

Evaluación del Potencial Natural de Fertilización de Rocas Pertenecientes al Macizo de Santander: Sienogranito perteneciente al Granito de Pescadero, Monzogranito de la Cuarzo Monzonita La Corcova, Neis Biotítico-Silimanítico del Neis de Bucaramanga y Esquisto Moscovítico de la Formación Silgará.

Camilo Hernández Niño

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director

Carlos Alberto Ríos Reyes

PhD en Filosofía

Codirector

Nelson Facundo Rodríguez López

PhD en Suelos y Nutrición de Plantas

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2018

*A tu madre y a tu padre. No dudes en culparlos
a ellos de todo lo malo que hay en ti, pero no olvides
reconocer su mérito por todo lo bueno.*

(Neil Strauss, The Method)

Agradecimientos

Al Laboratorio del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA) de la Universidad Industrial de Santander en el Parque Tecnológico Guatiguará.

A Carlos Alberto Chacón y al Laboratorio de Microscopía del Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander. por su colaboración en la adquisición de datos del SEM.

A la docente Sandra Milena Pinto Bohórquez de la Escuela de Química y el Laboratorio Instrumental de Análisis Químico de la Escuela de Química, Facultad de Ciencias de la Universidad Industrial de Santander por la colaboración en la adquisición de datos (TRXF).

Al Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil, Facultad Físico Mecánicas de La Universidad Industrial de Santander por la colaboración con la pulverización de las roca.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	19
1.1 <i>Objetivo General</i>	19
1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	19
3. Marco Teórico.....	21
3.1 <i>Macronutrientes y micronutrientes</i>	21
3.2 <i>Análisis de suelos</i>	22
3.1.1 Disponibilidad de nutrientes.	23
3.1.2 Capacidad de intercambio catiónico.	24
3.1.3. Potencial de hidrógeno pH.....	25
3.1.4 Materia orgánica.	25
3.1.5 Textura.	26
4. Metodología	27
4.1 <i>Obtención de muestras</i>	27
4.1.1 Localización.	27
4.1.2 Pulverización.	27
4.1.3 Usos.....	28

4.2 <i>Análisis Petrográfico</i>	30
4.2.1 Preparación de las muestras.	30
4.2.2 Equipo usado.	30
4.2.3 Material bibliográfico usado.	30
4.2.4 Cálculo de la moda mineral.	30
4.3 <i>Microscopía electrónica de barrido (SEM)</i>	31
4.3.1 Equipo usado.	31
4.3.2 Toma de datos.	31
4.3.3 Interpretación de datos.	31
4.4 <i>Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X por reflexión total (TXRF)</i>	32
4.4.1 Equipo usado.	32
4.4.2 Rango de detección.	32
4.4.3 Muestras usadas.	32
4.4.4 Presentación de resultados.	32
4.5 <i>Análisis de suelos</i>	33
4.5.1 Instalaciones.	33
4.5.2 Métodos usados.	33
5. Resultados	34
5.1 <i>Análisis petrográfico</i>	34
5.1.1 Sienogranito.	34
5.1.2 Monzogranito.	36
5.1.3 Neis Biotítico-Silimanítico.	40
5.1.4 Esquisto Moscovítico.	45
5.2 <i>Microscopía electrónica de barrido (SEM)</i>	47

5.2.1 Sienogranito	47
5.2.2 Monzogranito.....	48
5.2.3 Neis Biotítico-Silimanítico.	48
5.2.4 Esquisto Moscovítico.....	49
<i>5.3 Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X por reflexión total (TXRF)</i>	<i>49</i>
5.3.1 Sienogranito.	49
5.3.2 Monzogranito.....	49
5.3.3 Neis Biotítico-Silimanítico.	49
5.3.3 Esquisto Moscovítico.....	49
<i>5.4 Análisis de suelos</i>	<i>50</i>
7. Conclusiones	56
8. Recomendaciones	57
Referencias Bibliográficas	58
Apéndices.....	64

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Clasificación de los Nutrientes Minerales de las Plantas</i>	21
Tabla 2. <i>Niveles de Disponibilidad de Nutrientes en un Análisis de Suelos</i>	23
Tabla 3. <i>Niveles de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)</i>	24
Tabla 4. <i>Niveles de CIC para las Arcillas</i>	25
Tabla 5. <i>Rangos de Niveles de pH</i>	26
Tabla 6. <i>Localización de Afloramientos para Obtención de Muestras</i>	27
Tabla 7. <i>Métodos Usados para el Análisis de Suelos</i>	33
Tabla 8. <i>Composición Modal del Sienogranito</i>	34
Tabla 9. <i>Composición Modal del Monzogranito</i>	36
Tabla 10. <i>Composición Modal del Mesosoma del Neis Biotítico-Silimanítico</i>	40
Tabla 11. <i>Composición Modal del Leucosoma del Neis Biotítico-Silimanítico</i>	44
Tabla 12. <i>Composición Modal del Esquisto Moscovítico</i>	45
Tabla 13. <i>Disponibilidad de Macronutrientes, Micronutrientes y Propiedades Físico Químicas de cada Roca</i>	50
Tabla 14. <i>Texturas de Rocas Pulverizadas</i>	51
Tabla 15. <i>Elementos con Potencial Nutritivo en cada Roca</i>	51
Tabla 16. <i>Evaluación de Potencial Natural de Fertilización de las Rocas Objeto de Estudio</i>	57

Lista de Figuras

Figura 1. Georreferenciación de Muestras Usadas en el Presente Estudio.	29
Figura 2. Microfotografías de Minerales Primarios del Sienogranito.	35
Figura 3. Microfotografías de Minerales Secundarios y Accesorios del Sienogranito.	37
Figura 6. . Microfotografías de Minerales Primarios, Secundarios y Accesorios de la Cuarzomonzonita.	39
Figura 7. Microfotografías de Minerales Mayores, Menores y Accesorios del Neis Biotítico Silimanítico.	42
Figura 8. Microfotografías de Minerales Mayores, Menores y Accesorios del Esquisto Moscovítico.	46

Lista de Apéndices

Apéndice A. Fotografías de muestras usadas en el presente estudio.....	65
Apéndice B. Tablas de composición molecular en Wt% de las fases minerales de cada roca.....	66
Apéndice C. Espectros de dispersión hallados por TXRF.....	71

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL NATURAL DE FERTILIZACIÓN DE ROCAS PERTENECIENTES AL MACIZO DE SANTANDER: SIENOGRANITO PERTENECIENTE AL GRANITO DE PESCADERO, MONZOGRANITO DE LA CUARZOMONZONITA LA CORCOVA, NEIS BIOTÍTICO SILIMANÍTICO DEL NEIS DE BUCARAMANGA Y ESQUISTO MOSCOVÍTICO DE LA FORMACIÓN SILGARÁ.*

AUTOR: CAMILO HERNÁNDEZ NIÑO **

PALABRAS CLAVE: MINERALES, MACRONUTRIENTES, MICRONUTRIENTES, FERTILIZANTE.

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo se evalúa el potencial natural de fertilización que tienen distintas rocas aflorantes en el Macizo de Santander (Sienogranito perteneciente al Granito de Pescadero, Monzogranito de la Cuarzo Monzonita La Corcova, Neis Biotítico-Silimanítico del Neis de Bucaramanga y Esquisto Moscovítico de La Formación Silgará, pertenecientes al basamento cristalino del Macizo de Santander). La evaluación se hace con un énfasis geológico, en el sentido en que el punto de partida se dará con la determinación de un potencial a partir de la composición mineralógica de cada roca, entendiendo cómo la composición química, global de la roca y particular de cada mineral, explica tanto la presencia como la disponibilidad de macronutrientes y micronutrientes en cada roca objeto de estudio. La composición mineralógica de cada roca se caracterizará a través de un análisis petrográfico en sección delgada, analizando la composición química de las fases minerales principales usando la técnica de microscopía óptica de barrido (SEM), de igual forma se realiza un análisis semicuantitativo de la composición química global haciendo énfasis en elementos traza de cada roca usando la técnica de espectroscopia de fluorescencia de rayos X por reflexión total (TXRF). La disponibilidad de nutrientes, así como propiedades físico químicas de las rocas, se encuentra realizando un análisis de suelos a un kilogramo de muestra pulverizada de cada roca. Se encuentra que en todas las rocas del presente estudio existe un potencial natural de fertilización a corto, mediano y largo plazo, para distintos macronutrientes y micronutrientes, entre estos destaca la disponibilidad de fósforo.

ABSTRACT

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto Ríos Reyes

, PhD en Filosofía. Codirector: Nelson Facundo Rodríguez López, PhD en Suelos y Nutrición de Plantas.

TITLE: EVALUATION OF THE NATURAL FERTILIZING POTENTIAL OF ROCKS FROM SANTANDER MASSIF, COLOMBIA: SIENOGRANITE FROM GRANITO DE PESCADERO, MONZOGRANITE FROM CUARZOMONZONITA LA CORCOVA, BIOTITIC-SILIMANITIC GNEIS FROM NEIS DE BUCARAMANGA AND MUSCOVITE SCHIST FROM FORMACIÓN SILGARÁ*

AUTHOR: CAMILO HERNÁNDEZ NIÑO**

KEY WORDS: MINERALS, MACRONUTRIENTS, MICRONUTRIENTS, FERTILIZER

DESCRIPTION:

This work studies the natural fertilizing potential from different outcropping rocks in the Santander Massif (Sienogranite from Granito de Pescadero, Monzogranite from Cuarzo Monzonita La Corcova, Biotitic-Silimanitic Gneis from Neis de Bucaramanga and Muscovite Schist from Formación Silgara.). The evaluation is done with a geological emphasis, in the sense that the starting point will be given with the determination of a potential from the mineralogical composition of each rock, understanding how the chemical composition, for the general rock and particular of each mineral, explains both, the presence and availability of macronutrients and micronutrients in each rock under study. The mineralogical composition of each rock is carried out through a thin section petrographic analysis, analyzing the chemical composition of the main mineral phases using the scanning optical microscopy (SEM) technique, in the same way a semiquantitative analysis of the composition is carried out global chemistry emphasizing trace elements of each rock using the technique of total reflection X-ray fluorescence spectroscopy (TXRF). The availability of nutrients, as well as the physical and chemical properties of the rocks are found by performing a soil analysis at one kilogram of pulverized sample from each rock. It is found that in all the rocks samples from the present study there is a natural fertilizing potential in the short, medium and long term, for different macronutrients and micronutrients, among these there is a highlight about the availability of phosphorus from the rocks.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto Ríos Reyes

, PhD en Filosofía. Codirector: Nelson Facundo Rodríguez López, PhD en Suelos y Nutrición de Plantas.

Introducción

La idea de usar harina de roca en cultivos agrícolas posiblemente data desde hace cientos de años atrás, sin embargo se tienen registros científicos de hace más de cien años. Uno de los pioneros fue el químico alemán Julius Hensel quien en el siglo XIX ya había publicado varios textos científicos sobre los beneficios de usar diferentes clases de roca pulverizada como fertilizante natural, incluso ya existía un comercio de ellas. Uno de sus escritos rescatados y más generales es “Panes de Piedra” en donde explicaba como con el uso de la harina de roca se podían mejorar los contenidos nutricionales de los cultivos al menor costo y además revitalizar el tan gastado suelo, explicaba las contradicciones que enfrenaba la naciente industria del fertilizante químico y porque era factible la sustitución con el fertilizante natural (Restrepo, 2007).

En general se expuso que los fertilizantes químicos estaban regidos por una ley llamada la “Ley del Mínimo”, y esta ley estaba causando no solo el deterioro acelerado de los suelos si no también empobrecimiento en la calidad nutritiva de los cultivos, puesto que contemplaba que solo era necesario abonar químicamente los cultivos con el “NPK (Nitrógeno, fósforo y potasio)”, explicando que la mayor parte del nitrógeno era obtenido por las plantas por medio atmosférico y no a través del suelo, idea que se rebatirá más adelante, y que si bien el potasio y el fosforo eran necesarios para el desarrollo y crecimiento de las plantas también es necesario adicionarle calcio, magnesio y ácidos fosfóricos y sulfúricos en la combinación más favorable y que precisamente las rocas por su condición natural podrían en conjunto cumplir con dicha condición (Restrepo, 2007). Por más de cien años los escritos de Hensel fueron ocultados por

motivos económicos por empresas como la IG Farben , sin embargo a finales de los setentas salieron a la luz y desde entonces algunos científicos se han dado a la tarea de comprobar y seguir con su investigación (Restrepo, 2007).

(Bakken, Gautneb, & Myhr, 1996) utilizando rocas molidas tanto de desechos de minas como productos del mercado tales como carbonatitas, esquistos en fase epidota, sienita nefelínica y adularia experimentó con ellas aplicándolas en cultivos de ballica encontrando como resultado que la biotita procedente de las carbonatitas y el esquistos en fase epidota podía aportar en un ratio lento , pero destacable, una cantidad de potasio en los cultivos a manera de fertilizante natural más alta que la porción de potasio no intercambiable que por naturalidad tiene el suelo, sin embargo el potasio del feldespatos potásico presente en la sienita nefelínica y en la adularia era muy poco asimilable por las plantas.

(Pang, Li, & Peng, 2001) habla sobre la creciente aplicación de REE usados como fertilizantes en la industria agrícola de China, realiza una breve recopilación de los estudios, hechos hasta el momento de la publicación, sobre el tema, revelando que muchos estudios sugerían que los REEs (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Yu) podían estimular la absorción, transferencia y asimilación de nutrientes, siendo el rocío de REEs en las semillas de las plantas uno de los métodos más comunes en la agricultura de China.

(Theodoro & Leonardos, 2006) en el estado de Minas Gerais, Brasil, demostraron en práctica, fertilizando en lugares puntuales de zonas rurales durante y subsecuentemente tomando análisis de fertilidad del suelo por más de cinco años, que el uso de rocas volcánicas de la región de

Mata da Corda del Plateau de Brasil como un fertilizante natural si proveía al suelo macronutrientes como fósforo, magnesio, calcio, potasio y también micronutrientes. Las rocas usadas geoquímicamente estaban caracterizadas por ser ultrapotásicas y por poseer una afinidad Lamproítica y teniendo en cuenta que la textura era porfirítica su mineralogía consistía en fenocristales de olivino y flogopita embebidos en una matriz de olivino, diópsido, flogopita, perovskita, richterita, calcita, apatito, melilita y zeolita.

En 2010 el Gobierno Brasileño expidió en una colección de estudios llamada “Serie de Rocas y Minerales Industriales” un documento titulado “Potencial de los agrominerales alternativos en la región del Noreste de Brasil” en el cual exponía el potencial existente en el uso de rocas y minerales en la agricultura, analizando las distintas litologías y los distintos tipos de minerales que se encontraban al alcance en zonas cercanas a áreas de consumo, enlistándolas en los respectivos nutrientes esenciales que proveían cada una de ellas (Antonio & Elias, 2010).

(Morford, Houlton, & Dahlgren, 2011) analizo metapelitas de bajo gradiente geotérmico, éstas conformaban la roca madre de varios suelos de bosques norteamericanos, encontraron que la meteorización de estos estratos de roca podía ser una de las principales fuentes de N para los ecosistemas terrestres, contribuyendo de un treinta a un cien por ciento de las entradas de nitrógeno en estos ecosistemas, derrumbando el paradigma que la fuente principal para capa vegetal de la corteza terrestre provenía de la atmosfera.

(Nunes, Kautzmann, & Oliveira, 2014) Estudiaron las propiedades físico-químicas y mineralógicas de basaltos a partir de técnicas de espectrometría, absorción atómica, fotometría y espectroscopia encontrando que había una capacidad de intercambio catiónico de la roca

estudiada puesta está en un medio acuoso y también encontraron que existía una disponibilidad de macronutrientes y micronutrientes esenciales para el desarrollo de la vida vegetal tales como (Al, Ca, Mg, Mn, P, K, S, Cu, Fe, Na y Zn).

Es necesario reconocer que no han sido suficientes los estudios realizados para comprender esta área del saber, sin embargo la información existe y ha sido recopilada (Harley & Gilkes, 2000) (Restrepo, 2007), y si algo es seguro es que si existe un potencial de fertilización inorgánica en diversas litologías, sin embargo es necesario entender que este potencial no solo depende de las rocas, también entran en juego condiciones naturales como el clima (Harley & Gilkes, 2000), y el pH (F. K. Crundwell, 2014a), de microorganismos como lichens y bacterias (Banfield, Barker, Welch, & Taunton, 1999) (Meena, Maurya, Verma, & Meena, 2016), en incluso por acción de las mismas plantas a través de sus raíces (Williams, D.E ; Coleman, 1950), todo esto facilitando mecanismos para la disolución de los minerales y así propiciar su aporte de nutrientes en forma de iones. Por lo tanto no solo hay que contemplar una caracterización de la roca, hay que entender que el potencial es global y que la única forma de entenderlo es entendiendo el contexto del uso de las rocas como fertilizantes.

Dicho lo anterior se entiende que por su naturaleza geológica, ya caracterizada por muchos trabajos (Ward, 1973) (Urueña & Zuluaga, 2011) (Zapata, Correa, Rodríguez, & Arango, 2016) (Mantilla-Figueroa, García-Ramírez, & A.Valencia, 2016), las rocas de estudio si pueden presentar un contenido en elementos mayores y menores lo suficientemente variados como para cumplir con las necesidades nutritivas necesarias para el crecimiento y sostenimiento de cultivos de alta calidad en la industria agropecuaria, sin embargo en Colombia y en Santander son casi

nulos los estudios que busquen una caracterización litológica entrando en contexto con el uso de las mismas litologías como fertilizantes naturales. Puntualmente solo se encontró un estudio sobre el uso de feldespatos como fuentes de potasio en el territorio colombiano (Sanz Scovino & Rowell, 1988) durante el presente trabajo, exceptuando también algunos estudios hechos para la roca fosfórica (INGEOMINAS, 1987) (FAO, 2007). No solo es necesario realizar estudios que articulen la geología, ciencias de los suelos y la ecofisiología vegetal por lograr un aporte al conocimiento, la creciente demanda de fertilizantes, su ya pronosticada escases, el empobrecimiento nutritivo de los suelos y los problemas de nutrición para el ser humano (Amundson et al., 2015) (White & Brown, 2010) hacen un llamado de atención a las nuevas generaciones de científicos, dejando un mensaje claro, las ciencias tienen que ser aplicadas y para todos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar el potencial natural de fertilización del Sienogranito perteneciente al Granito de Pescadero, Monzogranito de la Cuarzo Monzonita La Corcova, Neis Biotítico-Silimanítico del Neis de Bucaramanga y Esquisto Moscovítico de La Formación Silgará, pertenecientes al basamento cristalino del Macizo de Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar una investigación previa de la información geológica del área de estudio enfocada en litologías con una mineralogía y geoquímica relacionada con elementos que presenten un potencial como fertilizante inorgánico.

Realizar un análisis petrográfico con microscopía óptica de sección delgada de las rocas seleccionadas para la identificación de las fases minerales presentes y su abundancia modal.

Analizar la composición química de las fases minerales predominantes usando la técnica de microscopía óptica de barrido (SEM).

Realizar un microanálisis multielemento semicuantitativo de cada roca de estudio usando el principio de espectroscopia de fluorescencia de rayos X de reflexión total (TXRF).

Realizar una correlación entre los constituyentes estequiométricos de las fases minerales de cada roca y las concentraciones de los elementos encontrados a partir del TXRF con el fin de entender la mineralogía de la roca con su composición química.

Realizar una caracterización química de los macronutrientes y micronutrientes potenciales para uso como fertilizante inorgánico presentes en las rocas de estudio y correlacionarlo con sus mineralogías y composiciones químicas correspondientes.

3. Marco Teórico

3.1 Macronutrientes y micronutrientes

Se ha establecido que de los 118 elementos descubiertos presentes en el planeta tierra tan solo 17 de ellos han sido señalados como esenciales para el desarrollo de plantas altas (Taiz & Zeiger, 2010) (White & Brown, 2010), es decir que sin ellos tanto su ciclo de vida como su psicología no se cumplen de manera natural.

Tabla 1. Clasificación de los Nutrientes Minerales de las Plantas

Mineral	Clasificación por concentración	Función
Grupo 1 N S	macronutriente macronutriente	Constituyentes de moléculas orgánicas
Grupo 2 P Si B	macronutriente macronutriente micronutriente	Indispensable para las reacciones involucradas en la síntesis de ATP Contribuyen a la integridad estructural de la planta, definiendo así su rigidez, elasticidad y elongación celular.
Grupo 3 K Ca Mg Cl Mn Na	macronutriente macronutriente macronutriente micronutriente micronutriente micronutriente	Principal catión que establece la turgidez y electroneutralidad en las células. Es uno de los constituyentes principales de la laminilla media de las paredes celulares. Constituyente principal de la estructura molecular de la clorofila Se requiere en la evolución del oxígeno en las reacciones de fotosíntesis. Actúa junto con otros cationes en procesos de activación de enzimas y evolución del oxígeno en la fotosíntesis. Puede sustituir el potasio en algunas funciones
Grupo 4 Fe Zn Cu Ni Mo	micronutriente micronutriente micronutriente micronutriente micronutriente	Están envueltos en reacciones de óxido-reducción

Nota: Adaptado de (Taiz & Zeiger, 2010)

Cuando estos elementos se encuentran en el suelo en forma de iones inorgánicos se le pueden llamar nutrientes minerales. Estos se han agrupado frecuentemente en dos grupos dependiendo de su concentración en las plantas, estos son macronutrientes y micronutrientes, sin embargo se encuentra útil clasificarlos en 4 grupos por su rol bioquímico y sus funciones psicológicas, de esta forma entendiendo que no solo es la cantidad el factor que delimita la necesidad nutritiva de una planta, también su cualidad (Ver Tabla 1).

Gran parte de la fuente natural de estos elementos se encuentra en la fracción inorgánica del suelo, la cual representa más del 90% de sus componentes sólidos, siendo los minerales unos de sus componentes principales (Sparks, 1995) siendo estos últimos en términos de aporte nutritivo una de las mayores fuentes, tal es el caso del potasio el cual es contenido en el suelo casi en toda su totalidad en feldespatos, micas y materiales provenientes de estos (Meena et al., 2016).

3.2 Análisis de suelos

Los análisis de suelos muestran resultados de métodos analíticos que tienen como fin medir la concentración de nutrientes disponibles para las plantas en el suelo, es decir que no mide el total de nutrientes, mide solo los que se presenten en forma iónica (como catión o anión) siendo estos los que la planta puede disponer de forma inmediata (Sullivan, 2017). Puesto que la técnica analítica para medir cada nutriente es distinta, entendemos que para (Ca, Mg, Na, K) se mide su CIC, en cambio para los nutrientes restantes su concentración se mide en partes por millón. En el análisis de suelos también se miden propiedades que pueden afectar la disponibilidad de nutrientes, estas son la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el potencial de hidrógeno (pH), materia orgánica (MO), la cual en algunos casos esta se mide directamente por su contenido en carbono (C) y textura del suelo.

3.1.1 Disponibilidad de nutrientes. Se tiende también a medir los 5 cationes disponibles con mayor abundancia en el suelo (Ver Tabla 3), incluyendo al aluminio cuando el pH es muy ácido, la sumatoria de ellos nos da una medida llamada CIC efectiva (ECIC), la cual debe ser un valor aproximado al CIC. También hay estudios que muestran que la proporción en porcentaje de CIC que guardan estos cationes entre ellos mismos es más importante que su CIC propio. Para los nutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn, P, B, S) se mide la concentración de su forma disponible en ppm (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Niveles de Disponibilidad de Nutrientes en un Análisis de Suelos

Catión (meq/100gr)	Forma disponible	Adecuado	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Na	Na^+	-	0-0.1	0.1-0.3	0.3-0.7	0.7-2.0	>2
K	K^+	-	0-0.2	0.2-0.3	0.3-0.7	0.7-2.0	>2
Ca	Ca^{2+}	-	0-2	2-5	5-10	10-20	>20
Mg	Mg^{2+}	-	0-0.03	0.3-1.0	1-3	3-8	>8
Catión (ppm)							
Mn	Mn^{2+}	1-5					
Cu	Cu^{2+}	>0.6					
Zn	Zn^{2+}	>1.5					
Anión (ppm)							
P	$H_2PO_4^-$ HPO_4^{2-}		-	<20	20-40	40-100	>100
B	H_3BO_3 $H_3BO_3^-$		<0.2	0.2-0.5	0.5-1	1-2	>2
S	SO_4^{2-}		<2	2-5	5-20	>20	-

Nota: Adaptado de (Sullivan, 2017) (Edwards, 2018)

3.1.2 Capacidad de intercambio catiónico. El intercambio catiónico es la propiedad que tienen algunas partículas de absorber ciertos cationes y aniones, retenerlos en un estado de intercambio, e intercambiarlos por otros aniones y cationes, todo esto en un sistema acuoso, y en algunas ocasiones no acuoso. Esta propiedad es medida como CIC (Capacidad de Intercambio Catiónico). En los suelos se mide con la unidad miliequivalentes por cada cien gramos (meq/100 g) (Ver Tabla 3), entendiéndose que la estabilidad química (disponibilidad de nutrientes) y física (estabilidad y estructura) del suelo dependen y aumentan con su CIC.

Tabla 3. Niveles de Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Clasificación	CIC meq/100 g
Muy bajo	<6
Bajo	6-12
Moderado	12-25
Alto	25-40
Muy alto	>40

Nota: Adaptado de (Edwards, 2018)

Los minerales del grupo de las arcillas (minerales arcillosos) comparten esta propiedad (Ver Tabla 4). Existen tres causas por las cuales los minerales arcillosos poseen intercambio catiónico. (I) La primera ocurre por sus enlaces rotos, lo que produce un desbalance de cargas en sus moléculas, buscando una neutralidad absorbiendo cationes. El número de enlaces rotos aumenta cuando el tamaño de las partículas disminuye. Es por esto que la molienda se reconocido como un método para aumentar el CIC. En la caolinita y halloisita es la causa principal de su CIC. En la illita y clorita cuando están muy bien cristalizadas poseen una baja

CIC, por lo cual la mayor causa para aumentarlo sería rompiendo sus enlaces. (II) La segunda causa ocurre por la sustitución en su estructura de iones trivalentes de aluminio por iones cuadrivalentes de silicio u otros iones como magnesio, esta sustitución causa un aumento en el CIC y un proceso contrario lo disminuye, esta es la causa principal de CIC en la montmorillonita y vermiculita. (III) La tercera ocurre cuando los hidroxilos de los enlaces rotos de los minerales arcillosos están expuestos a procesos de hidrólisis, lo cual promueve el intercambio de los iones de los cationes de hidrógeno de este grupo por otros cationes aumentando así su CIC. Como la caolinita y halloysita exhiben en su plano de clivaje grupos de hidroxilo esta causa podría aumentar su CIC.

Tabla 4. *Niveles de CIC para las Arcillas*

Mineral	CIC
caolinita	3-15
halloysita	5-50
montmorillonita	80-15
illita	10-40
vermiculita	100-150
clorita	10-40

Nota: Adaptado de (Grim, 1953)

3.1.3. Potencial de hidrógeno pH. Con el pH se busca expresar la acidez del suelo, encontrándose que los valores adecuados se encuentran en un rango neutral (Sullivan, 2017) (Ver Tabla 5).

3.1.4 Materia orgánica. La materia orgánica (MO) tiene la capacidad de aumentar el CIC de un suelo, puede variar entre 150-500 meq por 100g (Saharinen, 1998), sin embargo estos valores altos se restringen a si es materia orgánica fresca o no, si esta proviene de sedimentos antiguos o

materiales que han sufrido procesos de metamorfismo su CIC baja considerablemente (Grim, 1953).

3.1.5 Textura. Los minerales de las arcillas no son los únicos con CIC. Los minerales muy finos (<0.1mm) también poseen CIC como resultado de sus enlaces rotos en sus bordes, esta capacidad aumenta a medida que el tamaño disminuye, sin embargo esta capacidad puede ser insignificante en comparación a la de los minerales de las arcillas. Sin embargo tanto en los análisis de suelos y como recomendación en estudios de la misma línea de investigación del presente estudio (Harley & Gilkes, 2000) (Nunes et al., 2014) se hace necesario caracterizar la textura de las partículas estudiadas.

Tabla 5. Rangos de Niveles de pH

	pH
Fuertemente ácido	<5.1
Moderadamente ácido	5.2 - 6.0
Levemente ácido	6.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Moderadamente alcalino	7.4 - 8.4
Fuertemente alcalino	>8.5

Nota: Adaptado de (Sullivan, 2017)

4. Metodología

4.1 Obtención de muestras

4.1.1 Localización. Fueron cuatro afloramientos específicos en donde se tomaron las muestras del presente estudio, se obtuvieron 50 Kg de cada roca (Ver Tabla 6 y Figura 1 y Apéndice A).

Tabla 6. *Localización de Afloramientos para Obtención de Muestras*

Muestra	Coordenadas	
	Latitud	Longitud
Sienogranito	6°46'15.27"N	73° 0'24.25"O
Monzogranito	7° 7'27.60"N	73° 3'5.73"O
Neis Biotítico-Silimanítico	7° 7'43.61"N	73° 5'46.18"O
Esquisto Moscovítico	6°49'2.02"N	73° 0'21.42"O

4.1.2 Pulverización. Posteriormente se trituraron de forma manual, con una pica, 10 Kg de cada muestra hasta quedar en partículas de aproximadamente 3 cm, las cuales posteriormente fueron pulverizadas con una “máquina de los ángeles para abrasión”, procesando 3.3 Kg cada 25 minutos, en las instalaciones del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas de la Universidad Industrial de Santander.

4.1.3 Usos. Los análisis petrográficos y SEM se realizaron con la misma sección delgada de cada tipo de roca respectivamente, estas provenientes de una muestra escogida al azar de los 50 Kg que fue procesada en el Laboratorio de Preparación de Muestras (Ver cap.4.2.1). Los análisis TXRF y de suelos se realizaron con 20 gr y 1 Kg de roca pulverizada “harina de roca” respectivamente. El material restante, aproximadamente 9 Kg de roca pulverizada y 38 Kg de roca sólida fueron guardados para posteriores experimentos (Ej. Evaluación de “harina de roca” en cultivos).

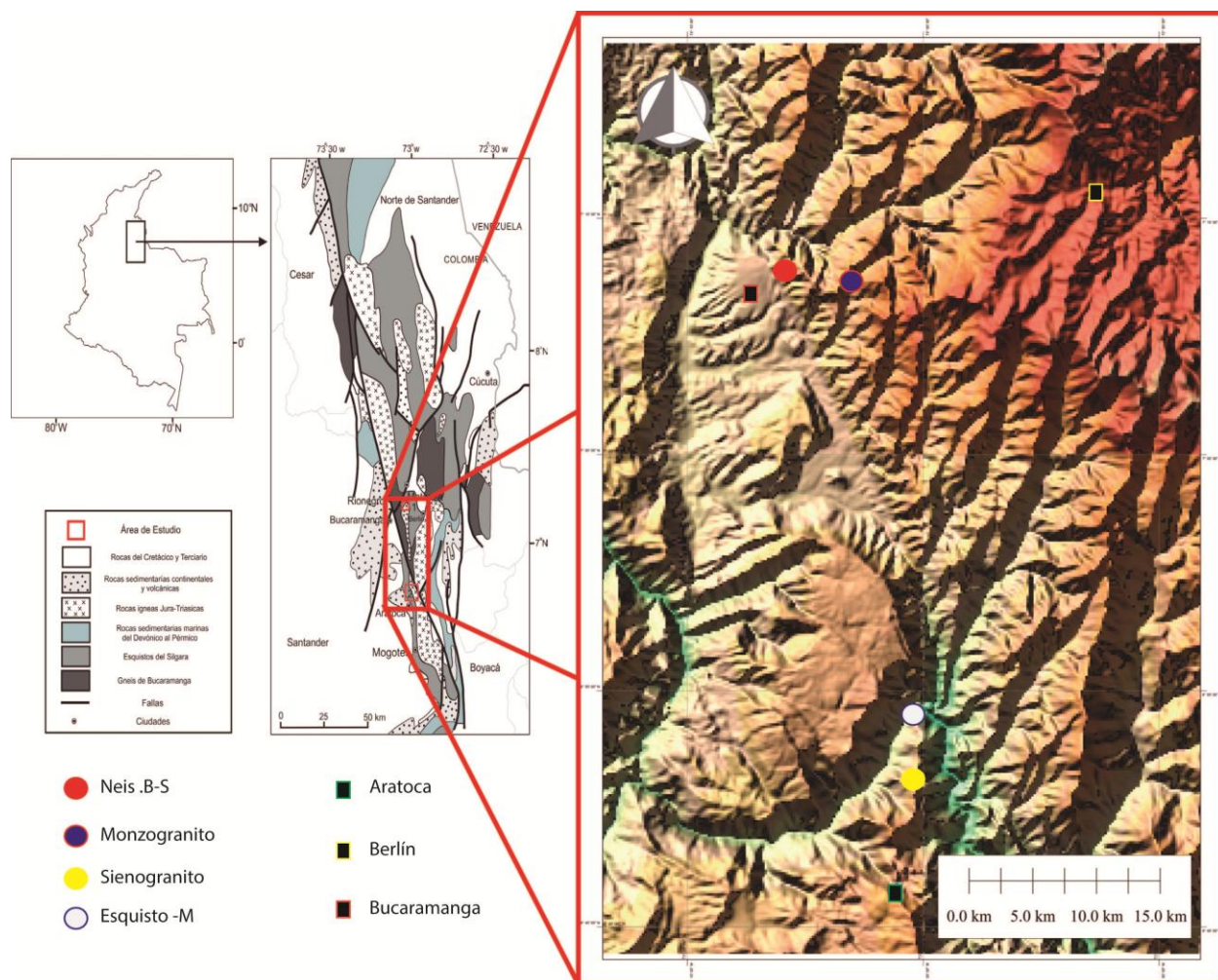


Figura 1. Georreferenciación de Muestras Usadas en el Presente Estudio. Nota: Adaptado de (Mantilla-Figueroa et al., 2016).

4.2 Análisis Petrográfico

4.2.1 Preparación de las muestras. Se realizó en el Laboratorio de Preparación de Muestras de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Se prepararon un total de 5 muestras, una para cada roca a excepción del Neis Biotítico-Silimanítico al cual se le realizaron dos, una para el mesosoma y otra para el leucosoma.

4.2.2 Equipo usado. Microscopio de luz transmitida “Nikon ECLIPSE 2000” en el Laboratorio de Microscopía de Luz Transmitida de la Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físico Químicas de la Universidad Industrial de Santander. Las microfotografías fueron tomadas usando el microscopio de luz transmitida “Leica, modelo DM750 P”, en los laboratorios del “Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA)” en el Parque Tecnológico Guatiguará de La Universidad Industrial de Santander.

4.2.3 Material bibliográfico usado. La descripción microscópica se realizó siguiendo la “Guía de Laboratorios de Petrología Ígnea” (Mantilla Figueroa, 2003), el “Manual de Prácticas de Petrología Metamórfica” (García Ramírez, 2007) y la publicación “Texturas y Estructuras de las Rocas Ígneas: Significado Petrológico e Implicaciones en las Condiciones de Formación de las Rocas” (López & Bellos, 2006).

4.2.4 Cálculo de la moda mineral. La composición modal se calculó por conteo de 300 puntos homogéneamente distribuidos en toda el área de la sección delgada, a excepción del esquisto moscovítico en donde se realizó mediante estimación visual de porcentajes usando patrones propuestos en “Manual of Field Geology” (Compton, 1962).

4.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

4.3.1 Equipo usado. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Microscopía del Parque Tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander. Las secciones se colocaron sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbón, se recubrieron con grafito en un equipo de recubrimiento Quorum 150ES, posteriormente se procedió a la toma de imágenes y análisis químico usando un microscopio electrónico de barrido FEG (Field Emission Gun) de referencia “Quanta Feg 650”. Las imágenes fueron tomadas al vacío, con un voltaje de aceleración de 20kV, usando un detector para imágenes de electrones retrodispersados “Back scattered detector (BSED)” tipo SSD. El análisis químico se realizó con un análisis “Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS)” usando un detector “EDAX APOLO X” de resolución 126.1 eV (en. Mn $K\alpha$) y el software EDX Genesis para obtener información semi-cuantitativa de los elementos químicos.

4.3.2 Toma de datos. El SEM se realizó en todas las muestras a excepción del leucosoma del Neis Biotítico-Silimanítico. Se realizaron análisis puntuales en zonas aleatorias a lo largo y ancho de la sección delgada, identificando distintas especies minerales, teniendo como guía las formas y escalas de grises presentadas en las imágenes y su composición química elemental.

4.3.3 Interpretación de datos. Debido al recubrimiento en carbono en la sección delgada durante la toma de datos se tuvieron que recalcular los porcentajes en peso molecular (Wt%) excluyendo al carbono. Se comparó el Wt% de los constituyentes estequiométricos teóricos, hallados a partir de las formulas químicas de las principales fases minerales (Barthelmy, 2012), con los Wt% encontrados en los análisis puntuales en SEM, caracterizando así cada fase mineral

hallada en estos análisis. La caracterización permitió impurezas como elementos en algunas fases minerales. De igual forma convirtiendo el Wt% en porcentaje en óxido % se encontró la relación en composición de anortita y ortoclasa de las plagioclasas y feldespatos potásicos, lo que permitió clasificarlos por su composición usando el diagrama ternario por contenido en porcentaje de anortita y ortosa de (Smith & Brown, 1988).

4.4 Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X por reflexión total (TXRF).

4.4.1 Equipo usado. Los análisis se realizaron usando un espectrómetro de sobremesa portátil de referencia “S2 PICOFOX, BRUKER”, en el Laboratorio Instrumental de Análisis Químico de la Escuela de Química, Facultad de Ciencias de la Universidad Industrial de Santander.

4.4.2 Rango de detección. El equipo realiza un microanálisis multielemento semicualitativo con límites de detección en el rango de ppb y ppm ideal para el análisis de oligoelementos (S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Ba, Hg, Pb). Por lo cual son los elementos anteriores los esperados a ser detectados.

4.4.3 Muestras usadas. El análisis se realizó con no más de 50 mg de harina de roca de cada roca objeto de estudio. Es importante aclarar que las muestras fueron digeridas con ácido clorhídrico (HCL), por lo cual los niveles de Cl no pertenecen a las muestras analizadas.

4.4.4 Presentación de resultados. Los resultados son mostrados a través de gráficas que muestran los espectros de cada uno de los elementos emisores. Los espectros se construyen a

partir de los pulsos en función de la unidad de energía “Kev” característica de cada elemento, a mayor pulso más altos serán los picos y habrá mayor área del espectro, representando el área el número de fotones fluorescentes que llegan al detector, por lo cual la intensidad de los picos se encuentra relacionada proporcionalmente con la concentración de su respectivo elemento en la muestra.

4.5 Análisis de suelos

4.5.1 Instalaciones. Los análisis se realizaron en las instalaciones del Laboratorio Químico de Suelos, instalado en la sede principal de la Universidad Industrial de Santander, creado a partir de un convenio entre la Gobernación de Santander, Colombia y la misma universidad.

4.5.2 Métodos usados.

Para establecer la disponibilidad de macronutrientes y micronutrientes de cada muestra de harina de roca, así como las propiedades físico-químicas de sus mismas partículas (pH, %MO, % Textura, CIC), se llevaron a cabo los siguientes métodos analíticos para cada una de las muestras (Ver Tabla 7). Es importante tener en cuenta que la disponibilidad de nutrientes se halló en condiciones de pH neutro.

Tabla 7. *Métodos Usados para el Análisis de Suelos*

Parámetros	Método Analítico
pH	Electrónico: Relación 1:1 Agua destilada
C	Colorimétrico: Walkley Black $K_2Cr_2O_7$ - H_2SO_4
P	Colorimétrico: Bray II. HCL 0,1 N- NH_4F 0,03 N
Ca, Mg, Na, K	Absorción Atómica; Extracción: Acetato de Amonio
%Textura	Bouyoucous: Agua destilada
B	Colorimétrico: Extracción Fosfato Monocálcico
Fe, Mn, Cu, Zn	Absorción Atómica: Extracción con DTPA
S	Turbidimétrico: Extracción Fosfato Monocálcico
CIC	Extracción: Acetato de Amonio

5. Resultados

5.1 Análisis petrográfico

5.1.1 Sienogranito. Es una roca holocristalina, con un tamaño de cristales que pueden ir de grano fino hasta grueso, predominando el grano fino, tiene una relación de tamaños inequigranular bimodal, encontrándose fenocristales de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa euhedrales y subhedrales, y observándose los mismos cristales en tamaños más finos con formas alotriomórficas. En términos generales se observa un crecimiento dificultado entre los cristales y fracturas mecánicas frías (frágiles).

Tabla 8. *Composición Modal del Sienogranito*

Qtz	Pl	Kfs	Fl	Op	Bt	Ap	Zrn	Cal	Ser
36.63	15.98	37.5	2.85	2	Tr	Tr	Tr	Tr	3

Como minerales primarios se encuentran cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa. El cuarzo puede encontrarse con textura poiquilítica presentando chadocristales de plagioclasa en

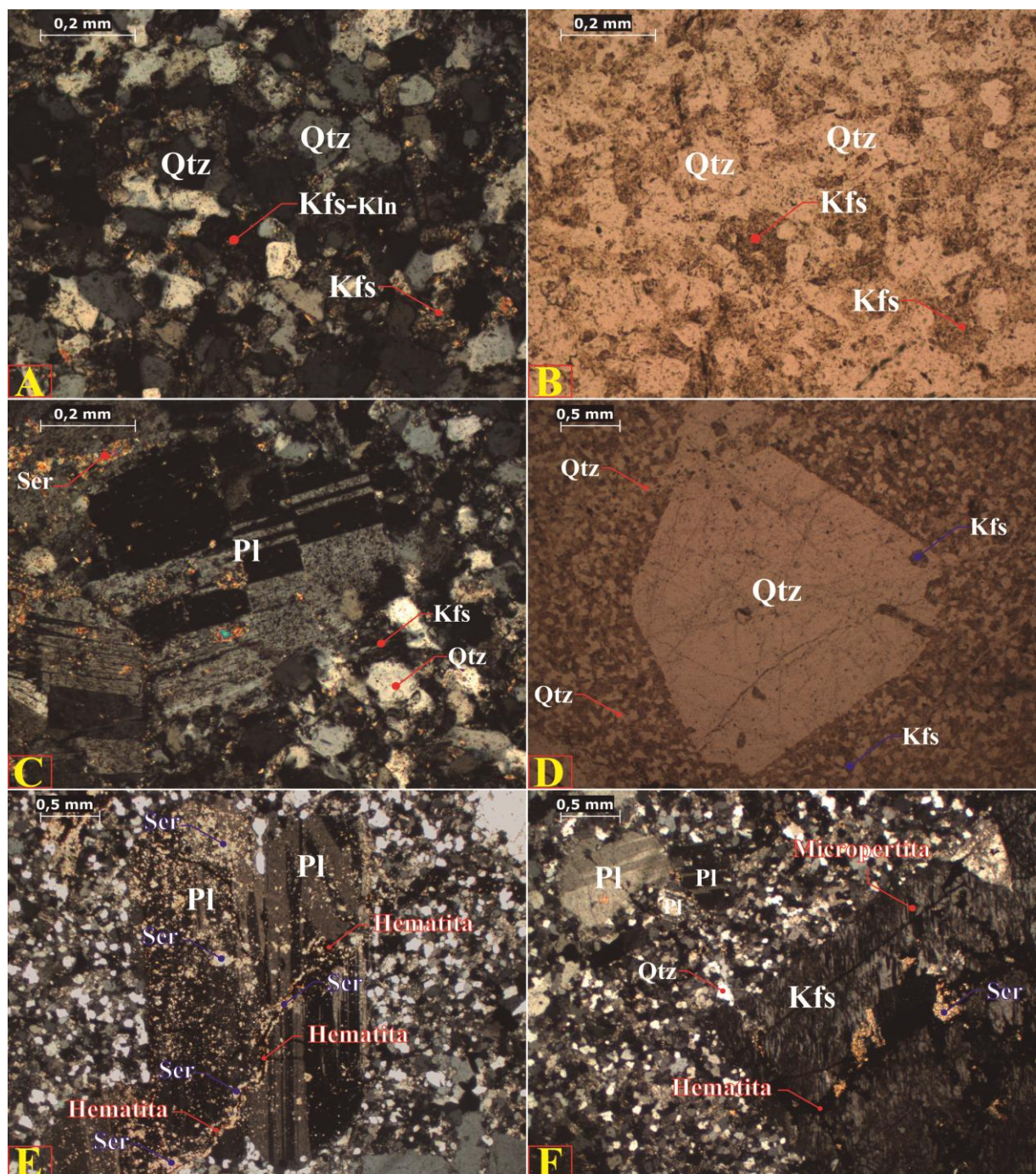


Figura 2. Microfotografías de Minerales Primarios del Sienogranito.

A–B) Qtz, Kfs y Pl alotriomórficos de grano fino, se evidencia Kfs enmascarado por alteración a caolín. C) Pl (Der.) muestra combinación de macla carlsbad-albita, Pl (Izq.) muestra combinación de macla carlsbad con macla polisintética en ley de la periclina. D) Fenocrystal de Qtz euhedral, ligeramente corroído en los bordes y con bahías de disolución E) Fenocristales de Pl exhibiendo macla Carlsbad-albita presentando pinchamiento. Presenta fracturas rellenas por Ser y Op. F) Fenocrystal de Kfs subhedral presentando textura de exsolución.

ocasiones alterando a sericita. Es común observar plagioclasa desarrollada como textura perítica en cristales de feldespato potásico y también como chadocristales en cristales de cuarzo. Su alteración a sericita resulta influenciada por fracturas, existiendo un mayor desarrollo de la alteración en zonas cercanas a estas. Es común encontrarlos con combinación entre macla de carlsbad y maclado polisintético, encontrándose en ley de albita o ley de periclina, con ángulo de extinción de 12° (A_{n10}) límite albita-oligoclasa. El feldespato potásico generalmente se presenta alotriomórfico, en fenocristales presenta textura de exsolución perítica en manchas y venas gruesas. Además de la alteración a caolín puede encontrarse alterando a sericita, sin embargo esto sucede cuando hay presencia de fracturas.

Se encuentra la fluorita como un mineral accesorio mayor, encontrándose en cristales euhedrales, subhedrales y en ocasiones alotriomórfica rellenando venas, siempre mostrando un comportamiento isotrópico en nicols cruzados. Como minerales accesorios se encuentra apatito, zircón, trazas de moscovita y opacos, caracterizando estos últimos por (EDS) cristales de hematita, kleberita (producto de alteración de la ilmenita) y magnetita.

5.1.2 Monzogranito. Es una roca holocristalina, con un tamaño de cristales que pueden ir de grano fino hasta medio, tiene una relación de tamaños equigranular. En términos generales se observa un crecimiento dificultado entre los cristales.

Tabla 9. *Composición Modal del Monzogranito*

Qtz	Pl	Kfs	Bt	Ttn	Hbl	Op	Ap	Zrn
33,33	29,41	18,95	9,80	4,57	Tr	2	1	Tr

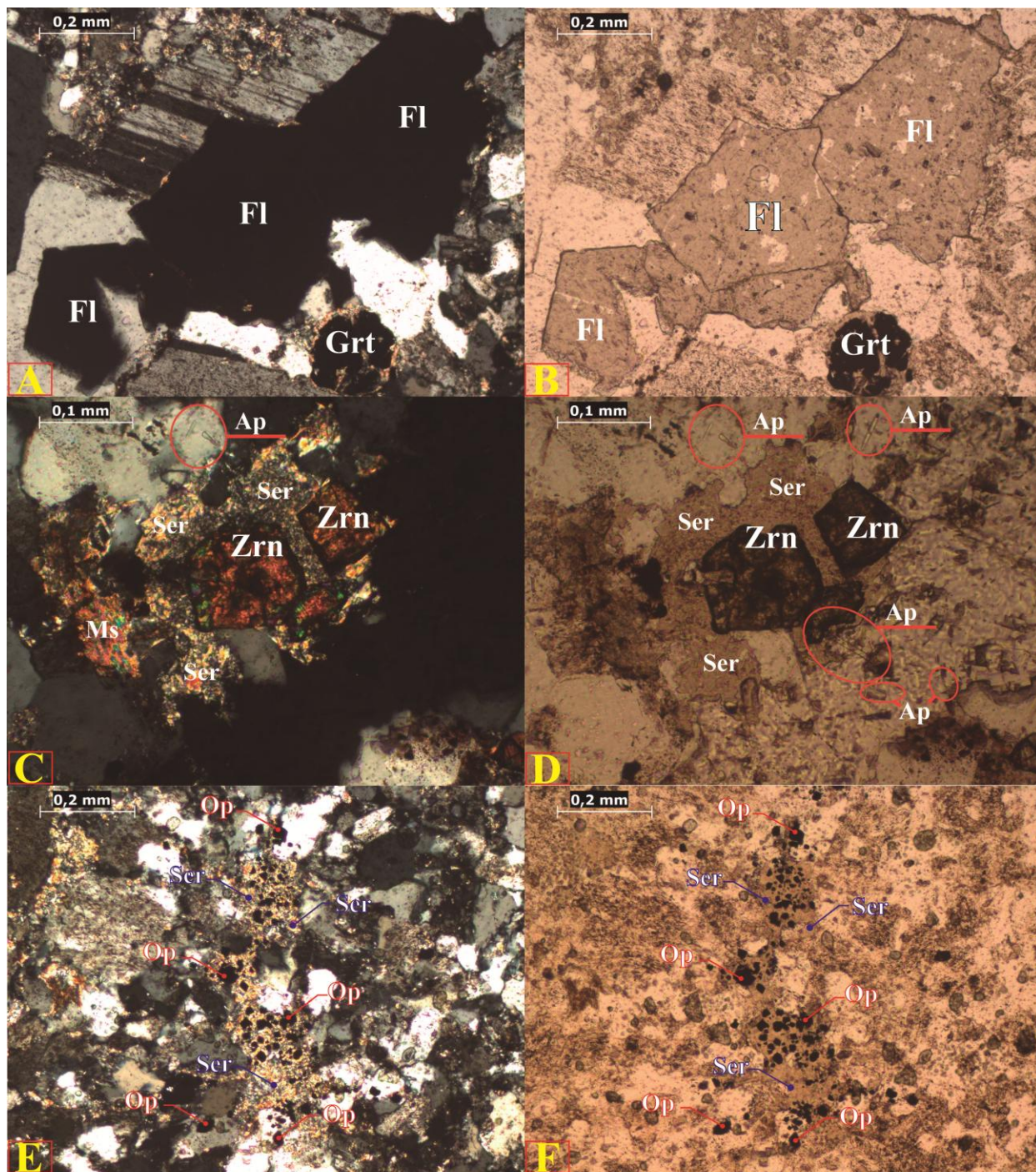


Figura 3. Microfotografías de Minerales Secundarios y Accesorios del Sienogranito.

A–B) Qtz, Kfs y Pl alotriomórficos de grano fino, se evidencia Kfs enmascarado por alteración a caolín. C) Pl (Der.) muestra combinación de macla carlsbad-albita, Pl (Izq.) muestra combinación de macla carlsbad con macla polisintética en ley de la periclina. D) Fenocristal de Qtz euhedral, ligeramente corroído en los bordes y con bahías de disolución E) Fenocristales de Pl exhibiendo macla Carlsbad-albita presentando pinchamiento. Presenta fracturas rellenas por Ser y Op. F) Fenocristal de Kfs subhedral presentando textura de exsolución.

Como minerales primarios se encuentran cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa. El cuarzo se presenta como cristales alotriomórficos de grano fino, puede encontrarse con bordes corroídos, presenta fuertemente extinción ondulante y puede encontrarse con inclusiones de apatito. El feldespato potásico se presenta subhedral en cristales de grano medio, o alotriomórfico presentando textura micrográfica junto al cuarzo.

Se reconocen dos variedades de este grupo, la primera es la microclina, esta presenta macla polisintética en parrilla, por combinación de las leyes de la albita y la periclina, en ocasiones presenta "parches de plagioclasa en su interior". Frecuentemente presenta inclusiones de cristales de apatito de grano fino. La segunda es ortoclasa, esta se presenta junto al cuarzo en textura micrográfica. La plagioclasa se presenta de habito tabular elongado, de tamaño de grano medio, presenta macla simple y macla polisintética en ley de albita con ángulo de extinción de 25° (An_{45}) correspondiendo a la andesina. Es habitual encontrarla con zonación oscilatoria, evidenciándose en halos de alteración a sericita. La alteración a sericita se encuentra en todos los cristales de la sección, alterando en promedio del 30%-50% del área superficial e cada cristal. Frecuentemente se puede encontrar inclusiones de apatito y biotita dentro de su estructura.

Se encuentran dos minerales accesorios mayores, estos son biotita y titanita. La biotita frecuentemente se encuentra alterando a clorita. La titanita se encuentra se aprecia siempre con exfoliación recta bien desarrollada y de color café. Se reconocen como minerales accesorios menores los minerales opacos, el apatito y horblenda. Sobre los minerales opacos se reconocen posibles cristales de hematita por su tonalidad rojiza oscura y magnetita por análisis puntual con (EDS). Los cristales de apatito aparecen como inclusiones en cristales de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa, encontrándose en concentraciones mayores en cristales de feldespato,

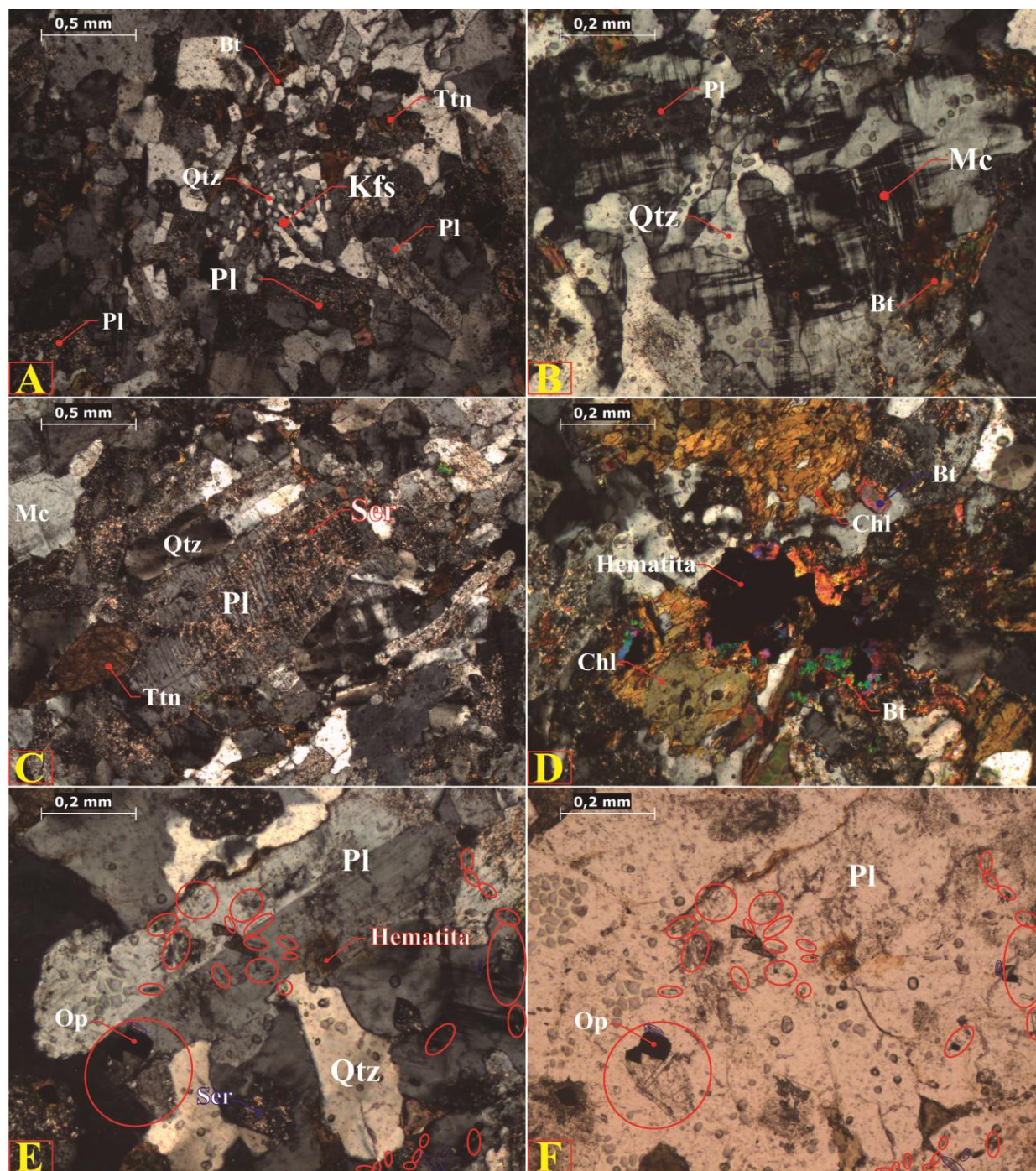


Figura 4. . Microfotografías de Minerales Primarios, Secundarios y Accesorios de la Cuarzomonzonita.

A-B) Se presentan las dos variedades de Kfs en intercrecimientos con Qtz en textura perfítica. C) Cristal de Pl con zonación oscilatoria alterada a sericita en contacto con cristales de Ttn, Mc y Qtz. D) Cristales de hematita rodeados por cristales de Bt y Chl. E-F) Cristales de Pl y Qtz con inclusiones de apatito (señalados en óvalos rojos) de hábito acicular.

predominando en la variedad de la ortoclasa. Se reconocen por su hábito acicular, son incoloros en nicols paralelos y en cruzados presentan colores de birrefringencia muy bajos, llegándose a mimetizar con sus oicocristales, es de relieve medio y puede alcanzar un tamaño hasta de 0.5 mm. No se encuentran en cristales de biotita y horblenda.

5.1.3 Neis Biotítico-Silimanítico. A escala mesoscópica se trata de un afloramiento fuertemente meteorizado, con una marcada fracturación por esfuerzos mecánicos, localmente se reconocen rocas de estructura néisica, sin embargo predominan rocas con estructura migmatítica. Las dos presentan los mismos tipos composicionales, metapelítico y cuarzo-feldespático, sin embargo las primeras presentan una foliación composicional espacialmente bien definida mientras que las segundas presentan un bandeamiento composicional muy irregular donde es posible hacer una diferenciación entre leucosomas y mesosomas, predominando la composición cuarzo feldespática de los primeros.

Por la naturaleza de la misma roca se hace necesario definir una composición modal para cada parte que la compone, leucosoma y mesosoma.

5.1.3.1 Mesosoma. A escala microscópica presenta como minerales mayores cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, silimanita, biotita y moscovita.

Tabla 10. *Composición Modal del Mesosoma del Neis Biotítico-Silimanítico*

Qtz	Pl	Kfs	Sil	Ms	Bt	Grt	Op	Ap	Mnz
27.71	27.66	13.99	13.33	9.46	7.85	3	3	Tr	Tr

El cuarzo se presenta en dos generaciones. La primera se presenta como individuos heteroblásticos, de grano fino a medio, xenoblásticos y en ocasiones idioblásticos como

inclusiones en cristales de la misma especie mineral. Presenta inclusiones de silimanita (variedad fibrolita). La segunda generación se presenta como simplectitas con las siguientes asociaciones: Qtz-Kfs/Pl-Qtz/Bt-Qtz. La plagioclasa se presenta como individuos homeoblásticos, idioblásticos y subidioblásticos, de grano medio, algunos individuos pueden presentar maclado polisintético, alteración a sericita e inclusiones de silimanita (variedad fibrolita), es el mineral que mayor fracturamiento presenta. El feldespato potásico se presenta en dos generaciones. La primera se presenta como individuos de ortoclasa, homeoblásticos de grano medio, subidioblásticos y xenoblásticos, siempre presentando textura de exsolución (pertítica en venas y micropertítica) La segunda como individuos de microclina, presentando su macla característica en enrejado, son homeoblásticos de grano medio, subidioblásticos. La silimanita se presenta como agregados de hábito fibroso, homeoblásticos de grano muy fino, idioblásticos. Se presenta asociado a cristales de biotita, y como inclusiones en feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo. Es el único individuo que presenta una orientación específica. La biotita se presenta como agregados marrones de grano fino, constituido por individuos heteroblásticos, subidioblásticos de hábito laminar y sin orientación preferente, asociada a los cristales opacos, silimanita y moscovita. La moscovita se presenta en agregados compuestos por individuos incoloros heteroblásticos de grano fino, subidioblásticos en contacto neto y asociada con la biotita.

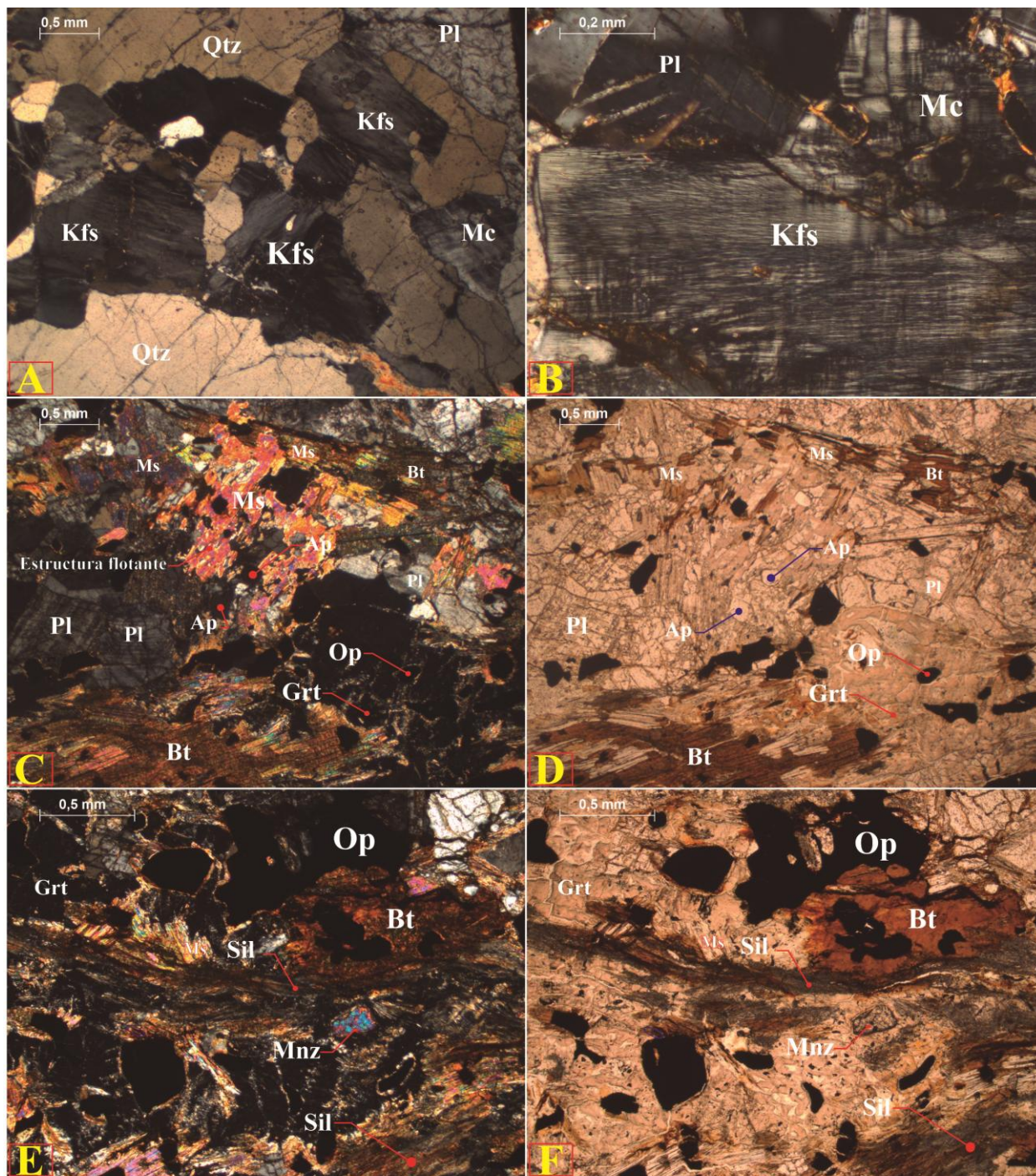


Figura 5. Microfotografías de Minerales Mayores, Menores y Accesorios del Neis Biotítico Silimanítico.

A) Individuos xenoblásticos de Qtz, Pl y Mc. B) Individuo de Kfs exhibiendo textura perthítica. C-D) Individuos de Ap exhibiendo comportamiento isotrópico, agregados de Grt de formas redondeadas en contacto con individuos Op, estructura flotante evidenciada en agregados de Ms. E-F) Agregados de Sil asociados a Ms y Bt, individuo de Mnz.

Como minerales menores se observan granate y minerales opacos, el granate se presenta como individuos de grano fino, homeoblástico, subidioblástico a xenoblástico, en hábito masivo y granular, con inclusiones de biotita, silimanita y opacos muy finos. Los minerales opacos se presentan como individuos heteroblásticos, en ocasiones idioblástico de geometrías cúbicas, subidioblásticos con algunas caras redondeadas y xenoblásticos, se encuentra asociado a la biotita. Como minerales accesorios se observan apatito y monacita. El apatito se presenta como individuos homeoblásticos, de grano fino, xenoblásticos de formas redondeas, con un color de birrefringencia muy bajo y un relieve moderado, incluidos en cristales de ortoclasa. La monacita se presenta como individuos homeoblásticos, de grano fino, xenoblásticos de formas redondeadas, con colores de birrefringencia de tercer orden, con relieve muy alto.

La textura predominante en la roca es lepidogranoblástica, desarrollando localmente microtexturas simplectíticas entre Qtz-Kfs/Bt-Qtz, mirmequíticas entre Pl-Qtz, de exsolución micropertíticas y en ocasiones maclas de transformación en feldespatos potásicos (ortoclasa) evidenciando un desarrollo a microclina. Localmente es posible distinguir estructuras flotantes. El tipo composicional es pelítico, la paragénesis mineral del pico metamórfico es Sil + Or + Bt + Qtz + Pl, encontrándose en la facie anfibolita, zona silimanita-ortoclasa. Se distingue en la misma facie como paragénesis del metamorfismo retrogrado la asociación Grt + Ms.

5.1.3.2 Leucosoma. A escala microscópica el leucosoma presenta como minerales mayores cuarzo, plagioclasa, biotita y moscovita.

Tabla 11. *Composición Modal del Leucosoma del Neis Biotítico-Silimanítico*

Qtz	Pl	Bt	Ms	Kfs	Sil	Op	Mnz
33.98	41.75	11.64	5.81	2.90	2.90	0.97	Tr

El cuarzo se presenta como individuos homeoblásticos, de grano medio, xenoblásticos, en contacto neto con plagioclasa y feldespato potásico y como inclusiones en las mismas. La plagioclasa se presenta como individuos homeoblásticos, de grano medio subidioblásticos, presentan macla polisintética en ley de albita, con ángulo de extinción de 26° (An45) correspondiendo a la andesina, presenta textura antipertítica y en ocasiones es enmascarada por alteración a caolín. La biotita se presenta como agregados de individuos laminares, homeoblásticos, de grano fino subidioblásticos, se encuentran en contacto neto con cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico, se encuentra asociado a la silimanita y moscovita. La moscovita se presenta como agregados de individuos de hábito laminar, homeoblásticos de grano fino, idioblásticos asociados a la biotita. Como minerales menores tenemos feldespato potásico y silimanita. El feldespato potásico se presenta como individuos de microclina, con su característica macla en enrejado, son homeoblásticos de grano fino, subidioblásticos. La silimanita se presenta como agregados fibrosos, homeoblásticos, de grano muy fino, idioblásticos, asociada a la biotita, no presenta orientación preferencial.

Como minerales accesorios se presentan los opacos y trazas de monacita. Los minerales opacos se presentan en dos generaciones, la primera como individuos homeoblásticos, de grano muy fino, idioblásticos de geometrías cúbicas, se encuentran como inclusiones de biotita. La segunda generación se presenta como individuos heteroblásticos, de grano fino, xenoblásticos, como inclusiones en cuarzo y plagioclasa.

La textura predominante de la roca es lepidogranoblástica, localmente se desarrolla la textura antiperitítica en plagioclasas. Se reconoce estructura flotante donde el paleosoma son los fragmentos de biotita, moscovita y silimanita flotantes sin orientación preferente en el mesosoma cuarzo-feldespático. El tipo composicional del leucosoma es cuarzo-feldespático, la paragénesis mineral del pico metamórfico es $Mc + Bt + Ms + Qtz$ encontrándose en facie anfibolita, zona andalucita-almandino.

5.1.4 Esquisto Moscovítico. A escala mesoscópica es una roca grisácea, de brillo metálico, estructura esquistosa, con una orientación preferencial de minerales micáceos. A escala microscópica se distingue una foliación espaciada bien desarrollada, con dominios de microlitones constituidos por cuarzo y dominios de clivaje definidos por moscovita y clorita, teniendo estos una relación anastomosada.

Tabla 12. *Composición Modal del Esquisto Moscovítico*

Qtz	Ms	Chl	Kfs	Op	Ap	Hialofana
30	50	20	4	1	Tr	Tr

Como minerales mayores están la moscovita, cuarzo y clorita. El cuarzo se presenta como individuos heteroblásticos, de grano fino y muy fino, xenoblásticos, con terminaciones irregulares y alargado respecto a la esquistosidad. La moscovita se presenta como agregado de individuos laminares, heteroblásticos, de grano fino y medio, idioblásticos, orientados en dirección a la esquistosidad. La clorita se presenta como agregados de individuos laminares,

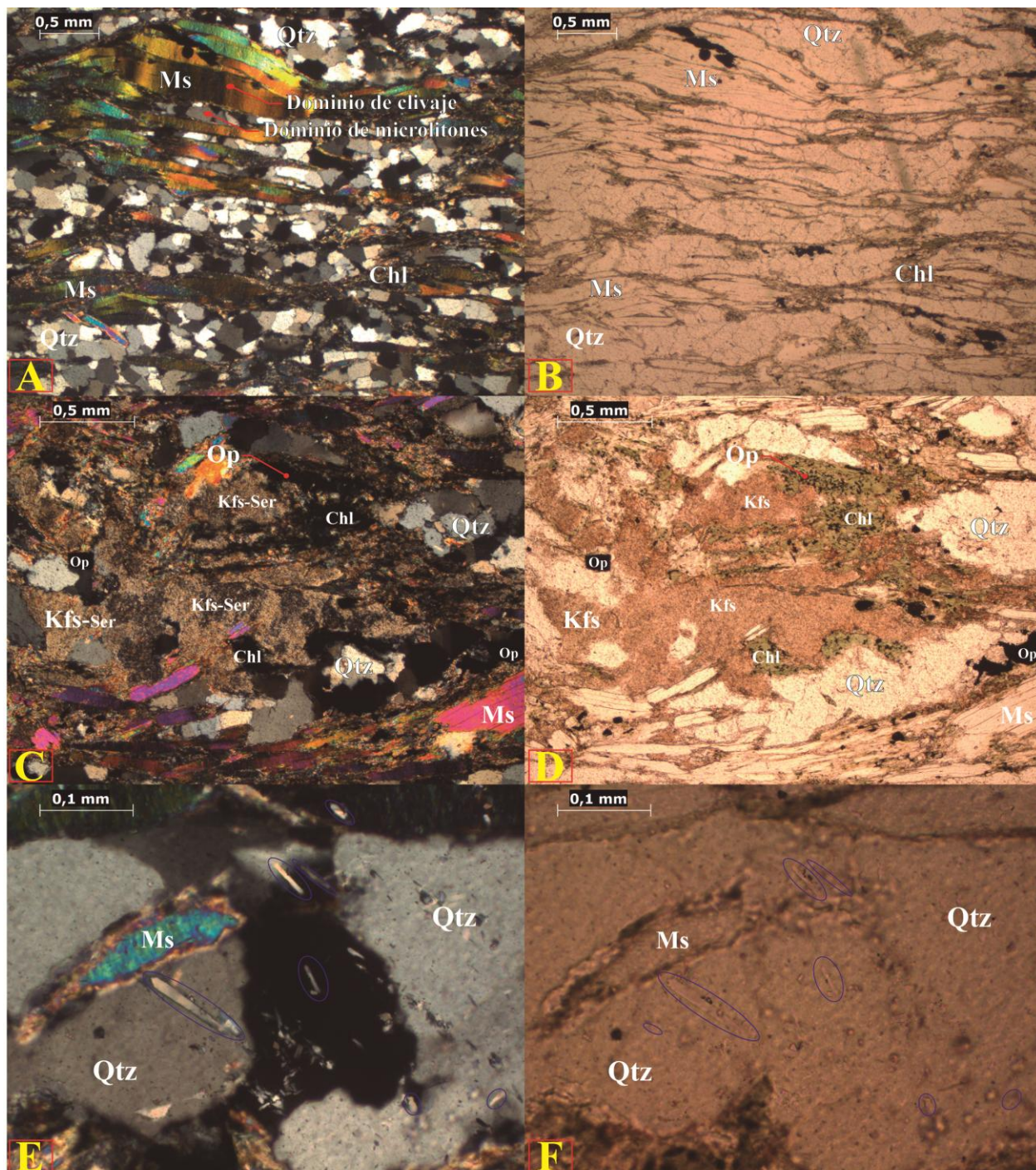


Figura 6. Microfotografías de Minerales Mayores, Menores y Accesorios del Esquisto Moscovítico.

A-B) Foliación espaciada anastomosada mostrando dominios de clivaje compuestos por agregados de Ms y Chl y dominios de microlitones compuestos por individuos de Qtz. C-D) Agregado de Kfs totalmente seritizado, en contacto con agregados de Chl con inclusiones de Op de hábito acicular con leve orientación la dirección de foliación. E-F) Individuos de apatito (señalados en óvalos azules) muy finos de hábito acicular incluidos de individuos de Qtz.

homeoblásticos, de grano muy fino, subidioblásticos orientados en dirección a la esquistosidad. Los minerales opacos se presentan como individuos heteroblásticos, como inclusiones finas idioblásticas de formas cúbicas en individuos de moscovita de grano medio, como inclusiones finas idioblásticas de formas aciculares en agregados de clorita y como individuos de grano medio, xenoblásticos en contacto con agregados de clorita. Se encuentran asociados a la moscovita y clorita. El feldespato potásico se presenta como individuos de grano medio, xenoblásticos, altamente seritizados, a escala mesoscópica se reconoce este mineral como intrusiones del granito de pescadero. La textura de la roca es granolepidoblástica. La paragénesis mineral del pico metamórfico es $Bt + Ms + Chl + Qtz$, encontrándose en facie esquistos verdes, zona de la biotita.

5.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

5.2.1 Sienogranito. La plagioclasa entra en el campo de la albita y el feldespato potásico entra en el campo de la ortoclasa (Smith & Brown, 1988). Encontramos que la moscovita tiene trazas de magnesio. El apatito tiene un porcentaje composicional en flúor, correspondiendo por su fórmula estequiométrica al fluorapatito. El zircón tiene trazas de elementos de tierras raras ligeras (LREE). La sericita, como alteración de la ortoclasa, está empobrecida en potasio y enriquecida en silicio conteniendo también trazas de magnesio y hierro. Los opacos fueron identificados como minerales de óxido. La hematita fue identificada por su Wt% en hierro, sin embargo su contenido representativo en aluminio no corresponde con ningún mineral conocido. Se identificó un producto de alteración de la ilmenita conocido como kleberita (Grey, Steinike, & MacRae, 2013) (IMA, 2018). Se identificó también hematita. (Ver Apéndice B, Tabla 1 y 5)

5.2.2 Monzogranito.

La plagioclasa entra en el campo de la andesina y el feldespato potásico entra en el campo de la microclina (Smith & Brown, 1988). La biotita puede identificarse como annita por su alto contenido en hierro sin llegar a ser siderophyllita, sin embargo tiene un contenido en magnesio que podría asociarse a la flogopita. En la titanita se encontraron trazas de aluminio, hierro y vanadio. La horblenda es rica en hierro y carece de contenido en magnesio. Se identificó la magnetita como uno de los minerales opacos. El apatito tiene un porcentaje composicional en flúor, correspondiendo por su fórmula estequiométrica al fluorapatito. El zircón contiene trazas de aluminio, potasio y calcio. (Ver Apéndice B, Tabla 2)

5.2.3 Neis Biotítico-Silimanítico. El feldespato potásico (Kfs₁) entra en el campo de la ortoclasa/microclina (Smith & Brown, 1988). Se analizó un cristal con textura micropertítica, el cual contiene dos fases minerales, la primera entra el campo de la ortoclasa (Kfs₂), la segunda entra en el campo de la albita (Pl) (Smith & Brown, 1988). La biotita tiene un contenido intermedio entre annita y flogopita por sus niveles en hierro y magnesio, encontrándose también trazas de vanadio. La moscovita tiene trazas en magnesio, y tiene como impureza un contenido representativo en hierro y titanio. El granate tiene un contenido traza en hierro y calcio. La monacita está compuesta mayoritariamente por lantánidos y actínidos siendo mayor el porcentaje para los LREE, conteniendo trazas de praseodimio, uranio, calcio y sílice, de igual forma dentro de su composición principal se encuentra el fósforo. (Ver Apéndice B, Tabla 3 y 6)

5.2.4 Esquisto Moscovítico. Se encuentra en la moscovita trazas de sodio, titanio y hierro, así mismo un contenido levemente más alto en hierro. Se determina que la clorita corresponde a la variedad chamosita por sus niveles en magnesio y hierro característicos, así mismo se encuentran trazas de potasio, calcio y manganeso. Se identificó trazas de Hialofana, con niveles de potasio y bario característicos de esta especie mineral. (Ver Apéndice B, Tabla 4)

5.3 Espectroscopia de Fluorescencia de Rayos X por reflexión total (TXRF)

5.3.1 Sienogranito. Se observan picos correspondientes a las líneas de emisión características de los elementos (Al, K, Ca, Mn, Fe, Ni, Zn, Ga, Br, Rb, Y). (Ver Apéndice C, Figura y Tabla 1)

5.3.2 Monzogranito. Se observan picos correspondientes a las líneas de emisión características de los elementos (Al, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Rb). (Ver Apéndice C, Figura y Tabla 2)

5.3.3 Neis Biotítico-Silimanítico. Se observan picos correspondientes a las líneas de emisión características de los elementos (K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Br, Rb, Sr, Y). (Ver Apéndice C, Figura y Tabla 3)

5.3.3 Esquisto Moscovítico. Se observan picos correspondientes a las líneas de emisión características de los elementos (K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb). (Ver Apéndice C, Figura y Tabla 4)

5.4 Análisis de suelos

Tabla 13. Disponibilidad de Macronutrientes, Micronutrientes y Propiedades Físico Químicas de cada Roca

Muestra	Cation (meq/100g)				ECIC	Cation (ppm)				Anión (ppm)			pH	%MO	CIC
	Na	K	Ca	Mg		Fe	Mn	Cu	Zn	P	B	S			
H1	0.13	0.22	1.7	0.23	2.28	0.04	5.05	0.30	0.60	15.9	0.25	5.71	6.3	0.88	3
H2	0.05	0.12	0.39	0.19	0.75	3.08	1.58	0.18	0.10	146	0.02	1.34	6.6	0.15	2.40
H3	0.09	0.09	2.81	2.01	1.74	1.96	5.57	0.21	0.44	51.2	0.12	12.1	6.2	0.14	3
H4	0.05	0.08	1.14	0.47	5	1.36	0.86	0.10	0.27	64.7	0.04	27.1	6.3	0.15	1

Nota: H1 = Sienogranito, H2 = Monzogranito, H3 = Neis Biotítico-Silimanítico, H4 = Esquisto Moscovítico.

H1, H2, H3 presentan los valores de CIC más altos, llegando a triplicar los valores de H4, sin embargo, comparados con la (Ver Tabla 13), presentan valores muy bajos.

Se encontró valores muy bajos de CIC del sodio y potasio en todas las muestras a excepción de H1, el cual presento niveles bajos, la misma situación se repite con el calcio encontrando niveles muy bajos en todas las muestras a excepción de niveles bajos en H3. Con respecto al magnesio H4 presenta niveles bajos y H3 niveles moderados. Se encontró también que la ECIC de H1, H3, H4 es aproximada a su CIC, siendo H3 quien presenta los niveles más altos, con respecto a H2 sus valores muy bajos de CIC en calcio y magnesio producen que su ECIC sea baja y no se aproxime a su CIC. Se encontró concentraciones adecuadas de manganeso en H1, H2, y H3. Ninguna muestra tuvo concentraciones adecuadas de cobre y zinc. Se encontró concentraciones altas de fosforo en H2 Y H3 y muy altas en H4. A excepción de H1 todas las muestras tienen concentraciones muy bajas en boro. Sobre el azufre, H2 presenta niveles muy bajos, H1 y H3 moderados y H4 altos.

H2 presenta un pH neutro, mientras que las muestras restantes se encuentran en un rango levemente ácido. Se encontró valores de materia orgánica muy bajos.

Texturalmente se presentan los siguientes resultados:

Tabla 14. *Texturas de Rocas Pulverizadas*

Roca	%Arena	% Limo	% Arcilla
	>0.05mm	0.02-0.005mm	<0.002mm
Sienogranito	64	24	12
Monzogranito	64	26	10
Neis .B	84	10	6
Esquisto .M	78	14	8

6. DISCUSIÓN

Caracterizando los macronutrientes y micronutrientes contenidos como elementos en las estructuras de todos los minerales (Ver Tabla 15) (Ver Apéndices B y C) que conforman la harina de roca es en primera instancia la primera prueba y como resultado la primera evidencia de viabilidad como fertilizante inorgánico (Nunes et al., 2014). Fue posible entonces entender mineralógicamente como estaba compuesta la roca (Ver cap.5.1), y cuál era su composición química global (Ver cap.5.3) y particular en cada mineral (Ver cap.5.2).

Tabla 15. *Elementos con Potencial Nutritivo en cada Roca*

Muestra	Si	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	P	B	S	N	Cl	Ni	Mo
Sienogranito	x	x	x	x	x	x	Tr		Tr	x						Tr
Monzogranito	x	x	x	x	x	x	Tr		Tr	x		Tr				
Neis. B	x	x	x	x	x	x	x	Tr	Tr	x						Tr
Esquisto. M	x	Tr	x	Tr	x	x	Tr	Tr								Tr

Nota: x (presente como parte de composición estequiométrica) Tr (Presente como traza)

Interpretando y correlacionando los anteriores resultados se puede entonces conocer el contenido en nutrientes de cada roca, sin discriminar aun su disponibilidad, y saber en la mayoría de ellos, cual mineral o minerales hospedan los nutrientes. Debido a que los silicatos (Cuarzo, feldespatos, micas, granate, monacita, etc.) son los minerales más abundantes en todas las muestras el contenido en silicio lo es también. La presencia de sodio es atribuible al grupo de los feldespatos potásicos (ortoclasa, microclina y albita), encontrando una relación proporcional entre la abundancia en la composición modal de estos minerales con la disponibilidad de sodio. La presencia de potasio se atribuye a los feldespatos (Feldespatos potásico y plagioclasa) (Sanz Scovino & Rowell, 1988) (Nunes et al., 2014) (Ramos et al., 2017) (Basak, Sarkar, Sanderson, & Naidu, 2018) y a las micas (Biotita, moscovita y clorita) (Boyle & Voigt, 1973) (Bakken et al., 1996) (Wang, Zhang, Cao, & Zhang, 2000) (D. K. Pal, Srivastava, Durge, & Bhattacharyya, 2001) (Dilip Kumar Pal & Planning, 2015) (Meena et al., 2016), sin embargo se encuentra que la disponibilidad es mayor en los feldespatos potásicos, encontrando en la ortoclasa y la albita la mayor disponibilidad de potasio. El hecho de que la concentración de potasio disponible sea baja en el Neis .B y en el Esquisto .M se puede atribuir a la presencia de cationes de hidrógeno, hierro y aluminio presentes en polimorfos de aluminio como la silimanita y filosilicatos como la moscovita, (Grim, 1953) muestra que la fijación de potasio en la illita disminuye con la presencia de estos cationes, la misma situación podría estar ocurriendo con las partículas finas de estas rocas, considerando que la composición modal de la plagioclasa y microclina posee valores similares tanto en el Neis .B como en el Monzogranito y que los valores de moscovita son altos en el Esquisto .M (Ver cap.5.1), siendo estos los minerales a los que se le atribuye el mayor contenido de potasio en estas rocas, no habría motivos por los cuales existiese tanta diferencia

con el Monzogranito. El calcio se encuentra de forma general en las plagioclasas, siendo por su naturaleza más abundante conforme a la proporción en anortita sea mayor, por lo tanto la andesina es el mineral con mayor disponibilidad en calcio (Theodoro & Leonardos, 2006) (Toscani & Campos, 2017). Es de señalar que en el sienogranito la abundancia modal de plagioclasa era mucho menor que en el monzogranito, teniendo ambos el mismo tipo de alteración sericítica, sin embargo la disponibilidad de calcio fue mucho mayor, por lo tanto se atribuye este hecho a la presencia de fluorita, que aunque siendo un mineral secundario su aporte en calcio disponible es representativo. Ahora comparando la abundancia modal de plagioclasa (Andesina) tanto en el Neis .B como en el Monzogranito era considerablemente alta, sin embargo su disponibilidad no, si existe una diferencia esta radica en el tipo de alteración encontrada por petrografía, encontrando en el orden respectivo una plagioclasa caolinizada (hecho aún más evidente a escala mesoscópica), y una plagioclasa fuertemente seritizada, lo que nos lleva a pensar que en el segundo tipo de alteración puede llegar a provocar un déficit en la disponibilidad de calcio. La presencia de magnesio y su disponibilidad se atribuye al contenido modal en biotita y clorita (Harley & Gilkes, 2000) (Nunes et al., 2014), encontrándose tanto la mayor abundancia modal como la mayor disponibilidad en el Neis .B y en el Esquisto .M. Es de destacar que el monzogranito también tiene una abundancia modal en biotita representativa, sin embargo su disponibilidad en magnesio es muy baja, encontrando la única diferencia con respecto a las otras rocas en su clasificación genética, siendo la primera una roca ígnea y las segundas metamórficas, sin embargo no se ha encontrado además de esta diferencia un hecho que explique esto. Si bien el hierro se encontraba como elemento traza en muchos minerales, se asume que el alto contenido hierro es debido a la presencia de los óxidos de hierro, encontrándose en los minerales opacos. Ahora bien a excepción del Esquisto .M, sabemos por

SEM que hay presencia de magnetita en todas las rocas, siendo esta la que mayor contenido en hierro tiene, ahora, encontramos que la disponibilidad de hierro puede incluso duplicarse con respecto a las otras rocas, lo que puede sugerir que su abundancia modal en magnetita es mayor, hecho que se respalda con la abundancia modal representativa que tiene en titanita, mineral que comúnmente suele hallarse en depósitos de magnetita (Carriedo & Tornos, 2009), y que no se encuentra en ninguna de las otras rocas. Si bien encontramos concertaciones trazas en manganeso por SEM en cristales de biotita, hematita y clorita (Harley & Gilkes, 2000) y de igual forma por TXRF, hay dos rocas que poseen una contenido de este elemento representativo, el Neis .B y el Sienogranito, si bien el primero se le puede atribuir la disponibilidad a los minerales anteriormente mencionados, al segundo menos, sin embargo a escala mesoscópica se identificó abundantes agregados detríticos de pirolusita, por lo cual a este óxido de manganeso atribuimos la disponibilidad de manganeso. No se evidencio por SEM la presencia de cobre, sin embargo por TXRF si se encontraron trazas, y aunque la disponibilidad en muy baja puede contribuirse a un sulfuro que se encuentre en los minerales opacos. El mismo hecho ocurrió con el zinc, sin embargo en este caso su disponibilidad se puede atribuir a su presencia como elemento traza dentro de la estructura de la biotita, granate y magnetita (Robinson, 1981). A excepción del Sienogranito, se encontraron valores de disponibilidad del fosforo altos para el Neis .B, para el Esquisto .M y muy altos para el Monzogranito, los cuales se asocian directamente con el apatito, ya (Ward, 1973) con el Monzogranito y el Esquisto .M y (Urueña & Zuluaga, 2011) con el Neis .B habían reportado presencia de apatito, y ahora con el presente estudio, teniendo en cuenta tanto la presencia apatito encontrada en la petrografía de cada roca (Ver cap.5.1) como en los resultados SEM del fluorapatito en el Monzogranito (Ver Apéndice B, Tabla 2) encontramos que este mineral, sin importar su hábito sea acicular o xenoblástico, posee concentraciones de

disponibilidad y por ende su potencial como fertilizante para dicho macronutriente también es alto. Se encuentran trazas de boro solo por el análisis de suelos en el Sienogranito y el Esquisto .M, su presencia en rocas se puede atribuir a la adición de estos elementos durante etapas magmáticas, posteriormente quedando dentro de la estructura química de filosilicatos como la moscovita (Schwartz, 1978), lo cual concuerda con el origen magmático del Sienogranito y su composición modal de moscovita como traza. El Esquisto .M presentó concentraciones altas de azufre, al igual el Neis .B presentó concentraciones moderadas, si bien con SEM y TXRF no se encontraron evidencias de la presencia de azufre, los análisis de suelos si lo hicieron, por lo cual podemos pensar que hay presencia de sulfuros entre los minerales opacos, puesto que de otra forma se hubieran podido reconocer en la petrografía. El pH presenta niveles que pueden llegar a funcionar como acondicionador de suelo para suelos ácidos (Theodoro & Leonardos, 2006) (Nunes et al., 2014), siendo el Monzogranito la roca que mayor potencial presenta. Los niveles de materia orgánica son despreciables debido a que valores altos en CIC que proporciona la misma se restringen a si es materia orgánica fresca o no, si este caso proviene de sedimentos antiguos y materiales que han sufrido procesos de metamorfismo, por lo cual su CIC baja considerablemente (Grim, 1953). Encontramos que la CIC es baja en todas rocas y que a pesar que los niveles teóricos de CIC de la clorita son moderados (Grim, 1953), estos no se evidencian en los resultados. Con respecto a las demás rocas el CIC se puede relacionar con la presencia de caolinita (Grim, 1953), sin embargo no encontramos una potencial inmediato en las rocas en la capacidad de acondicionar la CIC en el suelo. En el Neis .B con la monacita, y en el Sienogranito con el zircón, se presentaron respectivamente en su composición química niveles muy altos y moderados de LREE (La, Ce, Pr, Nd) y fueron ratificados con el TXRF , las

implicaciones de esto según (Pang et al., 2001) podrían tener un potencial como fertilizante al estimular la absorción, transferencia y asimilación de nutrientes.

7. Conclusiones

Basándonos en la disponibilidad de macronutrientes y micronutrientes, resultado del análisis de suelos realizado en este estudio, evaluados en condiciones de pH neutral, entendiendo que un potencial como fertilizante natural también tiene que basarse teniendo en cuenta características bioquímicas del suelo regidas por condiciones como el pH (F. K. Crundwell, 2014a) (F. K. Crundwell, 2014b) (Frank K. Crundwell, 2017), la presencia de arcillas (Grim, 1953), y de materia orgánica así como la presencia de microorganismos como líquenes, bacterias y las misma acción de las raíces que puede facilitar procesos de meteorización química y biológica que propician la disolución de los minerales que componen la harina de roca (Boyle & Voigt, 1973) (Banfield et al., 1999) (Harley & Gilkes, 2000) (Meena et al., 2016) y entendiendo que como producto químico de dichos procesos da a lugar a cationes libres , los cuales podrían actuar como nutrientes, de igual manera basándonos en la experiencia obtenida en los estudios de (Restrepo, 2007) (Sanz Scovino & Rowell, 1988) (Theodoro & Leonardos, 2006) (Harley & Gilkes, 2000) podemos entender que el potencial de efectividad (Tiempo en que comienza a cumplir su función luego de ser aplicado en el suelo) como fertilizante de la roca pulverizada “harina de roca” puede ser efectivo a corto, mediano y largo plazo, siempre y cuando exista una disponibilidad mínima de nutrientes, así como también puede ser nula si no los hay. Entendiendo corto plazo como efecto inmediato, mediano plazo a escala de meses y largo plazo en años,

podemos construir un esquema concluyente del potencial de fertilización natural que presenta cada roca objeto de estudio en un estado físico pulverizado (Tabla 16).

Tabla 16. *Evaluación de Potencial Natural de Fertilización de las Rocas Objeto de Estudio*

Muestra	Si	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	P	B	S	N	Cl	Ni	Mo
Sienogranito	n.d	LP	MP	spc	spc	n.d	CP	spc	LP	spc	spc	MP	n.d	n.d	LP	n.d
Monzogranito	n.d	spc	LP	spc	spc	n.d	CP	spc	spc	CP	spc	spc	n.d	n.d	spc	n.d
Neis .B	n.d	Spc	LP	LP	MP	n.d	CP	spc	spc	CP	spc	MP	n.d	n.d	LP	n.d
Esquisto .M	n.d	spc	LP	spc	spc	n.d	CP	spc	spc	CP	spc	CP	n.d	n.d	LP	n.d

Nota: CP = Potencial a corto plazo, MP = Potencial a mediano plazo, LP = Potencial a largo plazo, spc = Sin potencial conocido, n.d = No determinado.

8. Recomendaciones

Ya hecho una evaluación preliminar sobre el potencial natural de fertilización de las rocas con el presente estudio, se recomienda continuar la investigación, comprobando los efectos que tienen las rocas de estudio pulverizadas sobre las propiedades físico químicas del suelo, sobre el crecimiento de las plantas y sobre la absorción que estas realicen de nutrientes provenientes de las rocas.

Debido a la creciente demanda y limitada oferta, finita, de fuentes de fósforo (Amundson et al., 2015) es imperante seguir investigando el Monzogranito usado en este estudio como fuente potencial de fosforo para la región.

Referencias Bibliográficas

- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235). <https://doi.org/10.1126/science.1261071>
- Antonio, L., & Elias, R. (2010). *S ÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS O potencial dos agrominerais alternativos na região Nordeste do Brasil Luiz Inácio Lula da Silva*.
- Bakken, A. K., Gautneb, H., & Myhr, K. (1996). The potential of crushed rocks and mine tailings as slow-releasing K fertilizers assessed by intensive cropping with Italian ryegrass in different soil types. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 47(1), 41–48. <https://doi.org/10.1007/BF01985717>
- Banfield, J. F., Barker, W. W., Welch, S. A., & Taunton, A. (1999). Biological impact on mineral dissolution: Application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.7.3404>
- Barthelmy, D. (2012). Mineralogy Database. Retrieved October 18, 2018, from <http://www.webmineral.com/>
- Basak, B. B., Sarkar, B., Sanderson, P., & Naidu, R. (2018). Waste mineral powder supplies plant available potassium: Evaluation of chemical and biological interventions. *Journal of Geochemical Exploration*, 186, 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.11.023>
- Boyle, J. R., & Voigt, G. K. (1973). Biological weathering of silicate minerals. *Plant and Soil*, 38(1973), 191–201. <https://doi.org/10.1007/BF00011226>
- Carriedo, J., & Tornos, F. (2009). Diversos orígenes para los depósitos de tipo magnetita-(Cu-

- Au) en la Zona de Ossa Morena. *Macla*, 11, 51–52.
- Compton, R. R. (1962). Manual of Field Geology. *Geological Journal*, 3(2), xvii–xvii.
<https://doi.org/10.1002/gj.3350030218>
- Crundwell, F. K. (2014a). The mechanism of dissolution of minerals in acidic and alkaline solutions: Part I - A new theory of non-oxidation dissolution. *Hydrometallurgy*, 149, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.06.009>
- Crundwell, F. K. (2014b). The mechanism of dissolution of minerals in acidic and alkaline solutions: Part II Application of a new theory to silicates, aluminosilicates and quartz. *Hydrometallurgy*, 149, 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.07.003>
- Crundwell, F. K. (2017). On the Mechanism of the Dissolution of Quartz and Silica in Aqueous Solutions. *ACS Omega*, 2(3), 1116–1127. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00019>
- Edwards, A. C. (2018). Interpreting Soil Test Results: What do all the Numbers Mean? 3rd edition. By Pam Hazelton & Brian Murphy (eds). CSIRO Publishing, 2016, 200 pp. Paperback, AU \$59.95 ISBN 9781486303960. *Soil Use and Management*, 34(1), 164–165.
<https://doi.org/10.1111/sum.12402>
- FAO. (2007). *Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible*. Boletín FAO *Fertilizantes y Nutrición Vegetal* (Vol. 13). Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-y5053s.pdf>
- García Ramírez, C. A. (2007). *Manual de Prácticas de Petrología Metamórfica*. (U. I. de Santander, Ed.). Bucaramanga: Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Universidad Industrial de Santander.
- Grey, I. E., Steinike, K. C. M., & MacRae, C. (2013). Kleberite, $\text{Fe}_3\text{Ti}_6\text{O}_{11}$

- (OH)<SUB>5</SUB>, a new ilmenite alteration product, from Königshain, northeast Germany. *Mineralogical Magazine*, 77(1), 45–55.
<https://doi.org/10.3354/meps102153>
- Grim, R. (1953). *CLAY MINERALOGY*. (R. Shrock, Ed.). New York: McGraw-Hill.
- Harley, A. D., & Gilkes, R. J. (2000). Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: A geochemical overview. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56(1), 11–36. <https://doi.org/10.1023/A:1009859309453>
- IMA. (2018). *The New IMA List of Minerals – A Work in Progress – Updated: March 2018*. Retrieved from <https://www.ima-mineralogy.org/Minlist.htm>
- INGEOMINAS, i (Ed.). (1987). *Recursos Minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- López, J. P., & Bellos, L. L. (2006). *Texturas y Estructuras de las Rocas Igneas: Significado Petrológico e Implicancias en las Condiciones de Formación de las Rocas*. (F. Aceñolaza, Ed.). San Miguel de Tucumán: Universidad Nacional de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO).
- Mantilla-Figueroa, L. C., García-Ramírez, C. A., & A.Valencia, V. (2016). Propuesta de escisión de la denominada “Formación Silgará” (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38(1), 33–50.
<https://doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016002>
- Mantilla Figueroa, L. C. (2003). *Guía de Laboratorios de Petrología Ígnea*. (U. I. de Santander, Ed.) (Primera). Bucaramanga: Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Universidad Industrial de Santander.
- Meena, V. S., Maurya, B. R., Verma, J. P., & Meena, R. S. (2016). *Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture. Potassium Solubilizing Microorganisms for*

Sustainable Agriculture. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2>

Morford, S. L., Houlton, B. Z., & Dahlgren, R. A. (2011). Increased forest ecosystem carbon and nitrogen storage from nitrogen rich bedrock. *Nature*, 477(7362), 78–84. <https://doi.org/10.1038/nature10415>

Nunes, J. M. G., Kautzmann, R. M., & Oliveira, C. (2014). Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil). *Journal of Cleaner Production*, 84(1), 649–656. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.032>

Pal, D. K., & Planning, L. U. (2015). *Potassium release from muscovite and biotite under alkaline conditions*.

Pal, D. K., Srivastava, P., Durge, S. L., & Bhattacharyya, T. (2001). Role of weathering of fine-grained micas in potassium management of Indian soils. *Applied Clay Science*, 20(1–2), 39–52. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(01\)00044-8](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00044-8)

Pang, X., Li, D., & Peng, A. (2001). Application of rare-earth elements in the agriculture of china and its environmental behavior in soil. *Journal of Soils and Sediments*, 1(2), 124–129. <https://doi.org/10.1065/iss2001.05.013>

Ramos, C. G., Querol, X., Dalmora, A. C., de Jesus Pires, K. C., Schneider, I. A. H., Silva, L. F. O., & Kautzmann, R. M. (2017). Evaluation of the potential of volcanic rock waste from southern Brazil as a natural soil fertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2700–2706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.006>

Restrepo, J. (2007). *Panes de piedra*. Retrieved from <http://www.lombricor.com/index.php/productos/polvoderocas/polvorocaporfido?format=raw&task=download&fid=16>

Robinson, G. D. (1981). Adsorption of Cu, Zn and Pb near sulfide deposits by hydrous

- manganese-iron oxide coatings on stream alluvium. *Chemical Geology*, 33(1–4), 65–79.
[https://doi.org/10.1016/0009-2541\(81\)90085-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(81)90085-1)
- Saharinen, M. H. (1998). Evaluation of changes in CEC during composting. *Compost Science and Utilization*, 6(4), 29–37. <https://doi.org/10.1080/1065657X.1998.10701938>
- Sanz Scovino, J. I., & Rowell, D. L. (1988). The use of feldspars as potassium fertilizers in the savannah of Colombia. *Fertilizer Research*, 17(1), 71–83.
<https://doi.org/10.1007/BF01050458>
- Schwartz, W. (1978). K. H. Wedepohl (Editor), Handbook of Geochemistry, Vol. II/5. XXXII + 1546 S., 266 Abb. 576 Tab. Berlin—Heidelberg—New York 1978. Springer-Verlag. DM 690,00. *Zeitschrift Für Allgemeine Mikrobiologie*, 20(5), 364.
<https://doi.org/10.1002/jobm.19800200529>
- Smith, J. V., & Brown, W. L. (1988). *Feldspar Minerals*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-72594-4>
- Sparks, D. L. (1995). Inorganic Soil Components. *Environmental Soil Chemistry*, 23–51.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-656445-7.50006-1>
- Sullivan, D. M. (2017). Soil Test Interpretation Guide, (September 2014).
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology*. *Annals of Botany*.
<https://doi.org/10.1104/pp.900074>
- Theodoro, S. H., & Leonardos, O. H. (2006). The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 78(4), 721–730.
<https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000400008>
- Toscani, R. G. S., & Campos, J. E. G. (2017). Use of basalt and phosphate rock powder as fertilizers in weathered soils | Uso de pó de basalto e rocha fosfatada como

- remineralizadores em solos intensamente intemperizados. *Geociencias*, 36(2), 259–274.
- Urueña, C., & Zuluaga, C. (2011). Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetas - Santander. *Geología Colombiana*, 36(1), 37–55.
- Wang, J. G., Zhang, F. S., Cao, Y. P., & Zhang, X. L. (2000). Effect of plant types on release of mineral potassium from gneiss. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56(1), 37–44. <https://doi.org/10.1023/A:1009826111929>
- Ward, D. . (1973). Mapa Geológico De Colombia Cuadrangulo H-12 Bucaramanga Planchas 109 Rionegro - 120 Bucaramanga. *Ingeominas , Memoria Explicativa*.
- White, P. J., & Brown, P. H. (2010). Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105(7), 1073–1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>
- Williams, D.E ; Coleman, N. . (1950). Cation exchange properties of plant root surface. *Plant and Soil II*, (2).
- Zapata, G., Correa, A. M., Rodríguez, G., & Arango, M. I. (2016). *LITOESTRATIGRÁFICAS DE COLOMBIA GRANITO DE PESCADERO Cordillera Oriental Departamento ... Servicio Geológico Colombiano*. Medellín.

Apéndices

Apéndice A. Fotografías de muestras usadas en el presente estudio.

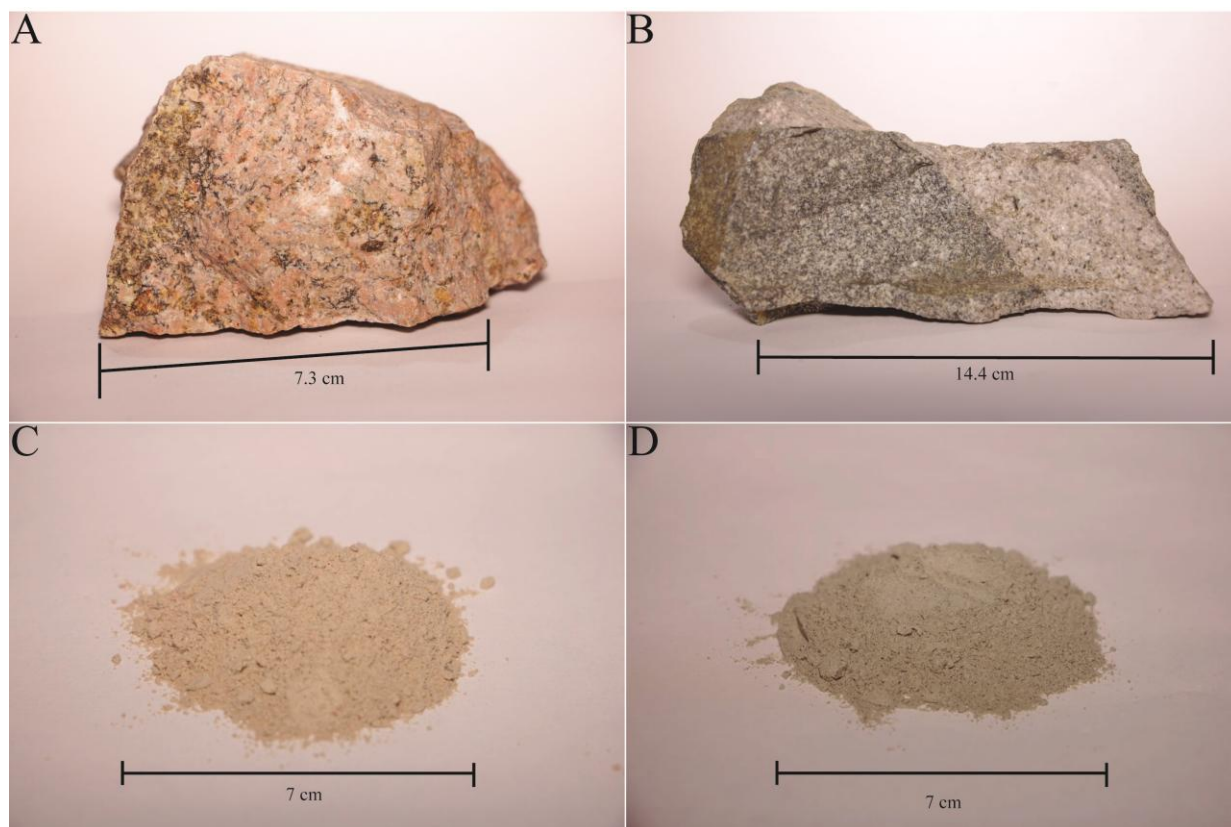


Figura 1. Fotografías de Muestras usadas en el presente estudio (Como roca y pulverizado respectivamente). A-C) Sienogranito
B-D) Monzogranito.

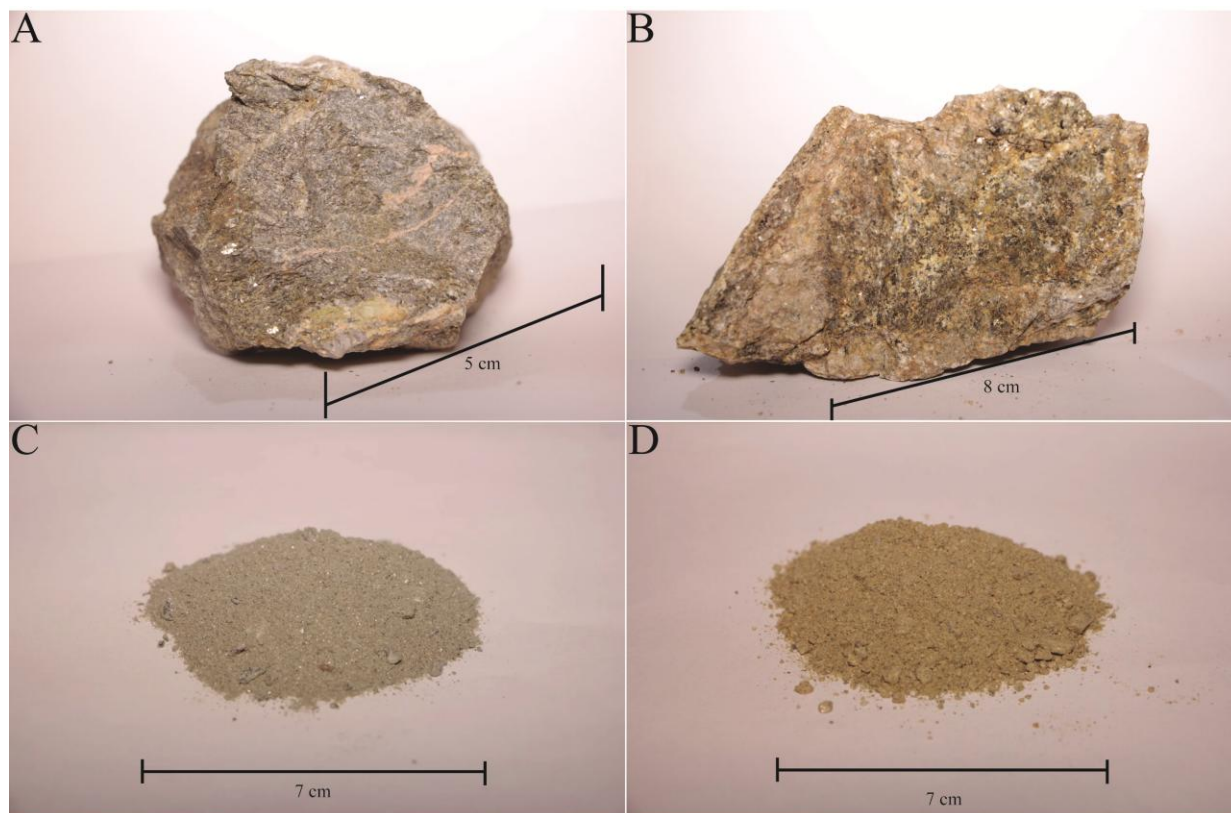


Figura 2. Fotografías de Muestras usadas en el presente estudio (Como roca y pulverizado respectivamente). A-C) Esquisto Moscovítico. B-D) Neis Biotítico Silimanítico.

Apéndice B. Tablas de composición molecular en Wt% de las fases minerales de cada roca

Tabla 1. *Composición Molecular en Wt% de Fases Minerales del Sienogranito*

Elemento	Qtz	Pl	Kfs	Fl	Ms	Ap	Zrn	Ser
	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%
O	42.70	48.47	34.88	01.17	33.22	26.49	25.03	38.17
Si	57.30	33.48	37.57	-	31.35	00.53	16.42	45.46
Al	-	11.75	11.94	-	21.25	-	-	10.00
K	-	-	15.61	-	10.30	-	-	04.77
Na	-	06.30	-	-	-	-	-	00.00
Ca	-	00.00	-	62.62	-	47.01	-	-
P	-	-	-	-	-	22.38	-	-
F	-	-	-	36.64	-	03.58	-	-
Mg	-	-	-	-	00.81	-	-	00.36
Fe	-	-	-	-	03.06	-	-	01.24
Zr	-	-	-	-	-	-	48.72	-
La	-	-	-	-	-	-	02.83	-
Ce	-	-	-	-	-	-	05.39	-
Nd	-	-	-	-	-	-	01.62	-

Tabla 4. *Composición Molecular en Wt% de Fases Minerales del Esquisto Moscovitico*

Elemento	Qtz	Ms	Chl	Hialofana
	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%
O	42.86	36.31	42.68	32.35
Si	57.14	27.03	13.84	24.50
Al	-	20.96	10.89	19.43
K	-	10.42	0.35	8.79
Ca	-	-	0.49	-
Na	-	0.39	-	0.31
Ti	-	0.66	-	-
Mg	-	0.64	8.60	0.54
Mn	-	-	1.10	
Fe	-	3.58	22.05	2.98
S	-	-	-	2.39
Ba	-	-	-	8.70

Tabla 5. *Composición Molecular en Wt% de Minerales de Óxido en Sienogranito*

Elemento	Hematita		Kleblerita		Magnetita	
	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%
O	26.81	52.37	27.90	54.13	21.34	48.52
Si	00.69	00.77	00.44	00.48	00.37	00.48
Fe	61.99	34.68	11.50	6.39	78.29	51.00
Ti	-	-	60.16	38.99	-	-
Al	10.51	12.18	-	-	-	-

Tabla 6. *Composición Molecular en Wt% de Minerales de Óxido en Neis Biotítico-Silimanítico*

Elemento	Hematita		Magnetita	
	Wt%	At%	Wt%	At%
O	22.96	50.56	21.14	48.33
Fe	68.33	43.10	78.86	51.67
Ti	7.96	5.85	-	-
Mn	0.75	0.48	-	-

Apéndice C. Espectros de dispersión hallados por TXRF

Figura 1. *Espectros de dispersión hallados por TXRF del Sienogranito*

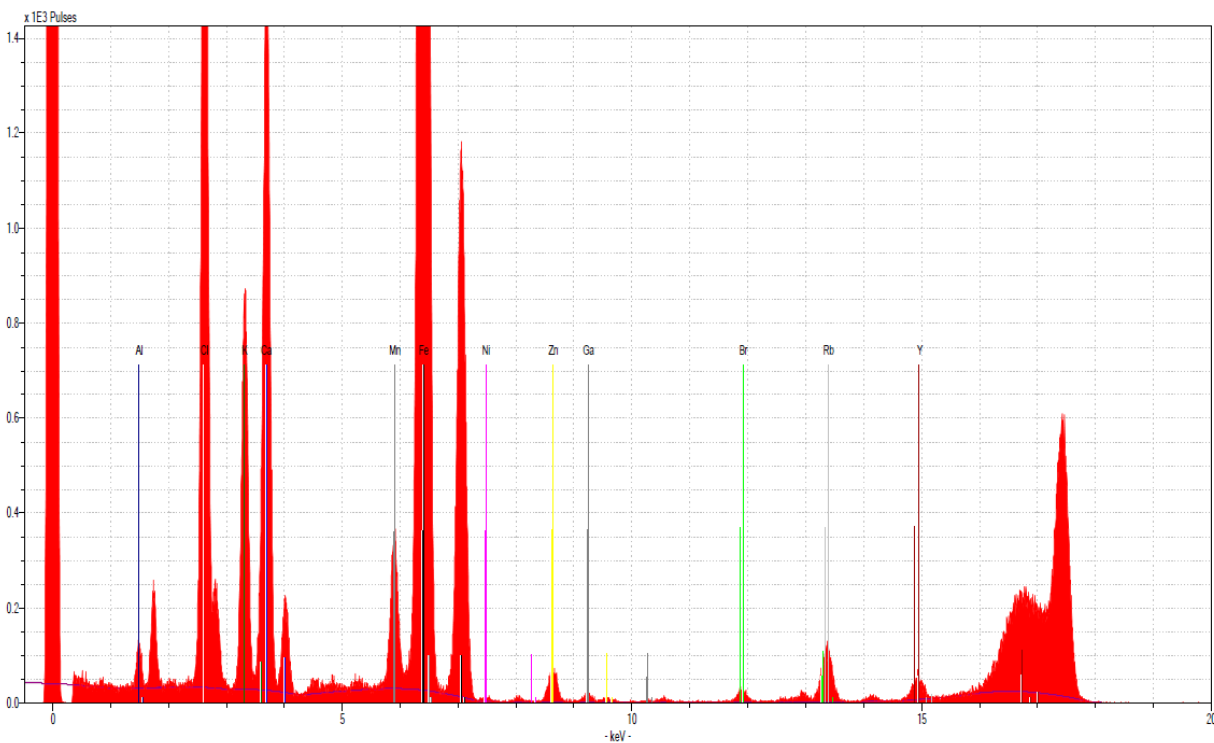


Tabla 1. *Área neta de cada elemento identificado en el Sienogranito.*

Elemento	Área neta
Al	1778
Cl	59547
K	21859
Ca	40971
Mn	9985
Fe	285466
Ni	253
Zn	2460
Ga	705
Br	1047
Rb	4642
Y	45440

Nota: El área neta de esta tabla representa un el área bajo el contorno de cada espectro.

Figura 2. Espectros de dispersión hallados por TXRF del Monzogranito

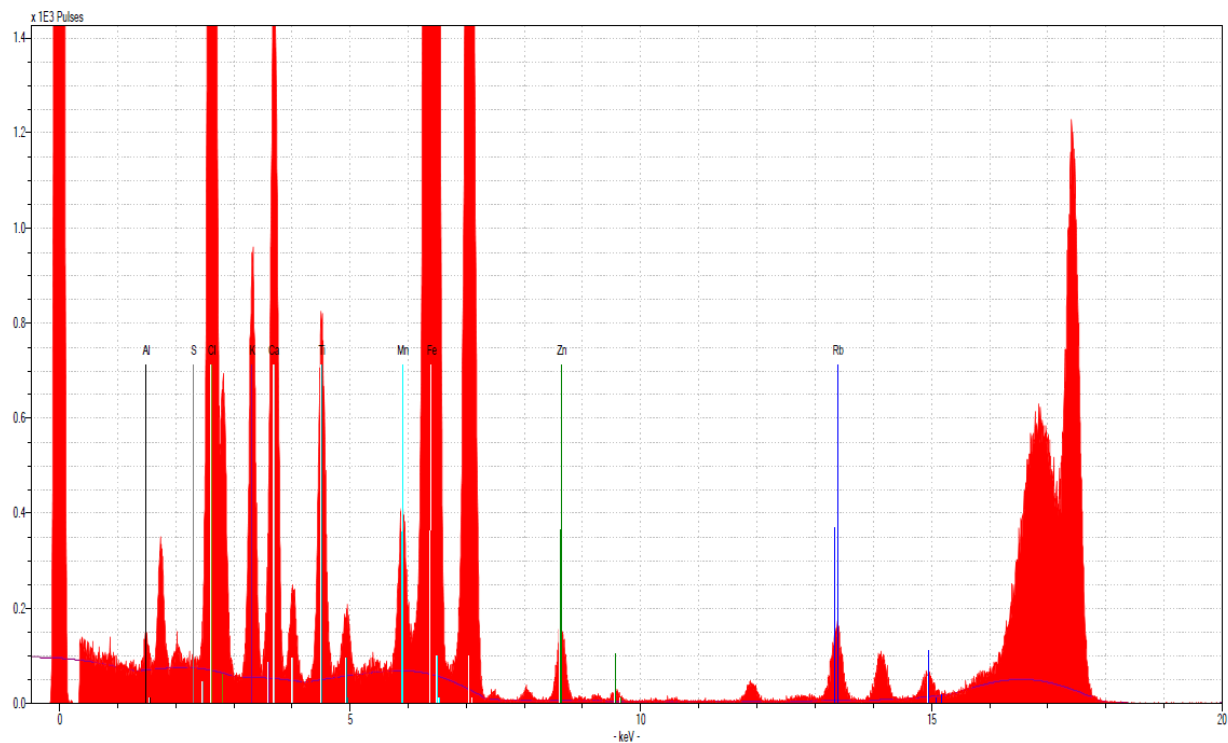


Tabla 2. Área neta de cada elemento identificado en el Monzogranito.

Elemento	Área neta
Al	1248
S	551
Cl	163465
K	22755
Ca	40927
Ti	22712
Mn	11359
Fe	778924
Zn	5932
Rb	12261

Nota: El área neta de esta tabla representa un el área bajo el contorno de cada espectro.

Figura 3. Espectros de dispersión hallados por TXRF del Neis Biotítico-Silimanítico

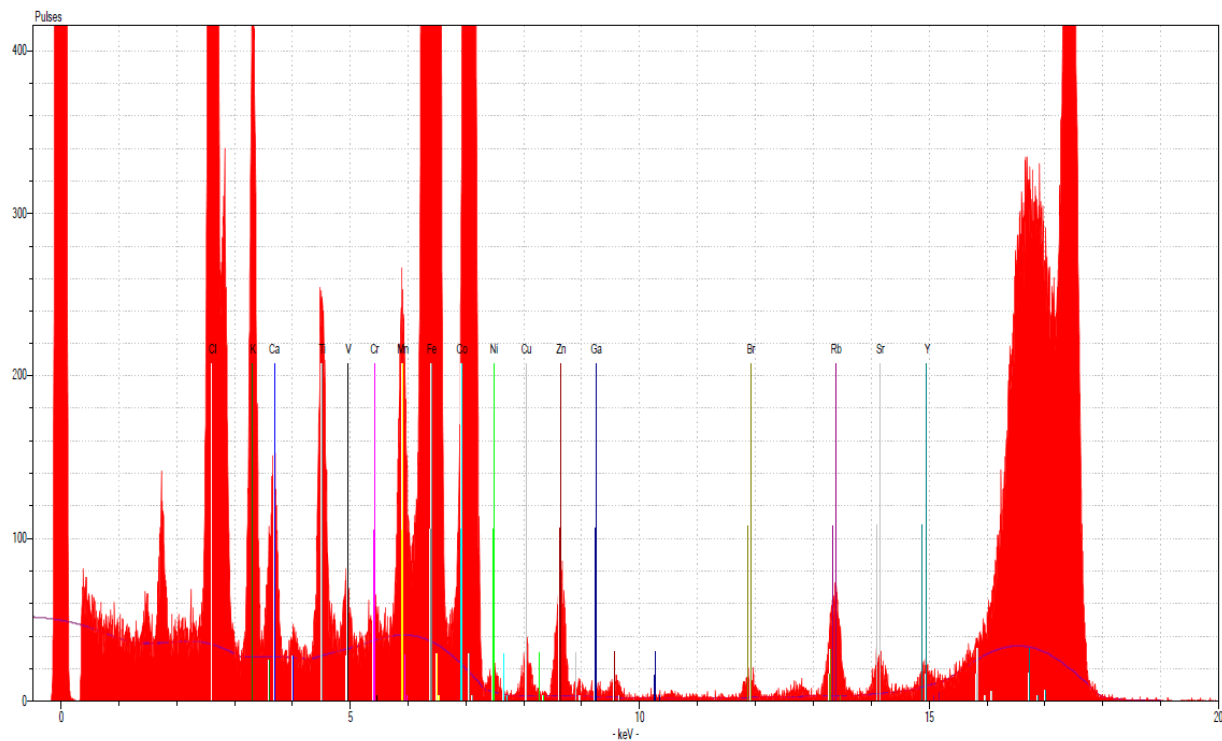


Tabla 3. Área neta de cada elemento identificado en el Neis Biotítico Silimanítico.

Elemento	Área neta
Cl	72750
K	10405
Ca	2403
Ti	6892
V	2
Cr	479
Mn	5971
Fe	506751
Co	1
Ni	349
Cu	838
Zn	2541
Ga	195
Br	549
Rb	2365
Sr	1110
Y	56839

Nota: El área neta de esta tabla representa un el área bajo el contorno de cada espectro.

Figura 4. Espectros de dispersión hallados por TXRF del Esquisto Moscovítico

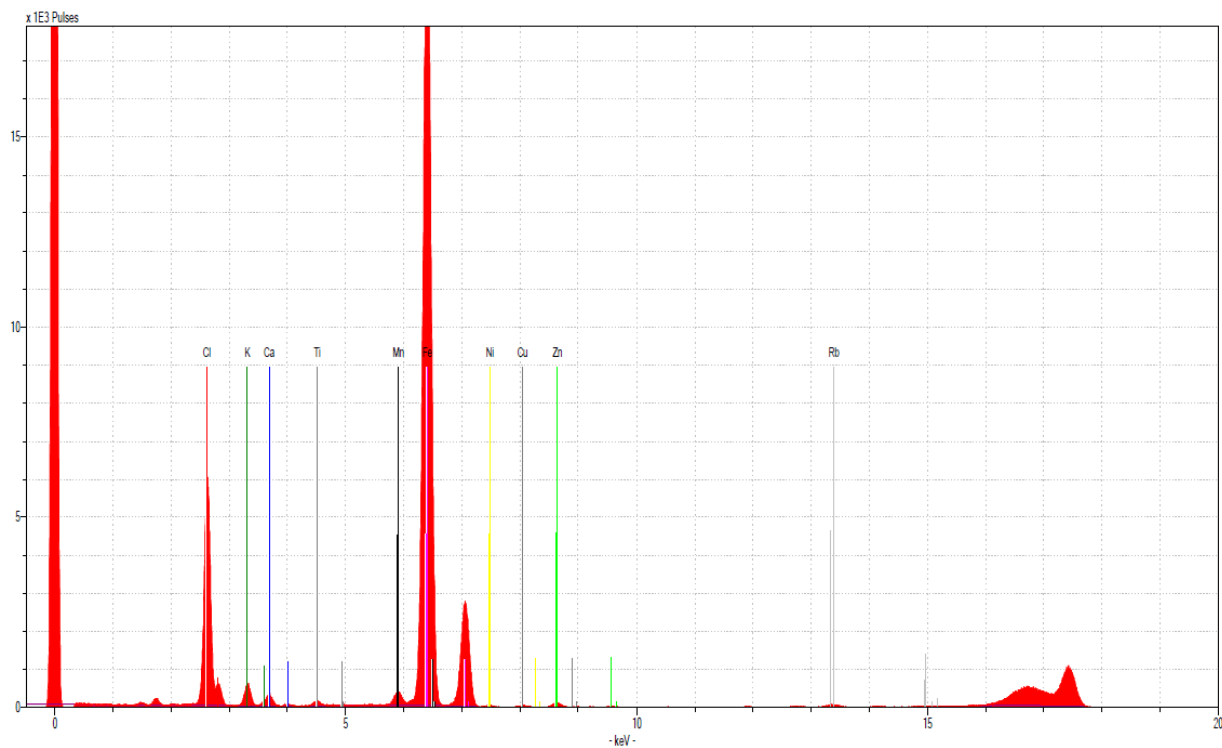


Tabla 4. Área neta de cada elemento identificado en el Esquisto Moscovítico.

Elemento	Área neta
Cl	149615
K	14304
Ca	6873
Ti	3653
Mn	11093
Fe	673328
Ni	926
Cu	1428
Zn	3959
Rb	3908

Nota: El área neta de esta tabla representa un el área bajo el contorno de cada espectro.