto moteado. Estas vetillas suelen ser más gruesas que 2 mm.

**V10:** vetilla de sulfuros mayoritarios, con halo simple. El relleno posee mineralización masiva de calcopirita y/o pirita sin o con cuarzo. El halo es bandeado o simple, predominantemente sericítico y contiene calcopirita y/o pirita diseminada.

**V11:** vetilla de sulfuros mayoritarios, con halo semi-complejo. Su halo tiene características transicionales entre V10 y V12. El halo es una transición gradual a la roca de caja con bordes externos que podrían interpretarse como un dudoso segundo halo. El relleno presenta un sector central con calcopirita y/o pirita masiva. La mineralización metálica en el halo es escasa y diseminada.

**V12:** vetilla de sulfuros mayoritarios, con halo complejo. Vetas o vetillas con calcopirita y/o pirita masiva. Su halo es doble, siendo el halo más cercano la veta cuarzo-sericítico con calcopirita y pirita diseminadas, mientras que el segundo halo es clorítico-sericítico con escasos sulfuros diseminados.



**Figura 3.4.** Ejemplos de vetillas típicas del tipo Hidrotermal Principal (HP).

### c. Etapa Hidrotermal Tardía (HT)

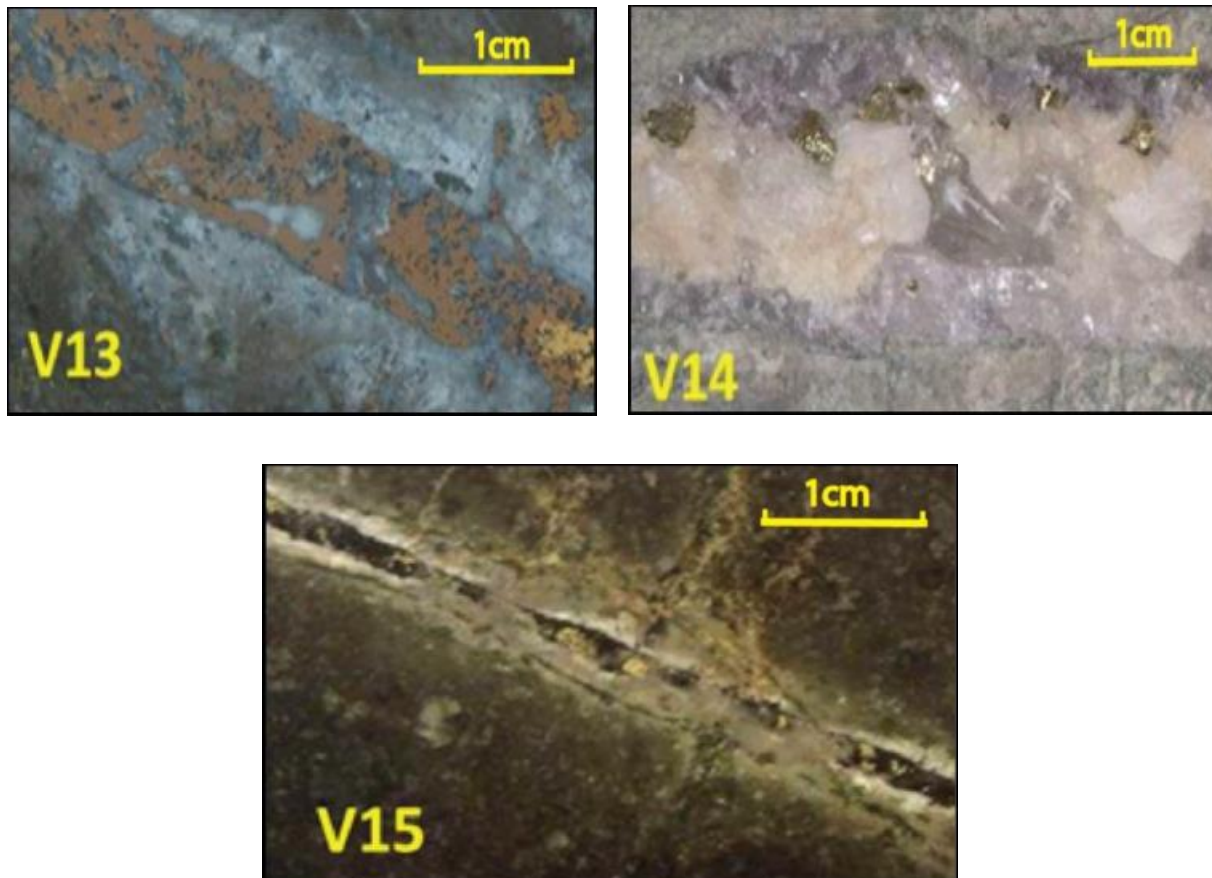
Las estructuras producidas en esta etapa se relacionan con fluidos hidrotermales asociados al desarrollo del Complejo de Brechas Braden. Éstas se extienden en un radio de 100-150 m con las brechas en su centro. En la etapa HT surgen vetillas de mayor complejidad y variabilidad mineralógica que contienen carbonatos, yeso, anhidrita y turmalina, con o sin sulfuros. Aparecen las vetillas de tenantita y tetraedrita, pues se incorporan valores anómalos de Pb, Zn y As producto de la alta sulfidización del ambiente. Las vetillas presentan textura masiva, espesores irregulares, con halos desarrollados y difusos sericítico o cuarzo-sericítico.

A continuación se presentan los subtipos de vetillas HT, adicionalmente se muestra un ejemplo de cada uno de ellos en la Figura 3.5.

**V13:** vetillas de sulfuros mayoritarios. Vetas o vetillas de sulfuros masivos (bornita y tenantita–tetraedrita y trazas de galena y blenda), con cuarzo, anhidrita y carbonatos subordinados. Presenta halos bien desarrollado de bordes indefinidos o difusos.

**V14:** vetillas de carbonatos y sulfatos mayoritarios. Carbonatos como calcita, ankerita, siderita y/o sulfatos como yeso y anhidrita, de textura masiva. Se puede encontrar sulfuros en cantidades menores. Presenta halo sericítico-clorítico, desarrollado y difuso.

**V15:** vetillas de turmalina mayoritaria. Contiene anhidrita subordinada. En el sector sur del yacimiento, en algunos casos existe epidota en baja proporción. Presenta halo sericítico, difuso o indefinido.



**Figura 3.5.** Ejemplos de vetillas típicas del tipo Hidrotermal Tardío (HT).

A continuación, en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se presenta un resumen, de cada vetilla según su categoría TM, HP o HT y su subtipo, en ella se describe la mineralogía típica y distintiva, mineralogía del halo y características diagnósticas que permiten su reconocimiento.



Categoría	Clase	Mineralogía Típica	Mineralogía Distintiva	Halo	Características diagnósticas
TM	V1	<b>Mt</b> ± Qz ± Bio ± (Anh)± (Cpy)± (Clo)	Mt	Silíceo	Magnetita. Halo deslavado
	V2	<b>Qz- Bio</b> - Anh- Clo± Cpy± Py± Bo± (Moly)	Qz- Bio	Sin halo	Qz-Bio. Bordes nítidos. Sin halo
	V3	<b>Qz- Bio- Clo</b> - Anh± Cpy± Py± Bo± (Moly)	Qz-Bio-Clo	Silíceo o silíceo - clorítico con biotita diseminado	Halo difuso o sinuoso. Mineralogía típica Qz-Bio-Clo. Puede presentar Bio-Clo en sutura
	V4	<b>Anh</b> ± Bio± Cpy± (Moly)± (Bo)± (Qz)	Anh mayoritaria	Silíceo-biotítico	Anhidrita, halo característico
	V5	<b>Qz</b> ± Anh± Bio± Cpy± Moly± Bo± (Py)± (Clo)	Qz mayoritario	Sin halo	Bordes nítidos, sin halo. Stockwork denso. Sulfuros diseminados o en sutura central
	V6	<b>Anh</b> ± Qz± Bio± Cpy± Moly± Bo± (Py)± (Clo)	Anh mayoritaria	Sin halo	Bordes nítidos, sin halo. Stockwork denso. Sulfuros diseminados.
	V7	<b>Cpy y/o Bo y/o Py y/o Moly</b> ± Anh± Qz± Bio	Sulfuros mayoritarios	Sin halo	Bordes nítidos, sin halo. Stockwork denso. En microvetillas sulfuros alternan con Bio.
	V8	<b>Tur</b> ± Anh± Qz± (Cpy)± (Moly)± (Bo)± (Py)	Tur mayoritaria	Sin halo	Bordes nítidos, sin halo
HP	V9	<b>Mt</b> ± Cpy± Py± Moly± Qz± Anh	Mt mayoritaria	Sericítico-clorítico. Cpy y/o Py diseminada	Halo simple o asimétrico con o sin clorita diseminada
	V10	<b>Cpy y/o Py</b> ± Qz± Anh± Moly	Cpy y/o Py mayoritaria	Sericítico-clorítico, con Cpy y/o Py diseminada	Halo bandeado o simple con sulfuros diseminados
	V11	<b>Cpy y/o Py</b> ± Qz± Anh± Moly	Cpy y/o Py mayoritaria	Sericítico-clorítico	Halo bandeado, semi-complejo, con bordes difusos. Escasos sulfuros diseminados.
	V12	<b>Cpy y/o Py</b> ± Qz± Anh± Moly	Cpy y/o Py mayoritaria	Silíceo-sericítico-clorítico	Halo doble o complejo con mineralización diseminada

**Tabla 3.1** Clasificación de vetillas de tipo TM y HP.

**Tabla 3.2.** Clasificación de vetillas Yauliyacu (Superintendencia de Geología de los Quenuales, 2017) de tipo HT. de tipo HT. La nomenclatura es: Anh anhidrita, Bo bornita, Cb carbonatos, Clo clorita, Cpy calcopirita, Ep, epidota, Moly molibdenita, Qz cuarzo, Py pirita, Ten tenantita, Tur turmalina, yeso.

Categoría	Clase	Mineralogía Típica	Mineralogía Distintiva	Halo	Características diagnósticas
HT	V13	<b>Cpy- Bo- Moly- Ten- Py</b> ± Qz± Anh± Cb± Tur± (Ys)± (Clo)	Sulfuros mayoritarios	Silíceo-sericítico-clorítico	Variedad mineralógica de sulfuros. Halo desarrollado y difuso
	V14	<b>Cb y/oYs t/o Anh</b> ± Cpy± Clo± Bo± Moly± (Ten)± (Qz)	Carbonatos y sulfatos	Silíceo-sericítico-clorítico	Halo desarrollado y difuso. Carbonatos y sulfatos
	V15	<b>Tur-Anh</b> ± Cpy± Cb± Ys± Qz± Py± Ep± (Bo)± (Moly)± (Ten)	Tur mayoritaria	Silíceo-sericítico-clorítico	Halo desarrollado y difuso. Turmalina en abundancia

## CAPITULO 4: ENSAYOS GEOTÉCNICOS DE TRACCIÓN

En general, los ensayos geotécnicos tienen tres objetivos principales. Entre ellos se encuentra el entregar información básica sobre las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, calificar la roca con un valor cuantitativo que permita compararla con otras y, finalmente, brindar la información necesaria para realizar el diseño de estructuras en la roca (Farmer, 1983).

Para la realización de ensayos geotécnicos es necesario la utilización de estándares, puesto que los resultados obtenidos dependen directamente de las condiciones en que se efectúe el ensayo (forma de la probeta, dirección de la carga, velocidad de aplicación y temperatura) y sin ellos la interpretación de resultados sería difícil (Merino, 1989).

Específicamente, para la determinación de la resistencia a la tracción de una muestra de roca es posible realizar dos tipos de ensayos, el de tracción directa y el de tracción indirecta (o ensayo brasileño), los que se comentan a continuación.

En esta oportunidad, los análisis se basan en resultados de ensayos de tracción directa de 19 muestras, realizados en la Unidad Minera Yauliyacu bajo la norma ASTM.

El ensayo de tracción indirecta es descrito de forma general, pues existen trabajos previos que lo han usado y es posible realizar comparaciones con el resultado de este trabajo.

### 4.1 ENSAYO DE TRACCIÓN DIRECTA

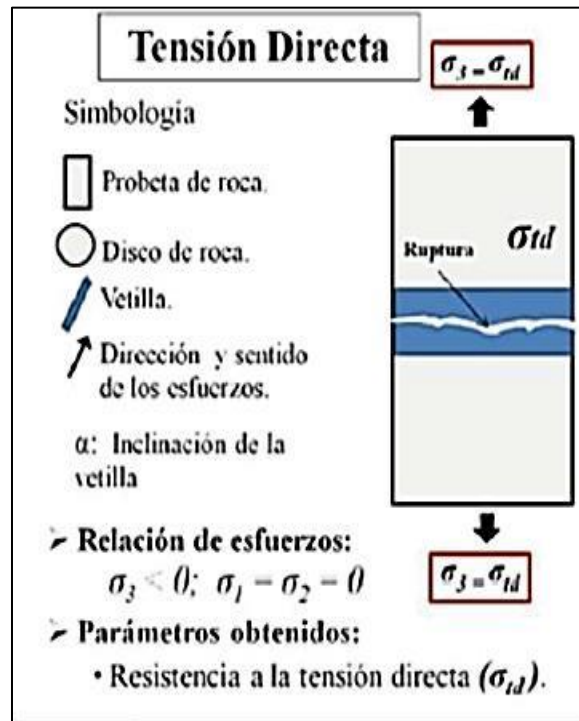
Este ensayo consiste en aplicar una fuerza de tracción uniaxial a una muestra cilíndrica o probeta, en la dirección de su eje hasta que se produzca la ruptura. Cada muestra posee una vetilla ubicada en el centro de la probeta y aproximadamente perpendicular a la acción de los esfuerzos de tensión, como se muestra en la Figura 4.1. Si se produce ruptura a través de la vetilla, el ensayo indica la resistencia a la tensión de la vetilla. La relación de los esfuerzos aplicados es la siguiente:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 < 0$$

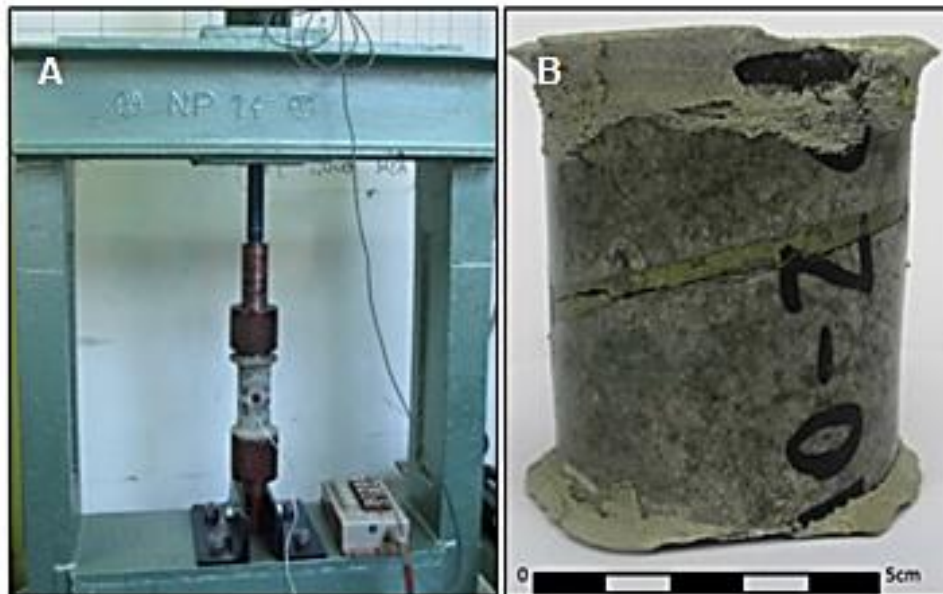
El equipamiento requerido para el ensayo consiste en: Un dispositivo de carga, usado para aplicar y medir la carga axial sobre la muestra; dos cabezales, que corresponden a tapas metálicas de forma cilíndrica las que son adheridas a los extremos de la muestra y sirven como

medio de traspaso de carga desde el dispositivo de carga a la muestra, estos deben transmitir la tracción sin aplicar torsión o flexión a la muestra (ASTM D2936, 2001). En este caso la máquina pertenece a IDIEM (Figura 3.7 A), y aunque tiene una capacidad de tensión mayor, la máxima carga de tensión aplicable es dependiente de la resistencia del material adhesivo, en este caso de 24,8 MPa.

El procedimiento consiste en adherir cada borde de la probeta a un cabezal metálico mediante un pegamento especial (en este caso se utilizó el adhesivo SIKA 31 HMG), los cuales son posteriormente fijados a la Máquina de tensión. Luego, se aplica la carga a través de la máquina desde uno de los bordes de la muestra de forma continua y a una tasa de carga menor a 15 N/s. Finalmente se registra la máxima carga soportada por la muestra.



**Figura 4.1** Figura esquemática de ensayo de tracción directa. Imagen extraída (Santos 2011).



**Figura 4.2** A) Máquina utilizada en los ensayos de tracción directa. B) Probeta de roca sometida a ensayo de tracción directa. En ella la vetilla se encuentra inclinada y en los extremos posee restos del pegamento especial utilizado para fijar la muestra a la máquina.

#### 4.1.1 Resistencia a la tracción directa

**La resistencia (r) a la tracción está dada por la carga máxima (f) soportada durante el ensayo dividido por el área (a) de la vetilla.**

$$R = \frac{F}{A}$$

Lo ideal es que la vetilla se ubique de forma ortogonal al eje del cilindro, de modo que también sea ortogonal al stress de tracción aplicado. En este caso, el área (A) a considerar corresponde a la sección transversal del cilindro de roca. Sin embargo, en la práctica puede haber una inclinación (Figura 4.3.B), la que va a influir en el cálculo de la resistencia al hacer variar tanto el área como la fuerza.

La Figura 4.3 muestra la forma de calcular el área de las vetillas inclinadas en un ángulo  $\alpha$  utilizada en este trabajo, considerando que el área corresponde a una elipse de semieje menor igual al radio del cilindro. Esta área corresponde a una aproximación en la que no se considera la rugosidad de la vetilla y se asume que ésta se inclina en sólo una dirección.

Es necesario, también, calcular la fuerza de tracción sobre la vetilla, pues al existir una inclinación, la fuerza aplicada por la máquina se puede descomponer en una fuerza de corte y una de tracción, que es normal a la vetilla y dependen del ángulo.

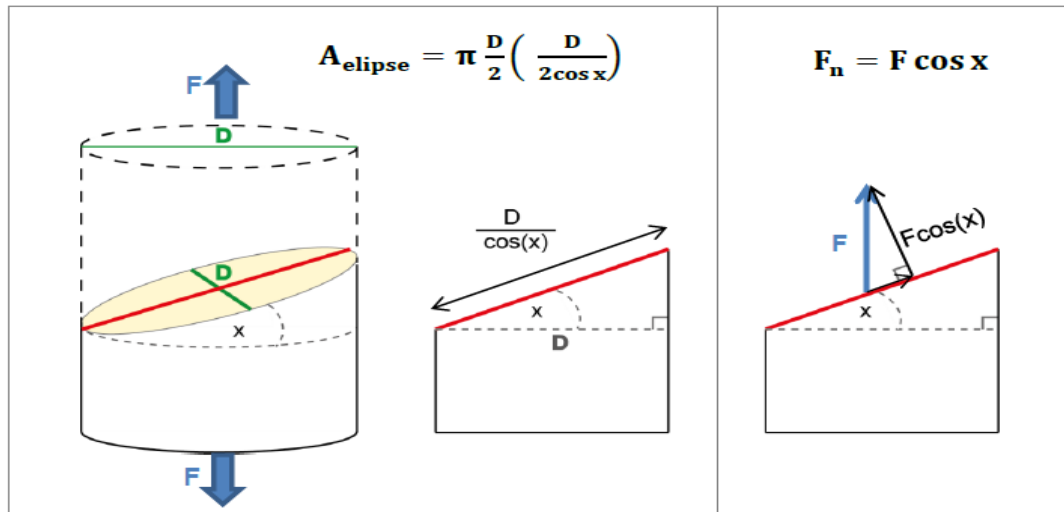


Figura 4.3. Forma de calcular el área y la fuerza normal aplicada sobre una vetilla inclinada en ángulo x.

#### 4.1.2 Medición de deformación en el ensayo de tracción directa

La deformación o strain producida durante el ensayo puede ser medida mediante un strain gage, galga extensiométrica o extensómetro (Figura 4.4) que se adhiere a la vetilla a ensayar en la misma orientación del esfuerzo aplicado. Éste es un dispositivo utilizado para la medición electrónica de magnitudes mecánicas como la deformación.

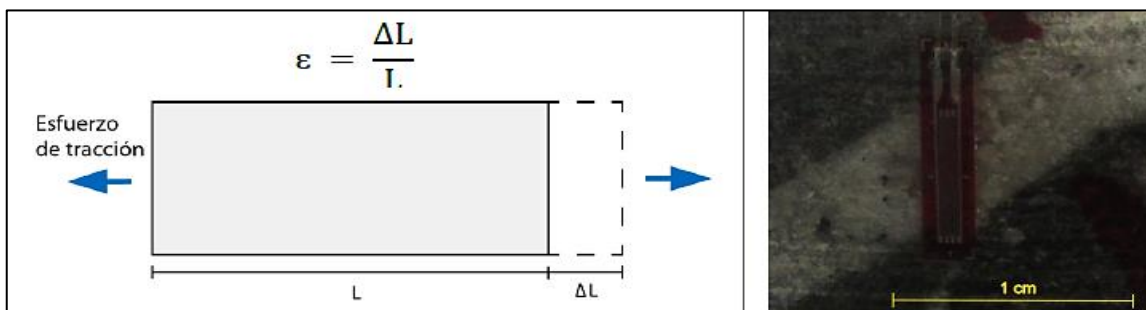


Figura 4.4. Izquierda: medición y cálculo de strain. Derecha: strain gage adherido a una vetilla de cuarzo.

El strain ( $\epsilon$ ) queda definido como la razón entre la variación de longitud ( $\Delta L$ ) y la longitud inicial ( $L$ ), como se muestra en la Figura 4.5. El strain es positivo en el caso de tensión y es un valor adimensional y que, en la práctica, presenta una magnitud muy pequeña por lo que se puede expresar como microstrain ( $\mu\epsilon$ ), que es  $\epsilon \times 10^{-6}$ .

El uso de esta herramienta permite obtener una curva de stress vs strain.

## 4.2 ENSAYOS DE TRACCIÓN INDIRECTA

También conocido como ensayo brasileño. Consiste en medir la resistencia a la tracción de un disco de roca (como el que se muestra en la Figura 4.5), pero de forma indirecta, pues es sometido a compresión diametral de manera uniforme, la que provoca un esfuerzo de tracción en la dirección perpendicular al eje en que se ejerce la compresión, por lo que se produce rompimiento. El estado de esfuerzo biaxial al que se somete la muestra es el siguiente:

$$\sigma_1 > 0; \sigma_2 = 0 \text{ y } \sigma_3 < 0$$

La vetilla a estudiar debe ubicarse de forma diametral al disco de roca, en la misma dirección de la aplicación de esfuerzo compresivo. Si la ruptura sucede por la vetilla, la resistencia a la tensión se obtiene usando la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\pi P}{2dt}$$

Donde P corresponde a la carga que produce la ruptura, d diámetro del disco y t al espesor del disco.

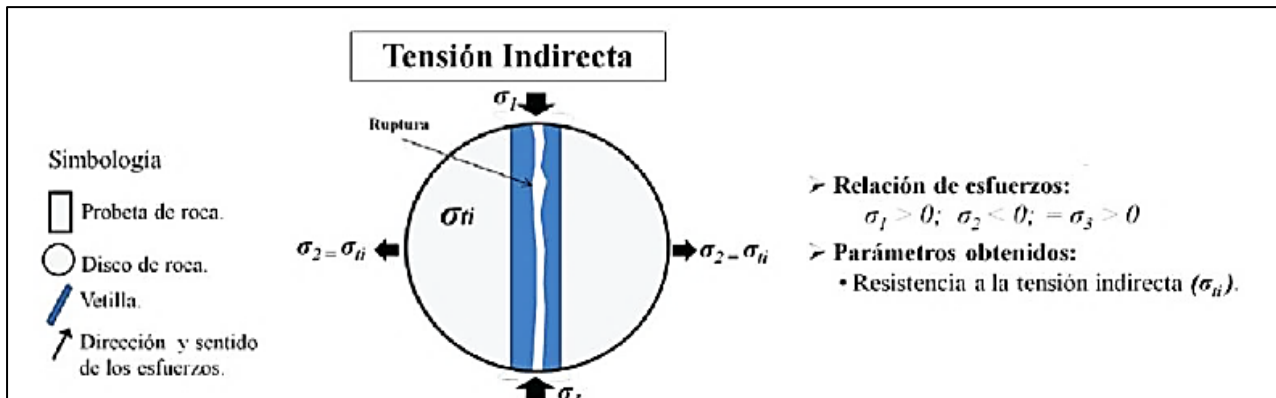
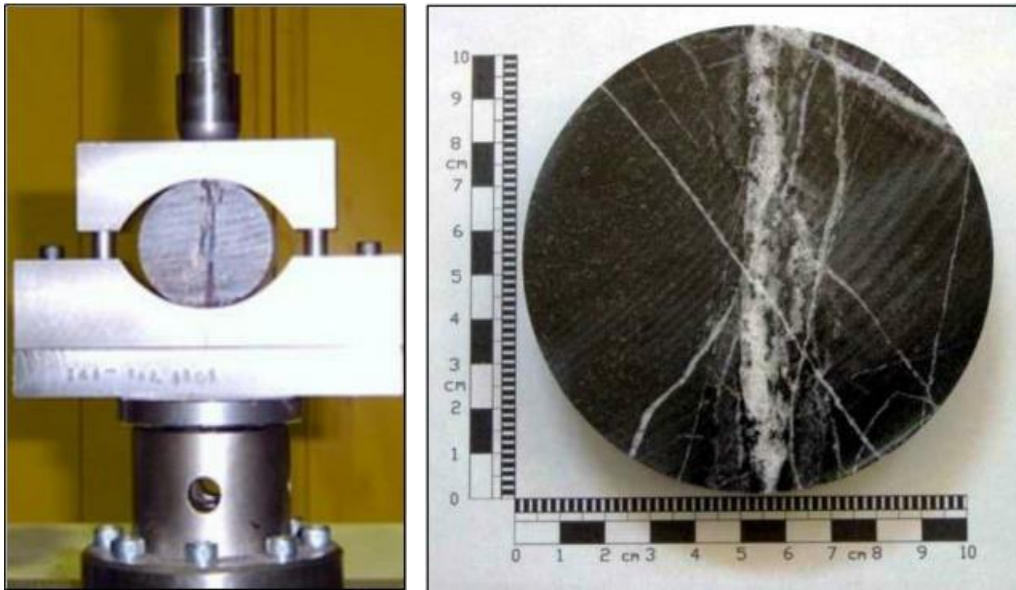
**Figura 4.51.** A) Máquina utilizada en el ensayo de tracción indirecta o brasileño. B) Disco de roca sometido a ensayo.

Este método se basa en el hecho experimental de que muchas rocas en un campo de stress biaxial fallan en tensión debido a un esfuerzo uniaxial extensivo cuando uno de los esfuerzos genera tensión y el otro compresión, cuya magnitud no excede tres veces al esfuerzo que genera tensión.

Se asume que el efecto de la compresión en puntos diametralmente opuestos de la muestra es equivalente al de aplicar tensión en la dirección perpendicular, sin embargo, la resistencia

entregada por este tipo de ensayo es una aproximación, que puede perder precisión con las heterogeneidades de la muestra debido a la diferencia entre vetilla y roca intacta.

La Figura 4.5 corresponde a un esquema de un ensayo de tracción.



**Figura 4.6.** Figura esquemática de ensayo de tracción indirecta. Imagen extraída de De Los Santos (2011).



## CAPITULO 5: DESCRIPCIÓN DE POST ENSAYO DE VETILLAS

La descripción de las muestras, luego de realizado el ensayo de tracción directa, tiene por objetivo capturar de forma detallada toda la información útil que se desprende de la vetilla y que permitirá luego relacionarla con la resistencia de la misma. En esta sección se consideraron las características recomendadas por la ISRM (Brown, 1981), como espesor y rugosidad, relleno mineralógico, y modo de falla.

La descripción se ha realizado llenando tablas como la que se expone en la Tabla 5.1 Y 5.2, la cual muestra como ejemplo la caracterización de la muestra NNM-23 Y DAC-25. Cada parámetro se describe a continuación.

Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
NNM-23	HP	V12	CMET	50

Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	50	Silíceo-sericitico-clorítico. Cpy diseminada en el halo exterior
Anhidrita	30	
Cuarzo	15	
Clorita	5	
Observaciones		
Cúmulos de Cpy y anh y Qz. Cl diseminada. La vetilla principal corta una vetilla V5 de 1 mm de espesor y de ángulo de aprox. 70°.		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
20		18-18
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
1	2	1
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
4	8	8
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido e irregular		

**Fotos**

Tabla 5.1 Tabla de descripción de vetillas. En ella se consideran los aspectos de identificación de muestra, relleno mineralógico y geometría de la vetilla. Se toma como ejemplo la descripción de la muestra NNM-23.

Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
DAC-25	HP	V10	CMET	-

Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	77	Sílice sericítico clorítico
Cuarzo	21	
Anhidrita	1	
Pirita	1	
Observaciones		
Información extraída de la memoria de De los Santos (2011).		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
5		10-12
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
3	1	2
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
7	3	4
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es recto y difuso		

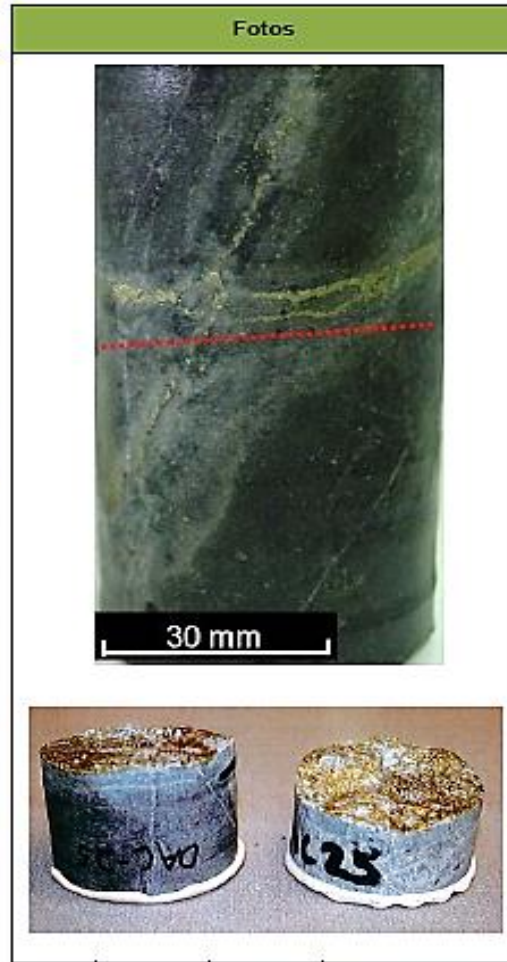


Tabla 5.2 Tabla de descripción de vetillas. En ella se consideran los aspectos de identificación de muestra, relleno mineralógico y geometría de la vetilla. Se toma como ejemplo la descripción de la muestra DAC-25.

## IDENTIFICACIÓN DE VETILLA

**Id:** correspondiente al código de identificación de cada probeta.

**Litología:** corresponde a la litología de la roca caja en la que se emplaza la vetilla ensayada. En su mayoría corresponden a complejo máfico pórfido diorítico PDIO y pórfido dacítico PDAC.

**Tipo:** en este ítem se ponen una de las siguientes opciones: TM, HP o HT que refiere a las categorías Tardimagmática, Hidrotermal Principal e Hidrotermal Tardía y que corresponden

al tipo genético de la vetilla dado por las características de esta en cada etapa hidrotermal. Para su registro primero se identifica la clase de vetilla y se obtiene la categoría correspondiente.

- TM: su formación se habría producido en un ambiente semidúctil, lo que se manifiesta en la forma sinuosa de la mayoría de la vetilla. La presencia de cuarzo, biotita, feldespato potásico y anhidrita en las vetillas y en sus halos de alteración, se asocia a la alteración potásica.
- HP: vetillas de bordes continuos y rectos, debido a su formación en roca frágil, que producen alteración filica mediante sus halos de alteración de diferentes espesores, simples o complejos, los cuales obliteran la roca caja y les agregan cuarzo, sericita y clorita. En estas vetillas predominan sulfuros como la calcopirita, pirita y la molibdenita, y pueden presentar cuarzo, sericita, clorita y anhidrita.
- HT: vetillas de mayor complejidad y variabilidad mineralógica, textura masiva, espesores irregulares, con halos desarrollados y difusos sericítico o cuarzo-sericítico. Presentan contenido de carbonatos, yeso, anhidrita y turmalina, con o sin sulfuros, entre ellos se puede tener tenantita y tetraedrita.

**S-Tip:** subtipo. Corresponde a 15 clases de vetilla definidas para la mina, las que se definen mediante de la asociación mineral y sus proporciones características y se designan como V1, V2, V3, V15. Las características diagnósticas se presentan en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 del capítulo 3.

## **5.1 DESCRIPCIÓN MINERALOGÍA DEL RELLENO Y HALO**

### **5.1.1 Relleno mineralógico**

Los minerales más comunes en las vetillas corresponden a cuarzo, anhidrita, turmalina, clorita, biotita, calcopirita, pirita, bornita, molibdenita, carbonatos, yeso, magnetita u otros. En la tabla de descripción se debe identificar los minerales presentes en la muestra y determinar su proporción en porcentaje de volumen de cada uno de ellos.

### **5.1.2 Porcentaje de minerales duros**

La dureza relativa de los minerales más comúnmente encontrados en las vetillas, según la escala de Mohs, se muestra en la Tabla 5.3. El porcentaje de minerales duros se define como la

suma de los porcentajes en volumen de los minerales cuya dureza es mayor o igual a 4,5. Los minerales que cumplen esta condición son turmalina, cuarzo, pirita y magnetita.

Mineral	Nomenclatura	Dureza Mohs
Turmalina	Tur	7 - 7,5
Cuarzo	Qz	7
Pirita	Py	6,5
Magnetita	Mt	5,5-6
Calcopirita	Cpy	3,5 - 4
Anhidrita	Anh	3,5
Calcita	Cb	3
Bornita	Bo	3
Sericita	Ser	2,5
Biotita	Bio	2,5 - 3
Yeso	Y	2
Clorita	Chl	2
Molibdenita	Mo 1	1

Tabla 5.3. Tabla de durezas relativas según las escala de Mohs.

### 5.1.3 Presencia de halo

Correspondiente a los cambios mineralógicos producidos en la roca caja producto de la circulación de las soluciones hidrotermales que formaron la vetilla. Las vetillas pueden o no tener halo. Las que sí tienen pueden ser silíceos, sericíticos, cloríticos, biotíticos y presentar minerales diseminados, como pirita, calcopirita y otros. Según el número de halos desarrollados por una vetilla, se clasifican en simples o dobles.

En este campo se registra si hay o no halo de alteración entre la roca y la vetilla, en el caso de haber se indica la asociación mineral observada ordenadas según su abundancia.

## 5.2 DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

### 5.2.1 Rugosidad

Para estimar la rugosidad de la vetilla se usa el índice JRC. Para ello se considera la forma de su traza preensayo observada en la superficie de la probeta de roca, en los contactos vetilla/roca o vetilla/halo, como se muestra en la Figura 5.4. Luego, se determina el JRC por comparación visual con los perfiles de rugosidad de Barton y Choubey (1977) que sirve para estructuras cuya longitud es menor a 10 cm (Figura 5.5)

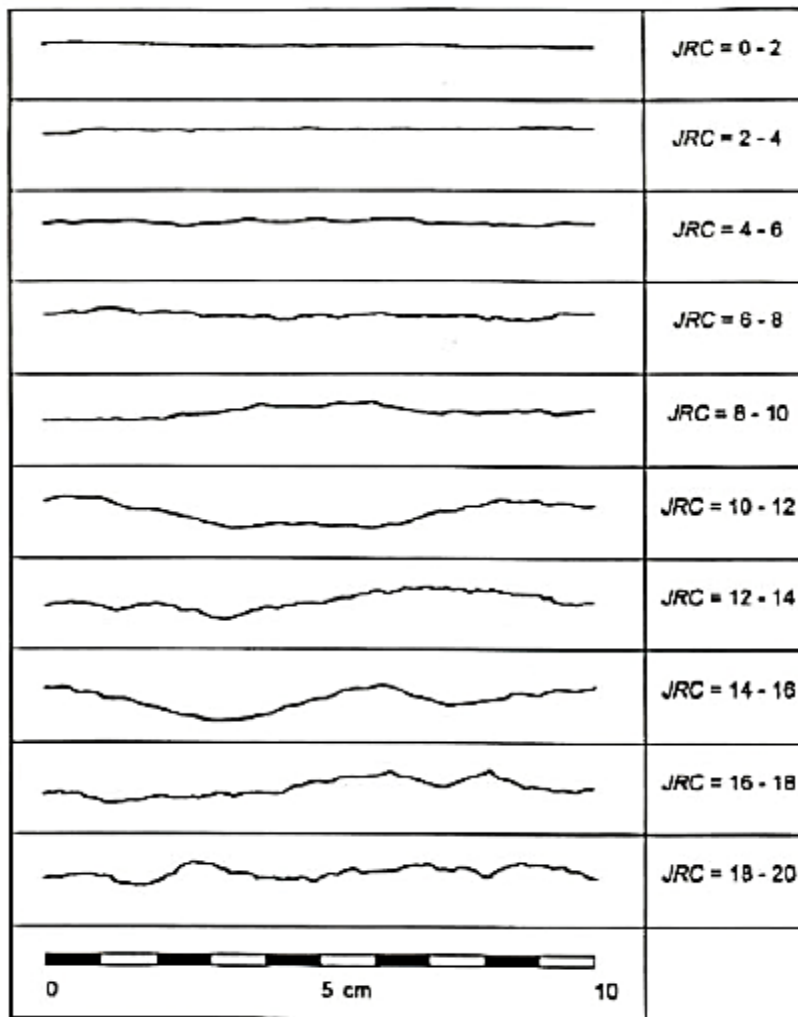
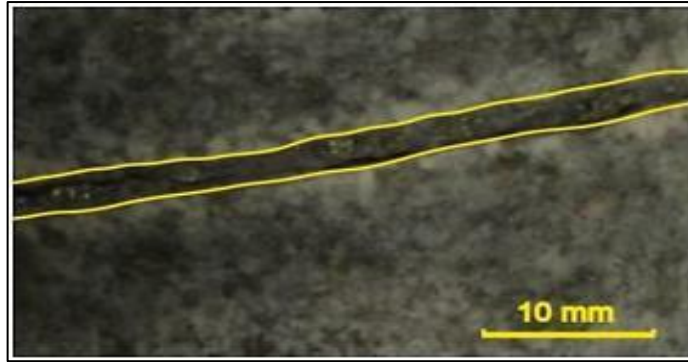


Figura 5.4 Diagramas para la obtención de rugosidad para discontinuidades de longitud menor a 10 cm (Barton y Choubey, 1977).

Figura 5.5. Forma de medir el JRC. Se observa en la forma de la traza de la vetilla preensayo, principalmente en sus interfases relleno/halo o relleno/roca, y se compara con los perfiles de (Barton, Choubey 1977).

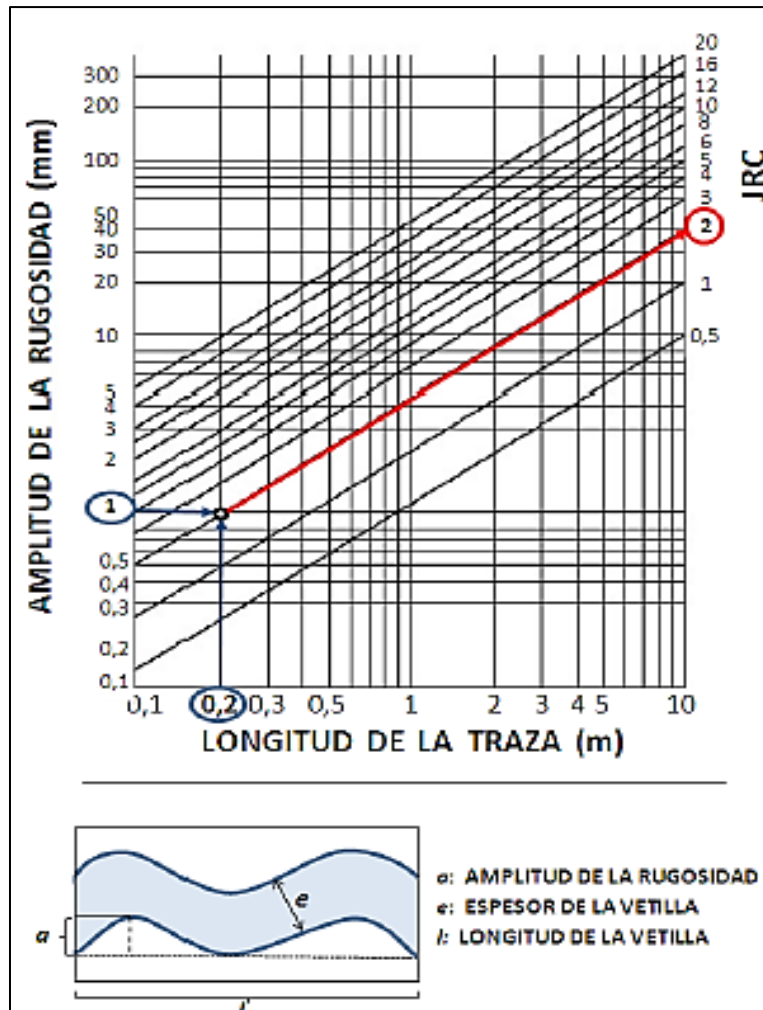
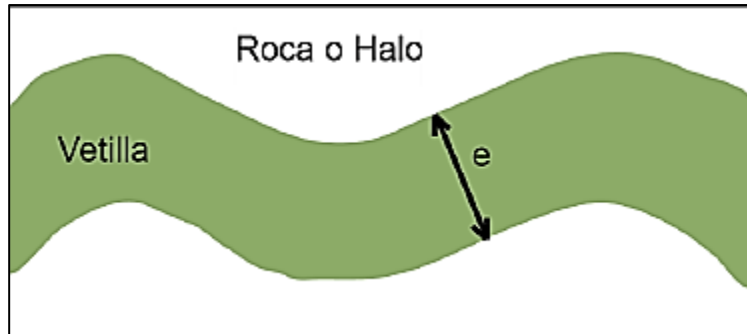


Figura 5.6. Estimación del índice de rugosidad JRC. En a) perfiles de rugosidad para el JRC, a una escala de 10 cm tomada de Barton y Choubey (1977), se incluyen también parámetros descriptivos obtenidos de Barton (1987). En b) grafica para estimar la rugosidad a partir de su amplitud y la longitud de la traza de la estructura. En c) esquema de una vetilla indicando su espesor, longitud y amplitud de la rugosidad.

### 5.2.2 Espesor

La medida del espesor se realiza con una regla, de forma perpendicular a la vetilla, teniendo cuidado de estar midiendo el espesor real y no uno aparente (ver Figura 5.4). En este caso no habrá mayor dificultad puesto que cada vetilla se dispone de forma aproximadamente ortogonal al eje del sondaje. Es necesario juntar ambos trozos de la muestra ensayada. En muchas ocasiones se presentan vetillas poco regulares, por lo que se debe registrar el valor máximo, mínimo y típico.



**Figura 5.7.** Determinación del espesor real de una vetilla.

### 5.2.3 Espesor Halo

De igual forma que en el relleno de la vetilla, se registra el valor del ancho del halo en caso de haberlo y en caso de que la probeta que contiene a la vetilla sea de largo suficiente para exponer el fin del halo.

### 5.2.4 Ángulo

Lo ideal es que las probetas de roca posean su vetilla orientada en forma ortogonal a la dirección de los esfuerzos de tracción, que para el ensayo de tracción directa coincide con el eje del sondaje. Pero no todos los casos cumplen con esta condición, es por esto que se debe registrar cuál es el ángulo para buscar posteriormente su influencia.

El ángulo a medir, es el que separa la traza de la vetilla con el plano ortogonal a la dirección del esfuerzo de tracción. En la Figura 5.5 corresponde al ángulo  $x$ . En el caso que la vetilla sea sinuosa se debe registrar el ángulo que mejor represente la posición de la vetilla.

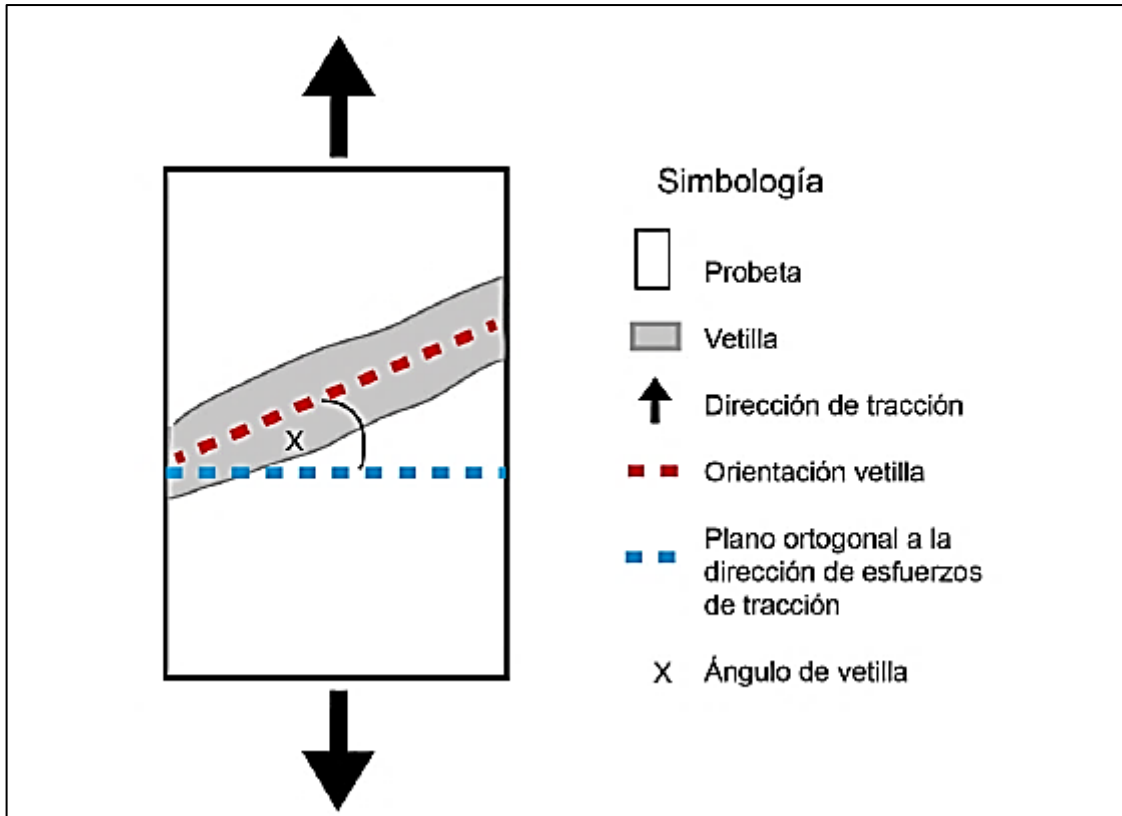
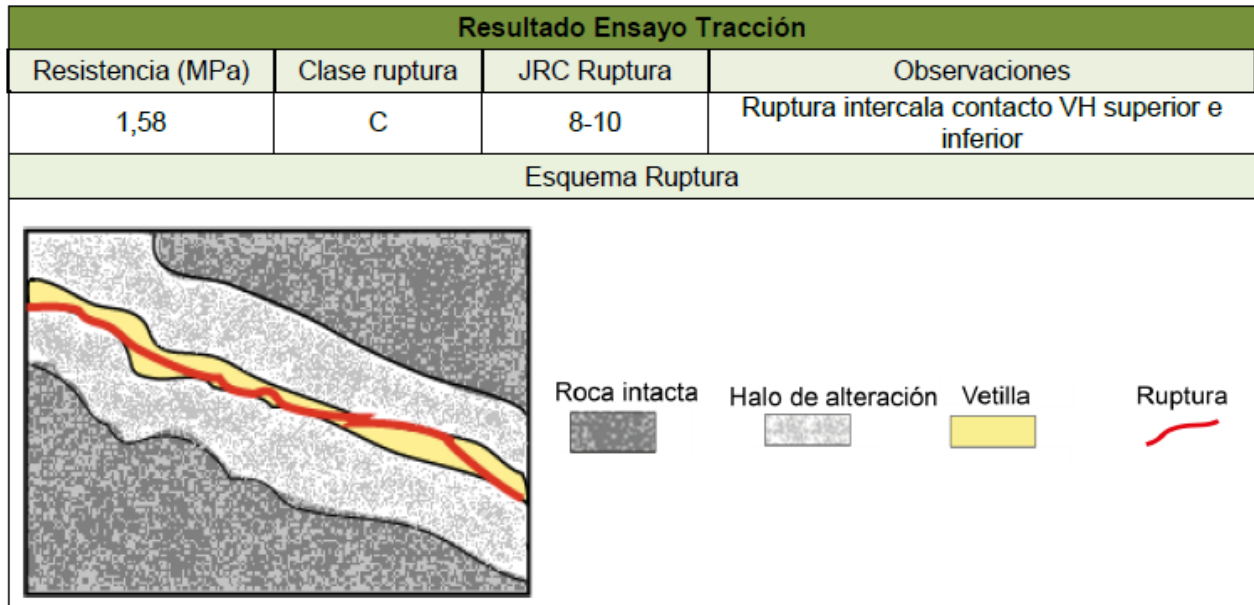


Figura 5.8. Esquema de medición del ángulo de vetilla considerado para este estudio.

### 5.3 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO

Los resultados del ensayo de tracción directa son registrados, al igual que la descripción mineralógica y geométrica de las vetillas, en una tabla como la que se muestra en el ejemplo de la muestra NNM-23 de la Tabla 5.9 y en ella se incluye la resistencia a la tracción directa, la clase de ruptura y los parámetros de deformación.





Deformación							
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	64,5	Módulo de elasticidad (GPa)	120	Stress Punto de Fluencia (Mpa)	0,3	Módulo secante (GPa)	49,6

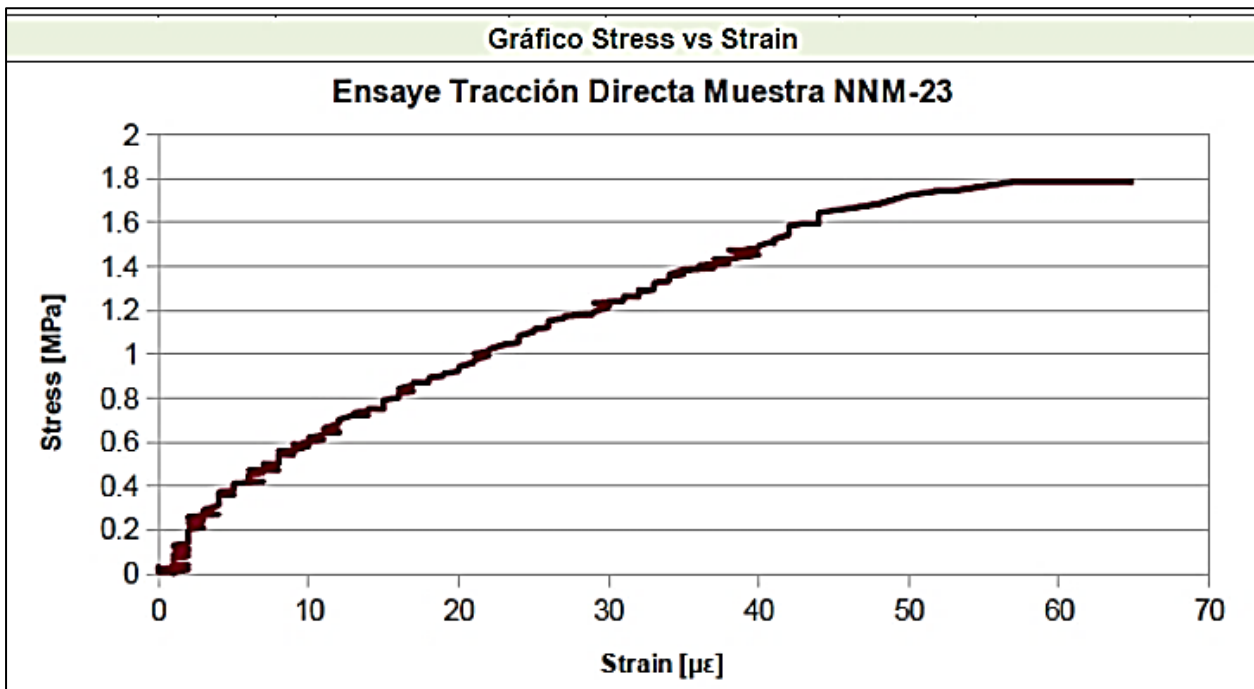


Tabla 5.9. Pauta de descripción del resultado del ensayo, en ella se incluyen los parámetros de resistencia a la tracción directa, las características de la ruptura y parámetros que describen la deformación presentada durante el ensayo. En este caso se muestra como ejemplo la descripción de la muestra NNM-23.

Los parámetros que se han registrado en cada muestra son los siguientes:

### **5.3.1 Modo de ruptura**

En base a la clasificación propuesta por (Marambio1999), mostrada en la Tabla 5.10, se ha realizado una caracterización para la forma de romper que exhiben las muestras durante el ensayo de tracción directa. Su clasificación consiste en tipos y clases de ruptura según su ubicación relativa al relleno y halo de la vetilla.

Los tipos de ruptura son:

**Tipo A:** ruptura por roca. La ruptura define una o más superficies irregulares, las que atraviesan roca y vetillas de forma arbitraria, sin encausarse a través de vetillas. Lo que produce que la probeta se fracture en varios segmentos.

**Tipo B:** ruptura mixta. Se subdivide en los tipos B1 y B2.

**B1:** superficie mixta única. La ruptura se desarrolla a través de roca y parcialmente por vetillas, pero generando solo una sola superficie.

**B2:** ruptura se propaga por roca y vetillas, generando varias superficies que fractura la probeta en fragmentos.

**Tipo C:** ruptura por varias vetillas. Ruptura genera varios trozos de roca definidos por superficies de varias vetillas.

**Tipo D:** ruptura por una sola vetilla. Se subdivide en D1 y D2.

**D1:** ruptura por superficie única, correspondiente a la vetilla.

**D2:** superficie múltiple. La ruptura principal se desarrolla por la vetilla, y presenta ramificaciones hacia un solo lado de esta.

**Tipo E:** rupturas anómalas. Producidas por ensayos defectuosos, probeta mal preparada.









Tipo	Descripción	Esquema
A	Ruptura por roca	
B1	Ruptura Mixta: superficie única	
B2	Ruptura Mixta: superficie múltiple	
C	Ruptura por vetillas	
D1	Ruptura por una vetilla: superficie única	
D2	Ruptura por una vetilla: superficie múltiple	
E	Rupturas anómalas	-
Simbología  Probeta de roca  Vetillas		

Tabla 5.10. Clasificación de tipos de ruptura de Marambio y otros (1999)

De estos tipos de rupturas, aquella por una vetilla única (D) se subdivide en las siguientes clases, las cuales son esquematizadas en la Tabla 5.11:

**Clase V:** ruptura por el interior del relleno de la vetilla.

**Clase C:** la superficie de ruptura se desarrolla por el contacto vetilla/halo.

**Clase H:** ruptura ocurre por el halo de alteración producido sobre la roca caja por la interacción con fluidos hidrotermales.

La ruptura de tipo A presenta la **clase R:** ruptura a través de roca, aquella que en su trazado no ha habido influencia de vetilla.

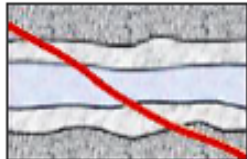
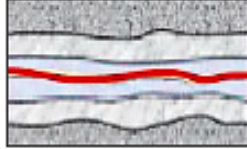
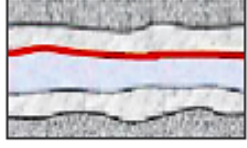
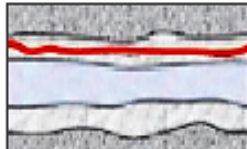




Tipo	Clase	Descripción	Esquema
A	R	Ruptura por roca	
D	V	Ruptura por relleno de vetilla	
	C	Ruptura por contacto vetilla/halo	
	H	Ruptura a través de halo	
<p>Simbología</p> <p> Roca</p> <p> Vetilla</p> <p> Halo</p> <p> Ruptura</p>			

Tabla 5.11. Subtipos de ruptura para los tipos A y D, basados en la clasificación de Brzovic y Villaescusa (2007).

Para efectos del presente estudio se utiliza una simplificación de esta clasificación, en que se identifica la ruptura que fue a través de la roca intacta como **R**, la ruptura por el halo de alteración, como **H**; la ruptura a través del relleno mineralógico, como ruptura **V**. La situación en que la ruptura ocurre por el contacto de la vetilla/halo, al igual que el contacto vetilla/roca (para vetillas sin halo) se designa como ruptura **C**. Finalmente la ruptura tipo B, C y D múltiples son designadas en este trabajo como ruptura **M** (de mixta).

### 5.3.2 Resistencia

El valor del esfuerzo aplicado al cual la muestra se rompe corresponde a la resistencia a la tracción de cada vetilla siempre y cuando la ruptura se haya realizado a través del relleno de esta, o en el contacto vetilla/halo o vetilla/roca. Este valor es calculado ocupando la expresión ya mencionada en el capítulo 4, en la sección de ensayo de tracción directa:

$$R = \frac{F_n}{A} = \frac{F(\cos x)^2}{\pi(D/2)^2}$$

Donde R es la resistencia a la tracción directa, F corresponde a la fuerza aplicada, D es el diámetro del cilindro de roca ensayado y x es el ángulo de la vetilla.

Es posible que durante el ensayo sea el pegamento especial que une la muestra a la máquina el que se fracture, en tal caso el ensayo no es válido y no es considerado (caso ruptura anómala o tipo E)

### 5.3.3 Deformación

La deformación queda registrada mediante el uso de strain gages los que finalmente permiten la obtención de una curva de stress vs strain como la que se muestra en la Figura 5.6. En la interpretación de la curva es posible identificar dos regiones:

**Zona elástica:** La región a bajas deformaciones, al principio de la curva, donde se cumple la Ley de Hooke.

$$\sigma = E\varepsilon$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo de tracción aplicado,  $\epsilon$  el strain o deformación y E, la constante de proporcionalidad, corresponde a el módulo de elasticidad o de Young.

La pendiente de este segmento lineal corresponde al módulo de elasticidad E. Este módulo puede ser interpretado como la rigidez o la resistencia de un material a ser deformado elásticamente.

Un material que se comporta de manera elástica pierde las deformaciones causadas por la aplicación de una fuerza cuando cesa la acción de la fuerza, es decir, vuelve a su forma original.

**Zona plástica:** luego de que se pierde el comportamiento lineal, se pasa de deformación elástica a plástica. La tensión necesaria para continuar la deformación en los metales aumenta hasta un máximo, la resistencia a tracción, la máxima tensión que puede ser soportada por una estructura a tracción; si esta tensión es mantenida, se producirá la ruptura. En esta zona la deformación es permanente.

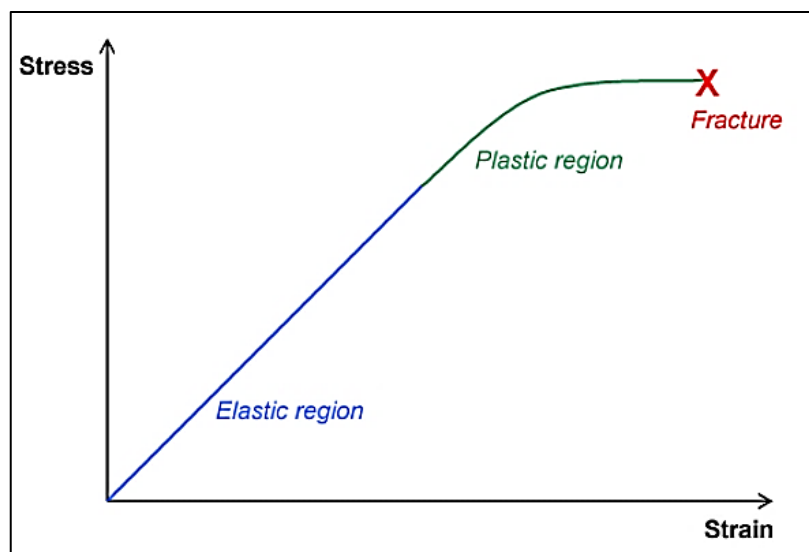
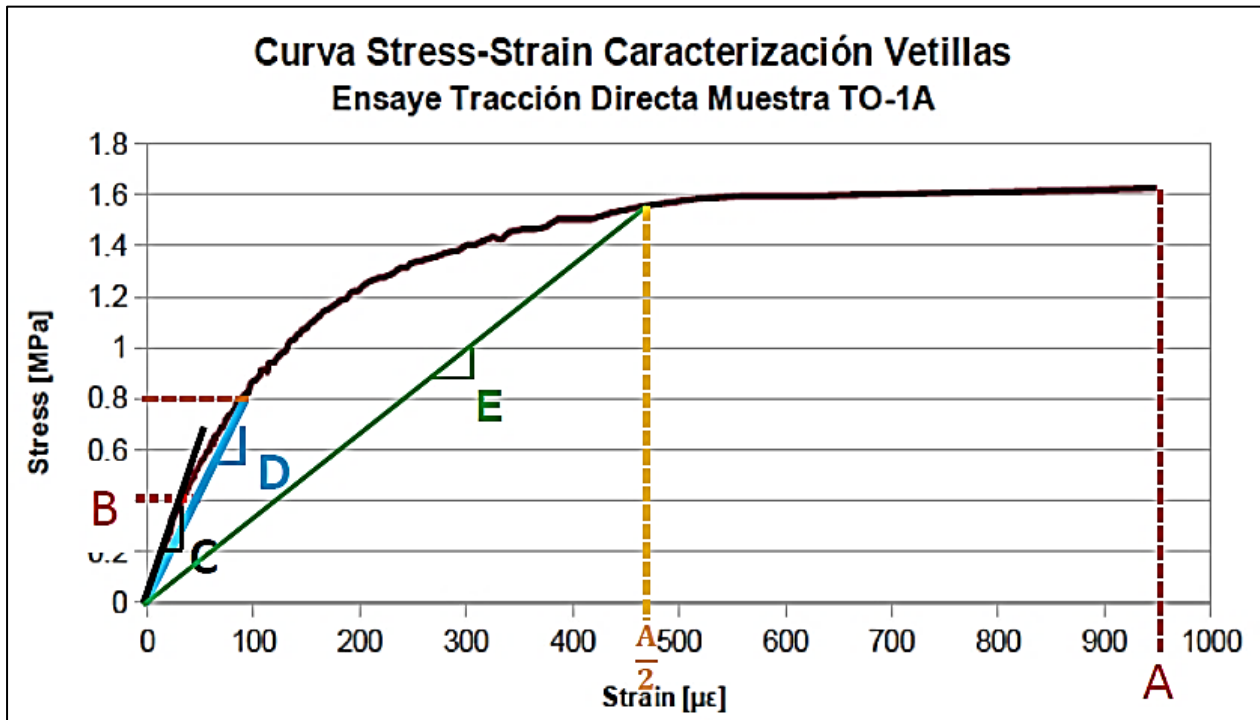


Figura 5.12. Zona de deformación elástica y plástica en gráfico de stress vs strain.

Para poder describir y cuantificar la información que esta curva posee de modo de poder comparar la deformación de las distintas vetillas en cada uno de sus ensayos, se ha utilizado los siguientes valores: la deformación final (la deformación alcanzada al momento de la ruptura. Punto A en la (Figura 5.13), el stress en el límite del comportamiento elástico o punto de fluencia

(Punto B de la Figura 5.13), el módulo de elasticidad o la pendiente de la parte recta inicial de la curva de stress vs strain (Punto C), el módulo secante o la pendiente de la recta secante que une el origen con el punto de la curva en que se ha alcanzado el 50% del stress total aplicado (Punto D) y, finalmente, el módulo de deformación al 50% correspondiente a la pendiente de la recta secante en el punto de la mitad de deformación total. Estos parámetros son indicados en la Figura 5.13.



**Figura 5.13.** Parámetros a registrar en la curva de stress vs strain. A corresponde al stress en el límite del comportamiento elástico. B es el strain total. C es el módulo de elasticidad o pendiente de la recta al inicio de la curva de deformación. D es la pendiente de la secante que une el origen con la curva en el 50% de la deformación.

#### 5.4.3.1 Normalización del strain según el espesor de cada vetilla

La deformación entregada por el strain gage corresponde, por definición, a la razón entre la variación de longitud y la longitud total ( $\epsilon = \Delta L/L$ , Figura 5.8).

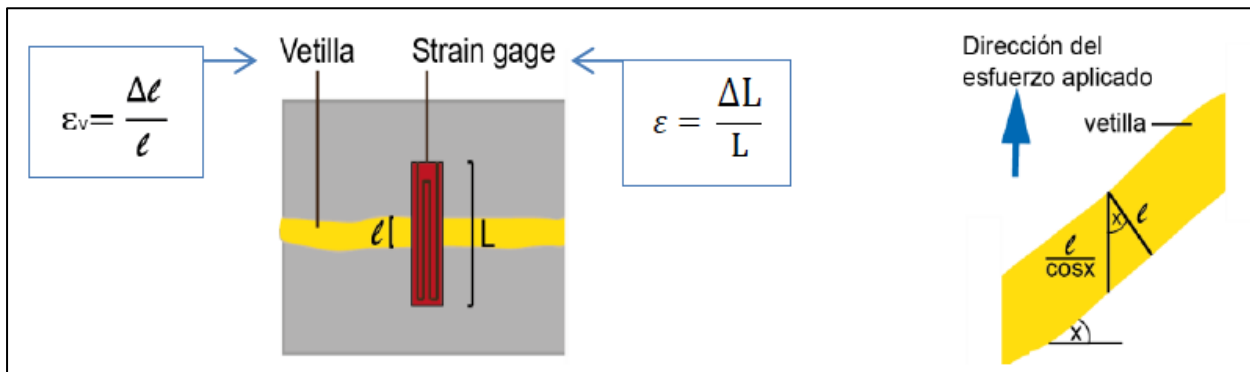
Los valores de strain corresponden a la deformación experimentada a lo largo de la totalidad del strain gage de cada vetilla ensayada (de longitud L, como muestra la Figura 5.14), no solo la que ocurre por la vetilla, que es la que interesa en el análisis. Considerando que las vetillas ensayadas presentan diferentes espesores, mientras que el strain gage tiene un

largo constante ( $L = 10 \text{ mm}$ ) en todas las muestras, es necesario realizar una normalización del valor de la deformación de la vetilla según su espesor.

La expresión para el cálculo del strain de la vetilla, cuyo espesor inicial es  $l$  es:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta l}{l}$$

Además, para cada ensayo, el strain gage es adherido en la vetilla en la misma dirección en la que se aplicará el esfuerzo de tracción, siendo este el eje en el cual se mide la deformación. Es decir, la fórmula presentada anteriormente es válida para vetillas ortogonales al eje del cilindro de roca. Para vetillas inclinadas se debe calcular el espesor de la misma en la dirección del esfuerzo de tracción, como muestra la Figura 5.14, a la izquierda, donde no se usa necesariamente el espesor real.



**Figura 2.** A la izquierda: esquema que diferencia entre el strain del strain gage y el de la vetilla. A la derecha: espesor utilizado para el cálculo del strain en vetillas inclinadas.

La variación de longitud registrada por el strain gage corresponde a la combinación de la deformación de la vetilla y de la zona de la roca o halo cubierto por el dispositivo. Como primera aproximación se puede suponer que la roca es mucho más rígida por lo que su longitud variará de forma despreciable en comparación con la vetilla, con lo que  $\Delta L \approx \Delta l$ . Con esto, el strain de la vetilla puede expresarse como:

$$\epsilon_v = \epsilon \frac{L}{l} \cos x$$



Los valores de módulo de elasticidad, modulo secante al 50% de stress y 50% deformación obtenidos de los gráficos de stress/strain, pueden ser convertidos al valor correspondiente a la vetilla mediante la división por la constante  $L/l \cos^2 \alpha$  de cada vetilla.

## CAPITULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción directa y la posterior descripción de las muestras se presentan por medio de gráficos de dispersión y de columnas.

En primer lugar se muestran las características obtenidas de forma individual (subtipo de vetillas estudiadas, porcentaje de minerales duros, presencia de halo, espesor de las vetillas, rugosidad, ángulo con respecto a la ortogonal al eje del sondaje, resistencia a la tracción directa y clase de ruptura) para obtener una visualización general de los resultados. Luego se presentan los diagramas correspondientes a la relación entre resistencia a la tracción y clase de ruptura versus parámetros mineralógicos y geométricos, de forma general y manteniendo fijos otros parámetros. Y finalmente se presentan los gráficos de deformación.

### 6.1 RESULTADOS INDIVIDUALES

**Subtipo de vetillas:** la mayoría de las vetillas descritas tienen relleno de sulfuros, principalmente pirita y calcopirita, y corresponden a los subtipos V7, V10, V11 y V12. Por otro lado, sólo se tiene una muestra de vetilla de cuarzo, clasificada como V5.

El subtipo de vetillas que más se repite es V10, correspondiente a predominancia de pirita o calcopirita, con halo sericítico-clorítico. Su abundancia permite realizar un análisis más detallado en conjunto a las vetillas V11 y V12, que poseen características similares en su relleno mineralógico y difieren en las características del halo (Ver Figura 6.1)

**Porcentaje de minerales duros:** se considera como mineral duro a aquel con dureza mayor a 4,5 en la escala de Mohs. Los minerales con esta característica encontrados en la descripción de muestras fueron cuarzo y pirita.

Se tiene dos grupos de datos, como se observa en la Figura 6.2, aquellos de 0-30% (vetillas en las que predomina calcopirita) y de 80-100% de minerales duros (predominancia de pirita o cuarzo).

**Presencia de halo:** el halo es una característica presente en casi todas las vetillas estudiadas, como lo muestra la Figura 6.2. Solo dos vetillas, las de tipo V5 y V7, no lo poseen.

Sin embargo, este parámetro no es estudiado en este trabajo, puesto que no se cuenta en todos los casos con su espesor.

La causa de que no se cuente con la totalidad del halo en algunas muestras es que la probeta inicial debe ser cortada para que la vetilla a estudiar quede al medio del cilindro de roca, para la correcta realización del ensayo, y si el halo es muy ancho o la vetilla está ubicada en la orilla de la probeta, parte del halo se pierde (esta situación es esquematizada en la Figura 6.1).

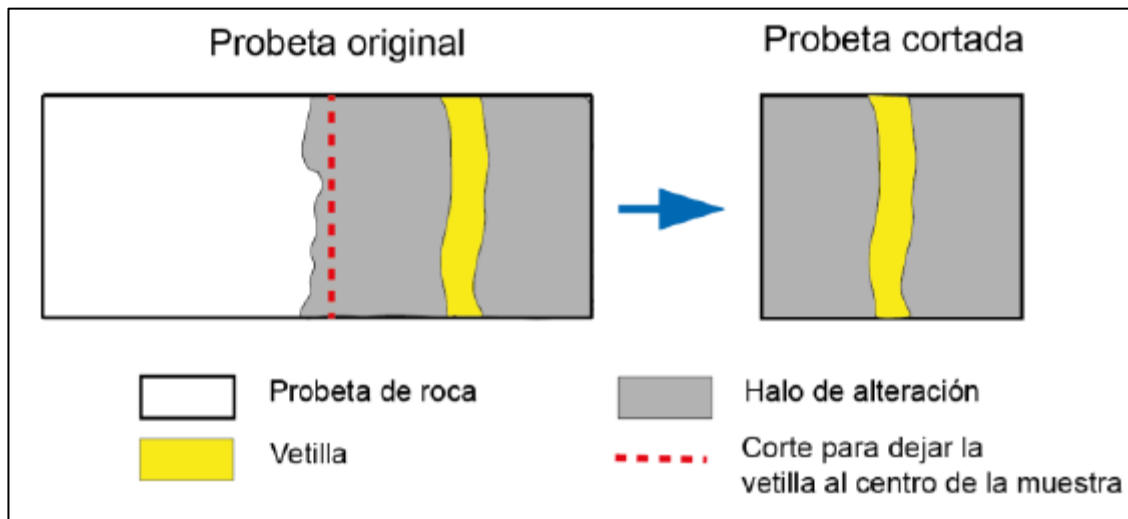
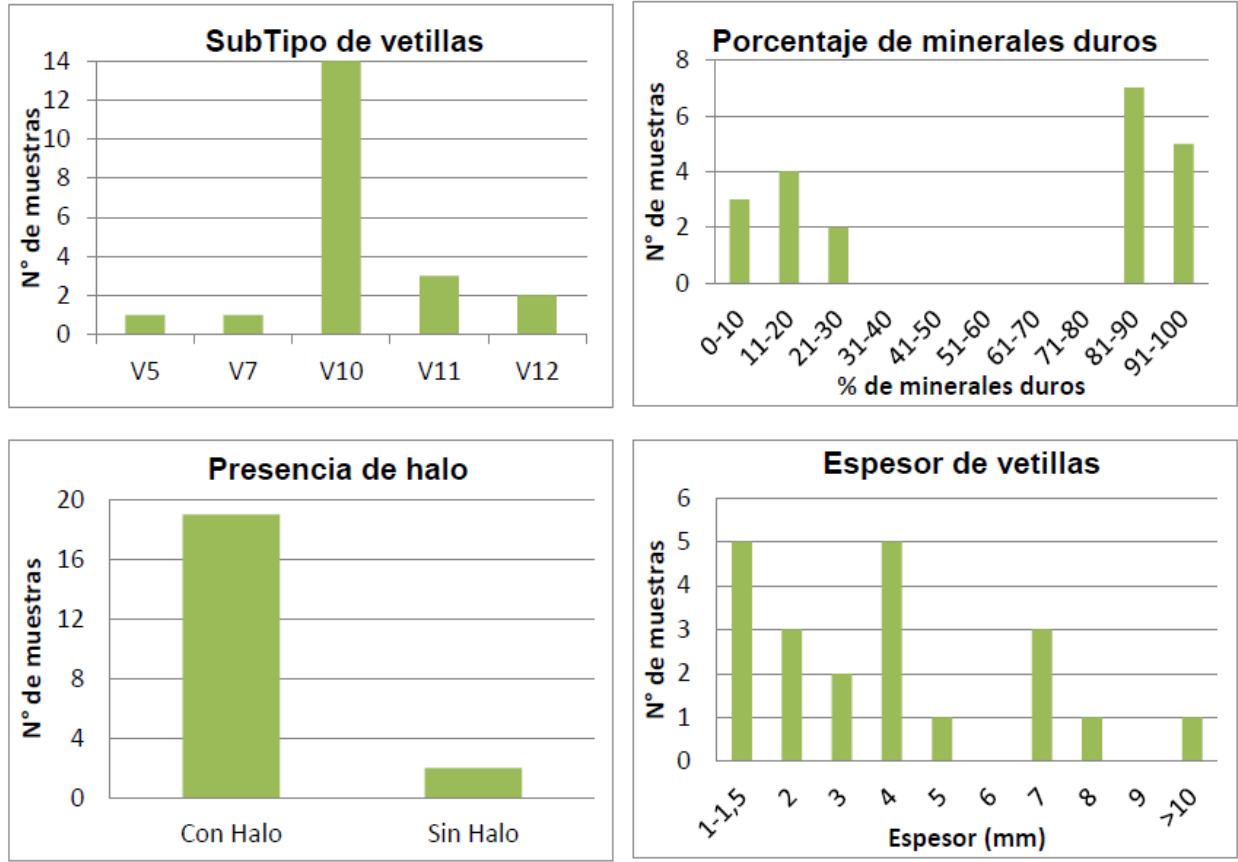


Figura 6.1. Esquema del corte que se realiza en algunas muestras para que el cilindro de roca que será ensayado contenga la vetilla en estudio en su centro.

**Espesor de vetillas:** la Figura 6.2 muestra un histograma con los espesores típicos de las vetillas en estudio. Estos van desde 1 mm hasta 13 mm y son mayormente menores a 5 mm.



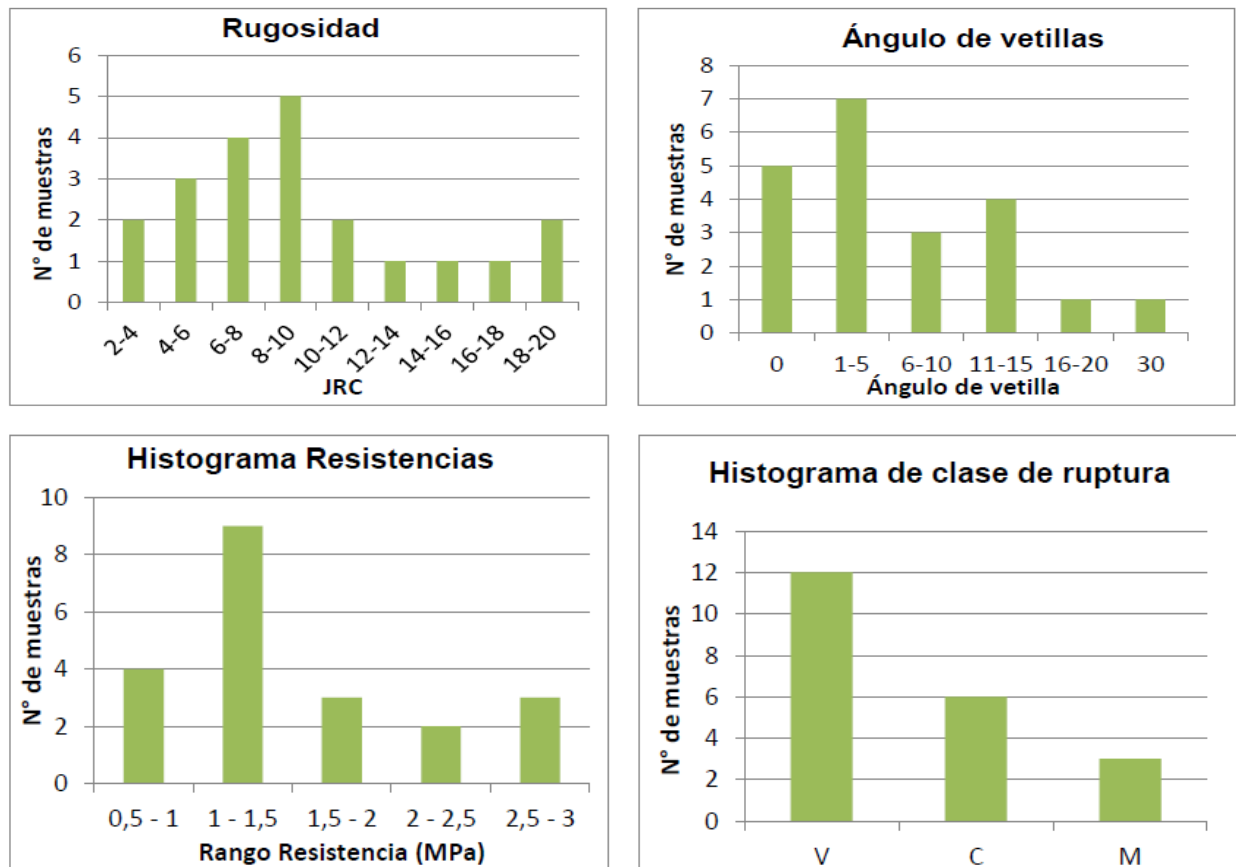
**Figura 6.2.** Resultados de la distribución de sub tipo de vetillas, porcentaje de minerales duros, presencia o ausencia de halo y espesor de vetillas.

**Rugosidad:** Con respecto a la rugosidad, representada por el JRC, en la Figura 6.3 se observa que las muestras cubren todos los rangos de JRC y los que más se repiten son los valores 6-8 y 8-10.

**Ángulo de vetilla:** Idealmente, las vetillas sometidas a ensayo de tracción directa deben ser ortogonales al esfuerzo de tracción aplicado, o sea ortogonales al eje del sondaje. Sin embargo, en la práctica no es así. En la Figura 6.3 se tiene un histograma con los ángulos medidos desde el plano ortogonal al eje del sondaje. Los valores varían entre 0 y 30°. Sólo 2 de las muestras presentan un ángulo mayor a 20° y el resto es menor o igual a 15°.

**Resistencia:** los valores obtenidos son bajos, van desde 0,5 MPa a 2,6 MPa. Las muestras NNM-66D, TO-2B, NNM-73B, TO-1A(2), DIO-2C presentan una resistencia mayor a 2 MPa, más alta que las demás y sobresalen en graficar todos los resultados juntos (Ver Figura 6.4). Como se muestra en la Figura 6.3 la mayoría de las vetillas presenta resistencia menor a 1,5 MPa.

**Clase de ruptura:** En la Figura 6.3 se puede observar que la forma más común de ruptura para las muestras ensayadas es a través del relleno de la vetilla (V). Le sigue en importancia el contacto vetilla/halo (C). La ruptura mixta ocurre en tres muestras, esta combina ruptura por la vetilla y por roca u otras vetillas. Hay un ensayo que no es incluido en el análisis puesto que presenta una ruptura anómala en la que el pegamento fue el que cedió primero.



**Figura 6.3.** Diagramas de resultados de rugosidad, ángulo de vetillas, resistencias y clase de ruptura obtenido en las muestras ensayadas. Las clases de ruptura son: a través de relleno (V), a través de contacto vetilla/halo (C) y ruptura mixta (M).

## **6.2 ANÁLISIS DE INFLUENCIA DE PARÁMETROS MINERALÓGICOS**

### **6.2.1 Subtipo de vetillas**

#### **6.2.1.1 Resistencia según subtipo de vetilla**

Sólo una vetilla calcopirita-bornita sin halo (V7) fue ensayada, con una resistencia a la tracción directa de 1,2 MPa, y una de cuarzo (de tipo V5) la que presentó un resultado no válido para el análisis del presente trabajo, pues cedió primero el pegamento que fija la muestra a la máquina de tracción.

Las resistencias de las 14 muestras tipo V10 ensayadas varían desde los 0,6 MPa hasta los 2,6 MPa.

El subtipo de vetillas V11, tuvo 4 muestras representantes, sus resistencias a la tracción se acotan entre 0,8 MPa y 1,2 MPa. A su vez, las vetillas tipo V12 ensayadas fueron solo 2 y sus resistencias son 1,8 y 2,2 MPa.

En la Figura 6.4 se tiene un gráfico que presenta las resistencias de todas las muestras agrupadas según sus respectivos subtipos de vetilla. Las vetillas V11 tienen resistencias bajas (inferiores a 1,2 MPa) y las vetillas V12 presentan resistencia a la tracción mayor a las anteriores (superior a 1,7 MPa). Las vetillas V10, cuyo relleno consiste en pirita y/o calcopirita predominante (al igual que las vetillas V11 y V12), presentan resistencias que varían dentro del rango 0,5-2,6 MPa. En base a esto, se tiene que el sub tipo de vetilla no es determinante en la resistencia a la tracción.

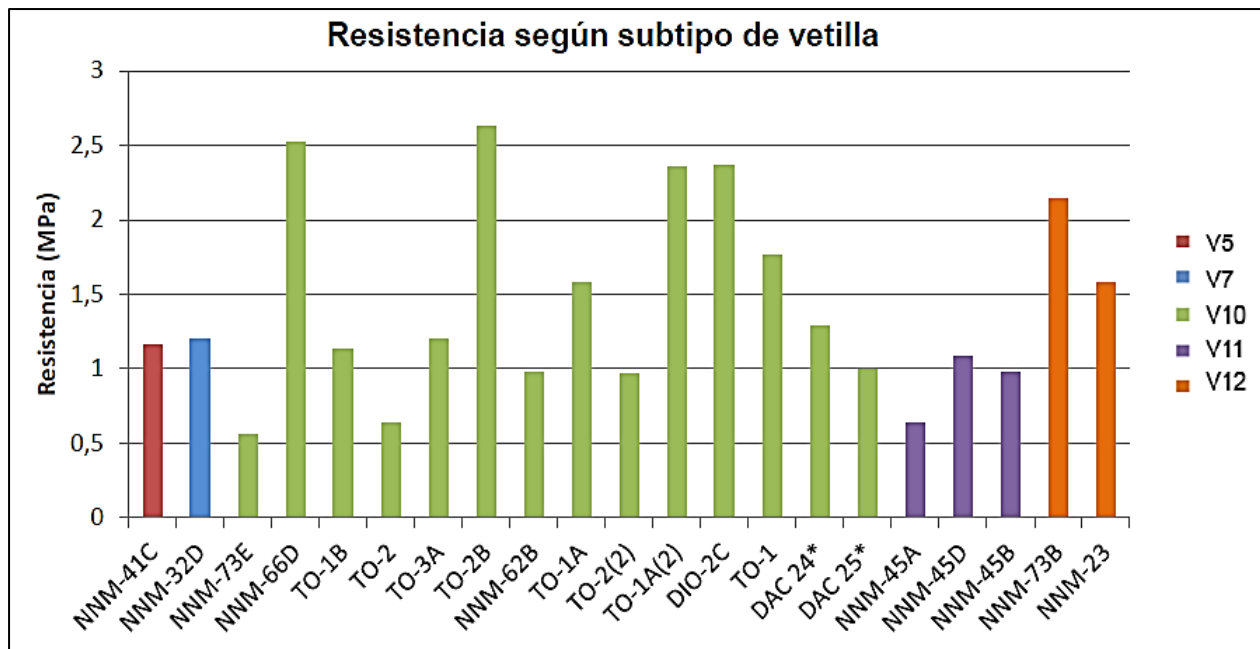


Figura 6.4. Resistencias a la tracción obtenidas en los ensayos en vetillas, se diferencian los subtipos de vetillas por color.

### 6.2.1.2 Clase de Ruptura Según Subtipo de Vetilla

La Figura 6.5 resume la clase de ruptura de las muestras dependiendo del subtipo. En ésta se observa en azul, que la vetilla de la muestra NNM-32D, de tipo V7 (predominancia de calcopirita-bornita), presentó una ruptura por el contacto vetilla/roca.

Las vetillas de tipo V10 son representadas en verde. Estas vetillas han roto predominantemente a través del relleno de la vetilla (ruptura clase V). Sólo 3 de ellas rompieron a través del contacto vetilla/halo y una rompió de forma mixta.

De las tres vetillas de clase V11 (morado), 1 presentó ruptura por el relleno (clase V) y las otras dos, ambas de calcopirita, presentan ruptura mixta. Las vetillas V12 presentaron una ruptura de clase C, es decir, a través del contacto vetilla/halo.

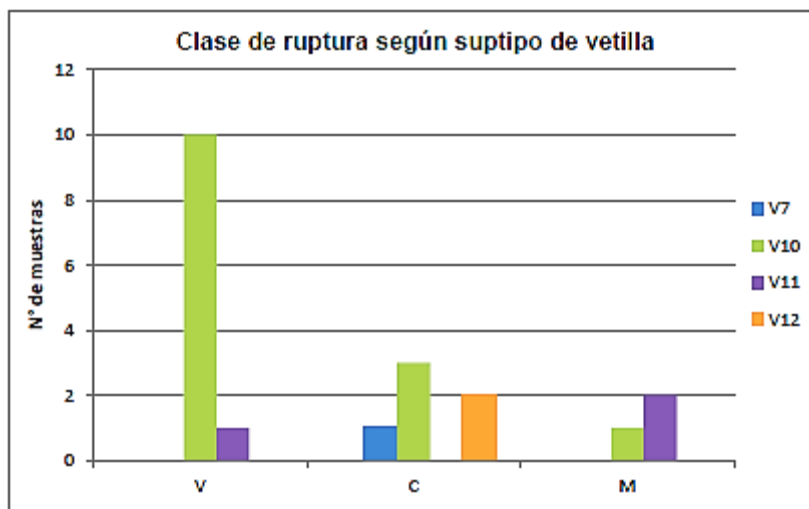


Figura 6.5. Histograma de clase de ruptura obtenida para cada subtipo de vetillas. V: por vetilla, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetilla y roca).

La Figura 6.6 presenta los esquemas de las muestras que tuvieron ruptura mixta. Entre ellas se tiene la muestra TO-2(2), correspondiente a una vetilla V10 con predominancia de pirita, donde la ruptura ocurrió principalmente por el halo silíceo sericítico con un ángulo de  $35^\circ$  y en menor medida rompió por el medio de la vetilla (V).

Las otras dos muestras corresponden a vetillas V11 de calcopirita. En la muestra NNM-45B, la ruptura ocurrió por la vetilla principal y por una vetilla V6 (anhidrita sin halo) de espesor menor a 1 mm y en menor medida por una superficie de roca con abundante calcopirita diseminada. Mientras que en la muestra NNM-45A, ocurre por el contacto vetilla/halo de la vetilla principal (1 mm) y por otras vetillas de menos de 1 mm de espesor de tipo V6 (anhidrita sin halo) y V3 (relleno de cuarzo-biotita-clorita).



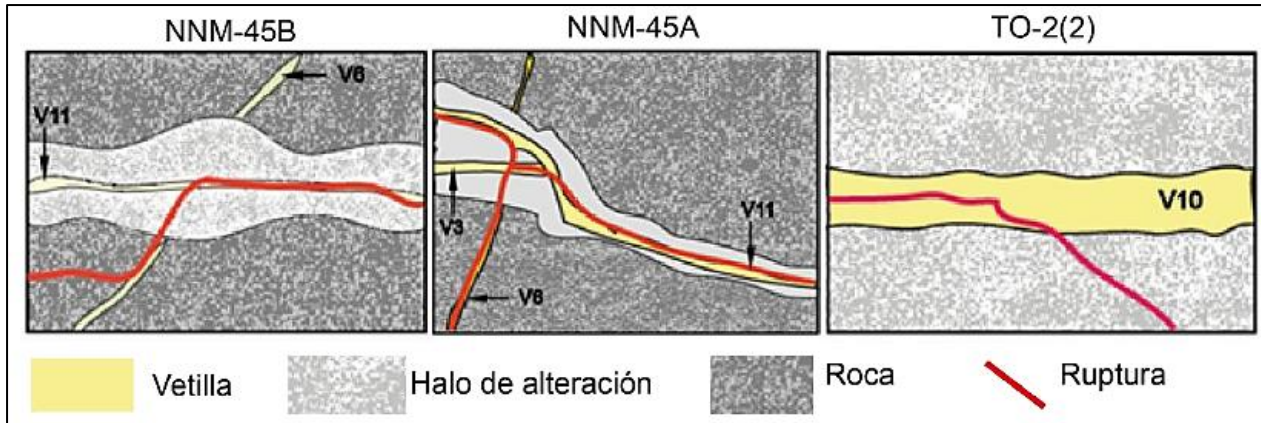


Figura 6.6. Esquemas de las muestras cuya ruptura resultó ser una combinación de superficies compuestas por distintas vetillas o roca de caja. Vetillas V10 y V11 corresponden a predominancia de pirita o calcopirita con halo sericítico-clorítico. Vetillas V6 tiene relleno de anhidrita sin halo.

## 6.2.2 Presencia de Halo

### 6.2.2.1 Resistencia según presencia o ausencia de halo

La mayoría de las vetillas estudiadas presentan halo y como se observa en la Figura 6.7, no se puede hacer gran comparación con la situación sin halo, dado que son solo dos muestras y una de ellas presentó una ruptura anómala (por lo que no se considera para este estudio).

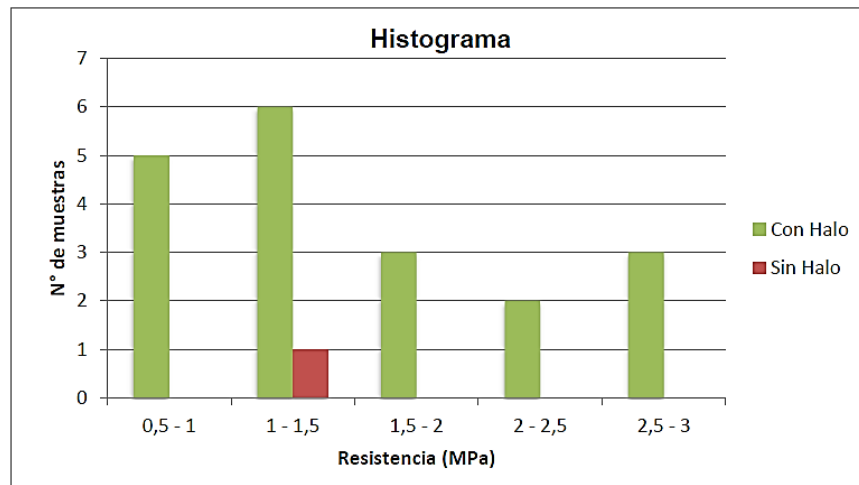
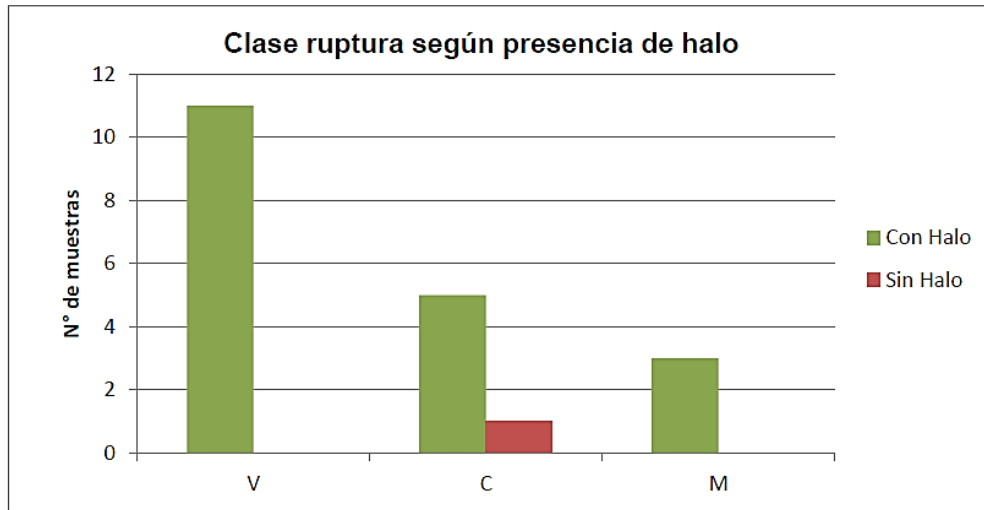


Figura 6.7. Histograma de resistencias a la tracción obtenida en muestras de vetillas con y sin halo.

### 6.2.2.2 Clase de ruptura según presencia o ausencia de halo

La Figura 6.8 presenta el histograma de las clases de ruptura para vetillas con y sin halo. En el caso de vetillas con halo, predomina la ruptura clase V, le sigue la ruptura clase C y luego la mixta. La vetilla sin halo, con resultado válido, rompió por contacto vetilla/roca (C).



**Figura 6.8.** Histograma de clase de ruptura para muestras de vetilla con halo. V: ruptura por vetilla, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetillas y roca).

### 6.2.3 Porcentaje de minerales duros

#### 6.2.3.1 Resistencia versus porcentaje de minerales duros para vetillas de Py, Cpy o Cpy-Bo

El gráfico de resistencia a la tracción versus porcentaje de minerales duros (Figura 6.9) muestra dos familias de datos, una de porcentaje menor a 30% de minerales duros y otra de sobre 80% de minerales duros.

Al mirar las dos familias por separado no se encuentra ningún patrón. Para un mismo porcentaje, la resistencia toma varios valores dentro del rango 0,5-2,5 MPa.

Lo anteriormente mencionado es expresado en la Figura 6.10, donde se ha separado el porcentaje de minerales duros en rangos y graficado las resistencias obtenidas. Sólo en el rango de 0-10% minerales duros se tiene un valor acotado entre 1,1 MPa y 1,3 MPa, sin embargo en los demás rangos se encuentran grandes variaciones. Lo que indica que el porcentaje de minerales duros no controla por si solo a la resistencia.

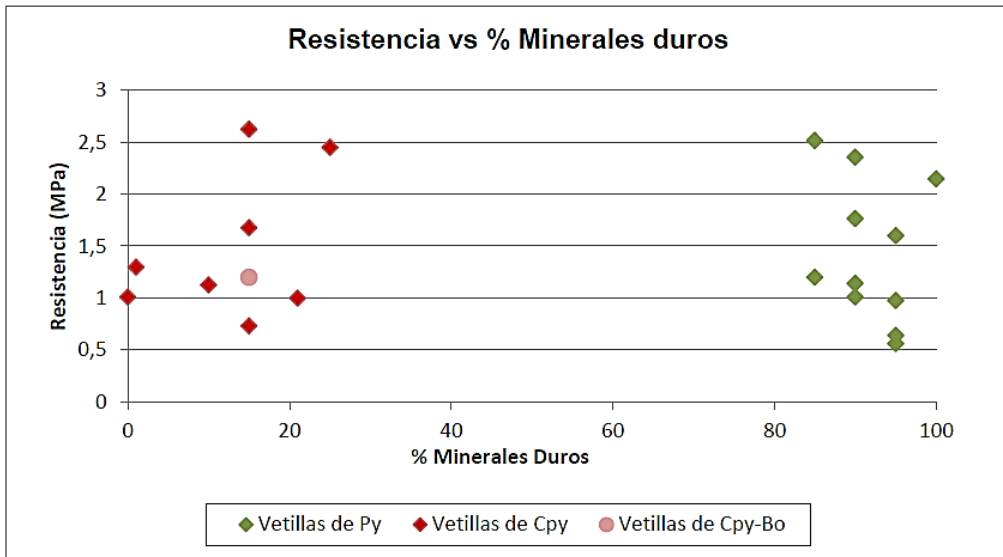


Figura 6.9. Resistencia a la tracción vs % de minerales duros diferenciando entre vetillas de pirita y calcopirita.

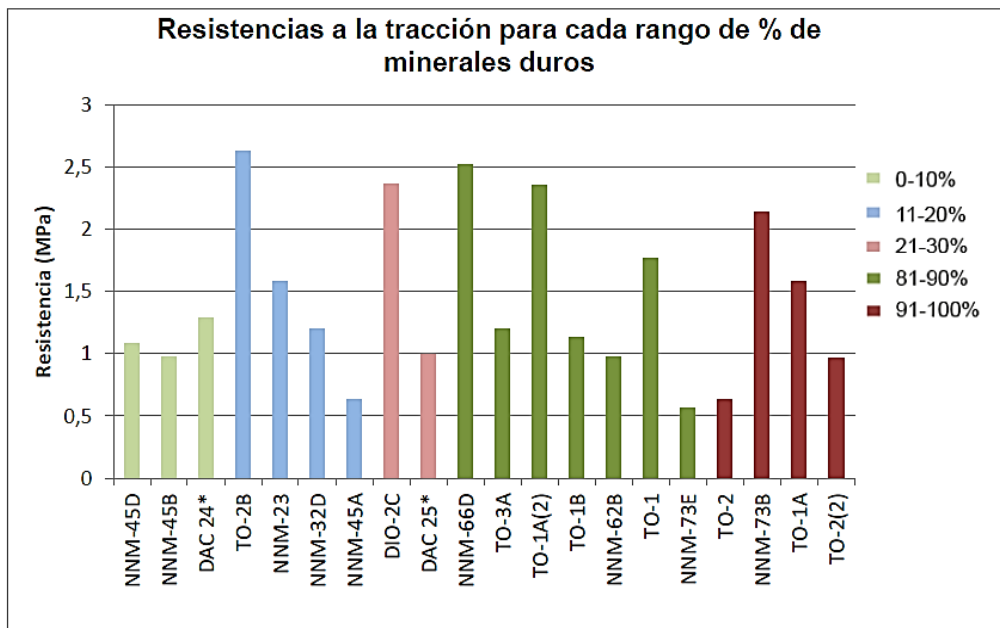


Figura 6.10. Resistencias agrupadas por rango de porcentaje de minerales duros.

### 6.2.3.2 Clase de ruptura según porcentaje de minerales duros

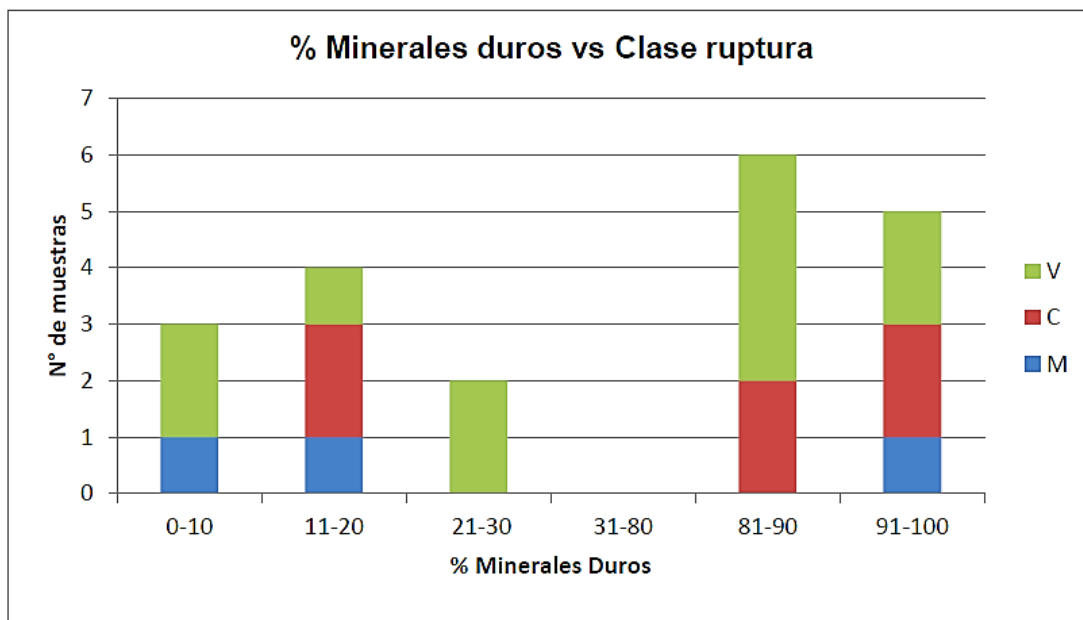
En la Figura 6.11 se muestran en un diagrama de columnas porcentual, las clases de ruptura para distintos rangos de porcentajes de minerales duros. La Figura 6.12 presenta un histograma en que se separan las vetillas en aquéllas con >80% de minerales duros, las que

corresponden a predominancia de pirita, y las de <30%, de calcopirita. Se graficó las clases V, C, R y M.

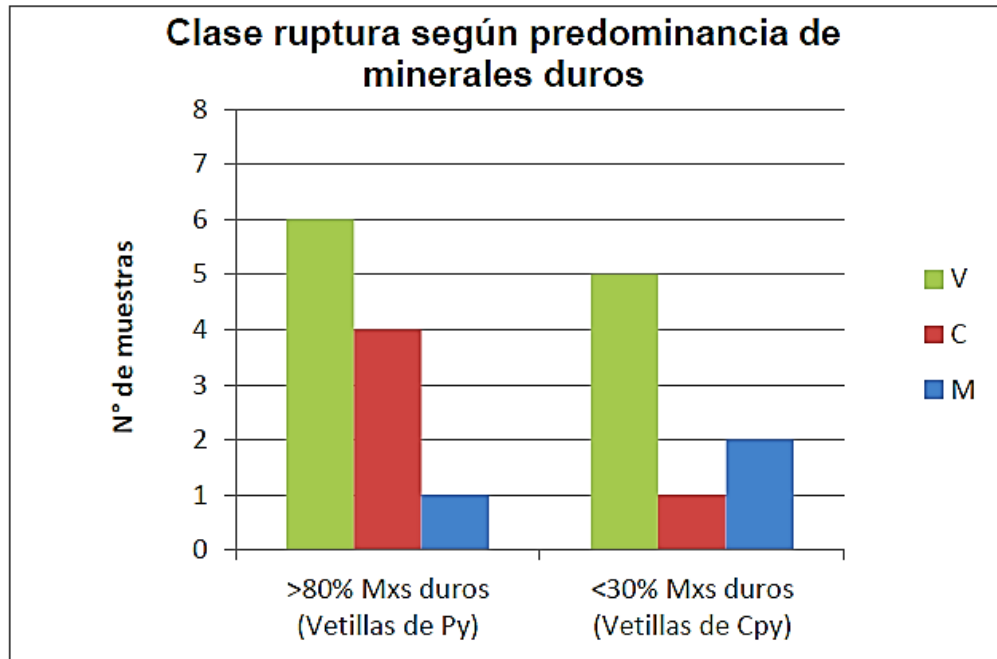
A partir de ellas se puede observar lo siguiente:

- En todos los rangos hay vetillas con ruptura por el medio del relleno (clase V) y en general, esta clase predomina (exceptuando el caso de 11-20%).
- La ruptura por contacto vetilla/halo y mixta ocurren en menor medida, tanto en vetillas con alto, como con bajo contenido de minerales duros.

No se encuentra en estos gráficos ningún patrón aparente que haga pensar que el porcentaje de minerales duros controla la forma de romper de la vetilla ante un esfuerzo de tracción.



**Figura 6.11.** Diagrama porcentual de clase de ruptura para cada rango de % minerales duros. Las clases de ruptura son V: ruptura por vetilla, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetillas y roca).



**Figura 6.12.** Histograma de clase de ruptura para vetillas de Py y de Cpy. V: ruptura por vetilla, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetillas y roca).

## 6.3 Espesor

### 6.3.1 Resistencia Versus Espesor

#### 6.3.1.1 Resistencia Versus Espesor

En la Figura 6.13. se hace un desglose de los datos en rangos de espesor. Los rangos de espesores menores presentan resistencias relativamente similares entre ellas, con alguna excepción, como es el caso de la muestra NNM-23 de 1-1,5 mm, NNM-73B de 2 mm y NNM-66D de 4 mm de espesor; las que presentan valores mayores al resto.

En la Figura 6.14 se muestra el promedio de resistencia de cada rango de espesor. En el cual parece haber una tendencia creciente hasta los 3 mm y luego una decreciente. Sin embargo, algunos rangos tienen escasas muestras, como es el ejemplo del espesor 8 mm que tiene sólo la muestra TO-2B, la cual se sale de la tendencia con su resistencia mayor a 2,5 MPa. Es necesario un análisis más profundo y contar con mayor cantidad de datos para confirmar o desechar lo observado en la Figura 6.13.

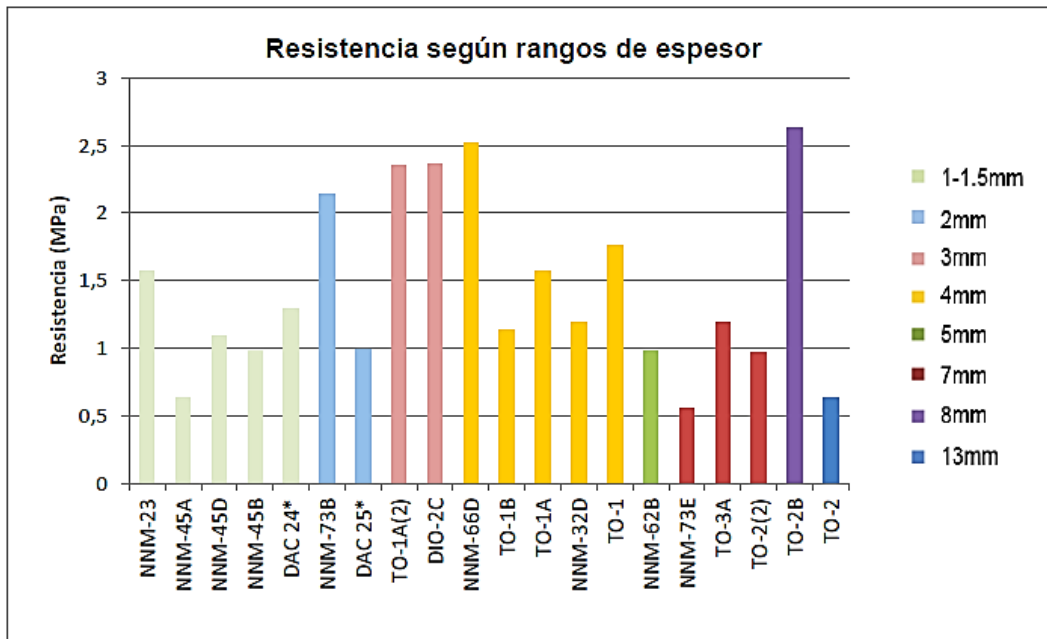


Figura 6.13. Diagrama de resistencia a la tracción para cada espesor típico.

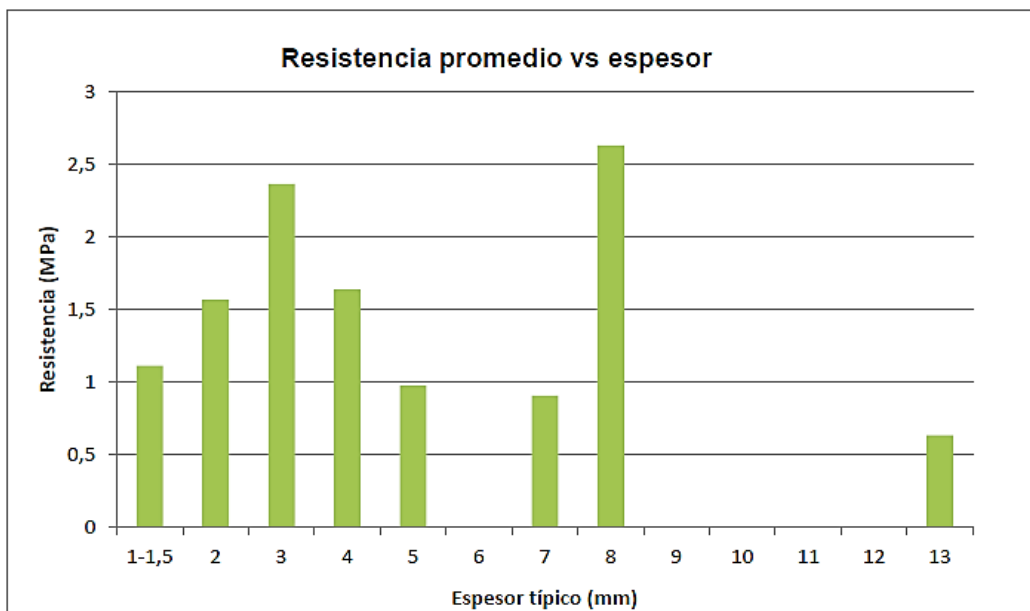


Figura 6.14. Promedios de resistencia para los distintos espesores típicos observados.

### 6.3.1.2 Resistencia versus espesor para vetillas de Py, Cpy y Cpy - Bo

La Figura 6.15 muestra un gráfico de espesor de la vetilla versus resistencia a la tracción en el que se distingue a las muestras según su mineral predominante. Al distinguir las vetillas

según su mineralogía surge una clara tendencia decreciente en vetillas de pirita y una aparente tendencia creciente en vetillas de calcopirita.

No se dispone de suficientes datos de vetillas de calcopirita de espesores mayores a 2 mm, para asegurar la tendencia creciente, por lo que es necesario contar con más datos.

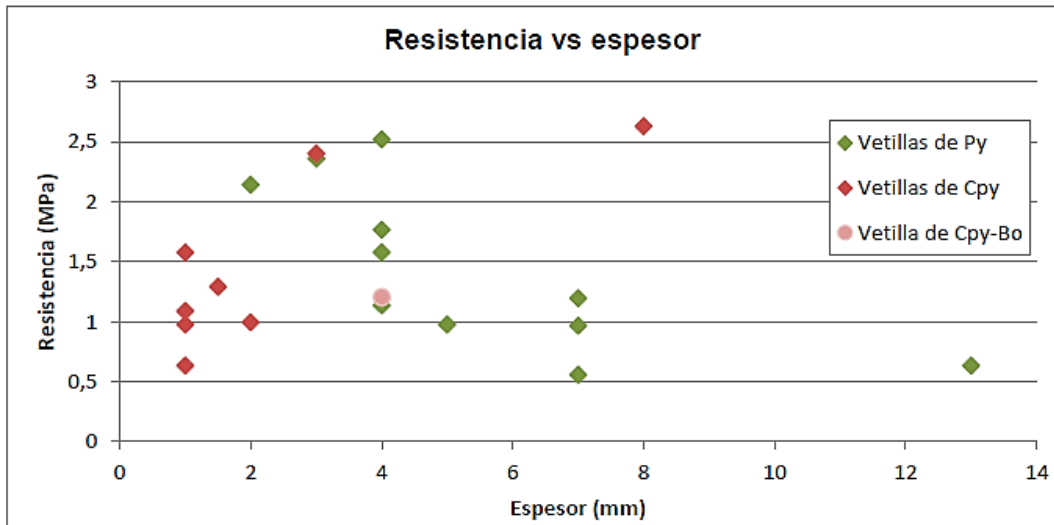
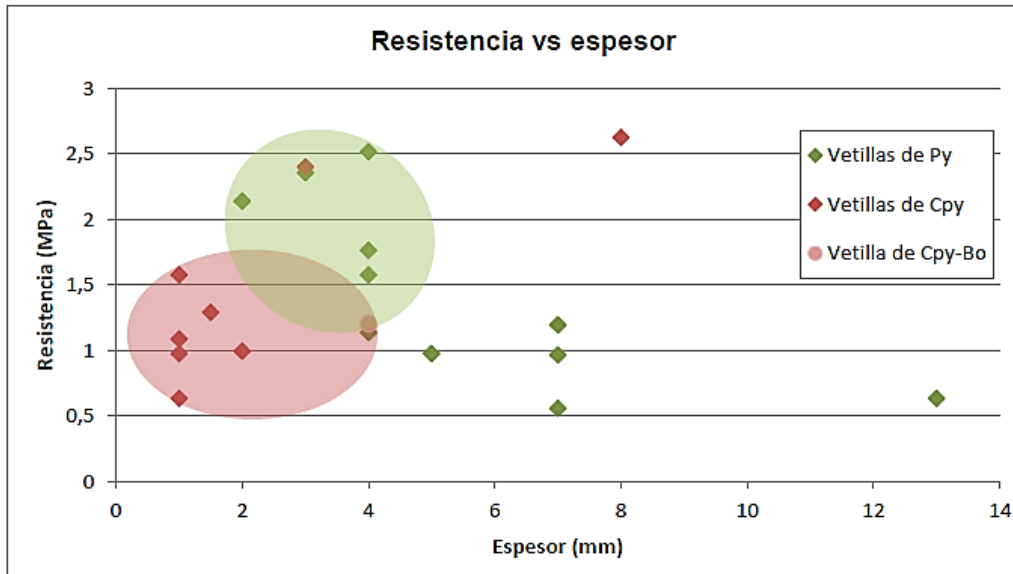


Figura 6.15. Resistencia a la tracción versus espesor típico para vetillas de Cpy, Py y Cpy-Bo.

### 6.3.1.3 Resistencia de vetillas de pirita y de calcopirita según el espesor.

En el gráfico de resistencia a la tracción directa vs espesor se puede observar que en espesores bajo los 4 mm las vetillas de pirita presentan mayor resistencia que las vetillas de calcopirita (Figura 6.16).

La única muestra de calcopirita que se posee sugiere que en espesores mayores a 5 mm las vetillas de calcopirita superan en resistencia a las vetillas de pirita. Sin embargo, la escasez de datos hace que este comportamiento sea poco claro.

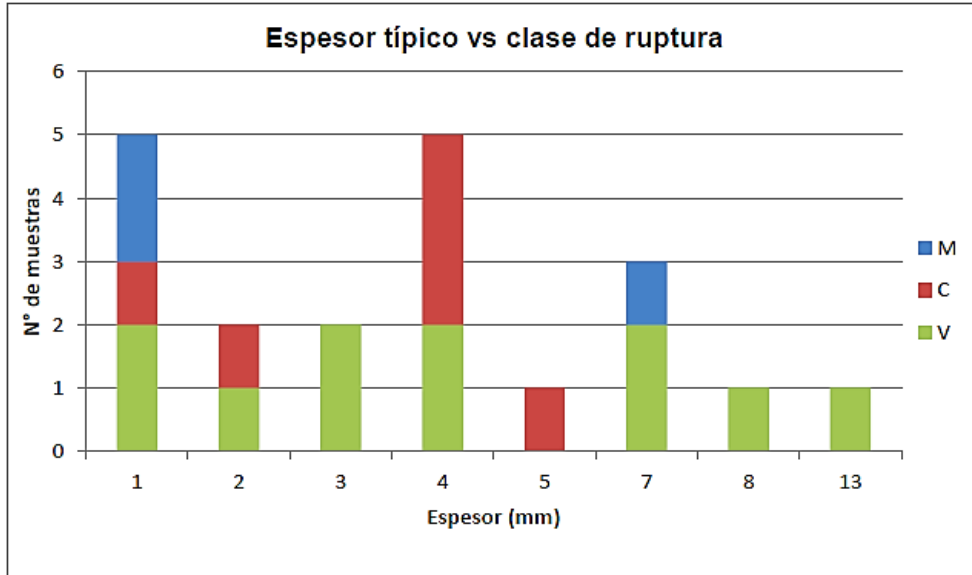


**Figura 6.16.** Resistencia a la tracción de vetillas de pirita es mayor a la resistencia de las vetillas de calcopirita de rango de espesor 1-4 mm. Para espesores mayores la relación no es clara por falta de datos.

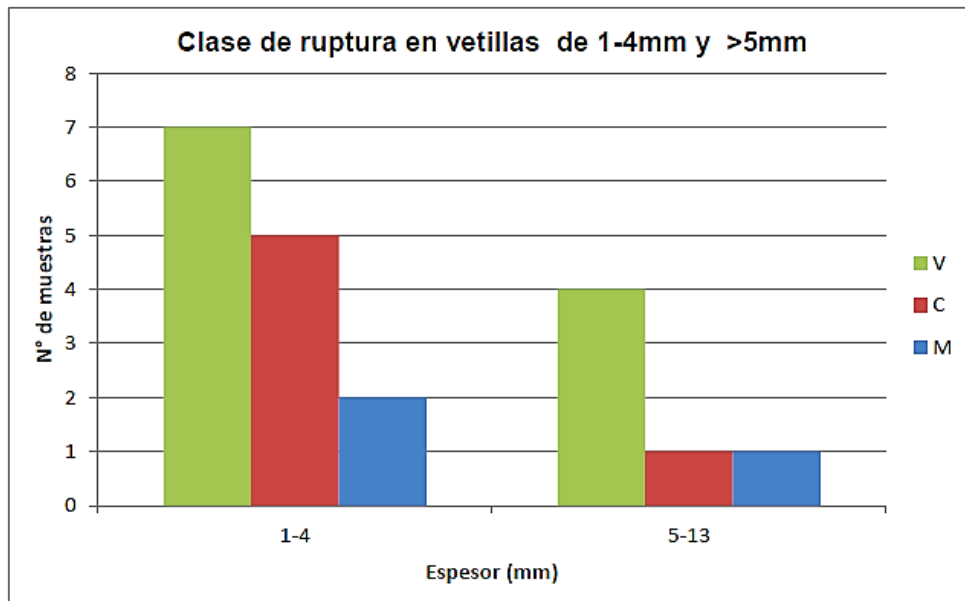
#### 6.3.1.4 Clase de ruptura según espesor de vetilla

Para el análisis de la influencia del espesor de la vetilla sobre la forma de romperse en ensayo de tracción, se definieron distintos rangos de espesor típico y se graficó la ocurrencia de cada clase de ruptura en un diagrama de columnas, el cual se presenta en la Figura 6.17. Por otro lado, en la Figura 6.18 se presenta un histograma en el cual se definen dos rangos de espesor (1-4 mm y mayor a 5 mm). En ambas figuras se ve que la ruptura tipo V ocurre en casi todos los espesores, la ruptura por contacto vetilla/halo o vetilla/roca ocurre solo en muestras de espesor menor a 5 mm. La ruptura mixta ocurre en menor medida, tanto en vetillas delgadas como gruesas.





**Figura 6.17.** Diagrama porcentual de clase de ruptura para cada rango de espesor de vetilla. V: ruptura por vetilla, R: por roca, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetillas y roca).



**Figura 6.18.** Histograma de clase de ruptura para distintos rangos de espesor de vetilla. V: ruptura por vetilla, R: por roca, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetillas y roca).

## 6.3.2 Rugosidad de la Vetilla

### 6.3.2.1 Resistencia versus rugosidad

A continuación, en la Figura 6.19, se muestra un diagrama de columnas donde se representa la resistencia a la tracción de la muestra y la rugosidad expresada en diferentes colores para cada JRC.

En general las muestras de vetillas correspondientes al mismo JRC resultaron tener una resistencia similar o variar dentro de límites no tan alejados. Los JRC 6-8 y 8-10 presentan resistencias más variables y son los que tienen más datos. Por ejemplo, la muestra NNM-66D que tiene una resistencia muy alta en comparación con las demás muestras de igual JRC.

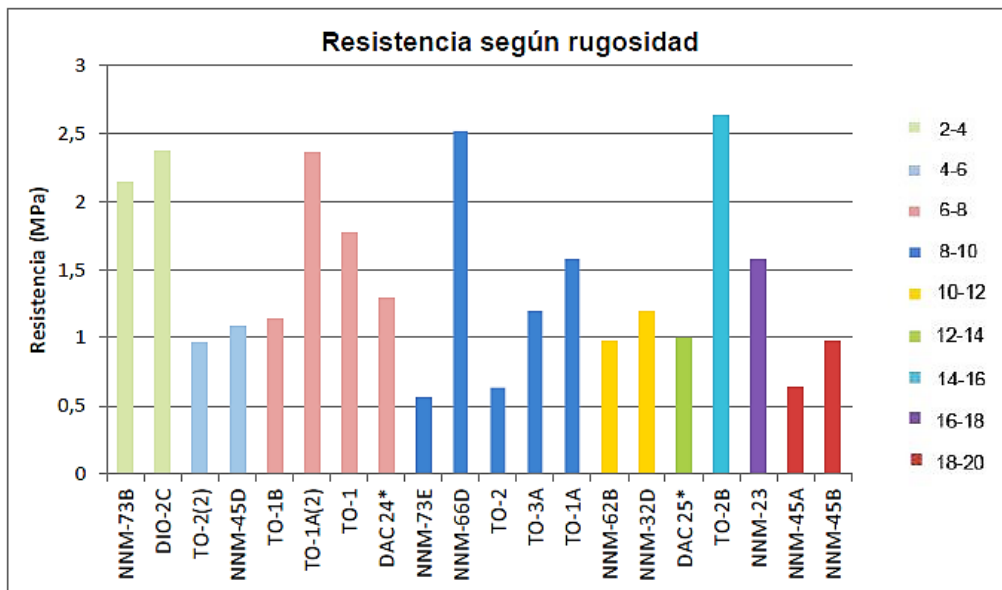


Figura 6.19. Diagrama de resistencia para distintos JRC.

La Figura 6.20 corresponde a los promedios de resistencia para cada rugosidad. En ella no se observa algún patrón entre ambos valores.

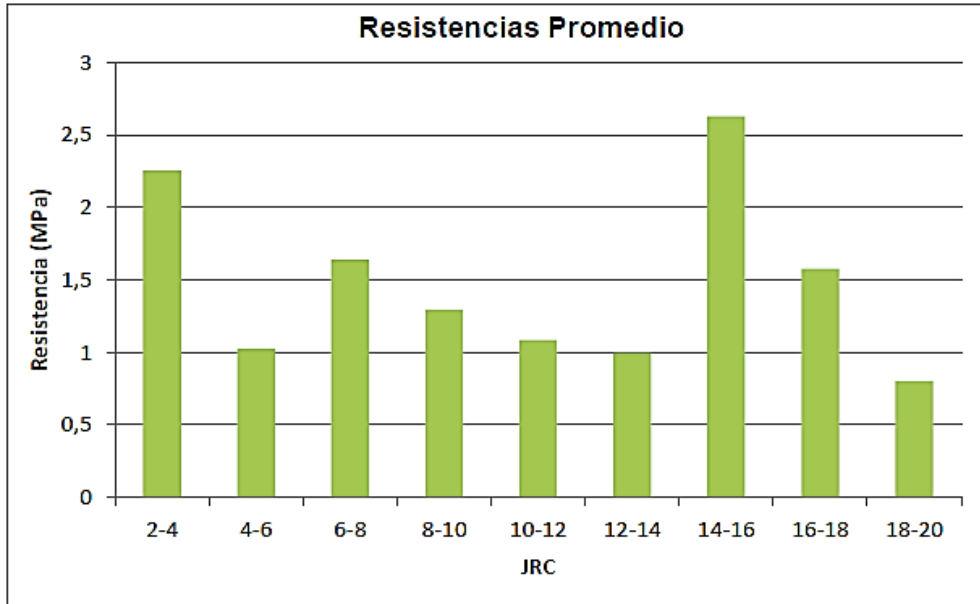


Figura 6.20. Diagrama Resistencias promedios para cada JRC.

### 6.3.2.2 Resistencia versus rugosidad para vetillas de Py, Cpy y Cpy-Bo

La siguiente imagen (Figura 6.21) presenta un gráfico de resistencia versus JRC. El JRC se expresa como un rango (por ejemplo JRC: 2-4). Por lo tanto, cada dato en el gráfico, ubicado en un punto impar del eje X, representa al rango dentro del que se ubica. Por ejemplo, los puntos más altos se ubican en el 19, es decir, JRC: 18-20. La figura tampoco muestra alguna relación o patrón evidente entre estos parámetros.

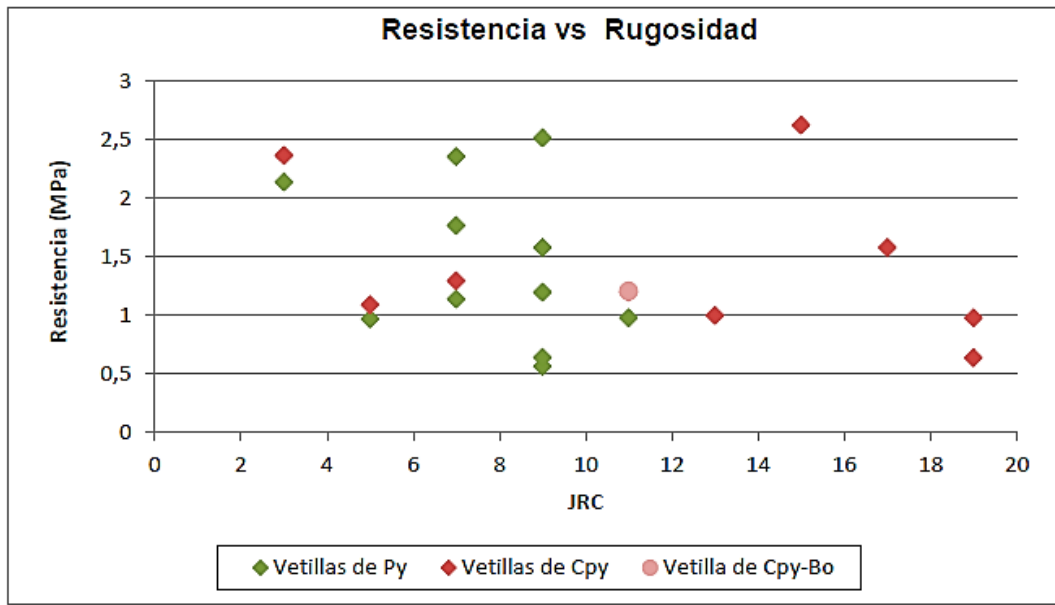


Figura 6.213. Gráfico de resistencia versus rugosidad para vetillas de Py, Cpy, Cpy-Bo

### 6.3.2.3 Resistencia versus rugosidad fijando el espesor

Previamente se observó que las resistencias de las vetillas de pirita y calcopirita varían al cambiar el espesor. Por esta razón es necesario mantener fijo este parámetro para analizar la influencia de la rugosidad.

Otro aspecto a considerar es que la rugosidad ejerce una clara influencia ante el actuar de esfuerzos de corte, pues se opone al movimiento de cizalle. Este tipo de stress aparece en el ensayo de tracción directa cuando la vetilla no es ortogonal al esfuerzo aplicado y actúa como una componente normal a la vetilla y otra de corte.

La Figura 6.22 muestra los gráficos resultantes al relacionar la resistencia a la tracción con el JRC de muestras del mismo rango de espesor. En cada gráfico se distingue, además, los casos de vetillas de ángulo aproximadamente ortogonal al esfuerzo aplicado (ángulo menor o igual a  $5^\circ$ ) y de vetillas inclinadas (ángulo mayor a  $5^\circ$ ). En éste no se encuentra ninguna tendencia clara en vetillas de pirita o calcopirita, de 1-4 mm ni de espesor mayor a 5 mm y tampoco en vetillas de diferente ángulo. La rugosidad parece no ser determinante en el ensayo de tracción directa. Sin embargo, un mejor análisis se puede llevar a cabo con mayor cantidad de muestras que permitan tener más datos al realizar las divisiones según espesor y ángulo.

Ya se ha observado que sólo en algunos casos la ruptura se produjo a través del contacto vetilla/halo, zona que fue utilizada para estimar el JRC de cada vetilla, por lo que puede ser útil realizar el análisis anterior pero considerando la rugosidad de la superficie de ruptura. La Figura 6.23 presenta esta situación, para cada rango de espesor de vetilla y distinguiendo las vetillas según su ángulo. Al igual que el JRC de la vetilla, el JRC de la ruptura no muestra relación clara con la resistencia a la tracción obtenida en los ensayos.

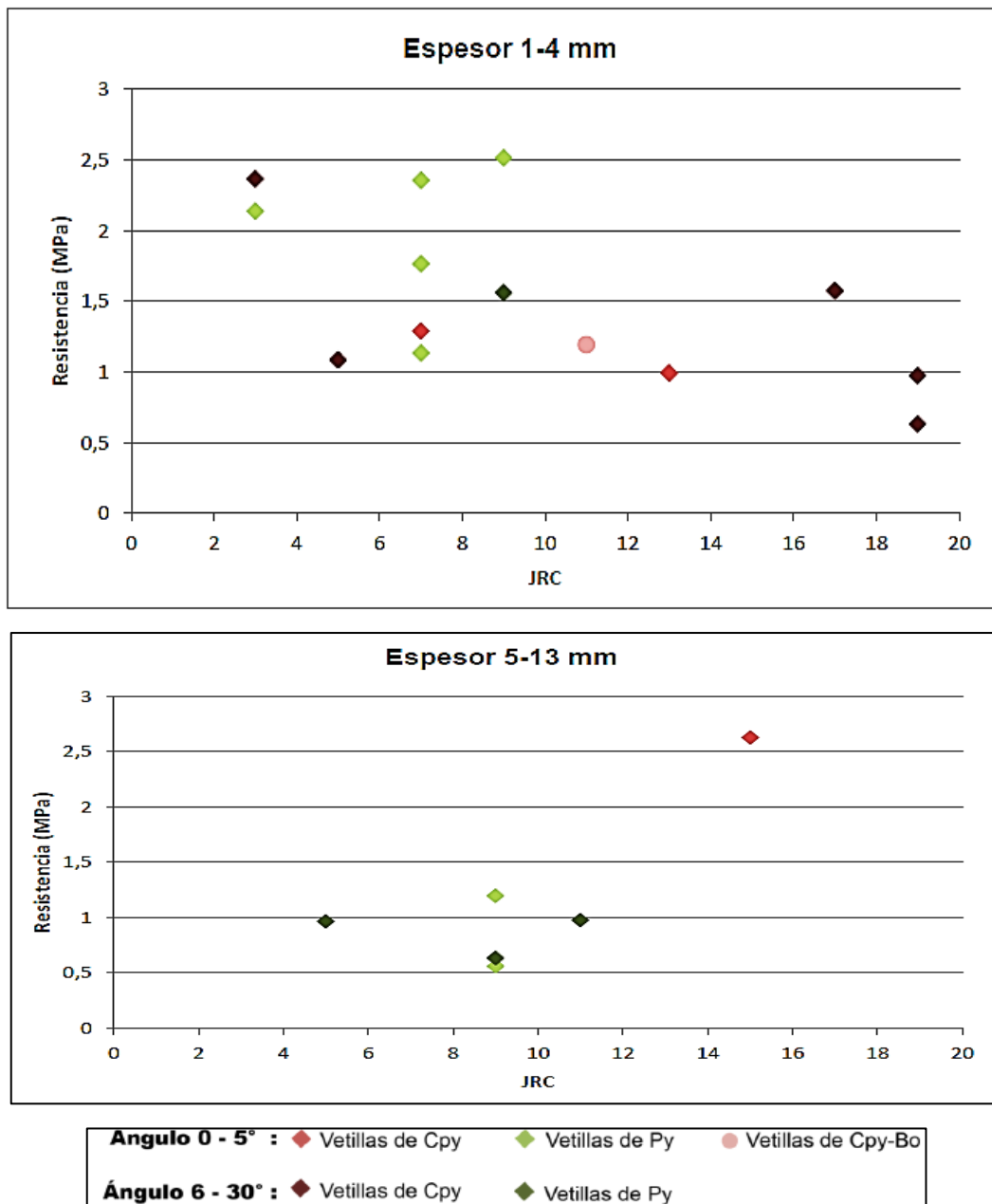
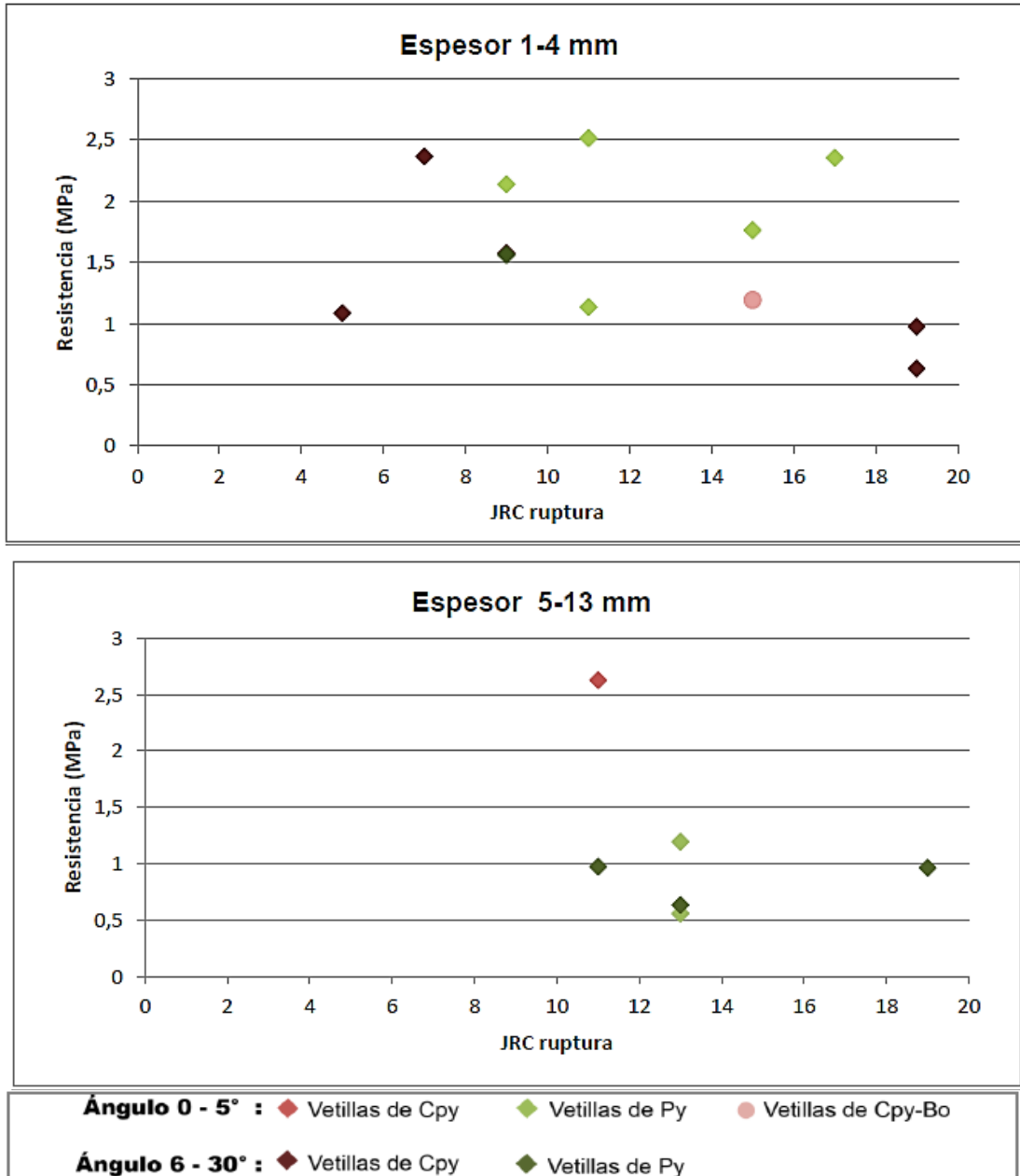


Figura 6.22. Resistencia versus JRC para distintos rangos de espesor y según ángulo.

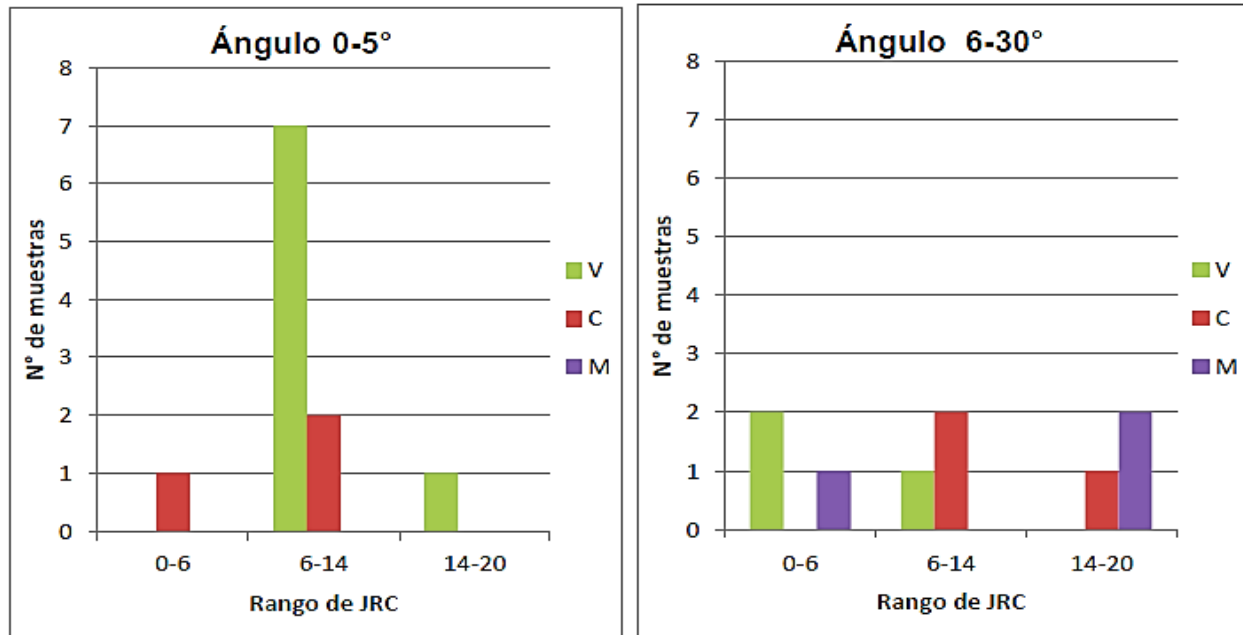


**Figura 6.23.** Gráficos de resistencia a la tracción versus JRC de la superficie de ruptura para vetillas de 1-4 mm de espesor y de 5-13 mm. Se distingue con colores entre vetillas de pirita y calcopirita de 0-5° y >5°.

#### 6.3.2.4 Clase de ruptura según rugosidad de la vetilla

En la Figura 6.24 se presentan dos diagramas de columna de las clases de ruptura en relación a la rugosidad, uno para vetillas de ángulo menor a 5° y otro para vetillas de ángulo mayor, en cada uno de ellos se agruparon los JRC en tres categorías. JRC 0 - 6, 6 -14 y 14 - 20. El resultado muestra que la ruptura V, por el medio del relleno de la vetilla, predomina en

vetillas de JRC 6-14 y ángulo de  $0-5^\circ$  y que la ruptura mixta (M) ocurre más en vetillas con JRC 14-20 de ángulo mayor a  $5^\circ$ . En los demás casos los datos son insuficientes para concluir.

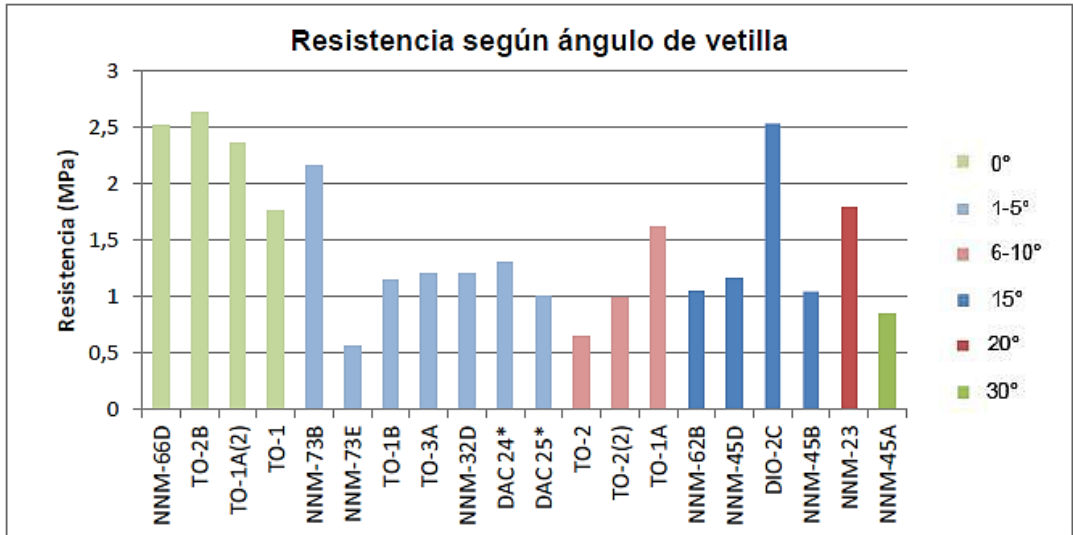


**Figura 6.24.** Diagramas de clase de ruptura para rangos de JRC de vetilla según el ángulo de la vetilla. V: ruptura por vetilla, R: por roca, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetilla y roca).

### 6.3.3 Ángulo de Vetilla

#### 6.3.3.1 Resistencia versus Ángulo de vetilla

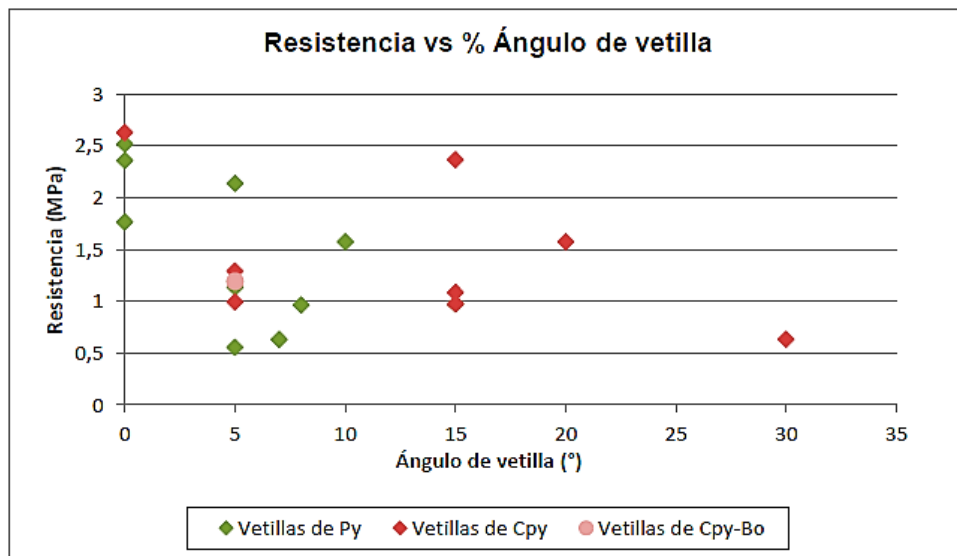
El ángulo de la vetilla contenida en cada probeta, con respecto al esfuerzo de tracción aplicado, es relacionado con la resistencia a la tracción resultante en el ensayo por medio del gráfico presentado en la Figura 6.25. Se observa que las vetillas que son ortogonales al esfuerzo (ángulo  $0^\circ$ ), las que experimentan esfuerzo de tracción puro, sin componente de corte, presentan las mayores resistencias. El resto de los rangos presenta resistencias, en general, más bajas y varían entre 0,5 MPa y 2,5 MPa.



**Figura 6.25.** Resistencia a la tracción para cada ángulo de vetilla.

### 6.3.3.2 Resistencia versus ángulo, para vetillas de Py, Cpy y Cpy-Bo

El gráfico de resistencia versus ángulo de vetilla según mineral predominante se encuentra en la Figura 6.26. A partir de este no se observa relación clara entre ambos parámetros, pero si se aprecia que las resistencias resultantes, tanto en vetillas de pirita como de calcopirita, son cercanas o mayores a 2 MPa cuando el ángulo es 0°.



**Figura 6.26** Resistencia a la tracción versus ángulo, para vetillas de Py, Cpy y Cpy-Bo.



### 6.3.3.3 Resistencia versus ángulo, fijando rugosidad y espesor

Es necesario realizar la correlación de la resistencia con el ángulo de vetilla manteniendo fijo el rango de espesor, puesto que este parámetro muestra una cierta influencia en el valor de las resistencias de las vetillas, como se mostró anteriormente. También es necesario considerar el comportamiento de las vetillas de diferente rugosidad, pues los mayores ángulos aumentan el actuar de esfuerzos de corte. En la Figura 6.27 se presentan los casos de JRC: 6-14 y JRC: 14-20 (el rango de JRC: 0-6 no se muestra debido a que contiene muy pocas datos y no aporta mayor información). A su vez, se distinguen las vetillas de 1-4 mm de espesor de las de 5-13 mm. Las vetillas de calcopirita de JRC alto (14-20) parecen mostrar una tendencia decreciente, en que a mayor ángulo se obtienen menores resistencias. En el caso de las vetillas de pirita de JRC: 6-14 no se observa ninguna tendencia.

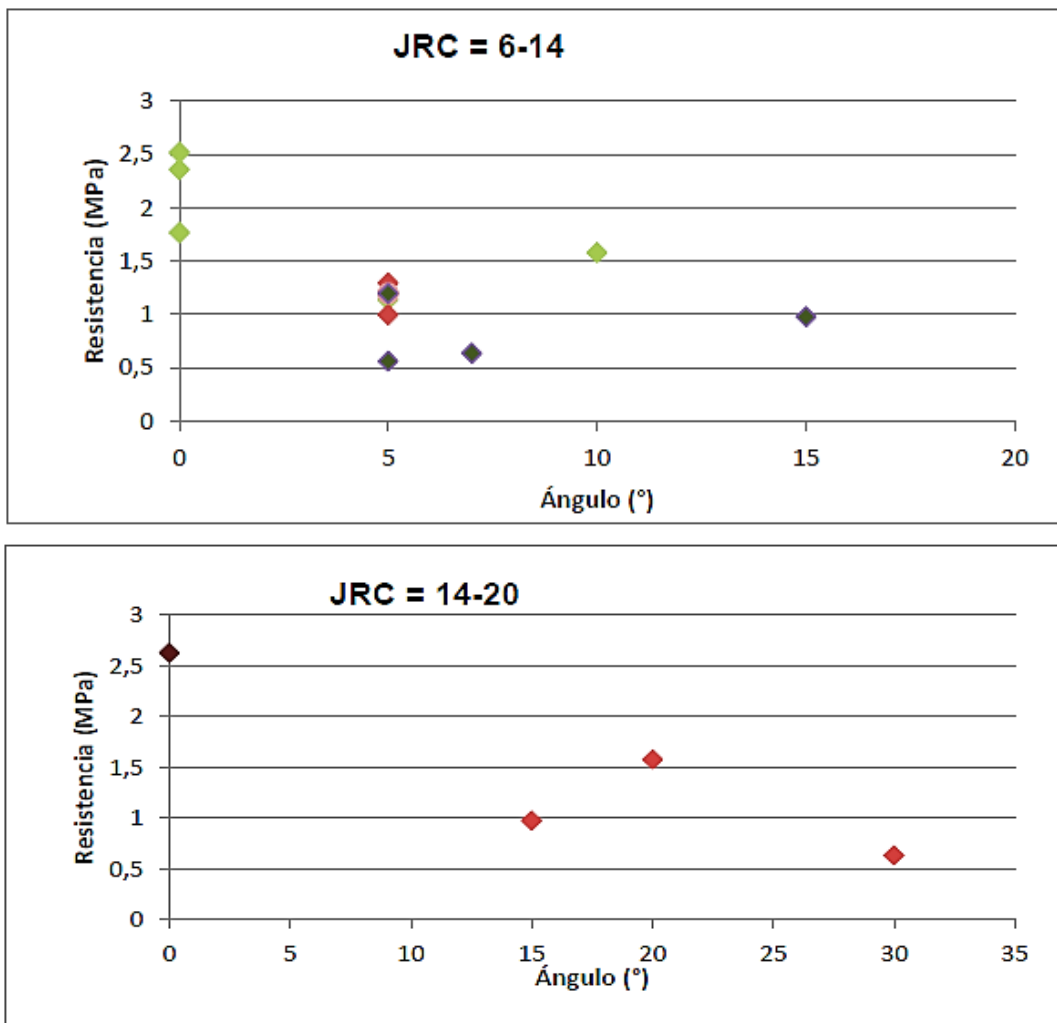




Figura 6.27. Resistencia a la tracción versus ángulo de vetilla para distintos rangos de JRC.

### 6.3.3.4 Clase de ruptura según ángulo de vetilla

La Figura 6.28 muestra la clase de ruptura para distintos rangos de ángulo de la vetilla con respecto al plano ortogonal al esfuerzo aplicado. En ellas se observa que la mayoría de las vetillas se ubican con un ángulo menor a  $5^\circ$  y que de estos, la mayoría rompe por el relleno de la vetilla (V). En el caso de la ruptura por contacto vetilla/halo o vetilla/roca, esta ocurre en casi todos los rangos. Se tiene, además, que la ruptura mixta sólo ocurre en vetillas de ángulo superior a los  $8^\circ$ .

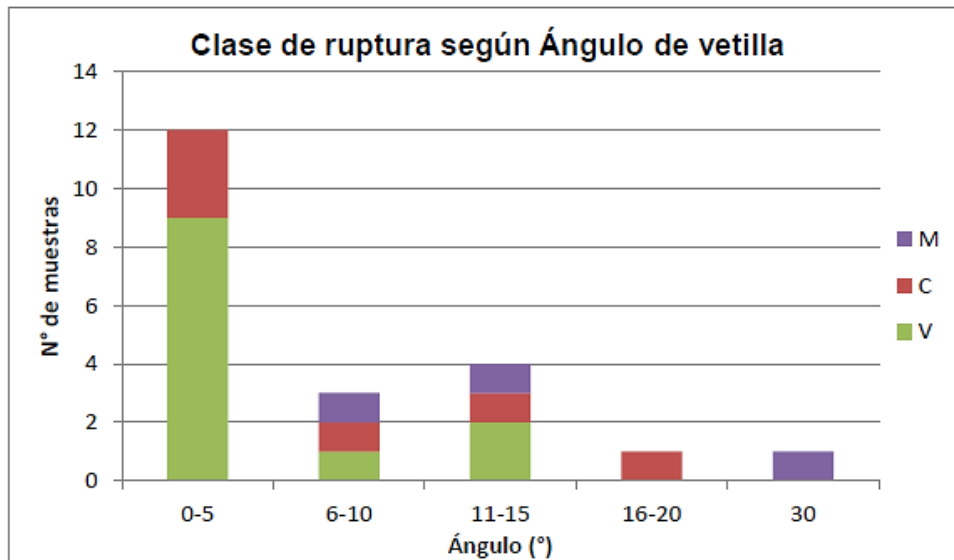


Figura 6.28. Diagrama de clases de ruptura según el ángulo de vetilla. V: ruptura por vetilla, C: por contacto vetilla/roca o vetilla/halo, M: mixto (vetilla y roca).

## 6.4 ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN SEGÚN PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y MINERALÓGICOS

### 6.4.1 Stress Límite de Comportamiento Elástico

Al relacionar los valores de stress en el puntos de fluencia, correspondientes al valor del stress en el límite de comportamiento elástico (parte recta de la curva stress vs strain), con porcentaje de minerales duros de cada vetilla se obtiene el gráfico de la Figura 6.29. En éste se

observa que las vetillas de calcopirita presentan valores que varían entre 0,26 MPa y 0,5 MPa, prácticamente el mismo rango que las vetillas, a excepción de tres muestras cuyo stress del punto de fluencia es de 0,1 MPa.

Si bien no se ve en el gráfico una tendencia que permita establecer una correlación entre el stress del punto de fluencia y el porcentaje de minerales duros. Éste si sugiere que tanto vetillas de pirita como de calcopirita inician su comportamiento plástico a stress similares y bajo los 0,5 MPa.

En el Anexo B se presentan los gráficos de stress en el punto de fluencia versus los otros parámetros (espesor, JRC y ángulo). En ellos no se encuentra ninguna regularidad.

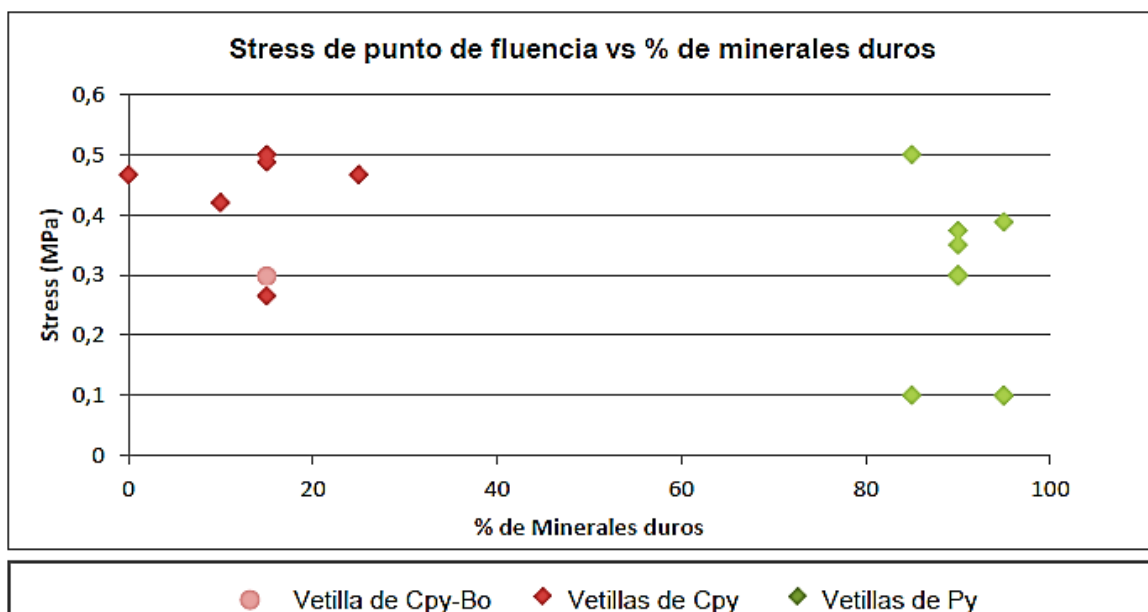


Figura 6.29. Gráfico de punto de fluencia versus porcentaje de minerales duros en vetillas de pirita y calcopirita.

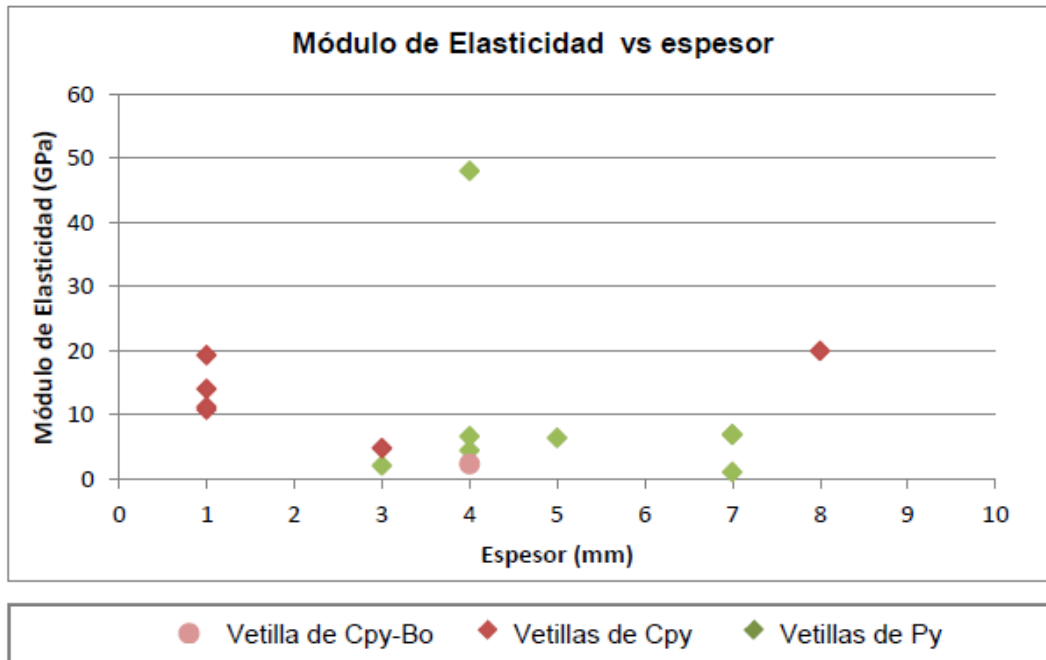
#### 6.4.2 Módulo de Elasticidad

En el gráfico de la Figura 6.30 se muestra la relación entre el módulo de elasticidad, correspondiente a la pendiente de la recta tangente en el principio de la curva, y el espesor de la vetilla.

Sólo una de las vetillas ensayadas presentó un módulo de elasticidad mayor a 40 GPa, y esta corresponde a una vetilla pirita de 4 mm, JRC: 6-8 y 0° de ángulo, que no muestra ninguna característica macroscópica que permita explicar este alto valor. Todas las demás vetillas, mantienen un valor inferior a los 20 GPa.

Omitiendo la muestra de pirita cuyo módulo de elasticidad resalta (muestra TO-1) todas las demás vetillas de pirita presentan un valor inferior a 7 GPa. Por su parte, las vetillas de calcopirita tienen, en su mayoría, valores entre 10 y 20 GPa (mayores a los de pirita)

En el gráfico de espesor no hay ninguna tendencia. En los gráficos de rugosidad y ángulo tampoco hay correlación.

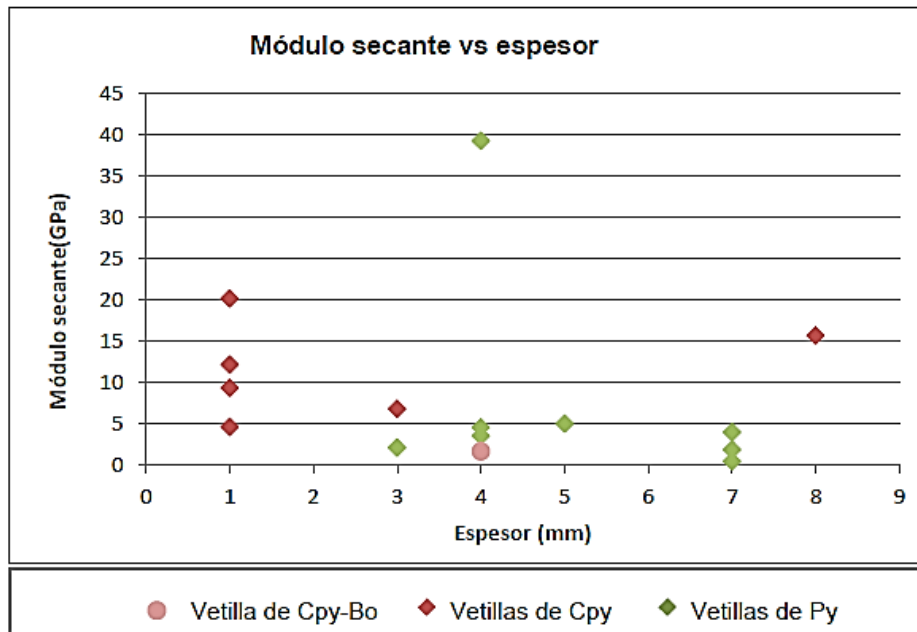


**Figura 6.30.** Gráfico de módulo de elasticidad vs espesor, JRC y ángulo.

### 6.4.3 Módulo Secante o Pendiente de la Secante en el 50% del stress aplicado

En la Figura 6.31 se presenta el gráfico de pendiente de la recta secante que pasa por la curva en el 50% del stress aplicado versus el espesor.

Las vetillas de calcopirita presentan módulos de 2 GPa a 21 GPa, sin mostrar ninguna tendencia en función del espesor. Por otro lado, las vetillas de pirita alcanzan valores inferiores a 5 GPa a excepción de una vetilla de 4 mm que alcanzan los 39 GPa.



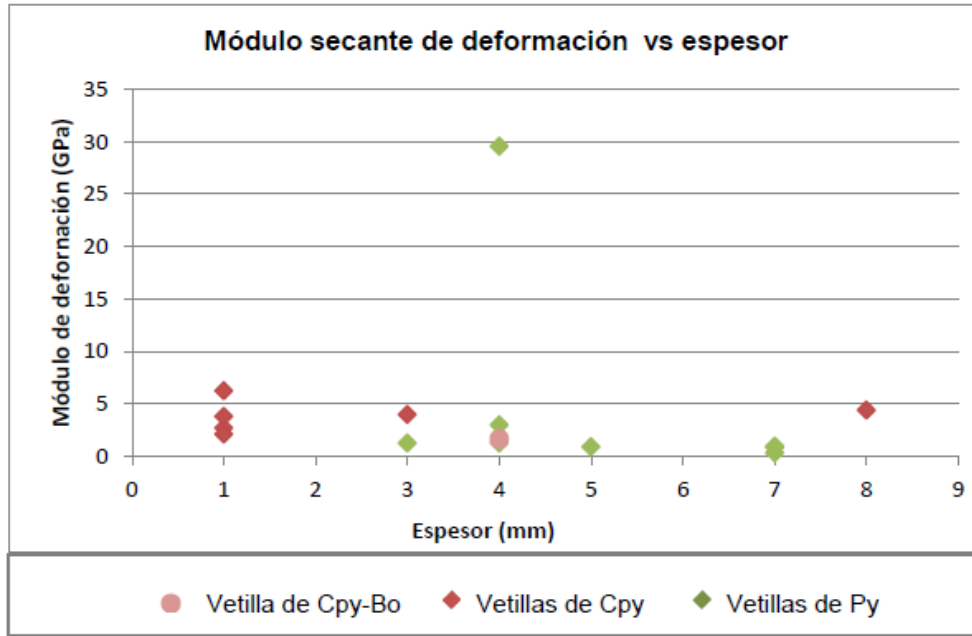
**Figura 6.31.** Gráficos de pendiente de la recta secante en el punto de 50% del stress aplicado vs parámetros geométricos.

#### 6.4.4 Módulo de Deformación o Pendiente de la Secante en el 50% de la de Formación

El gráfico expuesto en la Figura 6.32 corresponde a la relación entre la pendiente de la recta secante que pasa por la curva en el 50% de deformación y el espesor.

El total de las vetillas de calcopirita presentan módulos secantes de deformación menores a 6 GPa, pero no se observa ningún patrón.

Las vetillas de pirita alcanzan valores inferiores a 3 GPa, a excepción de una vetilla de 4 mm que alcanza los 30 GPa.



**Figura 6.324.** Gráfico de pendiente de la recta secante en el punto de 50% de deformación según espesor.

### 6.4.5 Strain Total

La Figura 6.33 contiene gráficos de deformación total versus el espesor y ángulo de las vetillas analizadas.

Las vetillas de pirita tienen valores de hasta  $3170 \mu\epsilon$ . Las de calcopirita alcanzan hasta  $1137 \mu\epsilon$  y la vetilla de calcopirita-bornita alcanza  $2577 \mu\epsilon$ . Se observa una tendencia creciente en vetillas de calcopirita, en que a mayor espesor, la vetilla presenta mayor deformación. Esta tendencia creciente no se observa al considerar las vetillas de pirita por separado. Por otra parte, la mayoría de las vetillas de pirita presenta mayores deformaciones que las vetillas de calcopirita.

El gráfico de strain total versus ángulo sugiere una tendencia decreciente donde las vetillas de calcopirita de mayor ángulo presentan menor strain. La rugosidad no muestra patrón alguno.

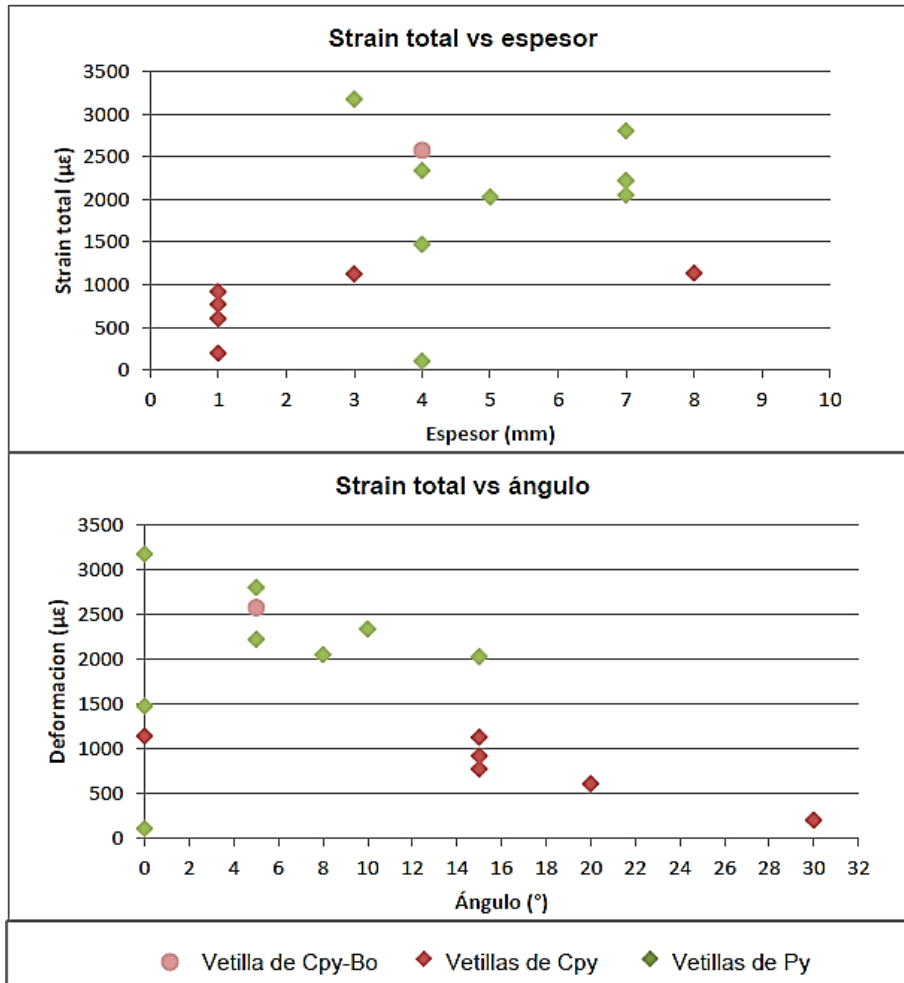


Figura 6.33. Gráficos de strain total vs porcentaje de minerales duros, espesor, JRC y ángulo.

## CONCLUSIONES

Las vetillas estudiadas presentan resistencias a la tracción que van desde 0,5 a 2,7 MPa. La mayoría de las muestras corresponde a vetillas V10, V11 y V12, cuyo relleno característico corresponde a pirita y/o calcopirita mayoritaria, con halo sericítico clorítico silíceo que difiere para cada subtipo en si es simple o doble. De acuerdo a lo anterior se realizó el análisis separando vetillas de pirita y calcopirita. La influencia del halo de la vetilla no fue evaluada puesto que se contó con solo dos muestras sin halo, los datos que permitirían realizar comparaciones son escasos.

A partir de la información extraída de los gráficos expuestos en este trabajo, se puede interpretar lo siguiente:

El porcentaje de minerales duros, considerando como tal aquellos que tienen dureza de Mohs mayor a 4,5 (cuarzo y pirita), no determina por si solo el valor de la resistencia y no se encuentra una relación clara al evaluar ambos valores manteniendo fijo el espesor o el JRC, pero se encontró que las vetillas de pirita (mineral de dureza alta, 6,5 en la escala de Mohs) tienen, en general, mayor resistencia a la tracción directa que las vetillas en las que predomina la calcopirita, en el rango de espesor de 1 a 4 mm, por lo que coincide con lo observado en ensayos de tracción indirecta anteriores, donde a mayor cantidad de minerales duros, mayor resistencia tiene la vetilla.

Con respecto al espesor de la vetilla, los datos disponibles indican que las vetillas de pirita disminuyen su resistencia al aumentar el espesor y que las vetillas de calcopirita se comportan al revés, al aumentar el espesor aumenta la resistencia. Sin embargo el caso de la calcopirita posee pocas muestras de espesor mayor a 4 mm por lo que esta tendencia puede deberse a otras causas. La relación debe ser comprobada con más muestras.

La rugosidad medida en la interfase vetilla/halo no parece influir en la resistencia, aun cuando la vetilla está inclinada y produzca un efecto de corte en vetilla. Tampoco hay correlación con el JRC de la superficie de ruptura.



Los gráficos de ángulo de vetilla con respecto al plano ortogonal a la dirección del esfuerzo de tracción aplicado tampoco muestran correlación con la resistencia.

Las vetillas de pirita y calcopirita tienden a romperse por el relleno de la vetilla (ruptura clase V) y en segundo lugar por contacto vetilla/halo (clase C).

Los parámetros mineralógicos y geométricos no muestran una influencia clara sobre la clase de ruptura en los gráficos presentados, los que en general muestran una distribución irregular, a excepción de las siguientes observaciones: La ruptura mixta aparece mayoritariamente en vetillas con JRC alto, 18-20 y con ángulo superior a 10°, además, ocurre en muestras que poseen más vetillas secundarias con rellenos más blandos, como anhidrita y biotita, por donde se propaga parcialmente la ruptura.

En general no se encuentran discrepancias entre los resultados de los ensayos presentados y los ensayos de tracción indirecta realizados con anterioridad. Solo el caso de la tendencia creciente de la resistencia con el espesor de las vetillas de calcopirita contradice lo señalado en la bibliografía, pero no es concluyente debido a la escasez de datos.

En relación a la comparación de los gráficos de stress versus strain, se concluye que:

El stress del punto de fluencia, considerado como el punto donde acaba el comportamiento lineal de la curva, de las vetillas de pirita y calcopirita están dentro del mismo rango (0,25-5 MPa), en algunos casos las vetillas de pirita obtienen un valor inferior (0,1 MPa). Estos bajos valores indican que el comportamiento plástico comienza a bajo stress.

Los módulos de elasticidad, secante en el 50% de stress y en el 50% de deformación son mayores en las vetillas de calcopirita. Lo que indica que estas son más rígidas. Los parámetros geométricos no muestran una influencia clara.

Por otro lado, las vetillas de pirita alcanzan un strain total mayor que las vetillas de calcopirita. Este strain total parece tener una relación con el espesor de la vetilla y su ángulo, con algunas excepciones. A mayor espesor, mayor strain total y a mayor ángulo, menor strain.

## RECOMENDACIÓN

A raíz de los análisis y resultados obtenidos en esta memoria de título, se recomienda en trabajos futuros:

Considerar una mayor cantidad de probetas de cada sector de la Mina, ya que debido a la menor cantidad de datos en comparación con los demás sectores no fue posible hacer una buena comparación en la mayoría de los parámetros estudiados. Lo obtenido para este sector, es solo una reseña de su comportamiento por lo que los resultados deben apoyarse con más datos.

Realizar un estudio de frecuencia de vetillas y ensayos geotécnicos, para otras litologías que estén presentes en los sectores productivos ya que como se concluyó en este estudio, las propiedades geotécnicas de la roca caja varían en función de su frecuencia y tipo de vetillas.

Replicar los ensayos de compresión simple y confinada para vetillas con un mayor porcentaje de rellenos metálicos como calcopirita o pirita, y contrastarlo con los resultados obtenidos.

Para los ensayos de deformación, se propone colocar strain gauges en las proximidades de las vetillas, para así poder determinar la deformación de estas o si tienen o no alguna influencia en la deformación de la matriz.

Se recomienda continuar con este estudio, agregando mayor cantidad de muestras las cuales posean variedad de espesores, ángulos, rugosidades y distintos subtipos, para mejorar la caracterización de las vetillas de pirita y calcopirita y sumar información de vetillas con otros rellenos.

Se recomienda también, realizar ensayos en muestras de roca intacta para poder comparar la resistencia a la tracción directa y deformación de las distintas litologías de la mina con la de las vetillas y con las resistencias ya conocidas por ensayos de tracción indirecta.

## REFERENCIAS

- a. ASTM International. 2001. Standard Test Method for Direct Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens.
- b. Barton, N. y Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mechanics. Viena, Austria. Rock Mechanics.
- c. Brown E.T. 1981. Rock Characterisation Testing and Monitoring, suggested methods. International Society for Rock Mechanics.
- d. Brzovic, A. 2001. Fundamentos Geológicos Para un Sistema De Clasificación Geotécnica Del Macizo Rocosó Primario, Mina El Teniente. Hundibilidad Fase I, API-T01m101 – G1187 / 01.
- e. DICTUC, S.A. 2010, Ensayos de laboratorio en vetillas para el Informe Geomecánico Pilares Mina Esmeralda, Reporte técnico (inédito), Universidad Católica. Santiago, Chile.
- f. Drake, R., Charrier, R., Thiele, R., Munizaga, F., Padilla, H., Vergara, M. 1982. Distribución & edades K-Ar de volcanitas post Neocomianas en la Cordillera Principal entre 32° & 36° Latitud Sur. Implicaciones estratigráficas & tectónicas.
- g. Farmer, 1983 Engineering Behaviour of Rocks. Segunda Edición.
- h. Godoy, E. 1993. Geología del Área entre los ríos Claro del Maipo & Cachapoal, Volumen I: Texto & Mapas, 67 p. Informe Final Proyecto CODELCO & SERNAGEOMIN.
- i. Godoy, E. & Lara, L. 1994. Segmentación estructural andina a los 33°-34° S. Nuevos Datos en la Cordillera Principal. 7° Congreso Geológico chileno, Acta.
- j. Hevia, B. 1984. Estudio Geotécnico De Probetas De Testigos De Sondajes Sometidas A Ensayos De Mecánica De Rocas. Informe De Práctica.
- k. Howell, F. & Molloy, J. 1960. Geology of the Braden Orebody, Chile. Economic Geology, Vol. 55, p. 863-905.
- l. Makshev, V.; Munizaga, F.; McWilliams, M.; Fanning, M.; Mathur, R.; Ruiz, J. &
- m. Padilla, R. 2004. Aplicación de Conceptos Geológicos en la estimación de la Resistencia A la Tracción en Vetillas selladas del Stockwork del Yacimiento El Teniente. Memoria Para Optar al Título de Geólogo. Universidad De Concepción, Departamento De Ciencias De La Tierra (Inédito): 150 pp. Concepción.
- n. Pilger, R. 1981. Plate reconstruction, a seismic ridges and low angle subduction beneath the Andes. Geological Society of American Bulletin, Vol. 92, p. 448-456.

- o. Rivera, O & Cembrano, J. 2000. Modelo de formación de cuencas volcanotectónicas en zonas de transferencia oblicuas a la cadena andina: El caso de las cuencas Oligo-Miocenas de Chile Central & su relación con estructuras NNW-NW (33° 00'-34° 30'S). Actas IX Congreso Geológico.
- p. Rojas, A. 2002. Petrografía & geoquímica del Pórfido Teniente, ubicado en el sector norte del yacimiento El Teniente, Provincia de Cachapoal, VI Región, Chile. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra, 133 p.
- q. Rojas, E.; Molina, R. & Cavieres, P. 2001. Preundercut caving in El Teniente mine, Chile. En Hustrulid, W. R. & Bullok, R. (Eds.) Underground Mining Methods; engineering fundamental and international case studies. Colorado, SME.
- r. Boletín N° 36 Serie A Geología de los Cuadrangulos 24-k y 25-k Matucana y huarochiri por Humberto Salazar Diaz, Marzo 1983.

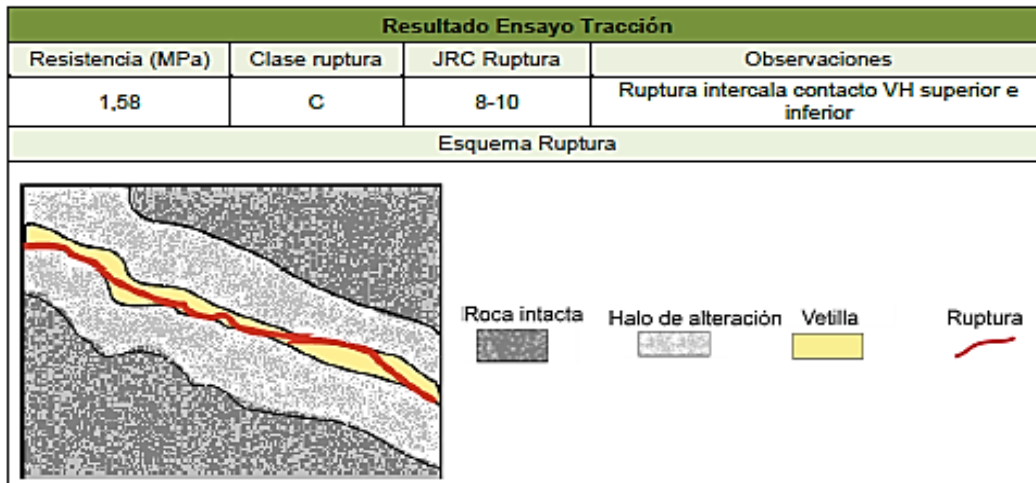
## ANEXO

Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
<b>NNM-23</b>	HP	V12	CMET	50

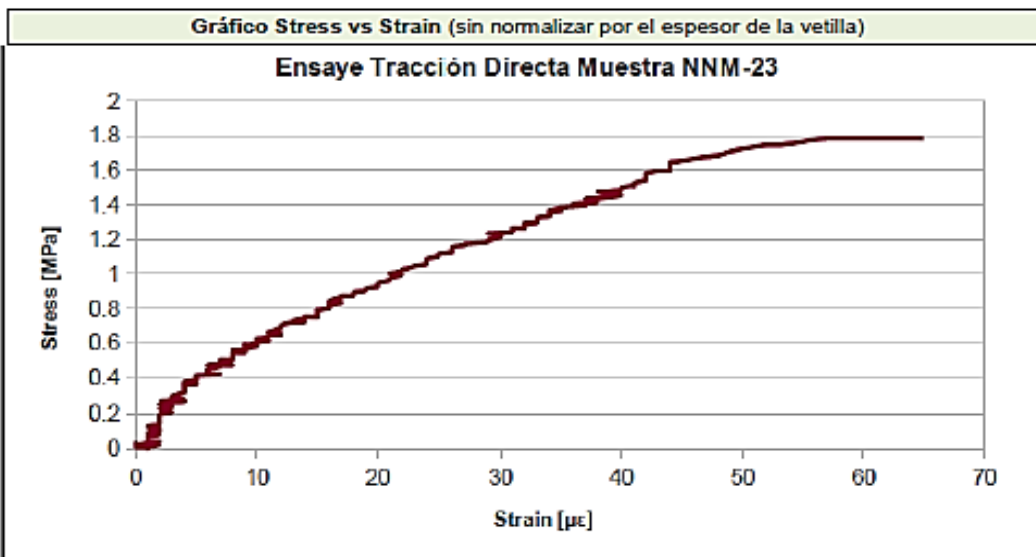
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Calcopirita	50	Silíceo-sericítico-clorítico. Cpy diseminada en el halo exterior
Anhidrita	30	
Cuarzo	15	
Clorita	5	
Observaciones		
Cúmulos de Cpy y Anh y Qz. Cl diseminada		

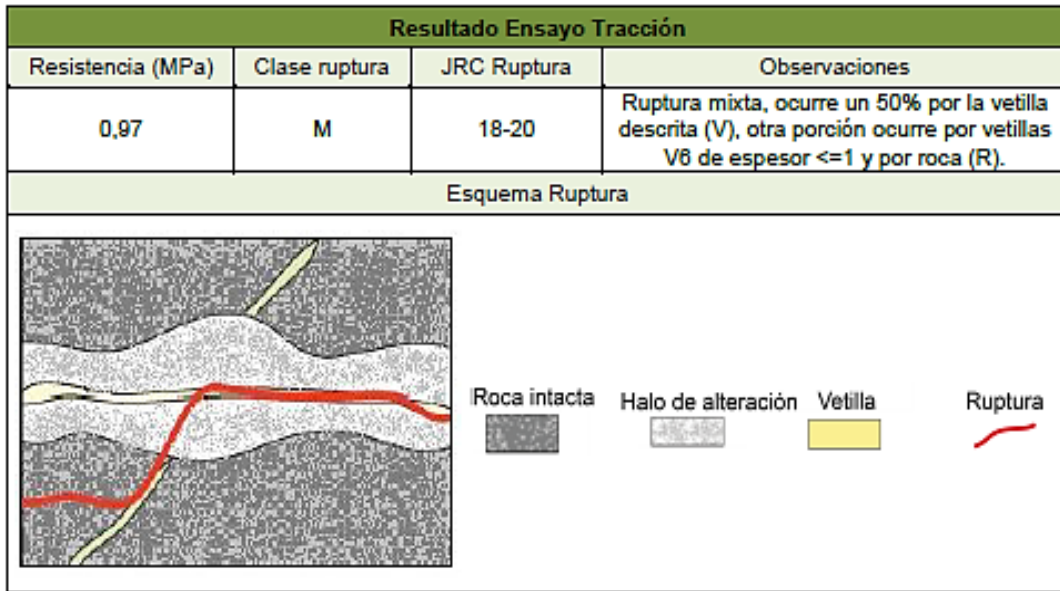
Geometría		
Ángulo (°)		JRC
20		16-18
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
1	2	1
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
4	8	6
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido e irregular		



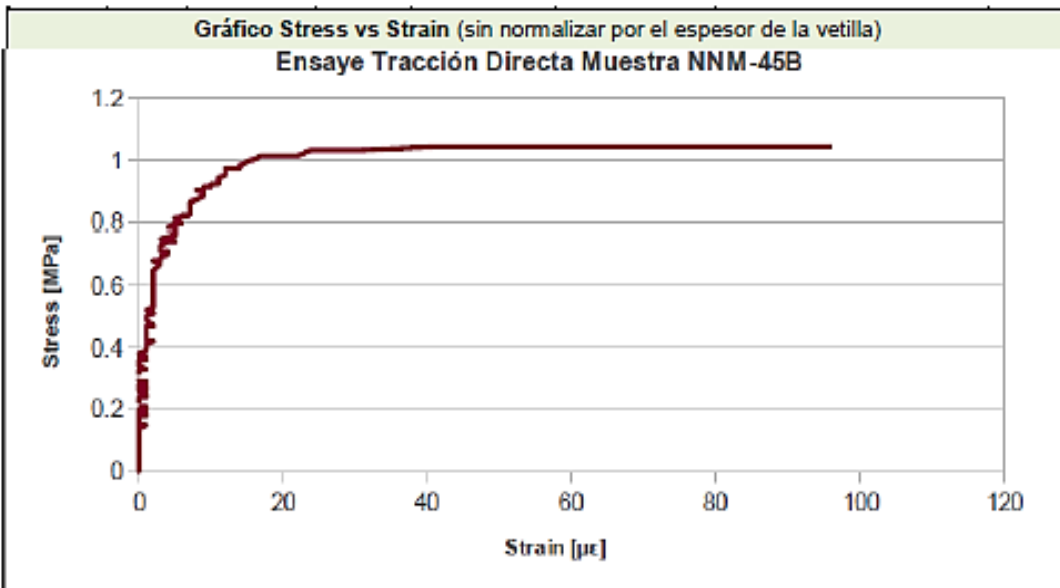


Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	606	Módulo de elasticidad (GPa)	11,3	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,26	Módulo secante stress (GPa)	4,7	Módulo secante deformación (GPa)	3,8





Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	917	Módulo de elasticidad (GPa)	19,3	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,5	Módulo secante stress (GPa)	20,1	Módulo secante deformación (GPa)	2,1



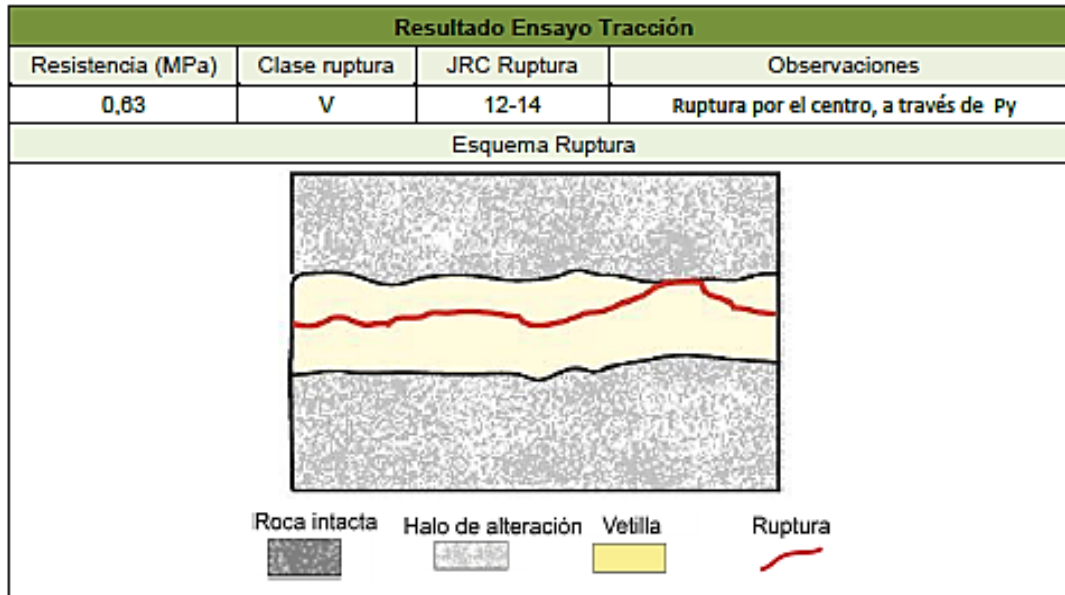


Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
TO-2	HP	V10	Tonalita	65

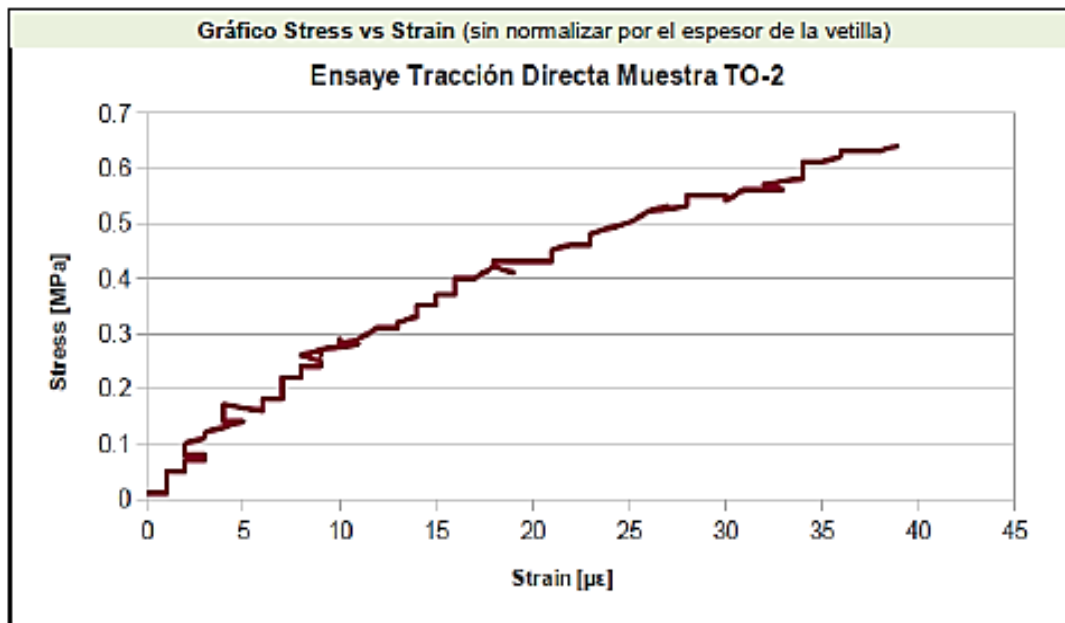
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	50	Sericítico-clorítico. Py y Cpy diseminada
Cuarzo	45	
Calcopirita	5	
Observaciones		
Py masiva al centro, con forma irregular, Qz a los bordes.		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
7		8-10
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
15	10	13
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
?	?	?
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es difuso y levemente ondulado. No se observa el límite del halo		





Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	39	Módulo de elasticidad (GPa)	37,5	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,15	Módulo secante stress (GPa)	26,8	Módulo secante deformación (GPa)	21,2

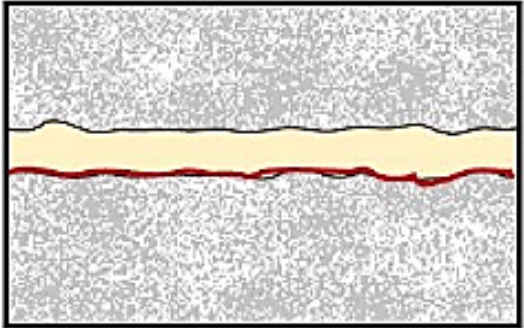






Identificación				
Muestra	Tipo	Sub-Tipo	Litología	Largo probeta (mm)
TO-1A	HP	V10	Tonalita	74

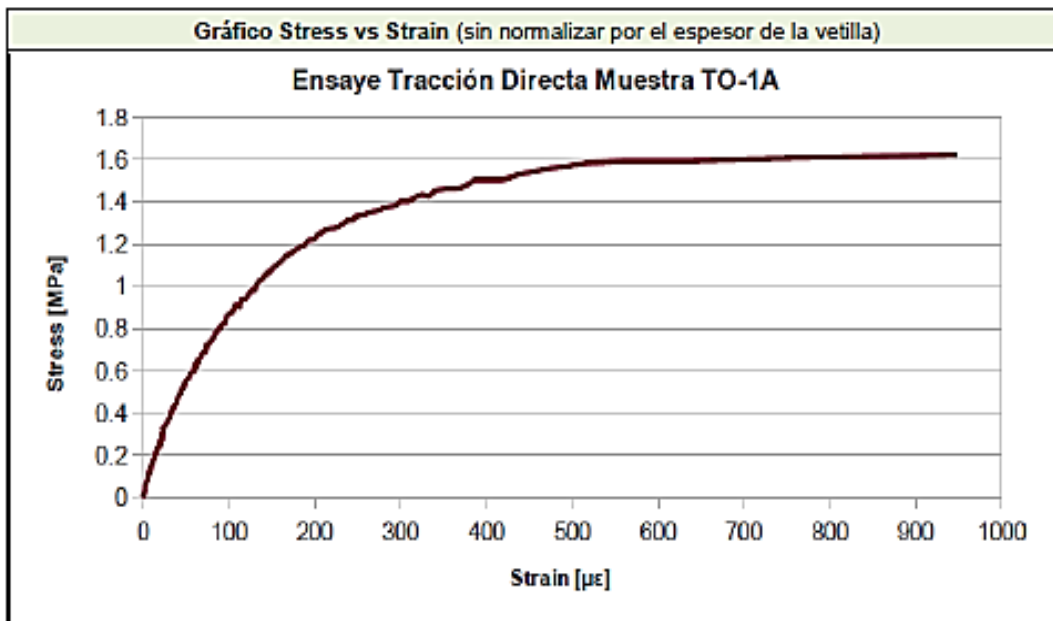
Relleno mineralógico		
Mineralogía vetilla	Porcentaje	Halo
Pirita	85	Silíceo-sericítico-clorítico
Cuarzo	10	
Anhidrita	5	
Observaciones		
Py masiva y Qz en cúmulos. Halo de 30mm, con una banda interior de 1mm silíceo.		

Geometría		
Ángulo (°)		JRC
10		6-8
Espesor vetilla (mm)		
Max	Min	Tip
4	2	4
Espesor Halo (mm)		
Max	Min	Tip
30	23	25
Observaciones		
Contacto vetilla/halo es nítido y onduloso		



Resultado Ensayo Tracción			
Resistencia (MPa)	Clase ruptura	JRC Ruptura	Observaciones
1,58	C	8-10	Ruptura por uno de los contactos v/h
Esquema Ruptura			
			
Roca intacta	Halo de alteración	Vetilla	Ruptura
			

Deformación									
Strain total ( $\mu\epsilon$ )	2339	Módulo de elasticidad (GPa)	4,5	Stress Punto de Fluencia (MPa)	0,4	Módulo secante stress (GPa)	3,6	Módulo secante deformación (GPa)	1,3





LOS EXPERTOS EN SOLDADURAS

www.lincolnelectric.com.co

LINCOLN SOLDADURAS DE COLOMBIA LTDA. NIT: 860.000.332-0

PLANTA Y OFICINAS:

Calle A No. 33-23 Bogotá, Colombia  
PBX (571)247 0585, Fax: (571) 277 6056, (571)201 8794.  
ventas@lincolnelectric.com.co  
Call:  
Calle 34 No. 6 A 59 Local 8 Barrio El Porvenir  
Tel. (572) 6830390/4631, Telefax: (572) 6830477.  
cal@lincolnelectric.com.co

MEDELLIN

Calle 29 D No. 55-131, Zona Industrial de Barran  
Tel: (574) 351 8581, Telefax: (574) 235 9486.  
medellin@lincolnelectric.com.co  
BARRANQUILLA:  
Calle 50 No. 43 - 111.  
Tel. (575) 341 8299.  
barranquilla@lincolnelectric.com.co

Bogotá D.C., 09 de Agosto de 2018

DEPARTAMENTO ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD  
LINCOLN SOLDADURAS DE COLOMBIA LTDA.

CERTIFICADO DE INSPECCIÓN DE METALES DE APORTE

Que el electrodo LINCOLN E8018-C1 de la clase E 8018-C1, cumple con los requerimientos de calidad exigidos por la norma ANSI/AWS SFA 5.5 E 8018-C1

LOTES LSC: 3492013

DIÁMETRO: 1/8"

Especificación AWS A.5.1.	ANALISIS QUIMICO TIPICO %				
	C	Mn	Si	S	Ni
LSC	0.12	1.25	0.60	0.03	2.00-2.75
	0.09	0.43	0.29	0.01	2.04

PROPIEDADES MECÁNICAS TÍPICAS*				
Punto de Fluencia N/mm2	Resistencia A la Tracción N/mm2	Alargamiento %	Energía Absorbida, J (Temp.-60 °C)	Dureza
520	600	24	85	NA

\*Análisis típico obtenido para el producto

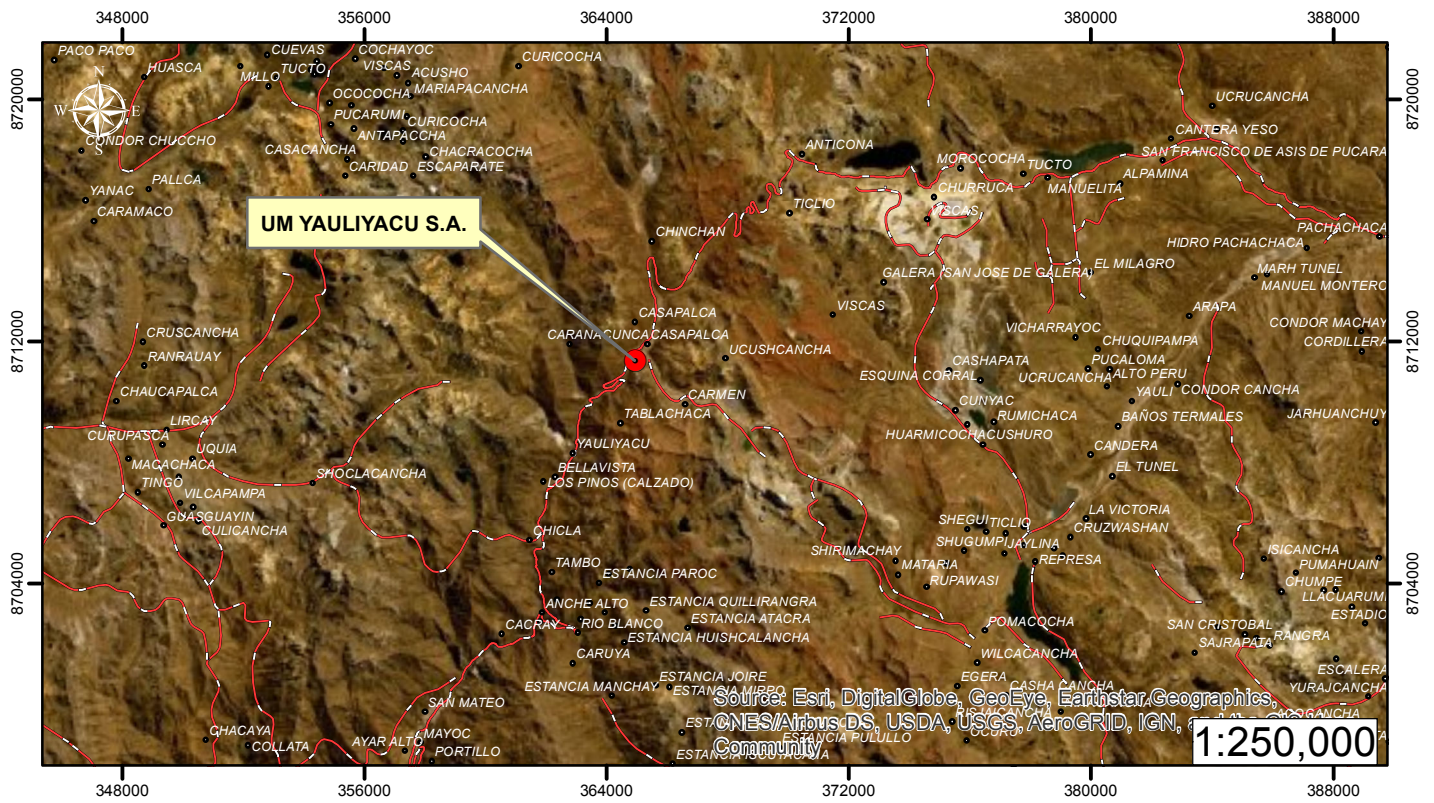
LINCOLN SOLDADURAS DE COLOMBIA LTDA.



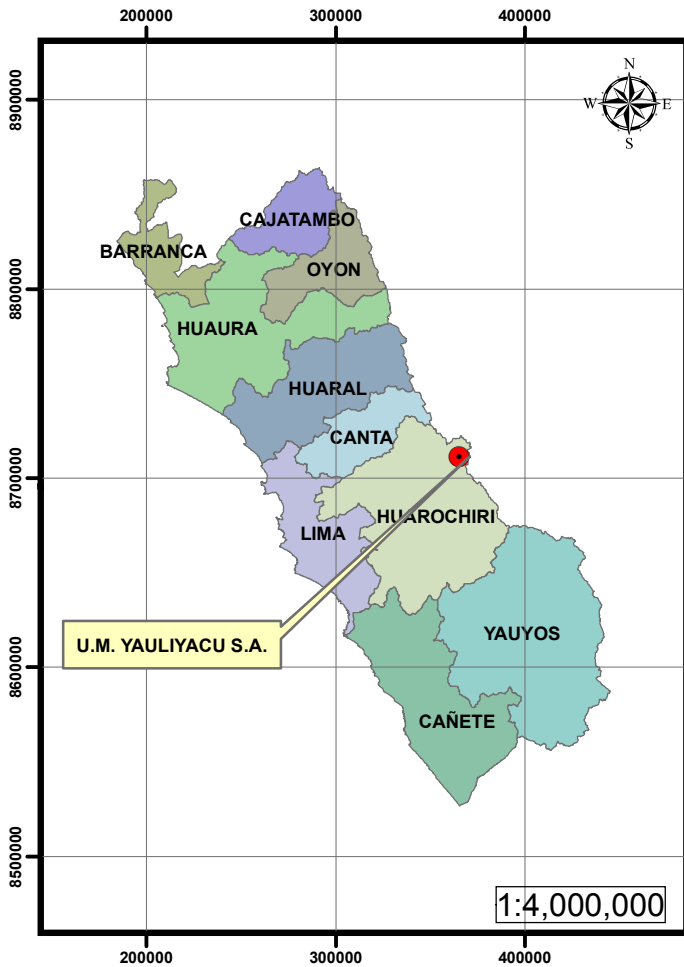
Roberto Carlos Jarama Champier  
CIV 12101801  
OC1 EXP 10/1/2018

Zulma A. Blanco Santana

Zulma Angélica Blanco Santana - Aseguramiento de Calidad y Normalización  
Sistema de Gestión de la calidad aprobado según norma NTC - ISO 9001:2008.  
Certificado Nro. CO 234200 Expedido por BUREAU VERITAS.



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar, Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, Community



LEYENDA	
	U.M. YAULIYACU S.A.
	Centros Poblados
	VIAS DE COMUNICACION

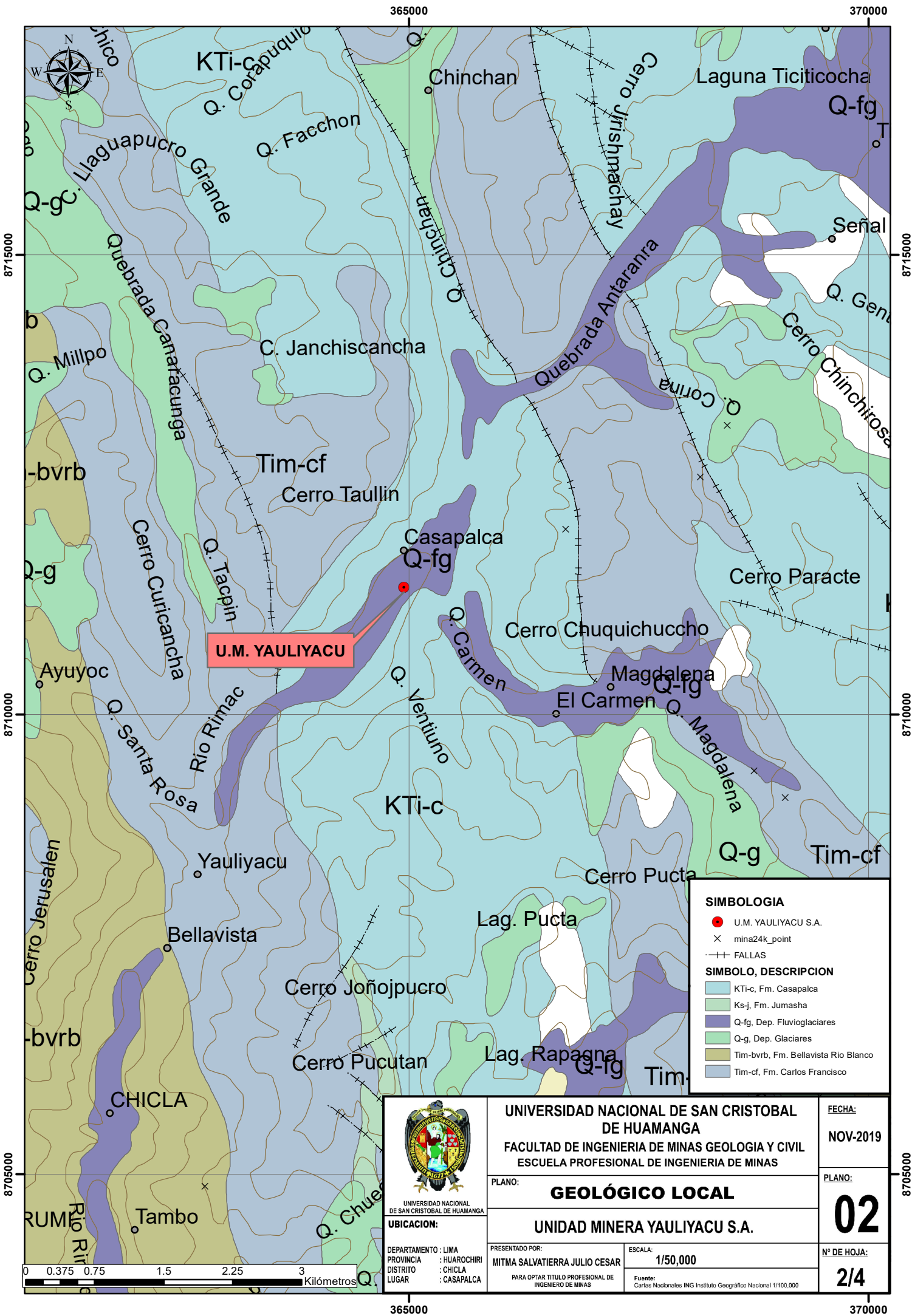


UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA

**UBICACION:**

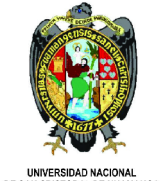
DEPARTAMENTO : LIMA  
 PROVINCIA : HUARACHIRI  
 DISTRITO : CHICLA  
 LUGAR : CASAPALCA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA		FECHA:
FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS GEOLOGIA Y CIVIL		NOV-2019
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS		PLANO:
PLANO:		<b>01</b>
<b>UBICACIÓN Y ACCESO</b>		Nº DE HOJA:
<b>UNIDAD MINERA YAULIYACU S.A.</b>		<b>1/4</b>
PRESENTADO POR:	ESCALA:	
MITMA SALVATIERRA JULIO CESAR	Indicada	
PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS		
Fuente: Cartas Nacionales ING Instituto Geográfico Nacional 1/100.000		



**U.M. YAULIYACU**

SIMBOLOGIA	
<span style="color: red;">●</span>	U.M. YAULIYACU S.A.
×	mina24k_point
---+	FALLAS
SIMBOLO, DESCRIPCION	
<span style="background-color: #ADD8E6;">■</span>	KTi-c, Fm. Casapalca
<span style="background-color: #90EE90;">■</span>	Ks-j, Fm. Jumasha
<span style="background-color: #6A5ACD;">■</span>	Q-fg, Dep. Fluvioglaciares
<span style="background-color: #90EE90;">■</span>	Q-g, Dep. Glaciares
<span style="background-color: #D2B48C;">■</span>	Tim-bvrb, Fm. Bellavista Rio Blanco
<span style="background-color: #ADD8E6;">■</span>	Tim-cf, Fm. Carlos Francisco



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS GEOLOGIA Y CIVIL**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS**

FECHA:  
**NOV-2019**

PLANO:  
**GEOLÓGICO LOCAL**

PLANO:  
**02**

**UNIDAD MINERA YAULIYACU S.A.**

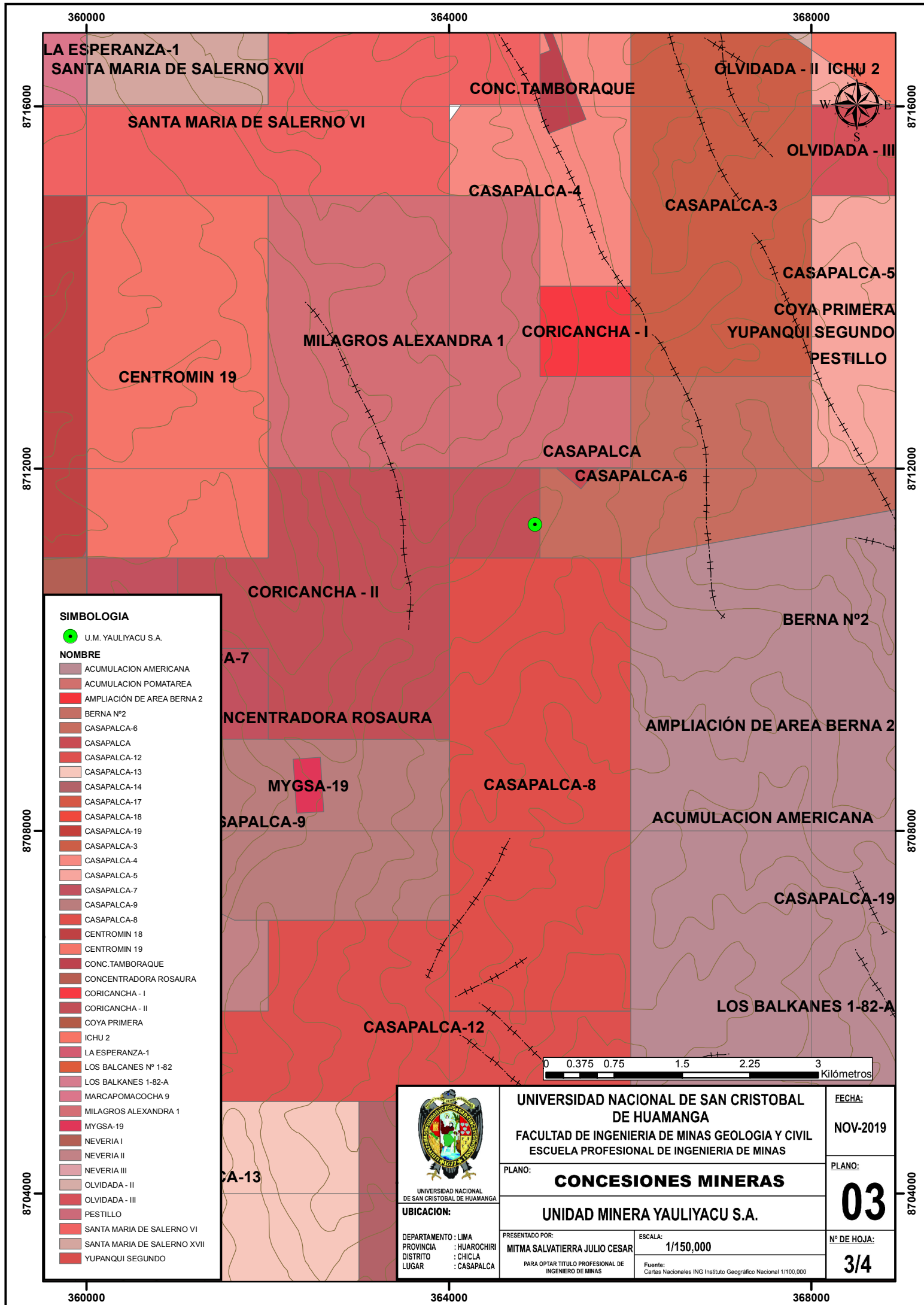
Nº DE HOJA:  
**2/4**

UBICACION:  
 DEPARTAMENTO : LIMA  
 PROVINCIA : HUAROCHIRI  
 DISTRITO : CHICLA  
 LUGAR : CASAPALCA

PRESENTADO POR:  
**MITMA SALVATIERRA JULIO CESAR**  
 PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS

ESCALA:  
**1/50,000**  
 Fuente: Cartas Nacionales ING Instituto Geográfico Nacional 1/100,000





SIMBOLOGIA	
	U.M. YAULIYACU S.A.
NOMBRE	
	ACUMULACION AMERICANA
	ACUMULACION POMATAREA
	AMPLIACIÓN DE AREA BERNA 2
	BERNA N°2
	CASAPALCA-6
	CASAPALCA
	CASAPALCA-12
	CASAPALCA-13
	CASAPALCA-14
	CASAPALCA-17
	CASAPALCA-18
	CASAPALCA-19
	CASAPALCA-3
	CASAPALCA-4
	CASAPALCA-5
	CASAPALCA-7
	CASAPALCA-9
	CASAPALCA-8
	CENTROMIN 18
	CENTROMIN 19
	CONC. TAMBORAQUE
	CONCENTRADORA ROSAURA
	CORICANCHA - I
	CORICANCHA - II
	COYA PRIMERA
	ICHU 2
	LA ESPERANZA-1
	LOS BALKANES N° 1-82
	LOS BALKANES 1-82-A
	MARCAPOMACOCHA 9
	MILAGROS ALEXANDRA 1
	MYGSA-19
	NEVERIA I
	NEVERIA II
	NEVERIA III
	OLVIDADA - II
	OLVIDADA - III
	PESTILLO
	SANTA MARIA DE SALERNO VI
	SANTA MARIA DE SALERNO XVII
	YUPANQUI SEGUNDO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA

**UBICACION:**

DEPARTAMENTO : LIMA  
 PROVINCIA : HUAROCHIRI  
 DISTRITO : CHICLA  
 LUGAR : CASAPALCA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS GEOLOGIA Y CIVIL**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS**

PLANO: **CONCESIONES MINERAS**

**UNIDAD MINERA YAULIYACU S.A.**

PRESENTADO POR: **MITMA SALVATIERRA JULIO CESAR**

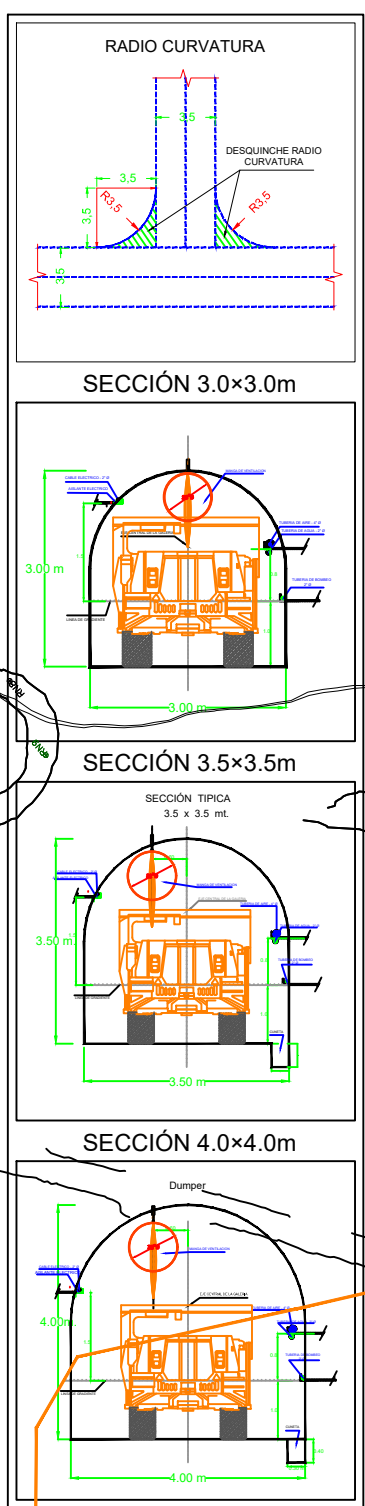
PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS

ESCALA: **1/150,000**

Fuente: Cartas Nacionales ING Instituto Geográfico Nacional 1/100,000

FECHA:	NOV-2019
PLANO:	<b>03</b>
N° DE HOJA:	<b>3/4</b>

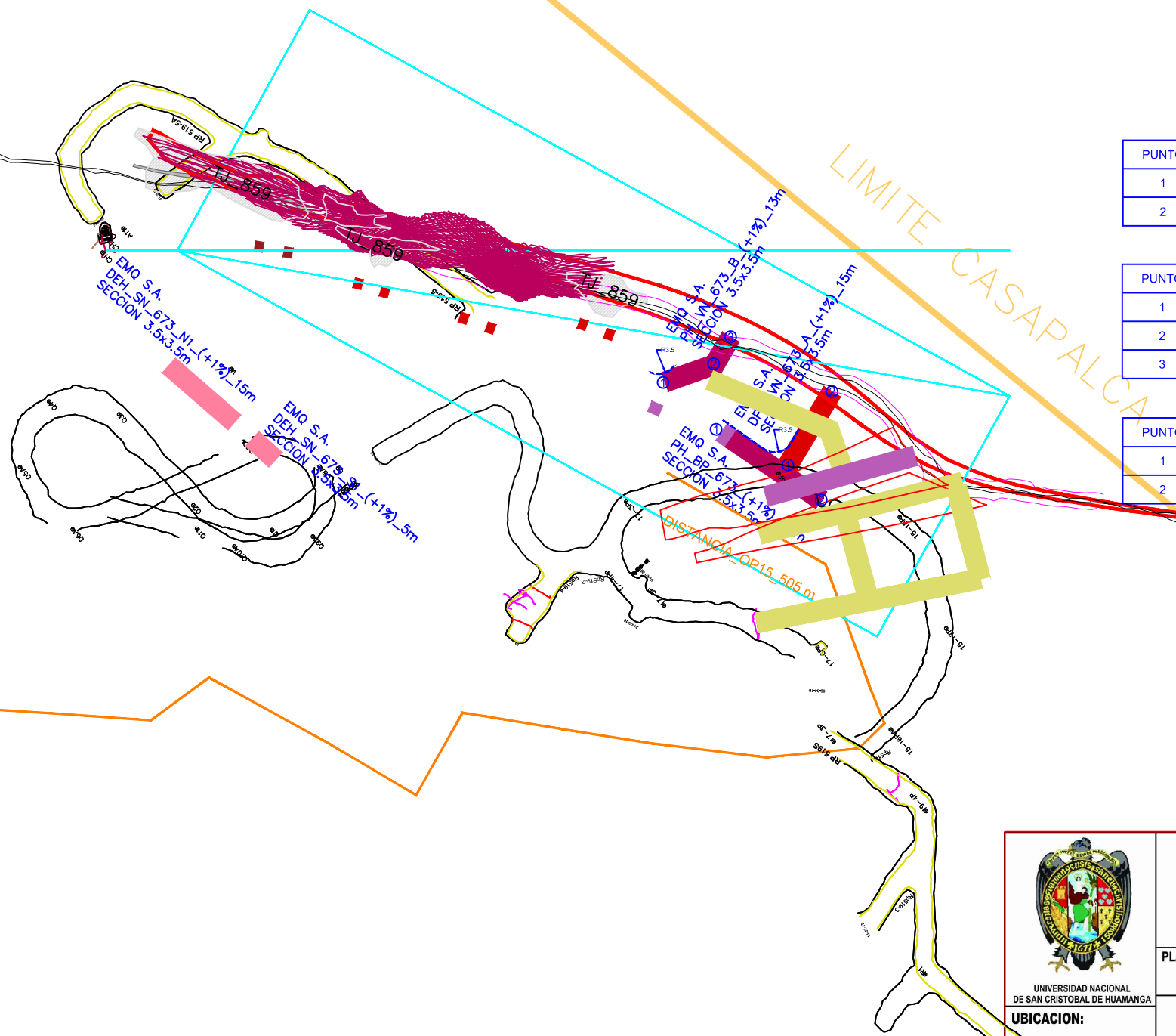




- MESES
- ENERO
- FEBRERO
- MARZO
- ABRIL
- MAYO
- JUNIO
- JULIO
- AGOSTO
- SEPT EMBRE
- OCTUBRE
- NOVIEMBRE
- DICIEMBRE

**LEYENDA**

Nivel Antiguo	MINADO CUERPO	Recurso Medido	Prog. Preparación Horizontal	CH.VENTILACIÓN
Nivel Base	MINADO VETA	Recurso Indicado	Prog. Desarrollo Primario	CH.ORE PASS
Nivel 1 (1piso)	CONTORNO GEOLOGICO	Recurso Inferido	Prog. Desarrollo Exploratorio	RUTA ORE PASS
Nivel 2 (2piso)			Proyecto Integral	AREA A MINAR
Nivel 3 (3piso)				
Contorneo Geológico				



BP_673			
PUNTO	NORTE	ESTE	COTA
1	8711166.1705	366687.4149	4282.6070
2	8711159.0515	366661.1045	4282.8795

VN_673_B			
PUNTO	NORTE	ESTE	COTA
1	8711164.7647	366688.9194	4282.5961
2	8711157.9150	366691.2899	4,282.9961
3	8711152.5940	366693.1315	4282.7249

VN 673_A ESTE			
PUNTO	NORTE	ESTE	COTA
1	8711186.8525	366669.5689	4282.7966
2	8711145.2828	366674.3219	4282.9468

<p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA</p> <p>UBICACION:</p> <p>DEPARTAMENTO : LIMA          PROVINCIA : HUAROCHIRI          DISTRITO : CHICLA          LUGAR : CASAPALCA</p>	<p><b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA</b></p> <p>FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS GEOLOGIA Y CIVIL</p> <p>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS</p>		<p>FECHA:</p> <p><b>NOV-2019</b></p>
	<p>PLANO:</p> <p><b>PLANO CUERPO O - NIVEL 1500 - TJ_496</b></p>		<p>LAMINA:</p> <p><b>04</b></p>
	<p><b>UNIDAD MINERA YAULIYACU S.A.</b></p>		<p>Nº DE HOJA:</p> <p><b>4/4</b></p>
	<p>PRESENTADO POR:</p> <p><b>MITMA SALVATIERRA JULIO CESAR</b></p> <p>PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS</p>	<p>ESCALA:</p> <p><b>INDICADA</b></p> <p>Fuente: UNIDAD DE GEOLOGIA CIA MINERA PODEROSA S.A.</p>	

DATOS DE LA LABOR		PLANEAMIENTO:	GEOLOGIA	MINA:
SECCION	IV	LUIS VILLANUEVA	D. SANCHEZ	J. CASTILLON
ESTRUCTURA	CUERPO O	VB*	VB*	VB*
NIVEL	1500			
TAJO	TJ_494			
DISEÑO	C.SALVATIERRA	LABOR	-	C. ZEGARRA
SUPER. PLANEAMIENTO	ALAZARO	FECHA	10/10/18	VB*
GER. OPERACIONES	P. DE LA CRUZ	ESCALA	1/1000	