

CARACTERIZACIÓN LITOLÓGICA ÁREA NORTE DE CAMPO DIAMANTE
CEMENTOS ARGOS SA. EN EL MUNICIPIO DE SONSON

TRABAJO DE GRADO

EMILIO JOSÉ OSORIO
ALEJANDRO ZOTA BALVIN

Asesor
JOSE FERNANDO DUQUE

EAFIT
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA - GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2020

Queremos agradecer a la universidad EAFIT por brindarnos este espacio de aprendizaje y poner en nuestras manos todas las herramientas para cumplir nuestros sueños. También queremos agradecerle al profesor Jose Fernando Duque por su disposición y acompañamiento en este proceso, a nuestras familias por el apoyo incondicional y a los compañeros de estudio, hoy colegas que se volvieron familia.

INDICE

INTRODUCCIÓN	5
GENERALIDADES	6
Localización	6
Ruta de Acceso	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
Pregunta de Investigación	7
Hipótesis	7
OBJETIVOS	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos	8
METODOLOGÍA	9
Fase de Pre campo	9
Fase de Campo	9
Fase de Oficina	10
MARCO GEOLÓGICO	11
Geología Regional.	11
Geología Local.	14
Geología Estructural Regional	14
MARCO TEÓRICO	16
Generalidades de las Arcillas.	16
Usos de las arcillas en el cemento.	16
Importancia de las Arcillas en el Cemento.	17
Comité Conjunto de Reservas de Mena (JORC).	18
RESULTADOS.	21
Mapa de Muestreo.	22
DISCUSIÓN	31
CONCLUSIONES	34
REFERENCIAS	35

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.	6
Figura 2 Geología regional de la zona de estudio. Modificado de González (2001).	13
Figura 3 Fallas de rumbo regionales.	15
Figura 4 Localización puntos de muestreo.	23
Figura 5 Distancia entre pozos exploratorios.	23
Figura 6 Procesos de extracción de muestras. A toma de muestra. B proceso de “cuarteo”. C retroexcavadora responsable de abrir caminos.	25
Figura 7 Afloramiento en que se evidencia diferentes horizontes de meteorización según (Deere y Patton, 1971).	28
Figura 8 Cortes con dirección SW/NW. A. Corte de 1 -1'. B. Corte 2-2'. C. Corte 3-3'.....	29
Figura 9 Cortes con dirección SE/NW. A. Corte de A -A'. B. Corte B-B'. C. Corte C-C'.....	30
Figura 10 Correlación Fe ₂ O ₃ Vs Al ₂ O ₃	32
Figura 11 Correlación Al ₂ O ₃ Vs SiO ₂	33

Lista de Tablas

Tabla 1 Separación cartográfica por grupos químicos.....	11
Tabla 2 . Fallas de rumbo regionales ordenadas cronológicamente. Tomado y modificado de (Feininger et al. 1972).	15
Tabla 3 Actividades de buenas prácticas mineras según el código JORC.	18
Tabla 4 Distribución de las muestras recolectadas.	24
Tabla 5 Valores de composición Química para 20 muestras aleatorias.....	26

Lista de Anexos

- Anexo 1. MAPA GEOLOGICO CAMPO DIAMANTE.
- Anexo 2. BASE DE DATOS.

INTRODUCCIÓN

Combatir el cambio climático sin afectar el desarrollo económico es uno de los mayores retos ambientales en la actualidad. El dióxido de carbono (CO_2) es uno de los principales gases de efecto invernadero, las fuentes antropogénicas de CO_2 son el uso de combustibles fósiles, la deforestación y la emisión de fuentes de minerales de CO_2 . La producción de cemento contribuye a la emisión de CO_2 a través del consumo de combustibles fósiles, así como en la descarbonización de la caliza (Worrell et al., 2001). El dióxido de carbono se emite como subproducto de la producción de Clinker, durante la etapa de calcinación, proceso en donde el carbonato de calcio (CaCO_3) se convierte en cal (CaO), utilizando combustibles fósiles que alcanzan temperaturas de hasta 1450°C (Supino et al., 2016).

Las arcillas son usadas como materia prima para la creación de puzolanas artificiales, proceso que consta de la activación térmica de dichas arcillas a una temperatura de 800°C , remplazando a las puzolanas de origen natural, las cuales son cenizas de origen volcánico, que han sido utilizadas durante muchos años en la industria cementera, sin embargo, hay un déficit de estas, debido a su aprovechamiento continuo. Estas puzolanas son de gran importancia, ya que en unión con el Clinker presentan propiedades cementantes, por lo que reemplaza significativamente la presencia del Clinker en la fabricación del cemento, reduciendo así el consumo de energía y la cantidad de CO_2 emitido a la atmosfera (Supino et al., 2016).

La mayoría de los minerales arcillosos se originan como producto de la meteorización de otros silicatos, la cual es definida por (Anon, 1995) como el proceso de alteración, separación de la roca y materiales del suelo, sobre y cerca de la superficie terrestre por descomposición química o desintegración física.

Por lo anteriormente mencionado, el presente trabajo tiene un interés particular en encontrar áreas estratégicas de arcillas, ya que el área de estudio se encuentra en un ambiente tropical en donde prevalecen altas temperaturas y lluvias abundantes, donde el resultado es una meteorización de los materiales intensa, dando lugar a perfiles de meteorización espesos (Henaó et al., 2012). Esto con el fin de desarrollar una puzolana artificial empleada en la fabricación del cemento verde producido por la empresa ARGOS SA, y así impactar de manera positiva al desarrollo económico de una región de una manera ambientalmente amigable.

GENERALIDADES

Localización

El área de estudio se ubica en el flanco Oriental de la Cordillera Central en el departamento de Antioquia en la región del Magdalena Medio, comprende el municipio de Sonsón cerca al corregimiento Jerusalén, esta zona tradicionalmente ha sido de uso ganadero y en menor proporción utilizada para agricultura.

Ruta de Acceso

El área de estudio tiene acceso por la autopista Medellín – Bogotá, en el kilómetro 160 la vía se bifurca al sur en dirección al corregimiento de Jerusalén, 500 metros adelante de la intersección se encuentra el ingreso para la zona de estudio Campo Diamante. (Ver figura 1).

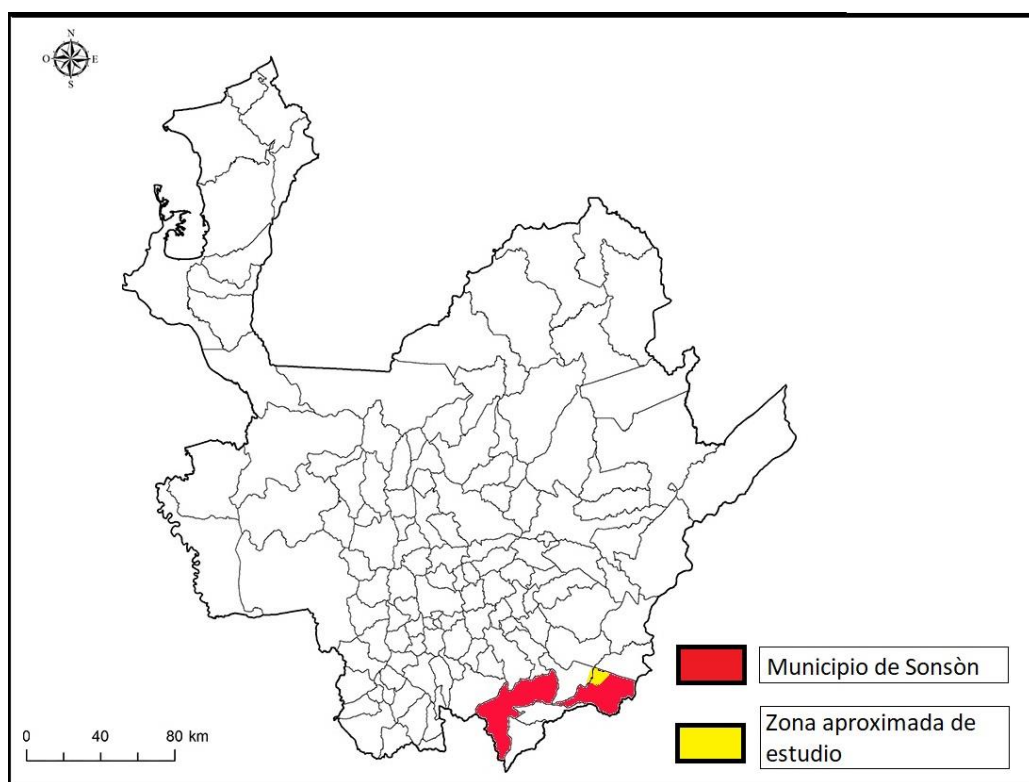


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Pregunta de Investigación

¿Cumplen las arcillas de Campo Diamante con las condiciones de calidad para ser utilizadas como materia prima para la elaboración del cemento verde?

Hipótesis

Las arcillas de la zona Norte del título Campo Diamante son útiles como materia prima para la elaboración del cemento Verde.

OBJETIVOS

Objetivo General

Caracterización de las arcillas para estimar su potencial uso como insumo para la producción de cemento verde.

Objetivos Específicos

- Generar una malla de perforación que permita reconocer la calidad de las arcillas.
- Elaborar un mapa geológico del área de estudio.
- Analizar los datos geoquímicos de cada muestra para determinar contenido de minerales aluminosos.
- Determinar áreas estratégicas para la extracción de materia prima del cemento verde.

METODOLOGÍA

Para la obtención de los objetivos planteados en el presente trabajo, se llevó a cabo la siguiente metodología.

Fase de Pre campo

- ° Revisión bibliográfica de la información existente, relacionada a las características de la zona de estudio.
- ° Revisión de las zonas de acceso del área.
- ° Construcción de itinerario para visita de campo.

Fase de Campo

- ° Diseño de la malla de perforación.
En esta actividad se tuvo en cuenta el trabajo de pre campo con el fin de analizar y programar las perforaciones dentro del área permitida. La malla fue elaborada en un área de 15mt x 30mt de distancia entre cada pozo.
- ° Marcación puntos de perforación.
Las perforaciones abarcaron toda el área con licenciamiento ambiental. Por medio de una retroexcavadora se facilitó el ingreso de la máquina perforadora que realizó 23 pozos, de los cuales se tomaron muestras de hasta 25 metros de profundidad.
- ° Recolección de muestras para análisis químico.
De acuerdo a los recorridos establecidos en la fase de pre campo, se tomaron las muestras resultantes de las perforaciones realizadas, tanto por la máquina perforadora (153) como de la maquina ahoyadora (41), estas muestras fueron debidamente marcadas y rotuladas según el código JORC para ser enviadas al laboratorio.
- ° Marcación en campo de los perfiles.
Se definió la dirección de los perfiles de tal forma que fueran influyentes para determinar interpretaciones.
- ° Toma de datos litológicos y estructurales en el área de estudio.
Siguiendo la programación propuesta en el itinerario, se tomaron datos litológicos y estructurales donde el terreno lo permitía.

Fase de Laboratorio

Las muestras fueron preparadas en el laboratorio de ARGOS SA. Una vez marcadas fueron separadas en bolsas de un kilogramo de arcilla, durante el trabajo de laboratorio se emplearon los métodos de Difracción de Rayos X y Fluorescencia de Rayos X.

La preparación de muestras para Difracción de Rayos X consta de un secado de la muestra a 40°C durante doce horas, luego la muestra es molida para tomar un porcentaje del material donde se lleva a un tubo de ensayo para un posterior análisis. Las muestras que se les realizó Fluorescencia se realizó un adecuado cuarteo, también fueron secadas a 40°C, se pulverizó la muestra y se calcinó durante dos horas a 950°C, la ceniza que queda de la calcinación se coloca en una desecadora de vidrio para hacer un respectivo análisis.

Fase de Oficina

Para llevar a cabo esta fase se requirió de 20 días de trabajo, donde se analizaron los resultados geoquímicos de las muestras que fueron llevadas al laboratorio de la planta ARGOS SA ubicada en Rio Claro. Los registros de muestras contienen los análisis de los siguientes elementos (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, SO₃, Na₂O y K₂O) adicionalmente se recopiló toda la información con el fin de generar una base de datos teniendo en cuenta (collar, survey, litho, assay) todas las actividades llevadas a cabo tanto en campo como en oficina fueron ejecutadas bajo las recomendaciones que propone el código JORC.

Con el análisis de los datos obtenidos se procedió a generar un modelo geológico y de calidad donde se lograron identificar zonas enriquecidas en arcillas aluminosas.

MARCO GEOLÓGICO

Geología Regional.

El título minero de Campo Diamante se ubica en el flanco oriental de la Cordillera Central al SE del departamento de Antioquia. Esta área hace parte de la SUB-ZONA II-B, y es señalada como una zona en la que hay presencia de rocas metamórficas como mármoles, esquistos, anfibolitas y gneises, varían ampliamente en composición y son el resultado de metamorfismo regional o de contacto de intensidad muy variable (Feininger et al., 1972), poseen evidencias de haber sufrido varios eventos metamórficos que se ven reflejados en las paragénesis metamórficas, rasgos estructurales y edades isotópicas. Estas rocas son agrupadas como una unidad litodémica denominada Complejo Cajamarca (Ver figura 2); es limitada al Este por la falla Otú-Pericos, que la separa de unidades metamórficas Precámbricas, y al Oeste por la Falla San Jerónimo, que la separa de rocas volcánicas de afinidad oceánica, hacia el occidente de la cordillera central (González, 2001).

De acuerdo con la separación cartográfica regional propuesta por (González, 2001), se crearon los siguientes grupos químicos (Ver tabla 1).

Tabla 1 Separación cartográfica por grupos químicos

Grupo Pelítico	Grupo Básico	Grupo Calcáreo	Grupo Cuarzoso
Neises aluminicos. Esquistos Cuarzo-sericíticos. Esquistos grafiticos.	Anfibolitas, esquistos anfibólicos.	Mármoles y esquistos calcáreos.	Cuarcitas, esquistos y neises cuarzosos.

El esquisto sericítico típico es de color gris medio a oscuro, laminado y está compuesto por sericita, cuarzo, biotita y grafito como minerales esenciales y como accesorios: clorita, plagioclasa (principalmente albita), turmalina, apatito y zircón. El porcentaje de sericita es mayor que el del cuarzo en la mayoría de las muestras (Feininger et al., 1972).

Las anfibolitas rara vez están asociadas con cuarcitas, pero si lo están con los esquistos sericíticos, las anfibolitas son por lo general más resistentes a la meteorización que las rocas encajantes, y de ahí se debe que sus afloramientos sean más grandes. Estas rocas son de color gris verdoso oscura a negra, foliada a néisica, la mayor parte de las capas

asociadas a neises feldespáticos y aluminicos. Las bandas tienen espesores variables de 1 a 10 cm. Los minerales más comunes en estas rocas son hornblenda y plagioclasa (andesina). Presenta minerales accesorios como: apatito, magnetita, pirita y en menor proporción biotita y clorita secundaria (Feininger et al., 1972).

Los Mármoles dan una topografía característica de colinas de 20 a 350 m de altura con cima redondeada y lados muy pendientes, por lo general con poca vegetación. Se encuentran al oeste de la falla Otú. El tamaño de grano en el mármol varía de fino a grueso y el color de gris oscuro a blanco. La mayor parte de estas rocas presente un metamorfismo de bajo grado. Están formados por un 80% de calcitas y presentan minerales accesorios como: Cuarzo, grafito, feldespato y micas. En algunos lugares, se encuentran bancos de cuarcitas finogranulares de color gris que se disponen intercalados con el mármol, en donde sobresalen debido a la meteorización (Feininger et al., 1972).

Las cuarcitas predominantemente son de grano fino, finamente laminada y de color claro. Compuesta por cuarzo sacaroidal, separada por bandas de biotitas. Son las rocas más resistentes a la meteorización y cuando se descomponen dan como resultado un suelo arenoso de color crema, donde resaltan los granos redondos de cuarzo, lo cual facilita su identificación en campo. La composición mineralógica de las cuarcitas indica que los sedimentos originales variaron de arena a limo, con un contenido variable de arcillas a partir de las cuales se formó la biotita, la coloración oscura es producto del grafito e indica condiciones reductoras durante la depositación (González, 2001).

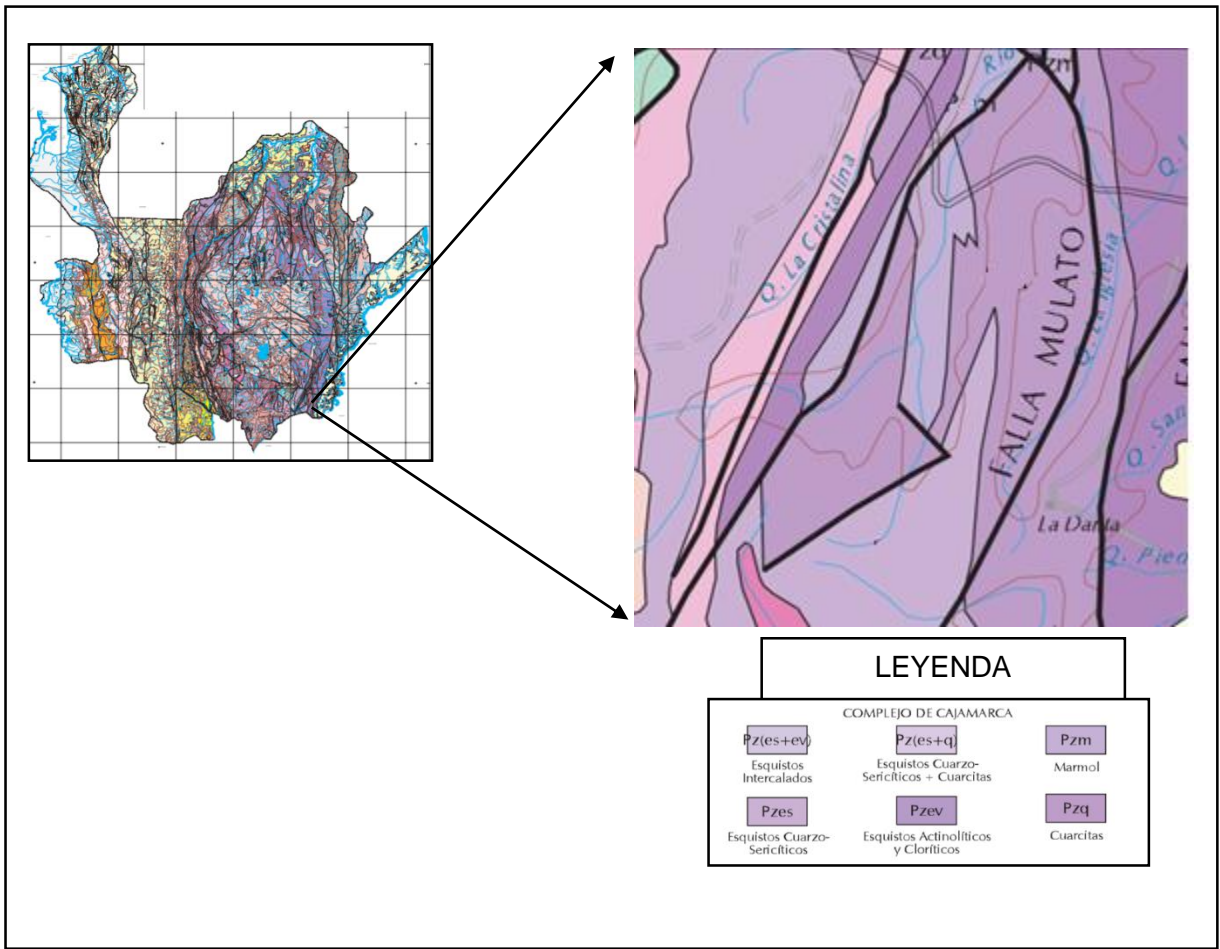


Figura 2 Geología regional de la zona de estudio. Modificado de González (2001).

Geología Local.

En el área de estudio se identificaron cuatro unidades litológicas correspondientes al Complejo Cajamarca.

El primer grupo de rocas se encuentra asociada a la unidad EVb (Pz2,Pz3) descrita por (Maya, 2001) donde habla de esquistos sericiticos, cuarcitas y mármoles en una franja del borde oriental de la Cordillera Central. El primer grupo de litología se encuentra en el sector Norte correspondiente a una roca de color rojo, con una meteorización intensa en donde se alcanzan a evidenciar minerales como moscovita, feldespato potásico, biotita y cuarzo en cantidades menores. Se denominó como esquisto micáceo, que a pesar de la intensa meteorización se logra evidenciar una esquistosidad fuerte.

El segundo grupo de rocas se encuentra asociado a la unidad EV(Pz1)3 descrita por (Maya, 2001) como un conjunto de lutitas pizarrosas, meta limolitas silíceas, mármoles, meta-areniscas feldespáticas y meta conglomerados. Ubicado hacia la parte central de la zona de estudio con una dirección NW- SE, presenta un color gris oscuro, una textura grafitosa pese a su alta meteorización, se logra evidenciar cristales de cuarzo y grafito, esta unidad fue denominada como esquisto grafitoso.

La tercera unidad se ubica hacia el SW y al igual que la unidad uno esta se encuentra asociada al grupo EVb(Pz2,Pz3) descrita por (Maya, 2001), a pesar de que es un esquisto similar al de unidad número uno, se denomina como esquisto cuarzo-sericitico por su alto contenido de cuarzo. Es una roca fuertemente meteorizada donde el cuarzo es el mineral más notorio y se observa tanto con el rumbo de la foliación como cortando la misma.

Los sitios topográficamente más bajos corresponden a la unidad de depósitos aluviales, estos son depósitos no consolidados de arenas y limos, con mala selección y sin estratificación.

Geología Estructural Regional

Las principales estructuras regionales en la zona son las fallas de rumbo (Ver figura 3). Algunas con extensión superior a 100 Km de longitud con desplazamientos medibles en docenas de kilómetros ver tabla 2. Estas fallas se encuentran confinadas entre el Batolito Antioqueño y el valle del magdalena. En su mayoría presentan dirección entre N20°W y N20°E (Feininger et al., 1972).

Sin embargo la más representativa es la Falla Palestina, que fue descrita por (Feininger et al., 1970), como una falla de rumbo con desplazamiento dextralateral que ha permanecido inactiva (Ver tabla 2).

Tabla 2 . Fallas de rumbo regionales ordenadas cronológicamente. Tomado y modificado de (Feininger et al. 1972).

NOMBRE	LONGITUD CONOCIDA	DESPLAZAMIENTO	COMENTARIOS
Jetudo	40 km	12 km	Llamada así por el nombre de una quebrada al noreste de Aquitania. En el sur está cubierta por los estratos del Terciario.
Cocorná Sur	47 km	26 km	Llamada así por el Rio Cocorná Sur
Palestina	350 km	Iluvia.7	Llamada así, por la estación de Palestina donde la cruza el Ferrocarril de Antioquia. Se cartografió fuera de II-B en fotos aéreas. El desplazamiento fue medido al norte de la Falla de Jetudo.
El Mulato	32 km	15 km	Llamada así por una quebrada al sureste de Aquitania

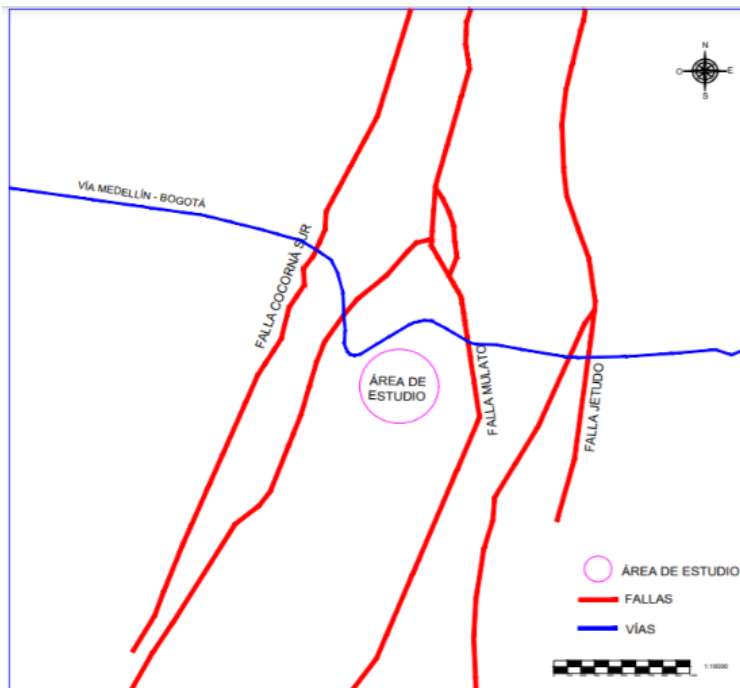


Figura 3 Fallas de rumbo regionales.

MARCO TEÓRICO

Generalidades de las Arcillas.

Las arcillas son un mineral natural complejo, constituido principalmente, por una mezcla de aluminosilicatos cristalinos pertenecientes al grupo de los filosilicatos, a los que se denominan minerales arcillosos, y de otros silicatos y minerales de hierro, calcio, titanio, etc., acompañados frecuentemente por materia orgánica (Bernal, I., H. et al. 2003). Actualmente hay gran variedad de minerales arcillosos y difieren entre sí por su forma, estructura, apilamiento de capas y por la simetría que presenta su red cristalina. Todas estas características permiten tener una amplia variación en la composición química de los minerales de arcillas, lo cual determina en gran parte el comportamiento químico del suelo, ya que es ahí, donde reposan estas arcillas en el presente trabajo.

La mayoría de los minerales arcillosos se originan como producto de la meteorización de otros silicatos, la cual es definida por (Anon,1995) como el proceso de alteración y separación de la roca y materiales del suelo, sobre y cerca de la superficie terrestre por descomposición química o desintegración física.

En este proceso en donde la roca se rompe en pequeños fragmentos, se lleva a cabo en diversas reacciones, como es el caso de la hidrólisis. Consiste en la reacción entre el agua y diversos compuestos químicos presentes en la roca, dando lugar a nuevos minerales (Suarez, 1979). Las arcillas pueden ser clasificadas en primarias y secundarias. Las primarias o residuales generalmente son de origen hipogénico, quiere decir que permanecieron en el lugar donde fueron formadas. Las arcillas secundarias, son aquellas que fueron transportadas a lugares diferentes al de su origen, entre estas se destacan:

- ° Fluviales, depositadas por ríos en un tamaño pequeño.
- ° Lacustres, depositadas en lagos de manera uniforme.
- ° Marinas, son consideradas más uniformes que las lacustres (de Pablo, 1964)

En el presente trabajo, las arcillas que son mencionadas y analizadas corresponden a arcillas primarias, ya que son producto de la meteorización de roca in situ.

Usos de las arcillas en el cemento.

Las arcillas tienen gran variedad de aplicaciones, son importantes en la industria farmacéutica, cerámica, agrícola y de fabricación de papel, sin embargo sobresalen en el sector cerámico de construcción en donde son utilizadas en la industria del cemento y como agregados ligeros (Díaz Rodríguez y Torrecillas, 2002). En los últimos años este uso ha tenido un crecimiento grande, debido a que en el proceso de fabricación del cemento, el uso de arcillas reduce el gasto energético y emite menor cantidad de CO₂

volviéndose la arcilla un aliado estratégico para la industria cementera, ya que estas son la materia prima para la creación de puzolanas artificiales, este proceso consta de la activación térmica de dichas arcillas a una temperatura de 800C°. Las puzolanas artificiales reemplazan las puzolanas de origen natural, las cuales son cenizas de origen volcánico que cada vez se agotan más en la superficie terrestre debido a su continuo aprovechamiento, estas son de gran importancia ya que en unión con el clinker presenta propiedades cementantes, por lo que reemplaza en un porcentaje significativo la presencia del clinker en la fabricación del cemento, reduciendo de esta manera el consumo de energía y la cantidad de CO₂ emitido al ambiente (Supino et al., 2016).

El proceso de fabricación del cemento comienza con una mezcla de las materias primas, que posteriormente se someten a trituración y homogenización en un horno rotatorio en funcionamiento continuo a temperaturas promedio de 1400C°, este proceso lleva consigo grandes cantidades de combustible y un consumo energético significativo. Igualmente, en dicho proceso al elevar la temperatura ocurre una serie de reacciones, entre ellas la evaporación del agua presente en las materias primas que arroja una mezcla homogenizada, esta etapa tiene como nombre clinkerización, y deja como producto el clinker, principal componente del cemento.

La palabra cemento, se aplica a todo tipo de producto o mezcla que presente propiedades adhesivas, se entiende por conglomerante un compuesto de una o varias sustancias capaces de endurecer al reaccionar con otros productos (Sanjuán y Chinchón, 2006).

Importancia de las Arcillas en el Cemento.

El cemento es el material básico más importante utilizado en la construcción y la ingeniería civil, desempeñando un papel clave a lo largo de la historia de la civilización y la urbanización.

Los procesos de fabricación vienen evolucionando atendiendo no solo las necesidades cambiantes de los usuarios, sino también mejorando el rendimiento desde la perspectiva de sostenibilidad ambiental. La producción del cemento se caracteriza por ser un proceso de alto consumo de energía y recursos. Históricamente, el principal combustible utilizado en la producción era el carbón, aunque hoy en día se utilizan combustibles fósiles y alternativos. La industria mundial del cemento es una de las principales fuentes de emisiones de dióxido carbono (CO₂) a través de la combustión, así como a través de la calcinación en la fabricación de Clinker, responsable de alrededor del 70 al 80% de la energía total consumida en producción de cemento. Se estima que la industria cementera mundial es responsable de aproximadamente el 5% de las emisiones antropogénicas de CO₂ (Worrell et al., 2001).

Comité Conjunto de Reservas de Mena (JORC).

En 1971 se constituyó el Comité Conjunto de Reservas de Mena JORC y publicó una serie de informes haciendo recomendaciones sobre la clasificación y el reporte público de reservas de mena, después de primera edición del Código en 1989. Estos establecen estándares mínimos, recomendaciones y guías para el reporte de resultados de exploración, recursos minerales y reservas de Mena en Australasia. Se publicaron ediciones revisadas y actualizadas del código en 1992, 1996, 1999 y en 2004. La edición más reciente es del 2012 la cual sustituye todas las ediciones previas. Los reportes públicos son preparados con el fin de informar a los inversionistas o potenciales inversionistas sobre los resultados de exploración y Recursos minerales (JORC, 2012).

La empresa ARGOS SA a lo largo de su recorrido como compañía cementera en Colombia se ha caracterizado por ser una compañía líder en la región, en donde las buenas prácticas les han permitido ser amigables con el medio ambiente sin dejar de lado el factor calidad/precio. A partir de esto surgió la necesidad de hacer una exploración y control de calidad de la materia prima de arcillas en la planta de Rio Claro, este proyecto pretende realizar un muestreo de calidad confiable para la compañía y sus inversionistas, donde a partir del código JORC (Ver tabla 3) se seleccionaron unos puntos fundamentales para el desarrollo del mismo, los cuales se evidenciarán a continuación.

Tabla 3 Actividades de buenas prácticas mineras según el código JORC.

Técnicas de muestreo	<ul style="list-style-type: none">• Naturaleza y calidad del muestreo (por ejemplo, canales, fragmentos aleatorios o herramientas específicas de medición especializada y estándar en la industria apropiadas a los minerales que se están investigando, tales como sondas gamma dentro de sondajes o instrumentos manuales de XRF, etc.). Estos ejemplos no deberían considerarse como límites al amplio significado de muestreo.• Incluir la referencia a las medidas tomadas para asegurar la representatividad y calibración adecuada de cualquier herramienta o sistema usado.• Los aspectos de la determinación de mineralización que son materiales para el Reporte Público. En casos en que el trabajo 'estándar de la industria' se ha hecho esto sería relativamente simple (por ejemplo 'se usó perforación de circulación inversa para obtener muestras de 1m de las que se pulverizan 3kg para producir una carga de 30g para ensayo al fuego). En otros casos se puede requerir más explicación tal como cuando hay oro grueso que tiene problemas inherentes de muestreo. Los productos o tipos de mineralización inusuales (por ejemplo, nódulos submarinos) pueden necesitar información detallada.
----------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Técnicas de Perforación	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de perforación (por ejemplo, diamantina, circulación inversa, martillo de sondaje abierto, por rotación, auger o tirabuzón, Bangka, sónico, etc.) y detalles (por ejemplo, diámetro del testigo de perforación, tubo triple o estándar, profundidad de la perforación terminada en diamantina, broca de muestreo de frente u otro tipo, si es diamantina orientada y si es así por cual método, etc.).
Recuperación de muestras de perforación	<ul style="list-style-type: none"> • Método de registro y evaluación de las recuperaciones de testigos y fragmentos y los resultados obtenidos. • Las medidas tomadas para maximizar la recuperación de muestras y asegurar la naturaleza representativa de las muestras. • Si existe una relación entre la recuperación de las muestras y la ley y si puede haber ocurrido un sesgo de muestreo debido a pérdida/ganancia preferencial del material fino/grueso.
Registros	<ul style="list-style-type: none"> • Si las muestras de diamantina y de fragmentos se han reconocido geológicamente y geotécnicamente a un nivel de detalle para soportar la estimación adecuada de Recursos Minerales, estudios de minado y estudios metalúrgicos. • Si los registros son de naturaleza cualitativa o cuantitativa. Fotografía de los testigos (o calicatas, canales, etc). • La longitud total y porcentaje registrado de las intersecciones relevantes.
Técnicas de submuestreo y preparación de muestras	<ul style="list-style-type: none"> • Si el testigo es cortado o aserrado y si se ha tomado un cuarto, la mitad o todo el testigo. • Si los no testigos han sido cuarteados, muestreados con tubo, cuarteados por rotación, etc. y si se muestrearon húmedos o secos. • Para todos los tipos de muestra, la naturaleza, calidad y la conformidad de las técnicas de preparación de muestras. • Los procedimientos de control de calidad adoptados para todas las etapas de submuestreo para maximizar la representatividad de las muestras. • Las medidas tomadas para asegurar la representatividad del muestreo del material recolectado in situ, incluyendo por ejemplo los resultados de muestras duplicados de campo/de la segunda mitad. • Si los tamaños de muestra son adecuados al tamaño de grano del material que se muestrea.

<p>Calidad de los datos de ensayos y pruebas de laboratorio</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La naturaleza, calidad y conformidad de los procedimientos usados de ensayo y de laboratorio y si la técnica es considerada parcial o total. • Para herramientas geofísicas, espectrómetros, instrumentos XRF de mano, etc. los parámetros usados para determinar los análisis incluyendo la marca y modelo del instrumento, tiempos de lectura, factores de calibración aplicados y sus derivaciones, etc. • La naturaleza de los procedimientos de control de calidad adoptados (por ejemplo estándares, blancos, duplicados, chequeos de laboratorio externo) y si se ha establecido el nivel de exactitud aceptable (es decir carencia de sesgo) y la precisión.
<p>Ubicación de los puntos de los datos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La exactitud de la calidad de los levantamientos usados para localizar los sondajes (collar y levantamientos de trayectoria de sondajes), trincheras, labores mineras y otras ubicaciones usadas en la estimación de Recursos Minerales. • Especificar el sistema de malla usada. • La calidad y lo apropiado del control topográfico.
<p>Espaciamiento de los datos y su distribución</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Espaciamiento de los datos para el reporte de Resultados de Exploración. • Si el espaciamiento de los datos y su distribución es suficiente para establecer el grado adecuado de continuidad geológica y de ley para los procedimientos de estimación de Recursos Minerales y Reservas de Mena así como las clasificaciones aplicadas.
<p>Auditorias o revisiones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Los resultados de cualquier auditoria o revisiones de las técnicas y datos de muestreo.
<p>Geología</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de depósito, marco geológico y estilo de mineralización
<p>Información de perforaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Un resumen de toda la información material para el entendimiento de los resultados de exploración incluyendo una tabulación de la siguiente información para todos los sondajes Materiales: <ul style="list-style-type: none"> • Este y norte de los collares de los sondajes • Elevación o RL (Nivel Reducido-elevación sobre el nivel del mar en metros) del collar del sondaje • Buzamiento y azimut del sondaje • Longitud del sondaje y profundidades de intercepción • Longitud del pozo • Si se justifica la exclusión de esta información sobre la base que la información no es Material y esta información no desvirtúa la comprensión del reporte, la

	<p>Persona Competente debería claramente explicar por qué es el caso.</p>
<p>Relación entre anchos de mineralización y longitudes de intersecciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Estas relaciones son particularmente importantes en el reporte de Resultados de Exploración. • Si se conoce la geometría de la mineralización con respecto al ángulo de los sondajes, se debería reportar su naturaleza. • Si no se conoce y solo se reportan las longitudes del sondaje debería haber una declaración clara para este efecto (por ejemplo 'longitud del sondaje, no se conocen los espesores verdaderos').
<p>Visitas a terreno</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Comentar sobre cualquier visita al lugar conducida por la persona competente y el resultado de esas visitas. • Si no ha habido visitas indicar por qué es el caso.
<p>Interpretación geológica</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La confianza en (o por el contrario la incertidumbre) la interpretación geológica del depósito mineral. • La naturaleza de los datos usados y todas las suposiciones hechas. • El efecto, si lo hubiera, de interpretaciones alternativas en la estimación de Recursos Minerales. • El uso de la geología en guiar y controlar la estimación de Recursos Minerales. • Los factores que afectan tanto la continuidad de ley y geológica.

RESULTADOS.

- El **anexo 1 (MAPA GEOLOGICO)** corresponde al resultado de un trabajo de campo detallado en donde se tienen en cuenta recorridos, análisis de muestras e interpretación geológica de los autores, logrando entregar la caracterización litológica del área de estudio. En donde se obtienen 4 litologías:
 - Esquisto cuarzo – Micáceo
 - Esquisto grafitoso.
 - Esquisto micáceo
 - Depósitos aluviales

Se evidencia en el mapa entregado, un patrón en la dirección de las capas, la cuales siguen una dirección general N10W.

Se observa la delimitación de un polígono correspondiente a un licenciamiento ambiental que fue otorgado a la compañía, por tal motivo, esta área representa mayor interés en el presente trabajo.

Mapa de Muestreo.

Con el fin de presentar una caracterización litológica del área de estudio se realizó una malla de perforación de tres bolillos, la cual es utilizada para realizar barrenos de explotación minera ya que esta distribución brinda una mejor energía del explosivo. Por lo tanto, en la compañía ARGOS SA se estandarizó este diseño en sus procesos tanto de exploración como la explotación, adicionalmente en esta fase la geometría de la malla puede ser de tres bolillos, cuadrangular o lineal, dependiendo del área a estudiar y del concepto geológico de profesional, la forma propuesta consiste en formar triángulos equiláteros que abarquen toda el área del licenciamiento ambiental.

En la (Figura 4) se observa tres tipos de muestras a las cuales se les realizó análisis geoquímico, los pozos de perforación tipo barreno (hasta 25 metros de profundidad) están marcados de color amarillo y se encuentran dentro del área de licenciamiento minero, por temas topográficos solo se pudo realizar muestreo en la cresta del cerro ya que el acceso al perforador en las demás áreas era limitado. De color verde se encuentran las muestras asociadas a la ahoyadora, estas muestras se realizaron por fuera del licenciamiento ambiental, dispuesto en el área de manera aleatoria y solo alcanzaron un metro de profundidad, por últimos de color azul están las muestras tomadas sobre la vía ya que se realizaron canales de 2 metros de largo para tomar la muestra en una misma litología.

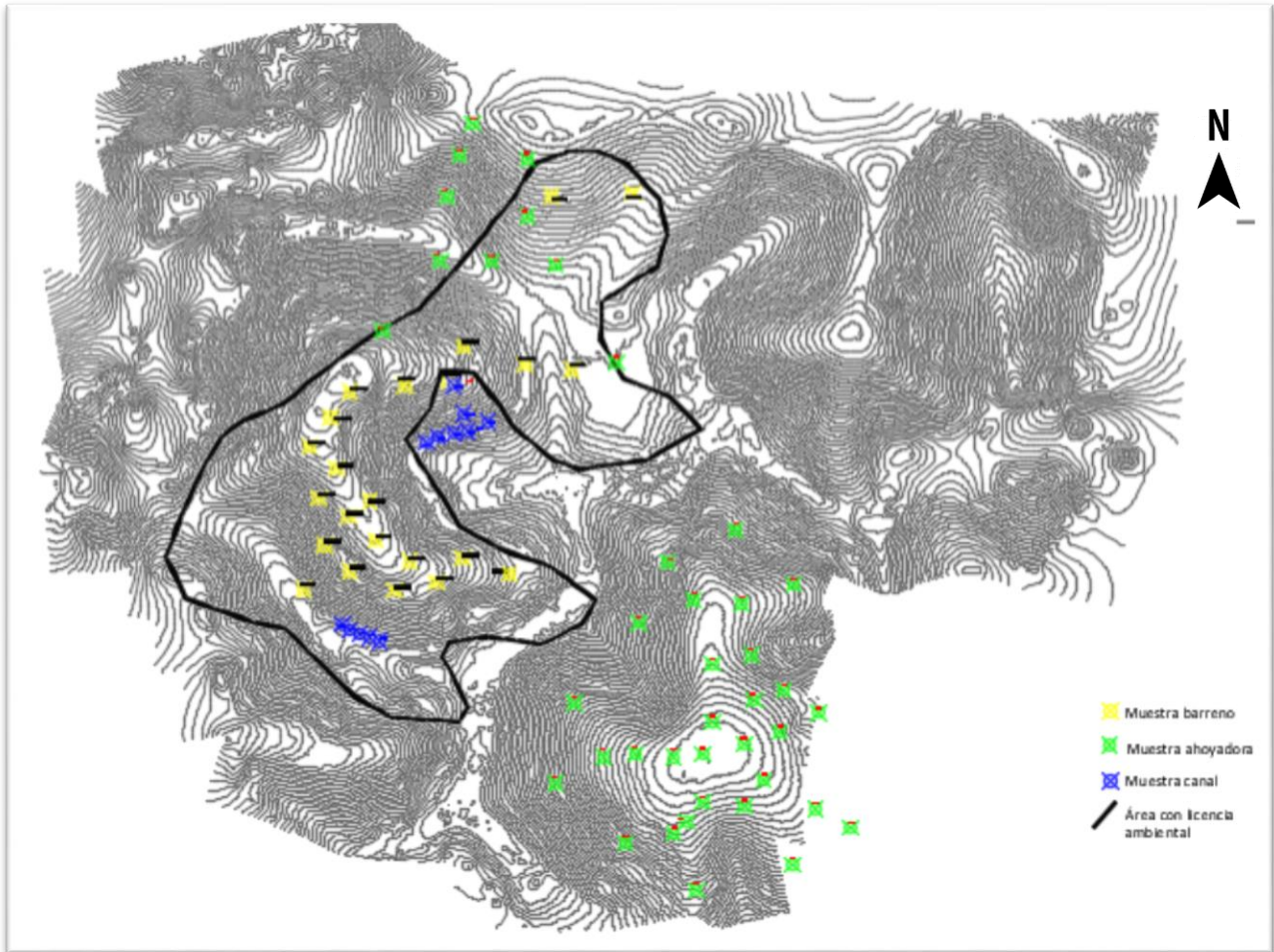


Figura 4 Localización puntos de muestreo.

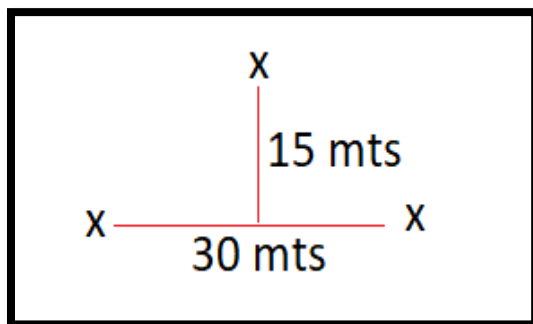


Figura 5 Distancia entre pozos exploratorios.

En la (figura 5) observa cómo estaban dispuestos los pozos de perforación, es importante tener en cuenta que las distancias son aproximadas ya que los puntos iniciales se marcaron con GPS y este podría tener un error de 4 metros aproximadamente, posterior a las perforaciones se levantaron los puntos con una estación topográfica TOPCON-ES105

Figura 5. Distancia entre pozos exploratorios.

En la tabla 4 se evidencia la cantidad de muestras analizadas según su método de recolección.

Tabla 4 Distribución de las muestras recolectadas.

METODO DE RECOLECCIÓN	CANTIDAD DE MUESTRAS
MUESTRAS AHOYADORA	41
MUESTRAS PERFORADORA	153
MUESTRAS DE CANAL	12
TOTAL DE MUESTRAS	206

Se realizó el respectivo acompañamiento con el personal encargado de la maquinaria, señalando los puntos que serían intervenidos. Durante este proceso, la empresa ARGOS SA dispuso de operarios tanto del taladro como de la máquina Retroexcavadora que abría paso en el terreno.

Siguiendo las recomendaciones del código JORC se realizó el acompañamiento y monitoreo constante tanto en el proceso de perforación como en de recolección, para así asegurarnos de que la información suministrada no tuviese alteraciones.

Se verificó que el proceso de extracción cumpliera el protocolo adecuado, el cual era el siguiente:

- Verificación con GPS punto a punto de cada estación.
- Acomodación de la superficie para la instalación de la plataforma.
- Perforación con el fin de sacar la muestra.
- Extracción de la muestra (Figura 6 – A)
- “cuarteo” de la muestra, lo cual consiste en mezclar y partir la muestra de una manera homogénea (Figura 6 – B).
- Marcación rotulada con el nombre del pozo y de la muestra.

Estos procesos se llevaron a cabo en cada punto, garantizando las buenas prácticas mineras sugeridas en el código JORC.



A

B



C

Figura 6 Procesos de extracción de muestras. A toma de muestra. B proceso de “cuarteo”. C retroexcavadora responsable de abrir caminos.

Para llevar a cabo con éxito la campaña de perforación fue necesario la intervención de maquinaria pesada (Figura 6 – C).

Se observa la forma en la cual eran extraídas las muestras, además se observa la actividad de “cuarteo” ejecutada por el personal de la empresa ARGOS SA.

Tabla 5 Valores de composición Química para 20 muestras aleatorias.

ID POZO	PROF_DESDE	PROF_HASTA	ID MUESTRA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
MD_03_20	0,00	1,00	MD_03	46,32	32	8,64
PD_14_20	18,75	22,50	PD06_14_20	32,844	31,827	16,681
MD_04_20	0,00	1,00	MD_04	44,78	31,36	8,35
MD_01_20	0,00	1,00	MD_01	46,03	31,32	8,66
PD_14_20	0,00	3,75	PD01_14_20	43,692	30,898	11,727
PD_14_20	11,25	15,00	PD04_14_20	43,544	30,61	13,093
PD_14_20	15,00	18,75	PD05_14_20	39,035	30,585	14,666
MD_15_20	0,00	1,00	MD_15	47,3	30,25	8,28
MD_02_20	0,00	1,00	MD_02	47,97	30,08	8,11
MD_35_20	0,00	1,00	MD_35	38,55	29,58	13,4
PD_16_20	3,75	7,50	PD02_16_20	35,121	29,419	16,312
MD_10_20	0,00	1,00	MD_10	47,29	29,38	8,18
PD_03_20	18,75	22,50	PD06_03_20	43,148	29,157	16,246
MD_08_20	0,00	1,00	MD_08	46,55	29,03	10,92
MD_05_20	0,00	1,00	MD_05	46,98	28,92	8
MD_26_20	0,00	1,00	MD_26	46,87	28,81	8,2
PD_23_20	7,50	11,25	PD03_23_20	37,422	28,801	17,624
MD_12_20	0,00	1,00	MD_12	46,98	28,8	7,98
MD_11_20	0,00	1,00	MD_11	47,03	28,57	8,02
PD_03_20	7,50	11,25	PD03_03_20	48,174	28,455	12,728

En la (Tabla 5) se tomaron en cuenta las 20 muestras con mayor cantidad de aluminio de 206 que fueron entregadas por el laboratorio de ARGOS SA, esta tabla está compuesta por la identificación de pozo, profundidad inicial y profundidad final a la que fue tomada la muestra, además de los valores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃.

Esta es un fragmento del **anexo 2 (BASE DE DATOS)** que es la información recopilada con los parámetros establecidos por el código JORC teniendo en cuenta parámetros como:

- Verificación de las coordenadas.
- Marcación correcta y continua de todas las muestras.
- Buena recuperación de las muestras obtenidas.

Este **anexo 2 (BASE DE DATOS)** está compuesto por un **collar, survey, assays, litho**. Teniendo en cuenta que una base de datos es una recopilación organizada de una información existente para facilitar su preservación, búsqueda y uso, en el **anexo 2** registra los datos para un uso a futuro.

En **Collar** encontramos los datos de identificación, localización, y cualquier otro dato que se quiera añadir para organizar la base de datos, por ejemplo: Autor, año, tipo de muestra, etc.

Por temas de seguridad empresarial las coordenadas X, Y, Z fueron anuladas bajo requisito de la empresa ARGOS SA

El **survey** indica datos de azimuth y buzamiento de las perforaciones realizadas.

Los datos en **assays** corresponden a la información geoquímica en porcentajes.

Litho corresponde a la información litológica en caso tal de tener la identificación de cada capa.

Las arcillas aquí presentes corresponden a suelos residuales de esquistos. Presentan horizontes de meteorización que varían entre 2 y 20 m de espesor, color pardo rojizo a pardo amarillento con decoloraciones negras y brillos de biotita. Se encuentra húmeda, no plástica y conserva parte de la textura de la roca original (Figura 7).

Deere y Patton	Descripción
IA	Se observa una pequeña capa de materia vegetal, con presencia de materia orgánica de un espesor inferior a 20 cm, lo que propicia a la infiltración en el horizonte inmediatamente inferior.
IB	Material completamente descompuesto, la parte más superior de este segmento tiene tonalidades un poco más oscuras, las cuales van degradando a medida que disminuye en la vertical, no hay evidencias del material parental.
IC	Este material conserva un poco las estructuras del material parental en la parte central del afloramiento, se evidencia unas alineaciones preferenciales y minerales arcillosos en donde hay algunos relictos de esquistosidad. Las tonalidades grisáceas en la parte central, son producto de dicho material parental.



Figura 7 Afloramiento en que se evidencia diferentes horizontes de meteorización según (Deere y Patton, 1971).

En el presente trabajo se realizaron 6 cortes, de tal modo que la dirección del corte fuera lo más ortogonal entre los perfiles geológicos. Estos cortes están representados por 4 litologías (ESQM) que refiere al esquisto cuarzo micáceo, (ESG) que es el esquisto grafitoso, (ESM) es el esquisto micáceo y por ultimo tenemos (DEP) son los depósitos aluviales. Se observan dos tonalidades en cada litología de los perfiles que hace referencia al nivel de meteorización que está presente en la roca aproximadamente de 15 a 20 metros de profundidad en las crestas y valles.

3 de ellos numerados de 1-3 (ver figura 8) que presentan dirección SW/NE y en sentido perpendicular a estos con una dirección SE/NW nombrados de la A-C (Ver figura 9). Con el fin de interpretar el comportamiento del subsuelo según los datos levantados en

superficie, se registran los niveles de meteorización presentes en la zona con sus respectivos espesores.

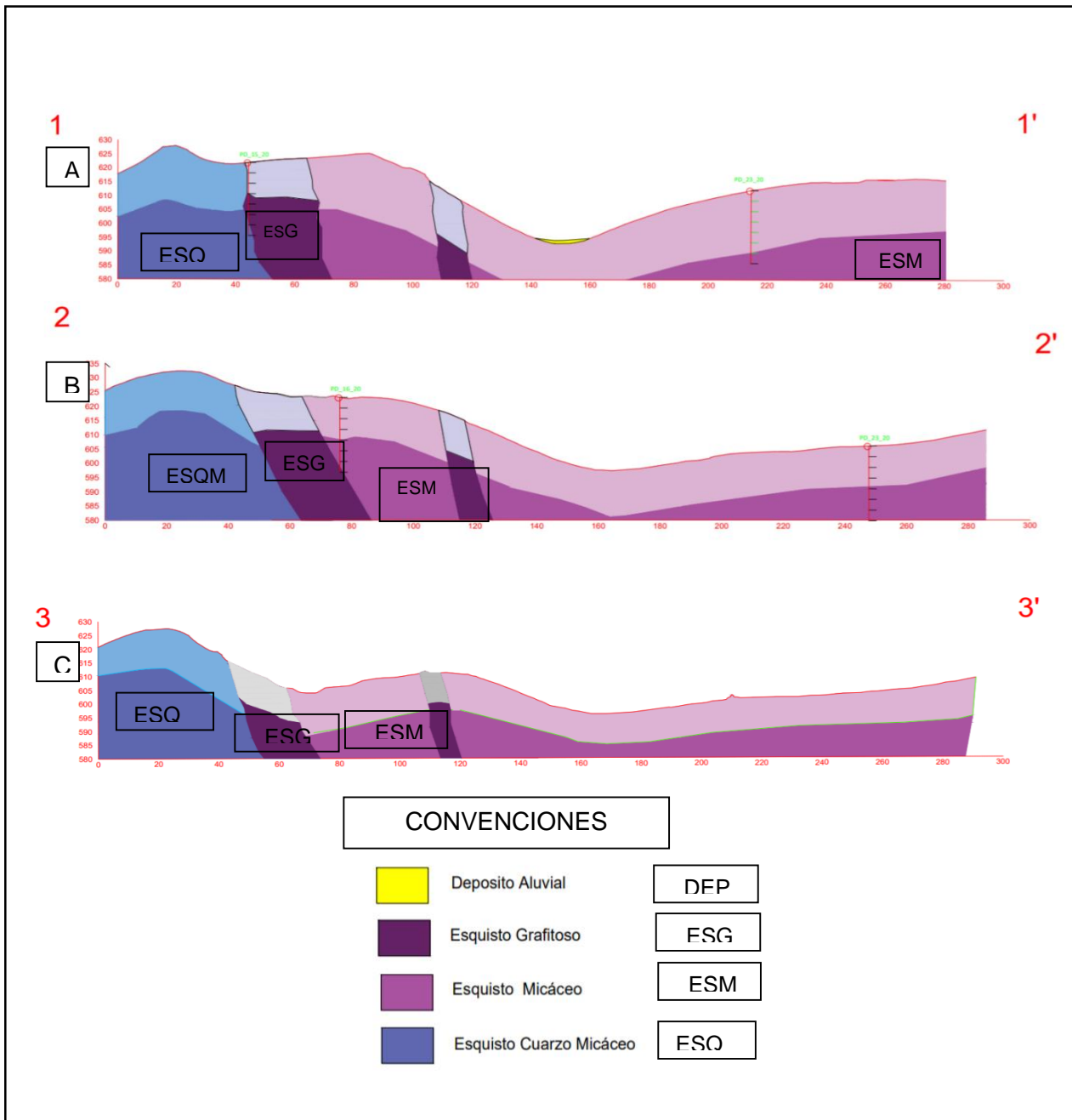


Figura 8 Cortes con dirección SW/NW. A. Corte de 1-1'. B. Corte 2-2'. C. Corte 3-3'.

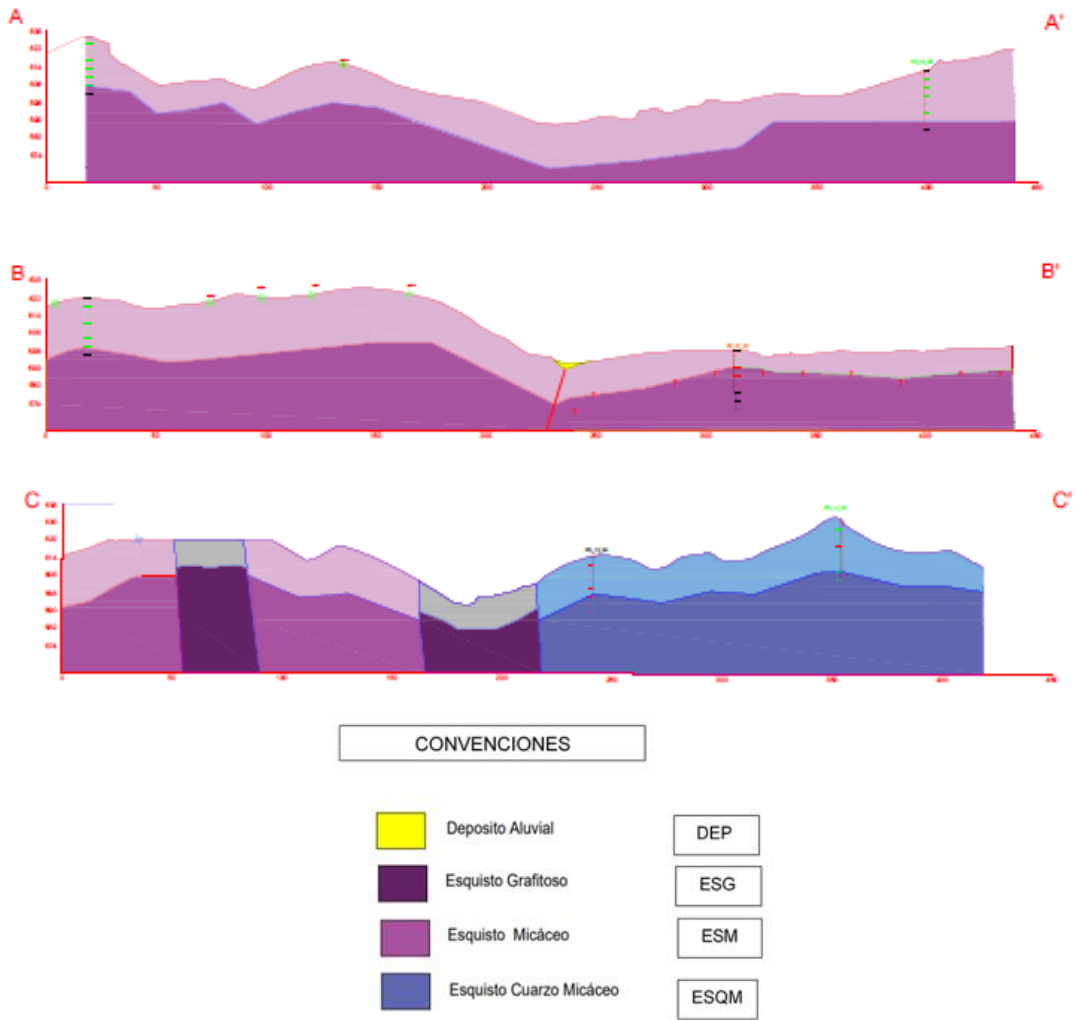


Figura 9 Cortes con dirección SE/NW. A. Corte de A -A'. B. Corte B-B'. C. Corte C-C'

DISCUSIÓN

La caracterización litológica presente en el anexo 1 se hizo teniendo en cuenta los recorridos de campo que se realizaron, en donde se tuvo en cuenta el reconocimiento superficial y con la ayuda de los pocos afloramientos se definieron unas áreas demarcadas por diferentes características. Sin embargo, fue de gran apoyo las perforaciones que se realizaron, ya que estaban distribuidas a lo largo y ancho del territorio, fue posible identificar las características químicas por zonas, correlacionando así, los resultados otorgados por el laboratorio con las características observadas en la superficie y así definir 4 tipos de rocas, cada uno de estos paquetes fueron analizados con la herramienta AutoCAD, permitiendo interpretar el comportamiento de cada uno de los grupos de rocas en la profundidad. La litología predominante en el área de estudio son las rocas metamórficas divididas en diferentes grupos de esquistos, es importante resaltar que hay presencia de unos perfiles de meteorización bastante espesos, los cuales llegan hasta 20 metros, esto favorecido por las condiciones climatológicas de la zona, ya que nos encontramos en un ambiente tropical con constantes lluvias e incrementos en la temperatura durante el día, lo que favorece a un desarrollo mas veloz de la meteorización, dando además como resultado a la generación de arcillas, las cuales se tienen en cuenta como primarias ya que son producto de la meteorización de la roca in situ.

La explotación de estas arcillas se requiere como fuente principal para el suministro de aluminio, además de hierro y sílice, para cumplir con las especificaciones en el proceso de clinkerización. Se maneja un tenor mínimo o de corte de 18% de contenido de Al_2O_3 , favoreciendo a la optimización económica ya que maximiza el beneficio de la materia prima considerando los costos de operación, de acuerdo con la información suministrada por la empresa ARGOS SA.

Según la información geoquímica recopilada de las muestras de perforación disponibles en el **anexo 2**, se logra evidenciar que 70 de las 192 muestras analizadas cumplen con las características para su optimización. Es importante tener en cuenta que esta cantidad representa toda el área de estudio, sin embargo, hay resultados geoquímicos que son afectados por características litológicas como lo es el esquisto cuarzo- micáceo, debido a la cantidad de cuarzo presente en este sector hay menos cantidad de arcillas y esto afecta la calidad de las muestras de las arcillas tomadas con el perforador, aumentando considerablemente el contenido de sílice, disminuyendo así el de óxidos de aluminio y óxidos de hierro que se encuentran asociados a las arcillas.

Por lo anteriormente mencionado el área NE del licenciamiento ambiental es la zona que representa mayores índices de óxidos de aluminio evidenciado en los pozos PD_22_20 y PD_23_20 unos valores geoquímicos de interés para explotación por su contenido de aluminio y hierro, adicionalmente en esta zona se realizó un seguimiento litológico estricto ya que representa un mayor interés económico para la compañía y se pretende hacer un minado.

En la zona SE sé realizaron 30 perforaciones con la ahoyadora, logrando bajar a un metro cada perforación, alcanzando identificar otra posible área con potencial de arcillas, se aprecia una continuidad del esquisto micáceo y baja presencia de cuarzo en esta área, lo que proponemos como una zona para extender el licenciamiento ambiental. En el costado W del área de estudio se aprecia un esquisto cuarzo micáceo el cual presenta una alta influencia por SiO_2 que se encuentra presente en las fracturas, asociamos este comportamiento a las fallas y estructuras que se encuentran presentes en esta zona, hay un comportamiento similar de esta litología en el sur, pero por cuestiones de licenciamiento ambiental no representa importancia económica igualmente se deja caracterizada la zona para un futuro estudio en esta área.

Las siguientes gráficas de correlación Fe_2O_3 vs Al_2O_3 y Al_2O_3 vs SiO_2 son diagramas de Harker, el cual es una gráfica que permite la comparación de análisis de diferentes muestras geoquímicas entre los cuales está el porcentaje de SiO_2 en el eje X versus un óxido, en este caso tomamos en cuenta Al_2O_3 y Fe_2O_3 en el eje Y.

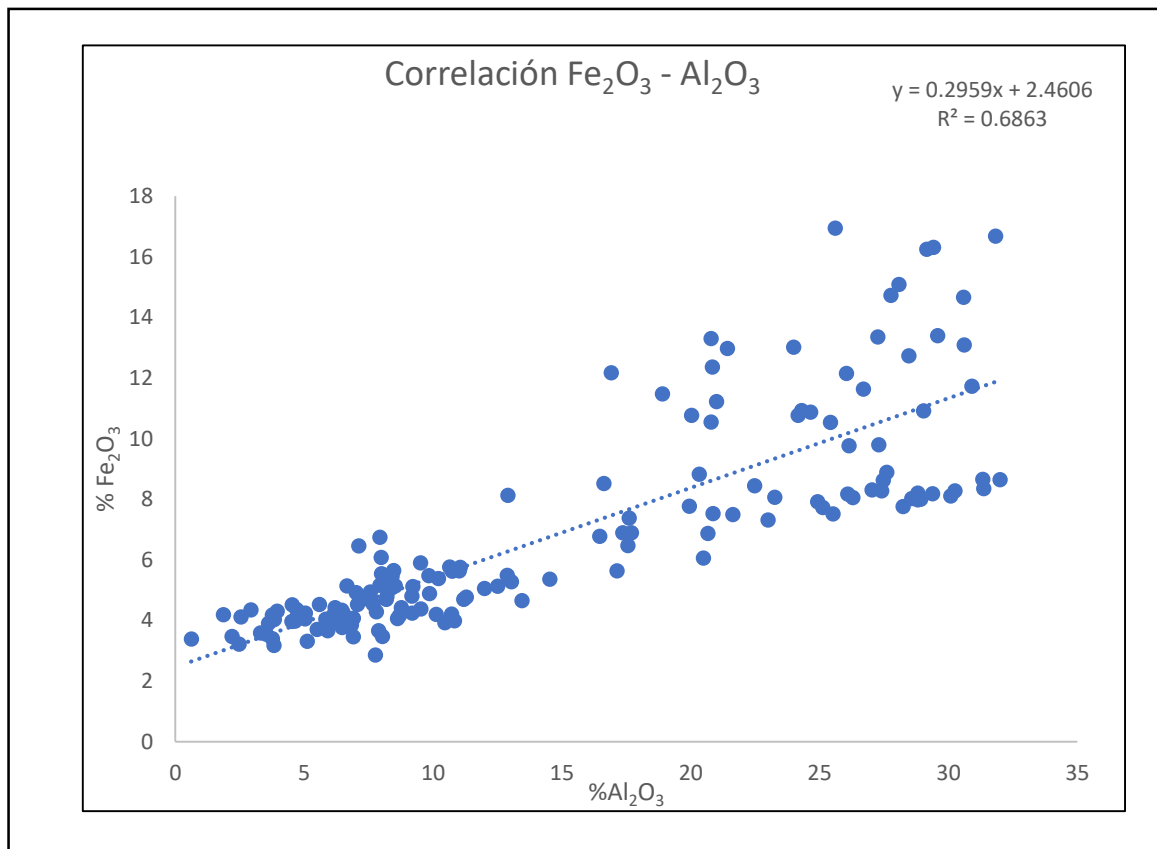


Figura 10 Correlación Fe_2O_3 Vs Al_2O_3

Como se mencionó anteriormente los óxidos de aluminio y de hierro son el punto de referencia para determinar si las arcillas son óptimas para ser usadas como materias primas en la producción del cemento verde, en la figura 9 se observa una pendiente positiva, donde muestra que a mayor contenido de Fe_2O_3 , también aumenta el contenido de Al_2O_3 . Esta relación es importante ya que nos pueden ayudar a entender y definir una mineralogía con la presencia del hierro y aluminio. En la figura 10 se observan muestras tomadas en diferentes áreas de la zona de estudio los valores con más del 20% de Al_2O_3 corresponden a la litología descrita como esquisto micáceo, en cambio los valores menores a un 15 % corresponden a la litología descrita como esquisto cuarzo sericitico y esquisto grafitoso. Es necesario tener en cuenta que estos datos químicos corresponden a un área en donde se tiene un enriquecimiento en estos dos componentes, lo más probable es que sea debido al protolito del cual provenía la roca, en este caso el esquisto, y que la meteorización ha favorecido las condiciones para que pueda acumularse y conservarse el óxido de aluminio y de hierro. También nos lleva a confirmar el origen de los esquistos que tenemos en superficie, ya que otros autores habían nombrado que estar rocas provenían de un origen pelítico, y con esta ilustración se verifica, ya que es menos posible que una roca ígnea contenga tan altos contenidos de aluminio.

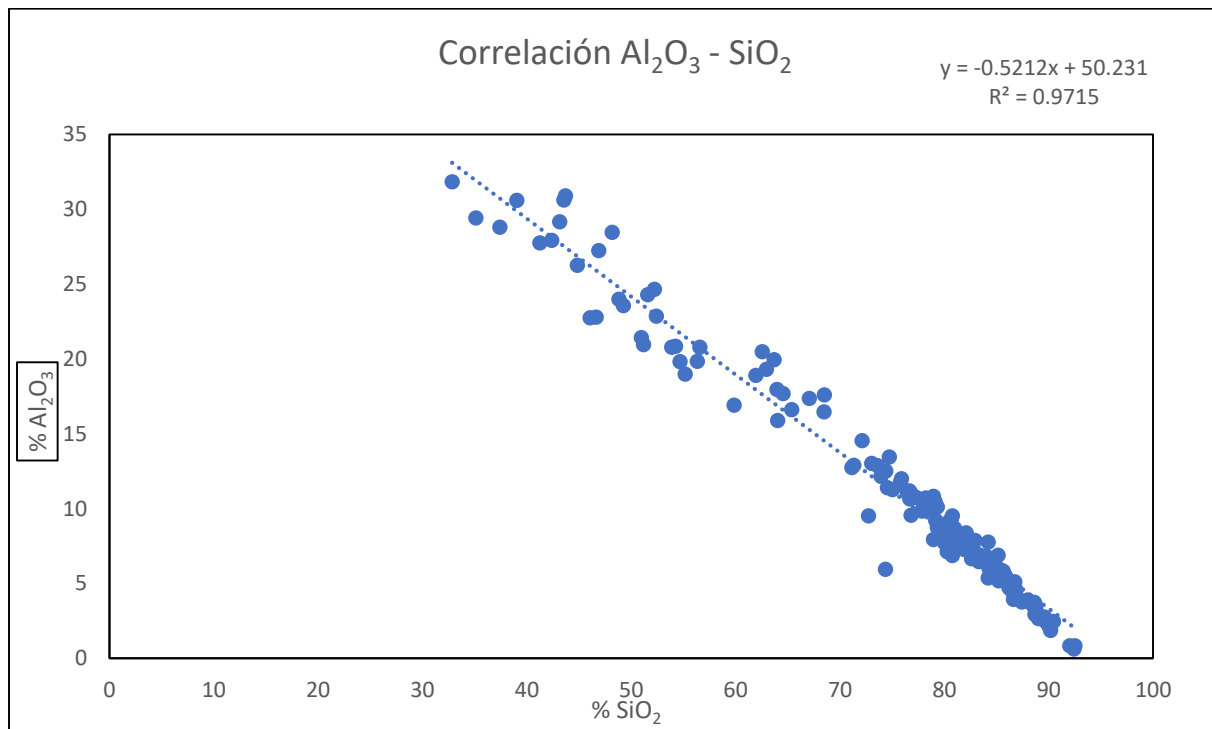


Figura 11 Correlación Al_2O_3 Vs SiO_2

En la figura 11 se observa una gráfica de dispersión de puntos en la cual en el eje Y se encuentra el porcentaje de aluminio que contiene la muestra, y en el eje X corresponde al porcentaje de sílice que contiene la muestra, se logra evidenciar que a mayor cantidad de sílice en la muestra el porcentaje de aluminio es menor evidenciando una correlación con pendiente negativa.

Es claro que la producción del cemento constituye un porcentaje significativo de emisión de CO₂, sin embargo, es una industria fundamental para el desarrollo de las regiones, por tal motivo la empresa ARGOS SA es pionera en Colombia, en materia de evolución y transformación de sus tecnologías con el fin de lograr un equilibrio sustentable. Debido a la problemática ambiental en la que nos encontramos actualmente, estos procesos son de gran importancia e interés para las compañías competentes, debido a que constantemente buscan estrategias para reducir el impacto ambiental, y como se explicó anteriormente, la compañía ARGOS SA está sustituyendo clinker por puzolana artificial que se deriva de la calcinación de arcillas con alta concentración en aluminio, teniendo en cuenta que la fabricación del cemento emite un 5% de emisión de CO₂ mundial y la fabricación del clinker es el 85% de las emisiones, se calcula que al migrar por nuevas tecnologías como el uso de arcilla para producir cemento, se estaría disminuyendo un 38% de las emisiones con relación a la producción de clinker siendo un aproximado de 710.6 millones de toneladas anuales que se están dejando de emitir a la atmosfera. Por lo anterior es de gran importancia este trabajo ya que es una alternativa para continuar con el progreso, sin afectar el desarrollo económico y lo más importante minimizando fuertemente las consecuencias ambientales.

CONCLUSIONES

- Se caracterizaron las arcillas del área de estudio con base en la geoquímica definida, con el fin de ser usadas como materia prima en la fabricación de puzolanas artificiales.
- Se hallaron sectores con enriquecimientos anormales de elementos que puedan ser perjudiciales para la calidad de las arcillas, esto con el fin de alertar cambios de calidad de la materia prima que puedan afectar el proceso de selección.
- Se comprobó que las arcillas de Campo Diamante cumplen con las características químicas para ser utilizadas como materia prima en la fabricación de puzolanas artificiales, producto utilizado en la producción del cemento verde.
- La adición de puzolanas artificiales en el proceso de fabricación de cemento verde, contribuye a un desarrollo económico ambientalmente amigable, ya que está contribuyendo de manera positiva a un proceso necesario como lo es la fabricación del cemento, disminuyendo el porcentaje de contaminación comúnmente conocido.
- Se definen las arcillas del sector NE como materia prima ideal en la fabricación de puzolanas artificiales, siendo estas las de la composición más óptima para dicho proceso.

REFERENCIAS

- Anon. (1995). The description and classification of weathered rock for engineering purposes. Geological Society Working Party Report. Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 207-242
- Bernal, I., H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica & J. Quintero. 2003, "Análisis próximo de arcillas para cerámica". Rev. Acad. Colomb. Cienc. 27: 569-578.
- Joint Ore Reserves Committee of The Australian institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientist and Minerals Council of Australia. (2012). *The JORC Code*.
- Pablo, L. (1964). Las arcillas: I. Clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales. In *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* (Vol. 27, Issue 2). <https://doi.org/10.18268/bsgm1964v27n2a1>
- Deere, D.U., Patton F.D. 1971. Slope stability in residual soils. En Proc., Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico. Vol. 1, Pág. 87-170.
- Díaz Rodríguez, L. A., & Torrecillas, R. (2002). Cerámica y Vidrio de sus distintos tipos , significados y aplicaciones. *Boletín de La Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio*, 41, 459–470. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/4676/1/arcillas.pdf>
- Feininger, T., Barrero, D., & Castro, N. (1970). Mapa Geológico del Oriente de Antioquia (Hojas I y II). Cuadrángulo I9 y parte de lo cuadrángulos H-9, H-10, I-10, J-9 y J-10. Escala 1:100.000. *Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas*, 2–3.
- Feininger, T., Barrero, D., & Castro, N. (1972). Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (Sub-Zona II-B). *Boletín Geológico*, 20(2), 1–173. <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/321>
- González, H. (2001). *Mapa Geológico del Departamento de Antioquia*. http://190.109.167.188:83/imagenes/SIAD/LI_GEO_EST_MAP_MAPA_GEOLOGICO_DE_ANTIOQUIA_400MIL_SEMA.PDF
- Maya, M. (2001). DISTRIBUCIÓN, FACIES Y EDAD DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS EN COLOMBIA. *Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas*, January 2001, 60.
- Sanjuán, Á., & Chinchón, S. (2006). Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland. In *Nucleic Acids Research* (Vol. 34, Issue 11). <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/45347>
- Suarez, F. (1979). *Conservacion De Suelos*. (M. de la Cruz (ed.); 3rd ed.). <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6112>
- Supino, S., Malandrino, O., Testa, M., & Sica, D. (2016). Sustainability in the EU cement industry: The Italian and German experiences. *Journal of Cleaner Production*, 112, 430–442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.022>
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM THE GLOBAL CEMENT INDUSTRY. *Carbon*, 26, 303–329. <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.energy.26.1.303>