



UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**CARACTERIZACION GEOMECANICA Y MINERALOGICA DEL MAICILLO EN LA
CORDILLERA DE NAHUEL BUTA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

PAULA ANDREA RODRIGUEZ STUARDO

PROFESOR GUIA:

Dipl.-Ing. MAURO POBLETE FREIRE

MIEMBROS DE LA COMISION:

Dr. JUAN CARLOS SANTAMARINA

Dr. OSCAR JEREZ RIVEROS

CONCEPCIÓN DE CHILE

DICIEMBRE 2015

*... Hubo un tiempo sin forma, una fusión
de basalto mordida de cristales
Con certeza hubo un río, un mar antiguo,
donde rodó la piedra.
También hubo un sismo, y otro sismo
Ahora cumplirá, en la mano cerrada,
La forma prometida.
Así, exacta,
se modeló la piedra*

José Saramago

AGRADECIMIENTOS

A Dios primeramente, porque su presencia en mi vida es guía en la oscuridad.

A la Universidad Católica de la Santísima Concepción, por ser fuente inagotable de conocimientos y oportunidades.

A mi profesor guía Dipl-Ing. Mauro Poblete Freire por sus oportunos consejos, y constante apoyo para lograr la culminación del presente trabajo de investigación.

Al Laboratorio de Geomateriales (LGM) de la Universidad Católica de la Santísima Concepción y al instituto de Geología Económica Aplicada (GEA) de la Universidad de Concepción, en especial a la colaboración del Dr. Oscar Jerez, por su apoyo durante todo este tiempo.

A Forestal Mininco, en particular a Oscar Mardones del área de investigación, Rodrigo Velozo y Sergio Escobar, del área de caminos, quienes con su apoyo, cooperación logística y económica hicieron posible el acceso y toma de muestras en terreno.

A todos aquellos que contribuyeron con información, gestión o conversación para el desarrollo de este trabajo; entre ellos, Robert King, Francesc Ferraro y José miguel Montenegro.

Todos no tenemos la dicha de tener siempre a nuestro padre cuando lo necesitamos, y que nos acompañe durante mucho tiempo en nuestra vida, a ti va dedicado este logro ya que fuistela gran razón de no renunciar nunca. Mi proyecto de vida y mis metas las planifiqué contigo, sin ti nada de esto sería hoy realidad. Gracias por transformarme en la mujer que soy, gracias totales.

A mi familia y en particular, a mi hermano Luis por su apoyo incondicional y valiosos consejos desde la partida de nuestro padre, a mi madre por su entrega y cariño, a mis tíos Luis y Hugo, quienes me enseñaron que con esfuerzo, trabajo y confiando en Dios las metas se pueden lograr y no existen imposibles.

Ustedes son mi motivo de crecer y de superarme. Renunciar siempre será el camino más fácil, pero a través de su apoyo incondicional y siendo consciente de saber que su amor hacia mí es tal en todo momento, que los admiro y son un ejemplo a seguir.

A mis amigas: Pia y Mari, gracias por su amistad y por acompañarme en los momentos más complicados y por esas largas conversaciones.

INDICE

Capítulo 1	Introducción	1
1.1	Motivación y alcance del estudio.....	1
1.2	Organización de la tesis	2
Capítulo 2	El maicillo y los suelos residuales.....	3
2.1	Los suelos residuales	3
2.1.1	Clasificación de suelos residuales mediante meteorización.....	4
2.1.2	Clasificación de los suelos residuales.	7
2.2	Origen geológico del Maicillo.....	15
2.1	Desarrollo de minerales en el perfil de meteorización	23
2.2	Maicillo en la literatura.....	25
Capítulo 3	Campaña de terreno, toma de muestras y ensayos preliminares.	28
3.1	Ubicación y accesos.....	29
3.2	Fase pre terreno.....	29
3.3	Clima del lugar de estudio	30
3.4	Visita a terreno.....	34
3.5	Toma de muestras.....	37
3.6	Ensayos de Laboratorio	38
3.7	Ensayos preliminares.....	38
3.7.1	Gravedad específica	39
3.7.2	Granulometría.....	40
3.7.3	Granulometría mediante difracción Laser.....	41
3.7.4	Ensayo densidad máxima y mínima.....	49

Capítulo 4	Caracterización mecánica.....	51
4.1	Límites de consistencia.....	51
4.2	Caída de cono	53
4.3	Angulo de reposo.....	56
4.4	Ensayo de corte directo (CD)	59
4.5	Proctor modificado	81
Capítulo 5	Caracterización Mineralógica.....	87
5.1	Minerales en las arcillas.....	91
5.1	Difracción de rayos X (DRX).....	97
5.2	Análisis cualitativo	102
5.3	Análisis cuantitativo	107
5.4	Microscopio estereoscópico (óptico).....	109
Capítulo 6	Conclusiones	122
Referencias	125
Anexo A	Tablas condiciones iniciales y finales ensayo Corte Directo.....	129
Anexo B	Imágenes de muestras en alta resolución	134
Anexo C	Registro Fotográfico recorrido en terreno 2014.....	139

Resumen

El maicillo es el producto de la meteorización de rocas graníticas del batolito costero y es uno de los suelos residuales más comunes y abundantes en Chile. El batolito costero es una gran masa de roca intrusiva que se ha formado en paralelo a la zona de subducción, a partir del enfriamiento del magma a varios kilómetros de profundidad y que se emplaza a lo largo de la cordillera de la costa desde Valparaíso hasta la Cordillera de Nahuelbuta en el sur de Chile.

El maicillo presenta una composición tan compleja que es imposible establecer si su respuesta mecánica corresponde a la de una roca meteorizada o de un suelo o probablemente la mezcla de ambos. Los problemas que se presentan en el maicillo afectan la estabilidad de taludes de caminos forestales así como la estabilidad de viviendas que se fundan sobre él. Por lo anterior caracterizar geomecánica y mineralógicamente al maicillo en los distintos puntos de la Cordillera de Nahuelbuta, entre la VIII y X regiones es de interés para la población y para la actividad productiva forestal.

Ya que el maicillo proviene de rocas ígneas intrusivas ácidas (con gran contenido de cuarzo) como el granito y forman perfiles profundos generalmente arenoarcillosos, identificar el tipo de mineral de arcilla presente en la fracción fina es relevante ya que el comportamiento mecánico del suelo puede estar sujeto a los minerales de arcillas presentes.

Esta investigación se lleva a cabo a lo largo de aprox. 1500 km de caminos forestales en 9 fundos propiedad de Forestal Mininco S.A., en un total de 56 taludes que han sufrido un deterioro importante. Se extrae e identifica un total de 59 muestras alteradas entre 1-2 kg y 19 bloques inalterados de aprox. 45 x 45 x 45 cm a los cuales se les realizan ensayos de gravedad específica, granulometría, proctor modificado, ángulo de reposo, densidades máximas y mínimas y corte directo. Para este último ensayo se implementa un método novedoso de preparación de muestra que permite mantener la muestra inalterada a pesar de la complejidad y fragilidad de los bloques de maicillo. Del análisis de los resultados destaca el ángulo de fricción residual difiere en promedio 3.2° con los resultados del ensayo de ángulo de reposo.

Además se realizan ensayos de granulometría mediante difracción laser y difracción de rayos X (DRX) con el propósito de estudiar los cristales individuales del maicillo. Se utiliza la técnica del

polvo obteniendo los difractogramas de cada una de las muestras, las que revelaron la presencia de minerales de arcilla como; caolinita, vermiculita y micas.

Los resultados de la caracterización geomecánica y mineralógica permiten establecer recomendaciones para el análisis y diseño de estabilidad de taludes y obras de edificación sobre el maicillo de la Cordillera de Nahuelbuta.

Abstract

Maicillo is the result of weathering of granite that belong to the coastal batholith and is one of the most common residual soils and abundant in Chile. Coastal batholith is a large mass of intrusive rock that has been formed concurrently with the subduction zone, from the cooling process of the magma several kilometers deep and that is placed along the coastal mountain range, from Valparaiso to the Nahuelbuta range in the south of Chile.

Maicillo is formed by a highly complex composition so it is impossible to establish if its mechanic answer belongs to one of a rock that has been broken down or of a soil or probably the mixture of both of them. The problems that are present in gravel affect the balance of not only slopes in forest roads but also the balance of homes that are founded over it. This is why to characterize geomechanics and gravel in the subject of mineralogy in the different points of the Nahuelbuta Range, between the VIII and X region, is of interest for the population and for the forest production activity.

Due to the fact that Maicillo comes from acid intrusive igneous rocks (with high contents of quartz) like granite and make generally deep shapes that are sand-clay like, to identify the kind of clay mineral that is present in the thin fraction is relevant because the mechanic behavior of the soil may be subject to the minerals of clay.

This research is carried out along about 1500 kilometers of forest roads in 9 farms that belong to Forestal Mininco S.A., in a total of 56 slopes that have been highly damaged. A total of 59 altered samples between 1-2 kg and 19 unaltered blocks of about 45 x 45 cm wide, with which are tested in terms of specific gravity, grain size analysis, modified proctor, angle of repose, maximum and minimum stocking density and direct cutting. In terms of sample preparation and for the latter test a novel method is implemented and it allows us to maintain the sample unaltered, despite its complexity and fragility of gravel blocks. Out of the results analysis, the angle of residual friction stands out because it differs 3.2° average with the results of the angle of repose test.

Besides, grain size analysis is carried out by laser and X-ray diffraction with the aim of studying the individual crystals of gravel. The dust extraction technique is used so the diffractogram of every

sample can be obtained, which revealed the presence of clay minerals such as kaolinite, vermiculite and mica.

The results of geomechanics and mineralogy characterization allow us to establish recommendations for the analysis and design of slope balance and building works over the gravel in Nahuelbuta Range.

Capítulo 1 Introducción

1.1 Motivación y alcance del estudio

La aplicabilidad de las teorías y los criterios de diseño geotécnico que existen actualmente, podría no ser completamente válida en el caso de suelos residuales o en macizos rocosos completamente meteorizados, debido a diferencias importantes que existen en la constitución y estructura de los suelos y de las formaciones residuales, y las de los suelos que sirvieron de modelo para el desarrollo de la mecánica de suelos tradicional. Esta diferencia es debida principalmente, al fenómeno de la meteorización que es extensa y profunda en la mayoría de las formaciones de suelos residuales.

El Maicillo es producto de la meteorización de rocas graníticas del batolito costero, este suelo residual es común y abundante en Chile, se extiende desde a lo largo de la Cordillera de la Costa desde Valparaíso hasta la Cordillera de Nahuelbuta. Este tipo de suelo puede mantener planos de clivaje o diaclasas de la roca granítica que le dio origen, los que en ocasiones se encuentran arcillizados, construyendo planos de debilidad.

El uso forestal de estos terrenos ubicados en la Codillera de Nahuelbuta, permite observar en cada monte cortes en el terreno por el cual pasan estos caminos para labores de cosecha forestal, estas son complejas por el peso y volumen de materia prima que mueven en el reducido espacio de vías de conexión a través de los bosques, esto implica contar con una adecuada infraestructura caminera que se abran paso en medio del bosque, especialmente cuando se inician las cosechas. En su construcción se debe lidiar con la presencia de mantos rocosos, terrenos con pendientes fuertes, otros inundables y algunos donde hay alta presencia de especies arbóreas que se requiere proteger, además se suma el hecho que los fundos están ubicados a lo largo de la Cordillera de Nahuelbuta, donde la influencia climática en la zona, debido a las precipitaciones orográficas producen un aumento significativo de las precipitaciones en las cumbres en comparación con las zonas de barlovento y sotavento, esto podría

producir un aumento en las condiciones de saturación, favorecer la meteorización y erosión por lluvia, por nombrar algunas de sus consecuencias, lo que implica un costo al retiro del material del camino.

El presente trabajo consiste en caracterizar el maicillo geomecánica y mineralógicamente a través de distintos ensayos de; clasificación, mecánicos y mineralógicos, estos ensayos permitirán evaluar el tipo de suelo en estudio, obteniendo sus parámetros resistentes, cuantificar el contenido de minerales de arcillas presente en las muestras, tales como, caolinita, vermiculita y micas, de esta manera establecer recomendaciones para el análisis y diseño de estabilidad de taludes y obras de edificación sobre el maicillo de la Cordillera de Nahuelbuta.

1.2 Organización de la tesis

El capítulo 2, se realiza una revisión bibliográfica de la formación de los suelos residuales a partir de ricas ígneas, detallando los procesos en que estos fueron formados y como afecta la alteración o meteorización del macizo rocoso; es decir el origen de la formación del suelo donde actúan procesos físicos y químicos, que reducen al macizo rocoso en fragmentos más pequeños creando un perfil de meteorización. También se describe el origen y se define el maicillo en el contexto de los suelos residuales.

En el capítulo 3, se describe la zona de estudio, enumera cada una de las etapas en las que se realiza la exploración: la definición, (en conjunto con Forestal Mininco), de los fundos y los taludes a muestrear en cada uno, señalando los puntos georreferenciales; además se presenta el plan de toma de muestras y se realiza una caracterización del clima del lugar de estudio a lo largo de la Cordillera de Nahuelbuta. Por otro lado se realizan ensayos de clasificación de suelo como son: gravedad específica, granulometría por tamiz, granulometría mediante difracción laser y densidad relativa.

En el capítulo 4, se muestran los ensayos que permitan caracterizar mecánicamente el maicillo; entre los cuales se encuentran los límites de atterberg, caída de cono, ángulo de reposo, ensayos de corte directo para determinar los parámetros resistentes y proctor para determinar la Densidad Máxima Compactada Seca (DCMS).

En el capítulo 5, se caracteriza el maicillo mineralógicamente, por medio de ensayos de difracción de rayos X a la roca total como a la fracción de arcilla bajo los $2\mu\text{m}$, se efectúa un análisis cualitativo y posteriormente cuantitativo de las arcillas presentes en la muestra bajo los $2\mu\text{m}$, también se obtiene la caracterización visual del maicillo mediante microscopio óptico.

En el capítulo 6, se presenta las conclusiones de la investigación.

Capítulo 2 El maicillo y los suelos residuales

2.1 Los suelos residuales

Las rocas son agregados naturales duros y compactos de partículas minerales con fuerte uniones cohesivas permanentes que habitualmente se consideran como un sistema continuo. La proporción de diferentes minerales, la estructura granular, la textura y el origen de la roca sirven para su clasificación geológica.

Los suelos, son agregados naturales de granos minerales unidos por fuerzas de contactos normales y tangenciales a las superficies de las partículas adyacentes, separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación de agua.

Un criterio ampliamente extendido para el establecimiento de los límites entre suelo y roca es el valor de la resistencia a la compresión simple, o máximo esfuerzo que soporta una probeta antes de romperse, al ser cargada axialmente en laboratorio. En la zona de transición se encontrarían los denominados suelos duros y rocas blandas. Los límites sugeridos por diferentes clasificaciones y autores han ido rebajándose hasta 1 o 1,25 MPa debido a que algunas rocas muy blandas presentan resistencias de este orden (De vallejo, 2002).

Para agrupar o clasificar los suelos residuales hay métodos basados en la meteorización, mineralogía, clasificación pedológica y métodos usados para usos locales y/o tipos de suelos provenientes de tipos de rocas específicas (Wesley, 2009).

2.1.1 Clasificación de suelos residuales mediante meteorización

Los suelos se originan por los procesos de alteración y disgregación de las rocas sedimentarias, ígneas o metamórficas, sometidas a la acción ambiental disgregadora de la erosión en su tres facetas; física, química y biológica. Todo ello da lugar a fenómenos de disgregación (alteración o meteorización) y transformación de la roca, creándose el perfil de meteorización. En este perfil la roca madre ocupa la parte más baja y alejada de la superficie y el suelo la más alta. Los suelos residuales se forman cuando el producto de la descomposición de la roca permanece en el lugar de origen Figura 2.1.

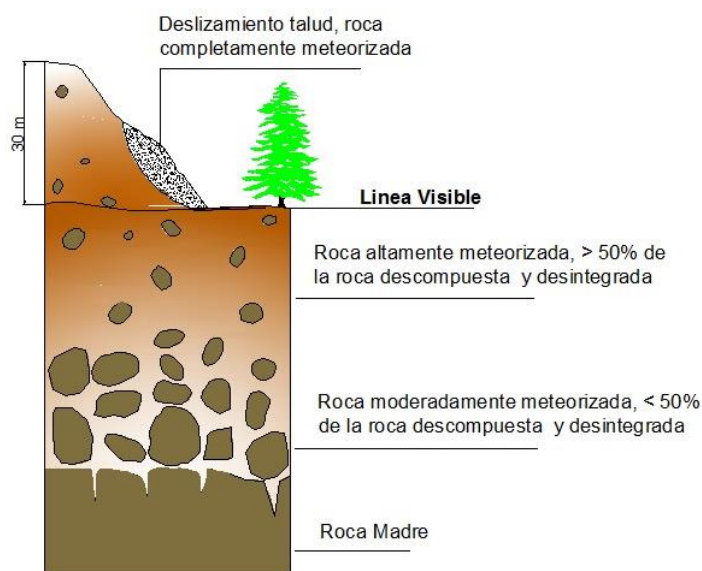


Figura 2.1 Perfil suelo residual.

La clasificación es mediante el método de la meteorización es la representación. Las limitaciones de este método son que, primero, no describen una clasificación de los suelos residuales, describen más bien los perfiles de meteorización de la roca. En segundo lugar proveen información del estado del suelo in-situ pero no una composición del suelo mismo, finalmente esta clasificación debería estar unida a algún tipo de comportamiento, como si lo hace la clasificación USCS (Clasificación Unificada del Suelo), este método sólo es relevante para tipos de roca particulares, un ejemplo de esto es la Figura 2.2 y Figura 2.3.

La Figura 2.2 (a) presenta la meteorización gradual típica del granito donde se muestra un perfil que se compone de una serie de zonas gruesas espesores similares, donde el límite entre el suelo y la roca suele ser súbita, con una transición delgada de material.

Estas transiciones de roca a suelo también se presentan en la Figura 2.2 (b) en rocas basálticas que por ejemplo se encuentran en la isla Norte en Nueva Zelanda y en las arcillas rojas derivadas de rocas andesíticas y basálticas de la isla de Java en Indonesia.

Los pedólogos plantean que las rocas básicas se meteorizan más rápidamente a suelos que las rocas ácidas, esto debido a que se produce una capa de contacto delgada entre los minerales, por el contrario la zona de alteración en rocas ácidas ricas en cuarzo tienden a ser bastante gruesa por lo que toma mayor tiempo en ser meteorizada, en parte por la estabilidad química que tiene el cuarzo (Townsend 1985 en Wesley, 2009).

En la Figura 2.2 (c) se presenta un suelo de cenizas volcánicas, estos presentan límites abruptos entre el suelo y la roca subyacente, como se presenta por ejemplo en los lahares basálticos o andesíticos, o también en rocas sólidas. Dicho límite en suelos de cenizas volcánicas se presenta no sólo debido a la naturaleza del proceso de la meteorización, sino a que la ceniza ha sido depositada en la parte superior de la roca y el suelo se deriva de ceniza fresca y no de la roca subyacente.

En las rocas sedimentarias como: areniscas, rocas blandas, lutitas y shales, el proceso de meteorización no suele romper los minerales de la roca para convertirlos químicamente en minerales arcillosos, pero si puede y suele suceder que por procesos de meteorización química (por ejemplo con hidrólisis) que entre las estratificaciones por las infiltraciones de agua libere los minerales arcillosos existentes en la roca parental generando una pérdida de cementación. En esta situación, el perfil del suelo suele presentar capas intercaladas de rocas meteorizadas como se muestra en la Figura 2.2 (d). Por ejemplo en Auckland (Nueva Zelanda) se presentan capas intercaladas de arenisca y lodolitas (conocidas como secuencia de Waitemata). Esta roca blanda presenta resistencias a la compresión no confinada generalmente entre 1500-4000 kPa (Wesley, 2009).

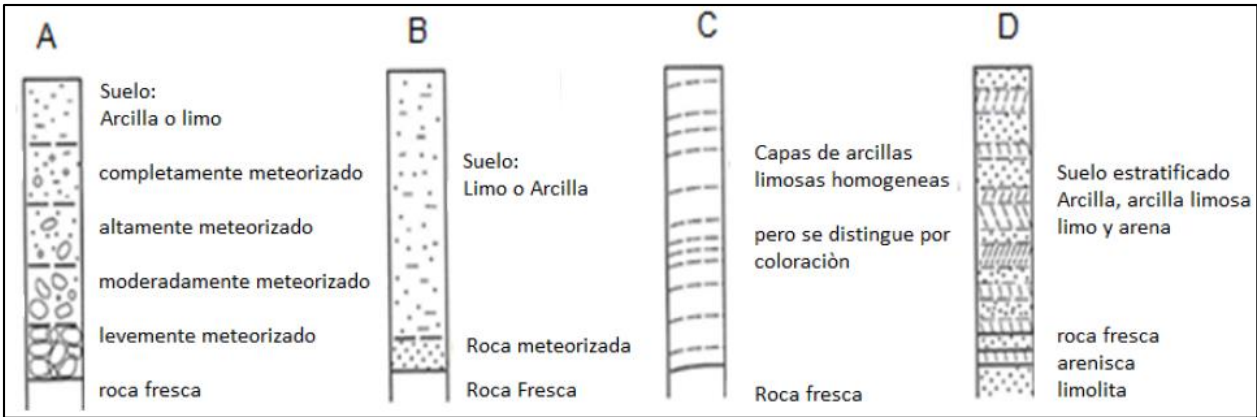


Figura 2.2 Variación de los perfiles en suelos residuales (Wesley 2009)

PERFIL ESQUEMÁTICO	LOVE (1951) LITTLE (1961)	VARGAS (1951)	SOWERS (1954, 1963)	CHANDLER (1969)	GEOLOGICAL SOC. ENG. GROUP (1970)	DEERE Y PATTON (1971)	
	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS, BASÁLTICAS Y ARENISCAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	MARGAS Y LIMOLITAS	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	
	VI SUELO	SUELO RESIDUAL	ZONA SUPERIOR	V COMPLETAMENTE ALTERADA	VI SUELO RESIDUAL	HORIZONTE IA	
	V COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL JOVEN	ZONA INTERMEDIA	PARCIALMENTE ALTERADA	IV	HORIZONTE IB	
	IV ALTAMENTE ALTERADA	CAPAS DE ROCA DESINTEGRADA	ZONA PARCIALMENTE ALTERADA		III	HORIZONTE IC (SAPROLITO)	
	III MODERADAMENTE ALTERADA				IV ALTAMENTE ALTERADA	ZONA DE TRANSICIÓN	IA TRANSICIÓN CON ROCA METEORIZADA SAPROLITO
	II ALGO ALTERADA				III MODERADAMENTE ALTERADA		II DEBILMENTE ALTERADA
	I ROCA SANA	ROCA SANA	ROCA INALTERADA	I ROCA INALTERADA	II MUY POCO ALTERADA	IA ROCA SANA	ROCA SANA

Figura 2.3 Grado de meteorización según varios autores (de Vallejo 2002).

El grado de meteorización o la evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso se realizan por observación directa del afloramiento y comparación con los índices estándares recogidos en tabla 2.1 por el ISRM (1981) “Evolución del grado de meteorización del macizo rocoso”, suelo residual se define cuando “todo el macizo rocoso se ha transformado en suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material”, mientras que para un macizo rocoso completamente meteorizado “todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso”.

Tabla 2.1 Grado de meteorización (ISRM, 1981)

Clase	Tipo	Descripción
I	Masivo	Pocas discontinuidades o espaciado muy grande.
II	Cubico	Bloques aproximadamente equidimensionales
III	Tabular	Bloques con una dimensión considerablemente menor que las otras dos.
IV	Columnar	Bloques con una dimensión considerablemente mayor que las otras dos.
V	Irregular	Grandes variaciones en el tamaño y forma de los bloques.
VI	Triturado	Macizo rocoso muy fracturado.

2.1.2 Clasificación de los suelos residuales.

Las características específicas de los suelos residuales que los distinguen de los suelos sedimentarios pueden generalmente ser atribuidas a la presencia de arcillas inusuales o estructuras particulares afectadas, como la presencia de un suelo intacto y parcialmente meteorizado, planos de debilidad, y cementantes interpartículas, estas influencias pueden ser agrupadas bajo su composición y su estructura, (Wesley, 2009).

La composición incluye el tamaño de partículas, su forma, y especialmente su mineralogía, mientras que la estructura incluye la macroestructura y la microestructura.

Un primer paso para agrupar los suelos residuales es dividirlos en grupos basados en la composición por sí mismo, sin referencia a su estado inalterado. Así como lo describe Wesley, (2009), quien sugirió los siguientes grupos (tabla 2.2):

- Grupo A: suelos sin una fuerte influencia mineralógica

Aparte de los suelos que son fuertemente influenciados por las arcillas minerales, hay un grupo de suelos que pueden tener propiedades similares con influencia de la mineralogía, en general los suelos que tienen un perfil de meteorización como el ilustrado en la Figura 2.7 (a), están presentes en este grupo. Por ejemplo los suelos provenientes de los granitos meteorizados son típico ejemplo de este

grupo, estos suelos son de naturaleza gruesa que cuentan con una pequeña fracción de arcillas, y rara vez en la parte superior del suelo se encuentran suelos con propiedades influenciadas por los minerales de arcilla.

Este grupo de suelos se subdivide en 2 grandes grupos (a y b) y en un grupo más pequeño (c):

- ✓ Subgrupo a): suelos en donde la macroestructura juega un papel importante en el comportamiento de los suelos, por ejemplo los horizontes más profundos presentados en la Figura 2.2 (a), en esta categoría se Incluyen todos los detalles que se pueden observar visualmente como lo son las discontinuidades, las capas, las fisuras, los poros, la presencia de materiales no meteorizados o parcialmente meteorizados y las estructuras heredadas.
 - ✓ Subgrupo b): suelos sin macroestructura, pero con una fuerte influencia de la microestructura. La influencia más importante de la microestructura son las uniones entre las partículas o la cementación, y aunque esta no puede ser identificada visualmente, puede ser inferida por aspectos básicos del comportamiento de los suelos. La sensibilidad, en particular es una buena medida de medición de la presencia de esta cementación que se pierde cuando se remodela el suelo. Este grupo también tiene en cuenta la fábrica, la forma y el tamaño de los poros, etc.
 - ✓ Subgrupo c): suelos que no están fuertemente influenciados ni por la macro estructura ni por la microestructura, este subgrupo es un grupo menor, pocos suelos residuales del grupo a) caen en esta categoría,
- Grupo B: suelos con una fuerte influencia mineralógica proveniente de las arcillas convencionales comúnmente encontradas en los suelos sedimentarios

En este grupo entran los suelos que son fuertemente influenciados por las arcillas minerales, como las normalmente encontradas en suelos sedimentarios, el miembro más significativo en este grupo son los suelos llamados Vertisoles (en la clasificación FAO), las arcillas negras (Black cotton soils) y en general las tierras negras, se caracterizan por su gran capacidad de expansión y retracción, alta compresibilidad y baja resistencia, estas características son directamente relacionadas a su predominante mineralogía, la cual es montmorillonita, o materiales similares a las del grupo de las esmecitas.

La información en la literatura sugiere que otros suelos residuales que pertenecen a este grupo aunque algunos suelos se deriven de rocas sedimentarias, como areniscas y lodolitas tienen propiedades que son fuertemente influenciadas por la composición mineralógica (Wesley, 2009).

- Grupo C: suelos con una fuerte influencia mineralógica proveniente de minerales de arcillas especiales que no están presentes en los suelos sedimentarios.

Los dos minerales más importantes aquí son las arcillas silíceas; la halloysita y la Allofanita, y los minerales asociados son conocidos como los sesquióxidos. La influencia de la allofanita (hidrosilicato de aluminio amorfo, del grupo de los filosilicatos) y la halloysita (filosilicato) y en el suelo dan propiedades claras y documentadas a diferencia de la influencia de los sesquióxidos, en todo caso es importante subdividir el grupo en 3 subgrupos:

- a) Suelos de Halloysita: la influencia principal es este mineral que aparenta tener de buenas propiedades ingenieriles, a pesar su alto contenido de arcilla y pequeños tamaños de partículas, y altos contenidos de agua natural, las buenas propiedades ingenieriles aparentan ser resultado de la composición mineralógica, o en algunos casos de la cementación, ejemplo de este subgrupo son las arcillas rojas, Latosoles, Oxisoles y los Ferrisoles.
- b) Suelos de allofanita: las propiedades de la allofanita son dramáticas y difíciles de comprender, se encuentran rangos de contenidos de agua entre 80% y 250%, pero siguen funcionando perfectamente como materiales para ingeniería, son frecuentemente muy superiores a los suelos con contenidos de agua previamente mencionados, ejemplo de este subgrupo son los suelos de las cenizas volcánicas y Andosoles.
- c) Suelos influenciados por la presencia de sesquióxidos: el papel principal de los sesquióxido parece ser cementar y unir minerales que constituyen el suelo, con la suficiente concentración de esquistos se forman materiales comúnmente conocidos como lateritas, la relación Sílice/Aluminio ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) y la relación de Sílice/esquióxido se obtiene un indicador del grado de laterización. Este subgrupo puede quizá ser en términos generales el grupo de las lateritas, los duracretos y los suelos ferralíticos.

A continuación en la Tabla 2.2, se presenta un resumen del método basado en la mineralogía y estructura propuesto por Wesley & Irfan (1997).

Tabla 2.2 Sistema de clasificación de los suelos residuales (Wesley & Irfan, 1997).

Grupo	Subgrupo	Ejemplo	Identificación	Comentarios
A Suelos sin influencia mineralógica fuerte	(a) Influencia fuerte de la macroestructura	Suelos de rocas ígneas ácidas o intermedias rocas sedimentarias muy meteorizadas	Inspección visual	Este es un grupo muy grande de suelos, incluyendo los saprolitos, cuyo comportamiento en las laderas es dominado por la influencia de las discontinuidades, fisuras, etc.
	(b) Influencia fuerte de la microestructura	Suelos de rocas ígneas y sedimentarias	Inspección visual y evaluación de la sensibilidad e índice de liquidez.	Son suelos esencialmente homogéneos. Es importante la identificación de la naturaleza y el papel de las discontinuidades heredadas, tanto primarias como secundarias para entender el comportamiento.
	(c) Poca influencia de la estructura	Suelos derivados de rocas muy homogéneas	Poca o ninguna sensibilidad y apariencia uniforme	Se comportan en forma similar a los suelos moderadamente sobre consolidados

Grupo	Subgrupo	Ejemplo	Identificación	Comentarios
B Suelos fuertemente influenciados por minerales comunes	(a) Grupo de la Esmectita y Montmorillonita	Suelos negros tropicales y suelos formados en condiciones pobremente drenadas	Colores gris a negro y alta plasticidad.	Suelos problemáticos encontrados en zonas planas; son de baja resistencia, alta compresibilidad y características fuertes de expansión y contracción.
	(b) Otros minerales comunes			Subgrupo relativamente pequeño.
C Suelos fuertemente influenciados por minerales arcillosos propios solamente de los suelos residuales	(a) Grupo de Alófanos	Suelos derivados de roca volcánica	Contenidos de agua muy altos y cambios irreversibles al secarse.	Altos límites líquidos y plásticos. Las características de ingeniería son generalmente buenas, aunque en algunos casos, la alta sensibilidad hace difícil la compactación.
	(b) Grupo de la Halloisita	Suelos derivados de rocas volcánicas antiguas, especialmente arcillas rojas tropicales.	Color rojo, topografía bien drenada.	Suelos finos de baja a media plasticidad, pero de baja actividad. Las propiedades de ingeniería son generalmente buenas, (Debe tenerse en cuenta que con frecuencia, se traslapan los suelos alófanos y los halloisíticos).
	(c) Grupo de los Sesquioxidos	Suelos lateríticos o lateritas	Apariencia granular o nodular	Es un grupo muy amplio que van desde arcilla

La aplicabilidad de las teorías y los criterios de diseño geotécnico que existen actualmente, podría no ser completamente válida en el caso de suelos residuales o en macizos rocosos completamente meteorizados, debido a diferencias importantes que existen en la constitución y estructura de los suelos y de las formaciones residuales, y las de los suelos que sirvieron de modelo para el desarrollo de la mecánica de suelos tradicional. Esta diferencia es debida principalmente, al fenómeno de la meteorización que es extensa y profunda en la mayoría de las formaciones de suelos residuales. Como características de los suelos residuales pueden mencionarse las siguientes (Brand, 1985):

- a) No pueden considerarse aislados del perfil de meteorización, del cual son solamente una parte componente. Para definir su comportamiento y las posibilidades de ocurrencia de deslizamientos, interesan prioritariamente las características del perfil estratigráfico que pasan a determinar la ocurrencia de potenciales fallas por sobre las propiedades del material en sí.
- b) Son generalmente muy heterogéneos y difíciles de muestrear y ensayar.
- c) Este tipo de suelos suele formarse en climas templados a húmedos, así como en climas tropicales, donde el proceso de meteorización tanto físico como químico permite el desarrollo de este tipo de suelos. De esta forma, es común que se encuentren en estado húmedo, lo cual representa una dificultad adicional para evaluar su resistencia al corte.
- d) Generalmente, poseen zonas de alta permeabilidad, lo que los hace muy susceptibles a cambios rápidos de humedad y saturación.

En tanto los principios generales de estabilidad de taludes se aplican por igual tanto a suelos sedimentarios como suelos residuales, pero hay diversos aspectos del comportamiento de la pendiente que le son propias, o característica de los suelos residuales. Estos incluyen lo siguiente (Wesley, 2011):

- a) Las pendientes en suelos residuales (con exclusión de suelos de "Algodón negro") generalmente se mantienen estables en ángulo mucho más pronunciado que en suelos sedimentarios. Taludes de 45° o más son frecuentes. Los cortes en cenizas volcánicas arcillas (alofanas) a menudo con 10 m de altura y 60°, no tienen peligro de deslizarse.

- b) Las fallas en suelos residuales, especialmente cuando son pendientes empinadas, es poco probable que sean fallas circulares profundas, son más bien fallas poco profundas ligeramente curvadas o casi planar (Figura 2.4). Sin embargo el volumen de material involucrado puede ser muy grande.

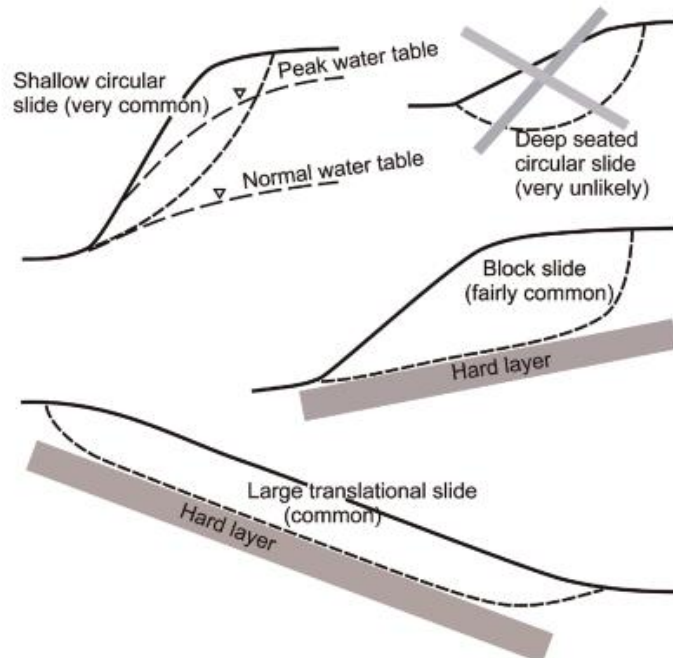


Figura 2.4 Modos de falla en suelos residuales (Wesley, 2009)

- c) El valor de c por lo general juega un papel importante en mantenimiento de la estabilidad; debido a la forma de enlaces débiles entre partículas.
- d) La resistencia residual es generalmente más cerca del peak que en el caso de la mayoría de los suelos sedimentarios, especialmente en arcillas que contienen minerales alófono o halloysita.
- e) La estabilidad de muchos taludes en suelos residuales depende de la contribución a la resistencia al corte derivados de la zona de presiones de poro negativa por encima del nivel freático.
- f) Con la presencia de discontinuidades en suelos residuales (posiblemente la mayoría), puede ser el factor que rige el comportamiento de estabilidad de taludes.

- g) La medida en que la estabilidad de taludes en suelos residuales son evaluados por los métodos analíticos es muy limitada, debido a las incertidumbres de los parámetros resistentes y en las condiciones de infiltración.
- h) Los deslizamientos de tierra en las zonas de suelos residuales en general son provocados por las fuertes lluvias, y son el resultado del aumento temporal de las presiones de poro en la pendiente. Esta es una diferencia importante con los suelos sedimentarios, donde el nivel freático tiende a permanecer constante no afectado por el clima.
- i) Los terremotos fuertes también puede ser el detonante de deslizamientos de tierra.
- j) La causa real de un gran número de deslizamientos en suelos residuales es la intervención humana. Los cortes en las laderas, la interferencia con el drenaje natural, los patrones de infiltración y la deforestación son factores que conducen a la reducción de la estabilidad y, posiblemente a fallas, especialmente en las zonas urbanas.

2.2 Origen geológico del Maicillo

La Cordillera de Nahuelbuta es un macizo montañoso localizado en la zona costera en el límite de las regiones del Biobío y la Araucanía con una altura promedio de 600 msnm (metros sobre el nivel del mar) y dos prominentes máximos de 1350 y 1280 msnm siendo su máximo entre Angol y Cañete, de 170 km, las pendientes en esta zona son más pronunciadas, siendo en muchos lugares sobre los 30°. Esta cordillera presenta una forma aproximadamente elíptica, con su eje mayor de unos 180 km orientado en la dirección norte-sur (37.2-38°S) y su eje menor de unos 100 km en la dirección este-oeste (73.8 -72.8°W). Ubicada en el margen norte del corredor de tormentas del Pacífico sur, (Garreaud *et al* 2011). La litología presente, comprende en la parte occidental rocas metamórficas y al oriente rocas intrusivas. En este sector, Cordillera de Nahuelbuta, presenta un fallamiento y/o fracturamiento más intenso en el área, esencialmente afectando al Batolito Costero (constituido por granitos, tonalitas, granodioritas, y dioritas, con zonas de migmatitas y gneises). Se constató que en la zona de contacto entre el Batolito Costero y el Basamento Metamórfico ocurren una cantidad importante de remociones en masa, debido a la inestabilidad propia al producirse una interfase entre dos medios de propiedades mecánicas distintas. Sobre el basamento metamórfico y donde se concentra el mayor relieve de la Cordillera de Nahuelbuta se observa también una mayor concentración de remociones en masas, alineadas norte-sur (ver Figuras 2.5 y 2.6), Escobar (2013)

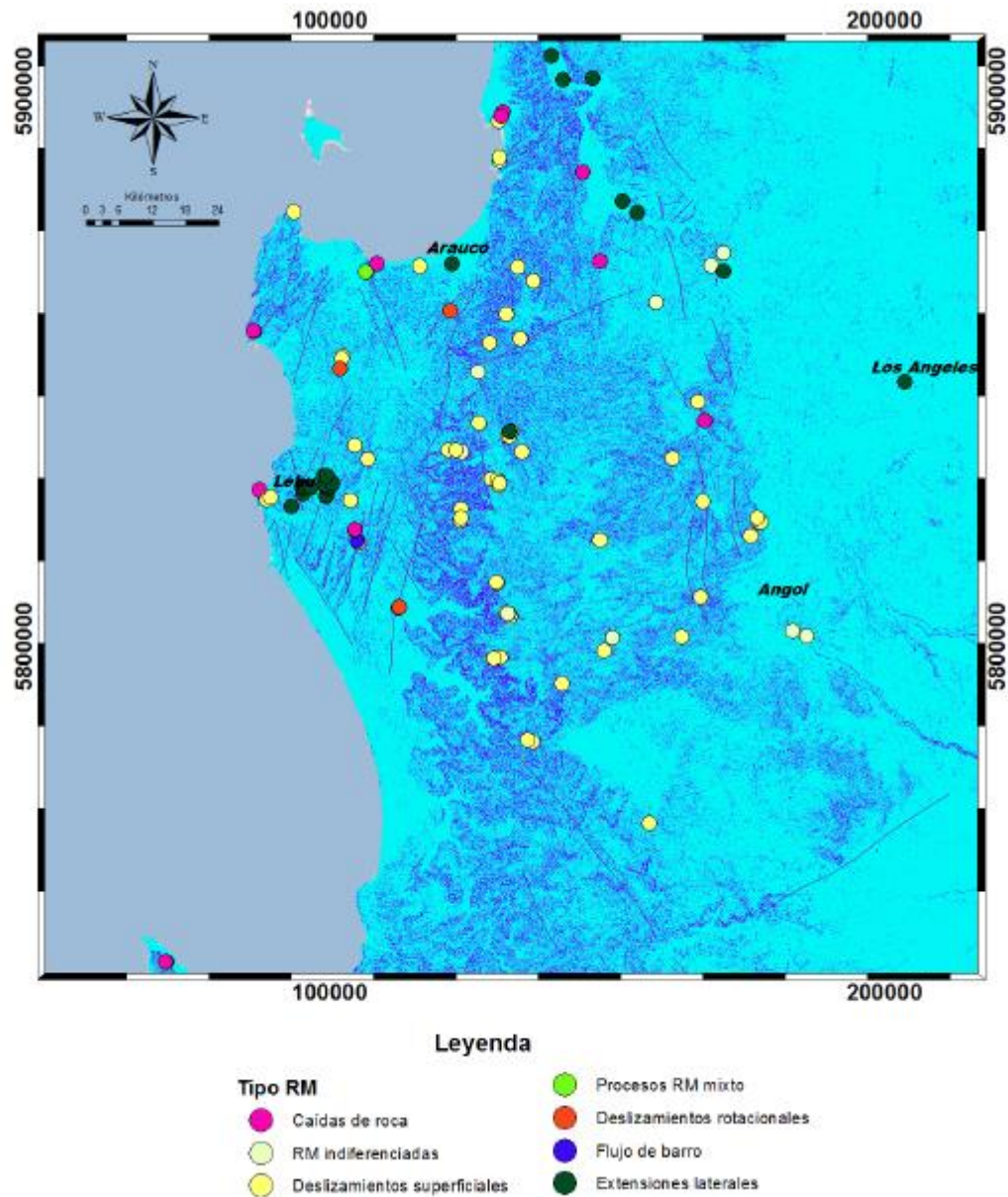


Figura 2.5: Mapa de pendientes del sector que presenta la mayor cantidad de remociones en masa inventariadas. Involucra Cordillera de Nahuelbuta y península de Arauco. Se incluyen fallas mapeadas por SERNAGEOMIN (2003) (Escobar, 2013)

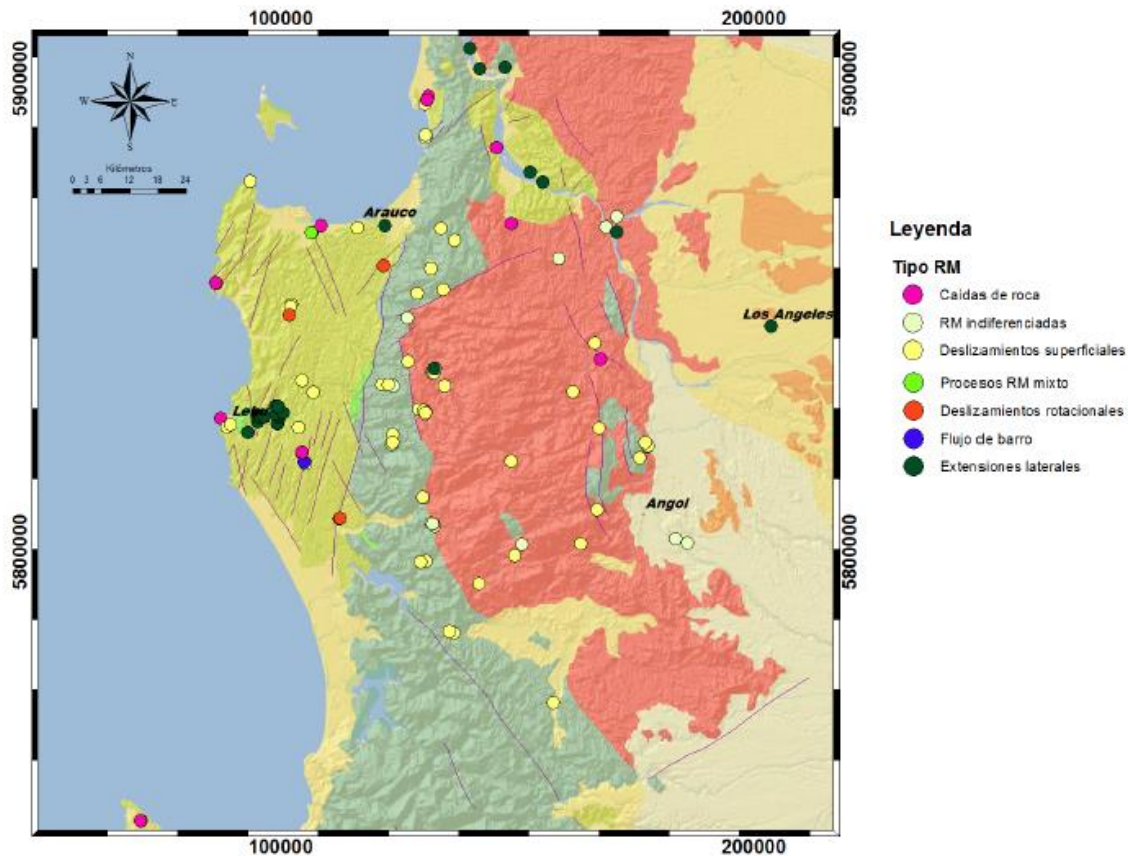


Figura 2.6: Mapa de litológico del sector que presenta la mayor cantidad de remociones en masa inventariadas. Involucra Cordillera de Nahuelbuta y península de Arauco. (Escobar, 2013)

La geología comprendida entre los 32,8° y los 38,5° Latitud S, a escala regional se caracteriza por mostrar una alineación aproximadamente NS de las unidades litológicas, paralelas al margen de subducción. En la cordillera de la costa se encuentran rocas metamórficas que constituyeron un prima de acreción en el Devónico - Carbonífero y se pueden considerar el esqueleto del sector costero de Chile desde la frontera con Perú hasta los 38° S, además de rocas plutónicas del carbonífero triásico que aparecen en la Cordillera de Nahuelbuta hasta la altura de Valparaíso (38° - 33° S) conformando el Batolito Costero de Chile central (Escobar, 2013).

El batolito costero es una gran masa de roca intrusiva que se ha formado en paralelo a la zona de subducción, a partir del enfriamiento del magma a kilómetros de profundidad (de 5 a 30 km aproximadamente) compuestos por unidades de dioritas calcoalcalinas, tonalitas, granodioritas y granitos.

Las rocas intrusivas o rocas plutónicas e hipoabisales que se distribuyen en una franja alargada constituyendo el esqueleto de la Cordillera de la Costa desde los 33° hasta los 38° S. predominan, rocas graníticas del Carbonífero - Pérmico (CPg). Estas se componen de monzodioritas, granodiorita, monzogranito, monzonita, tonalita, diorita, monzodiorita cuarcífera, granito, pórfido andesítico, pórfido dacítico, pórfido granodiorítico, brecha hidrotermal y secundariamente gabro, como se ve en la Figura 2.7.

A continuación se describen los afloramientos rocosos según (SERNAGEOMIN (2003) en el área de estudio se destacan los siguientes afloramientos rocosos y se pueden observar en la Figura 2.8;

- Cpg: Para las muestras B.1 (Bloque 1), B.3 (Bloque 3), B.4 (Bloque 4), B.7 (Bloque 7), y B.12 (Bloque 12)
- Pztr4(a): Para las muestras B.14 (Bloque 14) y B.15 (Bloque 15)

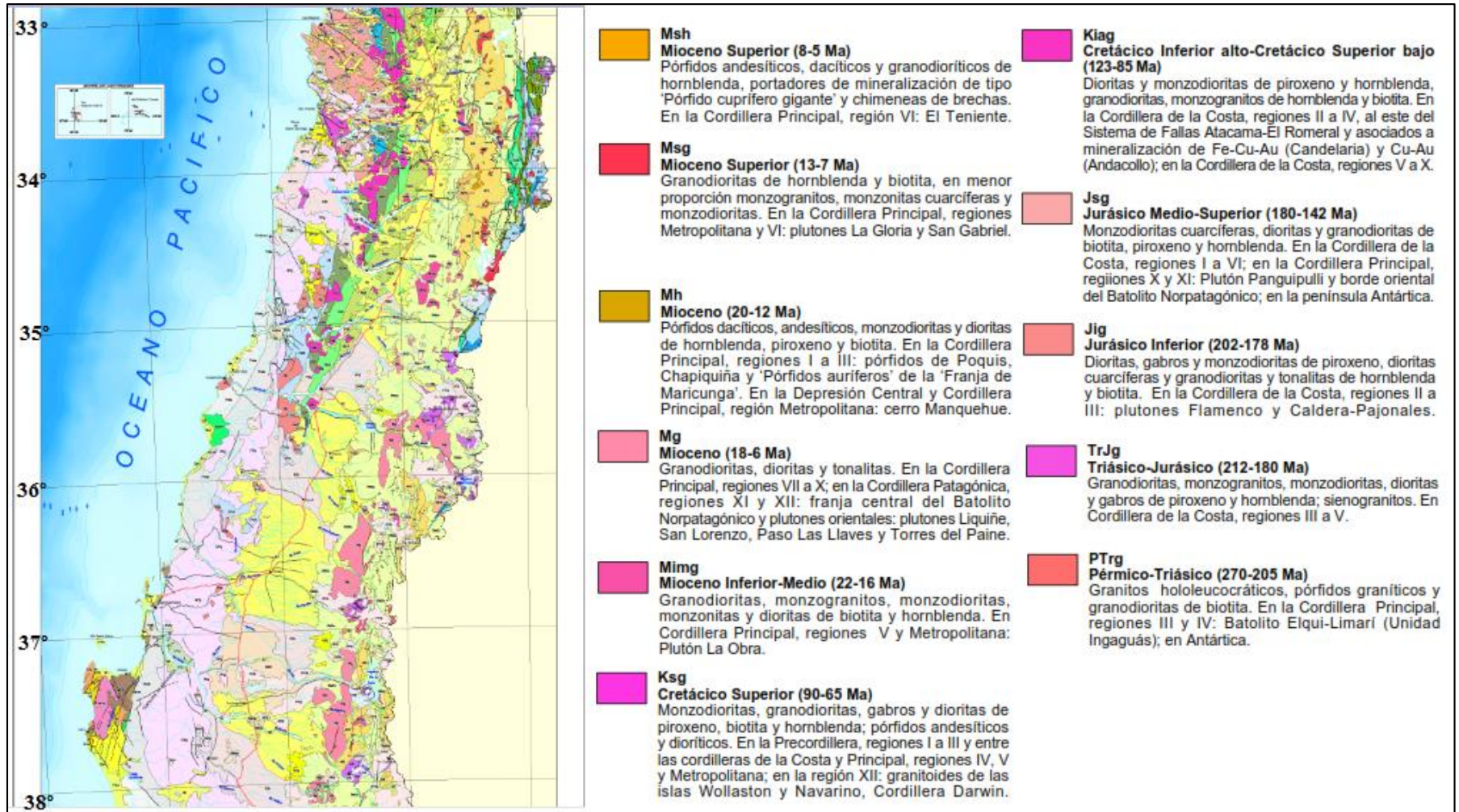


Figura 2.7 Mapa geológico según SERNAGEOMIN (2003), Afloramientos de rocas intrusivas entre los 33° y 38° a lo largo de la Cordillera de la Costa

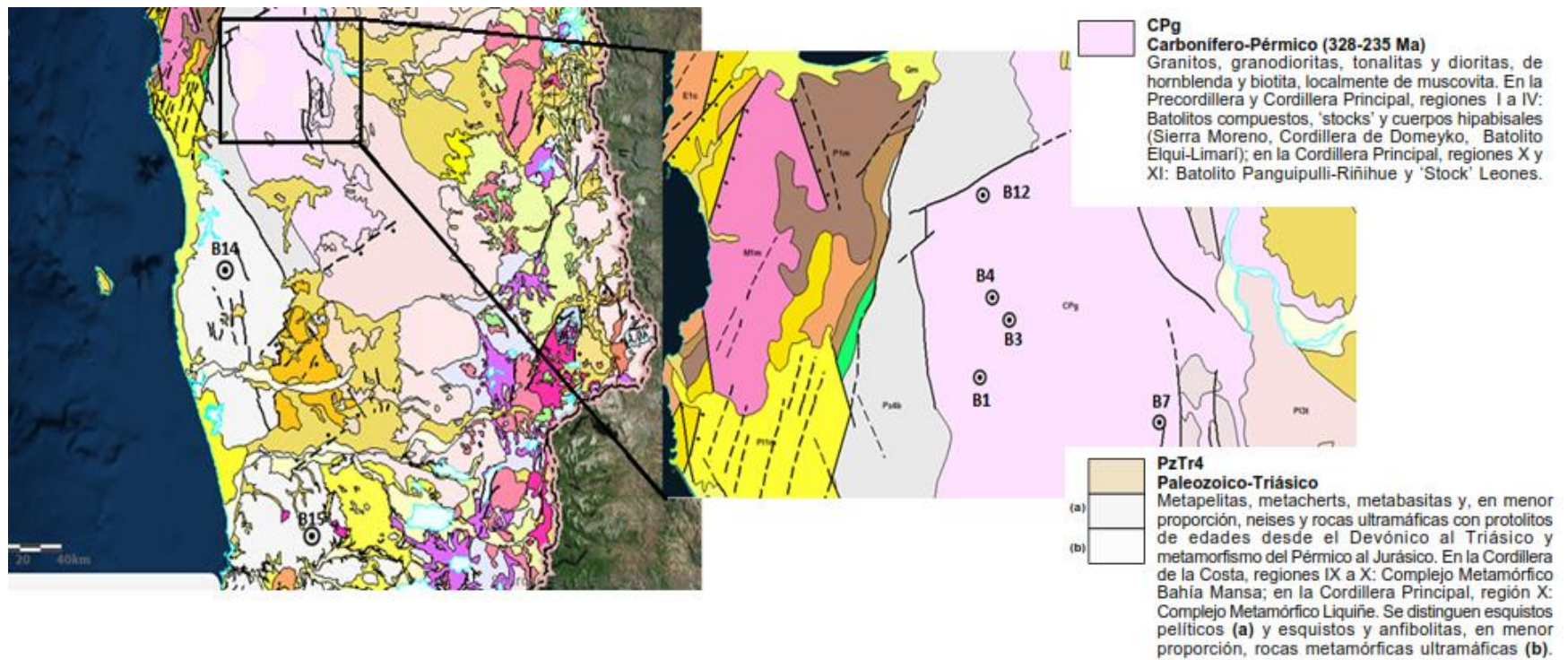


Figura 2.8 Mapa geológico según SERNAGEOMIN (2003), extracción de bloques inalterados del B.1, B.3, B.4, B.7, B.12, B.14 y B.15, según perfiles de estudio.

Producto de la meteorización de las rocas graníticas del batolito costero se forma el maicillo. Este suelo residual es el más abundante en Chile. Según lo indicado por (Toro, 2007) el suelo generado a partir de la meteorización creciente en profundidad de roca madre granítica puede mantener los planos de clivaje o diaclasas del macizo rocoso que le dio origen, los que a veces pueden estar rellenos de arcilla y constituir planos de debilidad.

A continuación en las Figuras 2.9 al 2.12 se puede observar el Maicillo encontrado en los distintos taludes estudiados.

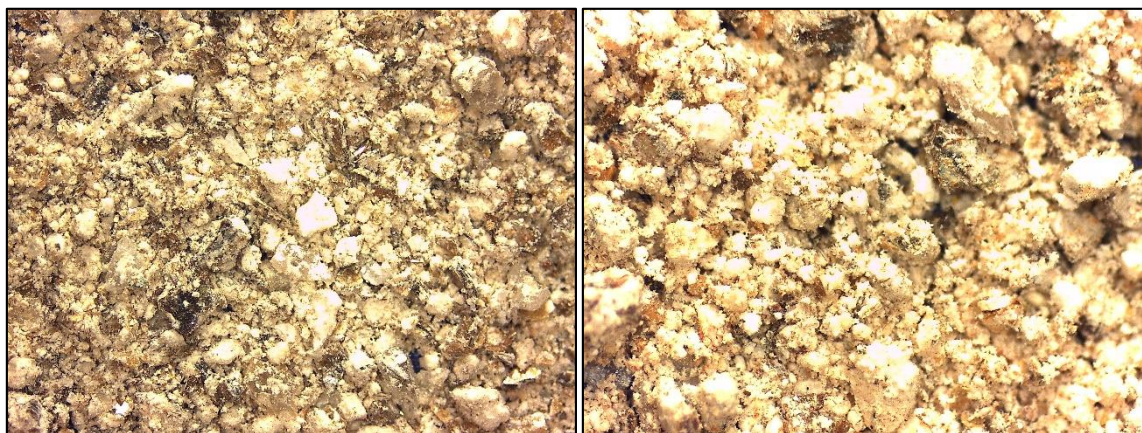


Figura 2.9 Muestras B.1 y B.3, Fondos Trongol y Caballo de palo

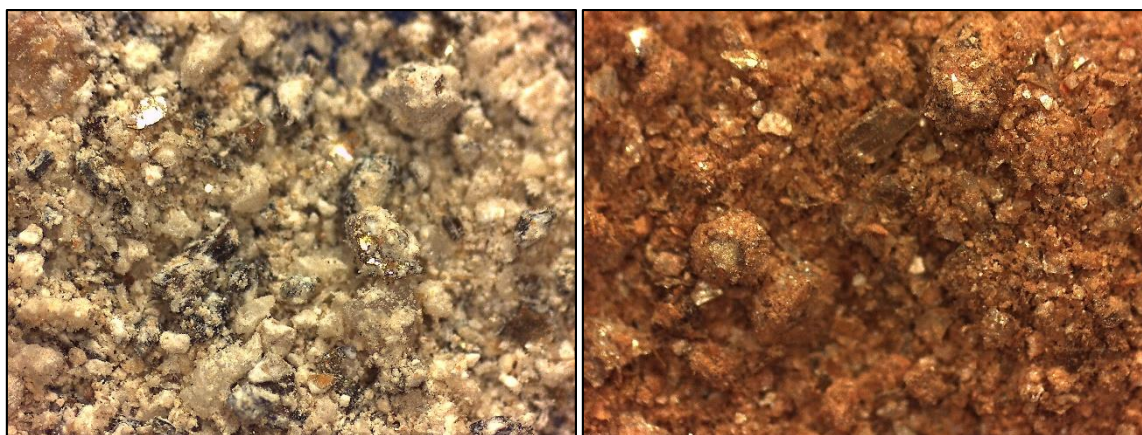


Figura 2.10 Muestras B.4 y B.7, Fundo El Encanto y Parcela 11 Maintenrehue.

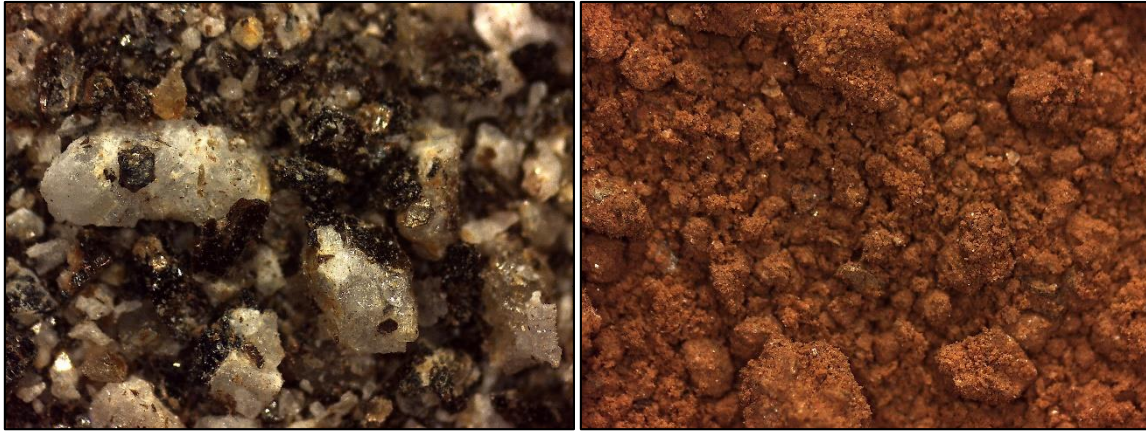


Figura 2.11. Muestras B.12 y B.14, Parcelas Cabrera y Fundo Carilebu y otros.



Figura 2.12 Muestra B.15, Fundo Alto Molul

2.1 Desarrollo de minerales en el perfil de meteorización

En los suelos se encuentra una gran variedad de minerales, heredados de las rocas parentales o formadas durante el desarrollo del suelo, y las posibilidades de existencia de éstos están reguladas por la estabilidad de los minerales en el medio en que se encuentran. La estabilidad de los minerales es responsable a su vez de que la mineralogía de las fracciones gruesas (arenas) y la de las finas (arcillas) sea distinta. Las arenas representan una fracción muy estable, puesto que los granos de las arenas son de gran tamaño versus la poca superficie relativa que poseen frente a su volumen, y en ellas predominan los granos heredados, más o menos transformados. Las arcillas se caracterizan por su gran superficie versus su tamaño (partículas muy pequeñas, donde casi toda ella es superficie por ser un filosilicato), por lo que son muy activas y están constituidas por minerales de neoformación y de alteración.

Aunque en las rocas la meteorización química suele ser más intensa y produce su descomposición y cambios mineralógicos, la física rompe y disgrega la roca, debilitando la estructura rocosa al romperse los minerales y los contactos entre partículas, aumentando la superficie expuesta a la atmósfera y permitiendo la entrada del agua. Las rocas ígneas o metamórficas son químicamente inestables en superficie al haberse formado en condiciones de presión y temperatura muy diferentes, sufriendo intensa meteorización química y cambios mineralógicos. Sin embargo, son más resistentes a la meteorización física que las rocas sedimentarias.

La exposición de las rocas ígneas como granitos y las dioritas, da lugar a fracturas de descompresión paralelas a la superficie que permiten la meteorización química, produciéndose la alteración de los minerales de la matriz rocosa, feldspatos y micas a minerales arcillosos, mientras que el cuarzo permanece como una arena. Las discontinuidades son zonas preferenciales de alteración, y entre ellas los bloques de matriz se meteorizan esféricamente, quedando la parte central inalterada.

En general, la mayoría de los silicatos se meteorizan a minerales arcillosos. Bajo determinadas condiciones ambientales, como climas tropicales o húmedos, se descomponen en óxidos e hidróxidos de aluminio y hierro. Los minerales arcillosos finales producto de la meteorización dependerán de los

minerales arcillosos finales producto de la meteorización dependerán de los minerales originales, del contenido en agua y del pH.

La formación y evolución de los perfiles de meteorización de granitos está ligada a la migración de elementos químicos. Generalmente, el orden de migración de los principales elementos formadores de rocas es: Cl, S → Ca → Na → Mg → K → Si → Fe, Al (Huang et al., 1996).

El perfil de meteorización de granito incluye los minerales primarios y secundarios. Los minerales primarios son cuarzo, feldespato, piroxeno, hornblenda, olivino y mica, en general sueltos como granos por la meteorización física. Los minerales secundarios son formados desde los minerales primarios por meteorización química. Los minerales secundarios son las componentes más importantes en los perfiles de meteorización como lo muestra la siguiente secuencia (Huang et al., 1996; Wang, 1992; Li, 1987):

1. feldespato → sericita → hidromica → caolinita;
2. piroxeno y hornblenda → clorita → montmorillonita → halloysita → caolinita;
3. biotita → vermiculita → montmorillonita → caolinita;
4. cuarzo → sílice → calcedonia → cuarzo → secundario.

Los perfiles de meteorización de granitos contienen en general abundante halloysita. Por ejemplo, sobre el 75% del total del contenido total de arcillas y sobre el 25% del contenido de los suelos son compuestos de halloysita en los granitos completamente meteorizados.

Los perfiles de meteorización de granitos son a menudo encontrados en condiciones parcialmente saturadas. Si el suelo es subsecuentemente saturado o si el contenido de agua incrementa drásticamente, la resistencia al cizalle final puede depender del tipo de arcilla presente en el suelo. Si es la caolinita el mineral predominante, el efecto de la humedad puede no ser importante. Sin embargo, si es la halloysita o la montmorillonita el mineral principal, al encontrarse húmedo el suelo, puede decrecer en forma importante su resistencia al cizalle.

Los perfiles de meteorización de suelos graníticos también contienen sobre un 5% de goethita (Irfan, 1996), y una cantidad menor de gibbsita. Una pequeña cantidad de hematita también puede estar

presente. Estos minerales son conocidos en conjunto como minerales sesquióxidos de hierro y aluminio.

Las propiedades físicas e ingenieriles de los perfiles de meteorización pueden ser fuertemente influenciados por la presencia de sesquióxidos. Estos minerales en clusters o agregados reducen la habilidad de los minerales de arcilla para absorber agua y pueden también cementar físicamente los granos adyacentes, entregando una verdadera cohesión al suelo. Esto también resulta por tanto en un aumento de la resistencia cohesionada del suelo.

2.2 Maicillo en la literatura

El maicillo es uno de los suelos residuales más comunes y abundantes en Chile. Es el producto de la meteorización de rocas graníticas del batolito costero. El batolito costero es una gran masa de roca intrusiva que se ha formado en paralelo a la zona de subducción, a partir del enfriamiento del magma a kilómetros de profundidad (5 a 30 km aproximadamente) y que se emplaza a lo largo de la cordillera de la costa desde Valparaíso hasta la Cordillera de Nahuelbuta. Estas grandes masas de magma solidificado enterradas en la corteza terrestre, han quedado expuestas a la superficie producto del levantamiento continental ocurrido algunos cientos de años y posterior erosión de mantos rocosos metamórficos y sedimentarios que lo sobreyacían. Últimamente se suma la acción antrópica, al excavar cerros y montañas ya sea en cortes de caminos y carreteras y extracción enrocados y chancado de canteras. Granodioritas y tonalitas son las unidades que afloran y que se han visto expuestas a un fuerte proceso de meteorización física y química que ha aflojado y desmembrado las uniones entre los cristales de cuarzo, mica, feldespatos ferromagnesianos y ortoclasas. Esto resulta en el desprendimiento de bloques, algunos de los cuales pueden ser reducidos con las manos a partículas de cuarzo.

El maicillo es un material difícil de analizar mecánicamente, debido a lo complejo de su composición. Además, no es posible establecer si su respuesta mecánica corresponde a la de una roca meteorizada o de un suelo o probablemente la mezcla de ambos (Villalobos, 2014).

El término maicillo es muy utilizado en Chile, pero corresponde en rigor a un Arenosols. Según la clasificación de la FAO (2006), Arenosols comprende a los suelos arenosos, incluyendo también los

suelos desarrollados en arenas residuales después de la meteorización *in situ* de sedimentos ricos en cuarzo o roca, y suelos desarrollados en depósitos de arenas desarrolladas recientemente como las dunas y playas. Muchos arenosols corresponden a *Arenic Rudosols* (Australia), *Psammozems* (Federación Rusa) y *Neossolos* (Brasil).

El material parental de los Arenosols son áreas donde ocurre meteorización extrema en rocas silíceas así como depósitos no consolidados en lugares calcáreos, donde el material transportado es de textura arenosa. Aunque la mayoría de los Arenosols ocurren en regiones áridas y semiáridas, estos son típicamente azonales; son encontradas en el rango más amplio posible de los climas, desde muy árido a muy húmedo y de frío a caliente. Arenosols se forman en mantos de meteorización de grano grueso de rocas silíceas principalmente granito, areniscas y cuarcitas y en ambiente marino, litoral, arenas lacustres y también son distribuidos en forma aérea. Estos no están limitados a la edad o periodo en que se formó la zona. Los Arenosols ocurren en superficies muy antiguas tanto como en muy recientes plataformas, y pueden casi no pueden ser asociados a ningún tipo de vegetación. (Toro, 2007)

En la literatura, es posible encontrar al maicillo también con el nombre de saprolito granítico y al proceso de generar arenas desde los cuerpos graníticos como arenización.

Este proceso se ve influenciado por biotitas y feldespatos alterados en la microfabrica de la roca de diferentes formas y una mayor influencia se ejerce sobre el microtejido desintegrado de la roca tanto los productos de la oxidación y los límites entre biotita y clorita constituyen sitios de alta probabilidad para la disgregación de la roca. Por otra parte, las fases de nueva formación de minerales esa lo largo de planos de clivajelo que produce un efecto de cuña que fractura los granos adyacentes (Le Pera, 2001).

El término de saprolito granítico, viene desde la mecánica de suelos, donde se denomina saprolito o regolito al macizo rocoso meteorizado que conserva la estructura rocosa, aunque la composición de la roca matriz se haya alterado y tenga menos resistencia que la roca sana, pudiendo presentar, además las discontinuidades originales del macizo, otros planos de debilidad por alteración preferencial. Según el grado de meteorización pueden conservar los bloques de matriz rocosa o presentar un comportamiento de suelos. De esta forma, ante la meteorización de un cuerpo granítico, si éste aún

conserva la estructura del macizo parental pudiendo además presentar nuevas discontinuidades, es posible entonces llamarlo saprolito granítico.

El saprolito conserva la textura de la roca madre. La transición desde la roca madre hasta saprolito está marcada por tanto desintegración granular como la alteración química. Alteración incipiente muestra que la mayoría de los constituyentes inestables del entorno saprolito son feldespatos, biotita y granate. Los feldespatos tienen una apariencia opaca de color marrón, debido a micro cristalización secundaria, que es probablemente un mineral sustituto de arcilla durante la meteorización (Tazaki and Fyfe, 1987).

Capítulo 3 Campaña de terreno, toma de muestras y ensayos preliminares.

El interés por caracterizar el maicillo entre las regiones VIII y X, donde se ubican los caminos forestales a lo largo de la Cordillera de Nahuelbuta, hace necesario elaborar un plan de trabajo que permita caracterizar el suelo.

A continuación se describen las etapas desarrolladas durante exploración y selección de muestras que consisten en una fase de pre-terreno, visitas a terreno y toma de muestras. El plan de recorrido ver Figura 3.1 que se desarrolla durante 2 meses por más de 1500 km de caminos forestales que incluyen las regiones del Biobío y de la Araucanía en el sur de Chile abarcando 9 fundos propiedad de Forestal Mininco S.A.

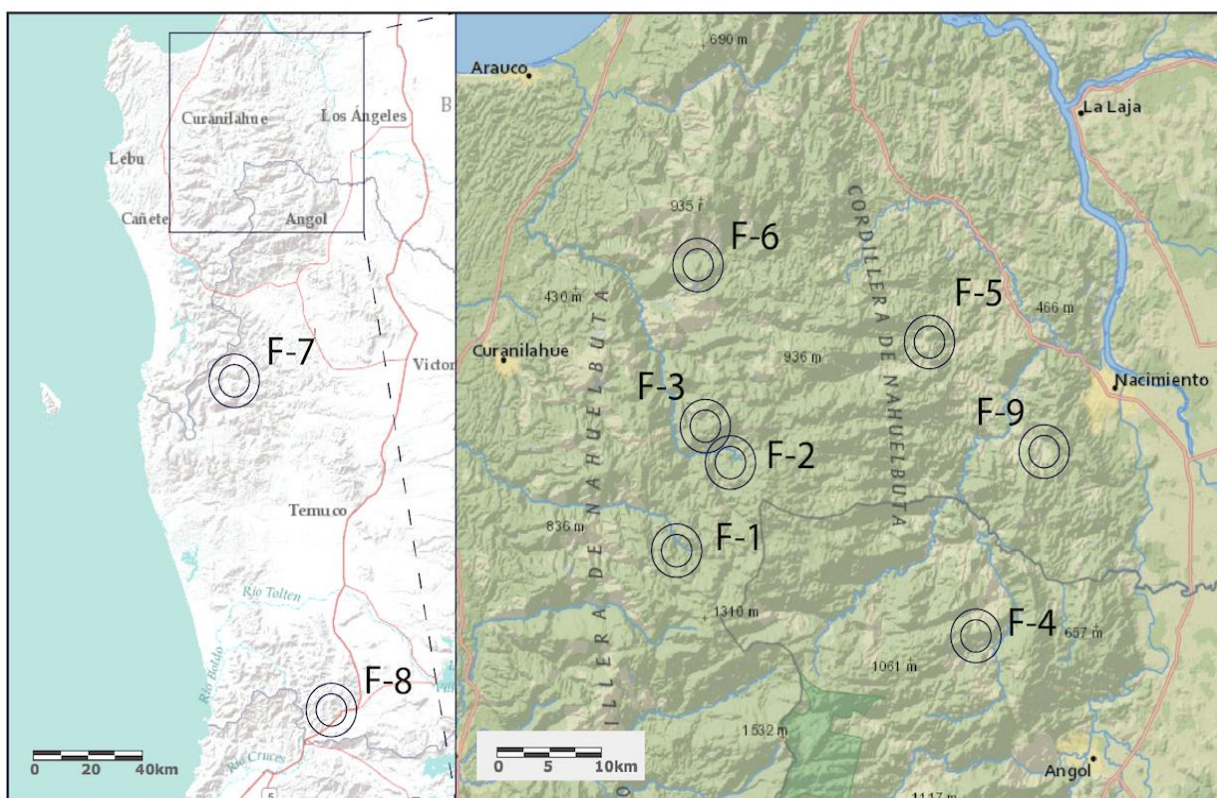


Figura 3.1 Fundos estudiados: F-1: Trongol, F-2: Caballo de palo, F-3: El Encanto, F-4: Parcela 11 Mantenrehue, F-5: Santa Maria, F-6: Parcelas Cabrera, F-7: Curilebu y otros, F-8: Alto molul y otros y F-9 : San Pedro.

3.1 Ubicación y accesos

Los siete puntos anotados en la tabla de estudio 3.1 son representativos de cada fundo perteneciente a la empresa Forestal Mininco según Figura 3.1 y se encuentran a los largo de caminos forestales desde Nacimiento hacia el Sur; los accesos eran dificultosos por su conformación de camino forestal de uso constante de camiones de carga maderera en faenas de deforestación.

Tabla 3.1 Ubicación áreas de estudio en caminos forestales de Forestal Mininco en coordenadas UTM

Lugar Zona de estudio	Coordenadas UTM (Norte)	Coordenadas UTM (Este)
Fundo Trongol	666294	5834410
Fundo Caballo de palo	671043	5842141
Fundo El Encanto	668422	5845125
Parcela 11 Maintenrehue	694089	5827789
Parcelas Cabrera	667198	5858997
Fundo Carilebu y otros	654500	5757204
Fundo Alto molul	694257	5645308

3.2 Fase pre terreno

En esta etapa se recopila la información de los fundos seleccionados acotando el sector de estudio comprendido entre las latitudes 37° y 38° S es decir entre las localidades de Nacimiento y Loncoche como se puede ver en la Figura 3.1. Durante estos dos meses en Forestal Mininco se estudian series de suelo, caminos forestales, límites de cuencas, litología y morfología del lugar, toda esta información se encuentra en la base de datos de la empresa, con el fin de optimizar los recorridos con un plan de trabajo.

3.3 Clima del lugar de estudio

La precipitación en la zona centro-sur de Chile es mayoritariamente producida por el paso de sistemas frontales, en especial durante los meses de invierno. La prominente topografía (Cordillera de los Andes y de la Costa) modifica substancialmente la distribución de precipitación, generando fuertes gradientes pluviométricos los cuales además pueden variar entre tormentas (Garreaud *et al* 2011).

Para tener una idea del clima de los sectores de estudio desde Nacimiento hacia el Sur por la Cordillera de Nahuelbuta se utiliza un mapa interactivo de los climas de Chile, proyecto financiado por el Fondo de Desarrollo Docente de la Pontificia Universidad Católica de Chile, este archivo digital interactivo que permite el acceso simultáneo a una cartografía climática de Chile y a gráficos explicativos correspondientes a estaciones meteorológicas, según la clasificación climática de Wladimir Köppen (Koeppen), además de un estudio del proyecto AFEX (Andes Cordillera – Frontal System Experiment, 2011-2013). Con un despliegue de una red de termo-pluviómetros en la cordillera de Nahuelbuta.

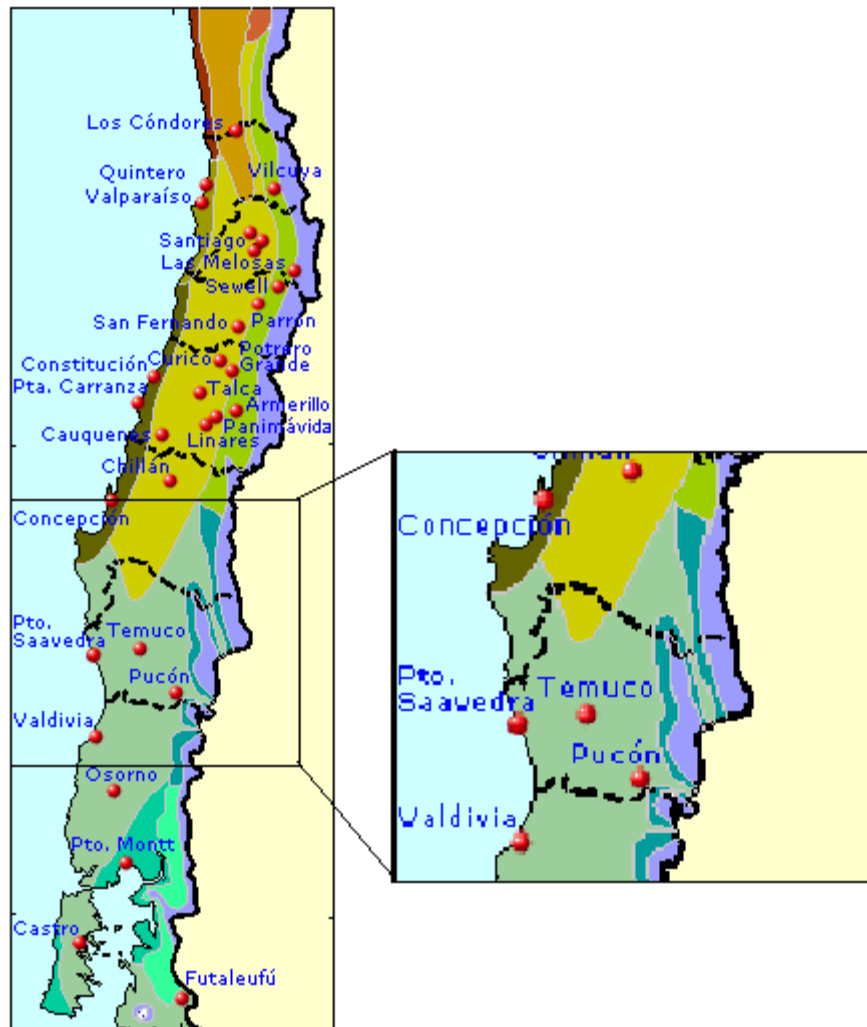


Figura 3.2 Clima según las zonas estudiadas desde Nacimiento hacia el sur.

Cartografía Interactiva de los climas de Chile [en línea]. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. <www.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva> [Junio 2015].

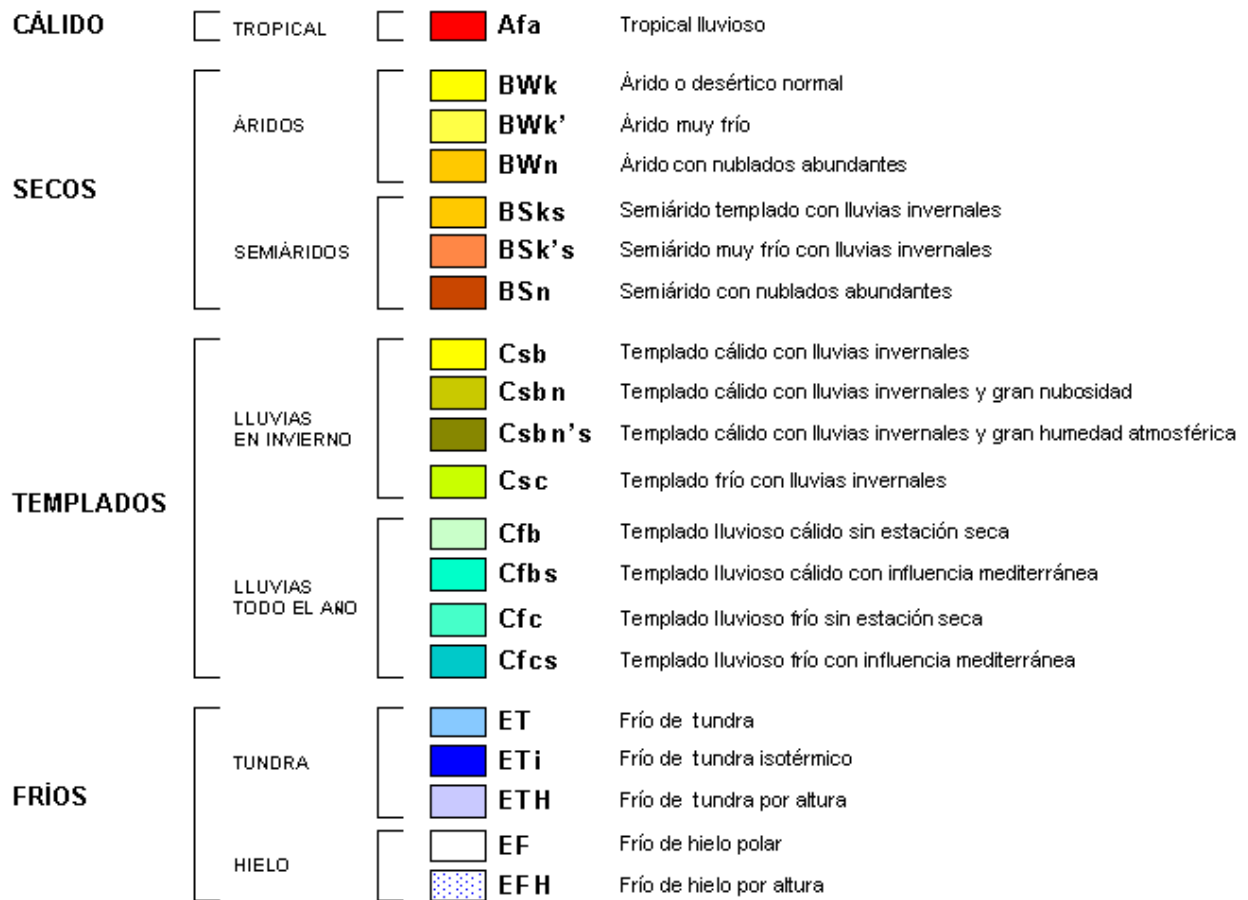


Figura 3.3 Leyenda climática según Wladimir Köppen (2015)

De acuerdo a Figura 3.2 el clima en las zonas de estudio desde Nacimiento hacia el Sur, corresponde a climas cálidos con lluvias invernales (Csb) y climas lluviosos sin estación seca (Cfb) como se puede ver la Figura 3.3 leyenda de clasificación según Wladimir Köppen.

Por lo tanto, la Cordillera de Nahuelbuta exhibe un clima templado lluvioso con una estación lluviosa extendida desde principios de otoño a fines de primavera. Hacia el este del macizo costero la depresión intermedia (~300 msnm) se extiende por unos 100 km hasta encontrar la cordillera de los Andes que a estas latitudes se eleva en promedio hasta los 2000 msnm.

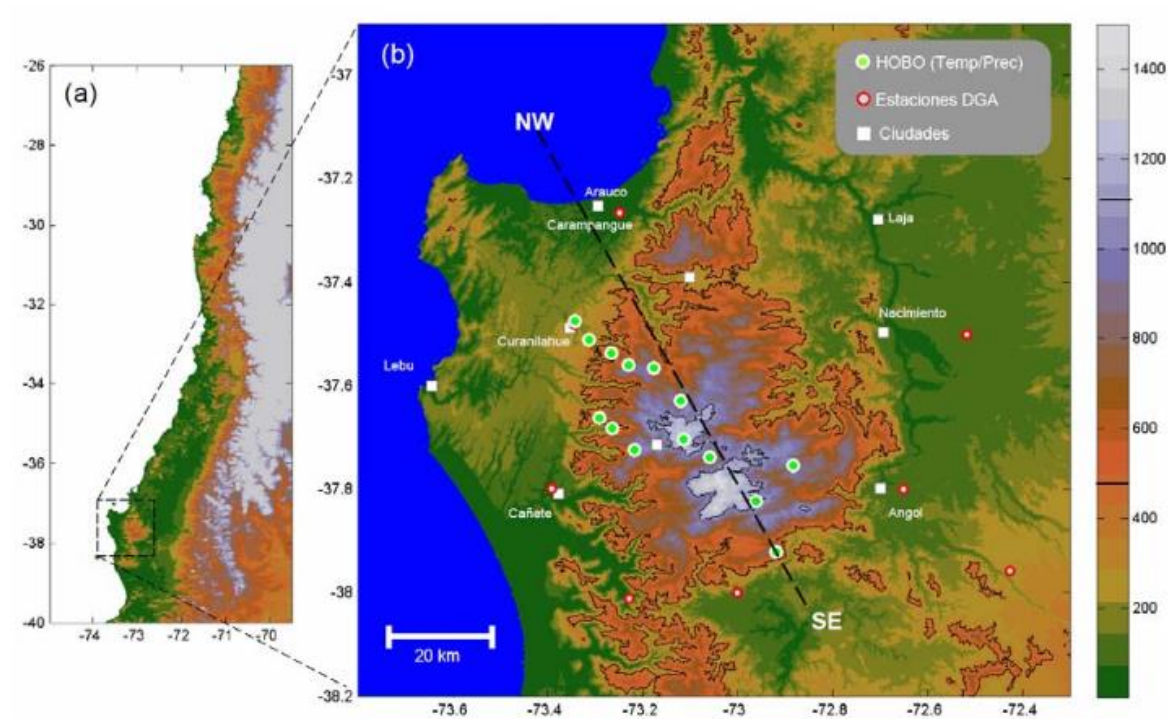


Figura 3.4. (a) Mapa topográfico de Chile centro-sur. (b) Mapa en detalle de la cordillera de Nahuelbuta mostrando las estaciones instaladas (Garreaud *et al*, 2011)

Consistente con su ubicación, extensión y elevación la Cordillera de Nahuelbuta es capaz de modificar la distribución de precipitación producto del paso de sistemas frontales por el centro-sur de Chile. En términos muy generales, para un rasgo montañoso como Nahuelbuta, se espera un aumento de precipitación en la ladera de barlovento (enfrentando al viento), un máximo de precipitación cerca de la cumbre y una disminución sobre la ladera de sotavento y las planicies viento abajo. El balance nacional de aguas (DGA, 1987) efectivamente indica un promedio climatológico de precipitación superior a los 3500 mm en la zona más alta de Nahuelbuta que contrasta con promedios cercanos a los 1200 mm (700 mm) en las planicies viento arriba (abajo) de la cordillera.

La figura 3.5 muestra las precipitaciones observadas para un evento ocurrido en junio de 2011.

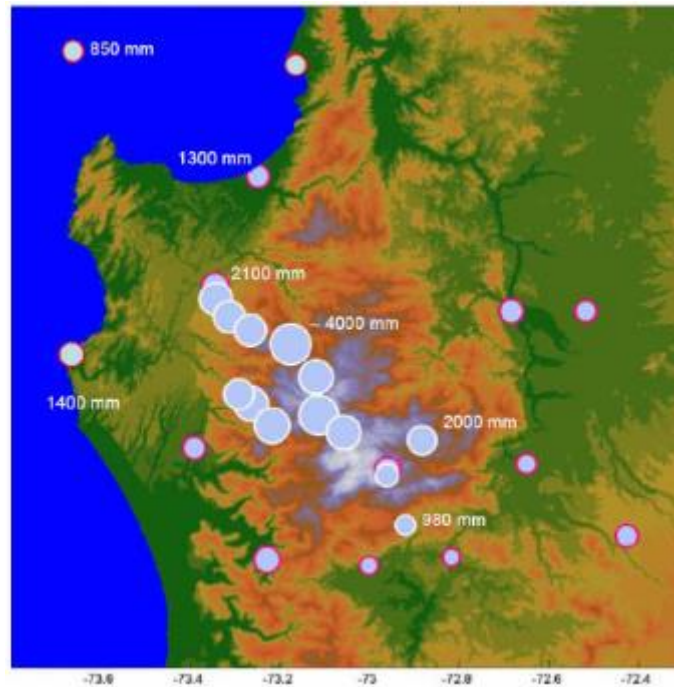


Figura 3.5 Tamaños de círculo indica precipitación acumulada para valores climatológicos de acumulación anual (Garreaud *et al*, 2011)

La influencia climática en la zona, debido a las precipitaciones orográficas que producen un aumento significativo de las precipitaciones en las cumbres en comparación con las zonas de barlovento y sotavento (Garreaud *et al*, 2011) pueden producir un aumento en las condiciones de saturación, favorecer la meteorización y erosión por lluvia, por nombrar algunas de sus consecuencias.

3.4 Visita a terreno

Durante los recorridos realizados en terreno se identifican los taludes que presentan falla o se encuentren en peligro de deslizamiento, se realiza un registro fotográfico, en el cual se eligen los lugares de donde se extraen las muestras de 9 fondos escogidos. Se seleccionan 56 taludes con problemas de deslizamiento de los cuales se extraen 19 bloques de maicillo. Además se toma un total de 59 muestras alteradas para análisis granulométrico y mineralógico. De algunos taludes se toma más de una muestra debido a la extensión del mismo. Se seleccionan 7 bloques representativos de cada fondo.

A continuación se muestran en las Figuras 3.6 al 3.9 los taludes que se estudiaron para esta investigación.



Figura 3.6 Taludes en Fundos Trongol (F-1) y Caballo de palo (F-2)



Figura 3.7 Taludes en Fundos El Encanto (F-3) y Parcela 11 Maintenrehue (F-4)



Figura 3.8 Taludes en Parcelas Cabrera (F-6) y Fundo Carilebu y otros (F-7)



Figura 3.9 Talud en Fundo Alto molul y otros (F-8)

La selección de la ubicación para la extracción de las muestras se realizó de acuerdo a los puntos anteriores. En terreno y para cada talud se define un lugar representativo del mismo de donde se extrae un bloque de aproximadamente 45 x 45 x 45 cm como se muestra en la Figura 3.10.



Figura 3.10 Extracción de un bloque inalterado para ensayo de laboratorio.

De cada fundo estudiado la empresa Ecofor Servicios Forestales Ltda. realiza la extracción de bloques de material y los traslada hasta Concepción entregándolos en el Laboratorio de Geomateriales de la universidad Católica de la Santísima Concepción donde se realizan los ensayos.

Cada uno de estos bloques fue marcado según el orden de extracción de acuerdo al recorrido de los fundos, con el propósito de hacer de manera más fácil la identificación de muestras al realizar los ensayos en laboratorio. A continuación se muestra la leyenda de cada bloque:

B.1: Bloque 1, B.3: Bloque 3, B.4: Bloque 4, B.7: Bloque 7, B.12: Bloque 12, B.14: Bloque 14 y B.15: Bloque 15.

3.5 Toma de muestras

La selección de la ubicación para la extracción de las muestras se realiza de acuerdo a 3.2). En terreno y para cada talud se define un lugar representativo del mismo de donde se tomaran pequeñas muestras (1-2 kg de peso), y se definirán y marcarán los sectores en que requerirá la extracción de muestras mayores de suelo (bloques) de aproximadamente 45 x 45 cm.

Se considera la toma de dos tipos de muestras:

- La primera considera la toma de muestras pequeñas de entre 1 y 2 kg de peso. El objetivo de estas muestras es realizar análisis de laboratorio de granulometría mediante difracción laser, granulometría por tamizado, mineralogía y ángulo de reposo. Se tomarán todas las muestras que se estimen necesarias. Se estima en primera instancia la recolección de 59 muestras de este tipo.
- El segundo tipo de muestras corresponde a bloques inalterados similares a los que se extrajeron para el estudio de estabilidad de taludes presentado en septiembre de 2013 por el LGM. Estos bloques serán extraídos por la empresa Ecofor Servicios Forestales Ltda y serán trasladados a las dependencias del laboratorio de Geomateriales (LGM) en Concepción. Se estima la extracción de entre 17 bloques de este tipo. El objetivo de estos bloques es realizar ensayos mecánicos de laboratorio a las muestras recibidas, entre otros.

3.6 Ensayos de Laboratorio

Los ensayos de laboratorio serán realizados por el Laboratorio de Geomateriales (LGM), de la Universidad Católica de la Santísima concepción y el Instituto de Geología Económica Aplicada (GEA), de la Universidad de Concepción como se detalla a continuación:

- Ensayos realizados por el LGM: Clasificación, Corte Directo, Proctor modificado, determinación de densidades máximas y mínimas, ángulo de reposo, ensayos que permiten la caracterización mecánica del material de estudio.
- Ensayos realizados por el GEA: Granulometría mediante difracción laser y Mineralogía.
- La realización de estos ensayos es lenta y se requerirán entre 6 y 8 meses de trabajo de laboratorio dependiendo de la cantidad de muestras a analizar.

3.7 Ensayos preliminares

En la Tabla 3.2 se muestra el programa de ensayos realizados para poder determinar las propiedades físicas del maicillo presente en cada uno de los puntos de estudio, se muestra además la norma utilizada, y número de ensayos realizados.

Tabla 3.2 Cantidad de ensayos realizados en laboratorio

Ensayo	Norma	Cantidad
Gravedad específica	NCh 1532.Of 80.	7
Granulometría	ASTM D2487-06	7
Granulometría mediante difracción Laser	-	17
Densidad máxima y mínima	NCh 1726.of 80	7

3.7.1 Gravedad específica

Se realizaron ensayos a las siete muestras según el procedimiento recomendado en la normativa chilena NCh 1532.Of 80.



Figura 3.11 Determinación de la gravedad específica mediante picnómetro.

La gravedad específica de las siete muestras estudiadas es la razón entre la masa unitaria de las partículas de suelo y agua. Este parámetro es utilizado para determinar la relación peso-volumen y se determina de la siguiente forma:

$$G_s = \frac{M_s}{M_s + M_a - M_m}$$

donde, M_s es la masa de suelo seco, M_a es la masa del matraz con suelo seco y agua sin aire y M_m es la masa del matraz lleno sólo con agua sin aire.

El valor de la gravedad específica de las partículas sólidas obtenido para las siete muestras ensayadas se muestra en la tabla 3.3

Tabla 3.3 Gravedad específica, (G_s)

Muestra	Fundo	G_s
B.1	F-1	2,583
B.3	F-2	2,640
B.4	F-3	2,651
B.7	F-4	2,648
B.12	F-6	2,690
B.14	F-7	2,720
B.15	F-8	2,629

La importancia de este ensayo para la caracterización del suelo, es su aporte de información sobre las partículas que componen el suelo y así determinar su densidad, además de ser un parámetro esencial para el cálculo de relación de vacíos de los suelos, siendo este ensayo fundamental para el estudio del comportamiento del cambio volumétrico de estos.

El análisis de las muestras permite observar que para fondos distantes entre sí, el rango de G_s es entre 2,583 y 2,720, el resultado es prácticamente muy cercano a pesar de lo distante de los fondos (aprox 1500 km) lo que indica que el sector de estudio está conformado por un suelo residual (maicillo) que proviene de la misma formación rocosa.

3.7.2 Granulometría

El análisis granulométrico realizado a las siete muestras de suelo se realiza de acuerdo a las consideraciones propuestas por la ASTM D2487-06. Se puede observar en la tabla 3.4 el resultado de este ensayo para todas las muestras.

Tabla 3.4 Granulometría de las siete muestras.

Malla ASTM	tamiz (mm)	% que pasa Muestra B.1	% que pasa Muestra B.3	% que pasa Muestra B.4	% que pasa Muestra B.7	% que pasa Muestra B.12	% que pasa Muestra B.14	% que pasa Muestra B.15
N°4	4,75	90,04	100,00	98,80	99,87	99,90	93,70	99,68
N°10	2	90,04	100,00	90,98	97,57	82,64	83,91	97,74
N°20	0,85	63,45	83,37	75,46	80,49	62,38	77,95	96,76
N°40	0,425	47,01	66,28	56,33	53,22	46,08	74,52	94,30
N°60	0,25	37,27	55,53	43,76	34,00	34,68	70,87	87,47
N°100	0,15	31,43	49,08	36,56	22,10	27,41	66,42	75,32
N°200	0,075	25,49	40,23	32,17	15,03	22,83	61,30	58,62

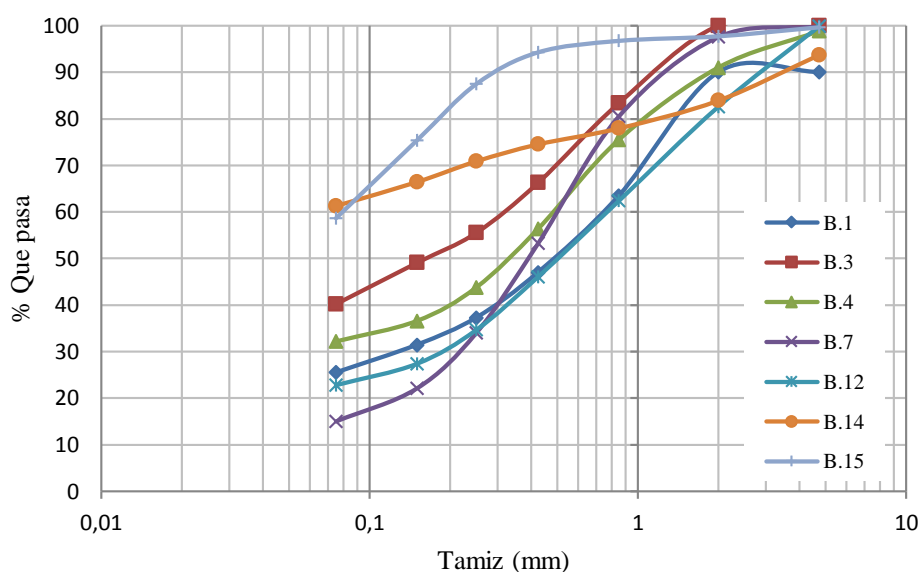


Figura 3.12 Distribución granulométrica de las siete muestras estudiadas

Se aprecia una diferencia entre las curvas granulométricas (Figura 3.12), observando que las curvas de las 7 muestras se encuentran desplazadas hacia arriba, lo cual indica que las muestras de estas zonas tiene una mayor cantidad de finos entre un 15 y un 60 % (no fue coherente con los resultados de los límites de Atterberg a pesar del gran contenido de fino, estos no poseían plasticidad a excepción de la muestra B.14).

3.7.3 Granulometría mediante difracción Laser

Se realizó análisis granulométricos mediante difracción laser al Maicillo. Este análisis fue realizado en el instituto GEA de la Universidad de Concepción con el equipo ANALYSETTE 22 MicroTec plus

FRITSCH (Figura 3.13). La granulometría laser permite obtener distribuciones granulométricas en un rango de tamaño de partículas del orden de los 0,08 a 2000 μm , es una técnica de rápida ejecución y con gran exactitud en los resultados obtenidos. (Manual Analysette 22. Fritsch)



Figura 3.13 Equipo ANALYSETTE 22 MicroTec plus, a la izquierda unidad de medición, a la derecha unidad de dispersión ultrasónica en húmedo.

El procedimiento de ensayo consiste en colocar la muestra con el material a analizar en la unidad de dispersión (que en este caso se utilizó con la unidad húmeda), con una cantidad de 6 g de la muestra a ensayar.

A continuación la muestra es transportada a la unidad de medición por un sistema de circulación cerrado. Finalmente, un láser es dirigido hacia ella. La desviación parcial del haz láser crea una distribución de intensidad característica con forma de anillo detrás de la muestra que puede ser medida. El tamaño de las partículas es calculado basándose en la separación de los anillos formados (Figura 3.14). Partículas de mayor tamaño producen anillos más unidos, mientras que las partículas más pequeñas producen anillos más separados entre sí.

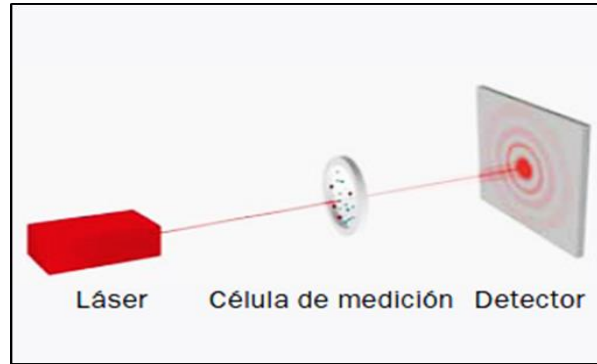


Figura 3.14 Estructura principal de un instrumento de medición de partículas por láser. Manual Analysette 22. (2008)

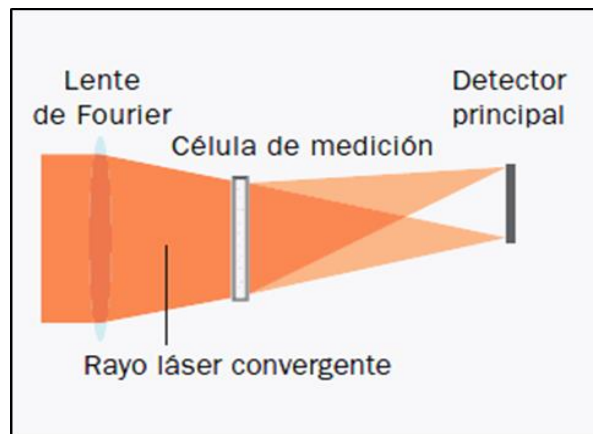


Figura 3.15. Estructura Fourier inversa del equipo ANALYSETTE 22 MicroTec plus. Manual Analysette 22.(2008)

En la Figura 3.15 se presenta un esquema de la estructura interna de la unidad de medición, en donde el lente de Fourier que concentra la luz láser dispersa en una trayectoria adecuada hacia el detector. A diferencia de los equipos convencionales, en el equipo utilizado el lente de Fourier se encuentra antes de la celda de medición.

La granulometría laser fue realizada a 17 muestras de Maicillo representativos de 56 taludes estudiados. La Figura 3.16 muestra los resultados de las 17 muestras analizadas y la Figura 3.17 las 7 muestras seleccionadas para este estudio que representan los 7 taludes de interés. Se puede observar la diferencia importante en el porcentaje de finos el tamiz N° 200 (ASTM) que va entre un 22% y un 93%. También se observa que la banda granulométrica está acotada para el d_{50} entre las 18 y 300 μm .

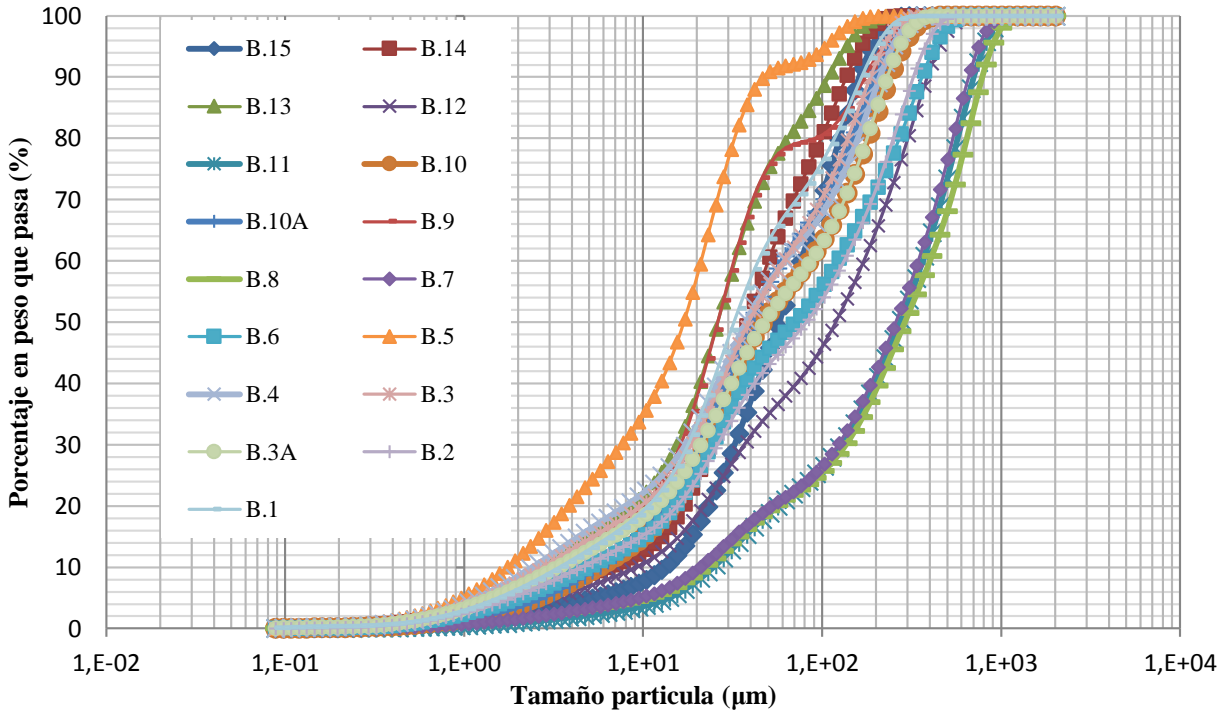


Figura 3.16 Resultados de granulometría láser realizadas a 17 muestras provenientes de los 9 fondos estudiados.

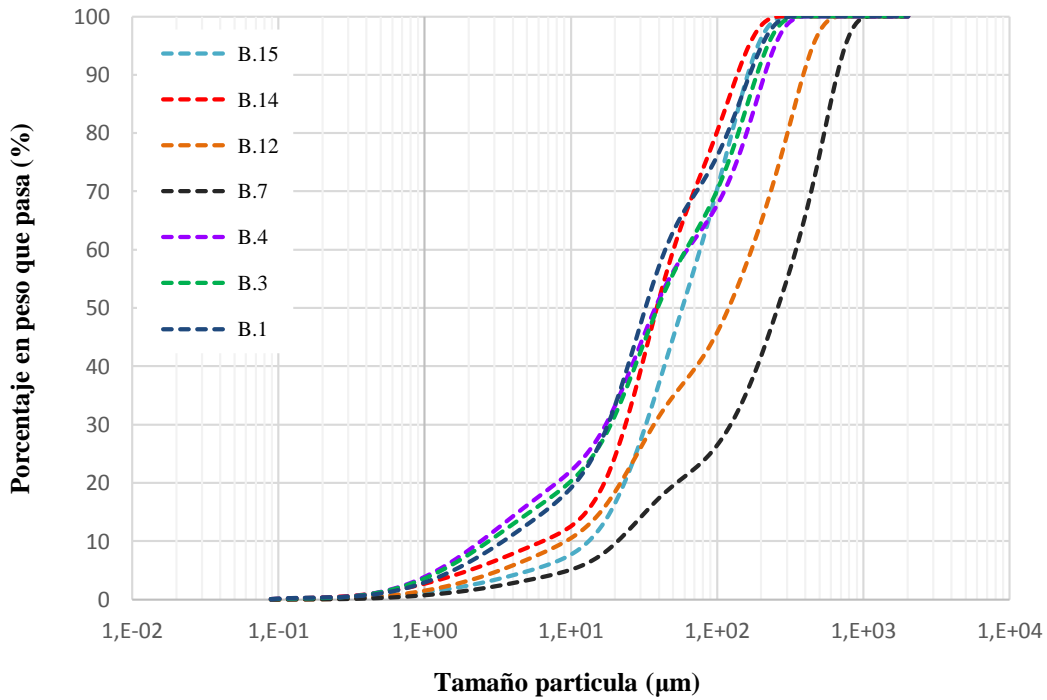


Figura 3.17 Resultados de granulometría mediante difracción láser realizada a 7 muestras provenientes de los 7 fondos en estudio.

Los diferentes tamaños de partículas, son calculados en base a las teorías de difracción de Fraunhofer (1984).

Una vez obtenidos los resultados de granulometría por tamizado y mediante difracción laser, se grafican el porcentaje que pasa en función al tamaño de tamiz [mm], para los tamices ASTM números; 4, 10, 20, 40, 100 y 200. Con el propósito de compararlos, no se aplica logaritmo al eje de las abscisas con el fin de observar mejor la superposición. A continuación en las Figuras del 3.18 al 3.24 se presentan los resultados correspondientes a cada muestra:

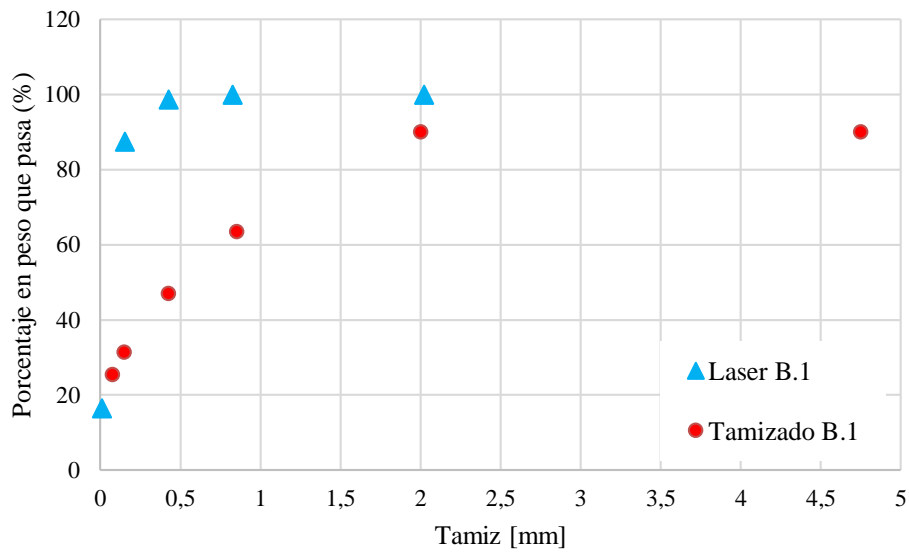


Figura 3.18 Superposición resultados mediante difracción laser y por tamizado en la muestra B.1.

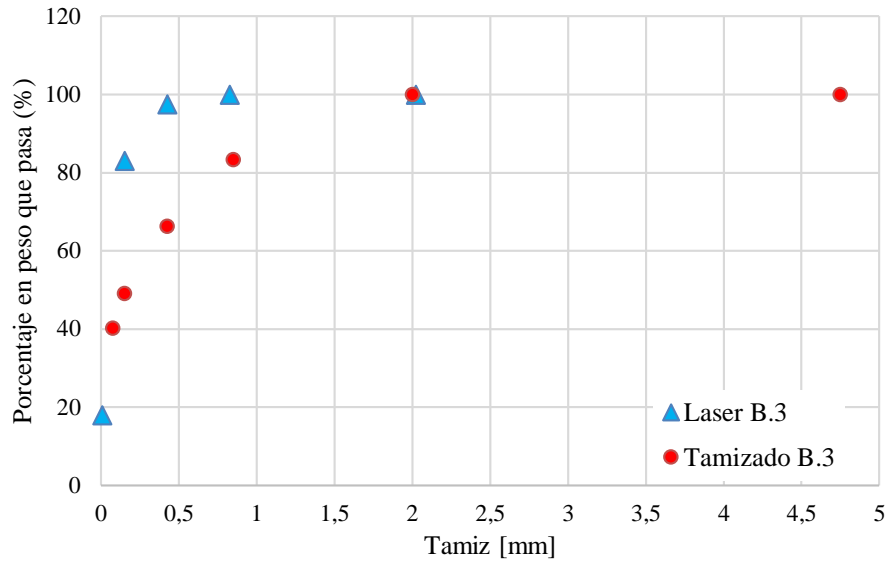


Figura 3.19 Superposición resultados mediante difracción laser y por tamizado en la muestra B.3.

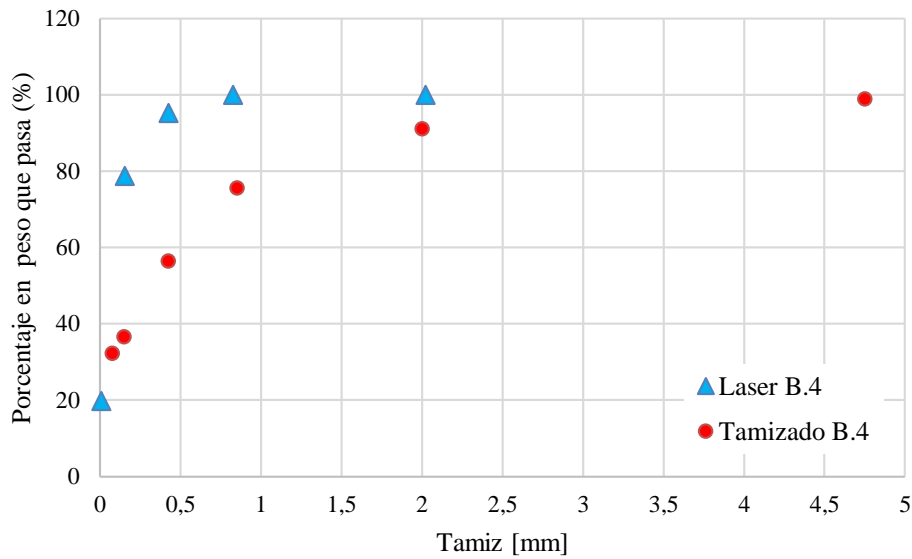


Figura 3.20 Superposición resultados mediante difracción laser y por tamizado en la muestra B.4.

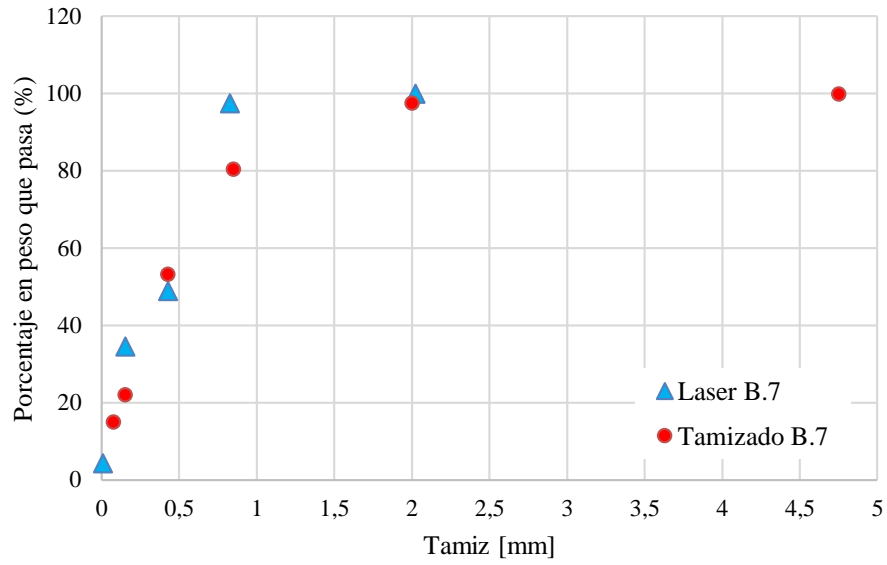


Figura 3.21 Superposición resultados mediante difracción laser y por tamizado en la muestra B.7.

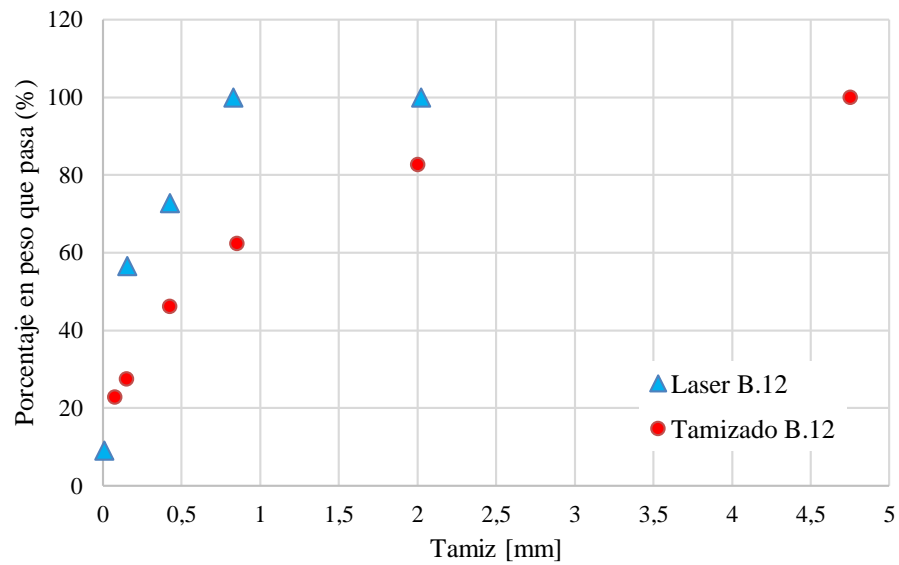


Figura 3.22 Superposición resultados mediante difracción laser y por tamizado en la muestra B.12.

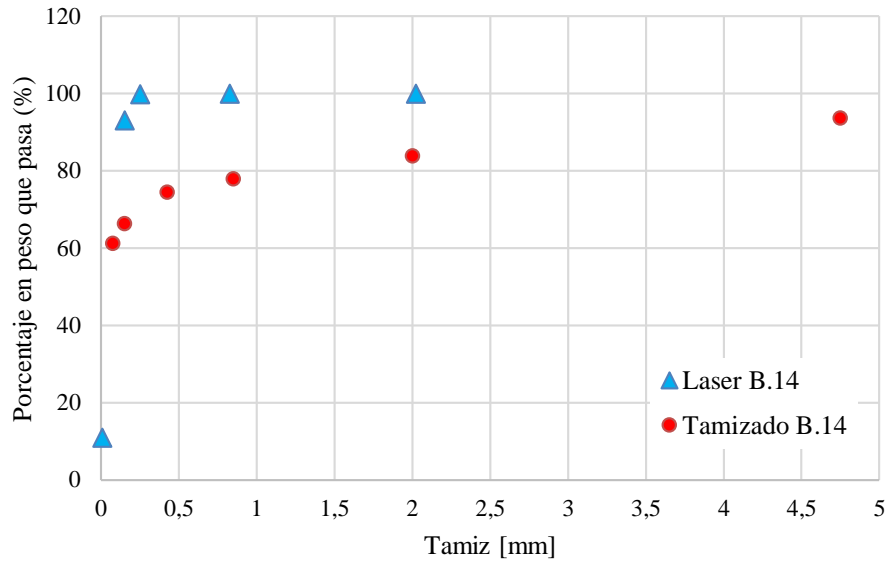


Figura 3.23 Superposición resultados mediante difracción laser y por tamizado en la muestra B.14.

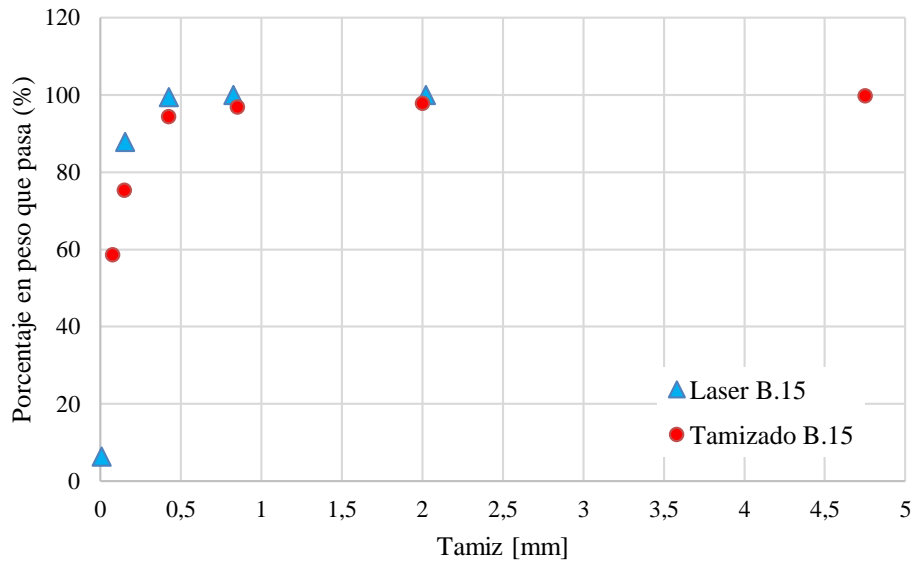


Figura 3.24 Superposición resultados mediante difracción laser y por tamizado en la muestra B.15.

De los resultados se puede concluir que ambos métodos son comparables, pero presentan apartamientos con respecto a las partículas más pequeñas, como por ejemplo las muestras B.7 y B.15, a partir de tamices menores al ASTM N° 40 (0,425 mm). La diferencia puede provenir de las desviaciones con respecto a la esfericidad de las partículas naturales.

3.7.4 Ensayo densidad máxima y mínima

El procedimiento para determinar la densidad mínima seca ($\rho_{\text{mínima}}$) consiste en depositar el material seco dentro de un molde, de diámetro interno 152.5 mm, peso 1750 g y volumen 2833 cm³ determinados previamente, de tal manera de que quede lo más suelto y homogéneo posible, para ello se utilizó un embudo de 25 mm, y se levantó suavemente logrando el llenado del molde, tal como se muestra en la (Figura 3.25a). Se enraza el molde y se registra su peso con el material. La densidad mínima queda definida como la diferencia entre el peso del molde más material y el peso del molde dividido por el volumen del molde previamente registrado.

De igual manera para la determinación de la densidad máxima seca ($\rho_{\text{máxima}}$), el procedimiento es igual en los primeros pasos al de la densidad mínima seca ($\rho_{\text{mínima}}$), pero luego de pesar el material se lleva a una mesa vibratoria (Figura 3.25 b), de frecuencia 3660 vibraciones/min y amplitud vertical entre 0,05-0.64 mm, y se coloca en la parte superior del molde, un disco y una masa de 25.9 kg, que en conjunto equivalen a una sobrecarga de 14 KPa . Posterior a ello se agrega un collarín, que centra la sobrecarga y es fijado al molde por 3 pernos. Se compactó la muestra por vibración durante 8 min (Figura 3.25 c). Una vez transcurrido el tiempo el molde es retirado de la mesa vibratoria, se registra el descenso producto del acomodo de las partículas durante la vibración, en distintos puntos y se obtiene un promedio de ellos. La densidad máxima seca queda definida por el peso del suelo en el molde dividido por la diferencia entre el volumen del molde menos el volumen de descenso (Área por promedio de descensos).



Figura 3.25: a) instalación de muestra para calcular densidad mínima, b) y c) encaje de muestra en mesa vibradora para calcular la densidad máxima.

Se lleva a cabo el ensayo de densidad mínima y máxima, bajo el procedimiento descrito en la norma Nch 1726 of.80. A continuación en la tabla 3.5 se dan a conocer los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos.

Tabla 3.5 Resultados de Densidad Mínima y Máxima

Muestra	ρ_{minima} [kN/m ³]	ρ_{maxima} [kN/m ³]
B.1	8.792	13.40
B.3	9.578	14.06
B.4	9.277	13.57
B.7	8.397	11.76
B.12	8.865	12.16
B.15	9.415	14.30

Los resultados de densidad máxima son bastante inferior a los resultados entregados por el ensayo Proctor Modificado en la sección 4.5 por lo tanto, no se recomienda realizar ensayos de Densidad relativa a muestras de macillo con altos porcentajes de fino, aunque estas clasifiquen como arenas limosas.

Capítulo 4 Caracterización mecánica

En la Tabla 4.1 se muestra el programa de ensayos realizados para poder determinar las propiedades mecánicas del maicillo presente en cada uno de los puntos de estudio, se muestra además la norma utilizada, y número de ensayos realizados.

Tabla 4.1 Cantidad de ensayos realizados en laboratorio

Ensayo	Norma	Cantidad
Límites de atterberg	NCh 1517/1.of 79 NCh 1517/2.of 79	7
Caída de cono	BS1377 of 90 -part2	7
Angulo de reposo	-	7
Corte directo (CD)	ASTM D 3080.of 03	21
Proctor modificado	NCh 1534/2.of 79	7

4.1 Límites de consistencia

La determinación de índice de plasticidad a través de los límites líquido y plástico son necesarios para la clasificación del suelo, sin embargo las siete muestras ensayadas, solo dos muestras presentaron límite líquido y una limite plástico. Los resultados de los límites de Atterberg para las siete muestras se presentan en la tabla 4.2

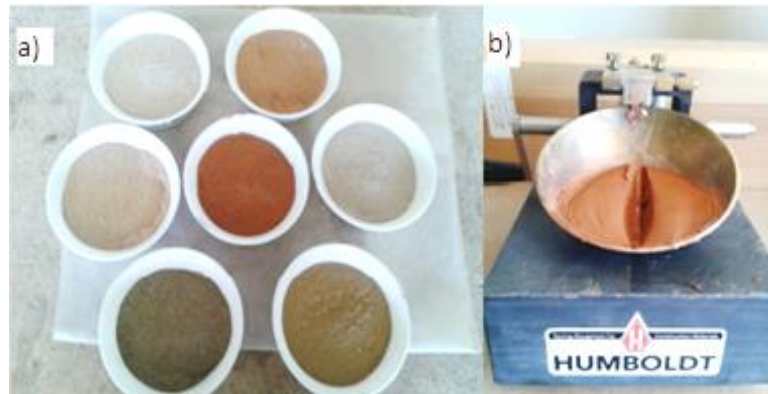


Figura 4.1 a) Siete muestras analizadas para límites de consistencia y b) Cuchara Casagrande para determinar limite líquido.

Tabla 4.2 Límites de consistencia de las siete muestras

Muestra	LL %	LP %	IP
B.1	NP	NP	NP
B.3	NP	NP	NP
B.4	NP	NP	NP
B.7	47	NP	47
B.12	NP	NP	NP
B.14	38	28	10
B.15	NP	NP	NP

Con los resultados anteriores se pueden clasificar los suelos de acuerdo a la USCS. Los resultados se indican en la tabla 4.3

Tabla 4.3 Clasificación USCS

Muestra	Clasificación USCS
B.1	SM sin plasticidad
B.3	SM sin plasticidad
B.4	SM sin plasticidad
B.7	CL sin plasticidad
B.12	SM sin plasticidad
B.14	ML
B.15	SM sin plasticidad

La variabilidad de las propiedades índices del maicillo depende del grado de meteorización en que se encuentre éste y varía dependiendo del horizonte donde se extrae la muestra, por lo tanto se recomienda repetir los ensayos de acuerdo a la cantidad de perfiles existentes. Es decir, podemos encontrar maicillos que varían desde arenas limosas con plasticidad baja a nula, hasta arenas arcillosas

con plasticidad media. Según Begonha (1989), este tipo de suelos tiene como productos finales gibbsita y caolinita en baja cantidad, por lo que esta mineralogía secundaria no genera plasticidad en los saprolitos y geotécnicamente no exhiben plasticidad, como paso en 5 de las 7 muestras dado que el IP fue no plástico (NP) y clasificaban como SM es decir arenas limosas.

4.2 Caída de cono

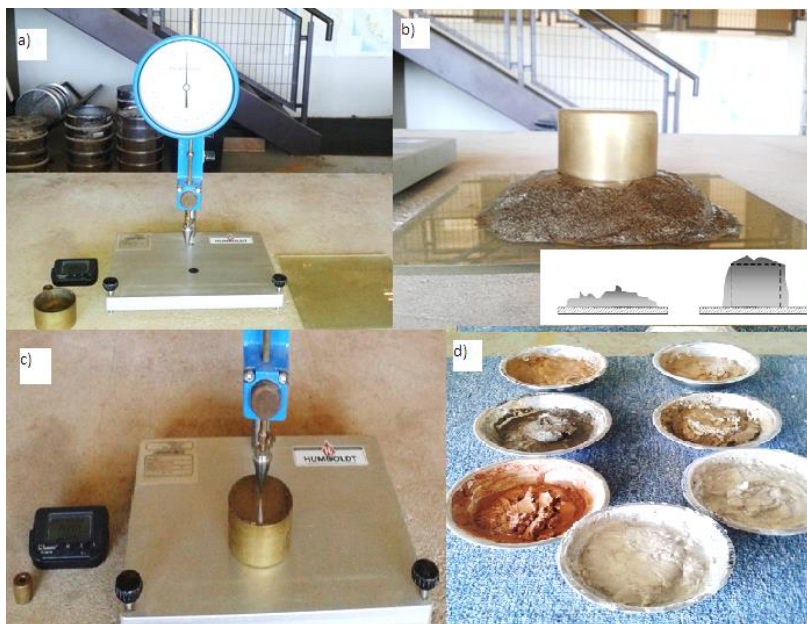


Figura 4.2 a) Cono utilizado, b) método de preparación muestra, c) Posición del envase más muestra para antes de dejar caer el cono y d) Muestras para ensayo de caída de cono.

Este ensayo actualmente está siendo utilizado en países europeos, para determinar el límite líquido. El dispositivo fue producido por primera vez en 1966 por el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en Francia. El límite líquido se evalúa mediante la determinación del contenido de agua del suelo en el punto que el cono penetra la muestra por 20 mm. El cono tiene un peso de 80 g y con un ángulo de punta de 30°. Por lo general, la prueba se repite para diferentes contenidos de agua, y se establece la relación entre la penetración y contenido de agua. (Sivakumar et al, 2009).

Tabla 4.4 Limite liquido caída de cono

Muestra	LL %
B.1	46
B.3	46
B.4	51
B.7	45
B.12	40
B.14	45
B.15	45

La tabla 4.4 muestra los resultados obtenidos de límite líquido por caída de cono (H=20 mm)

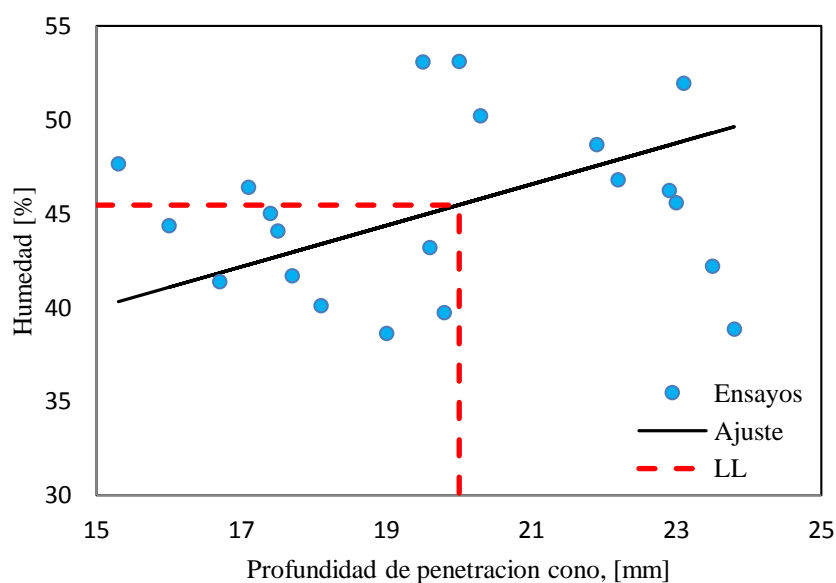


Figura 4.3 Superposición de todos los ensayos de caída de cono para determinar límite líquido (H=20 mm).

De la Figura 4.3 se puede obtener un valor de límite líquido por caída de cono del 44,5% aproximadamente. También se estimó el valor de la resistencia al corte no drenada (S_u) con este método ya que es posible determinar la Resistencia al Corte No Drenada (S_u) de suelos con el ensayo de caída de cono (Hansbo, 1957; Koumoto & Houlsby, 2001). Cuando el cono penetra la muestra tiende a cortar la masa de suelo, entonces los resultados de este ensayo dependen principalmente de la resistencia al corte no drenada (S_u). Hansbo (1957) en su investigación desarrolló una relación semi-empírica entre la profundidad de penetración del cono (h) y la resistencia al corte no drenada (S_u).

$$S_u = \frac{K \cdot W}{h^2}$$

Donde W es el peso del cono utilizado en este caso 0.78 N, h es la profundidad de penetración y K es un "factor de cono" que depende principalmente del ángulo de cono utilizado y rugosidad del cono. Koumoto & Houlsby (2001) proponen un valor de K igual a 1.33 para el cono de 30°, de superficie semi-rugosa. Con los resultados obtenidos en la determinación del límite líquido por caída de cono fue posible obtener una aproximación rápida de la resistencia al corte no drenada (S_u) con la expresión propuesta por Hansbo (1957), y se puede ver la variación de (S_u) con la penetración y con la humedad (Figuras 4.4 y 4.5).

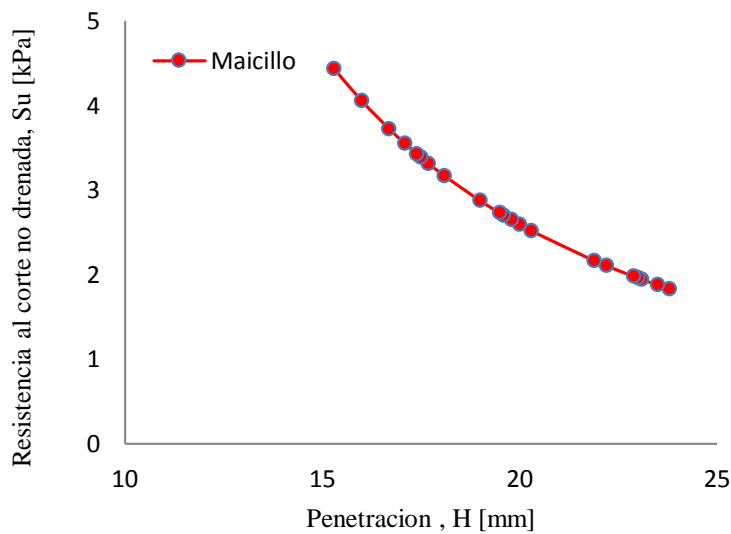


Figura 4.4 Penetración versus Resistencia al corte no drenado

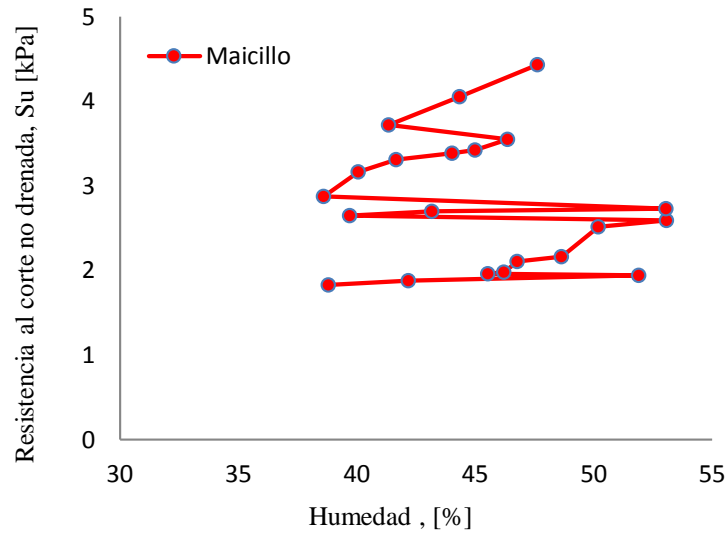


Figura 4.5 Humedad versus resistencia al corte no drenado

De las figuras 4.4 y 4.5 se pueden apreciar una aproximación bastante baja de la resistencia al corte no drenada (S_u) para el maicillo, el valor mayor de (S_u) registrado fue de 4,43 kPa con un contenido de humedad del 47,6% y una penetración de 15,3 mm

4.3 Angulo de reposo

El φ_{rep} es una propiedad única del material el cual se puede comparar con el φ_c obtenidos de ensayos triaxiales o corte directo (Solaque y Lizcano, 2008) y el método utilizado fue por medio de una pila construida dejando fluir el material por medio de un embudo, levantando lentamente el embudo desde la base horizontal.

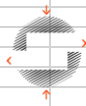


Figura 4.6 Angulo de reposo realizado a las 7 muestras.

Una vez que el total de la muestra era vaciado a través del embudo en una superficie plana y nivelada, se obtenían dos fotografías según las vistas de Norte-Sur, y Este –Oeste, luego eran llevadas a un software CAD de dibujo 2D donde se obtenían los puntos del contorno del montículo de la muestra y eran llevados al Excel para ajustar una recta y calcular su pendiente, luego se calcula un promedio de las pendientes α y β de las rectas (ver Figura 4.7) donde se obtiene finalmente el ángulo de reposo que se muestra en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Angulo de reposo

Muestra	φ_{rep}
B.1	34.2
B.3	34.6
B.4	35.6
B.7	35.3
B.12	37.7
B.14	36,2
B.15	35,4



LGM UCSC
LABORATORIO DE GEOMATERIALES

Fecha:

Muestra:

B.1

Proyecto: ángulo de reposo

Observaciones:

Tesis

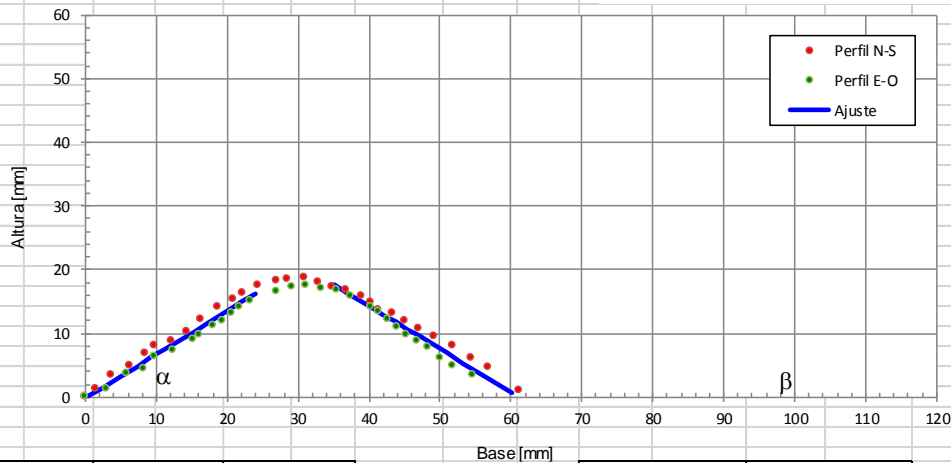
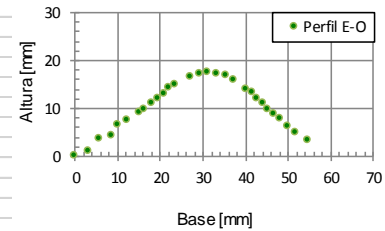
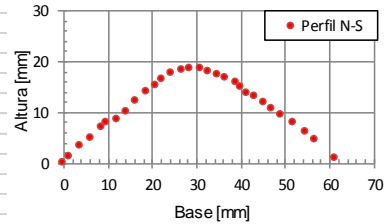
Laboratorista: Paula Rodriguez Stuardo

Determinación del ángulo de reposo

Punto	N - S			E - O			Equivalente	
	base	altura	Ajuste N-S	base	altura	Ajuste E-O	Base	Altura
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	0,00	0,00	0,33	0,00	0,00	-0,52	0,00	-0,10
2	1,62	1,24	1,48	3,05	1,11	1,46	2,33	1,47
3	3,74	3,43	3,00	5,81	3,58	3,25	4,78	3,12
4	6,36	4,80	4,86	8,39	4,34	4,93	7,37	4,89
5	8,60	6,78	6,45	9,91	6,32	5,92	9,25	6,19
6	9,85	7,84	7,34	12,31	7,32	7,49	11,08	7,41
7	12,16	8,59	8,98	15,19	8,96	9,36	13,68	9,17
8	14,28	10,08	10,49	16,07	9,66	9,93	15,17	10,21
9	16,40	12,02	12,00	18,01	11,07	11,19	17,21	11,60
10	18,71	13,95	13,64	19,29	11,95	12,03	19,00	12,83
11	20,83	15,14	15,15	20,77	13,00	12,99	20,80	14,07
12	22,20	16,25	16,12	21,88	14,11	13,71	22,04	14,92
13	24,44	17,44	17,72	23,29	14,93	14,62	23,86	16,17
14	26,94	18,12		27,09	16,40			
15	28,56	18,50		29,14	17,16			
16	30,88	18,56		31,25	17,45			
17	32,81	17,88		33,31	16,99			
18	34,80	17,25	18,00	35,42	16,75	17,23	35,11	17,61
19	36,74	16,69	16,81	37,42	15,82	15,75	37,08	16,28
20	39,05	15,69	15,38	40,23	13,94	13,66	39,64	14,52
21	40,22	14,76	14,65	41,47	13,18	12,74	40,84	13,70
22	41,41	13,64	13,92	42,69	12,00	11,83	42,05	12,88
23	43,34	13,02	12,73	44,04	10,83	10,83	43,69	11,78
24	45,15	11,77	11,61	45,39	9,72	9,83	45,27	10,72
25	47,15	10,52	10,38	46,80	8,61	8,79	46,97	9,58
26	49,28	9,34	9,06	48,32	7,62	7,66	48,80	8,36
27	51,95	7,91	7,41	50,14	6,09	6,31	51,05	6,86
28	54,57	5,91	5,79	51,90	4,86	5,01	53,24	5,40
29	56,95	4,48	4,33	54,71	3,22	2,92	55,83	3,63
30	61,18	0,81	1,71	58,88	-0,24	-0,17	60,03	0,77

Ángulo de reposo:

34,2°



Ángulos: α 34,3

β 34,1

Figura 4.7 Planilla Excel utilizada para cálculo de ángulo de reposo

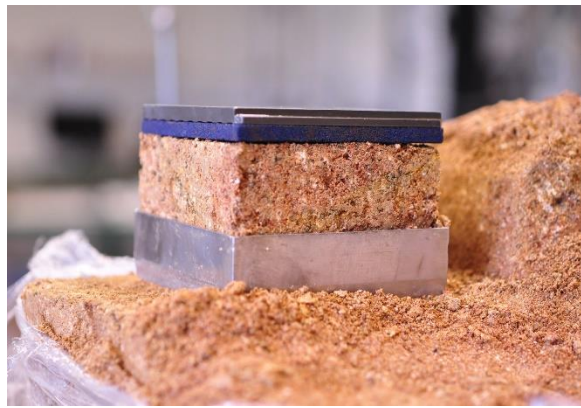
4.4 Ensayo de corte directo (CD)

Los ensayos se efectuaron en el Laboratorio de Geomateriales de la UCSC, en el equipo de Corte Directo marca Humboldt, modelo HM-2700SW. Este equipo cuenta con dos transformadores diferenciales de variación lineal (LDVT, sigla en inglés), necesarios para medir el desplazamiento vertical y horizontal de la muestra durante el ensayo. Una celda de carga electrónica, que mide la fuerza al momento que produce el corte en la muestra producto del desplazamiento de una mitad de la caja de corte respecto a la otra. Estas mediciones, desplazamientos y fuerza, son registradas por un datalooger, que recibe la información de configuración del ensayo y envía el registro de datos al computador durante el ensayo. Un motor, que desplaza la cámara de agua, y provoca el desplazamiento relativo a los 12 mm entre las dos mitades de la caja corte. La aplicación de la carga normal se realiza sobre un brazo palanca que cuenta con contrapeso, que equilibra la carga aplicada en una razón de 10 es a 1, es decir la carga en el brazo se amplificará por 10 en la muestra.

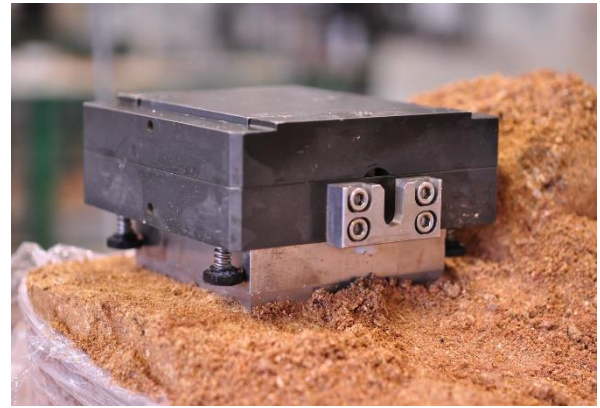
Realizar un ensayo de corte directo a un bloque de suelo residual es complejo debido a la fragilidad del material al ser tallado. Se implementa un método de preparación de muestra que consiste en tomar el bloque inalterado y comenzar a retirar el material sobrante hasta dejar una columna de suelo de 10 x 10 cm con ayuda de un molde como se muestra en la Figura 4.8 a).

En seguida se ubican la piedra porosa inferior y el molde de ensayo para confinar el material y evitar que este se desmorone (Figura 4.8b).

Una vez que la muestra está protegida y confinada por el molde se retira del bloque, se termina de tallar, se le ubican la piedra porosa superior y el resto del molde y se introduce en el equipo de ensayo (Figura 4.9) donde fueron saturadas con agua por un periodo de 24 horas y se utilizó una velocidad de corte de 0,1 mm/min para cada ensayo.



(a)



(b)

Figura 4.8: a) y b) Tallado de la muestra inalterada a partir de bloque de suelo residual,

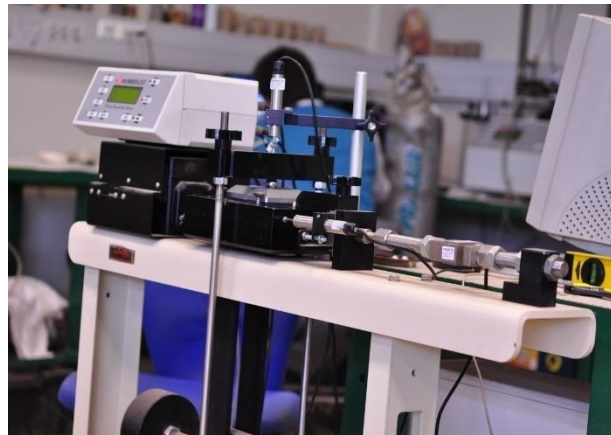


Figura 4.9 Equipo de ensayo de corte directo marca Humboldt

Del registro de datos se graficaron distintas curvas de las cuales se obtienen valores de resistencia al corte máximo, ángulos de fricción, ángulos de dilatación y la variación del ángulo de fricción con la deformación.

Al graficar los puntos de mayor tensión versus la tensión normal aplicada para cada probeta, se tienen tres puntos a graficar, luego los datos se ajustan a una línea recta del criterio de falla de Morh Coulomb y se obtiene ángulo de fricción en falla o máximo φ_{\max}

$$\varphi_{\max} = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_{\max}}{\sigma_n} \right)$$

También se puede utilizar la fórmula de coulomb para obtener ángulos de fricción residual en los casos que aplica y alcance dicho valor.

$$\varphi_{\text{crit}} = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_{\text{crit}}}{\sigma_n} \right)$$

Como el maicillo es producto de una alta meteorización de la roca ígnea, la alteración química afecta a los feldespatos y micas convirtiéndolos en arcilla. Se aumenta el contenido de óxidos de hierro y aluminio los cuales pueden cementar grupos de partículas aumentando la cohesión, por lo tanto al graficar el esfuerzo de corte (kPa) y la tensión normal (kPa), es decir la falla de Mohr Coulomb, debe haber un intercepto en el eje de las ordenadas que es la cohesión (Suarez, 2002), por lo tanto, la cohesión que se obtuvo en cada uno de los ensayos es producto de un mayor contacto entre las partículas de menor tamaño en la muestra, de igual modo es inferior a 16,3 kPa un resultado bastante bajo y se puede atribuir al alto porcentaje de finos entre un 15 % y 60 % que tenían las muestras, por esta razón se puede considerar la cohesión para este tipo de granulometría.

Para esta investigación se utilizaron cargas normales del orden de 25 kPa, 50 kPa, 75 kPa y 100 kPa, en cuanto al desplazamiento máximo fue de 20 mm.

Muestra B.1, Fondo Trongol

Para la muestra B.1 inalterada en estado natural con un 25,5% de material fino, se obtienen sus respectivos gráficos:

La Figura 4.10 muestra la resistencia residual de cada probeta para grandes deformaciones > 10%

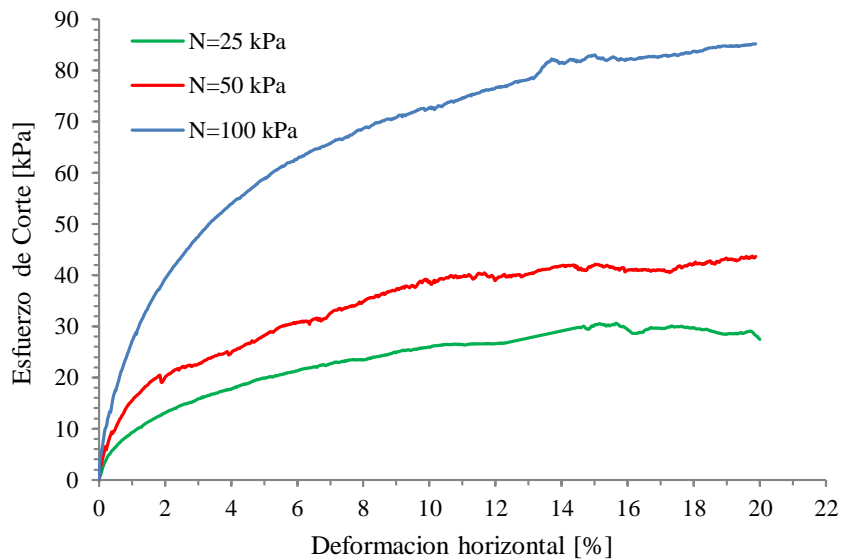


Figura 4.10 Deformación horizontal versus Tensión de corte

En la Figura 4.11 se ajusta una recta del cual se obtienen los parámetros de resistencia de corte residual que el suelo en estudio presenta:

- Angulo de fricción interna residual, $\theta_p = 36,6^\circ$
- Cohesión, $C = 6,19$ [kPa]

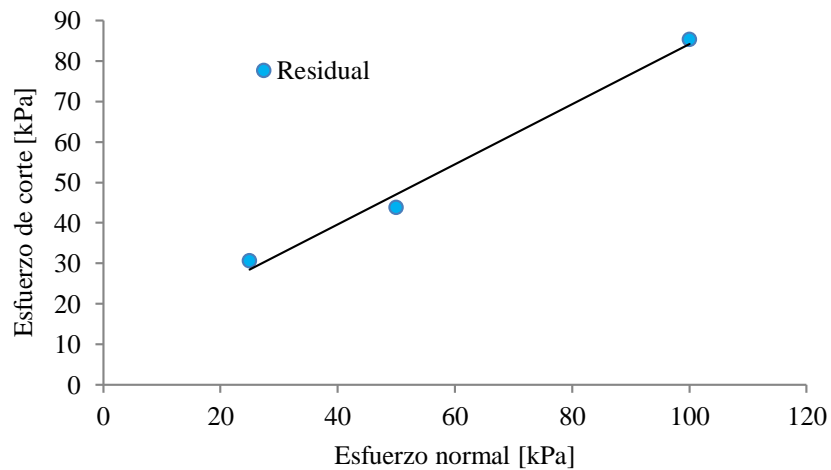


Figura 4.11 Envolvente de falla Mohr- Coulomb

De la Figura 4.12 muestra cómo varía la deformación vertical de las tres probetas al aumentar la deformación horizontal. Se observa un comportamiento contractivo en todo momento para un confinamiento de 25, 50 y 100 kPa.

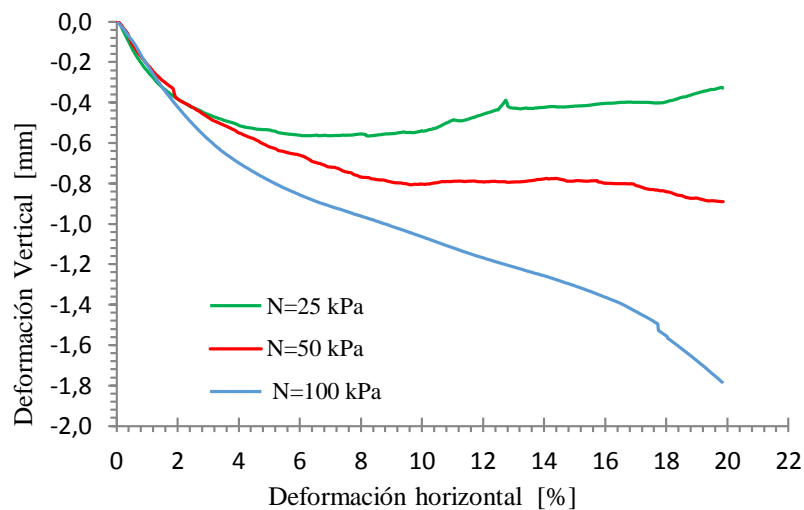


Figura 4.12 Deformación vertical versus deformación horizontal.

Muestra B.3, Fundo Caballo de Palo

La muestra B.3 con un 40,2% de material finos se obtienen sus respectivos gráficos:

La Figura 4.13 muestra la resistencia es residual de cada probeta para grandes deformaciones > 10%

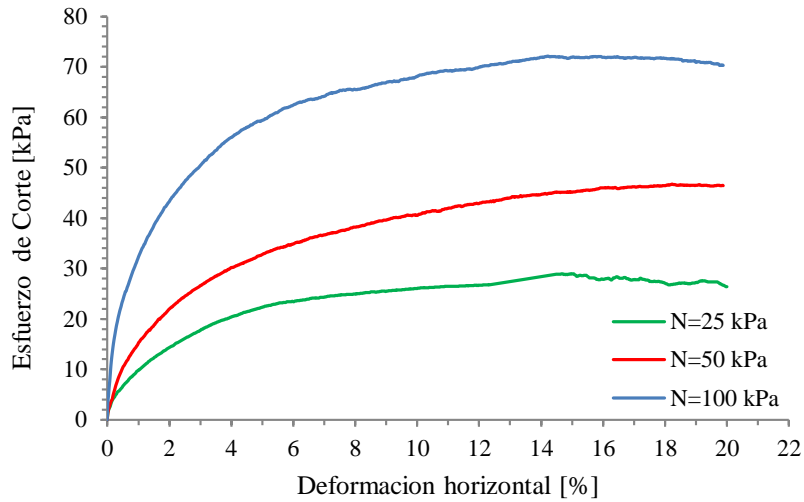


Figura 4.13 Deformación horizontal versus Tensión de corte

En la Figura 4.14 se ajusta una recta del cual se obtienen los parámetros de resistencia de corte residual que el suelo en estudio presenta:

- Angulo de fricción interna residual, $\theta_p = 29,5^\circ$
- Cohesión, $C = 16,32$ [kPa]

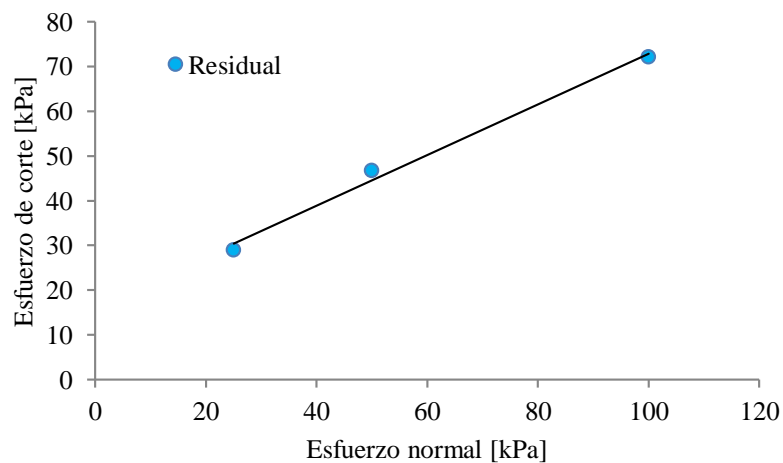


Figura 4.14 Envolvente de falla Mohr- Coulomb

De la Figura 4.15 muestra cómo varía la deformación vertical de las tres probetas al aumentar la deformación horizontal. Se observa un comportamiento contractivo en todo momento para las probetas de 50 y 100 kPa y luego tiende a dilatar para la probeta con un confinamiento de 25 kPa.

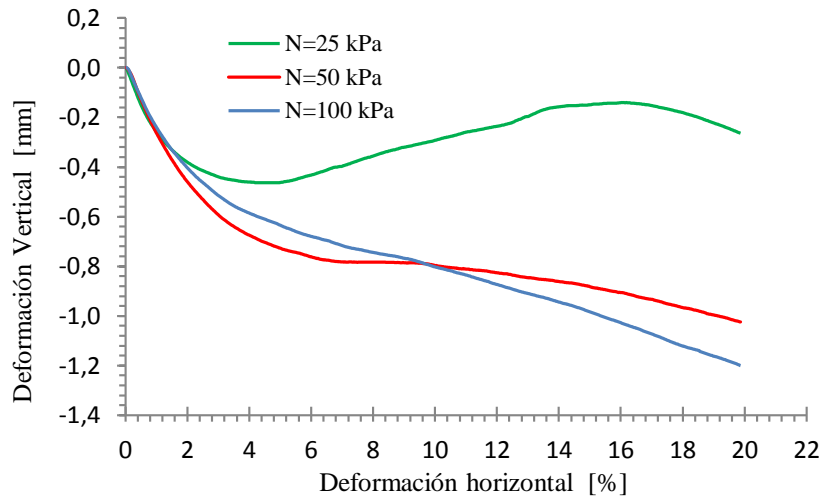


Figura 4.15 Deformación vertical versus deformación horizontal

Muestra B.4, Fondo El encanto

La muestra B.4 con un 32,2% de material fino se obtienen sus respectivos gráficos:

La Figura 4.16 muestra la resistencia es residual de cada probeta para grandes deformaciones > 10%

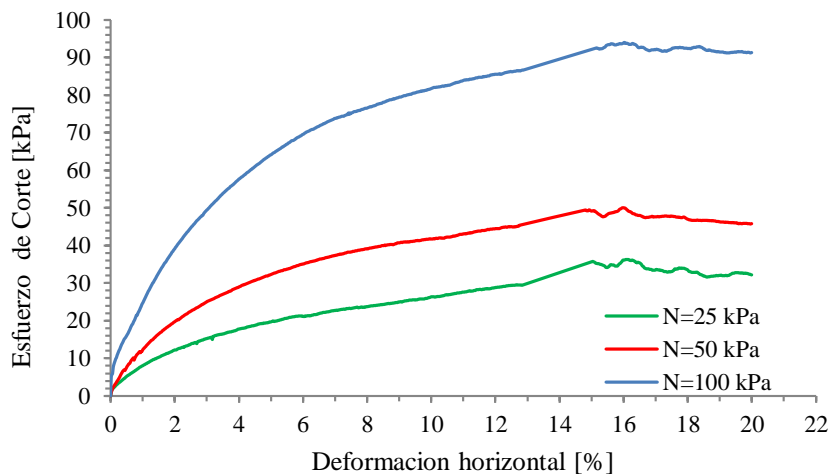


Figura 4.16 Deformación horizontal versus Tensión de corte

En la Figura 4.17 se ajusta una recta del cual se obtienen los parámetros de resistencia de corte residual que el suelo en estudio presenta:

- Angulo de fricción interna residual, $\theta_p = 29,5^\circ$
- Cohesión, $C = 14,35$ [kPa]

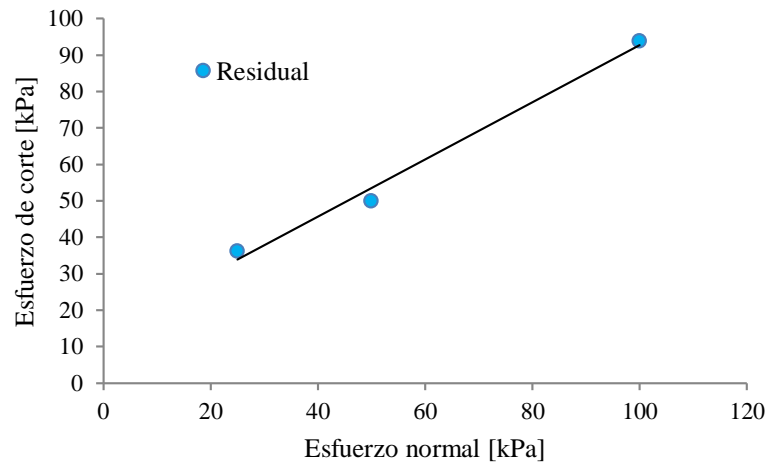


Figura 4.17 Envolvente de falla Mohr- Coulomb

De la Figura 4.18 muestra cómo varía la deformación vertical de las tres probetas al aumentar la deformación horizontal. Se observa un comportamiento contractivo en todo momento para las probetas de 50 y 100 kPa y luego tiende a dilatar la probeta con un confinamiento de 25 kPa.

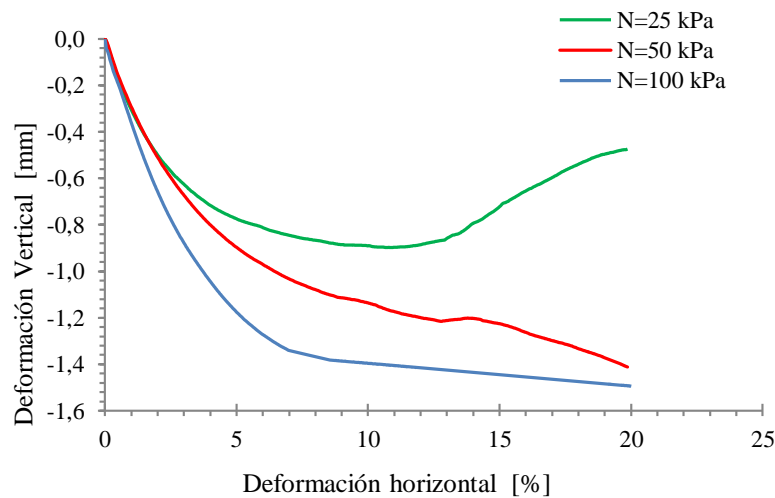


Figura 4.18 Deformación vertical versus deformación horizontal

Muestra B.7, Parcela 11 Mantenrehue

La muestra B.7 con un 15% de material finose obtienen sus respectivos gráficos:

La Figura 4.19 muestra la resistencia es residual de cada probeta para grandes deformaciones > 10%

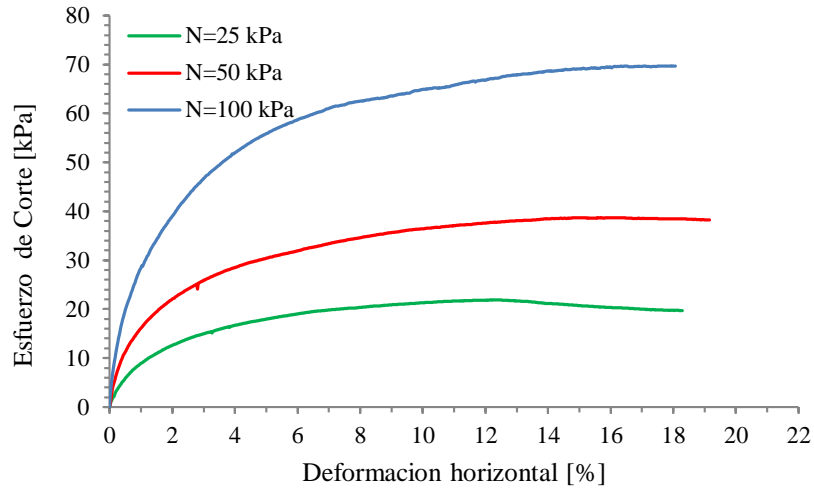


Figura 4.19 Deformación horizontal versus Tensión de corte

En la Figura 4.20 se ajusta una recta del cual se obtienen los parámetros de resistencia de corte residual que el suelo en estudio presenta:

- Angulo de fricción interna residual, $\theta_p = 32,4^\circ$
- Cohesión, $C = 6,42$ [kPa]

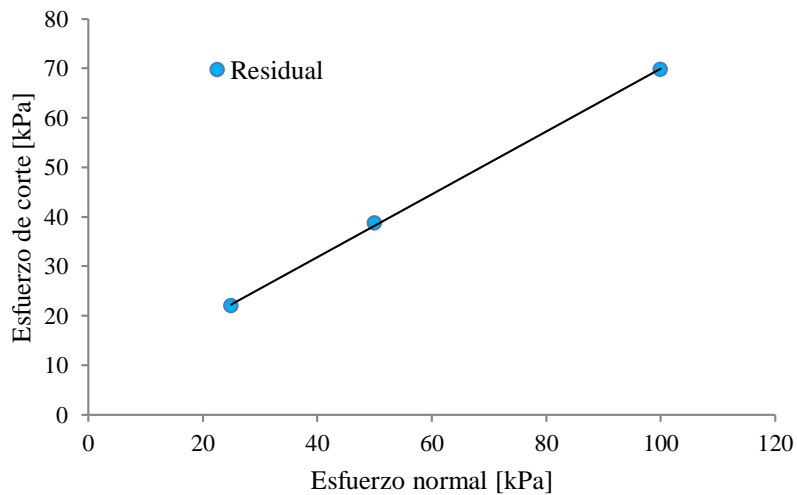


Figura 4.20 Envolvente de falla Mohr- Coulomb

De la Figura 4.21 muestra cómo varía la deformación vertical de las tres probetas al aumentar la deformación horizontal. Se observa un comportamiento contractivo en todo momento para las probetas de 50 y 100 kPa y luego tiende a dilatar para la probeta con un confinamiento de 25 kPa.

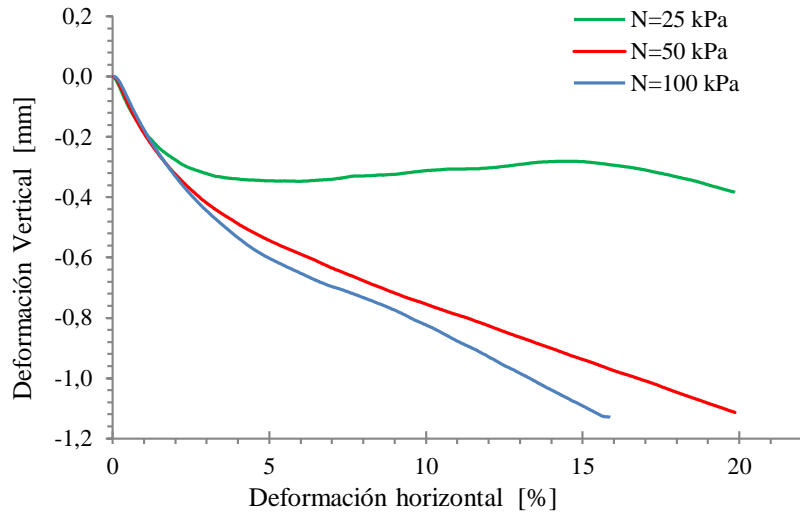


Figura 4.21 Deformación vertical versus deformación horizontal

Muestra B.12, Parcelas Cabrera

La muestra B.12 con un 22,8 % de material fino se obtienen sus respectivos gráficos:

La Figura 4.22 muestra la resistencia al corte de cada probeta alcanzando la resistencia peak y para grandes deformaciones > 10% la resistencia es residual.

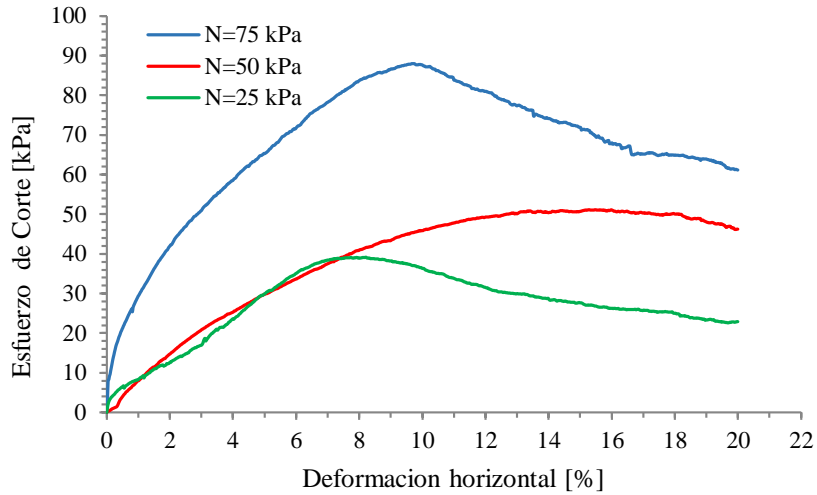


Figura 4.22 Deformación horizontal versus Tensión de corte

En la Figura 4.23 se ajusta una recta del cual se obtienen los parámetros de resistencia de corte máximo y residual que el suelo en estudio presenta:

- Angulo de fricción interna máximo, $\theta_p = 44,3^\circ$
- Cohesión, $C = 10,56$ [kPa]
- Angulo de fricción interna residual, $\theta_r = 37,4^\circ$
- Cohesión, $C = 5,15$ [kPa]

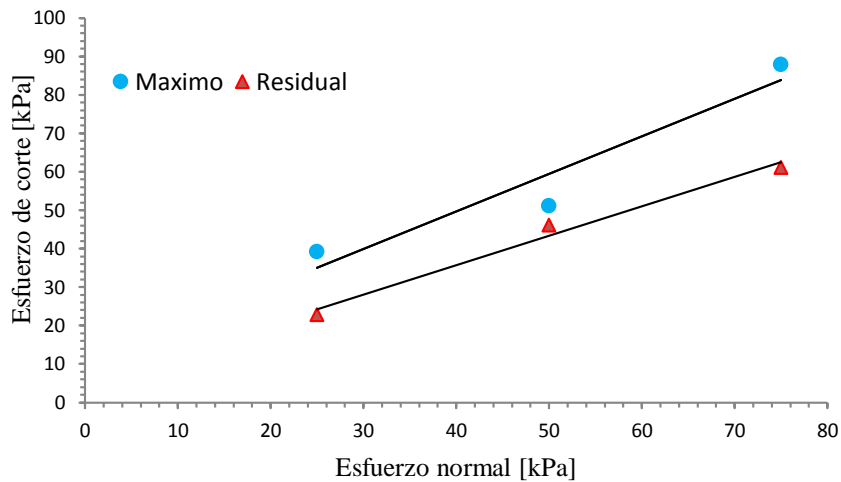


Figura 4.23 Envolvente de falla Mohr- Coulomb

De la Figura 4.24 muestra cómo varía la deformación vertical de las tres probetas al aumentar la deformación horizontal. Se observa un comportamiento contractivo para la probeta de 50 kPa y luego dilatante para los 25 y 75 kPa.

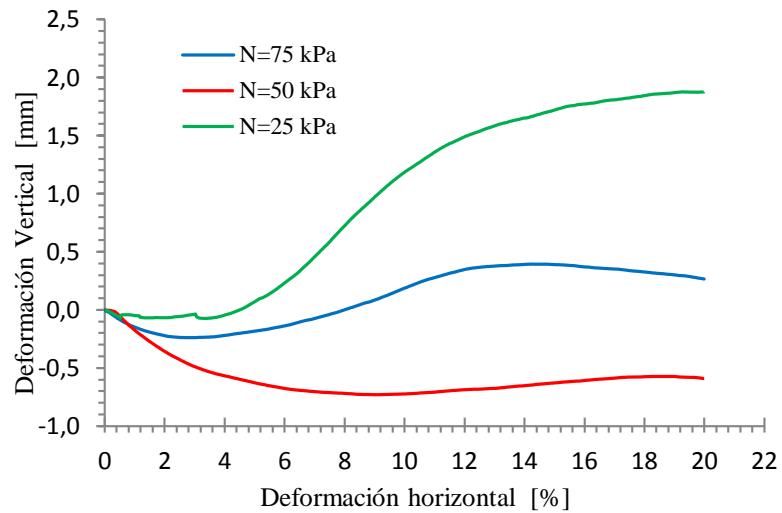


Figura 4.24 Deformación vertical versus deformación horizontal

Muestra B.14, Fundo Carilebu y otros

La muestra con un 61,3% de material fino se obtienen sus respectivos gráficos:

La Figura 4.25 muestra la resistencia es residual de cada probeta para grandes deformaciones > 10%

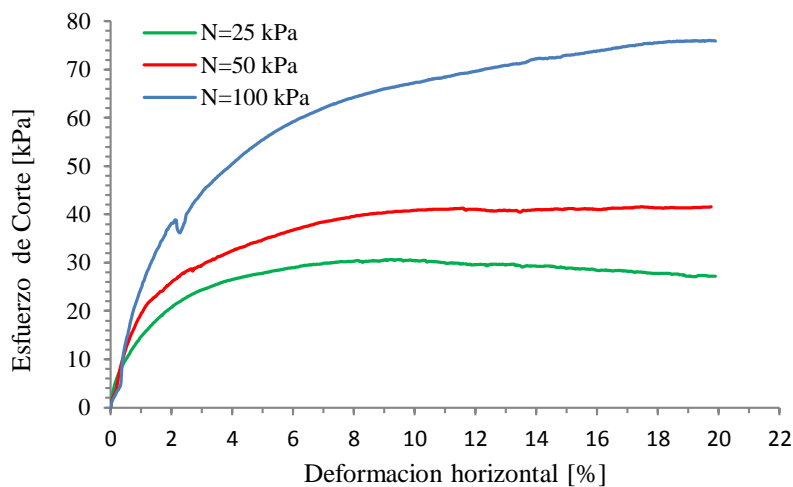


Figura 4.25 Deformación horizontal versus Tensión de corte

En la Figura 4.26 se ajusta una recta del cual se obtienen los parámetros de resistencia de corte máximo y residual que el suelo en estudio presenta:

- Angulo de fricción interna máximo, $\theta_p = 31,5^\circ$
- Cohesión, $C = 14,35$ [kPa]

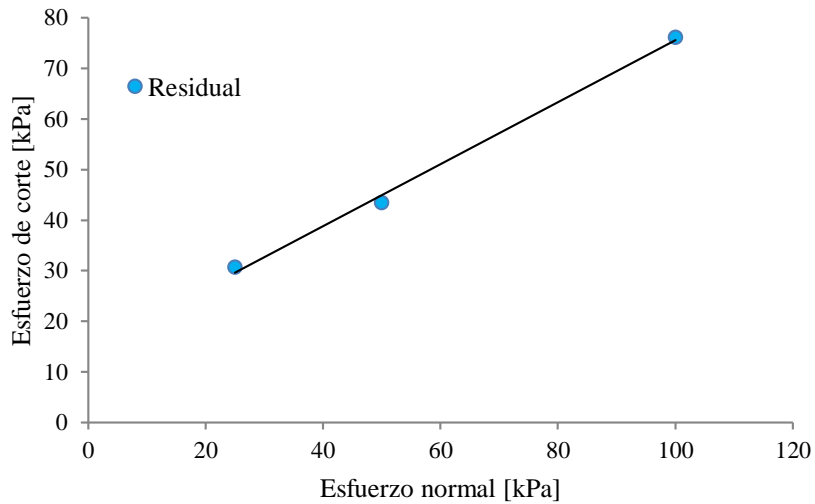


Figura 4.26 Envolvente de falla Mohr- Coulomb

De la figura 4.27 muestra cómo varía la deformación vertical de las tres probetas al aumentar la, deformación horizontal. Se observa un comportamiento contractivo para las tres probetas de 25, 50y 100 kPa.

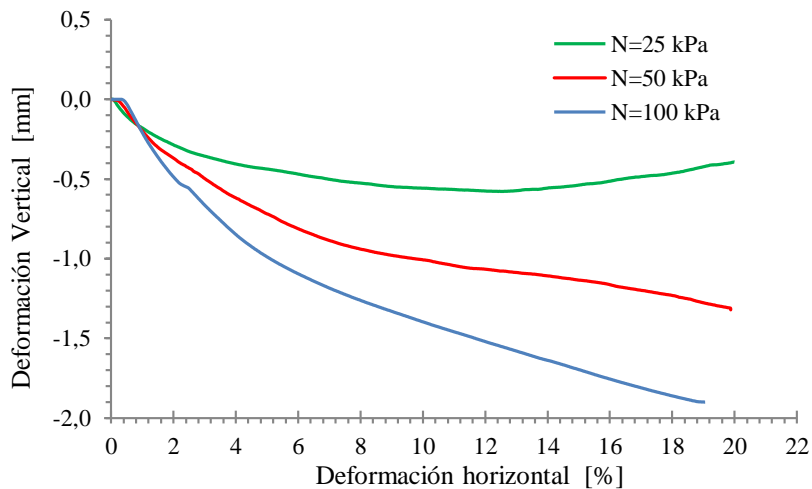


Figura 4.27 Deformación vertical versus deformación horizontal

Muestra B.15, Fundo Alto Molul y otros

La muestra B.15 con un 58,6 % de material fino se obtienen sus respectivos gráficos:

La Figura 4.28 muestra la resistencia al corte de cada probeta alcanzando la resistencia peak y para grandes deformaciones > 10% la resistencia es residual.

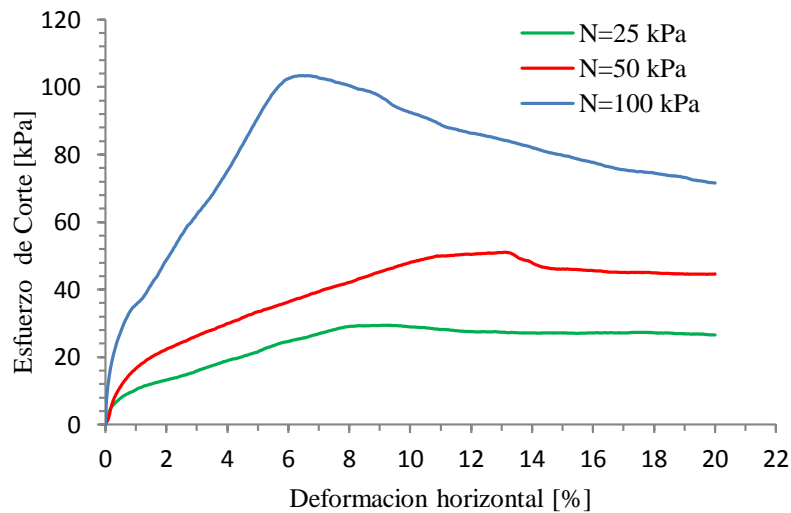


Figura 4.28 Deformación horizontal versus Tensión de corte

Se observa en la Figura 4.28 un peak en el esfuerzo de corte, esto se debe a que el bloque inalterado tenía sectores bastantes densos incluso difícil de tallar como a la vez sectores bastante sueltos disgregables con la mano, cabe señalar que las tres probetas de suelos fueron posicionadas igual a la Figura 4.29 como también la dirección del corte.

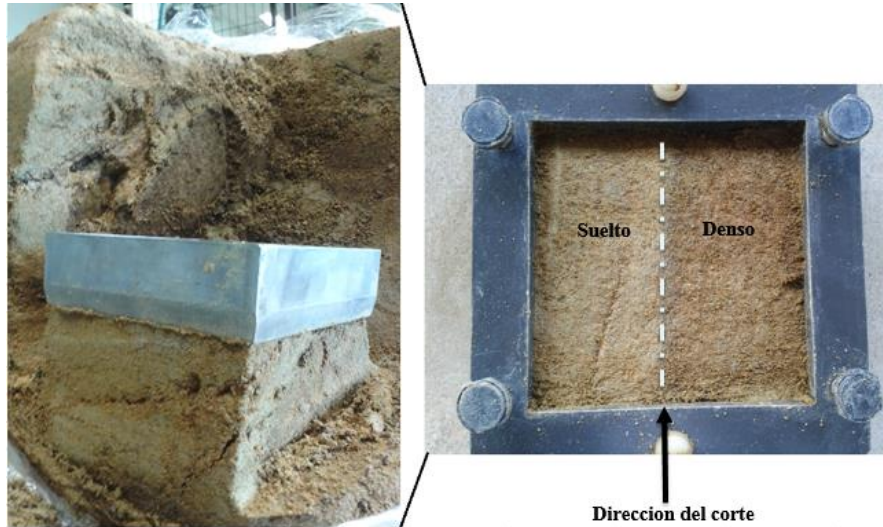


Figura 4.29 Tallado y colocación muestra B.14 en caja de corte.

En la Figura 4.30 se ajusta una recta del cual se obtienen los parámetros de resistencia de corte máximo y residual que el suelo en estudio presenta:

- Angulo de fricción interna máximo, $\theta_p = 44,9^\circ$
- Cohesión, $C = 3,28$ [kPa]
- Angulo de fricción interna residual, $\theta_r = 30,6^\circ$
- Cohesión, $C = 13,15$ [kPa]

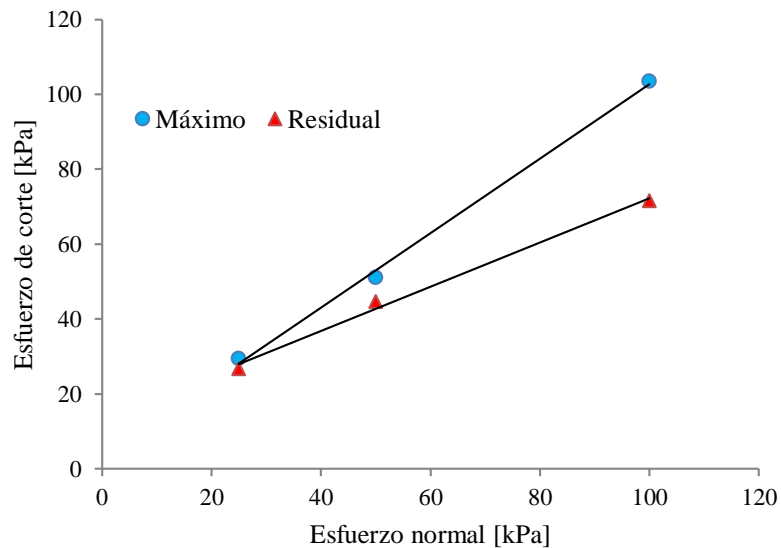


Figura 4.30 Envolvente de falla Mohr- Coulomb

De la Figura 4.31 muestra cómo varía la deformación vertical de las tres probetas al aumentar la deformación horizontal. Se observa un comportamiento contractivo para las tres probetas 25, 50 y 100 kPa.

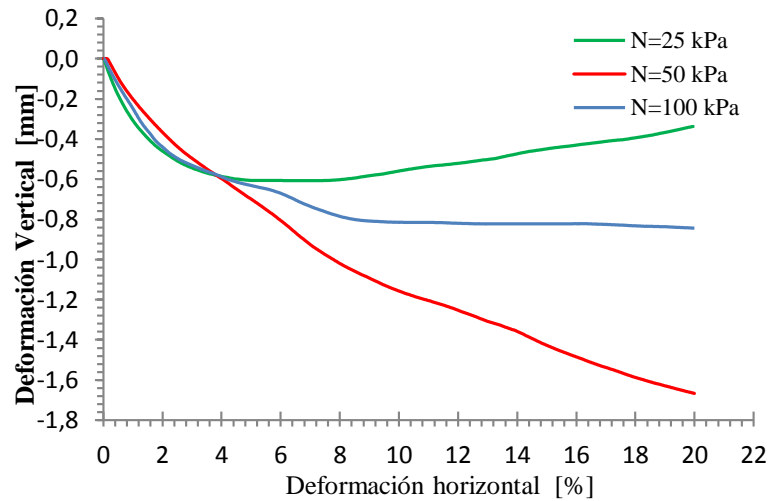


Figura 4.31 Deformación vertical versus deformación horizontal

La tabla 4.6 muestra los ángulos obtenidos al aplicar el criterio de falla de Morh Coulomb además se trazaron las rectas que definen la dilatación para cada carga normal y se calculó el ángulo de dilatación (Ψ) aplicando la Arcotangente a la pendiente de la recta, las pendientes de las rectas que definen la dilatación para cada carga normal se presentan en la tabla 4.7.

Tabla 4.6 Resultados ángulo de ángulo máximo, ángulo residual y ángulo de reposo para el Maicillo.

Muestra	Tendencia Máximo	Tendencia Residual	ϕ_{Maximo}	$\phi_{Residual}$	ϕ_{Reposo}
B.1	$\tau = 0,785\sigma_n + 6,193$, $R^2 = 0,998$			36,6	34.2
B.3	$\tau = 0,565\sigma_n + 16,319$, $R^2 = 0,992$			29,5	34.6
B.4	$\tau = 0,784\sigma_n + 14,350$, $R^2 = 0,998$			38,1	35.6
B.7	$\tau = 0,635\sigma_n + 6,420$, $R^2 = 0,990$			32,4	35.3
B.12	$\tau = 0,976\sigma_n + 10,56$, $R^2 = 0,996$	$\tau = 0,765\sigma_n + 5,15$, $R^2 = 0,984$	44,3	37,4	37.7
B.14	$\tau = 0,612\sigma_n + 14,35$, $R^2 = 0,996$			31,5	36.2
B.15	$\tau = 0,995\sigma_n + 3,279$, $R^2 = 0,998$	$\tau = 0,591\sigma_n + 13,15$, $R^2 = 0,994$	44.9	30,6	35.4

En la tabla 4.6 los resultados entregados de ángulo residual tiene una buena aproximación al ángulo de reposo su diferencia promedio es de 3,2° por lo tanto estos valores corroboran que al 20% de la deformación horizontal se alcanza el esfuerzo residual.

Tabla 4.7 Calculo ángulo de dilatancia.

Muestra	Carga Normal σ_n [kPa]	Dilatación, Δ	$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{dy}{dx} \right)$
B.12	25	0.250	14.04
B.12	75	0.0958	5.47

Según los resultados obtenidos por Villalobos (2011) en ensayos realizados a muestras inalteradas obtenidas del sector Pedro de Valdivia, Concepción, correspondientes a rocas graníticas descompuestas ensayadas bajo tensiones normales de 25, 50 y 100 kg, obtuvo un ángulo de fricción interna máxima de 41,3° y cohesión de 0,13 kg/cm² (13 kPa) y un ángulo de fricción en estado crítico de 37,5°, otro estudio realizado a dos muestras en suelos graníticos meteorizados son los de la ruta 68 Valparaíso, km 98.300 fueron analizados por Cabrera (2007), donde la muestra A era bastante más meteorizada que la muestra B, es decir era disgregable con la mano los resultados fueron los siguientes:

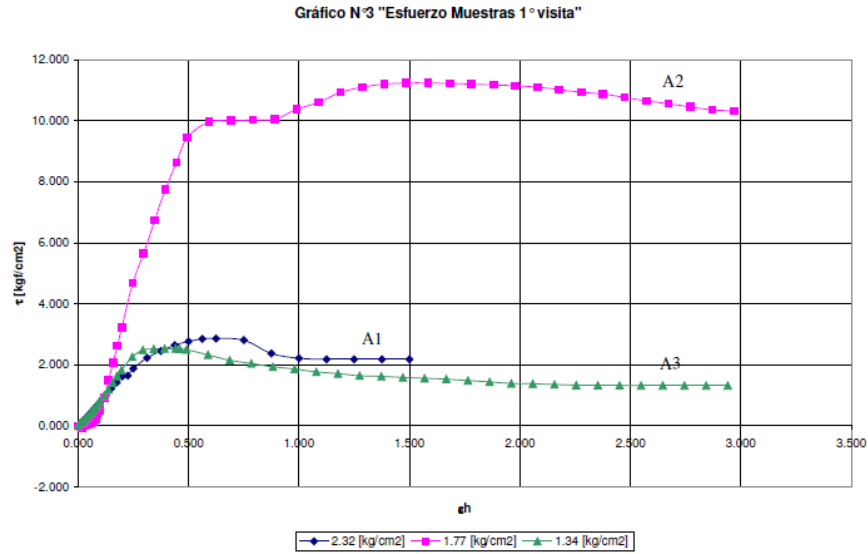


Figura 4.32 Deformación horizontal Versus Esfuerzo de corte (Cabrera, 2007)

*No considera Muestra A2 por romperse dentro de la caja de corte.

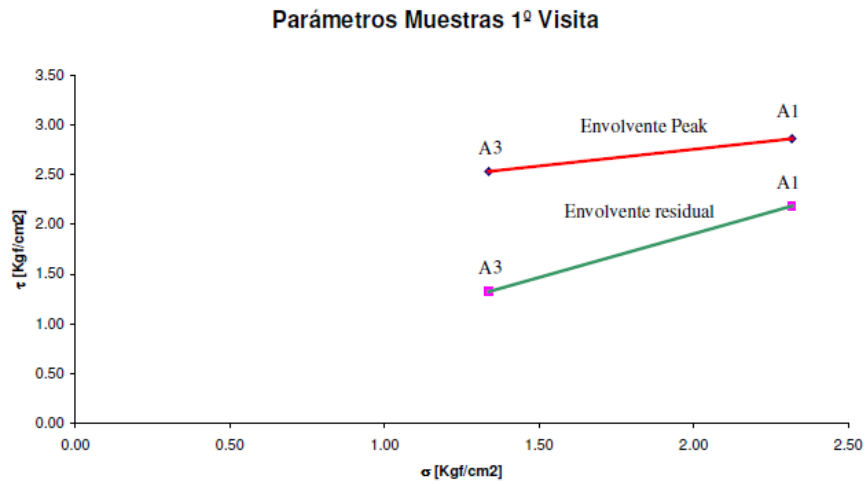


Figura 4.33 Envolvente de falla Mhor - Coulomb (Cabrera, 2007)

Muestra A:

Envolvente peak $\tau = 0,295\sigma_n + 1,260$

$C=1,3 \text{ [kg/cm}^2\text{]}= 13 \text{ [kPa]}$

$\theta_{\text{Peak}} = 16^\circ$

Envolvente residual $\tau = 0,874\sigma_n + 0,091$

$C=0,091 \text{ [kg/cm}^2\text{]}= 9 \text{ [kPa]}$

$\theta_{\text{residual}} = 41^\circ$

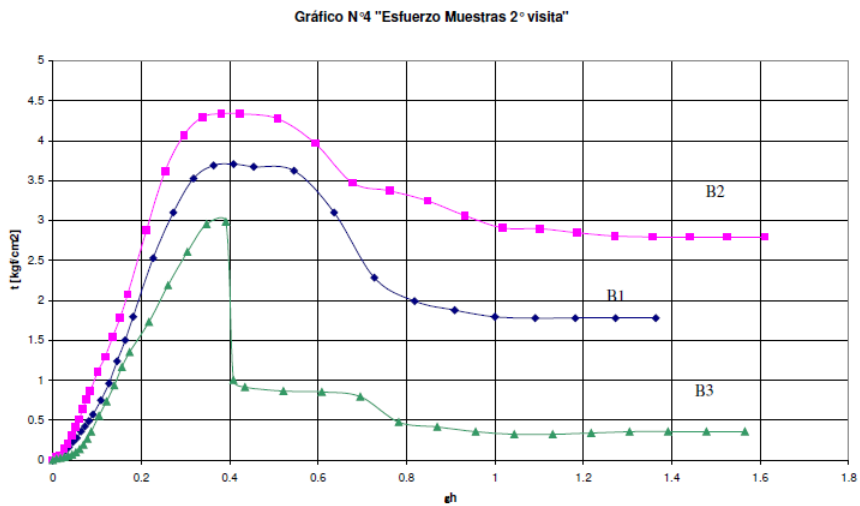


Figura 4.34 Deformación horizontal Versus Esfuerzo de corte (Cabrera 2007)

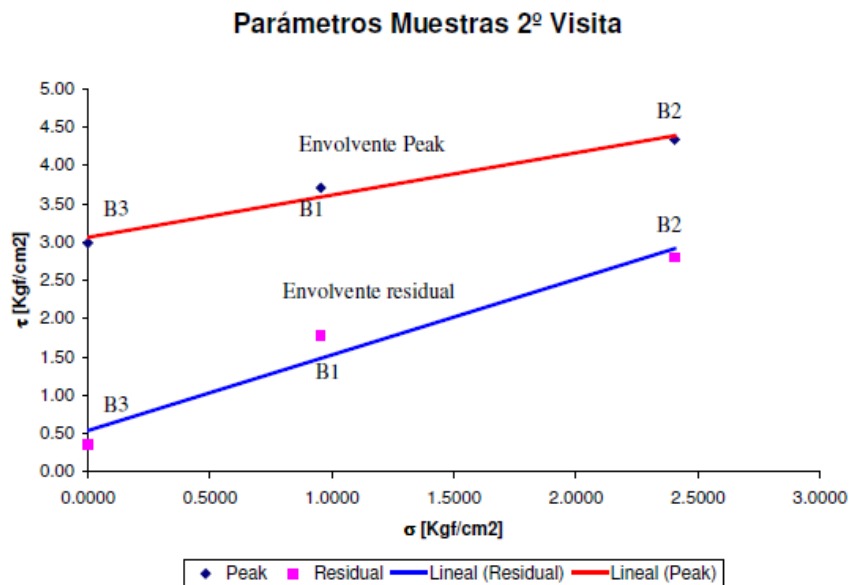


Figura 4.35 Envoltente de falla Mhor - Coulomb (Cabrera, 2007)

Muestra B:

Envolvente peak $\tau = 0,552\sigma_n + 3,06$

$C=3,06$ [kg/cm²]= 306 [kPa]

$R^2=0,976$

$\theta_{Peak} = 29^\circ$

Envolvente residual $\tau = 0,987\sigma_n + 0,539$

$C=0,539$ [kg/cm²]= 9 [kPa]

$R^2=0,955$

$\theta_{residual}= 44,6^\circ$

En ensayos realizados por Sepúlveda (2002) mediante triaxiales CIU, equipo triaxial electrónico ELE T 1150 M-4, sobre muestras inalteradas con presiones de confinamiento de 50, 100 y 200 kPa se obtuvieron los siguientes ángulos de fricción interna y se muestran en la tabla resumen 4.8 se observan los ángulos de fricción interna:

Tabla 4.8 Resumen parámetros resistentes de Maicillo (Sepúlveda, 2002)

Sector	U. de Concepción	Cerro Caracol	Lonco Parque	Ruta Itata	Palomares	Camino a Penco	Cerro Chepe
$\theta(^{\circ})$	30	29	30	32	29	29	31
C(kg/cm ²)	0,2	0,16	0,12	0,08	0,11	0,21	0,15
C(kPa)	20	16	12	8	11	21	15

Además estudios realizados por otros autores el valor del ángulo de fricción interna de los materiales disminuye con el avance del proceso de meteorización. En ensayos realizados en materiales de granitos y Neisses en Colombia, se encuentran variaciones de 26 a 38°, similares a los indicados por Deere y Patton (1971), para materiales de Lutitas entre 10 y 35° y para materiales de areniscas entre 25 y 45°, en concordancia a los valores propuestos por Sowers (1981). En materiales derivados de areniscas, el Autor ha encontrado ángulos de fricción a lo largo de discontinuidades rellenas de arcilla con valores de 10 a 15°, cuando los ángulos de fricción de discontinuidades sin relleno dan valores de 35 a 38° en el mismo talud. Esta realidad dificulta la evaluación del comportamiento de los suelos residuales utilizando los modelos de la mecánica de suelos tradicional (Suarez, 2002).

Por lo tanto los resultados obtenidos en esta investigación del comportamiento de resistencia al corte en maicillo presentan una buena aproximación a los resultados obtenidos por otros autores.

Sin embargo la resistencia al corte de suelos graníticos descompuestos suele variar significativamente en un mismo lugar, dependiendo de la distribución del tamaño de grano, grado de meteorización y composición de la roca parental. El comportamiento al corte de los suelos descompuestos graníticos in situ son principalmente influenciados por el grado de meteorización siendo afectado primeramente por el contenido de agua, el peso unitario seco y el contenido de agregados finos. Dependiendo de cuan meteorizados se encuentren los suelos graníticos no perturbados pueden llegar a ser estos suelos de blandos a duros.

Los deslizamientos observados en taludes, pueden ser por Inestabilidad másica, muchas de ellas en forma de cuña, que se mueven a lo largo de planos de debilidad (diaclasas) heredados de la roca madre como se ve en la Figura 4.36 y que, por concentrarse los minerales arcillosos en estos planos de debilidad, su resistencia al corte se ve fuertemente reducida, especialmente cuando existen filtraciones o napas colgadas en el interior del maicillo. La reducción de resistencia puede alcanzar a valores inferiores al de la resistencia de la matriz del maicillo existente entre diaclasas por lo que, sin lugar a duda el mecanismo de inestabilidad se gatilla a través de dicho plano de debilidad, mucho antes que se pueda pensar en un deslizamiento clásico con superficie circular que se desarrolle a través de la matriz y que incluso pudiera comprometer el piso de la excavación.

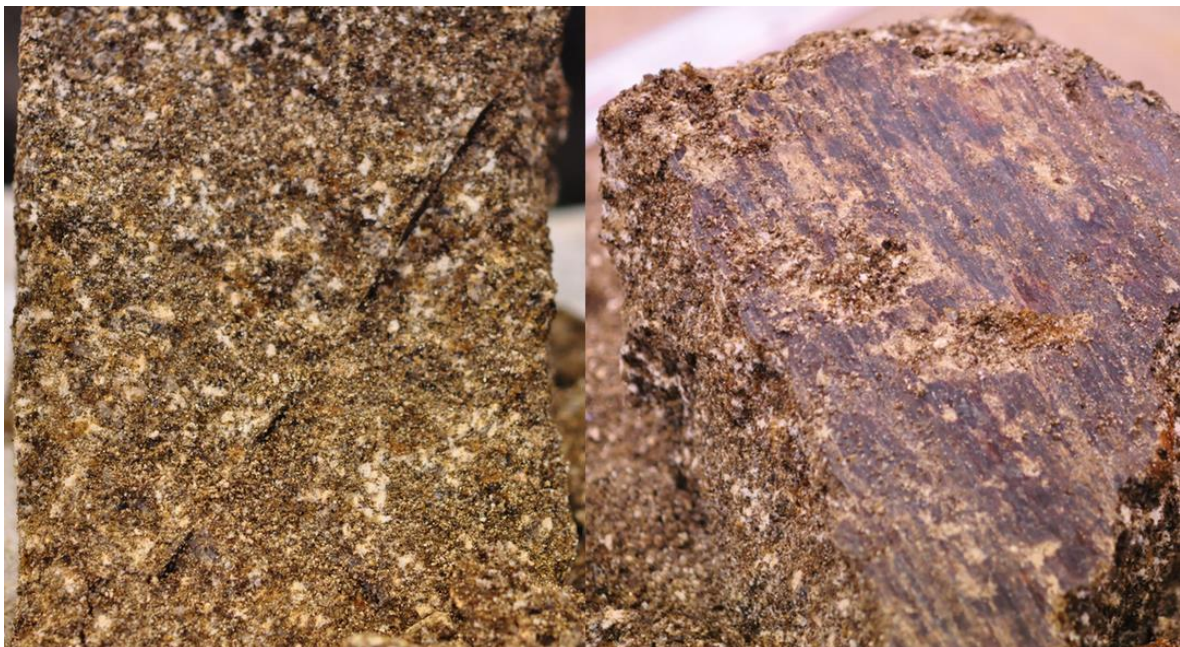


Figura 4.36 Plano de falla (izquierda) y superficie de falla (derecha) Fundo El Encanto

Cuando las diaclasas presentan una orientación sistemática desfavorable, se pueden generar inestabilidades másicas, pero lo típico es que los desprendimientos comprometan sectores localizados con longitudes reducidas.

Desafortunadamente, dada la aleatoriedad en la orientación de las diaclasas y al reducido espesor de la película arcillosa que las cubre (patina con fracciones de milímetros) son prácticamente imposibles de detectar con antelación a la ejecución de los cortes. Consecuentemente, es imposible predecir la magnitud y ubicación de los desprendimientos por inestabilidad másica, debiendo ser tratados a medida que estos se producen.

Algunas fallas observadas en zonas de estudio en las Figuras 4.37 a la 4.39:



Figura 4.37 Deslizamiento en las cercanías al Camino 30 Parcelas Cabrerías.

En la Figura 4.38 se observa un talud de aproximadamente 30 m de altura y 70 m de ancho. Las fallas se observan en gran parte del talud y además se aprecian diferentes tipos de deslizamientos. El principal en la zona central del talud con grandes surcos producidos por la acción erosiva del agua superficial



Figura 4.38 Talud Camino 18 Parcelas Cabrerias



Figura 4.39 Detalle fallas locales talud Camino 9 Fundo El Encanto

4.5 Proctor modificado

Este ensayo se desarrolló en las 7 muestras de Maicillo según la norma, NCh 1534/2.of 79 para estudiar el comportamiento del suelo al ser mezclado con cierta cantidad de agua y compactado, con el objetivo fundamental de determinar las humedades óptimas y peso unitario seco máximo (DMCS). El ensayo se realizó en un molde de 100.16 mm de diámetro y volumen 944 cm³, el que fue relleno en 5 capas cada una de ellas compactada con 25 golpes, que fueron realizados con el pisón de 4.5 kg el cual cae desde una altura de 460 mm, proporcionando así una energía de compactación teórica de 2700 KJ/m³ aproximadamente, con la que fueron realizados los ensayos (Figura 4.40).



Figura 4.40 a) Molde de 100,16 mm donde se compacto la muestra, b) extracción de muestra con gata, c) probeta y d) Muestras para determinar humedad.

1. Muestra B.1, Fundo Trongol

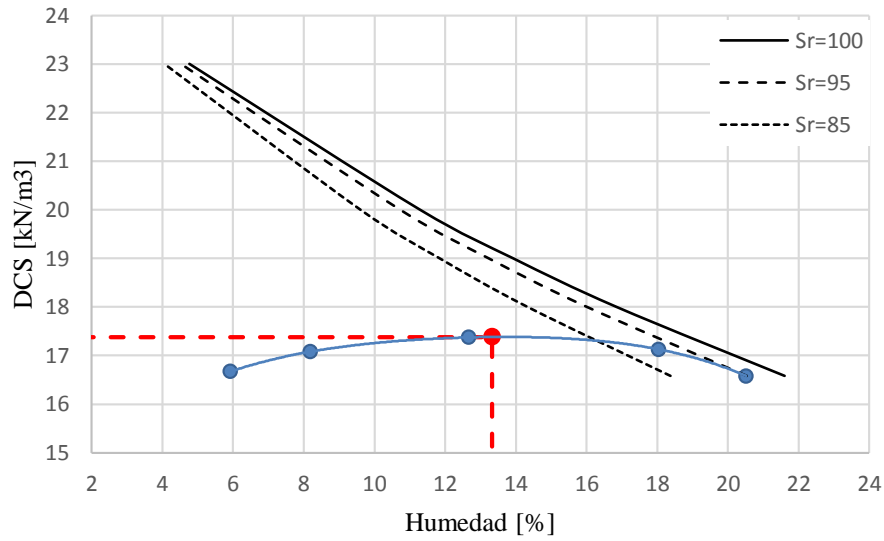


Figura 4.41 Proctor modificado realizado a la muestra B.1.

Los ensayos de compactación para la muestra B1. Con un 25,5% de fino, entregaron como resultado un DCMS de 17,34 KN/m³, con una humedad óptima (w_{opt}) de 13 %, como se puede ver en la Figura 4.41. Resultados que fueron obtenidos con la ecuación polinómica de grado dos que aproxima la curva en sus 3 puntos centrales.

2. Muestra B.3, Fundo Caballo de Palo

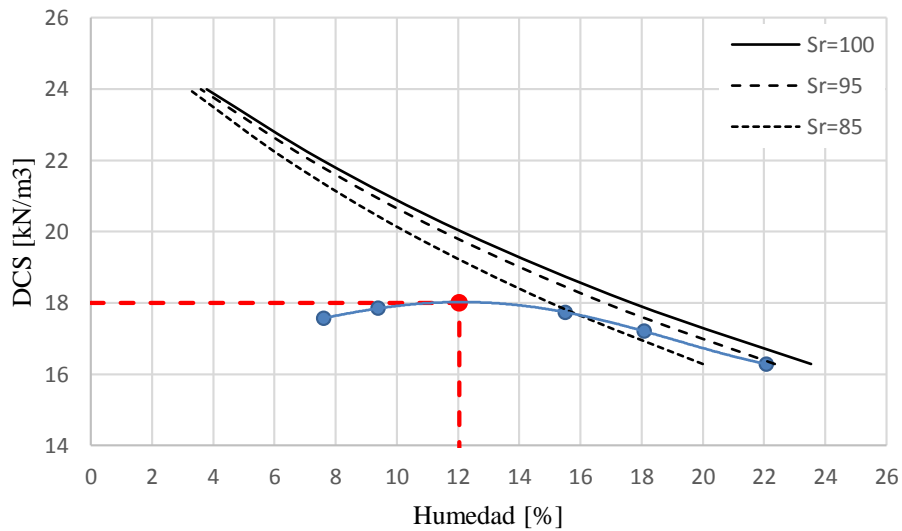


Figura 4.42 Proctor modificado realizado a la muestra B.3.

Los ensayos de compactación para la muestra B.3 con un 40,2 % de fino, entrego como resultado un DCMS de 18 KN/m³, con una humedad óptima (wopt) de 12 %, como se puede ver en la Figura 4.42. Resultados que fueron obtenidos con la ecuación polinómica de grado dos que aproxima la curva en sus 3 puntos centrales.

3. Muestra B.4, Fundo El encanto

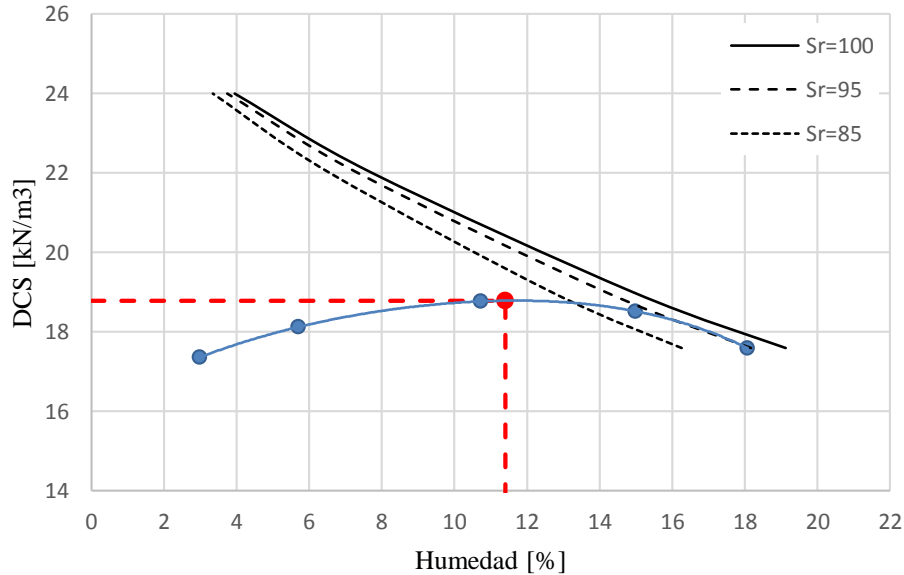


Figura 4.43 Proctor modificado realizado a la muestra B.3.

Los ensayos de compactación para la muestra B.4 con un 32,2 % de fino, entrego como resultado un DCMS de 18,78 KN/m³, con una humedad óptima (wopt) de 11 %, como se puede ver en la Figura 4.43. Resultados que fueron obtenidos con la ecuación polinómica de grado dos que aproxima la curva en sus 3 puntos centrales.

4. Muestra B.7, Parcela 11 Maintenrehue

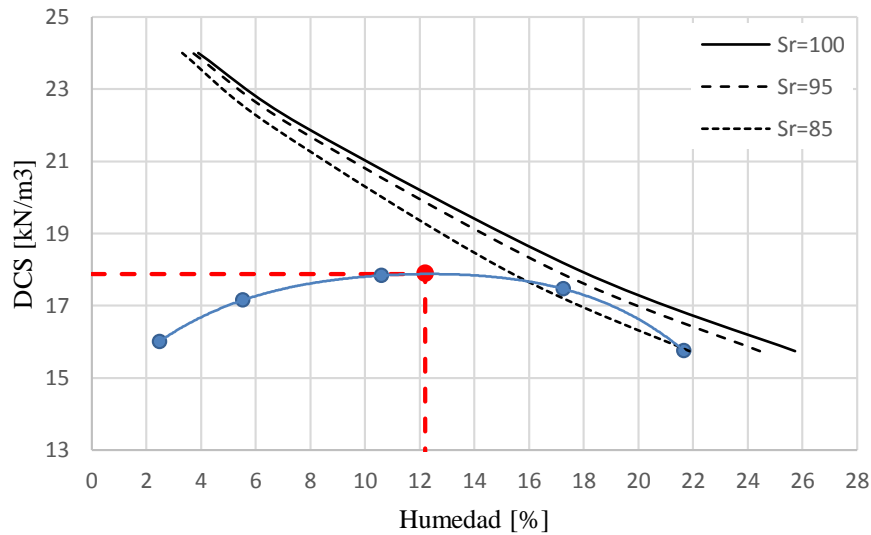


Figura 4.44 Proctor modificado realizado a la muestra B.7.

Los ensayos de compactación para la muestra B.7 con un 15% de fino, entregó como resultado un DCMS de 17,88 KN/m³, con una humedad óptima (w_{opt}) de 12 %, como se puede ver en la Figura 4.44 Resultados que fueron obtenidos con la ecuación polinómica de grado dos que aproxima la curva en sus 3 puntos centrales.

5. Muestra B.12, Parcelas Cabrera

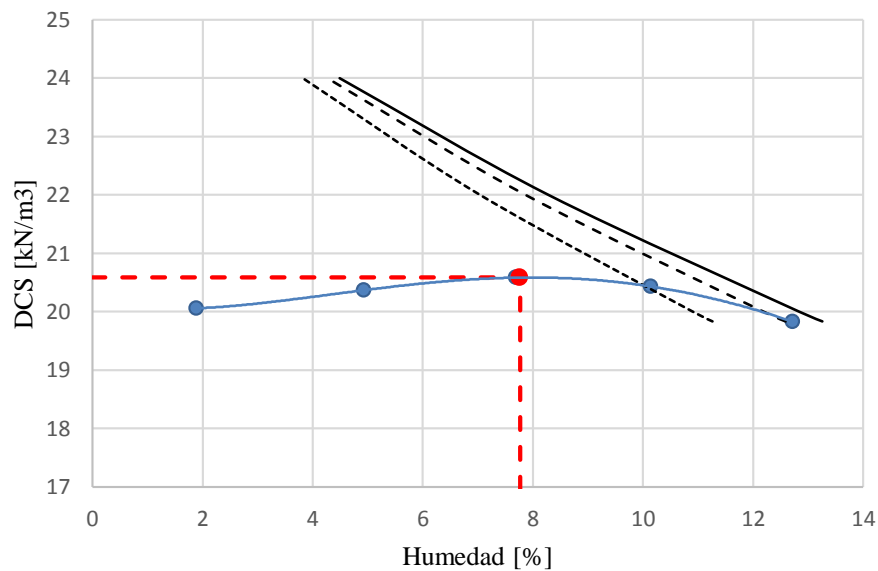


Figura 4.45 Proctor modificado realizado a la muestra B.12.

Los ensayos de compactación para la muestra B.12 con un 22,8% de fino, entrego como resultado un DCMS de 20,58 KN/m³ , con una humedad óptima (w_{opt}) de 8 %, como se puede ver en la Figura 4.45 Resultados que fueron obtenidos con la ecuación polinómica de grado dos que aproxima la curva en sus 3 puntos centrales.

6. Muestra B.14, Fundo Carilebu y otros

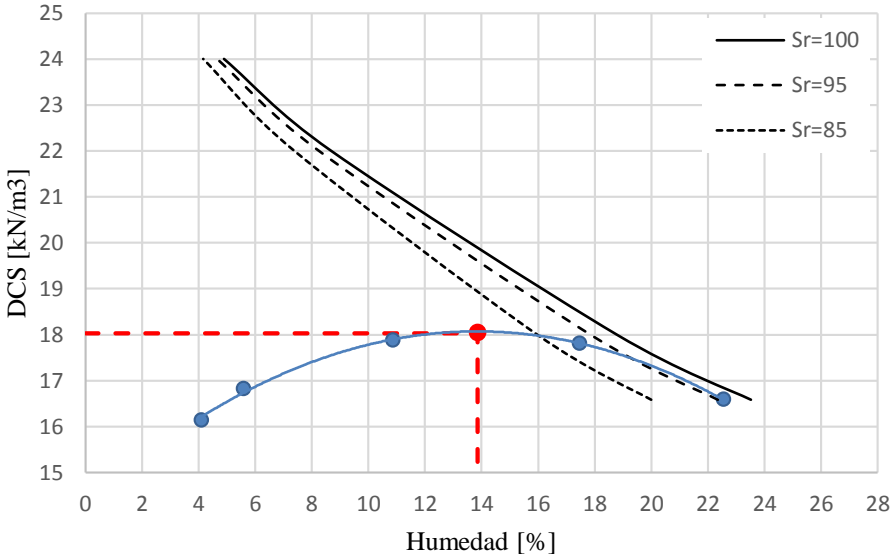


Figura 4.46 Proctor modificado realizado a la muestra B.14.

Los ensayos de compactación para la muestra B.14 con un 61,3 % de fino, entrego como resultado un DCMS de 18,03 KN/m³ , con una humedad óptima (w_{opt}) de 14 %, como se puede ver en la Figura 4.46 Resultados que fueron obtenidos con la ecuación polinómica de grado dos que aproxima la curva en sus 3 puntos centrales.

7. Muestra B.15, Fundo Alto Molul y otros

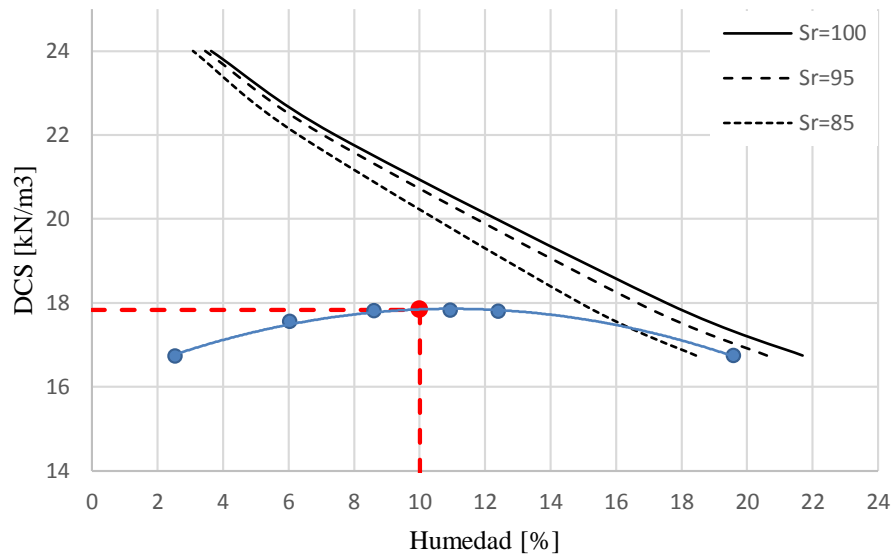


Figura 4.47 Proctor modificado realizado a la muestra B.15.

Los ensayos de compactación para la muestra B.15 con un 58,6 % de fino, entregó como resultado un DCMS de 17,84 KN/m³, con una humedad óptima (w_{opt}) de 10 %, como se puede ver en la Figura 4.47 Resultados que fueron obtenidos con la ecuación polinómica de grado dos que aproxima la curva en sus 3 puntos centrales.

Las características de compactación de los suelos residuales son influenciadas por su gradación, resistencia a la desintegración de los grupos de partículas, composición mineral y esfuerzo de compactación. En consecuencia las características de compactación varían en un rango muy amplio. (Suarez, 2002)

Las muestras de maicillo que fueron ensayados poseen valores densidades secas máximas compactadas (DSMC) que varían entre 17 kN/m³ y 21 kN/m³ y las humedades óptimas poseen un rango desde 8 a 13%.

A diferencia de suelos residuales que provienen en particular de cenizas volcánicas no indican densidades máximas secas como tampoco humedades optima (Wesley, 2009).

Capítulo 5 Caracterización Mineralógica

Los suelos pueden contener prácticamente cualquier elemento en la corteza terrestre; sin embargo, los más abundantes son; oxígeno, silicio, hidrógeno y aluminio, estos elementos, junto con el calcio, sodio, potasio, magnesio y el carbono, comprenden más de 99 % de la masa sólida de los suelos en todo el mundo (Mitchell, 2005). Átomos de estos elementos se organizan en estructuras ordenadas para producir los minerales cristalinos comunes que se encuentran en el suelo. Minerales cristalinos comprenden la mayor proporción de los suelos encontrados en la práctica de ingeniería.

La meteorización de las rocas que originan el suelo puede ser ocasionada por procesos químicos o biológicos. Los procesos principales de meteorización química dependen de los procesos del agua y en algunos casos de la disponibilidad de agua para mantener la química requerida en el proceso. Con una disponibilidad alta de agua, las soluciones son más diluidas y pueden atacar más fácilmente los minerales. Cuando la disponibilidad de agua es muy baja, las soluciones se saturan con los productos de las reacciones.

El grado de meteorización es uno de los factores más significativos que controlan la presencia de minerales de arcilla en los suelos residuales (Duzgoren-Aydin *et al.*, 2002).

La presencia y proporción de los diversos tipos de mineral de arcilla son un resultado de la litología de la roca y del ambiente y condiciones del proceso de meteorización. La caolinita y hematita son indicativos de un ambiente más seco. La Halloysita, esmectita y goetita muestran un ambiente de meteorización más húmedo (Parry y Franks, 2000).

Los silicatos son el grupo mineral más abundante y tienen como componente básico el ion de silicato (SiO_4^{-4}). En la Figura 5.1 se observan los principales grupos de silicatos y minerales.



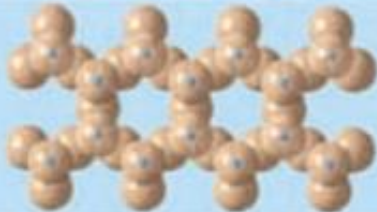
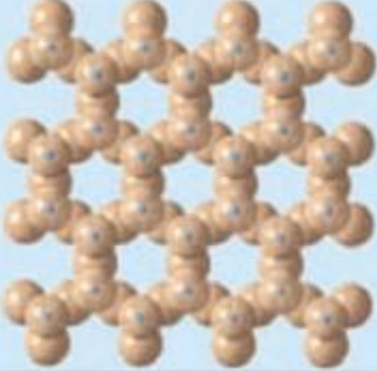

Mineral		Fórmula idealizada	Exfoliación	Estructura de silicatos	
Olivino		$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$	Ninguna	Tetraedro simple	
Grupo de los piroxenos (augita)		$(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$	Dos planos en ángulos rectos	Cadenas sencillas	
Grupo de los anfíboles (hornblenda)		$\text{Ca}_2(\text{Fe, Mg})_5\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Dos planos a 60° y 120°	Cadenas dobles	
Micas	Biotita	$\text{K}(\text{Mg, Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Un plano	Láminas	
	Moscovita	$\text{KA}_2(\text{AlSi}_5\text{O}_{10})(\text{OH})_2$			
Feldespatos	Ortosa	KAlSi_3O_8	Dos planos a 90°	Redes tridimensionales	
	Plagioclasa	$(\text{Ca, Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$			
Cuarzo		SiO_2	Ninguna		

Figura 5.1 Estructuras de los principales grupos de silicatos y minerales comunes (Tarbuck *et al.*, 2008).

Obsérvese en la Figura 5.1 que cada grupo mineral tiene una estructura interna y puede exhibir exfoliación.

Dado que los enlaces silicio-oxígeno son fuertes, los silicatos tienden a exfoliarse entre las estructuras silicio-oxígeno más que a través de ellas. Por ejemplo, las micas tienen una estructura laminar y, por tanto, tienden a exfoliarse en placas planas. El cuarzo, que tiene enlaces silicio-oxígeno de igual fuerza en todas las direcciones, no tiene exfoliación, pero en cambio, se fractura.

La mayoría de los silicatos se forman (cristalizan) conforme el magma se va enfriando. Este enfriamiento puede producirse en la superficie terrestre, cerca de ella (temperatura y presión bajas) o a grandes profundidades (temperatura y presión elevadas). El ambiente durante la cristalización y la composición química del magma determinan en gran medida qué minerales se producen. Por ejemplo, el olivino cristaliza a temperaturas elevadas, mientras que el cuarzo cristaliza a temperaturas mucho más bajas. Además, algunos silicatos se forman en la superficie terrestre a partir de productos meteorizados de silicatos más antiguos. Cada silicato, por consiguiente, tiene una estructura y una composición química que indican las condiciones bajo las cuales se formó. Por tanto, mediante un examen cuidadoso de los minerales constituyentes de las rocas, los geólogos pueden determinar a menudo las circunstancias bajo las cuales se formaron las rocas.

Durante el proceso de cristalización, la composición de la porción líquida del magma cambia continuamente. Por ejemplo, en la etapa en la que alrededor de una tercera parte del magma fundido se ha solidificado, carecerá casi por completo de hierro, magnesio y calcio porque esos elementos son constituyentes de los minerales que se formaron primero. La eliminación de esos elementos hará que se enriquezca en sodio y potasio. Además, dado que el magma basáltico original contenía alrededor del 50 por ciento de sílice (SiO_2), la cristalización del mineral formado primero, el olivino, que contiene sólo alrededor del 40 por ciento de sílice, deja el material fundido restante más rico en SiO_2 . Por tanto, el componente sílice del material fundido también se enriquece conforme evoluciona el magma.

Bowen demostró que si los componentes sólidos de un magma permanecen en contacto con el material fundido restante, reaccionarán químicamente y evolucionarán al siguiente mineral de la secuencia mostrada en la Figura 5.2. Por esta razón, esta disposición de minerales llegó a ser conocida como serie de reacción de Bowen. En algunos ambientes naturales los minerales formados en primer lugar suelen separarse del fundido, interrumpiendo así cualquier reacción química ulterior. El

diagrama de la serie de reacción de Bowen de la Figura 5.2 describe la secuencia de cristalización de los minerales a partir del magma de una composición media en condiciones de laboratorio. Pruebas de que este modelo de cristalización tan idealizado se aproxima a lo que puede ocurrir en la naturaleza proceden del análisis de las rocas ígneas. En particular, encontramos que los minerales que se forman bajo el mismo régimen de temperaturas general en la serie de reacción de Bowen se encuentran juntos en las rocas ígneas. Por ejemplo, nótese en la Figura 5.2 que los minerales cuarzo, feldespato potásico y moscovita, que están localizados en la misma región del diagrama de Bowen, suelen encontrarse juntos como constituyentes principales de la roca ígnea plutónica granito.

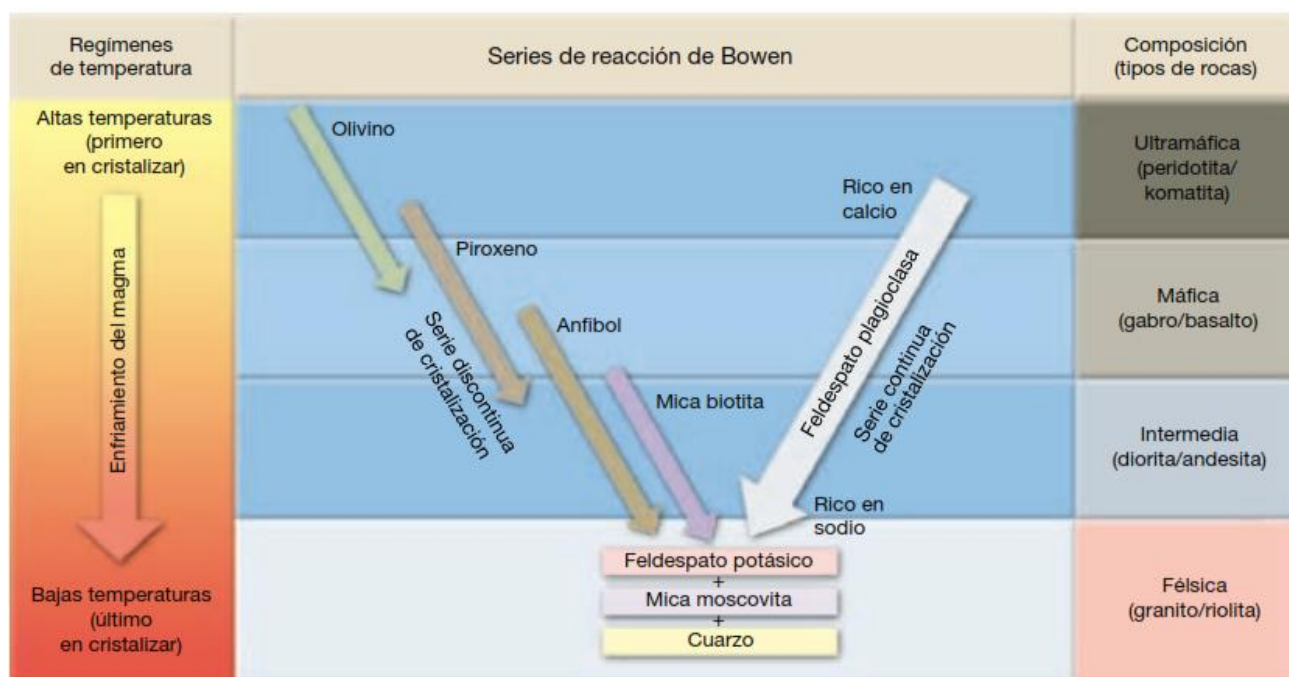


Figura 5.2 La serie de reacción de Bowen muestra la secuencia en la cual cristalizan los minerales a partir de un magma (Tarbuck *et al.*, 2008).

La mineralogía es el principal factor que controla el tamaño, la forma y las propiedades de las partículas del suelo. Estos mismos factores determinan los posibles rangos físicos y propiedades químicas de cualquier suelo dado; por lo tanto, un conocimiento a priori de los minerales que se encuentren en un terreno ofrece una percepción intuitiva en cuanto a su comportamiento. Comúnmente los rangos de tamaño de partícula se muestran en la Figura 5.3 las divisiones entre la grava, arena, limo, arcilla y tamaños son arbitraria, pero conveniente. Las partículas más pequeñas son aproximadamente del tamaño de malla del tamiz 200ASTM E-11/95 (0,074 mm), que es el límite

entre arena y limo según tamaños (no puede ser visto a simple vista). La arcilla puede referirse tanto a un tamaño y a una clase de minerales. Como término tamaño, se refiere a todos los componentes de un terreno más pequeño que un tamaño determinado, por lo general 0,002mm ($2\mu\text{m}$) en las clasificaciones de la ingeniería. Como término de minerales, se refiere específicamente a minerales de arcilla que se distinguen por (1) pequeño tamaño de partícula, (2) una carga eléctrica negativa neta, (3) la plasticidad cuando se mezcla con agua, y (4) una alta resistencia a la intemperie. Los minerales de arcilla son principalmente silicatos de aluminio hidratados.

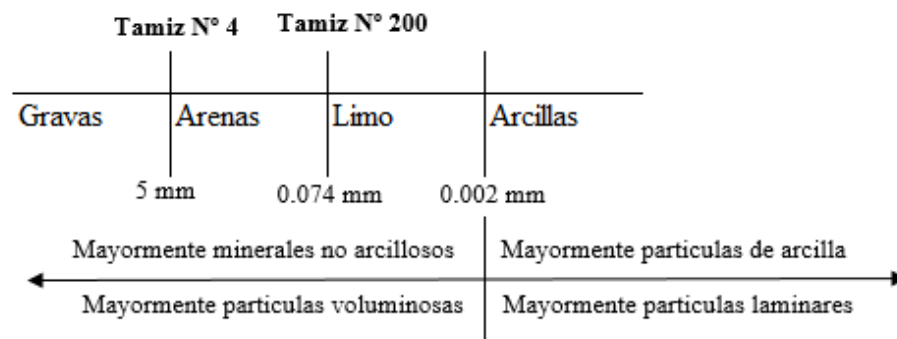


Figura 5.3 Rango tamaño de partículas en suelos (Mitchell *et al*, 2005)

5.1 Minerales en las arcillas

Los minerales que constituyen las arcillas representan un importante subgrupo de los silicatos con exfoliación plana o laminares como es la mica y que contienen el grupo de carga negativa $[Si_4O_{10}]_n^{4-}$. De los numerosos minerales, principalmente silicatos, que se encuentran en rocas ígneas y metamórficas, los agentes de descomposición química llegan a un producto final: la arcilla. A diferencia de lo señalado para suelos granulares, el comportamiento mecánico de las arcillas se ve decisivamente influido por su estructura cristalina en general y su constitución mineralógica en particular. Esto se refleja en que las arcillas no solo se diferencian en el tamaño más pequeños de sus partículas y por ello llamado suelo fino, si no que sus propiedades mineralógicas hacen que tenga un comportamiento distinto al de los suelos granulares o gruesos (Villalobos, 2014).

Las arcillas son estructuras laminadas de tetraedros de sílice y octaedros de aluminio, a continuación en la Figura 5.4 la fila inferior muestra que los minerales 2:1 difieren entre sí principalmente en el

tipo y la cantidad de "pegamento" que contiene las capas sucesivas juntas. Por ejemplo, esmectita tiene cationes débilmente sostenidos entre las capas, la illita contiene fijaciones de potasio, y la vermiculita tiene capas poco organizadas de agua y cationes. La clorita representa un elemento de extremo que tiene capas 2:1 unidas por una capa de hidróxido organizado. La carga por unidad es variable dentro y entre los grupos, y refleja el hecho de que la gama de composiciones es grande debido a cantidades variables de sustitución isomorfa. En consecuencia, los límites entre los grupos son un tanto arbitrarios.

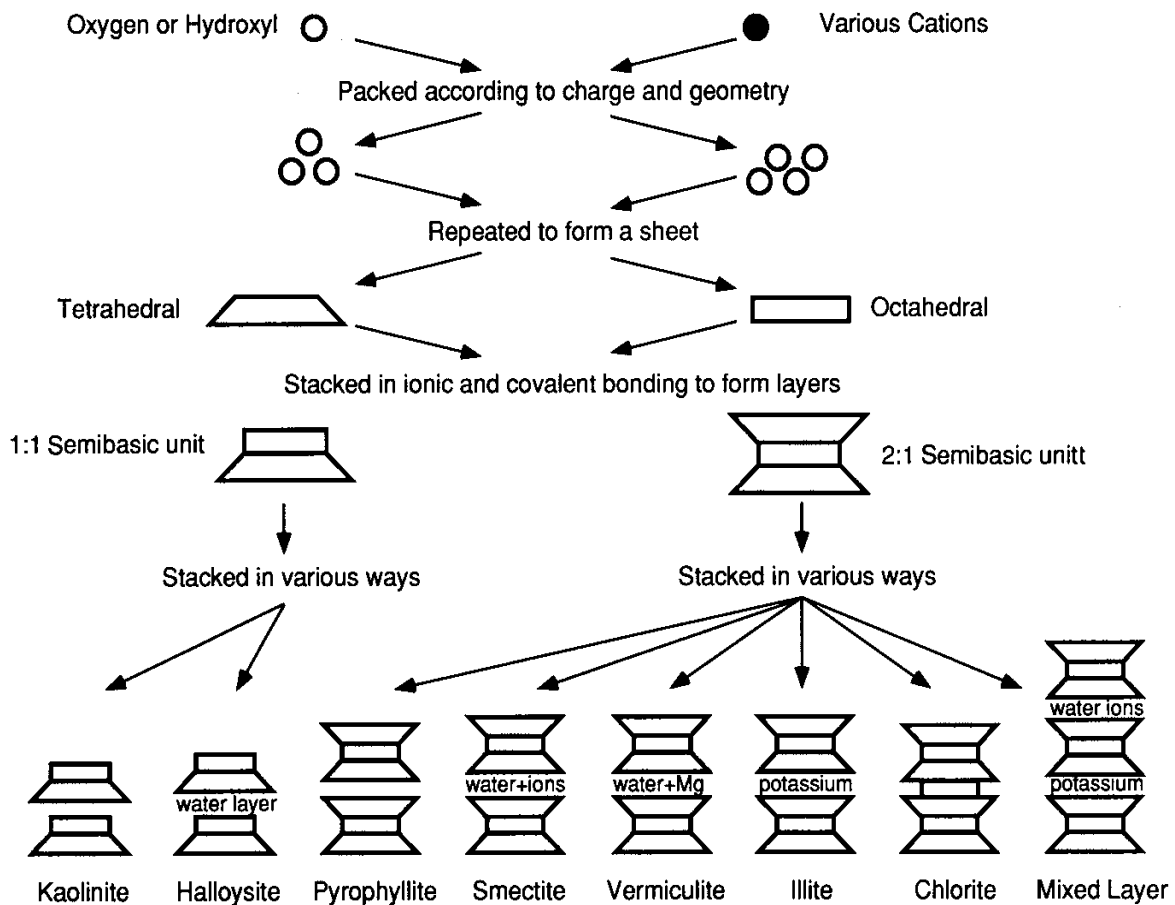


Figura 5.4 Patrón de síntesis de los minerales de arcilla (Mitchell *et al*, 2005).

Los principales grupo se arcilla se describen a continuación:

Caolinita: es una arcilla simple, de estructura tipo 1:1, formada por una lámina de sílice y una de alúmina, unidas fuertemente y formando cristales de 1 micra. No tiene sustituciones isomórficas y tiene completa saturación de las cargas salvo en los bordes.

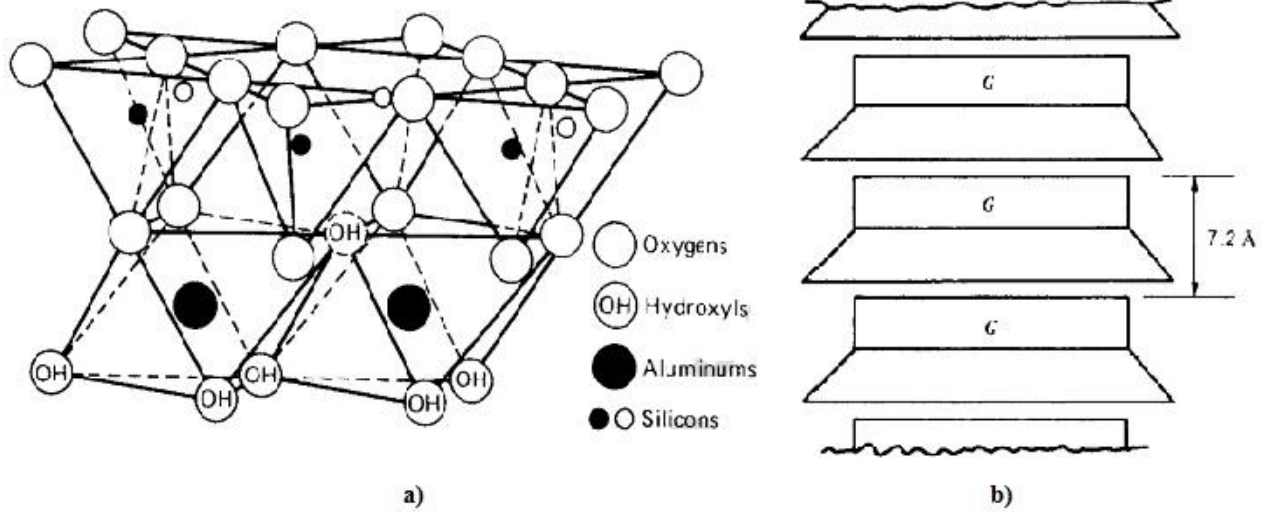


Figura 5.5 Dibujo esquemático a) y diagrama esquemático b) de la estructura de la caolinita

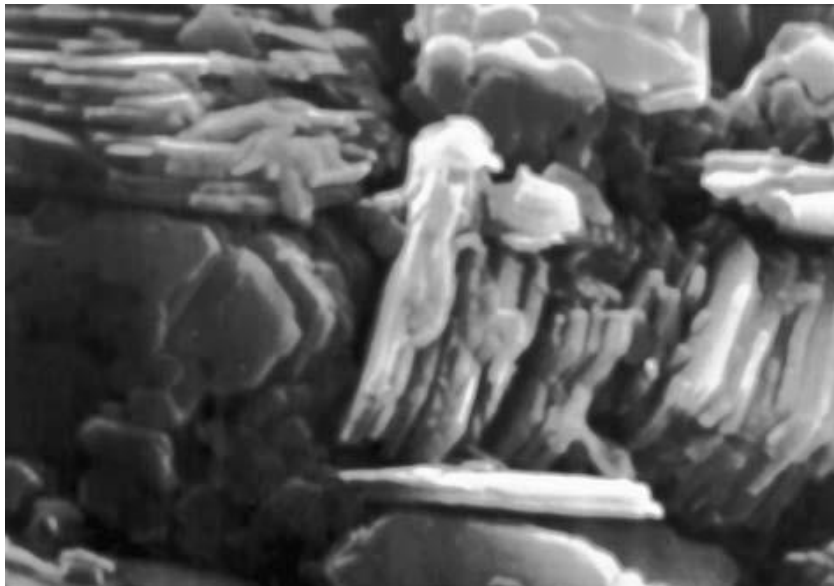


Figura 5.6 Microfotografía electrónica de una caolinita bien cristalizada de St. Austell, Cornwall, Inglaterra. Ancho de la imagen es 17 μm . (Mitchell *et al*, 2005)

Illita: está formada por dos capas de sílice y una de alúmina (estructura tipo 2:1) con sustituciones isomórficas en la capa tetraédrica, lo que hace que tenga exceso de cargas y pueda fijar potasio en la intercapa.

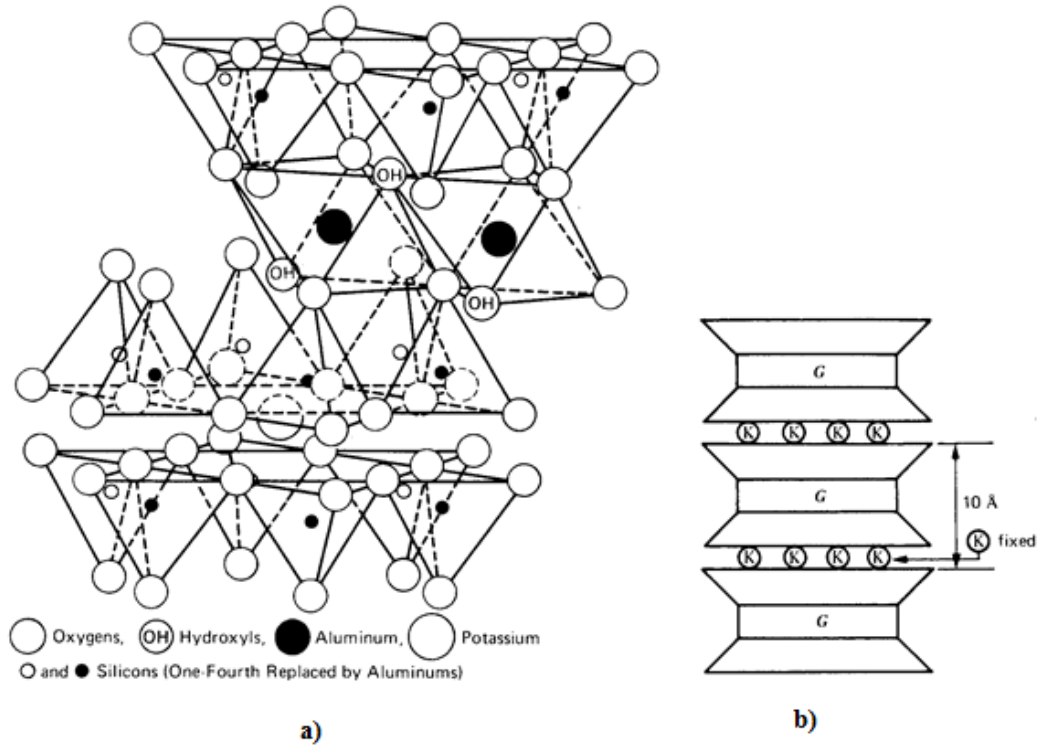


Figura 5.7 Dibujo esquemático a) y diagrama esquemático b) de la estructura de la illita

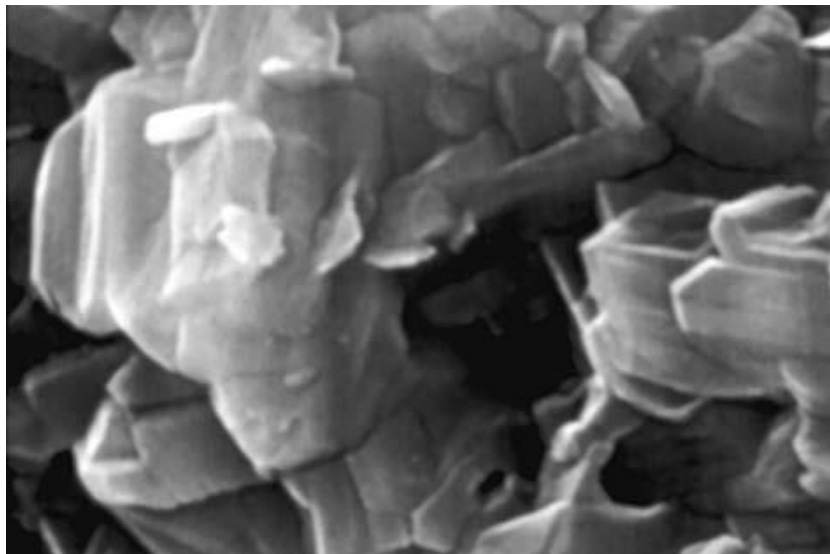


Figure 5.8 Microfotografía electrónica de illita de Morris, Illinois. El ancho de la imagen 7.5 μm (Mitchell *et al*, 2005).

Montmorillonita (esmectitas): presenta una estructura tipo 2:1 con sustitución isomórfica en la capa octaédrica lo que le da exceso de carga y capacidad para retener cationes y agua en su intercapa.

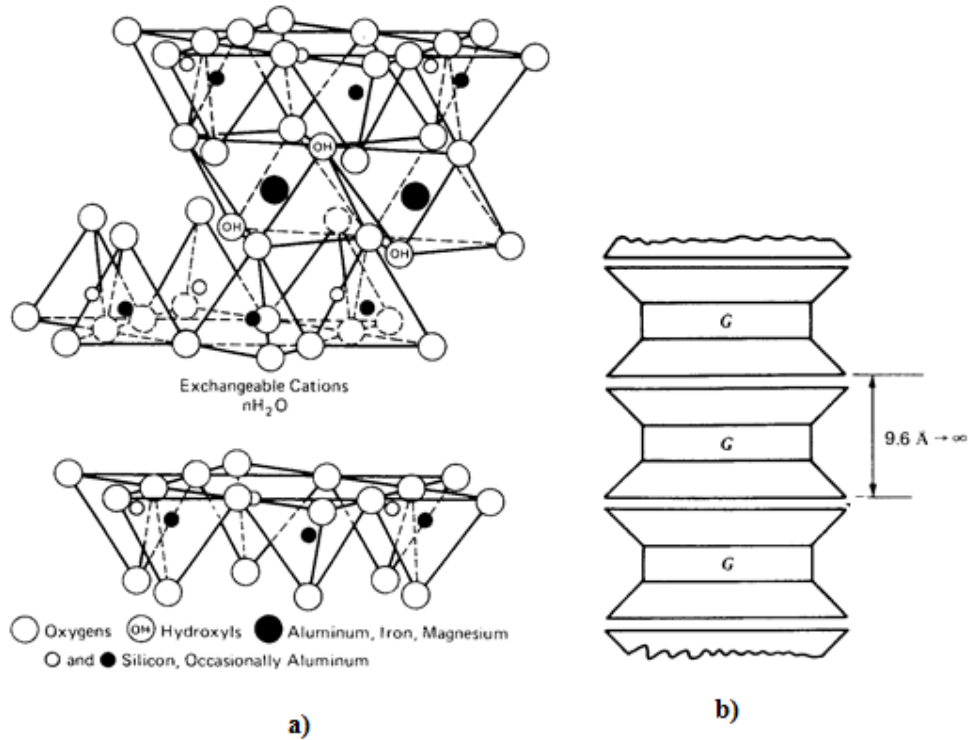


Figura 5.9 Dibujo esquemático a) y diagrama esquemático b) de la estructura de la Montmorillonita (Esmectita)

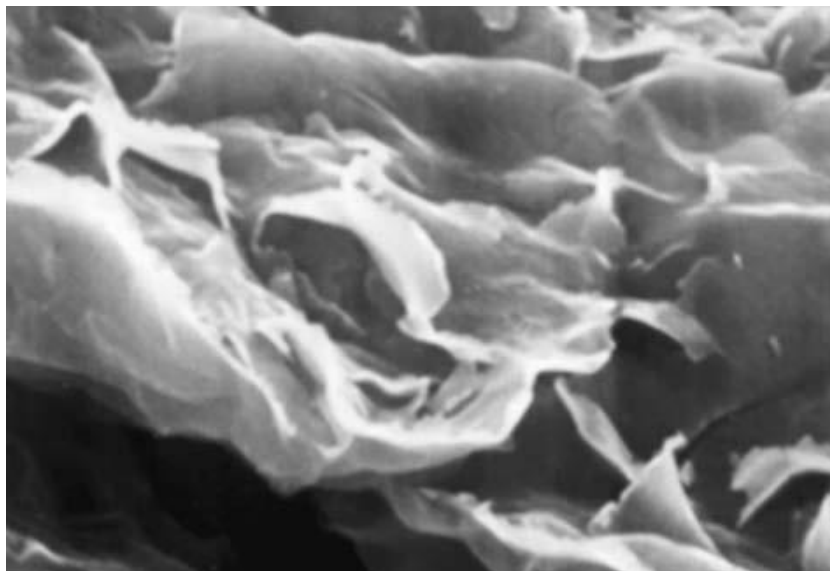


Figura 5.10 Microfotografía electrónica de montmorillonita (bentonita) de Spur Clay, Wyoming. Ancho de la imagen es de $7,5\mu\text{m}$ (Mitchell *et al*, 2005).

Vermiculita: tiene una estructura tipo 2:1 con el mismo tipo de sustitución que la montmorillonita y estructura similar a la mica biotita.

Clorita: de estructura 2:1:1 y es una arcilla 2:1 con una capa octaédrica entre las capas, de unión débil y con tendencia a degradarse.

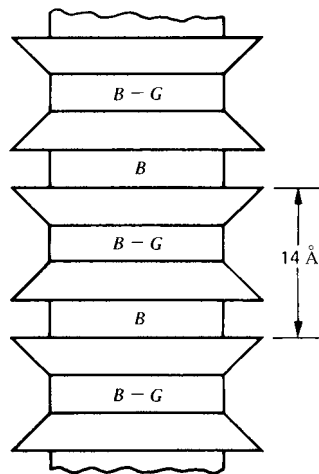


Figura 5.11 Estructura de la clorita

Otras fases presentes en la fracción de tamaño arcillas son los siguientes:

Los oxi – hidroxidos (Fe, Al, Mn, Si) constituyen junto a las arcillas una fracción importante del complejo de alteración. Cuando son liberados, tienden a pasar a formas insolubles (amorfo o cristalina) y generalmente se asocian a otros elementos del complejo, principalmente arcillas.

El **hierro** en medio bien aireado de pradera (mull) se asocia a las arcillas; en suelos de bosque forma complejos móviles. Las formas cristalinas son goethita (FeOOH) de color ocre, que se forma a medida que se libera de sus agentes complejantes y hematita (Fe_2O_3), de color rojo, propia de los climas tropicales, sin agentes complejantes y con período seco.

El **aluminio** es importante en su forma iónica (medio ácido, con pH menor a 5) y su tendencia es a formar minerales arcillosos siendo los óxidos poco abundantes. La forma cristalina, gibsita, predomina en los suelos ferralíticos.

La **silíce** existe bajo forma libre, cristalizada (cuarzo) o combinada en los silicatos. Al liberarse el ácido monosilícico (SiO_4H_4) soluble, por consecuencia móvil, puede pasar a forma amorfa o cristalina, o ser transportado por el agua y ser reciclado por las plantas y acumularse en el horizonte A, pudiendo evolucionar a arcillas de neoformación tanto en clima húmedo como semiárido.

Los diferentes minerales de arcilla se caracterizan primero por el orden de reflexión basal de 7, 10 o 14 Å. Para la determinación de un mineral en específico en un grupo cualquiera se requiere de un pre-tratamiento específico de la muestra.

5.1 Difracción de rayos X (DRX)

Debido al tamaño pequeño de la mayoría de partículas del suelo, que impiden el estudio de los cristales individuales para la identificación de los minerales presentes, se hace uso de la técnica del polvo. Esta técnica consiste en pulverizar una muestra que contiene partículas en todas las orientaciones posibles, se enfrenta con un haz de rayos X paralelos, y haces difractados de varias intensidades son escaneados por un detector PSD, que registra automáticamente las señales para producir un gráfico que muestra la intensidad del haz difractado en función del ángulo 2θ . Todos los planos atómicos prominentes en un cristal producirán una reflexión si la posición es correcta con respecto al haz de rayos X. Por lo tanto, cada mineral producirá un conjunto característico de reflexiones en valores correspondientes a las separaciones interatómicas entre los planos prominentes. Las intensidades de las diferentes reflexiones varían en función de la densidad de empaquetamiento atómico, entre otros factores.

Al incidir los rayos X con los planos cristalográficos de un mineral, producen una reflexión cuya intensidad depende de (1) la cantidad de mineral en el volumen de suelo irradiado y (2) la proporción de los granos minerales que están orientados correctamente. Para los minerales de arcilla, la orientación en paralelo de las placas aumenta las reflexiones basales, pero disminuye la intensidad de

la reflexión de planos reticulares orientados en otras direcciones. La intensidad en la reflexión (001) proporciona una medida de la orientación de las partículas de arcilla. Las alturas relativas de los peak basales para diferentes muestras del mismo material dan una medida de las diferencias de orientación de las partículas.

El método de difracción de rayos X tiene la ventaja de cuantificar los datos de una manera que no era posible con los métodos de microscopía óptica y de electrones. Sin embargo, el método de rayos X tiene algunas desventajas, que incluyen (1) la interpretación dificultosa en suelos que poseen múltiples minerales, (2) los datos se ponderan a favor de la fábrica más cercana a la superficie de la muestra, y (3) el volumen de suelo irradiado por lo general incluyen tanto microfábricas y minifábricas, y los resultados se promediarán en lugar de distinguirlos. Sin embargo, el método de difracción de rayos X es el más adecuado para el análisis de la fábrica de los minerales individuales de arcillas, en la que las orientaciones de partículas y el tamaño de las más regiones donde incide el haz de rayos X (unos pocos milímetros) son de interés en conjunción con otros métodos que también pueden proporcionar detalles sobre la carácter del microtejido.

Para obtener la mineralogía del maicillo en estudio fue necesario realizar ensayos de difracción de rayos X. Estos ensayos se realizaron en el laboratorio de Arcillas del Instituto GEA de la Universidad de Concepción.

El equipo de difracción de rayos X se compone internamente por un generador que alimenta el tubo de rayos X con voltajes y corrientes preseleccionadas, un tubo de rayos X compuesto por la fuente de electrones acelerados (cátodo) y fuente de rayos X (anticátodo de Cu), un goniómetro vertical controlado automáticamente sobre su rango angular, un detector de ondas, un procesador y un sistema de enfriamiento de tubos de rayos X, la información proporcionada por el equipo se registra en un computador.

El cátodo del tubo de rayos X produce electrones los cuales son fuertemente acelerados al ánodo del tubo. El choque ocasionado produce la emisión de rayos X. Los rayos X producidos, pasan a través de una ranura que orienta el haz de rayos, haciéndolo incidir en la muestra. Se produce la reflexión de los rayos X al incidir en un plano de la red cristalina del material irradiado. Los rayos X son difractados y filtrados. Estas ondas filtradas son analizadas por el detector cuya

función es ampliar las radiaciones que inciden sobre él. Las radiaciones amplificadas son enviadas al computador en donde se va graficando el difractograma, al mismo tiempo que sigue la ejecución del ensayo.

El difractograma consiste en una gráfica donde se presenta una serie de peaks representando cada uno de ellos la distancia interplanar de un cristal, cada peak depende de la intensidad de las reflexiones que lo causaron en un determinado ángulo.

La Figura 5.12 muestra un haz paralelo de rayos X de longitud de onda λ que incide sobre un cristal en un ángulo θ paralelo a los planos atómicos espaciados a una distancia d . Si se refleja la onda de C aumenta la onda reflejada de A, entonces la diferencia de longitud entre las dos ondas debe ser un número entero de longitudes de onda $n\lambda$. De la Figura 5.12, esta diferencia es la distancia $BC + CD$, por tanto se tiene:

$$BC + CD = n\lambda$$

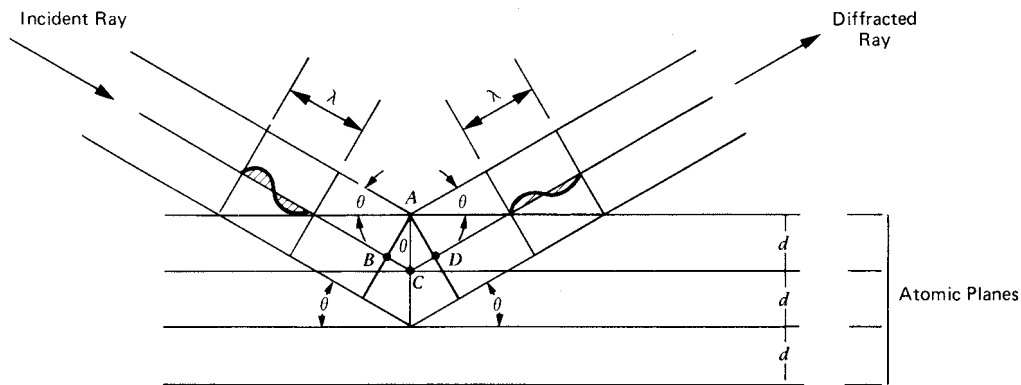


Figura 5.12 Condiciones geométricas de difracción de rayos X de acuerdo a la ley de Bragg.

(Mitchell *et al*, 2005)

Así de la simetría, $BC + CD$, y por trigonometría, $CD = d \cdot \text{sen}(\theta)$. De este modo se da la condición necesaria por:

$$n\lambda = 2 \cdot d \cdot \text{sen}(\theta)$$

Donde n es el número entero que representa el orden de flexión, λ es la longitud de onda de los rayos X, d es la distancia interplanar del cristal y θ es el ángulo de Bragg o ángulo de incidencia (variado continuamente durante el análisis).

Esta es la ley de Bragg, constituye la base para la identificación de los cristales mediante difracción de rayos X. Como no hay dos minerales que tengan las mismas distancias interatómicas de planos en tres dimensiones, los ángulos en que se producen difracciones (y las distancias atómicas calculadas a partir de ellos) se pueden utilizar para la identificación. Difracción de rayos X es particularmente muy adecuada para la identificación de los minerales de arcilla porque el (001) espaciado es característico para cada grupo de minerales de arcilla. Los planos basales generalmente en la mayoría entregan intensas reflexiones en los cristales, debido al empaquetamiento compacto de átomos en estos planos.

La difracción de rayos X es una técnica que permite identificar los minerales cristalinos que conforman un medio, siempre y cuando estos, se encuentren presentes en un porcentaje superior al 1 a 3%. Se utiliza radiación de rayos X, cuya longitud de onda oscila entre 0.02 Å y 100 Å, ya que toda sustancia cristalina dispersa rayos X en patrón propio de difracción, produciendo así una huella de su estructura atómica y molecular.

Para este análisis se seleccionaron 7 muestras representativas de cada fondo. Estas muestras seleccionadas (previamente tamizadas con la malla # 10), fueron pulverizadas y homogenizadas en un molino planetario de carburo de tungsteno hasta conseguir un tamaño de grano <20 µm (método del polvo), luego fueron analizadas, utilizando un equipo Bruker® D4 Endeavor Figura 5.13 a), operado con radiación de Cu y filtro de radiación Kβ de Ni. El resumen de la caracterización realizada se observa en la tabla 5.1 a la roca total

Tabla 5.1 Caracterización mineralógica mediante difracción de rayos X en la roca total.

Muestra	Cuarzo	feld. k	Plagioclasas	Gibbsite	anfíboles	illita/micas	caolinita	Clorita	Cloritoide
B.1	***	*	*	*	-	*	Tr	Tr ?	*
B.2	***	*	*	*	Tr	*	Tr	-	-
B.3 ^a	***	*	*	Tr	*	*	*	Tr ?	-
B.3	***	*	Tr	*	Tr	Tr	Tr	Tr ?	Tr
B.4	***	*	Tr	*	Tr	*	Tr	Tr ?	-
B.5	***	*	Tr	Tr	-	Tr	Tr	Tr ?	Tr
B.6	***	*	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr ?	Tr
B.7	***	*	*	Tr	*	Tr	Tr	-	Tr
B.8	***	*	Tr	Tr	Tr	Tr	*	Tr ?	Tr
B.9	***	*	-	-	-	-	Tr	Tr ?	Tr
B.10 ^a	***	*	Tr	-	-	Tr	*	-	Tr
B.10	***	*	Tr	-	Tr	Tr	Tr	-	Tr
B.11	***	*	Tr	-	Tr	Tr	Tr	Tr ?	Tr
B.12	***	*	*	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr ?	Tr
B.13	***	Tr	-	Tr	-	*	Tr	Tr ?	Tr
B.14	***	-	-	Tr	-	*	-	-	-
B.15	***	-	Tr	-	-	Tr	Tr	-	-

Referencias: feld k: feldespato potásico

Gradación:

***: Muy abundante

**: Abundante

*: Escaso

Tr: Trazas

Tr?: Fase dudosa

En general las muestras se encuentran dominadas por la presencia de cuarzo y minoritariamente por feldespatos potásicos y plagioclasas, sin embargo también se puede apreciar la presencia de gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$), anfíboles y cloritoide. Mención aparte requiere el grupo de las arcillas, estas incluso en pequeñas cantidades pueden dominar el comportamiento físico del sólido (Toro, 2007). Para el caso de las muestras analizadas se observan principalmente micas como vermiculita y caolinita, la presencia de cloritas y esmectitas no pueden ser mostradas por esta técnica, por lo anterior es necesario concentrar la fracción de tamaño inferior a 2 micrones y realizar una serie de nuevos difractogramas a modo de identificar de manera correcta la presencia de arcillas.

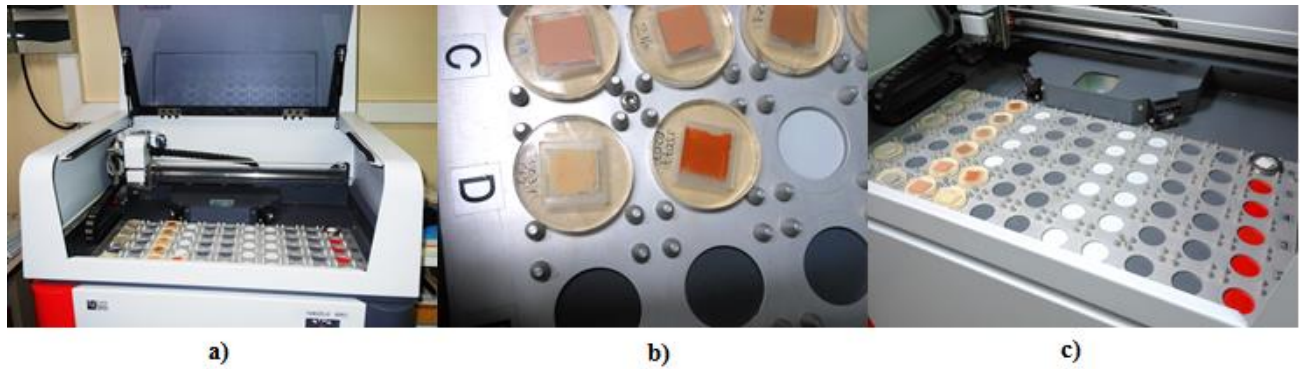


Figura 5.13 Preparación muestra para Difracción de rayos X: a) Equipo para difracción de Rayos X modelo Bruker® D4 Endeavor, Laboratorio GEA, Universidad de Concepción b) y c) montaje de muestra.

Para determinar el tipo de arcilla presente en las 7 muestras estudiadas, se realizó una difracción para la fracción bajo los $2\mu\text{m}$, la separación de arcillas consiste en colocar la muestra en una centrifuga (Figura 5.14 b), la cual se calibra utilizando la ley de Stokes. Previamente y con el fin de disgregar y/o liberar desde la roca total, se aplica ultrasonido como se puede observar en la Figura 5.14 c).

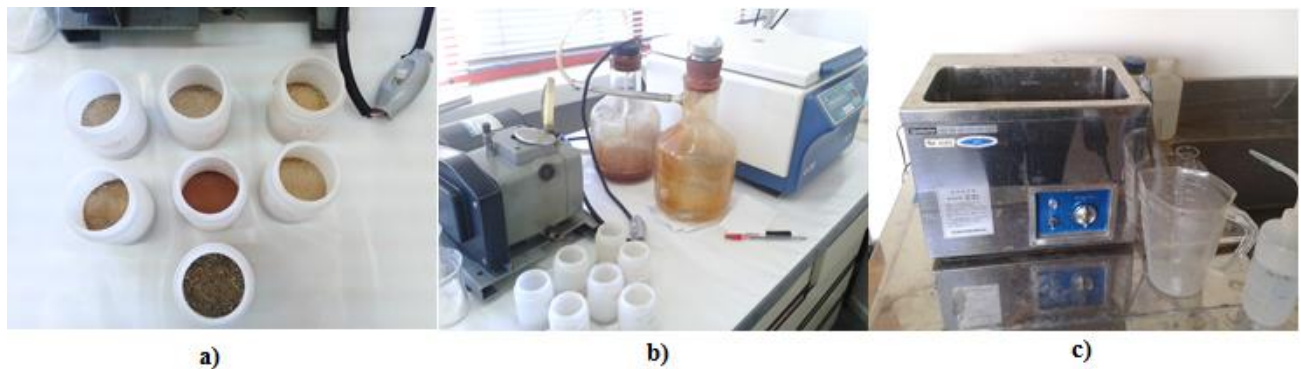


Figura 5.14 Preparación muestra para la separación fracción de arcillas ($< 2\mu\text{m}$): a) Muestras, b) equipo centrifuga y c) equipo ultrasonido.

5.2 Análisis cualitativo

Para identificar las diferentes especies minerales que componen cada una de las muestras, los valores de los picos del difractograma, (expresados en unidades de ángulo 2θ , donde θ representa el ángulo de refracción), se convierten en valores de espaciado d , (expresadas en unidades de longitud en Å) de los planos que producen las reflexiones, según lo expresa la Ley de Bragg. Luego, se asignan los peaks a las especies minerales, de acuerdo con los patrones estándar establecidos, donde

las vermicullitas son de 6° en unidades de ángulo 2θ aprox., las micas son de $8,5^\circ$ aprox. y las caolinita-clorita son de $12,5^\circ$ aprox.

Los resultados del estudio mineralógico de las arcillas a la fracción inferior a 2 micrones del maicillo se muestran en los difractogramas en los cuales se reconocen los principales peaks de minerales presentes en las muestras (Figuras 5.15 a 5.22) donde se someten a 4 procesos y lecturas respectivamente: orientado, etilenglicol, calentamiento a 375°C y finalmente un calentamiento a 550°C .

Se puede observar en los difractogramas que no existe presencia de material expandible relacionado a esmectitas, sino más bien vermicullitas, por otra parte se observa que el proceso realizado a 550°C , destruye la estructura de la caolinita, sin observar residuos en el patrón indicativo de la usencia de clorita en la muestra, también se identifican peaks de micas que no destruyeron su estructura a los 550°C . Por lo tanto la difracción de rayos X presenta una característica única con la cual los componentes de un medio pueden ser identificados como compuestos específicos a partir de sus diagramas de difracción.

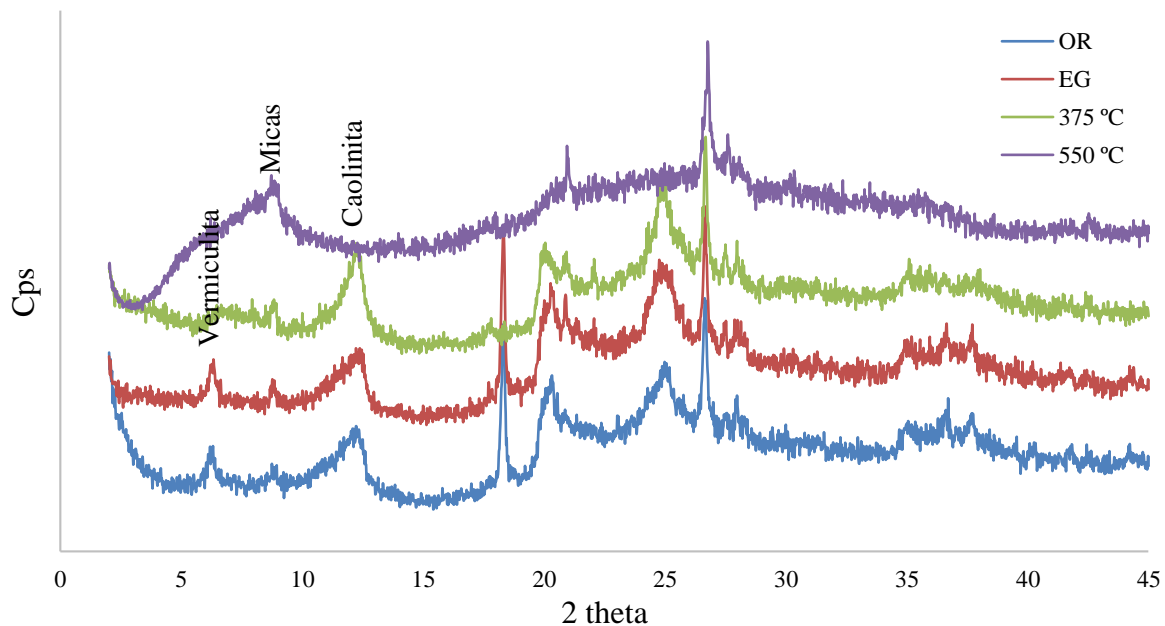


Figura 5.15 Patrón de difracción de rayos X de la muestra B.1, realizado en la fracción inferior a 2 micrones.

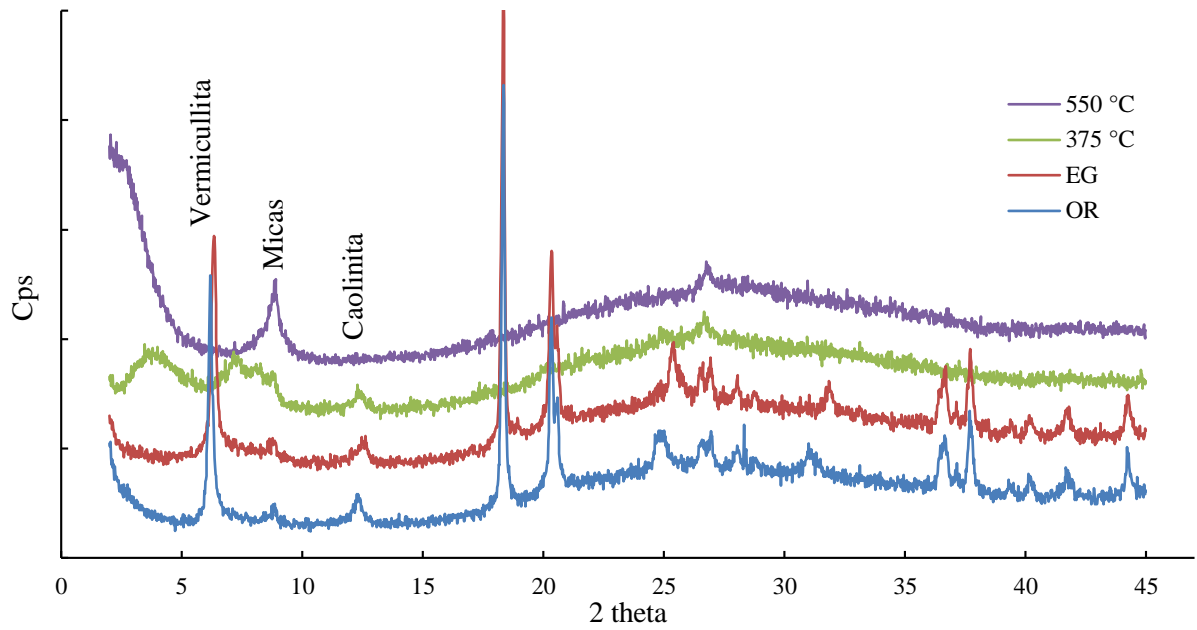


Figura 5.16 Patrón de difracción de rayos X de la muestra B.2, realizado en la fracción inferior a 2 micrones.

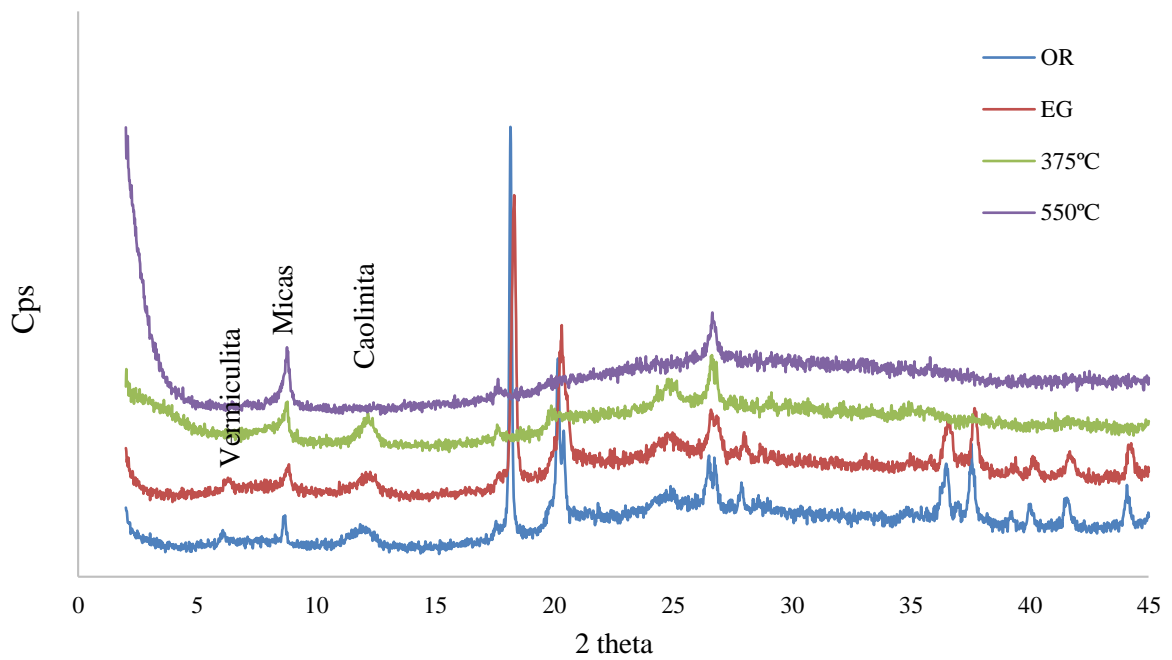


Figura 5.17 Patrón de difracción de rayos X de la muestra B.3, realizado en la fracción inferior a 2 micrones.

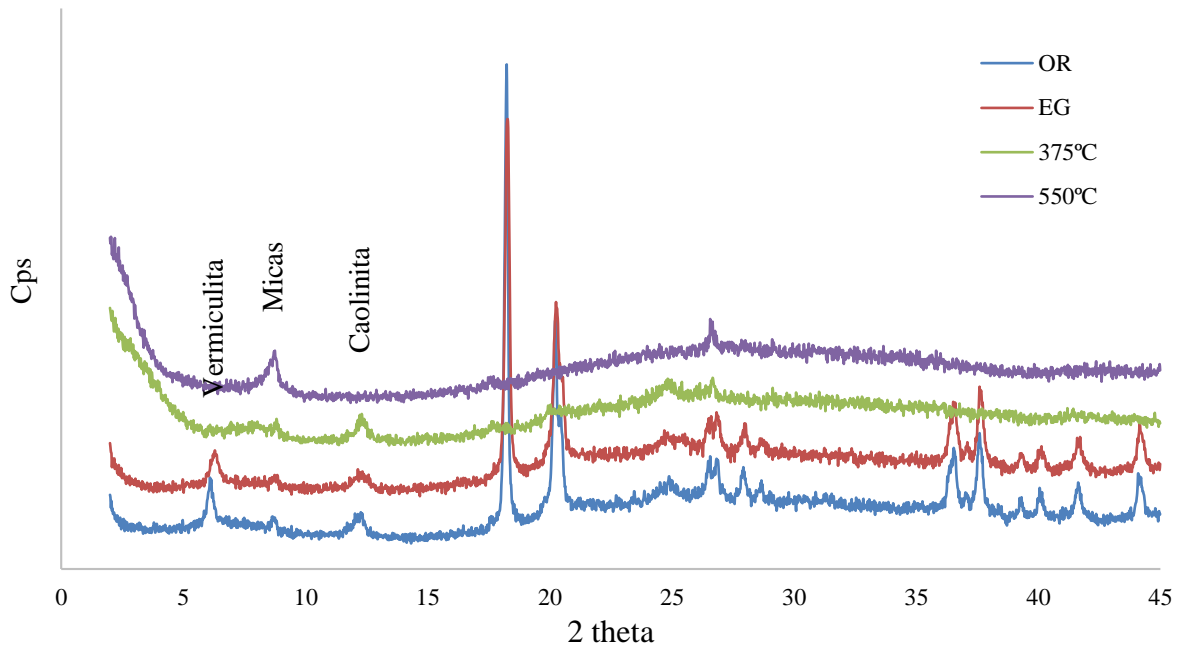


Figura 5.18 Patrón de difracción de rayos X de la muestra B.4, realizado en la fracción inferior a 2 micrones.

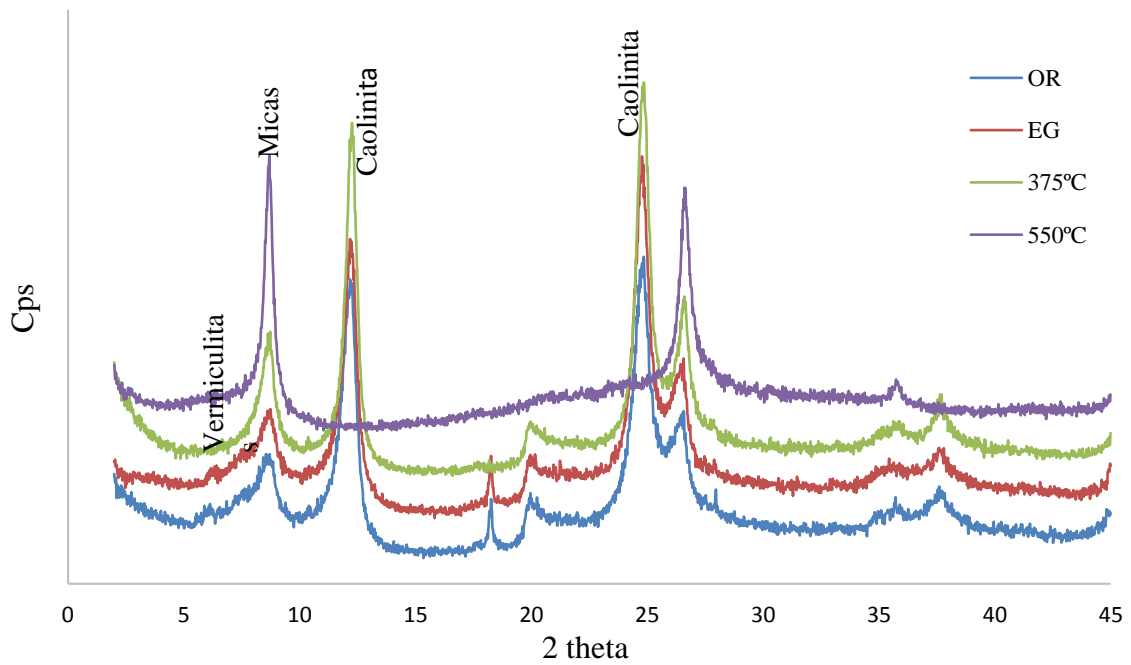


Figura 5.19 Patrón de difracción de rayos X de la muestra B.7, realizado en la fracción inferior a 2 micrones.

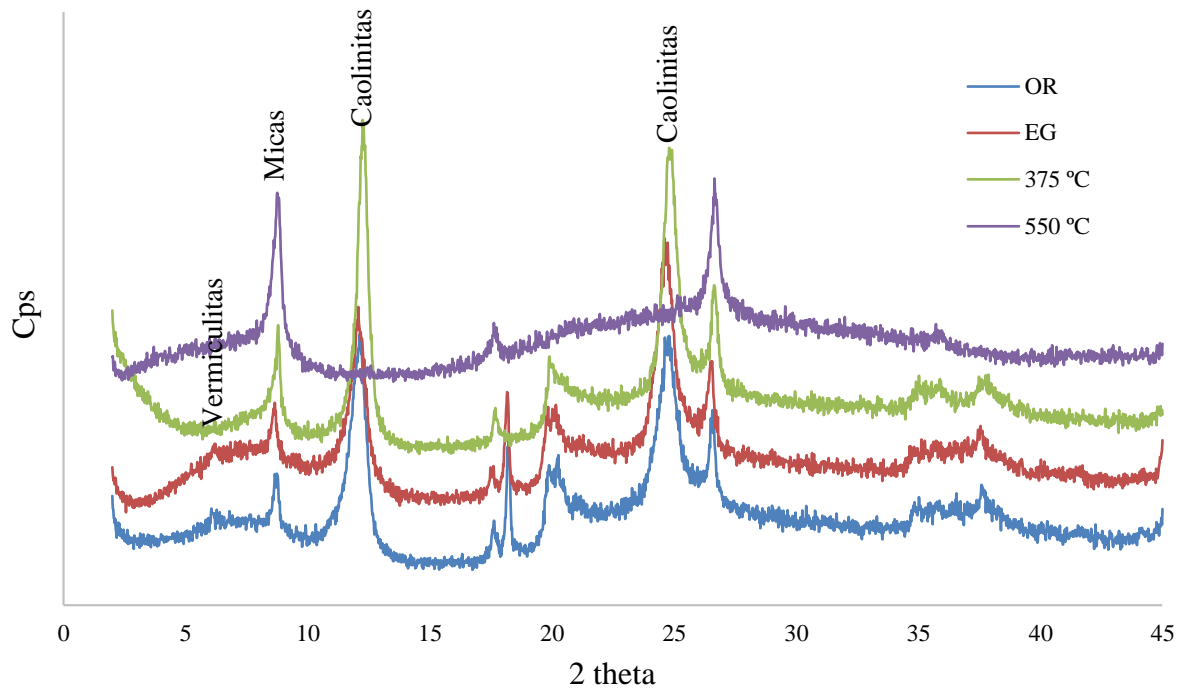


Figura 5.20 Patrón de difracción de rayos X de la muestra B.12, realizado en la fracción inferior a 2 micrones.

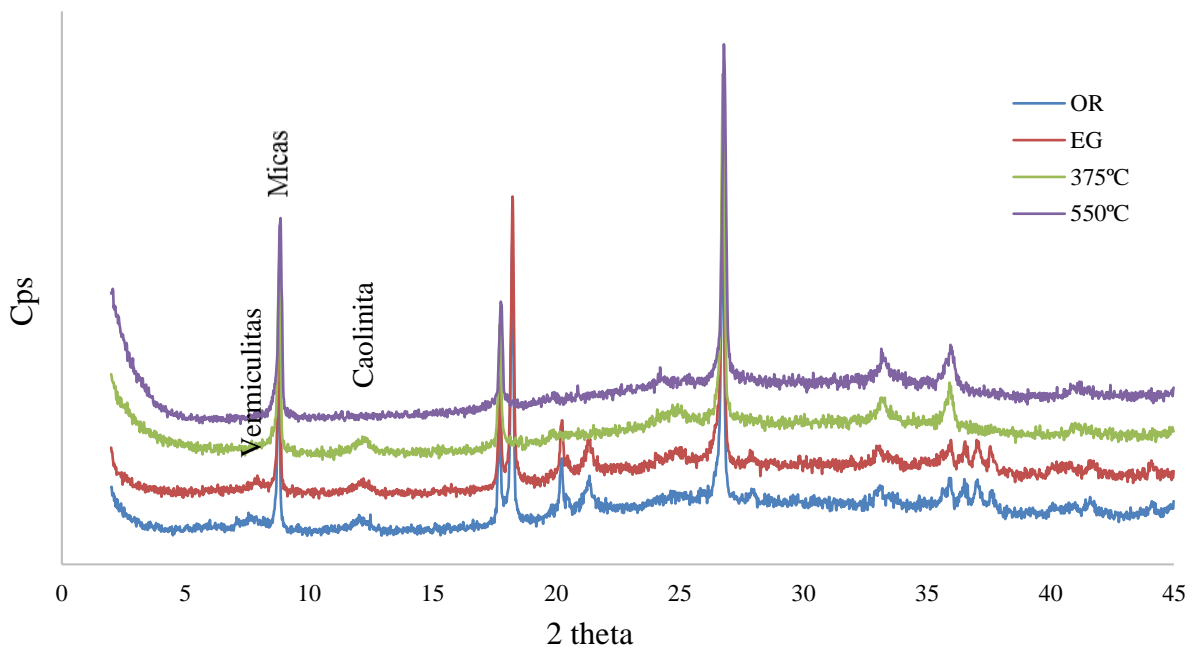


Figura 5.21 Patrón de difracción de rayos X de la muestra B.14, realizado en la fracción inferior a 2 micrones.

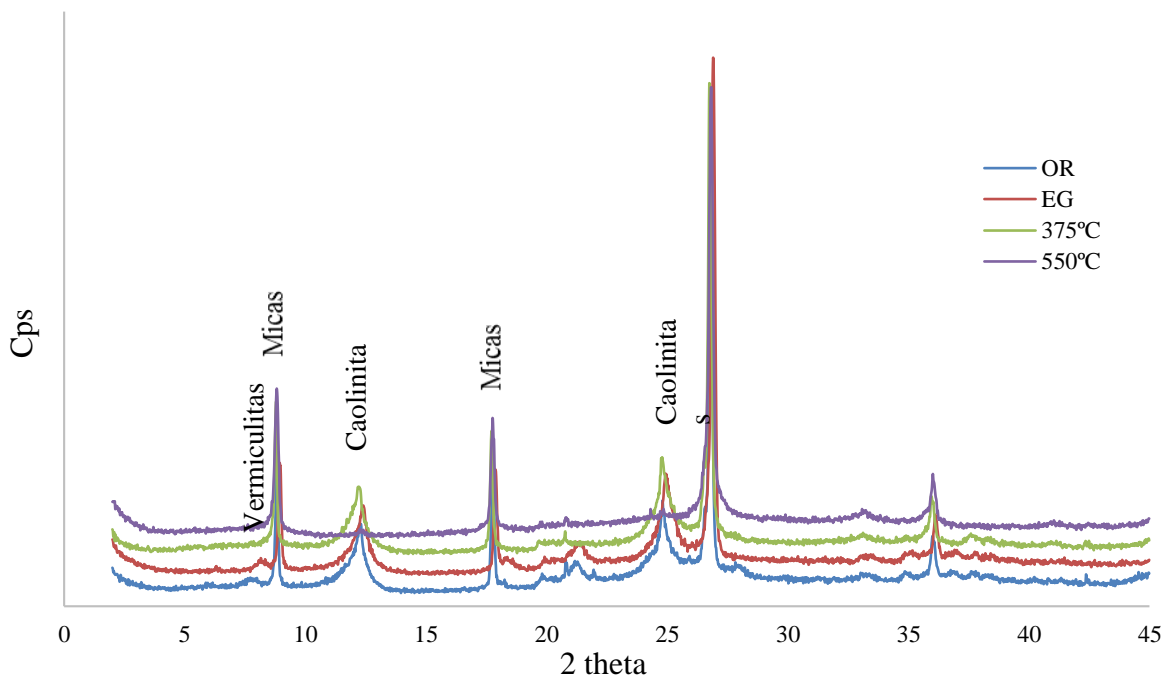


Figura 5.22 Patrón de difracción de rayos X de la muestra B.15, realizado en la fracción inferior a 2 micrones.

5.3 Análisis cuantitativo

La determinación de los tipos y cantidades relativas de los minerales presentes en el suelo forma una componente esencial de la mayoría de los esfuerzos de caracterización del suelo. Una vez obtenidos los datos necesarios a través del método de difracción de rayos X, se procede a la cuantificación de los minerales presentes en las muestras. Los cálculos son muy sencillos y consisten en obtener el porcentaje de cada mineral a través de los resultados del difractograma de análisis de minerales de arcilla bajo los 2µm, la metodología utilizada para la cuantificación de minerales fue usando “Mineral intensity factors” (MIFs) en combinación con el enfoque del 100%. Es decir mediante factores de intensidad recomendados por Gjames (1967) y utilizados para este estudio, se identifican los peak y se cuentan los Cps de la gráfica obtenida cuando se aplica el etilenglicol (EG), el cual permite la identificación de filosilicatos expansivos, que en su mayoría estos filosilicatos son del grupo de la esmectita en donde su principal miembro es la montmorillonita, del cual no se encontró ningún mineral expansivo en las muestras analizadas.

A continuación se muestra la tabla 5.2 con los factores de intensidad (1/MIF) de cada mineral obtenidos en la literatura (Khale *et al*, 2002)

Tabla 5.2 Factores de intensidad según tipo de mineral

Gjems (1967)	Kaolinite	Illite	Vermiculite	Chlorite	Smectite	ML (I/V)	ML (I/C)	ML (V/S)	ML	Quartz
	-	1	0,34	1	0,23	0,40	1	0,23	0,63	-

Para calcular los porcentajes de minerales de arcilla se utilizan las siguientes expresiones:

$$\% Vermiculita = \frac{CPS_{Vermiculita} \cdot 0,34}{(CPS_{Vermiculita} \cdot 0,34 + CPS_{mica} + CPS_{Caolinita}) \cdot 100} \quad (1)$$

$$\% Mica = \frac{CPS_{mica}}{(CPS_{Vermiculita} \cdot 0,34 + CPS_{mica} + CPS_{Caolinita}) \cdot 100} \quad (2)$$

$$\% Caolinita = \frac{CPS_{caolinita}}{(CPS_{Vermiculita} \cdot 0,34 + CPS_{mica} + CPS_{Caolinita}) \cdot 100} \quad (3)$$

La cuantificación de los minerales de arcilla en la muestra continuación en la tabla 5.3

Tabla 5.3 Tabla cuantificación minerales de arcilla

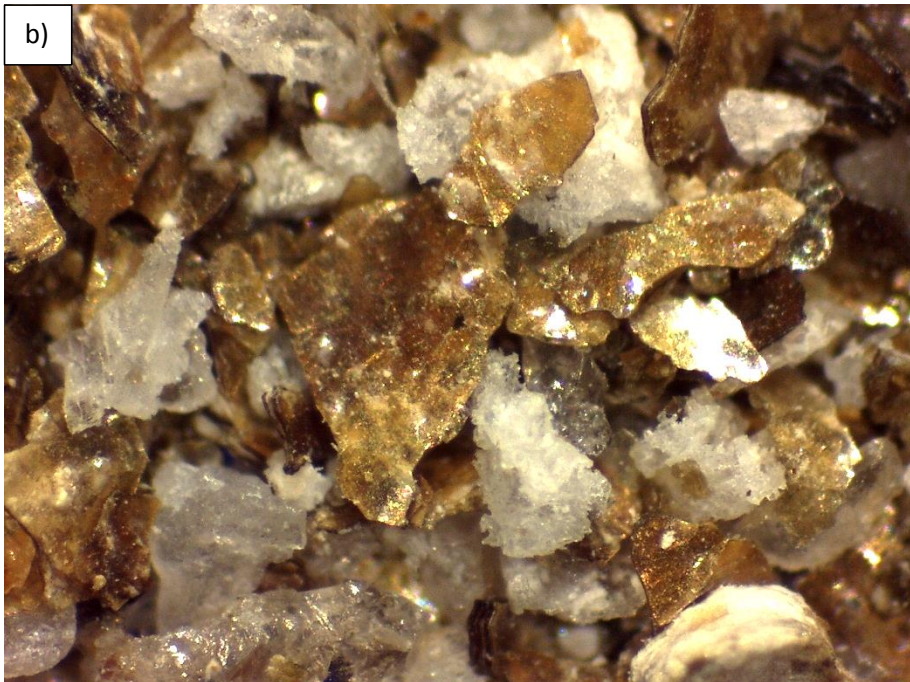
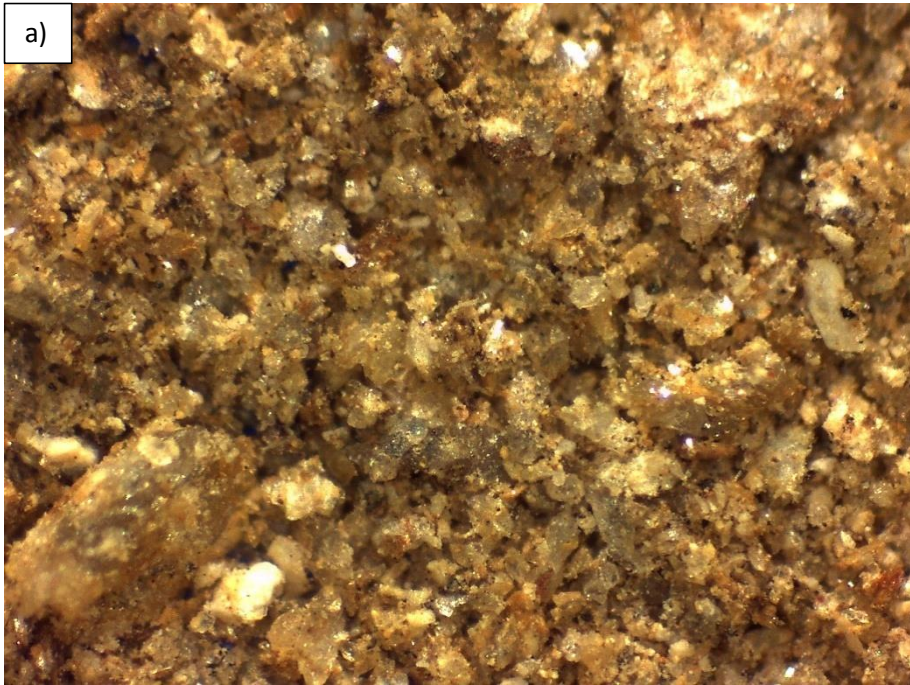
Muestra	Vermecullita Cps EG	Mica Cps EG	Caolinita- clorita Cps EG	Vermecullita %	Mica %	Caolinita- clorita %	Total %
B1	389	319	426	15,1	36,4	48,6	100
B2	1290	225	269	47	24,1	28,8	100
B3	225	315	286	11,3	46,5	42,2	100
B4	354	254	273	18,6	39,2	42,2	100
B7	459	814	1837	5,6	29	65,4	100
B12	432	605	1009	8,3	34,4	57,3	100
B14	313	1295	277	6,3	77,2	16,5	100
B15	396	1640	1052	4,8	58	37,2	100

5.4 Microscopio estereoscópico (óptico)

Los microscopios ópticos y petrográficos se pueden utilizar para estudiar la identidad, tamaño, forma, textura y condición de los granos individuales y agregados en el rango de tamaño de limo y arena; para el estudio de la sección delgada de la fábrica, es decir, la distribución espacial y las interrelaciones de los componentes; y para el estudio de las orientaciones de grupos de partículas de arcilla. Por lo tanto, las partículas de arcilla individuales no pueden por lo general ser distinguidas utilizando un microscopio óptico. Datos útiles sobre la forma, textura, tamaño y distribución del tamaño de granos de limo y arena se pueden obtener directamente sin formación previa formal en técnicas petrográficas. Se necesita algún fondo para identificar los varios minerales; sin embargo, los criterios de diagnóstico relativamente simples que se pueden utilizar para la identificación de más del 80 por ciento de los granos gruesos en la mayoría de los suelos son dadas por Cady *et al.* (1986). Estos criterios se basan en factores tales como el color, índice de refracción, birrefringencia, clivaje, y la morfología de las partículas. La naturaleza de texturas de la superficie, la presencia de revestimientos y capas de descomposición, son útiles tanto para la interpretación de la historia de un suelo y como una guía para la solidez y la durabilidad de las partículas. (Mitchell, 2005)

El microscopio estereoscópico utilizado para este estudio es un Leica EZ4 D, este incorpora un zoom 4,4:1 de alta calidad. El software Leica LAS EZ permite obtener imágenes, realizar el ajuste de precisión, la captura y el archivado de imágenes de manera sencilla, se tomaron imágenes a la muestra original como a la muestra lavada por el tamiz N° 200 ASTM y secada a 60°C con el fin de no perder minerales, sin embargo enfocar la muestra de suelo con gran variedad de minerales como es el maicillo hace dificultosa la identificación de minerales o forma del grano de suelo, a continuación se muestran las imágenes tomadas con el microscopio estereoscópico:

En la Figura 5.23 a) de la muestra B.1 se observa gran cantidad de feldespatos con un alto grado de meteorización química generando un material fino en un tono amarillo. En las Figuras 5.23 b) y c) se puede observar que la muestra B.1 contiene abundante cantidad de biotita color dorado y cuarzo.



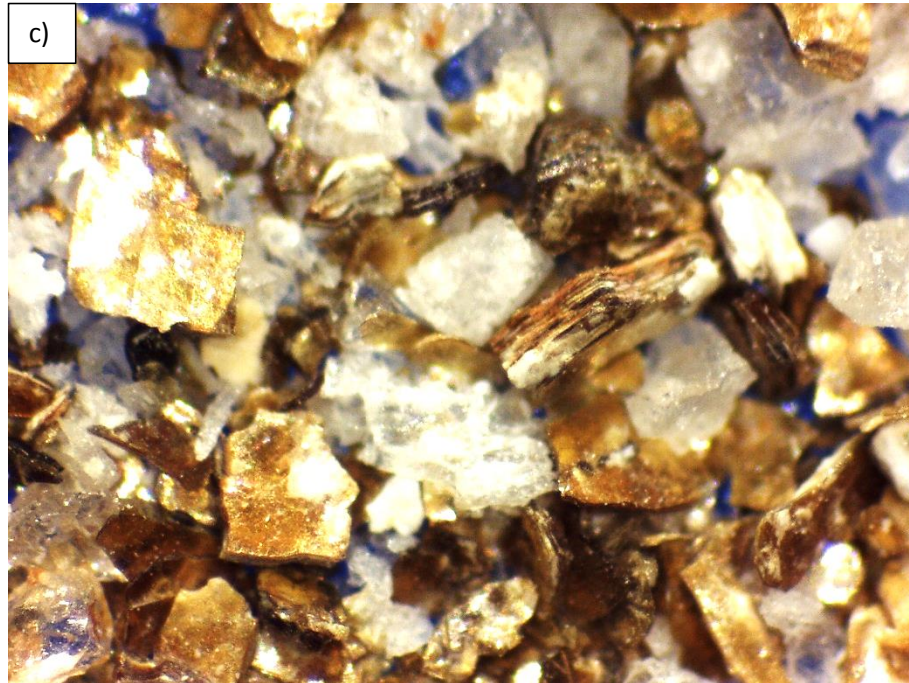
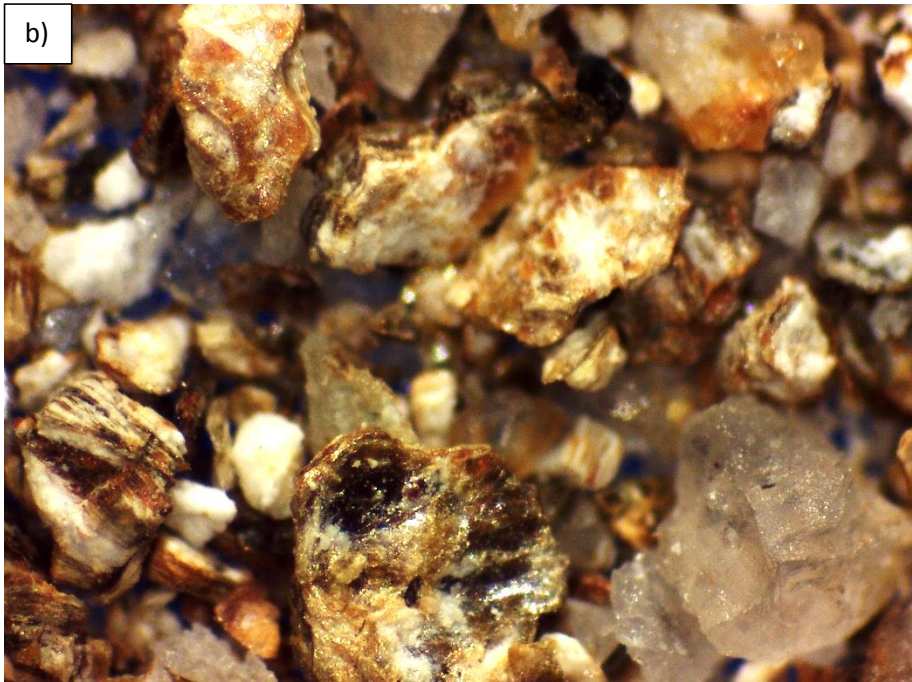
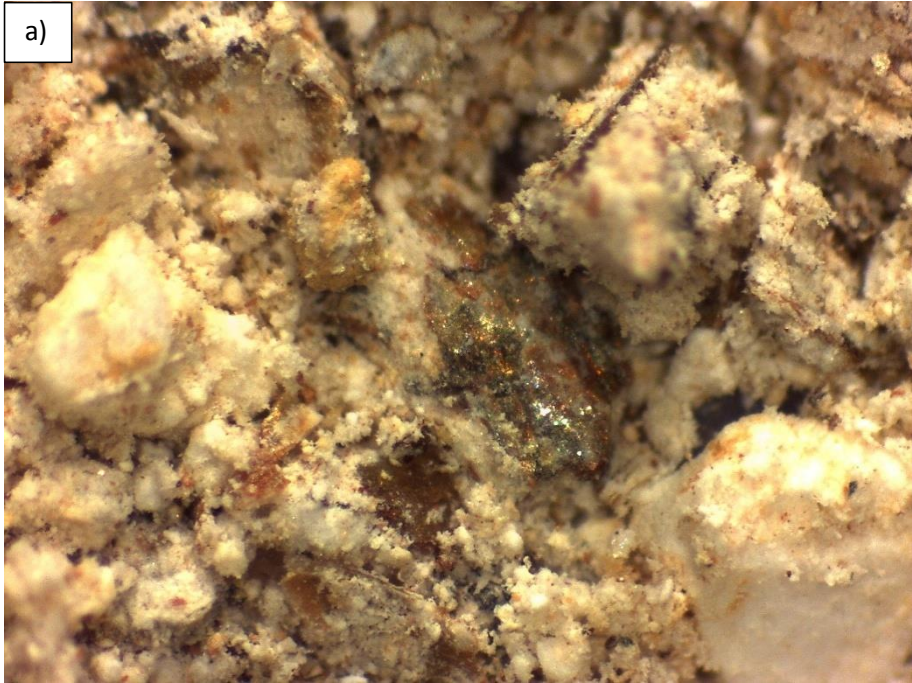


Figura 5.23 a) Es la muestra B.1 original, b) y c) corresponde a la muestra B1 lavada por malla N° 200 (0,075 mm) y secada en horno a 60° C. Ancho de imagen 3mm

La Figura 5.24 a) de la muestra B.3 se observa un material fino en un tono más blanco, es decir la meteorización del feldespato fue menos fuerte. En las Figuras 5.24 b) y c) se observa una meteorización menos fuerte que la muestra B.1 la biotita se conserva en un color más oscuro, también se distingue óxido de hierro en láminas en el cuarzo.



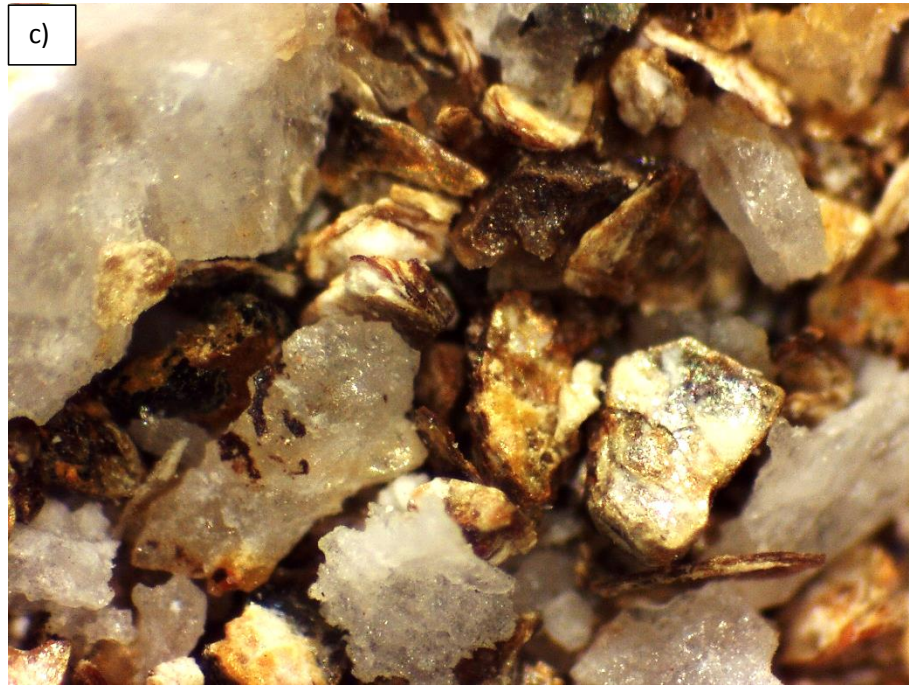
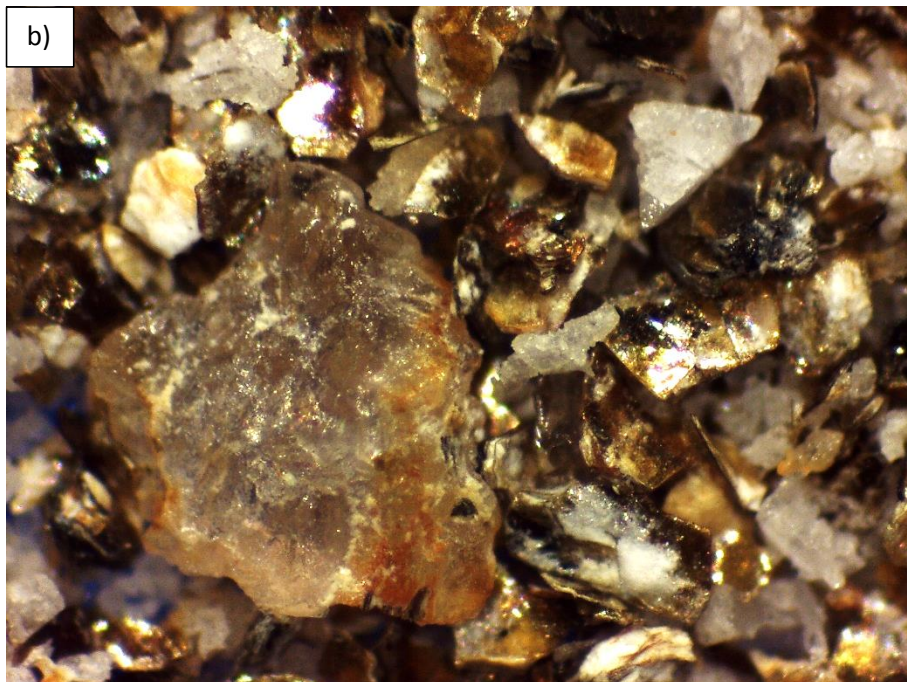
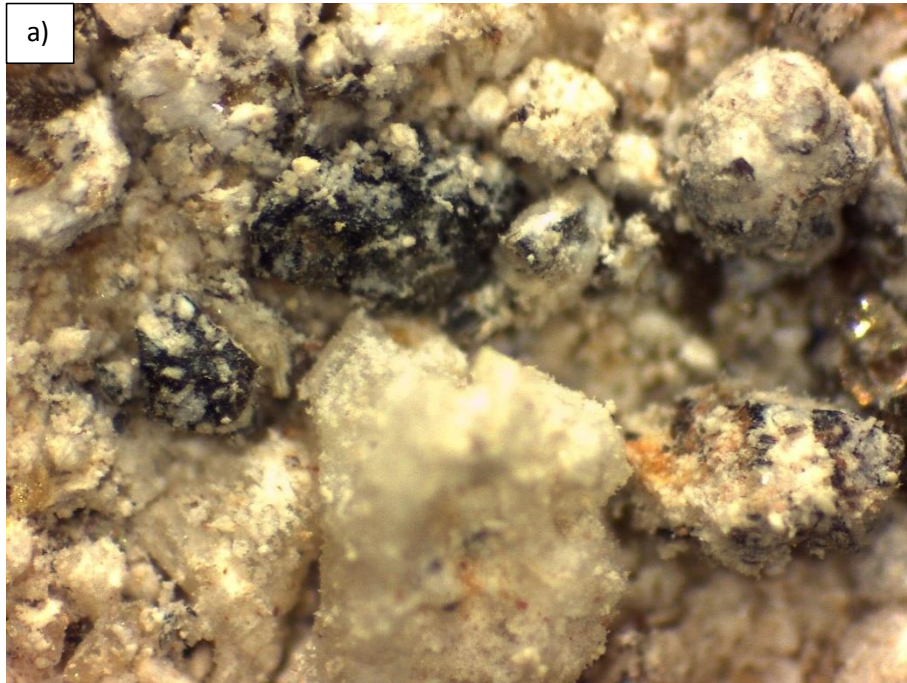


Figura 5.24 a) Es la muestra B.3 original, b) y c) corresponde a la muestra B.3 lavada por malla N° 200 (0,075 mm) y secada en horno a 60° C. Ancho de imagen 3mm

En la Figura 5.25 a) de la muestra B.4 no tiene un color amarillo intenso, esto quiere decir que el feldespato esta menos alterado. En las Figuras 5.25 b) y c) se observa una muestra menos meteorizada, con óxido de hierro y biotita más fresca por el color oscuro que presenta, además se observa más cantidad de feldespatos sano en color blanco que en las muestras anteriores.



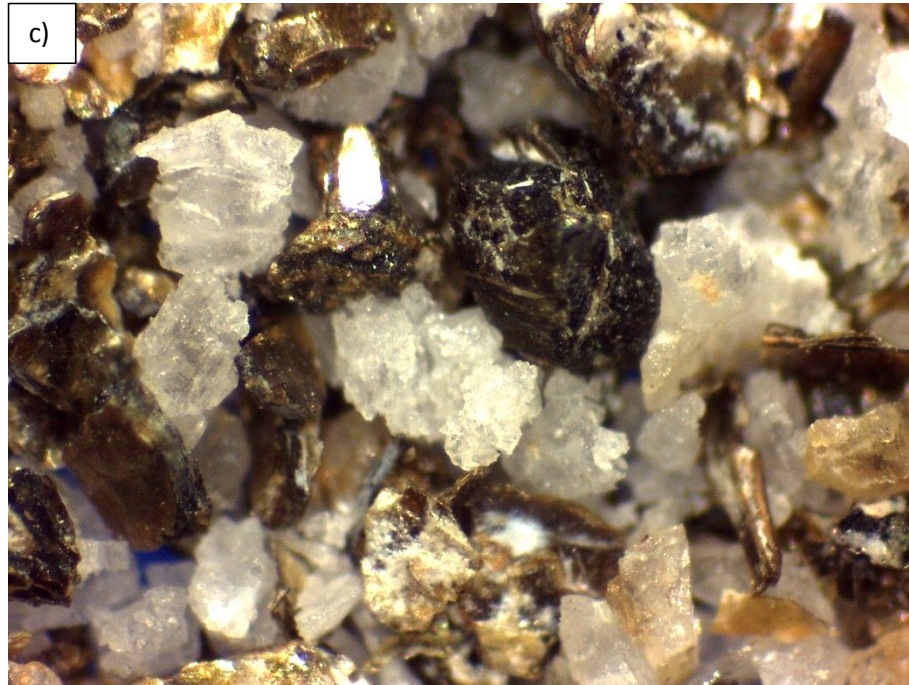
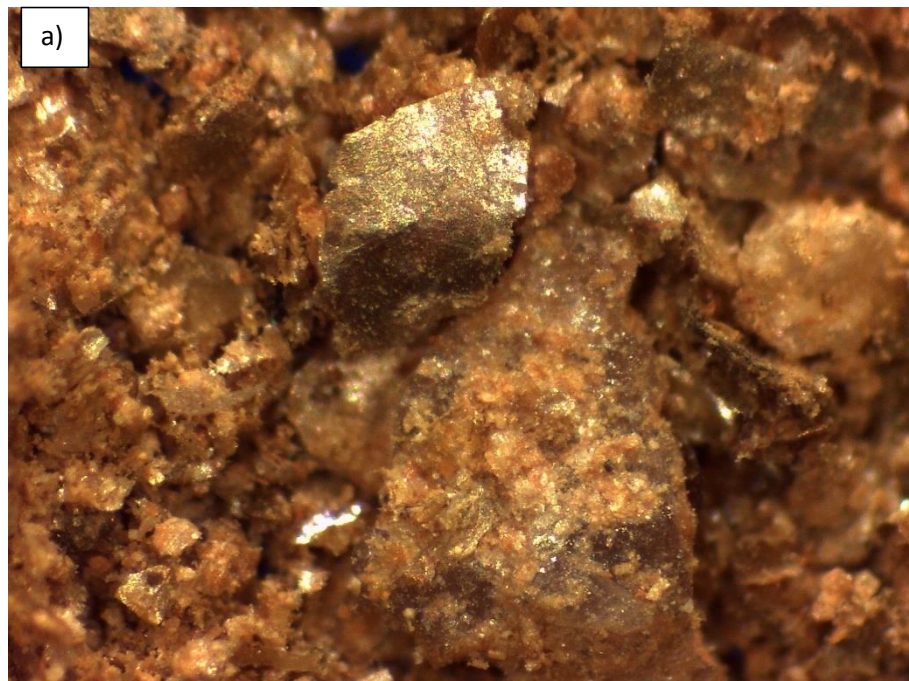


Figura 5.25 a) Es la muestra B.4 original, b) y c) corresponde a la muestra B.4 lavada por malla N° 200 (0,075 mm) y secada en horno a 60° C. Ancho de imagen 3mm

La Figura 5.26 a) de la muestra B.7 presenta un alto grado de meteorización, es decir el feldespato esta completamente desintegrado. En las Figuras 5.26 b) y c) el oxido de hierro presente es producto de la meteorización de la biotita, predominando el color dorado y rojizo en la muestra.



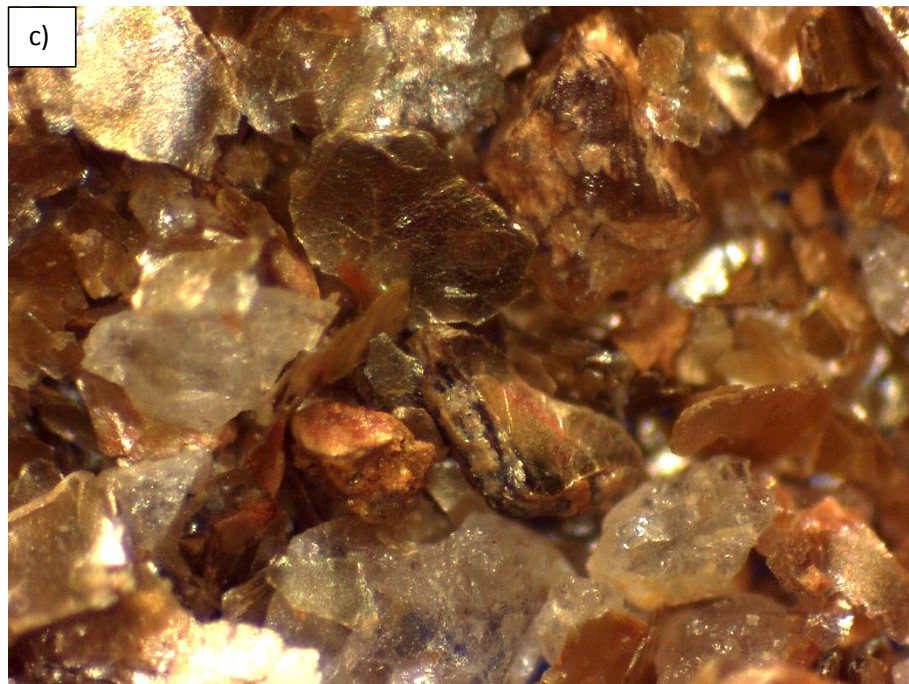
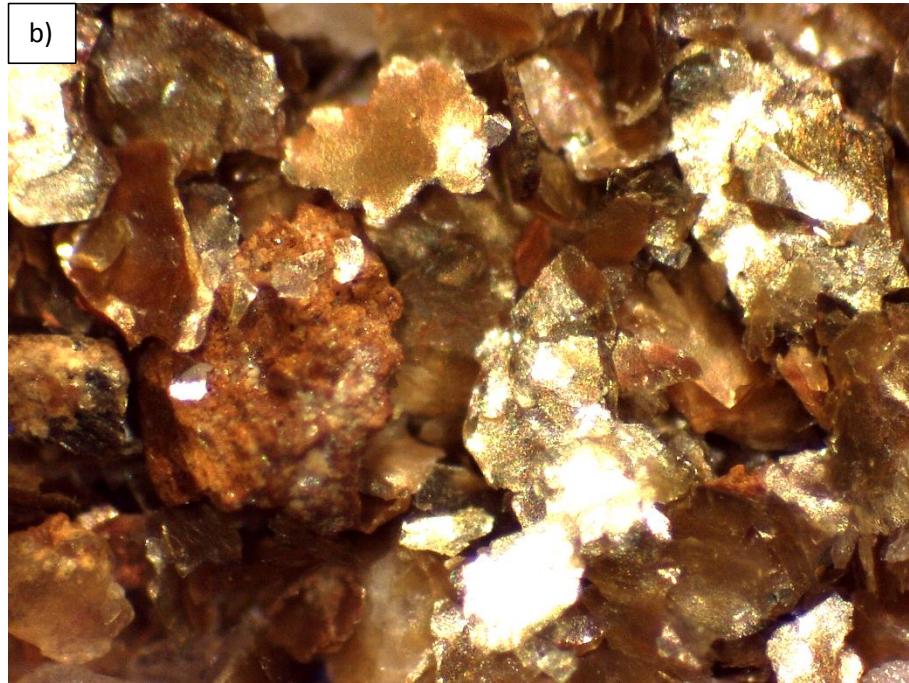
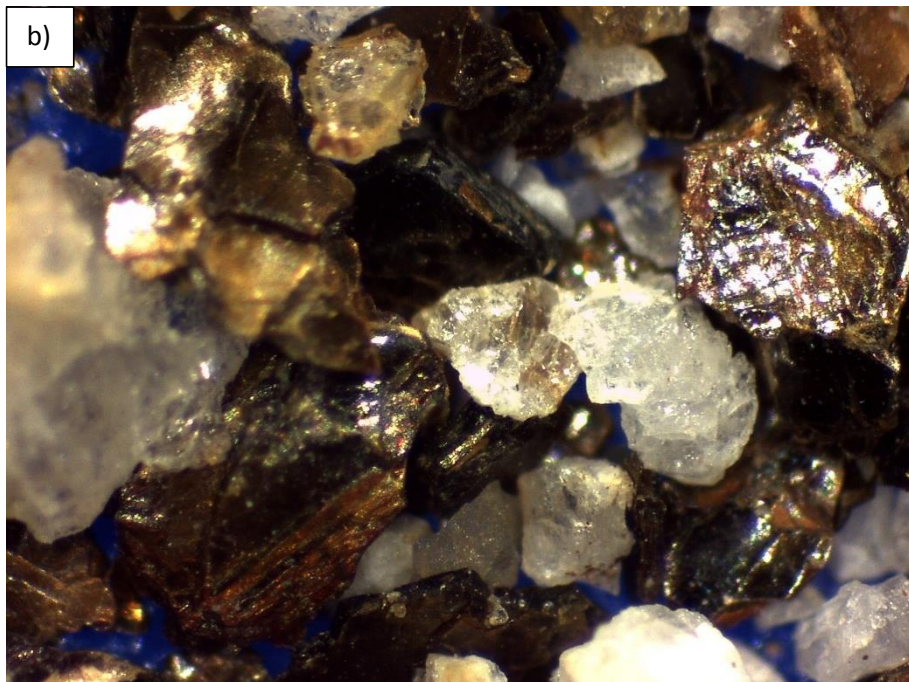
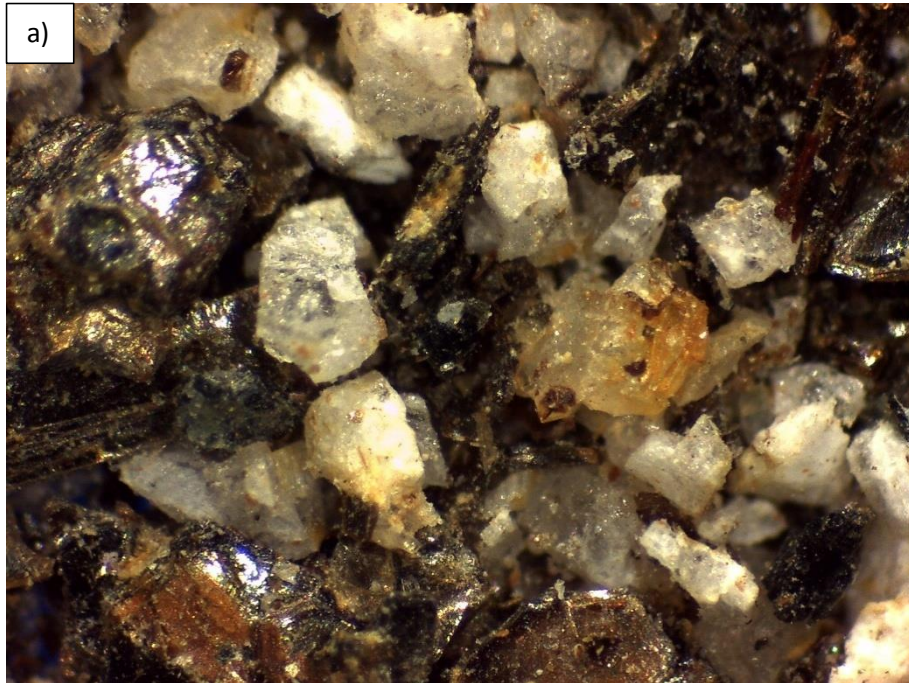


Figura 5.26 a) Es la muestra B.7 original, b) y c) corresponde a la muestra B.7 lavada por malla N° 200 (0,075 mm) y secada en horno a 60° C. Ancho de imagen 3mm

La Figura 5.27 a) la muestra B.12 al igual que la B.4. No presentan casi meteorización del feldespato es una roca mas fresca. En las Figuras 5.27 b) y c) se observa la biotita con un color oscuro, se observa bastante cuarzo, leve presencia de óxido de hierro y feldespato en color blanco.



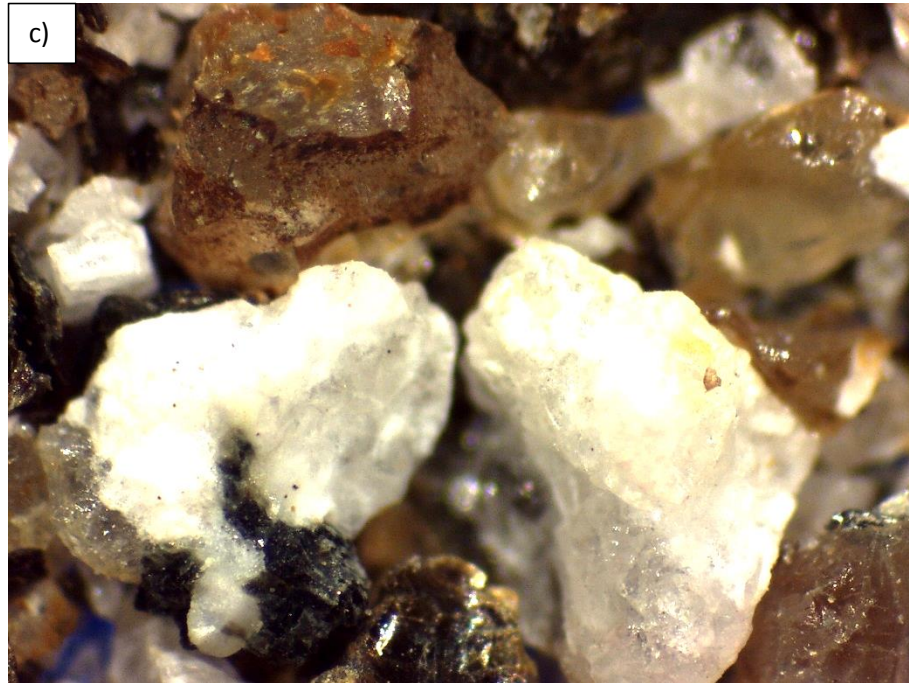
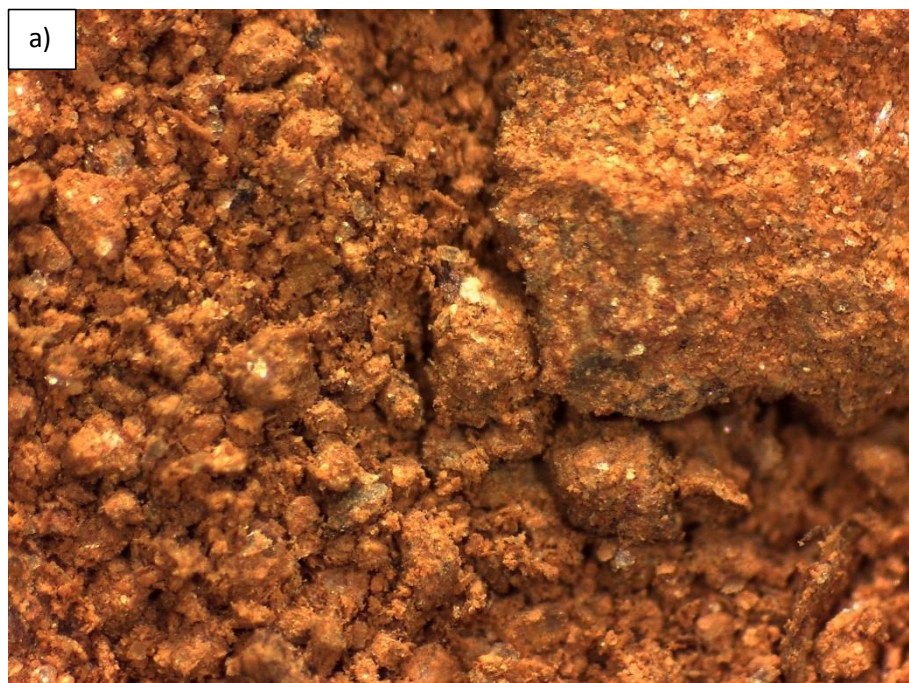


Figura 5.27 a) Es la muestra B.12 original, b) y c) corresponde a la muestra B.12 lavada por malla N° 200 (0,075 mm) y secada en horno a 60° C. Ancho de imagen 3mm

La figura 5.28 a) la muestra B.14 se observa con un alto grado de meteorización, la biotita perdió el color dorado por estar completamente alterada la muestra tiende a un color rojizo. En las figuras 5.28 b) y c) se observa claramente la abundancia de óxido de hierro.



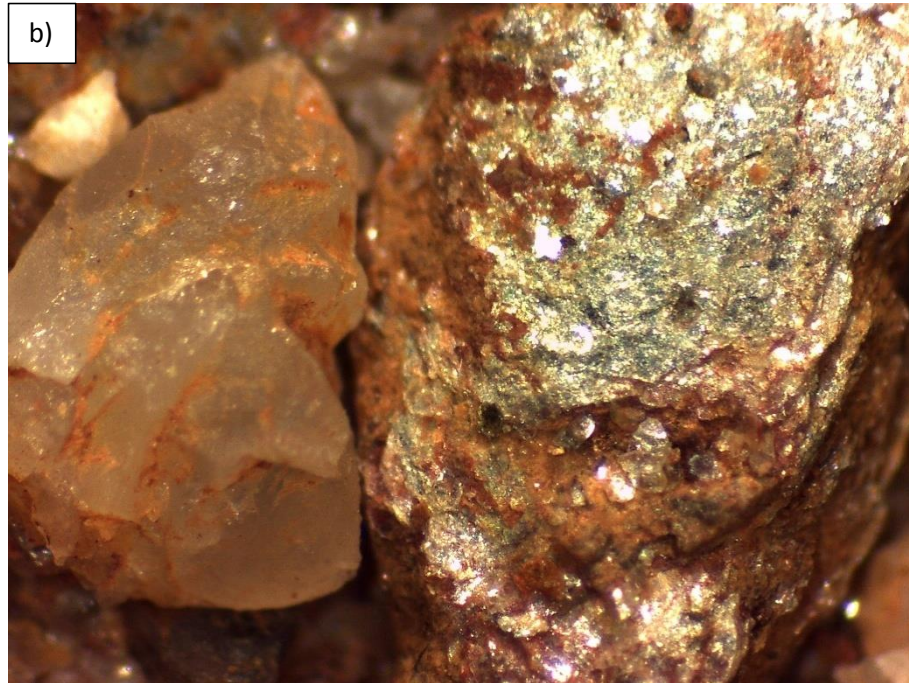
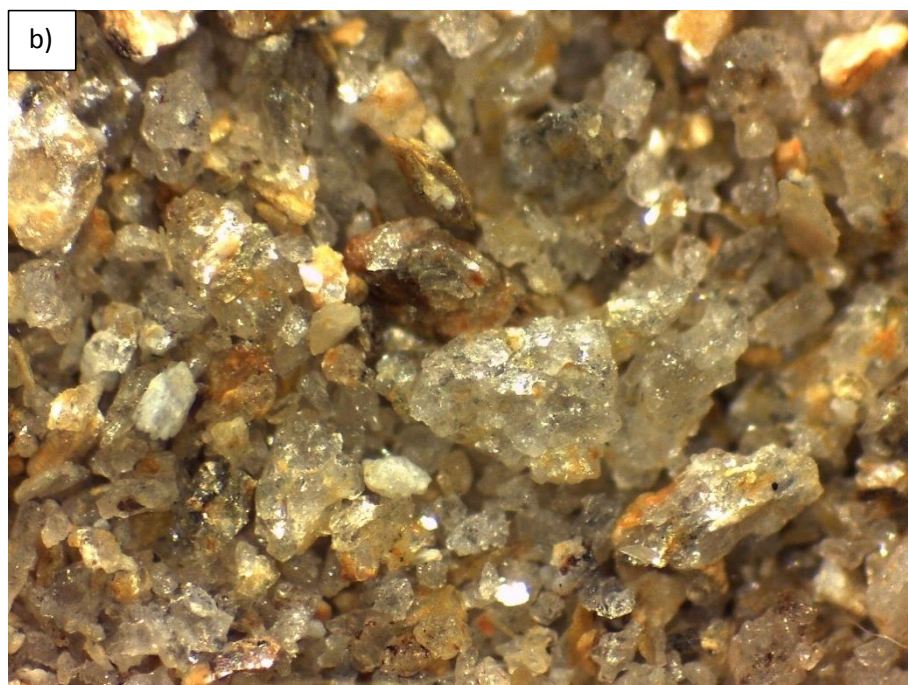
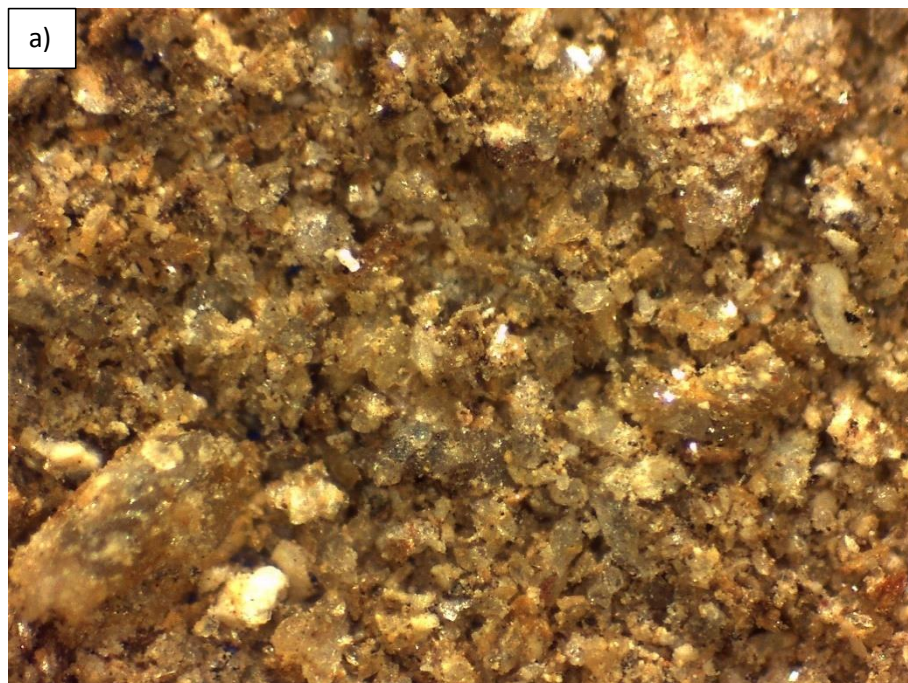


Figura 5.28 a) Es la muestra B.14 original, b) y c) corresponde a la muestra B.14 lavada por malla N° 200 (0,075 mm) y secada en horno a 60° C. Ancho de imagen 3mm

La Figura 5.29 a) la muestra B.15 no presenta casi meteorización. La Figura 5.29 b) y c) se observa muy poca abundancia de biotita, pero si existe bastante cuarzo y plagioclasa en menor tamaño de particula.



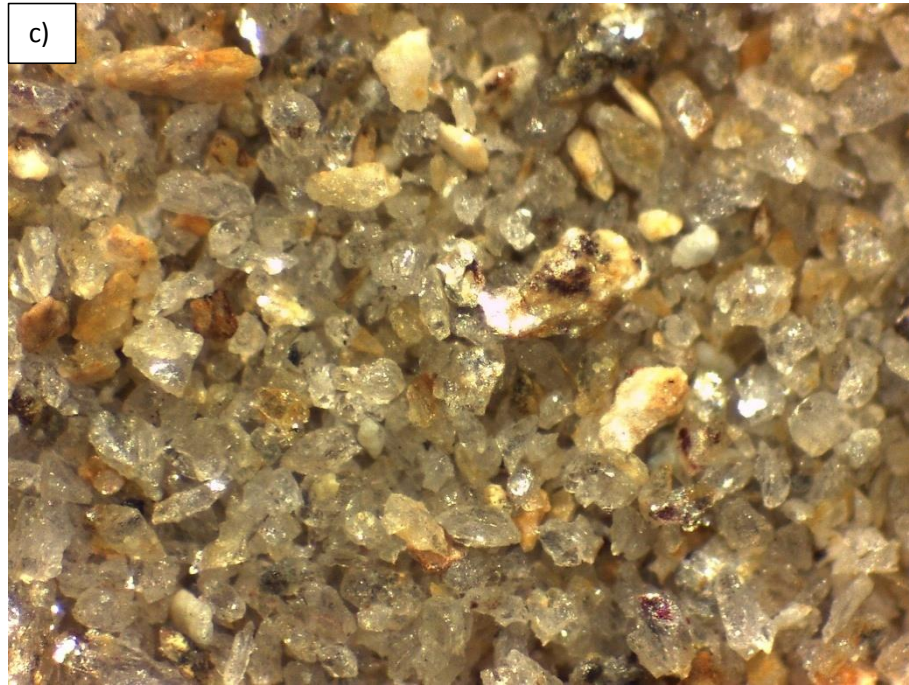


Figura 5.29 a) Es la muestra B.15 original, b) y c) corresponde a la muestra B.15 lavada por malla N° 200 (0,075 mm) y secada en horno a 60° C. Ancho de imagen 3mm

Capítulo 6 Conclusiones

La investigación realizada en este trabajo sobre el Maicillo de la Cordillera de Nahuelbuta, confirma lo que autores como Wesley (2011) han estudiado sobre suelos residuales y ha reconocido a través de sus publicaciones, referente a lo inadecuado de usar criterios desarrollados para suelos sedimentarios en la determinación de las propiedades de este tipo de suelo, como por ejemplo en el análisis de estabilidad de taludes. Estos procedimientos y metodologías convencionales no pueden ser aplicados directamente a este tipo de suelos debido a que la configuración de perfiles estratigráficos en suelos sedimentarios difiere totalmente para los suelos residuales, puesto que la variación de propiedades es secuencial desde la roca madre hasta la formación del suelo.

En estos tipos de suelos es necesario realizar una observación al área de estudio intentando descubrir todas las características y rasgos del suelo residual en sus distintos niveles con énfasis en las fallas ocurridas en estos materiales, las que pueden presentarse en diversas formas, desde desprendimientos hasta deslizamientos globales.

Aunque se trata de un material descompuesto in-situ y sin mayor transporte, el manto es fácilmente disgregable y recuerda a una arena con matriz arcillosa de origen reciente. El manto es muy disgregable y susceptible a la erosión de las aguas, en algunas partes se va eliminando muy rápidamente el manto meteorizado, lo cual indica que este manto es un material muy poco resistente y fácilmente deslizado por movimientos con poca energía.

Cuando las rocas intrusivas sufren una serie de alteraciones tanto físicas como químicas, modifican sustancialmente las características petrográficas iniciales de la roca y degradan progresivamente sus propiedades mecánicas, y pensando en la importancia de la alteración química se estudió la mineralogía de cada una de las muestras distribuidas en 7 fondos distintos, no existiendo variación mineralógica entre ellas, todas poseen la misma presencia de minerales como; vermicullitas, caolines y micas, destacando de cada una lo siguiente; se debe tener cuidado con la presencia de micas porque estas actúan como zonas de debilidad, en cambio los caolines son el grupo más estables de los minerales y las vermicullitas como no sufrieron expansión con el etilenglicol no se consideran arcillas expansivas. Como el análisis fue hecho a la fracción de arcilla bajo las 2 μm se recomienda realizar

una mineralogía a la roca total para saber efectivamente los porcentajes de minerales existentes en las muestras, sin embargo Wesley (2009), indica que si los suelos son saprolitos de origen ígneo, la mineralogía no tiene influencia en la propiedades mecánicas de los suelos, sino que su comportamiento está dominado por las discontinuidades, sin embargo no deja de ser importante saber la composición mineralógica de los suelos según su formación geológica.

Se analiza los resultados obtenidos con el fin de obtener la caracterización geomecánica del maicillo. Se puede destacar que los parámetros resistentes del suelo, como el ángulo de fricción residual a través del ensayo de corte directo, difiere en promedio 3.2° con los resultados del ángulo de reposo, esto quiere decir que, en vez de realizar ensayos de corte directo los cuales requieren aproximadamente 48 horas por probeta y necesitando por lo menos 3 probetas, es recomendable realizar ensayos de ángulo de reposo, que solo requiere de 2 horas desde el inicio al termino del ensayo.

No es adecuado realizar ensayos de densidades máximas y mínimas al maicillo, más bien es adecuado realizar proctor modificado ya que según su granulometría, el porcentaje que pasa por el tamiz N° 200 (ASTM) indica más de un 15% de material fino en esta investigación.

Nuevas líneas de investigación y recomendaciones

- La caracterización de un suelo residual debido a su heterogeneidad, requiere de un análisis integral que tenga en cuenta todos los factores que afectan su comportamiento, el cual incluye el grado y el proceso de meteorización, su mineralogía, microestructura, discontinuidades, estado de esfuerzos, propiedades mecánicas, clasificación y caracterización del perfil.
- Se recomienda realizar un análisis químico de muestras para obtener el índice de meteorización, puesto que el estado de erosión de la roca mediante procesos químicos como físicos, pueden reflejar cambios en las propiedades índice, densidades seca, relación de vacíos, contenidos de arcillas y velocidades de ondas de corte, por lo tanto sería apropiado para este tipo de estudio como como es el maicillo correlacionar estos índices con sus propiedades mecánicas, ya que la mineralogía no tiene una fuerte influencia en sus propiedades mecánicas como suelo de origen granítico.

- Es importante tener en cuenta que al llevar a cabo un proyecto de ingeniería será necesario averiguar si en la zona han ocurrido deslizamientos o fallas anteriores, ya que el proceso de meteorización es un proceso dinámico, en el cual el factor del tiempo, junto a las condiciones ambientales, no pueden perderse de vista. Definir ensayos que permitan obtener un perfil estratigráfico donde se permita diferenciar lo que es suelo meteorizado de la roca madre y una vez caracterizado este material identificar horizontes del suelo más susceptibles a colapsar.
- Se debe tener en cuenta que al extraer muestras inalteradas, considerar los planos de debilidad de la roca madre y tener extremo cuidado sobre todo en los ensayos para obtener parámetros resistentes y en casos de suelos completamente meteorizados considerar la matriz completa como suelo representativo puesto que ya no hay planos de debilidad heredados.

Referencias

ASTM D2487-06 “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).

ASTM D 3080 – 03 “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”.

BS 1377-1990 parte 2 “Classification tests”

BS 1377-1990 parte 7 y 8 “Shear strength test”

Beghona, A., Sequeira Braga, M.A., 1989. Weathering of the Oporto granite: geotechnical and physical properties. *Catena* 49, 57-76.

Brand, E. W. (1985). Predicting the performance of residual soil slopes. In *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. 5, pp. 2541-2578).

Cabrera, T. (2007). Características Geotécnicas de los suelos residuales del batolito de la costa de la cordillera de la Costa. Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

Cartografía Interactiva de los climas de Chile [en línea]. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. <www.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva> [Junio 2015].

De Vallejo, L. G. (2002). *Ingeniería geológica*. Prentice Hall

Duzgoren-Aydin, N. S., Aydin, A., & Malpas, J. (2002). Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology*, 63(1), 99-119.

Escobar, P (2013). Inventario de remociones en masa desencadenadas por el sismo del 27 de Febrero de 2010 en Chile central. Memoria para optar al título de Geóloga. Universidad de Chile.

Garreaud, R. D., Montecinos, A., Falvey, M., & Muñoz, C. Modificación de la precipitación frontal por efectos de la cordillera de Nahuelbuta: Resultados preliminares del proyecto AFEX.

Hansbo, S. (1957). A new approach to the determination of the shear strength of clay by fall cone test, Proc. No. 14. Stockholm:Royal Swedish Geotechnical Society.

Hürlimann M, Ledesma A, Martí J (2000). Characterisation of a volcanic residual soil and its implications for large landslide phenomena: application to Tenerife, Canary Islands. *Engineering Geology* 59: 115-132.

Ibarra, M., Mancilla, G., & Peralta, M. (1996). Evaluación de la erosión hídrica bajo tres tipos de cubierta arbórea en la Cordillera de Nahuelbuta. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile. 14p.

Irfan, T.Y. (1996). Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong. *Quarterly Journal Engineering Geology* 29: 5-35.

Kahle, M., Kleber, M., & Jahn, R. (2002). Review of XRD-based quantitative analyses of clay minerals in soils: the suitability of mineral intensity factors. *Geoderma*, 109(3), 191-205.

Koumoto, T. & Houlsby, G. T. (2001). Theory and practice of the fall cone test. *Géotechnique*, vol. 51, N°8, pp. 701-712.

Le Pera, E., Critelli, S., & Sorriso-Valvo, M. (2001). Weathering of gneiss in Calabria, southern Italy. *Catena*, 42(1), 1-15.

Manual Analysette 22. Fritsch, análisis tamaño de la partícula. (2008).

NCh 1517 of 79 Mecánica de Suelos- Límites de Consistencia- Parte 1 “Determinación del Límite Líquido”.

NCh 1517 of 79 Mecánica de Suelos- Límites de Consistencia- Parte 1 “Determinación del Límite Plástico” .

NCh 1532 of 80 Mecánica de Suelos- Límites de Consistencia- Parte 1 “Determinación de Densidad de Partículas Sólidas”.

NCh 1534 of 79 Mecánica de Suelos- Relaciones Humedad/Densidad - Parte 2 “Determinación de Compactación con Pisón de 4.5 [Kg] y 460 [mm] de caída”.

NCh 1726 of. 80: Mecánica de Suelos – “Determinación de las densidades máxima y mínimas y cálculo de la densidad relativa en suelos no cohesivos”.

Parry, S., & Franks, C. A. M. (2000). The mineralogy of clay-rich zones within some weathered volcanic and granitic rocks in Hong Kong. In Proc. 8th International Symposium on Landslides, Cardiff (pp. 1183-1188).

Sepúlveda, C. D. V. R. (2002). Determinación de parámetros CIU en muestras inalteradas de maicillos graníticos residuales de Concepción (Doctoral dissertation, Universidad de Concepción).

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).2003. Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Publicación Geológica digital No4, 2003. Base Geológica escala1:1.000.000.

Sivakumar, V., Glynn D., Cairns, P. and A. Black (2009). A new method of measuring plastic limit of fine materials. Géotechnique 59, N° 10, 813-823.

Solaque D, Lizcano A (2008). Angulo de fricción crítico y ángulo de reposo de la arena del Guamo. Revista Épsilon 11, 7-20.

Suarez, J. (2002). Manual de ingeniería para el control de erosión. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Tarbuck, E. J. L. (2005). Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología Física

Tazaki, K., Fyfe, W.S., 1987. Primitive clay precursors formed on feldspar. Can. J. Earth Sci. 24, 506–527.

Toro, K. (2007). Influencia de las características geológicas en las propiedades geotécnicas de granitoides jurásicos y suelos asociados en la Ruta 68. Memoria de título para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile.

Villalobos, S (2011) Análisis y diseño de una excavación apornada en un suelo residual de Concepción. Memoria para optar al título de Ingeniero civil. Universidad Católica de la Sma Concepción.

Villalobos, F (2014). Mecánica de suelos, Editorial Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Wesley, L., & Irfan, T. (1997). Classification of residual soils in mechanics of residual soils. (G. E. Blight, Ed.) Balkema, The Netherlands: Rotterdam.

Wesley, L. (2009). Geotechnical Engineering in Residual Soils. New Jersey: John Wiley & Sons.

Wesley, L (2011). Stability of slopes in residual soils. Obras y proyectos 10, 47-61.

Anexo A Tablas condiciones iniciales y finales ensayo Corte Directo

Se presentan las tablas de condiciones iniciales y finales de las probetas de cada muestra

Muestra B.1, Fundo Trongol

Tabla A.1 Condiciones iniciales y finales de las probetas, Muestra B.1

Condiciones iniciales	A	B	C	
Altura de la probeta*	27	28	27	mm
Contenido de humedad	22,68	22,39	21,01	%
Peso unitario húmedo	1,45	1,40	1,49	g/cm ³
Peso unitario seco	1,19	1,14	1,23	g/cm ³
Índice de vacíos	1,178	1,266	1,092	-

*La superficie de falla se ubica a los 12mm de altura

Condiciones del ensayo	A	B	C	
Velocidad de corte	0,1	0,1	0,1	mm/min
Esfuerzo normal	25	50	100	kPa
Esfuerzo de corte máximo	30,60	43,71	85,24	kPa
Asentamiento por corte	-0,33	-0,89	-1,80	mm

Condiciones finales	A	B	C	
Contenido de humedad	19,51	19,28	17,13	%
Peso unitario húmedo	1,47	1,41	1,52	g/cm ³
Peso unitario seco	1,23	1,18	1,30	g/cm ³
Índice de vacíos	1,096	1,186	0,992	-

Muestra B.3, Fundo Caballo de Palo

Tabla A.2 Condiciones iniciales y finales de las probetas, Muestra B.3

Condiciones iniciales	A	B	C	
Altura de la probeta*	27	26	26	mm
Contenido de humedad	25,30	24,96	25,44	%
Peso unitario húmedo	1,48	1,45	1,52	g/cm ³
Peso unitario seco	1,18	1,16	1,21	g/cm ³
Índice de vacíos	1,228	1,276	1,177	-

*La superficie de falla se ubica a los 12mm de altura

Condiciones del ensayo	A	B	C	
Velocidad de corte	0,1	0,1	0,1	mm/min
Esfuerzo normal	25	50	100	kPa
Esfuerzo de corte máximo	29,00	46,77	72,13	kPa
Asentamiento por corte	-0,27	-1,03	-1,21	mm

Condiciones finales	A	B	C	
Contenido de humedad	22,67	21,50	21,34	%
Peso unitario húmedo	1,50	1,47	1,55	g/cm ³
Peso unitario seco	1,22	1,21	1,28	g/cm ³
Índice de vacíos	1,159	1,185	1,069	-

Muestra B.4, Fundo El encanto

Tabla A.3 Condiciones iniciales y finales de las probetas, Muestra B.4

Condiciones iniciales	A	B	C	
Altura de la probeta*	27	27	27	mm
Contenido de humedad	24,80	23,16	20,36	%
Peso unitario húmedo	1,40	1,46	1,34	g/cm ³
Peso unitario seco	1,12	1,19	1,11	g/cm ³
Índice de vacíos	1,360	1,231	1,386	-

*La superficie de falla se ubica a los 12mm de altura

Condiciones del ensayo	A	B	C	
Velocidad de corte	0,1	0,1	0,1	mm/min
Esfuerzo normal	25	50	100	kPa
Esfuerzo de corte máximo	36,28	50,05	93,91	kPa
Asentamiento por corte	-0,47	-1,42	-1,49	mm

Condiciones finales	A	B	C	
Contenido de humedad	23,21	21,32	18,64	%
Peso unitario húmedo	1,41	1,47	1,34	g/cm ³
Peso unitario seco	1,14	1,21	1,13	g/cm ³
Índice de vacíos	1,317	1,182	1,340	-

Muestra B.7, Parcela 11 Mantenrehue

Tabla A.4 Condiciones iniciales y finales de las probetas, Muestra B.7

Condiciones iniciales	A	B	C	
Altura de la probeta*	26	27	27	mm
Contenido de humedad	21,90	20,95	21,06	%
Peso unitario húmedo	1,62	1,52	1,49	g/cm ³
Peso unitario seco	1,33	1,26	1,23	g/cm ³
Índice de vacíos	0,993	1,101	1,147	-

*La superficie de falla se ubica a los 12mm de altura

Condiciones del ensayo	A	B	C	
Velocidad de corte	0,1	0,1	0,1	mm/min
Esfuerzo normal	25	50	100	kPa
Esfuerzo de corte máximo	21,93	38,69	69,72	kPa
Asentamiento por corte	-0,39	-1,12	-1,13	mm

Condiciones finales	A	B	C	
Contenido de humedad	18,77	17,86	16,74	%
Peso unitario húmedo	1,65	1,55	1,52	g/cm ³
Peso unitario seco	1,39	1,31	1,30	g/cm ³
Índice de vacíos	0,910	1,020	1,032	-

Muestra B.12, Parcelas Cabrera

Tabla A.5 Condiciones iniciales y finales de las probetas, Muestra B.12

Condiciones iniciales	A	B	C	
Altura de la probeta*	35	33	35	mm
Contenido de humedad	8,50	12,22	13,94	%
Peso unitario húmedo	1,66	1,61	1,72	g/cm ³
Peso unitario seco	1,53	1,44	1,51	g/cm ³
Índice de vacíos	0,75	0,87	0,79	0,80

*La superficie de falla se ubica a los 12mm de altura

Condiciones del ensayo	A	B	C	
Velocidad de corte	0,1	0,1	0,1	mm/min
Esfuerzo normal	25	50	75	kPa
Esfuerzo de corte máximo	39,12	51,07	87,94	kPa
Asentamiento por corte	-1,88	0,59	-0,27	mm

Condiciones finales	A	B	C	
Contenido de humedad	9,57	4,53	10,24	%
Peso unitario húmedo	1,65	1,69	1,76	g/cm ³
Peso unitario seco	1,51	1,61	1,59	g/cm ³
Índice de vacíos	0,78	0,67	0,69	-

Muestra B.14, Fundo Carilebu y otros

Tabla A.6 Condiciones iniciales y finales de las probetas, Muestra B.14

Condiciones iniciales	A	B	C	
Altura de la probeta*	32	26	27	Mm
Contenido de humedad	28,64	29,37	29,14	%
Peso unitario húmedo	1,83	1,57	1,47	g/cm ³
Peso unitario seco	1,42	1,21	1,14	g/cm ³
Índice de vacíos	0,916	1,239	1,392	-

*La superficie de falla se ubica a los 12mm de altura

Condiciones del ensayo	A	B	C	
Velocidad de corte	0,1	0,1	0,1	mm/min
Esfuerzo normal	25	50	100	kPa
Esfuerzo de corte máximo	30,67	43,42	76,06	kPa
Asentamiento por corte	-0,39	0,00	-1,90	Mm

Condiciones finales	A	B	C	
Contenido de humedad	27,79	20,43	22,22	%
Peso unitario húmedo	1,84	1,64	1,51	g/cm ³
Peso unitario seco	1,44	1,36	1,23	g/cm ³
Índice de vacíos	0,893	0,996	1,204	-

Muestra B.15, Fundo Alto Molul y otros

Tabla A.7 Condiciones iniciales y finales de las probetas, Muestra B.15

Condiciones iniciales	A	B	C	
Altura de la probeta*	27	27	27	mm
Contenido de humedad	17,99	18,92	15,84	%
Peso unitario húmedo	1,47	1,48	1,59	g/cm ³
Peso unitario seco	1,25	1,24	1,37	g/cm ³
Índice de vacíos	1,106	1,115	0,916	-

*La superficie de falla se ubica a los 12mm de altura

Condiciones del ensayo	A	B	C	
Velocidad de corte	0,1	0,1	0,1	mm/min
Esfuerzo normal	25	50	100	kPa
Esfuerzo de corte máximo	29,43	51,07	103,38	kPa
Asentamiento por corte	-0,34	-1,67	-0,84	mm

Condiciones finales	A	B	C	
Contenido de humedad	15,80	19,97	13,54	%
Peso unitario húmedo	1,49	1,47	1,61	g/cm ³
Peso unitario seco	1,28	1,23	1,42	g/cm ³
Índice de vacíos	1,048	1,142	0,855	-

Anexo B Imágenes de muestras en alta resolución

Con el fin de no perder la nitidez de las partículas de suelo que se alejan del foco se opta por tomar fotografías con una cámara de alta resolución, incorporando luz adicional necesaria para iluminar la muestra sin generar sombras en las partículas de suelo, esto se logra fabricando un anillo con luces led blancas conectadas en paralelo, luego se monta la cámara como se muestra en la figura b.1, con la ayuda del software Helicon Focus 6.3.8 se logran imágenes completamente enfocadas y con gran profundidad de campo a partir de varias imágenes que estén parcialmente enfocadas. Esto ayuda cuando se realizan fotos en macro, donde la profundidad de campo es mínima y así lograr los resultados esperados. El programa requiere tener varias fotografías iguales pero con variaciones mínimas de enfoque y crea una con la suma de todas en la que la profundidad de campo aumenta, se tomaron en promedio 40 fotos por muestra para lograr el resultado deseado.



La figura b.1 muestra el montaje de la cámara y luz para toma de fotografías a las muestras

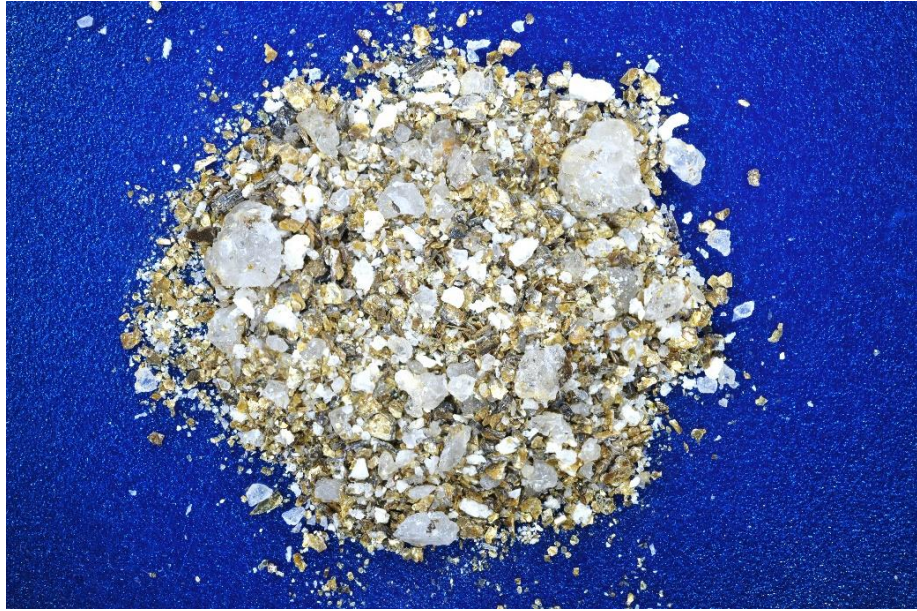


Figura b.2. Muestra FundoTrongol (B.1). Ancho de imagen 10 mm



Figura b.3. Muestra Fundo Caballo de palo (B.3).Ancho de imagen 10 mm



Figura b.4. Muestra Fundo el Encanto (B.4). Ancho de imagen 10 mm



Figura b.5. Muestra Parcelas 11 Maintenrehue(B.7). Ancho de imagen 10 mm



Figura b.6. Muestra parcelas Cabrera(B.12). Ancho de imagen 10 mm



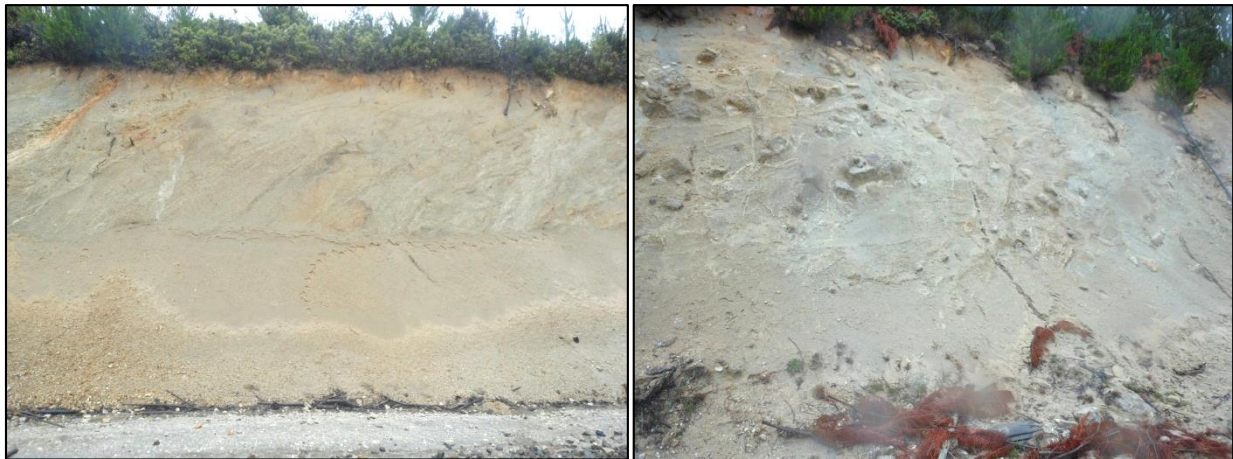
Figura b.7. Muestra Fundo Carilebu y otros (B.14). Ancho de imagen 10 mm



Figura b.8. Muestra Fundo Alto molul y otros (B.15). Ancho de imagen 10 mm

Anexo C Registro Fotográfico recorrido en terreno 2014

Fundo Trongol





Fundo Caballo de Palo



Fundo El Encanto

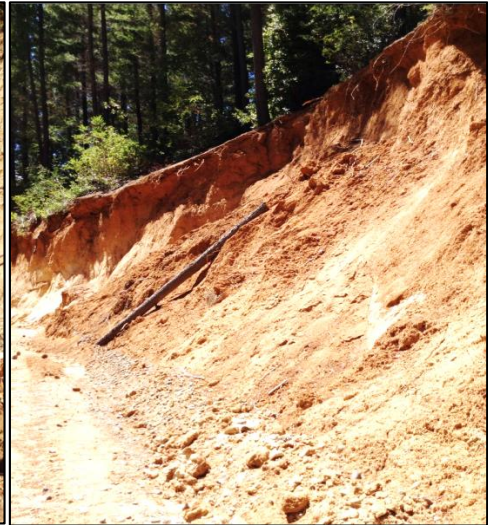






Parcela 11 Maintenrehue





Fundo Santa María



Parcelas Cabrera











Fundo Carilebu y otros

s



Fundo Alto Molul y otros

