

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ECONÓMICO DE LAS ARCILLAS EN LA
INDUSTRIA CEMENTERA A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL MODELO DE
CALIDAD, EN EL SECTOR ALTO RICO, MUNICIPIO DE SONSÓN – ANTIOQUIA**

DIANA MARCELA RAMÍREZ MERIÑO

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA DEL ÁREA ANDINA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
VALLEDUPAR - CESAR
2017**

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ECONÓMICO DE LAS ARCILLAS EN
LA INDUSTRIA CEMENTERA A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL
MODELO DE CALIDAD, EN EL SECTOR ALTO RICO, MUNICIPIO DE
SONSÓN – ANTIOQUIA**

DIANA MARCELA RAMÍREZ MERIÑO

**Informe de trabajo de grado realizado en la modalidad de proyecto de
investigación para optar al título de Ingeniero Geólogo**

DIRECTOR

ELÍAS ERNESTO ROJAS MARTÍNEZ

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA DEL ÁREA ANDINA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
VALLEDUPAR - CESAR
2017**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Para toda mi familia, especialmente a mis padres Dinael Ramírez Jiménez y Martha Isabel Meriño Molina, por el amor y apoyo incondicional que todos los días de la vida me brindan.

DIANA MARCELA RAMÍREZ MERIÑO

AGRADECIMIENTOS

Esencialmente doy gracias a Dios por darme la sabiduría, paciencia y tenacidad para lograr la culminación de este proyecto de grado.

A mis padres por brindarme la oportunidad de crecer para ser alguien productivo y tener las herramientas necesarias para afrontar las adversidades de la vida.

Asimismo agradezco toda la colaboración, tiempo y apoyo brindado por:

Elías Ernesto Rojas Martínez director temático de esta investigación, por liderar este proyecto, el apoyo y la confianza que me brindó durante el desarrollo de la misma.

La Fundación Universitaria del Área Andina por la formación integral, los servicios y herramientas prestadas para hoy alcanzar una meta que es el principio de una nueva etapa en mi vida.

La empresa SOLUCIONES EN GEOLOGÍA Y MINERÍA S.A.S. por apoyarme y facilitarme los datos necesarios para la realización de este proyecto, al Ingeniero Geólogo Rafael Antonio Saavedra Gómez quien me brindó su conocimiento y apoyo para poder finalizarla con éxito.

Y a todas las personas que confiaron en mí y me enviaron sus mejores deseos para que terminara esta meta.

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO.....	12
RESUMEN.....	15
ABSTRACT	16
INTRODUCCIÓN.....	17
1 PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA.....	18
1.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA.....	18
1.2 ASPECTOS ESTRATÉGICOS	18
1.3 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL.....	19
1.4 PORTAFOLIO DE PRODUCTOS Y SERVICIOS.....	20
2 INFORME DE PRÁCTICAS.....	20
3 TITULO.....	24
3.1 DESCRIPCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
3.2 JUSTIFICACIÓN	25
3.3 OBJETIVOS	26
3.3.1 Objetivos Generales	26
3.3.2 Objetivos Específicos	26
4 METODOLOGÍA.....	27
5 MARCO TEÓRICO.....	29
5.1 ANTECEDENTES.....	29
5.2 MARCO GEOGRÁFICO	29
5.2.1 Localización del área de estudio.....	29
5.3 MARCO CONCEPTUAL.....	30
5.3.1 Geología Regional.....	30
5.3.2 Geología Local	34
5.3.3 Geología Estructural.....	39
5.3.4 Perfil de Meteorización	39
6 ETAPA EXPERIMENTAL	41
6.1 TRABAJO DE CAMPO	41
6.2 Columna perfil de meteorización a partir de núcleos de perforación	43
6.2.1 Perfil de meteorización PA-01	43

6.2.2	Perfil de meteorización PA-02	44
6.2.3	Perfil de meteorización PA-03	45
6.2.4	Correlación de los perfiles de meteorización.....	46
6.3	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	46
6.3.1	Análisis Estadístico.....	47
6.3.2	Análisis Geoestadístico	47
6.3.3	Estimación.....	48
7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
7.1	MODELO DE CALIDAD.....	50
7.2	ISÓPACOS.....	50
7.3	MODELO DE BLOQUES.....	53
7.4	ANÁLISIS DE DATOS	54
7.4.1	Compósitos	54
7.4.2	Análisis de datos exploratorios (EDA).....	57
7.4.3	Variografía.....	64
7.5	ESTIMACIONES	69
	CONCLUSIONES	73
	RECOMENDACIONES.....	75
	REFERENCIAS	76
	BIBLIOGRAFÍA.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estructura Organizacional de la empresa	19
Figura 2 Metodología de trabajo empleada.....	27
Figura 3 Localización geografía zona de estudio	30
Figura 4 Geología regional de la zona de estudio	31
Figura 5 Unidades litológicas en la zona de estudio	34
Figura 6 Gneis meteorizado con minerales máficos oxidados.....	35
Figura 7 Anfibolita meteorizada	36
Figura 8 Intrusivo de composición tonalítica	37
Figura 9 Sedimentos terciarios presentes en el área de estudio	38
Figura 10 Clasificación perfil de meteorización	40
Figura 11 Metodología de muestreo	41
Figura 12 Localización puntos de muestreo.....	42
Figura 13 Columna perfil de meteorización PA-01	43
Figura 14 Columna perfil de meteorización PA-02	44
Figura 15 Columna perfil de meteorización PA-03	45
Figura 16 Correlación de perfiles de meteorización	46
Figura 17 Superficies modeladas perfil de meteorización	50
Figura 18 Isópacos horizonte III-IV	51
Figura 19 Isópacos horizonte V	52
Figura 20 Isópacos horizonte VI	53
Figura 21 Histograma de intervalos de muestreo en base de datos.....	55
Figura 22 Diagrama de caja y bigotes.....	56
Figura 23 Histograma de frecuencias (inferior)	56
Figura 24 Histogramas comparativo horizontes de meteorización Al_2O_3	58
Figura 25 Comparativo gráfico caja y bigotes horizontes de meteorización Al_2O_3	59
Figura 26 Histograma de frecuencias Fe_2O_3 totalidad de muestras	60
Figura 27 Distribuciones Fe_2O_3 entre las diferentes configuraciones de análisis.....	61
Figura 28 Histograma de frecuencias SiO_2 totalidad de muestras.....	62
Figura 29 Histogramas de frecuencia SiO_2 configuraciones de análisis b y c.....	63
Figura 30 Variograma eje mayor Al_2O_3	64

Figura 31 Variograma eje intermedio Al_2O_3	65
Figura 32 Variograma dirección principal Fe_2O_3	65
Figura 33 Variograma dirección secundaria Fe_2O_3	66
Figura 34 Variograma eje mayor SiO_2	66
Figura 35 Variograma eje intermedio SiO_2	67
Figura 36 Estimación Al_2O_3	69
Figura 37 Estimación Fe_2O_3	70
Figura 38 Estimación SiO_2	70

LISTA DE GRÁFICAS

Tabla 1 Recursos Humanos Área de Geología	21
Tabla 2 Recursos Físicos	21
Tabla 3 Cronograma de Actividades	22
Tabla 4 Distribución de las muestras	42
Tabla 5 Espesores promedios horizontes de meteorización	51
Tabla 6 Resumen estadístico longitud de muestreo.....	54
Tabla 7 Resumen estadístico contenido de Al_2O_3	58
Tabla 8 Resumen estadístico comparativo horizontes de meteorización Al_2O_3	59
Tabla 9 Parámetros estadísticos SiO_2 muestras totales.....	63
Tabla 10 Resumen parámetros geoestadísticos Al_2O_3	68
Tabla 11 Resumen parámetros geoestadísticos Fe_2O_3	68
Tabla 12 Resumen parámetros geoestadísticos SiO_2	68
Tabla 13 Valores de composición química límite y media de puzolanas sintéticas en la industria cementera	71

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Columna perfil de meteorización núcleo de perforación PA-01

Anexo B. Columna perfil de meteorización núcleo de perforación PA-02

Anexo C. Columna perfil de meteorización núcleo de perforación PA-03

Anexo D. Correlación de los perfiles de meteorización de los núcleos de perforación

GLOSARIO

ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS (EDA): procedimiento previo a la estimación, donde se realiza un análisis estadístico de los datos disponibles a partir del cálculo de compósitos con el objetivo de caracterizar el comportamiento estadístico de las variables en el depósito y en las unidades geológicas que lo integran.

ANILOS DE LIESEGANG: son bandas o anillos concéntricos causados por la precipitación rítmica de fluidos saturados en las rocas.

ARCILLAS: silicato de aluminio hidratado, en forma de roca plástica, impermeable al agua y bajo la acción del calor se deshidrata, endureciéndose mucho.

COMPÓSITOS: procedimiento mediante el cual las muestras de los análisis se combinan en intervalos regulares (igual longitud), que no coinciden con el tamaño inicial de las muestras.

CORRELACIÓN: establecimiento de correspondencia en carácter y posición estratigráfica entre dos unidades geológicas.

CURTOSIS ESTANDARIZADA: miden la mayor o menor concentración de los datos alrededor de la media.

DIAGRAMA DE CAJA Y BIGOTES: presentación visual que describe varias características importantes, al mismo tiempo, tales como dispersión y simetría.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX): técnica más eficaz para el análisis cualitativo y cuantitativo de fases cristalinas de cualquier tipo de material, tanto natural como sintético.

DISTRIBUCIÓN NORMAL: distribuciones de probabilidad de variable continua que con más frecuencia aparece aproximada en fenómenos reales.

EFFECTO PEPITA: representa la variabilidad en las distancias más pequeñas que la distancia típica de la muestra, incluyendo error de medición.

ESTIMACIÓN: determinación de la cantidad de materia prima contenida en un yacimiento o en una de sus partes.

GEOESTADÍSTICA: estudia muestras distribuidas en el espacio con base en modelos aleatorios.

HISTOGRAMA: representa la distribución de frecuencias de una variable continua.

HORIZONTES DE METEORIZACIÓN: secuencia de horizontes cada uno de los cuales posee características físicas, químicas y mecánicas diferentes como resultado de la descomposición de las rocas.

INVERSO DE LA DISTANCIA (IDW): método analítico para la interpolación de los valores de la variable de interés en puntos no muestreados.

ISOLÍNEAS: representación gráfica planimétrica de un volumen tridimensional y cuyas líneas conectan puntos de igual valor.

ISÓPACOS: representación gráfica planimétrica de un volumen tridimensional y cuyas líneas conectan puntos de igual valor.

KRIGING: consiste en encontrar la mejor estimación lineal insesgada de un bloque o zona V considerando la información disponible.

LITODEMA: cuerpo definido de roca, predominantemente intrusivo, con metamorfismo de alto grado o muy deformado, que se distingue y delimita por sus características líticas.

MODELO DE BLOQUES: discretización del espacio 3D en bloques o celdas tridimensionales, cada celda contiene los atributos (litología, tipo de mineralización y las mediciones (leyes, propiedades físico mecánicas) del dominio geológico en que se encuentra.

MODELO ESFÉRICO: este es lineal en el origen y con presencia de meseta, este modelo alcanza su meseta para un valor finito $h = a$.

MODELO EXPONENCIAL: modelo similar al esférico pero asciende más abruptamente, tiene más curvatura y alcanza la meseta C sólo en forma asintótica.

MODELO GEOLÓGICO: representación tridimensional de un volumen de rocas, representa la litología, mineralización, alteración u otro tipo de característica geológica del macizo rocoso.

MUESTREO SISTEMÁTICO: proceso de muestreo encaminado a determinar la composición (cuantitativa y cualitativa) de un depósito mediante la toma de muestras en intervalos regulares de tiempo o espacio.

PUZOLANAS: son materiales naturales o artificiales de silíceo amorfos o alúmino silíceos.

RANGO O ALCANCE: distancia en la que el variograma alcanza la meseta y también donde las variables no están más correlacionadas.

RELICTO: formado en el pasado (sedimento, suelo, estructura, mineral), bajo condiciones diferentes a las actuales, y que se ha conservado hasta la actualidad.

SAPROLITO: roca que se ha meteorizado a tal grado que constituye una masa de arcilla o grava donde todavía se pueden ver estructuras de la roca original.

SEMIVARIOGRAMA: herramienta central de la geoestadística que permite analizar el comportamiento espacial de una propiedad o variable sobre una zona dada.

SILL: valor en el cual la función que es creciente alcanza su límite.

SUELO RESIDUAL: se forman en el sitio por procesos de meteorización física y química y se desarrollan principalmente, en condiciones tropicales húmedas.

RESUMEN

Este trabajo tiene como fin primordial determinar el potencial económico de arcillas del sector Alto Rico, mediante una relación entre la calidad estimada a partir de los análisis de laboratorio evaluada a partir de las muestras recolectadas en una campaña de exploración del subsuelo en el departamento de Antioquia.

Para la realización de esta investigación se consultaron materiales bibliográficos referentes al uso de arcillas en la industria cementera. Posteriormente, se realizaron las columnas estratigráficas de las perforaciones y su respectiva correlación litoestratigráfica para evidenciar la continuidad de las arcillas. Se realizó el análisis de los datos de laboratorio, utilizando diversos enfoques (estadística descriptiva, geoestadística) los cuales proporcionaron información acerca de la variación en las variables estudiadas (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2), determinando que estas tienen un comportamiento matemático diferente.

El análisis geoestadístico permitió concebir y graficar la distribución espacial de la variabilidad de las propiedades evaluadas, con esto se determinaron los parámetros de estimación necesarios para cada una de las variables estudiadas aplicando los métodos de interpolación kriging para obtener el comportamiento de las variables estudiadas en los puntos no muestreados y el método inverso de la distancia (IDW).

Se llevó cabo la construcción del modelo de calidad para determinar el potencial de las arcillas dando como resultado en las variables estudiadas porcentajes ideales para ser usadas en la industria cementera como puzolanas sintéticas.

Palabras Clave: Arcillas; Puzolanas; Geoestadística; Estimación; Kriging; IDW.

ABSTRACT

This work has as a primordial to determine the economic potential of clays of the sector Alto Rico, through a relation between the quality estimated from the laboratory analysis evaluated from the samples collected in a campaign of exploration of the subsoil in the state of Antioquia.

For the accomplishment of this investigation consult bibliographical materials referring to the use of clays in the cement industry. Subsequently, the stratigraphic columns of the perforations and their respective lithostratigraphic correlation were made to evidence the continuity of the clays. The analysis of the laboratory data was carried out using different approaches (descriptive statistics, geostatistics), which provided information about the variation in the studied variables (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2), determining that they have a different mathematical behavior.

The geostatistical analysis allowed to conceive and graph the spatial distribution of the variability of the evaluated properties, with the determined the necessary estimation parameters for each one of the variables studied applying the kriging interpolation methods to obtain the behavior of the variables studied in the Points and the inverse method of distance (IDW).

The construction of the quality model was carried out to determine the potential of the clays resulting in the studied variables ideal percentages to be used in the cement industry as synthetic pozzolans.

Keywords: Clays; Pozzolans; Geostatistics; Estimation; Kriging; IDW.

INTRODUCCIÓN

Las puzolanas sintéticas a partir de arcillas han recibido especial atención en años recientes en la industria cementera. Se conoce que estas adiciones, cuando se añaden a morteros y hormigones, mejoran tanto su resistencia mecánica como su durabilidad.

Dentro de las puzolanas usadas para la fabricación de cementos mezclados y de hormigones, con vista a mejorar sus propiedades durables, se encuentran las arcillas. Varios han sido los trabajos que han estudiado sus aportes favorables, al ser utilizada como sustituyente del cemento Portland ordinario. Se ha demostrado que el uso de arcillas acelera la hidratación del cemento Portland y disminuye el contenido de hidróxido de calcio en las mezclas, mejora la permeabilidad y por tanto reduce la penetración de ion cloruro en hormigones expuestos al contacto con agua de mar, así como que aumenta la resistencia frente a ataque de sulfatos.

Con esta investigación se pretende dar un conocimiento para evaluar el potencial de un depósito de arcillas en el departamento de Antioquia, a partir de geoestadística, análisis químicos DRX y resultados del modelo de calidad y con base en éstos, determinar cómo se comportan las variables estudiadas en el área de interés.

La Geoestadística ha sido ampliamente utilizada internacionalmente y se ha extendido en la actualidad a otros campos de las ciencias que presentan problemas de estimación; el uso de estas técnicas de estimación ha estado limitado a la incursión empírica de especialistas, tomando auge en las empresas geo-mineras y en las instituciones relacionadas con las Ciencias de la Tierra en general. La aplicación de esta herramienta en el campo de la minería permite determinar el comportamiento de cualquier variable en el espacio con el objeto de tomar la mejor decisión posible frente a una incertidumbre, con base en los conocimientos teóricos de esta ciencia se puede determinar el potencial económico de las arcillas del sector Alto Rico en el departamento de Antioquia.

De acuerdo con lo anteriormente dicho, el desarrollo de este proyecto constituye un reto como estudiante de ingeniería de geológica, además sirve de base para futuras investigaciones que pretendan un mejor conocimiento en la determinación del potencial económico de arcillas para ser usadas en la industria cementera.

1 PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA

Es una empresa especializada en las perforaciones y consultoría de prospección, exploración, modelación, simulación, optimización, planificación y explotación de yacimientos, basándose en la determinación de las características físicas, químicas y tridimensionales de los depósitos metálicos y no metálicos, además, cuantificar y evaluar el comportamiento de las anomalías minerales por medio de herramientas estadísticas y geoestadísticas, este proceso realizado por medio de software especializados y certificados internacionalmente como Minesched, Surpac, Arcgis, entre otros. El personal de la empresa cuenta con toda la formación y experiencia requerida para los estudios que se realicen, buscando tener un buen acompañamiento y apoyados en un excelente manejo de softwares que generan precisión en cada uno de los proyectos, con profesionales que cuentan con años de experiencia en el sector complementados a talentos jóvenes del área de la ingeniería.

1.1 BREVE RESEÑA HISTÓRICA

2009: Nace la idea de negocio “Design and Modeling”.

2011: Se constituye como empresa con el nombre de “Soluciones Geomineras”, dando inicio a su trayectoria con cuatro (4) personas como capital humano.

2013: Es adquirida por su principal accionista convirtiéndose en “Soluciones en Geología y Minería”. Finaliza el año con dos (2) nuevos inversionistas e incrementa su planta de personal a 15 empleados.

2014: Aumenta su infraestructura física y tecnológica.

2015: Inicia el año con 25 empleados. Incluye dentro de su Plan de Acción 2015, implementar la Norma Técnica Colombiana NTCISO 9001:2008 Sistema de Gestión de Calidad. Para el Cuarto Trimestre, inicia con la certificación en las Normas ISO 14001:2004, NTC OHSAS 2007 y RUC 2015.

1.2 ASPECTOS ESTRATÉGICOS

Misión:

Generamos conocimiento y soluciones ingenieriles en Geología, Minería y Topografía, mediante el trabajo comprometido e idóneo de nuestro capital humano, apoyados en el uso de tecnología vanguardista y con un enfoque claro en superar las expectativas de nuestros clientes.

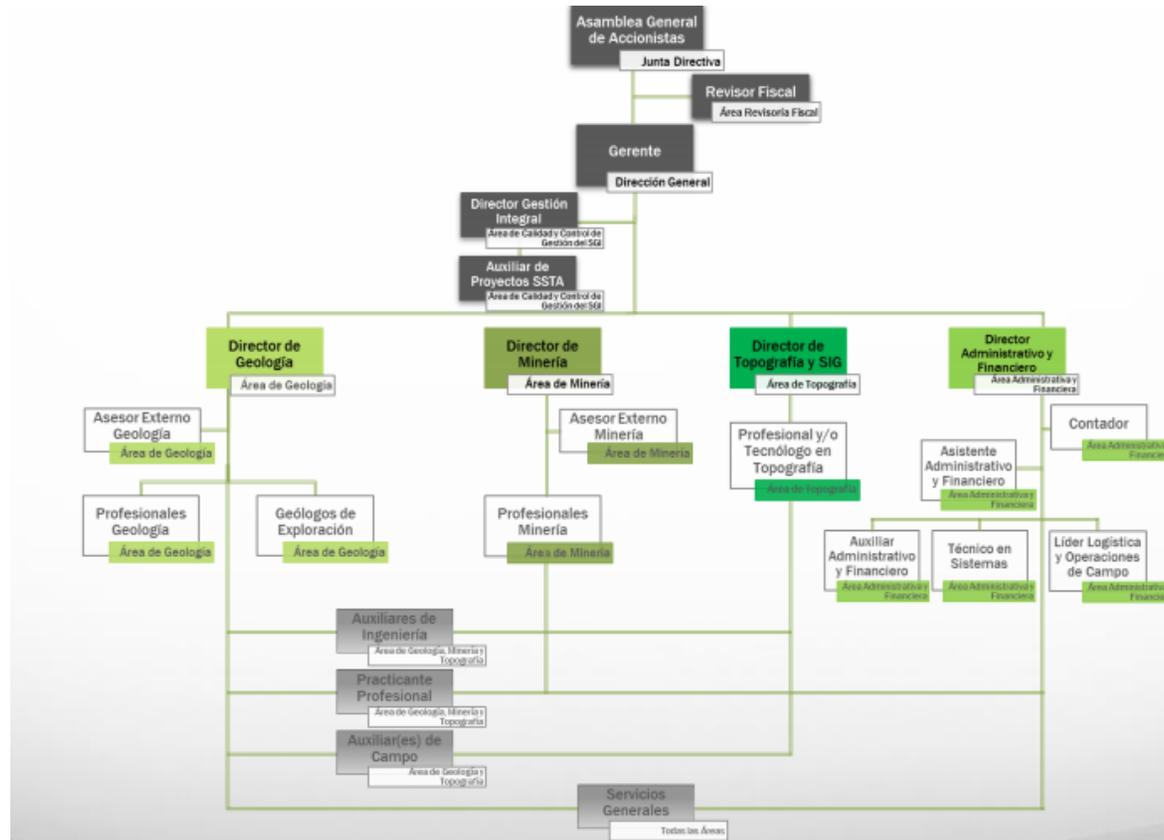
Visión:

En el año 2020, SOLUCIONES EN GEOLOGÍA Y MINERÍA S.A.S. será reconocida como la compañía líder en soluciones ingenieriles e innovación por su trayectoria en la optimización de recursos minerales y generación de valor superior para sus grupos de interés.

1.3 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

La empresa tiene sede principal en Medellín, en el departamento de Antioquia y está conformado por (Ver Figura 1).

Figura 1 Estructura Organizacional de la empresa



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

1.4 PORTAFOLIO DE PRODUCTOS Y SERVICIOS

La empresa Soluciones en Geología y Minería S.A.S. Brinda soluciones ingenieriles mediante el trabajo comprometido e idóneo de capital humano, apoyados en el uso de tecnología vanguardista en Geología (prospección y exploración, modelamiento geológico, estimación de recursos), Minería (viabilidad de proyectos, estudios específicos, licenciamiento minero), Topografía (control de calidad de la información topográfico, levantamiento topográfico de alta precisión por medio de Sistema Trimble R6, fotorestitución de alta precisión por sistema UAV UX5 Trimble) y SIG (imágenes satelitales, datos geográficos, base de datos, georeferenciación y ortoreferenciación), tiene proyectos nacionales ubicados en los departamentos de Guajira, Atlántico, Sucre, Córdoba, Bolívar, Antioquia, Santander, Valle del Cauca y Boyacá y proyectos internacionales ubicados en los países de Honduras, república dominicana y panamá. Entre sus clientes se encuentra Cementos Argos S.A., Construcciones el cóndor S.A., Universidad Nacional de Colombia, Mineros S.A., Cordillera Gold, Continental Gold, entre otras.

2 INFORME DE PRÁCTICAS

La dependencia en la que se realizó la práctica fue el área de geología conformada por el director de geología, la geóloga modeladora, geólogos de campo y practicante profesional de geología (Ver Tabla 1). La composición tecnológica desarrollado durante el transcurso de la práctica fueron software como Microsoft office versión 2016, ArcGIS versión 10.2, AutoCAD versión 2016, especializados en modelamiento geológico como Gemcon Surpac versión 6.5 (Ver Tabla 2), todos estos necesarios para realizar cada una de las funciones encargadas en el rol de practicante de Ingeniería Geológica teniendo en cuenta el cronograma de actividades propuesto (Ver Tabla 3).

El rol del Ingeniero Geólogo en la empresa es construir modelos geológicos y de calidades, categorizar recursos de proyectos a partir de los resultados de análisis de exploración mediante el uso del software Surpac, construcción y manejo de base de datos de proyectos exploratorios, realizar análisis SIG, construir y revisar informes técnicos y presentaciones.

Tabla 1 Recursos Humanos Área de Geología

RECURSOS HUMANOS		
Personal	Característica	Dedicación Semestral
Ing. Rafael Saavedra	Director de Proyecto	6 meses
Geóloga Laura Ceballos	Geólogo de Modelamiento	4 meses

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Tabla 2 Recursos Físicos

RECURSOS FÍSICOS		
Concepto	Característica	Disposición Requerida
Geovia Surpac 6.5	Modelamiento geológico especializado	4 meses
Esri ArcGis 10.2	SIG	4 meses
Microsoft Excel	Hoja de cálculo	6 meses
Microsoft Word	Informes	6 meses

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Tabla 3 Cronograma de Actividades

ACTIVIDADES	PERÍODO:															
	AGOSTO				SEPTIEMBRE				OCTUBRE				NOVIEMBRE			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisión de información bibliográfica	■	■														
Análisis de información recolectada de la exploración			■	■	■	■										
Entrega del primer Informe			■	■	■	■										
Construcción de bases de datos de Calidad							■									
Análisis estadístico								■								
Análisis geoestadísticos								■	■							
Estimaciones										■	■					
Entrega del segundo Informe										■	■					
ACTIVIDADES	PERÍODO:															
	DICIEMBRE				ENERO											
	1	2	3	4	1	2	3	4								
Construcción de modelo de calidades	■	■														
Entrega del tercer Informe	■	■														
Calculo recursos			■	■												
Categorización de recursos			■	■												
Evaluación del uso de potencial de las arcillas					■	■	■	■								

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Al finalizar la práctica empresarial se construirá modelo geológico y de calidades, categorización de recursos de proyectos a partir de los resultados de análisis de exploración mediante el uso del software Surpac, construcción y manejo de base de datos de proyectos exploratorios, realizar análisis SIG, construir y revisar informes técnicos y presentaciones. Tendrá una duración de 6 meses contados a partir de la aprobación de la opción de grado.

- **Duración:** 6 meses
- **Periodo:** Desde 20 de julio al 20 de Enero de 2017.
- **Lugar:** Oficinas administrativas de la empresa en la ciudad de Medellín.
- **Intensidad Horaria:** 9 horas diarias de lunes viernes
- **Horario:** 7:30am-12:00am y 1:00pm-5:30pm
- **Coordinación Técnica:** Ingeniero geólogo Rafael Saavedra y la Geóloga Laura Ceballos.
- **Tutor Temático Asignado:** Elías Ernesto Rojas Martínez

3 TITULO

DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ECONÓMICO DE LAS ARCILLAS EN LA INDUSTRIA CEMENTERA A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL MODELO DE CALIDAD, EN EL SECTOR ALTO RICO, MUNICIPIO DE SONSÓN – ANTIOQUIA

3.1 DESCRIPCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el proceso de producción del cemento se requiere como insumo básico, la adición de cantidades variables de Fe_2O_3 y Al_2O_3 . Para obtener estos insumos se han venido explotando “arcillas ferruginosas”, que hacen parte de los suelos derivados de la meteorización química de las rocas metamórficas pertenecientes al Complejo Cajamarca.

Teniendo en cuenta los planes de crecimiento de la capacidad de producción de la zona de estudio, es necesario evaluar depósitos de arcillas indicando su viabilidad y rentabilidad económica garantizando las crecientes tasas de consumo.

A partir de lo anteriormente dicho y la problemática presentada, se ha planteado la siguiente pregunta de investigación.

¿Cuál es el uso potencial para la industria cementera, de un depósito de arcilla en el sector alto rico, municipio de Sonsón, Antioquia?

3.2 JUSTIFICACIÓN

Las arcillas son minerales naturales que sirven como materia prima industrial que figuran entre los recursos minerales más importantes tanto en volumen explotado como por el valor de la producción, un 90% de la producción se dedica preferentemente a la fabricación de materiales de construcción y agregados; solo un 10% se dedica a otras industrias como la fabricación de papel, caucho, pinturas, absorbentes, decolorantes.

Esta investigación busca determinar el potencial económico de arcillas para ser usadas en la industria cementera, a partir de los resultados del modelo de calidad en el sector Alto Rico ubicado en el municipio de Sonsón en el departamento de Antioquia; con el fin de evaluar la viabilidad de ser usadas como fuentes importantes de hierro y alúmina.

Este proyecto pretende establecer una base de conocimiento para ser usada por la comunidad estudiantil con el fin de proponer investigaciones de mayor alcance y profundidad, transformándose en un marco de referencia para plantear metodologías de evaluación del potencial económico de arcillas en la industria cementera.

3.3 OBJETIVOS

3.3.1 Objetivos Generales

- Determinar el potencial económico de las arcillas en la industria cementera a partir de los resultados del modelo de calidad en el sector Alto Rico, municipio de Sonsón – Antioquia.

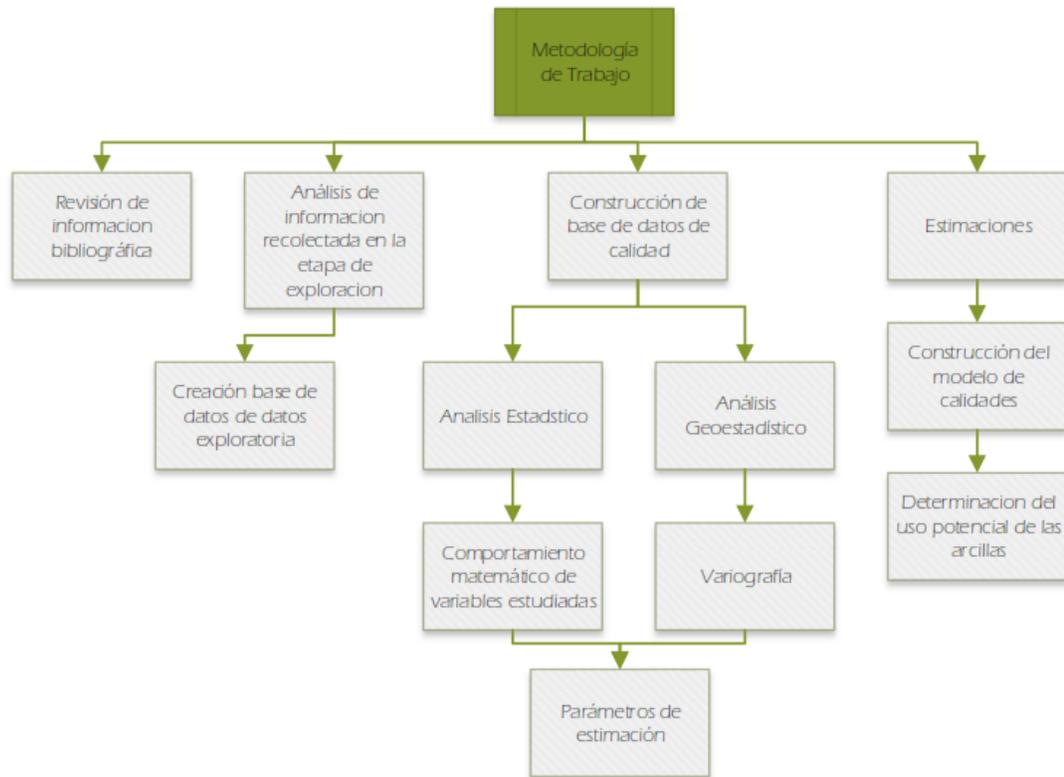
3.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar los resultados de las campañas de exploración del subsuelo, mediante la construcción de una base de datos de perforaciones.
- Interpretar los resultados de calidad de las arcillas a partir de los arrojados por difracción de rayos X (DRX).
- Constatar la continuidad de las arcillas mediante el levantamiento de las columnas de los perfiles de meteorización de los núcleos de perforación.
- Determinar el comportamiento de las variables de calidad a partir de los análisis estadísticos y geoestadístico.
- Seleccionar el método de interpolación más adecuado para desarrollar las estimaciones de las variables de calidad en el depósito de arcillas.
- Diagnosticar el potencial económico de las arcillas en la industria cementera a partir de los resultados del modelo de calidad.

4 METODOLOGÍA

La realización de este proyecto se llevó a cabo mediante el desarrollo de las siguientes etapas (Ver Figura 2):

Figura 2 Metodología de trabajo empleada



Fuente: Autor

- **Revisión de información bibliográfica:** En esta etapa se revisara y analizara toda la información geológica disponible sobre el área de interés consultada en el SICAT (Sistema de información para el inventario, catalogación, valoración y administración de la información técnico-científica), INGEOMINAS entre otros.

- **Análisis de información recolectada de la etapa de exploración:** Se recopilara y analizara toda la información recolectada de la etapa de exploración y resultados de análisis de calidad.

- **Construcción de bases de datos de calidad:** se realizara una base de datos de calidad de los resultados de los análisis realizados.

- **Interpretar los datos de calidad:** a partir de los análisis de laboratorio de DRX se interpretara el contenido de óxidos principales contenidos en cada uno de las litologías de interés.
- **Correlación de perforaciones:** se realizara las columnas estratigráficas de cada pozo de perforación permitiendo la correlación de unidades y por ende determinando la continuidad del depósito de arcilla de interés.
- **Análisis estadístico:** Se realizara el análisis estadístico de las variables de calidad (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2) de interés para determinar su comportamiento matemático y sus correlaciones.
- **Análisis geoestadístico:** Realizar un análisis geoestadístico con el fin de analizar y determinar los parámetros óptimos de estimación a partir de variografía.
- **Construcción de modelo de calidades:** Mediante el uso del software Surpac se construirá un modelo de bloques en el cual se estimara la calidad de las variables de interés de este depósito de arcillas.
- **Estimaciones:** A partir de los análisis geoestadístico determinar el método de interpolación más adecuado para la estimación de estas variables de interés (Kriging, IDW).
- **Evaluación del uso de potencial de las arcillas:** A partir de los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación se concluirá el uso potencial de estas arcillas.
- **Elaboración del informe final:** la preparación del informe se realizara con la integración de toda la información recopilada; la datos de la campaña de exploración, los cuales se analizaron e interpretaron para definir el potencial de arcillas en el área.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 ANTECEDENTES

Luego de realizar una exhaustiva revisión de la literatura existente que se relaciona con esta investigación se han hallado diferentes estudios y trabajos de investigación elaborados en torno al uso potencial de las arcillas, se encontraron los siguientes estudios en la zona “CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA Y MODELADO ESPACIAL MINA ALTO RICO”, cuyo objeto fue Cartografiar a escala 1:2000 en un área de 106 Ha localizadas en la zona de Alto Rico, en el departamento de Antioquia (Soluciones en Geología y Minería S.A.S, 2014).

A nivel regional, nacional e internacional se encuentran diferentes investigaciones referentes a este tema que permiten establecer un punto de partida para conocer el estado del arte.

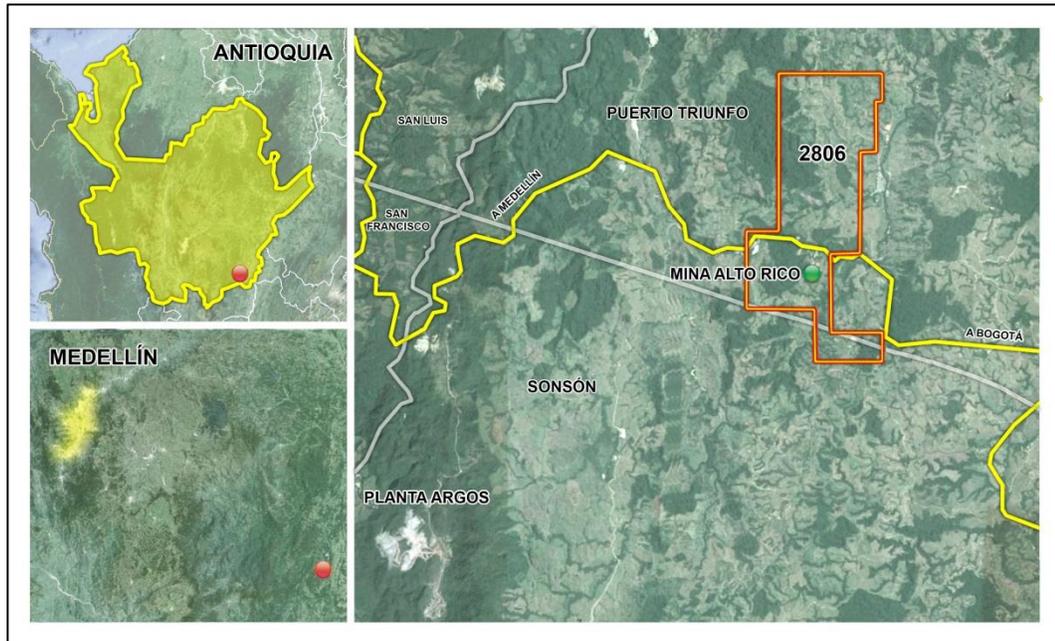
(Muñoz, R., et al, 2007) caracteriza las arcillas física y químicamente para poder optimizar sus propiedades y potencializar su uso; (Latorre, A. et al, 2008) analiza los determinantes de la demanda por departamento de la industria del cemento para así generar conclusiones aproximadas sobre su comportamiento; (Sola, P. et al, 2013) estableció qué usos tuvieron los distintos tipos de pigmentos los óxidos férricos y las arcillas (rojas) y cómo se fue diversificando su aplicación desde los tiempos de los primeros cazadores-recolectores hasta los momentos más tardíos de la prehistoria regional; (Delgado, A. & Negrete, C. 2012) evalúan el uso de arcillas y puzolanas en la etapa de molienda de acabado para la fabricación de cemento Portland Puzolánico Tipo IP; (Ocampo, E., 2005) realiza una caracterización geológica de la zona de reservas sur de la empresa Cementos Río Claro S.A. y una separación de unidades de composición mineralógica similar (calidades) con miras a estudiar su viabilidad de explotación como materias primas para el proceso de producción de Cemento en la planta de cementos Río Claro S.A. en el futuro.

5.2 MARCO GEOGRÁFICO

5.2.1 Localización del área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en las estribaciones del flanco oriental de la Cordillera Central, al suroriente del departamento de Antioquia a 172 km, al sur de su capital Medellín, en jurisdicción de los municipios de Puerto Triunfo y Sonsón (Ver Figura 3).

Figura 3 Localización geografía zona de estudio



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

5.3 MARCO CONCEPTUAL

A continuación se presentan las generalidades geológicas de área de estudio de manera regional y local.

5.3.1 Geología Regional

A escala regional sobre la zona de estudio, afloran unidades de rocas metamórficas de edad paleozoica y rocas ígneas de edad cretácea tardía, las cuales se describen a continuación:

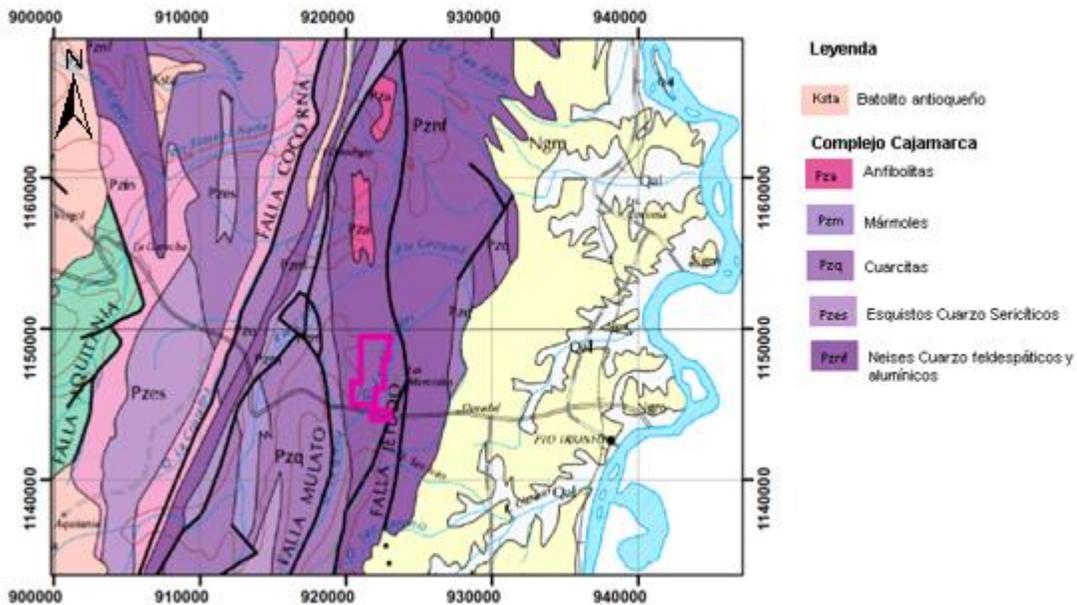
La rocas que afloran en la región se enmarcan dentro de las unidades (metamórficas e ígneas) que constituyen el flanco oriental de la Cordillera Central, las cuales denotan una compleja evolución cortical desde el Paleozoico (Feininger et al., 1970).

La composición notablemente uniforme en las capas individuales, la estratificación finamente laminada y el tamaño de grano sugieren una depositación en una cuenca de gran extensión, con cambios laterales en las facies sedimentarias y bajo condiciones anaeróbicas en las que se depositaron sedimentos ricos en materia orgánica, sílice, basaltos, toba, calizas, etc. (Feininger et al., 1972).

En estas unidades predominan dos tipos de esquistos de bajo a medio grado de metamorfismo, intercalados con cuarcitas y localmente con mármoles, gneises aluminicos de grado medio y algunos cuerpos de anfibolitas generalmente lenticulares (González et al., 2001).

El flanco oriental de la Cordillera Central se encuentra aflorando las siguientes unidades estratigráficas (Ver Figura 4):

Figura 4 Geología regional de la zona de estudio



Fuente: Ingeominas, 1999.

✓ **Complejo Cajamarca (Pzmf, Pzes, Pzq, Pzm, Pza)**

La mayor parte de las rocas metamórficas que afloran sobre la vertiente oriental de la cordillera central se agrupan dentro de esta unidad litodémica. Corresponde a rocas metamórficas conformadas principalmente por gneis cuarzo-feldespático producto de un metamorfismo regional sobre rocas sedimentarias relicto en un cinturón de alto grado metamórfico; estas rocas metamórficas presentan una estructura gnéisica a migmatítica, con textura augen ocasional, con foliación bien definida, localmente plegada; el complejo posee un notable control tectónico sectorizado por la actividad del sistema de fallas Palestina; además se tienen cuarcitas, intercaladas con el gneis cuarzo-feldespático y cuerpos de mármol.

Asimismo, dentro de este complejo se incluyen migmatitas, anfibolitas, rocas verdes y esquistos cuarzo-sericíticos, grafitosos con emplazamiento tanto concordante como discordante de diques pegmatíticos y cuarzosos de diferentes espesores como producto de sobreimposición tectónica y ascenso de fluidos hidrotermales. Las rocas más antiguas que se encuentran en el altiplano de Santa Rosa corresponden a anfibolitas y esquistos anfibólicos del paleozoico, las cuales han sido interpretadas como “techos aislados”, arrastrados durante la fase de emplazamiento del batolito Antioqueño quedando como franjas y bandas separadas en el proceso de levantamiento y denudación de la cordillera, y que se localizan hacia los bordes del altiplano. Estas rocas presentan perfiles de meteorización poco evolucionados, de tal manera que en las vertientes de inclinación moderada afloran suelos residuales y saprolitos (Horizonte IB y IC respectivamente) y en las vertientes más inclinadas es frecuente encontrar roca parcial o levemente alterada (Horizontes IIA y IIB), (Soluciones en Geología y Minería S.A.S., 2014).

Las edades radiométricas disponibles de las series metamórficas del Complejo Cajamarca varían entre 345 y 55 m.a. (Maya, M., 1992) y se pueden agrupar en tres grupos, 55-75 m.a; 105-130 m.a y 240-345 m.a.; de acuerdo con las relaciones de campo y métodos analíticos empleados, se considera que las más antiguas representan edades mínimas para el evento metamórfico del Paleozoico tardío, pre - Carbonífero, que correspondería a la Orogenia Acadiana (Toussaint, J., 1993). Las edades más jóvenes representan episodios posteriores de metamorfismo regional (tectó – dinámico – térmico). Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad de un evento metamórfico regional más antiguo, probablemente del Cámbrico (González, H., 2001).

Las rocas del Complejo Cajamarca han tenido un proceso de metamorfismo progresivo (aumento de las Zonas de Barrow) de tobas diabásicas, diabasas y rocas gabríticas asociadas, apoyado en una posible convergencia de rocas similares composicionalmente pero con orígenes distintos. Sin embargo, no hay argumentos sólidos para esta hipótesis. (Nelson, H., 1957).

De acuerdo con la composición química y la facilidad de identificación, las rocas metamórficas del Complejo se pueden agrupar en cuatro grupos generales:

- ✓ Grupo Pelítico: filitas; esquistos sericíticos, cuarzo-sericíticos y alumínicos (Pes); néises feldespáticos (Pnf, Pnch); y rocas metamórficas de muy bajo grado (Pbsd).
- ✓ Grupo Cuarzoso: cuarcitas (Pnq).
- ✓ Grupo Calcáreo: mármoles (Pm).

- ✓ Grupo Básico: anfibolitas (Pa) de hornblenda, andesita y ocasionalmente con diópsidos; y esquistos verdes (Pev) compuestos por albita, epidota, clorita y actinolita principalmente.

- ✓ **Batolito Antioqueño (Ksta)**

Este cuerpo ígneo como litodema más septentrional de la cordillera central, se encuentra localizado en la parte central del departamento de Antioquia abarcando un área de 7 221 Km²; constituye el substrato o basamento de la mayor parte del altiplano de Santa Rosa predominando una cuarzodiorita con variaciones a facies dioríticas y gabróicas, especialmente en cercanías a los contactos con las rocas metamórficas. El contacto con rocas metamórficas regionales es discordante y tajante, generalmente intrusivo con desarrollo de aureolas de contacto, excepto contra la anfibolita donde han tenido lugar algunas mezclas, localmente se observan contacto fallados (Feininger, T. & Botero, G., 1982).

Las rocas del Batolito corresponden a rocas de tipo granítico clasificadas entre granodiorita a cuarzodiorita presentando variaciones composicionales importantes; los minerales constituyentes incluyen plagioclasa, anfíbol, biotita y cuarzo. La textura es fanerítica equigranular con cristales de anfíboles tabulares, subhedrales; plagioclasas y cuarzos anhedrales; y biotitas subhexagonales. El tamaño de grano es principalmente de medio a grueso. De forma local suele observarse orientación de minerales, presencia de autolitos y cambios texturales y composicionales.

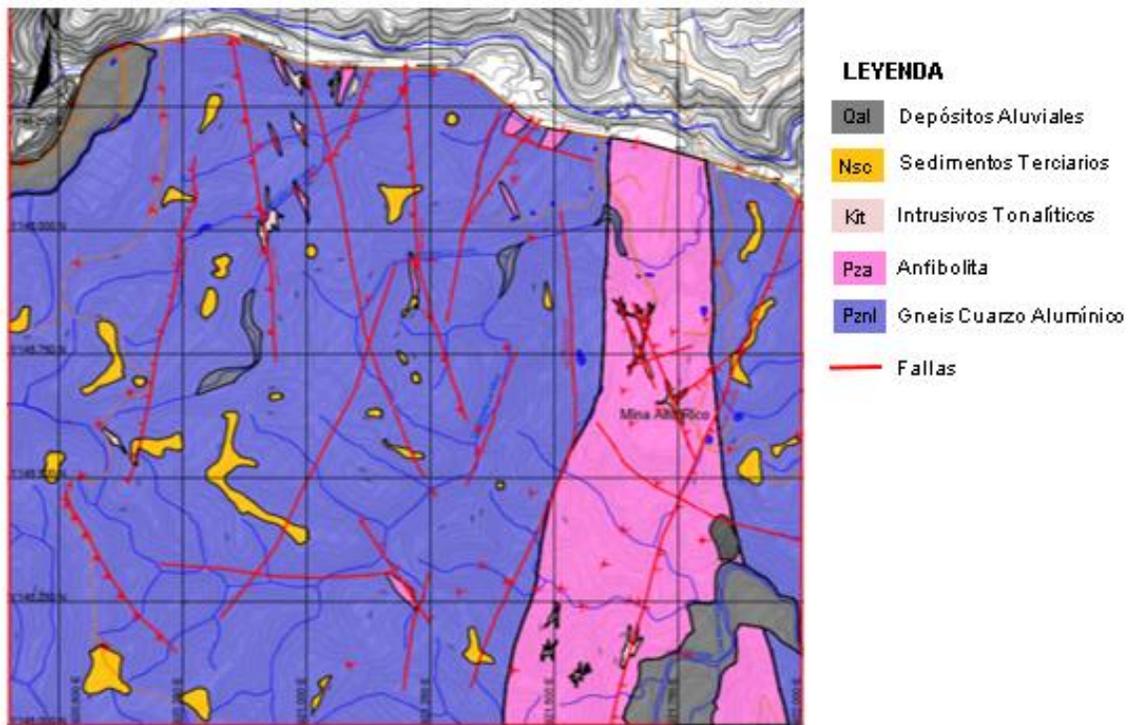
La presencia de autolitos es común en el Batolito Antioqueño, y en general son de composición básica y textura finogranular; asimismo es posible identificar zonas de cizalla, donde se desarrollan milonitas con orientación de biotitas, especialmente hacia el contacto con los esquistos del Complejo Cajamarca. En cuanto al perfil de meteorización, cuando la composición es cuarzo-feldespática (ácida), se genera un material claro conocido como “grus”, arenoso; por el contrario, cuando la composición presenta cantidades importantes de minerales ferromagnesianos (tendencia básica), el perfil de meteorización desarrolla un abigarramiento cromático en materiales de granulometría fina (limos y arcillas). Dentro de las características importantes de este cuerpo, cabe resaltar la formación de organales por efecto de la meteorización esferoidal. Este tipo de meteorización genera núcleos esféricos de roca fresca, embebidos en una matriz saprolítica; al interior de esta unidad se encuentran unos pequeños cuerpos intrusivos de textura porfídica. La cuarzodiorita en el altiplano presenta un perfil de meteorización muy continuo y espeso (80-90 metros de espesor promedio) en el cual son modeladas gran parte de las geofomas del altiplano.

Alrededor del Batolito Antioqueño se encuentran algunos cuerpos de rocas granitoides, que por sus características composicionales, texturales y estructurales, son difíciles de distinguir de las rocas de las facies normales del Batolito, y se consideran comagmáticos con éste.

5.3.2 Geología Local

En la zona se identifican cinco unidades litológicas: Gneis cuarzo aluminico (Pznl), Anfibolita (Pza), Intrusivos Tonalíticos (Kit), Sedimentos Terciarios (Nsc) y Depósitos Aluviales (Qal) (Ver Figura 5).

Figura 5 Unidades litológicas en la zona de estudio



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

- ✓ **Gneis cuarzo aluminico (Pznl):** Corresponde a un gneis cuarzobiotítico con minerales accesorios de moscovita y sillimanita, su composición media refleja un alto contenido de biotita, cuarzo, plagioclasa y en menor proporción otros minerales como anfíboles y trazas de grafito. Las diferencias composicionales son las que definen un bandeamiento marcado por bandas

claras y oscuras donde predominan plagioclasa + cuarzo y biotita respectivamente.

El gneis presenta blastos que varían a grueso a fino, con una textura granolepidoblástica, definida en las bandas oscuras como lepidoblástica por la orientación de la biotita principalmente y en las bandas claras como granoblástica por el cuarzo y la plagioclasa. Una característica importante del gneis que aflora en la zona de Alto Rico son las texturas típicas generadas por un metamorfismo dinámico intenso tales como colas de deformación en porfidoclastos de plagioclasa, cuarzo augen, orientación de minerales como la biotita (Ver Figura 6).

Figura 6 Gneis meteorizado con minerales máficos oxidados



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Los mejores afloramientos de esta unidad se manifiestan por todo el tramo de la autopista Medellín – Bogotá que hace parte del área de interés, también en la quebrada La Calera y algunos pocos en la quebrada La Mina. En los caminos, trincheras y carreteras secundarias se observa esta unidad altamente meteorizada y sólo en algunos sectores se puede reconocer su

textura original y es posible diferenciarla de las demás unidades por el contenido de cuarzo y aluminosilicatos.

- ✓ **Anfibolita (Pza):** Es la unidad más importante en la zona dado que es la principal fuente de arcilla rica en hierro y baja en alúmina. Corresponde a una anfibolita color gris y verde en roca fresca, compuesta principalmente por plagioclasa y anfíbol, exhibe localmente una estructura gnéisica y segregaciones de plagioclasa y cuarzo, su textura principal es granoblástica y en algunas zonas es nematoblástica definida por la orientación de los anfíboles (Ver Figura 7).

Figura 7 Anfibolita meteorizada



○ Anfibolita Meteorizada

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

- ✓ **Intrusivos tonalíticos (Kit):** Son cuerpos de tonalita biotíticas, a veces moscovítica, generalmente de textura fanerítica equigranular, con tamaño de cristales medio a grueso, aunque presenta variaciones texturales a porfírica

inequigranular con cristales de tamaño medio a muy grueso que alcanza hasta 2 cm en algunas plagioclasas.

Está compuesta principalmente por cristales anhedrales de cuarzo, plagioclasa y minerales accesorios de biotita y moscovita, aunque cuando se da un aumento en el contenido de matriz, aumenta la concentración de plagioclasa y disminuye la de cuarzo. Esta unidad se encuentra distribuida en toda el área, aflora como pequeños diques, en muchos casos no cartografiados de acuerdo con la escala de trabajo, intruyendo los neises y las anfibolitas de forma concordante y cortante con la foliación (Ver Figura 8).

Figura 8 Intrusivo de composición tonalítica



○ Intrusivo de composición tonalítica

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

- ✓ **Sedimentos Terciarios (Nsc):** Restringidos al tope las colinas que caracterizan la zona de Alto Rico y hacia el costado oriental del área de trabajo se identificaron una serie de materiales sedimentarios detríticos cuyo

patrón de distribución se desconoce, puesto que no tienen rasgos geomorfológicos que permitan contrastarlos y seguirlos por el paisaje.

Su matriz es areno-arcillosa vari coloreada compuesta por cuarzo, tanto la composición de los clastos como la de la matriz indican un alto grado de madurez. Hacia el extremo occidental de la zona el espesor de esta secuencia disminuye considerablemente.

Eventualmente se notan paquetes de grano finos (limos) bien compactados con pocas y pequeñas gravas, cohesivos y con un patrón anómalo de coloración que varía entre ocre, morados, grises, carmelitas y amarillos generados por circulación de óxidos; además son frecuentes los restos de hierro y los anillos de Liesegang (Ver Figura 9).

Teniendo en cuenta que estos sedimentos se encuentran en el tope de las colinas como remanentes del levantamiento tectónico y su posterior erosión, y considerando un ambiente de tipo depositacional, la madurez de los clastos y el avanzado grado de alteración química se puede sugerir una relación genética de esta secuencia con los sedimentos terciarios del fondo del valle del Magdalena.

Figura 9 Sedimentos terciarios presentes en el área de estudio



 Anillos de Liesegang

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

✓ **Depósitos Aluviales (Qal):**

El principal depósito aluvial (Qal) se encuentra en el límite suroriental del área y está asociado a la quebrada Las Mercedes, tiene un ancho de 150 m y un espesor de 12 m medidos en los núcleos recuperados de la perforación 3. Otros depósitos de origen aluvial, pero de menor extensión, son los que se encuentran en el extremo noroccidental de la zona y en algunos tramos de las quebradas La Mina y La Calera.

5.3.3 Geología Estructural

Las fallas afectan las diferentes unidades litológicas y constituyen una deformación posterior a la deformación dúctil que le imprime el carácter milonítico a las rocas en la zona.

La tectónica de la zona se enmarca dentro de la influencia del sistema de fallas Palestina, definido por como una falla de rumbo con desplazamiento dextralateral que ha permanecido inactiva (Feininger, T., 1970), (Ver Figura 4).

En el área de estudio el depósito tiene una tendencia estructural de N20°E evidenciando en los drenajes de menor orden que están perpendiculares al tren estructural con una tendencia preferencial de N70°W y S70°E permitiendo verificar la tendencia de las unidades litológicas aflorantes (Ver Figura 5).

5.3.4 Perfil de Meteorización

Se identificaron los diferentes horizontes de meteorización presentes en cada una de las unidades litológicas del área de interés, estos basados en parámetros de descripción en proporción clastos-matriz, características asociadas a la meteorización química que han sido la causa del valor de esta proporción (Little, A., 1969).

A continuación se describen los horizontes de meteorización utilizados (Ver Figura 10).

Figura 10 Clasificación perfil de meteorización

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

Fuente: The engineering classification of residual tropical soils, (Little, A., 1969).

- a) **Horizonte VI:** suelo residual material donde no se hereda ninguna característica del material parental, sus granos pueden separarse manualmente.
- b) **Horizonte V:** completamente descompuesto se preserva la textura del material original y los granos se separan fácilmente.
- c) **Horizonte IV:** altamente descompuesto con la mano se pueden romper en fragmentos, con el martillo produce un sonido grave. No se afloja en agua y presenta un color diferente al material original. Puede contener hasta 15% de fragmentos de roca.
- d) **Horizonte III:** moderadamente descompuesto no pueden romperse con la mano pero si con el martillo, con esta herramienta se produce un sonido ligero, presenta un color diferente al material original. Puede contener entre 15% y 90% de fragmentos de roca.
- e) **Horizonte II:** ligeramente descompuesto no se rompe fácilmente con el martillo, produce un sonido agudo cuando se raya. Se conservan los colores del material parental, excepto en las discontinuidades.
- f) **Horizonte I:** material parental fresco.

6 ETAPA EXPERIMENTAL

6.1 TRABAJO DE CAMPO

La fase de campo fue realizada por la empresa Soluciones en Geología y Minería S.A.S. con el fin de delimitar las unidades litológicas del área de estudio, evaluar el contenido de Fe_2O_3 y Al_2O_3 y caracterizar el perfil de meteorización de la mina Alto Rico, se llevó a cabo una campaña de exploración que incluyó recorridos de campo, un muestreo sistemático usando auger el cual permite definir el perfil de meteorización con mayor facilidad por tratarse de un material arcilloso logrando hacer de manera manual, elaboración de perforaciones y apiques.

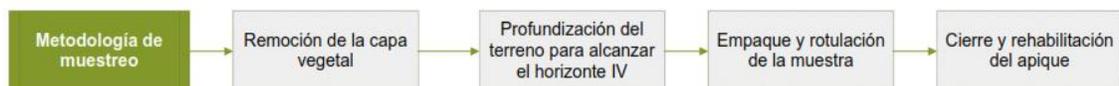
A continuación se describen las actividades realizadas durante esta etapa:

Recorridos de campo: Se realizaron sobre los drenajes de menor orden con direcciones preferenciales $N70^\circ W$ y $S70^\circ E$, teniendo en cuenta la tendencia estructural del depósito ($N20^\circ E$), estos recorridos perpendiculares al tren estructural permitieron identificar las unidades litológicas, mientras que los recorridos paralelos al tren estructural ayudaron a validar el modelo de las fallas perpendiculares.

Muestreo: El objetivo de este procedimiento fue evaluar la concentración de óxidos en el material de interés, por lo tanto se determinó el horizonte del perfil de meteorización el cual corresponde al horizonte IV. Se tomaron muestras de entre 3 y 4K. Para llevar a cabo esta metodología se inicia con la remoción de la capa vegetal para facilitar la profundización del terreno para llegar al horizonte IV, posterior a esto se procede a la recolección de muestra para empaquetar y rotular la misma, finalmente se devuelve el material sobrante y rehabilitar la zona intervenida (Ver Figura 11).

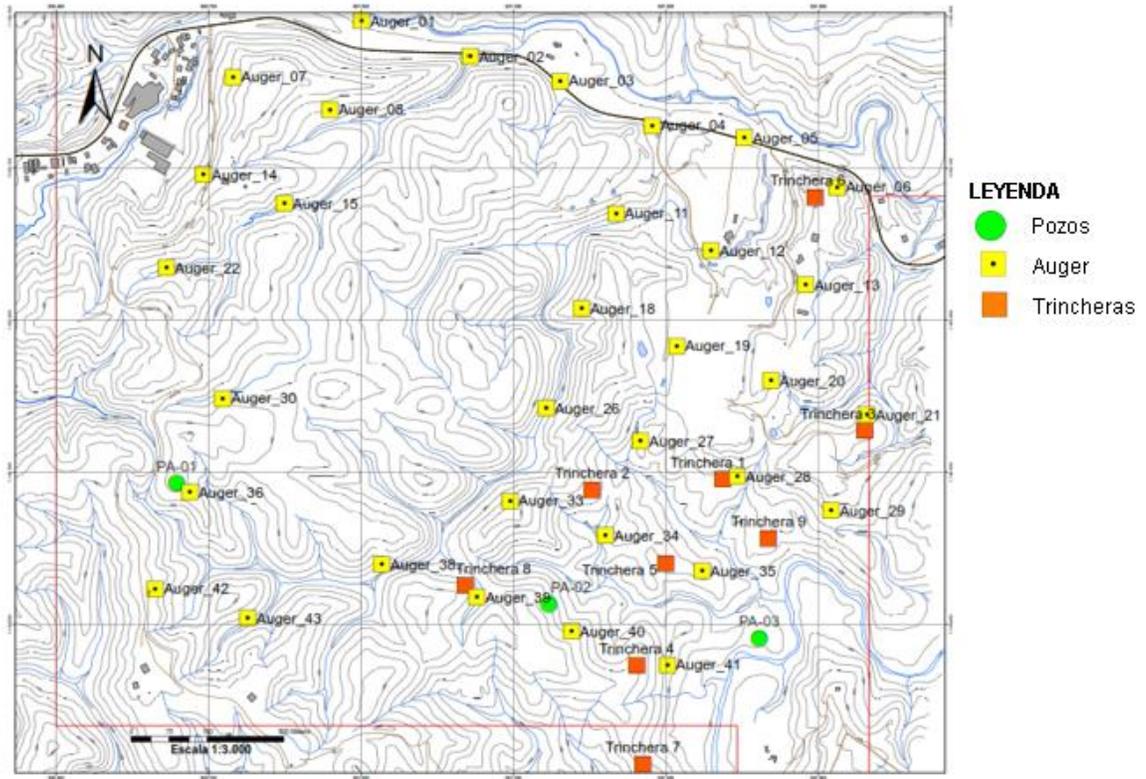
En esta etapa de muestreo se tomaron 266 muestras en los perfiles de suelo, distribuidas como se muestra en la Tabla 4, estas muestras fueron enviadas al laboratorio para su posterior análisis. En la Figura 12 se observa la localización de los puntos de muestreo.

Figura 11 Metodología de muestreo



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 12 Localización puntos de muestreo



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Tabla 4 Distribución de las muestras

MÉTODO DE RECOLECCIÓN	CANTIDAD DE MUESTRAS
Auger	33
Trincheras	153
Núcleos de perforación	28
Frente actual de explotación de la mina de arcilla	52
Total	266

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

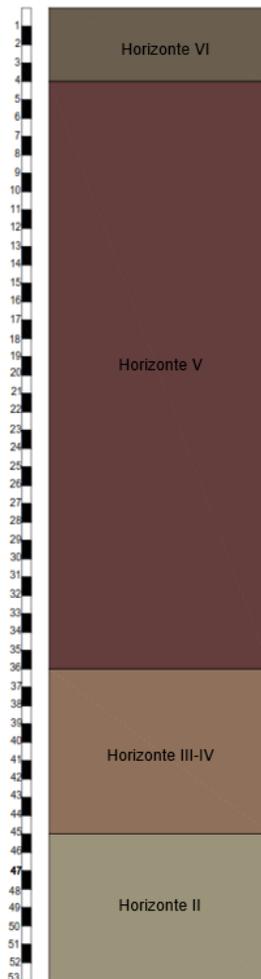
6.2 Columna perfil de meteorización a partir de núcleos de perforación

De las tres perforaciones ejecutadas se pudo determinar el espesor del perfil de meteorización a diferentes profundidades, los cuales se evidencian en las columnas levantadas a partir de los núcleos de perforación.

6.2.1 Perfil de meteorización PA-01

Se alcanzó una profundidad de 53.0 m., con presencia de suelo hasta los 45.0 m., en él se recolectaron 11 muestras. Corresponde a arcilla derivada del Gneis, con alto contenido de cuarzo, moscovita y biotita (Ver Figura 13, Anexo A).

Figura 13 Columna perfil de meteorización PA-01

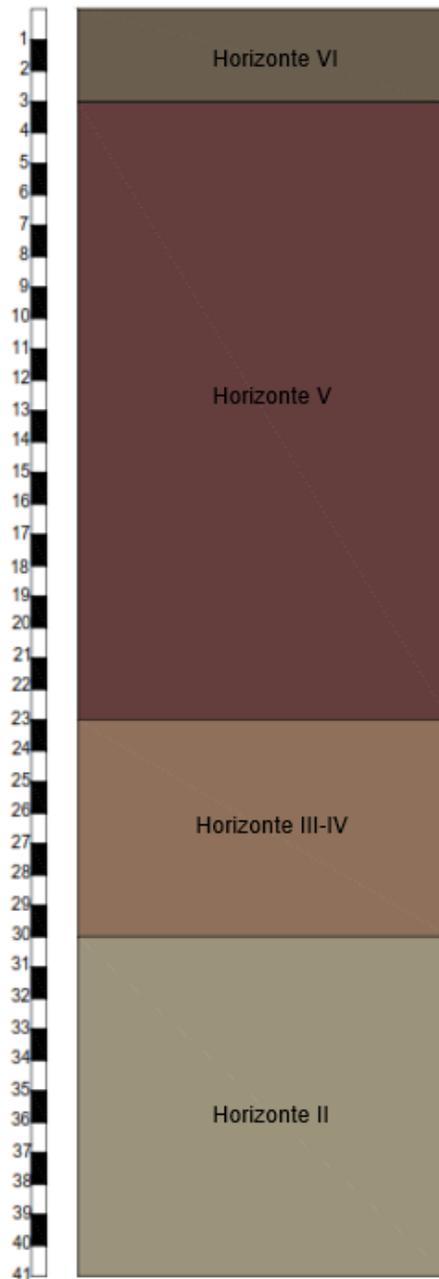


Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

6.2.2 Perfil de meteorización PA-02

Se alcanzó una profundidad de 41.0 m., con presencia de suelo hasta los 30.0 m., en él se recolectaron 11 muestras. Corresponde a arcilla derivada del Gneis, con alto contenido de cuarzo, moscovita y biotita (Ver Figura 14, Anexo B).

Figura 14 Columna perfil de meteorización PA-02

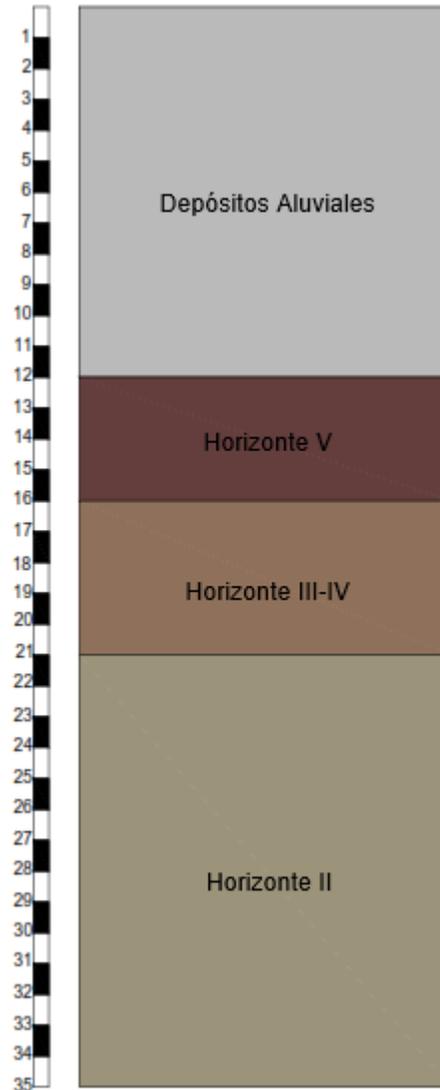


Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

6.2.3 Perfil de meteorización PA-03

Se alcanzó una profundidad de 35.0 m., con presencia de suelo hasta los 21.0 m., en él se recolectaron 6 muestras. Corresponde a arcilla derivada de la Anfibolita, con bajo contenido de cuarzo, moscovita y biotita. Presenta depósitos aluviales alcanzando una profundidad de 12.0 m. (Ver Figura 15, Anexo C).

Figura 15 Columna perfil de meteorización PA-03



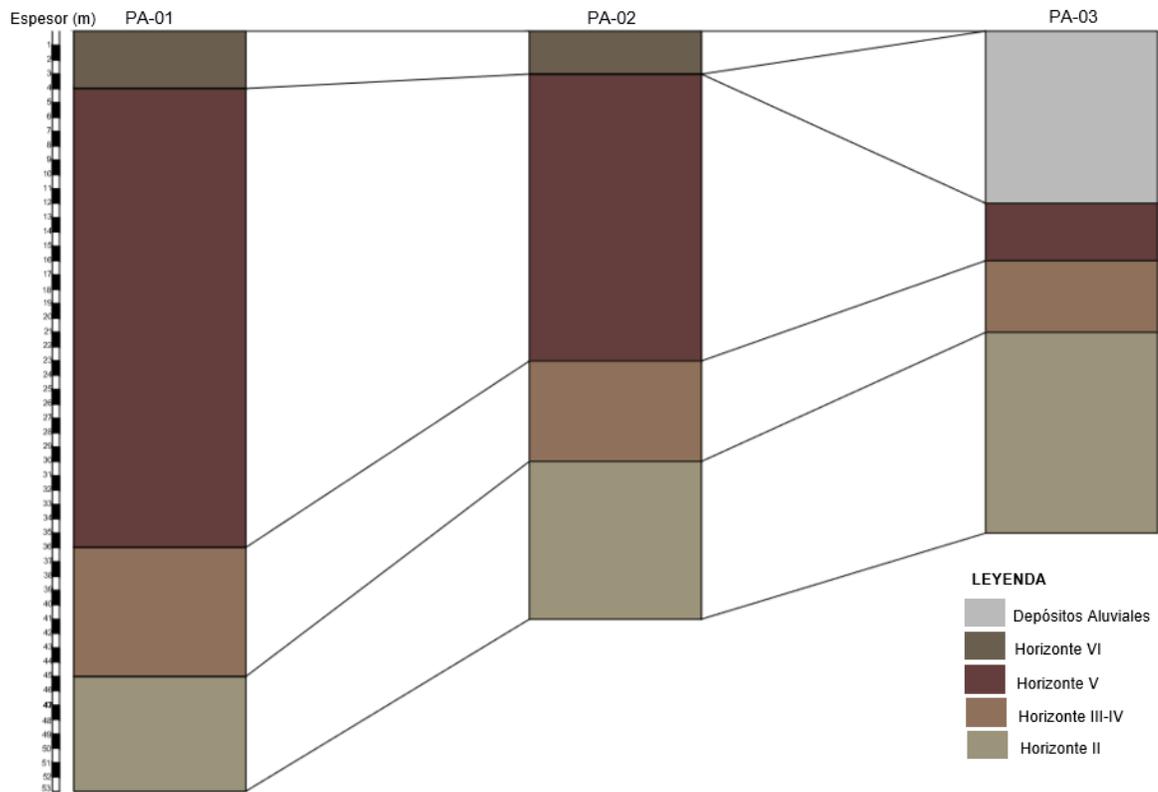
Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

6.2.4 Correlación de los perfiles de meteorización

Los núcleos recuperados se correlacionaron con cada una de las unidades de interés que se identificaron en este sector.

Es importante asociar la composición de las arcillas recuperadas en los núcleos con las unidades litológicas que afloran en el sector. Se comprobó la continuidad del depósito de arcillas en el área de interés con espesores variables en cada horizonte de meteorización interceptado (Ver Figura 16, Anexo D).

Figura 16 Correlación de perfiles de meteorización



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

6.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para cada una de las variables evaluadas SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 se estimaron los parámetros de tendencia central y de dispersión o variabilidad, con el fin de identificar aquellas variables con mayor poder de discriminación; este proceso se realizó utilizando el módulo de estadística básica del software Gemcon Surpac

el cual cuenta con herramientas de análisis básico de datos y generación gráficos y el software statgraphics.

6.3.1 Análisis Estadístico

Antes de proceder con la estimación de recursos se debe realizar un análisis estadístico de los datos disponibles o los generados a partir del cálculo de los compósitos con el objetivo de caracterizar el comportamiento estadístico de las distintas variables en el depósito y en las unidades geológicas que lo integran.

El cálculo de la estadística básica y el estudio de la distribución de frecuencias de los parámetros constituyen las principales herramientas que posibilitan el análisis estadístico de los datos. Los resultados de esta etapa complementan el modelo geológico y se emplean en la modelación de recursos. Se realiza el cálculo para las muestras originales y compositadas en cada unidad geológica, los cuales incluyen distintos tipos litológicos en donde la distribución estadística de la variable es diferente.

Se realizó una base de datos que se corrió en el programa Gemcon Surpac versión 6.1.5, posteriormente se realizó una compositación o regularización, se calcula usando la media ponderada por la longitud de los testigos que contribuyen a cada compósito y la masa volumétrica en caso de ser variable.

6.3.2 Análisis Geoestadístico

La geoestadística es un conjunto de técnicas usadas para analizar y estimar fenómenos espaciales o temporales, cuyo objetivo principal es caracterizar e interpretar el comportamiento de los datos que están distribuidos espacialmente, realiza el estudio de muestras distribuidas en el espacio con base en modelos aleatorios, su empleo es más simple que la creación de mapas, ya que también depende del tiempo y espacio de la probabilidad. Asume que los valores de las variables regionalizadas están correlacionados unos con otros, permitiendo realizar un análisis estructural o semivariograma, después del análisis estructural, se hacen estimaciones de las situaciones de sectores no muestreados usando la técnica de Interpolación "Kriging" la cual calcula un promedio ponderado de las observaciones muestrales, los pesos asignados a los valores muestrales son apropiadamente determinados por la estructura espacial de correlación establecida en la primera etapa y por la configuración de muestreo (Petigas, P., 1996).

El semivariograma es la herramienta central de la geoestadística que permite analizar el comportamiento espacial de una propiedad o variable sobre una zona dada.

Se obtuvo el semivariograma experimental vertical para cada parámetro con las siguientes especificaciones: azimut (0), inclinación (0), tolerancia angular (90), este proporciona una idea inicial de la variabilidad espacial de los datos, siendo el más idóneo para representar u obtener una estructura clara y definida.

Posteriormente se calculan semivariogramas en diferentes direcciones, pueden ser calculado en 4 direcciones separadas 45° con tolerancia angular de 22.5° , comenzando por 0° hasta encontrar la dirección de máxima o mínima variabilidad, también, se calculan más específicamente, en 8 direcciones separadas por 22.5° , se determinó el eje de anisotropía y mediante un proceso interactivo se estableció el modelo teórico de mejor ajuste, además de su validación.

Por otra parte, usando el software Gemcon Surpac versión 6.1.5 se realizó la estimación por medio del método de interpolación Kriging Ordinario para las variables de Al_2O_3 y Sio_2 e inverso de la distancia (IDW) para la variable de Fe_2O_3 y la construcción de los mapas temáticos que permiten visualizar la variabilidad espacial.

6.3.3 Estimación

Los orígenes de la geoestadística están en la estimación de un atributo en situaciones no muestreadas, la técnica del kriging proporciona una estimación lineal como una función de los valores de la variable en las localizaciones cercanas.

El kriging tiene dos ventajas principales con respecto a otros estimadores lineales: a) Los pesos usados en la estimación son determinados como una función entre la distancia estructural (El variograma) del valor y la localización a ser estimada y la distancia estructural (El variograma) de cualquier otro par de datos, y b) La estimación se acompaña por una cuantificación de incertidumbre, es decir, la varianza del kriging, no sólo se consigue una estimación que tiene en cuenta la posible anisotropía de la continuidad espacial del atributo, considerando para la redundancia de datos y como una medida de confianza que puede ser depositado en la estimación.

La estimación kriging es conocida como el mejor estimador imparcial lineal, en el sentido, de que el sistema de ecuaciones tienen que ser resuelto para determinar los coeficientes de la estimación lineal se obtiene bajo las condiciones que el promedio de los z^* (Estimados) es igual al promedio de los datos, y el promedio del cuadrado de la diferencia entre las estimaciones y los valores reales (Carroll, et al, 1996).

El método inverso de la distancia (IDW), este fue posiblemente el primer método analítico para la interpolación de los valores de la variable de interés en puntos no

muestreados. Esta técnica se ha convertido en una de las más populares gracias a la aparición de las computadoras y relativa sencillez. En principio se adopta la hipótesis de que importancia de un dato aislado responde a una función inversa de la distancia. El objetivo del método es asignar un valor a un punto o bloque mediante la combinación lineal de los valores de las muestras próximas.

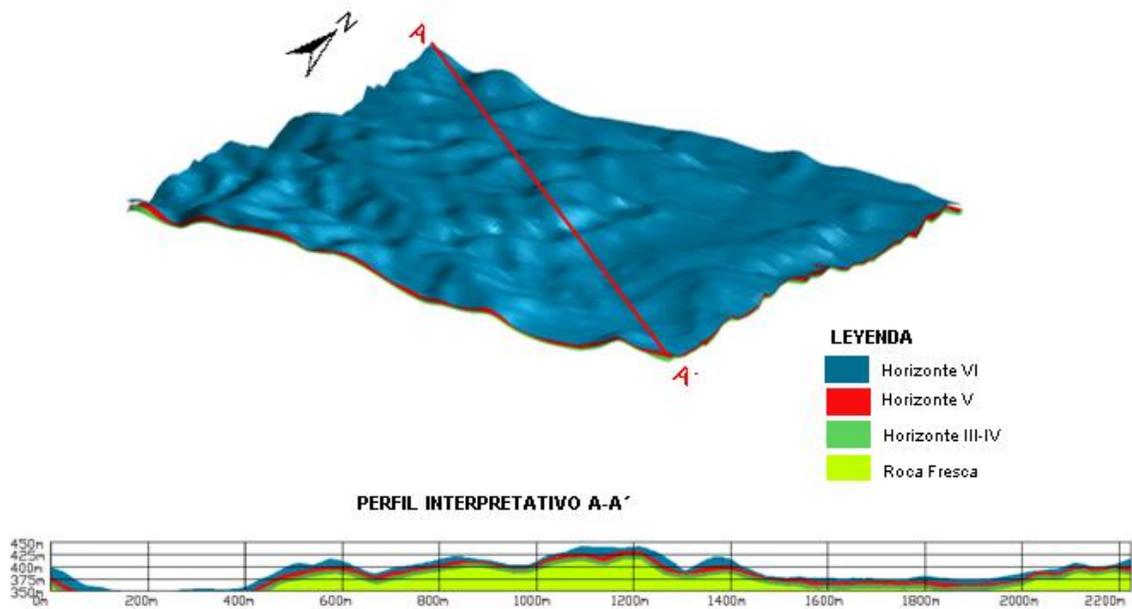
7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 MODELO DE CALIDAD

Se construyó el modelo geológico espacial del sector Alto Rico, el cual implica modelar geoméricamente los cuerpos de interés, analizar y pronosticar el comportamiento tridimensional del Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 .

Se modelaron las superficies que representan el perfil de meteorización. Es necesario aclarar, que los resultados obtenidos aquí, corresponden a una interpretación de cómo se comporta el perfil de meteorización en profundidad, interpretación justificada con base en los análisis estructurales, geológicos y morfodinámicos obtenidos a partir de los trabajos de campo ejecutados; también para el presente proyecto, se modelaron los principales aspectos estructurales y litológicos del área de trabajo (Ver Figura 17).

Figura 17 Superficies modeladas perfil de meteorización



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

7.2 ISÓPACOS

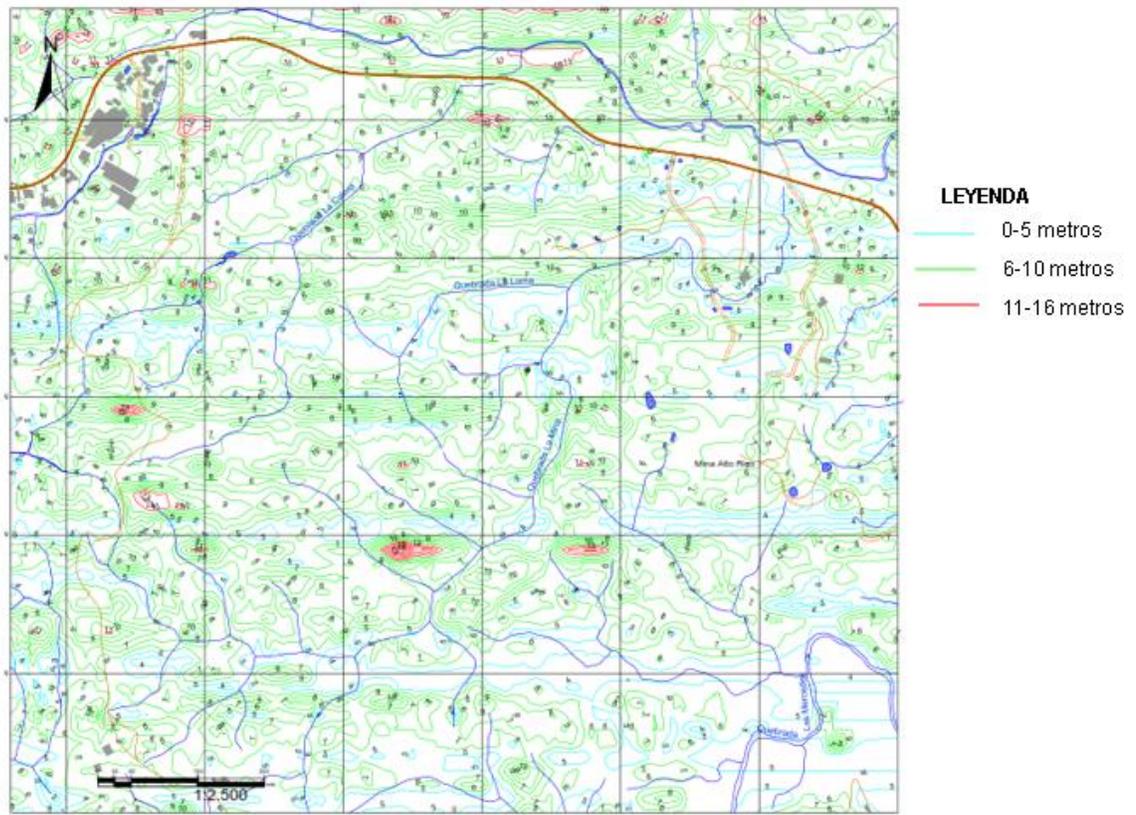
Con base en las superficies modeladas se generaron los mapas de isópacos para cada uno de los horizontes de meteorización y a partir de ellos se obtuvo la información de espesores promedio (Ver Tabla 5, Figura 18, Figura 19, Figura 20).

Tabla 5 Espesores promedios horizontes de meteorización

ESPESORES HORIZONTES DE METEORIZACIÓN	
Horizonte	Espesor Promedio (m).
VI	2
V	11
VI-III	7

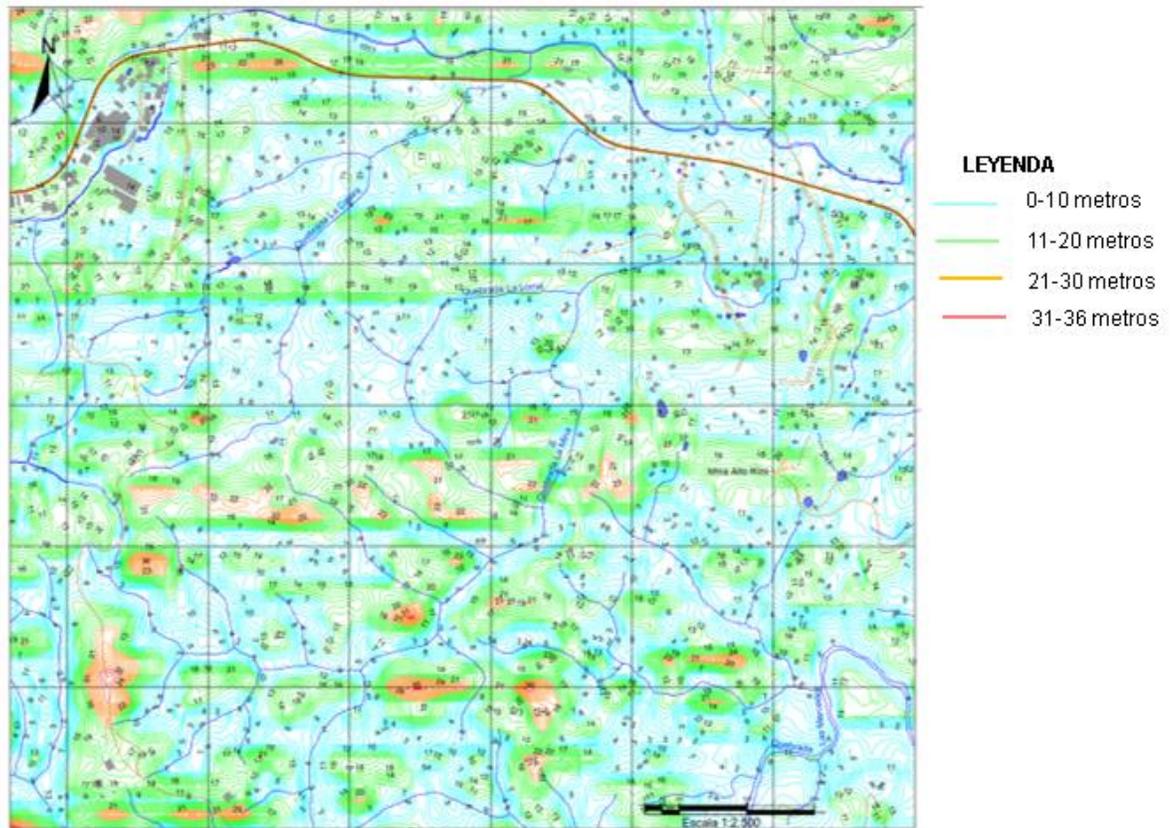
Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 18 Isópacos horizonte III-IV



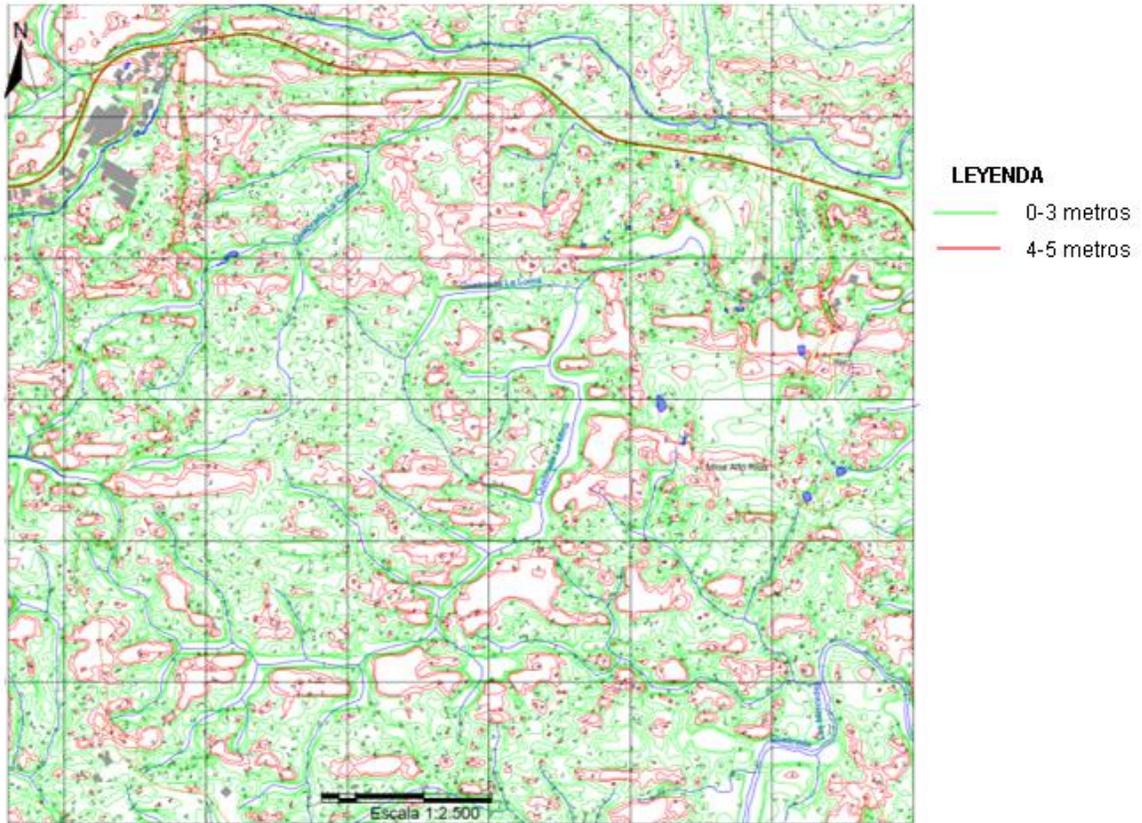
Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 19 Isópacos horizonte V



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 20 Isópacos horizonte VI



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

7.3 MODELO DE BLOQUES

Se construyó un modelo de bloques que representa el comportamiento espacial de las calidades, esta distribución es posible obtenerla al realizar las estimaciones con base en parámetros matemáticos y geoestadísticos obtenidos de análisis de los datos cuantitativos, además es posible a partir del modelo de bloques cuantificar y categorizar los recursos de acuerdo a estándares internacionales. La definición de la configuración geométrica del modelo de bloques se basó en una optimización de la variabilidad química de los materiales de interés, se tuvo en cuenta también, que la configuración geométrica de dicho modelo fuera acorde a las características extractivas actuales del yacimiento y con las principales características litológicas identificadas.

7.4 ANÁLISIS DE DATOS

A continuación se presentan los análisis y ajustes de la información que compone la base de datos:

7.4.1 Compósitos

Generalmente los intervalos de muestreo en los núcleos de perforación no coinciden con los intervalos de trabajo en la fase de estimación de recursos. Los intervalos de muestreo son siempre menores pues se busca revelar la variabilidad espacial de las variables que se estudian. Los compósitos es un procedimiento mediante el cual las muestras de los análisis se combinan en intervalos regulares, que no coinciden con el tamaño inicial de las muestras.

Para extraer los compósitos de la base de datos fue necesario regularizar éstos, para ello se realizaron análisis estadísticos con el fin de determinar el intervalo óptimo para construir los compósitos, en éstas se comparan las muestras de compósitos regularizados y las muestras en base de datos (Ver Tabla 6).

Tabla 6 Resumen estadístico longitud de muestreo

RESUMEN ESTADÍSTICO LONGITUD MUESTREO	
Recuento	636
Promedio	1.78467
Mediana	2
Moda	2
Desviación Estándar	0.58
Coefficiente de Variación	32.69%
Mínimo	0.2
Máximo	4
Rango	3.8

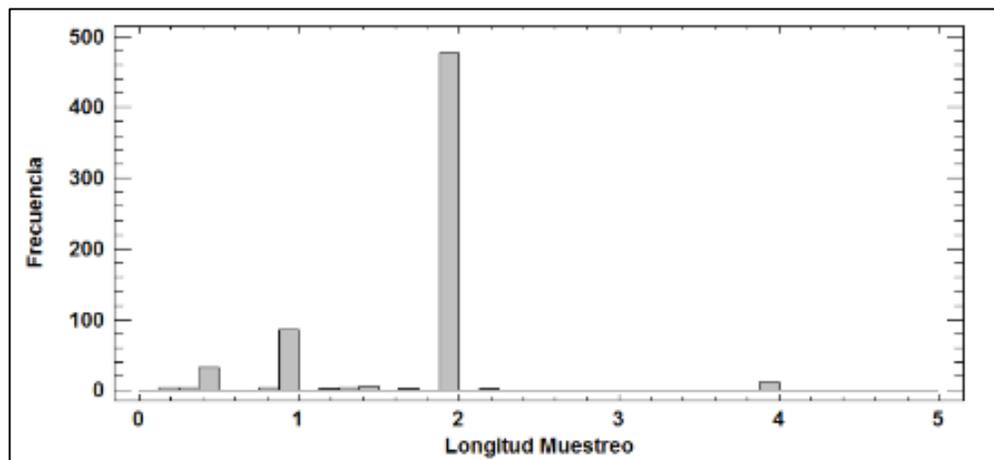
Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Como lo muestran los resultados, la longitud de compósito óptima es de 2 metros, cabe destacar, que aunque hay sondeos con longitud menor a 2 metros, por defecto en este caso, se asignó una muestra para estos sondeos de manera que tengan representación en los compósitos construidos. La totalidad de las muestras

incorporadas en la base de datos aptas para análisis son 433, mientras que las muestras obtenidas al realizar el compósito de 2 metros de longitud es de 450 esta diferencia no es significativa ya que corresponde al 96% de representatividad de la base de datos, por lo tanto el compósito definido regulariza el intervalo de muestreo de forma aceptable.

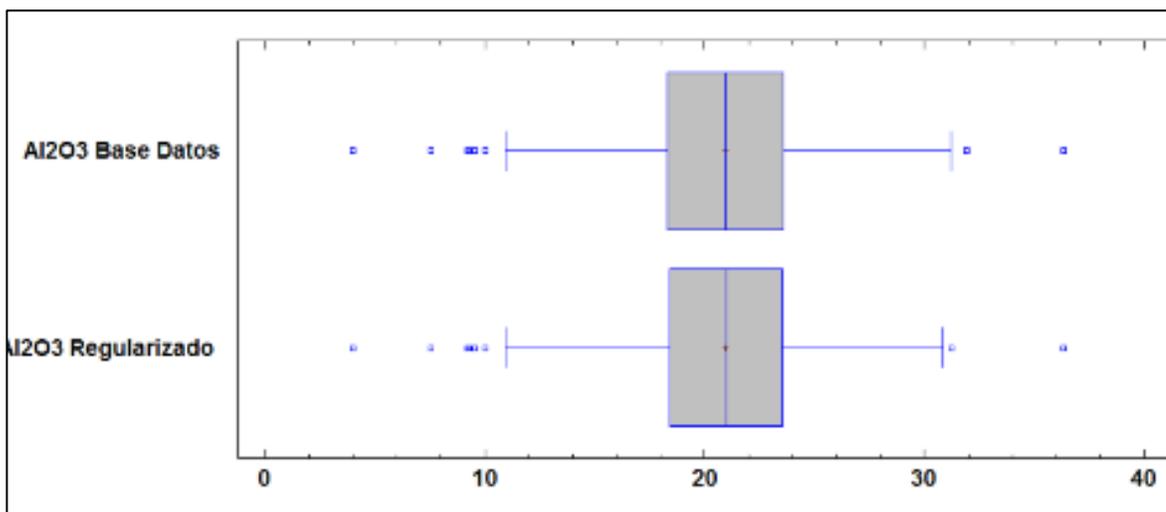
A continuación se presenta en las gráficas, estadísticas de las muestras no regularizadas y regularizadas, lo cual justifica que aún con la regularización, las muestras conservan su comportamiento y distribución (Ver Figura 21, Figura 22, Figura 23).

Figura 21 Histograma de intervalos de muestreo en base de datos



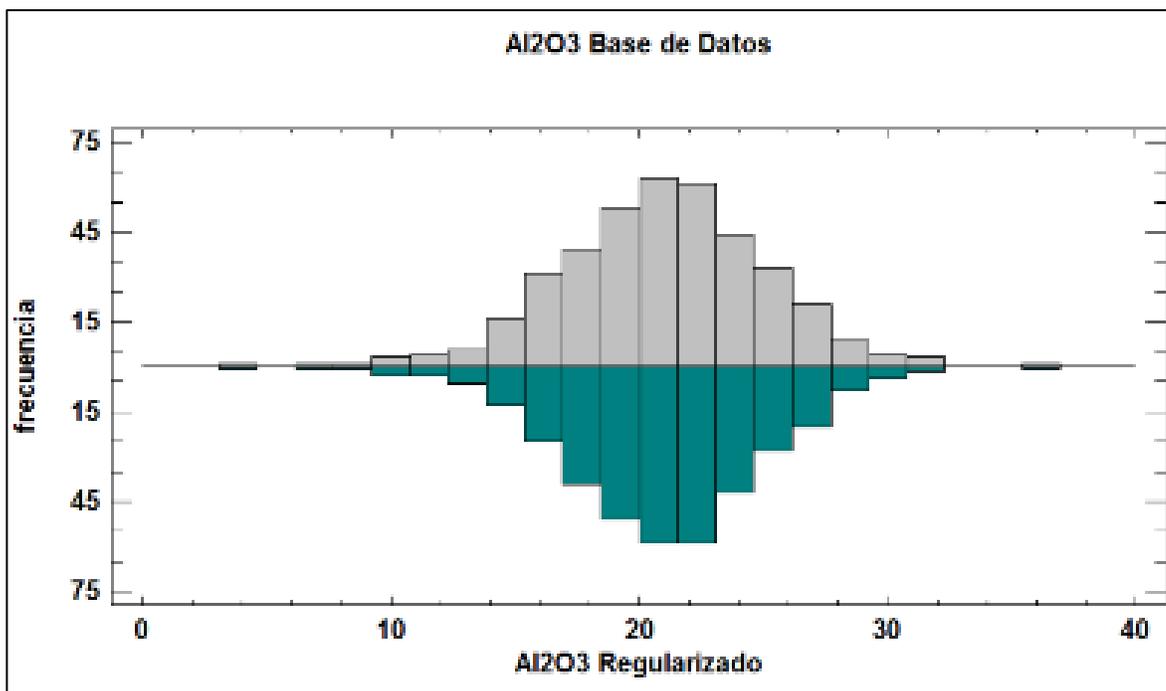
Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 22 Diagrama de caja y bigotes



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 23 Histograma de frecuencias (inferior)



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

7.4.2 Análisis de datos exploratorios (EDA)

El análisis de los resultados de calidad (en términos de % de óxidos principales) se hizo con base en los resultados de los análisis de laboratorio de las muestras colectadas, el objetivo fue determinar el contenido de óxidos por medio de porcentajes, para tal fin se usó el método de Difracción de Rayos X (DRX). Para realizar los análisis se utilizaron compósitos de 2 metros de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 .

Se realizaron tres diferentes configuraciones de análisis para identificar el comportamiento matemático de los diferentes óxidos dentro del horizonte de meteorización, estas configuraciones obedecen a características litológicas y diferenciación en el horizonte de meteorización, a continuación se describe cada una de estas configuraciones:

- a. **Configuración a:** en la primera configuración, se generaliza toda la información de los sondeos en un solo compósito, no se discrimina en este compósito la información por ningún aspecto geológico. Con esta configuración se obtiene 1 compósito denominado “sample_all_dep.str”.
- b. **Configuración b:** en esta configuración se clasificó la información de acuerdo a cada uno de los horizontes de meteorización (IV-III, V y VI). Para este caso, se obtuvieron tres compósitos denominados “sample_IV-III_dep.str”, “sample_V_dep.str” y “sample_VI_dep.str”.
- c. **Configuración c:** la tercera configuración clasifica la información por cada horizonte meteorización y además se restringen los compósitos de acuerdo a la litología (Gneis o Anfibolita). En este caso se obtuvieron 6 compósitos denominados igual que el caso anterior pero anexándoles el sufijo de acuerdo a la unidad litológica que represente, es decir “pza” para el caso de la anfibolita y “nfl” para el neis.

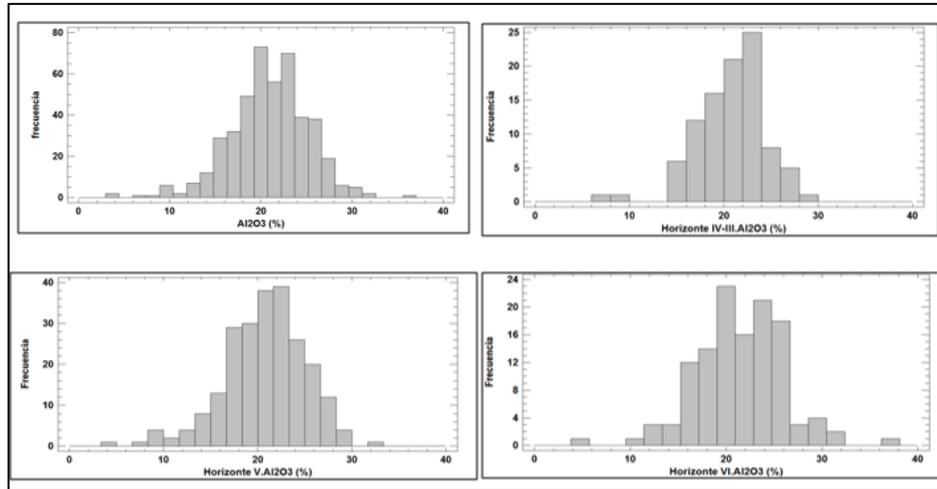
➤ Al_2O_3

Dentro de los análisis realizados, el Al_2O_3 fue la única variable que mostró un comportamiento estable en las diferentes configuraciones de análisis, se observa en la Figura 24, que gráficamente la información se asemeja a una distribución normal, aunque al verificar los parámetros numéricos (Ver Tabla 7), se encuentra que la distribución presenta valores de Curtosis Estandarizada (CE) (la cual sirve para analizar el grado de concentración que presentan los valores de una variable analizada alrededor de la zona central de la distribución de frecuencias) por encima de los máximos permitidos ($\text{CE} > 2$) para la definición de una distribución Gaussiana ideal.

Para el caso de las configuraciones b y c, la distribución gráfica y los reportes numéricos presentan un comportamiento similar al antes explicado.

Por lo tanto luego de realizar el análisis del comportamiento de la distribución del Al_2O_3 dentro del perfil de meteorización, se concluye que el análisis de variografía para el caso del Al_2O_3 es posible realizarlo con el compósito que incluye todos los horizontes de meteorización, ya que presentan una distribución con características similares y muy cercanas a la distribución Gaussiana (Ver Tabla 8, Figura 25).

Figura 24 Histogramas comparativo horizontes de meteorización Al_2O_3



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Tabla 7 Resumen estadístico contenido de Al_2O_3

RESUMEN ESTADÍSTICO Al_2O_3 PERFIL METEORIZACIÓN	
Recuento	450
Promedio	20.94
Mediana	21.01
Moda	23.67
Varianza	18.49
Desviación Estándar	4.3
Coficiente de Variación	20.53%
Mínimo	4.02
Máximo	36.33
Rango	32.31
Sesgo Estandarizado	-3.69
Curtosis Estandarizada	5.22

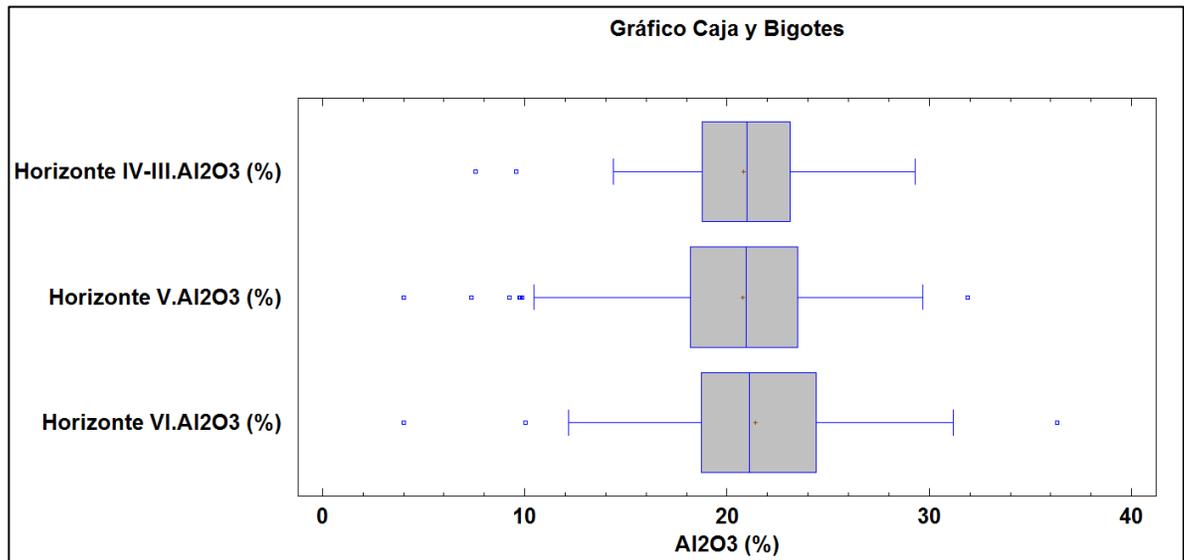
Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Tabla 8 Resumen estadístico comparativo horizontes de meteorización Al₂O₃

RESUMEN ESTADÍSTICO HORIZONTE DE METEORIZACIÓN							
Perfil Meteorización	Recuento	Promedio (%)	Desviación Estándar	Coefficiente de variación (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Rango
IV-III	96	20.8	3.68	0.18	7.57	29.29	21.72
V	232	20.76	4.32	0.21	4.02	31.89	27.87
VI	122	21.4	4.69	0.22	4.02	36.33	32.31
Total	450	20.94	4.3	0.21	4.02	36.33	32.31

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 25 Comparativo gráfico caja y bigotes horizontes de meteorización Al₂O₃



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

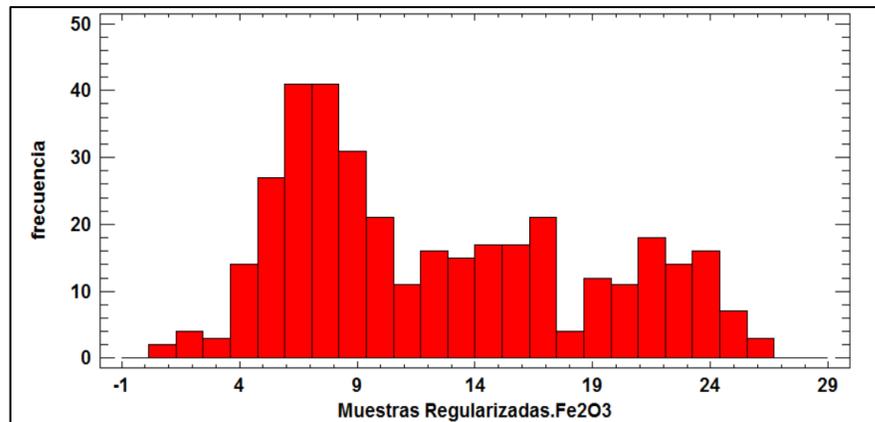
➤ **Fe₂O₃**

Esta variable a diferencia del aluminio, presenta una clara distribución multimodal y alta dispersión de los datos (Ver Figura 26), en este caso se utilizaron las tres configuraciones antes mencionadas, con el objetivo de obtener una distribución matemática que justifiquen las hipótesis geoestadísticas en un eventual proceso de estimación ya que como se mostrará a continuación, los datos en conjunto no permiten cumplir este objetivo. Las razones que generan el comportamiento multimodal mencionado pueden ser:

- i. Diferente comportamiento de la variable asociado a cada uno de los horizontes de meteorización.
- ii. Diferente comportamiento en los perfiles de meteorización producto de las diferentes rocas fuente generadoras de los materiales arcillosos (pza).
- iii. Por último, el comportamiento multimodal del Fe_2O_3 podría estar asociado a las inyecciones ígneas que han afectado considerablemente las diferentes unidades litológicas, debido a que estas inyecciones están enriquecidas en SiO_2 .

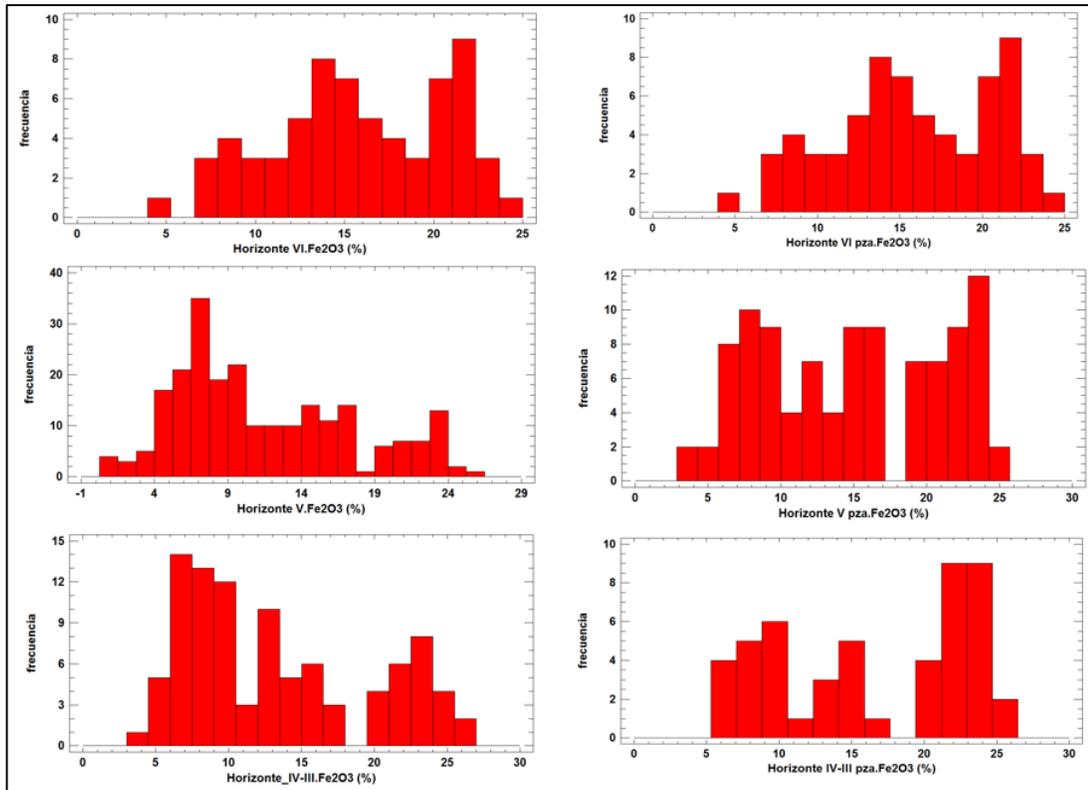
Por medio de las diferentes configuraciones de los compósitos fue posible analizar de forma independiente las características i y ii (Ver Figura 27) antes mencionadas que podrían generar el comportamiento multimodal del Fe_2O_3 , la característica iii, no fue posible analizarla ya que las inyecciones ígneas no presentan un comportamiento estructural sistemático o modelable. Como resultado general se obtuvo que no fue posible realizar una discriminación de compósitos que permitiera identificar zonas geológicas con comportamiento homogéneo y de esta manera justificar el uso de geostatística en el proceso de estimación.

Figura 26 Histograma de frecuencias Fe_2O_3 totalidad de muestras



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 27 Distribuciones Fe_2O_3 entre las diferentes configuraciones de análisis



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

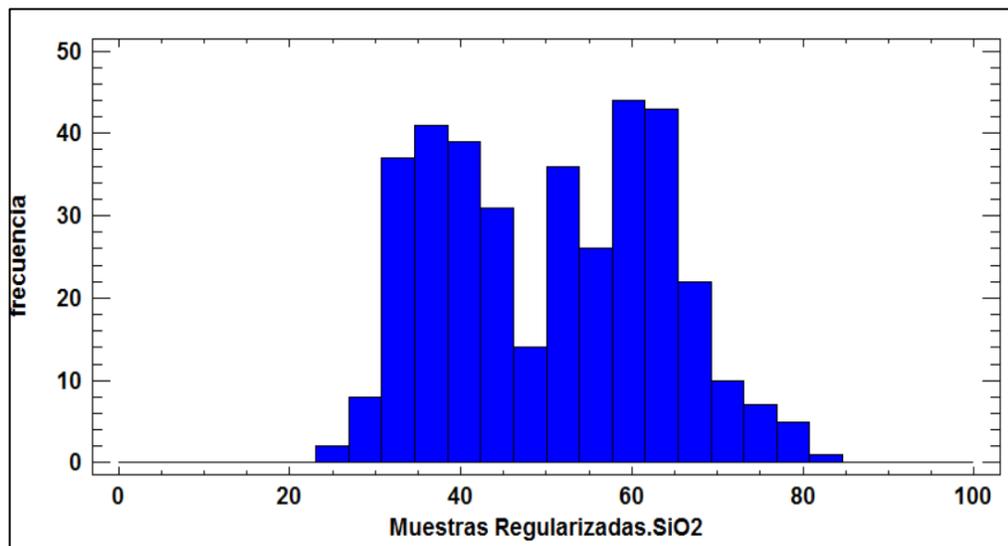
➤ **SiO_2**

El SiO_2 presenta resultados con similares características a las del Fe_2O_3 al analizar la totalidad de muestras como un solo compuesto (configuración a), pero a diferencia del Fe_2O_3 , fue posible identificar el comportamiento de los horizontes de meteorización a partir de las configuraciones definidas previamente (configuración b y c). En la Figura 28 se observa el histograma construido a partir de las muestras totales, donde claramente se observa una distribución bimodal de los datos y los parámetros estadísticos no representan una distribución estadística modelable (Ver Tabla 9). Al discriminar las muestras de acuerdo a las configuración de análisis b (Ver parte b1, b2 y b3 de la Figura 29), los datos presentan un mayor ajuste a distribuciones estadísticas conocidas, pero los parámetros numéricos no se ajustan a estas distribuciones, es decir, sólo se presenta un ajuste gráfico de los datos. Para el caso de la configuración de análisis c, se encuentra un ajuste gráfico y también en parámetros numéricos a distribuciones estadísticas estándar, por ejemplo, el horizonte III-IV de anfibolitas (pza) presenta una tendencia a ajustarse a una

distribución Gaussiana (Ver Figura 29 parte c1), el horizonte V pza, presenta una tendencia a ajustarse también a la distribución Gaussiana (Ver Figura 29 parte c2), mientras que el horizonte V pza se ajusta a una distribución Log normal (Ver Figura 29 parte c3).

Estos aspectos identificados en el Estudio Exploratorio de Datos (EDA) del SiO_2 , implican que para el proceso de estimación, se hace necesario realizar una discriminación en la selección de muestras por horizonte de meteorización y por litología, y con esto realizar las estimaciones por separado con el fin de tener resultados más representativos en términos de calidad del yacimiento.

Figura 28 Histograma de frecuencias SiO_2 totalidad de muestras



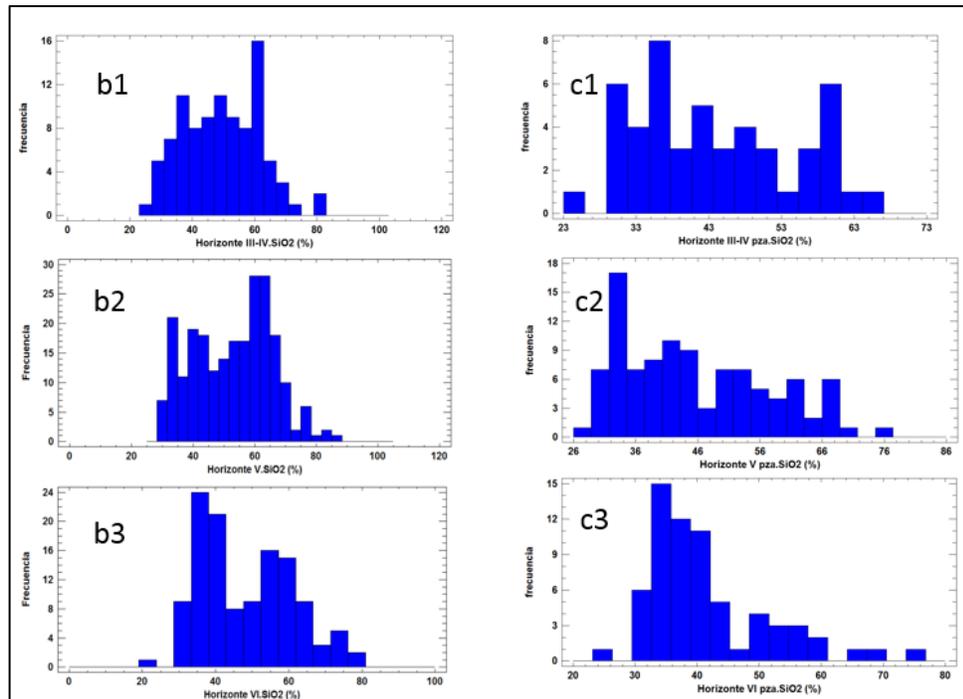
Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Tabla 9 Parámetros estadísticos SiO₂ muestras totales

RESUMEN ESTADÍSTICO SiO ₂	
Recuento	366
Promedio	50.502
Mediana	51.2759
Moda	35.16
Desviación Estándar	12.9541
Coficiente de Variación	25.65%
Mínimo	2352.00%
Máximo	81.46
Rango	57.94
Sesgo Estandarizado	0.874408
Curtosis Estandarizada	-4.11844

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 29 Histogramas de frecuencia SiO₂ configuraciones de análisis b y c



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

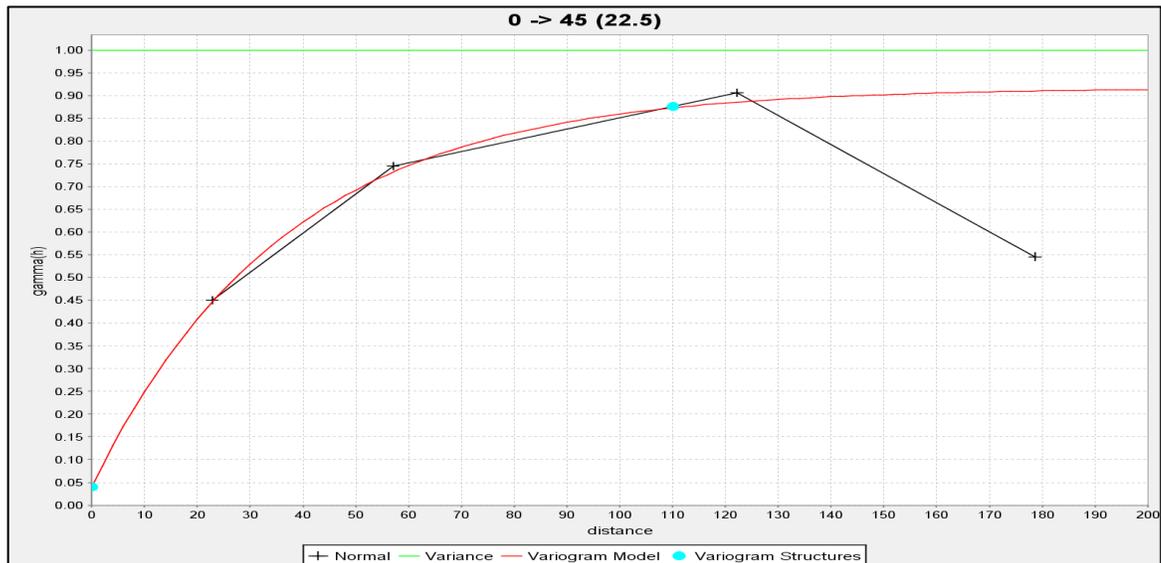
7.4.3 Variografía

La variografía consiste en determinar los rangos de correlación, direcciones preferenciales de correlación y modelos matemáticos que mejor representan las variables objeto de análisis teniendo en cuenta el EDA desarrollado antes. Para el caso del proyecto, con el EDA se identificó un comportamiento diferenciado para cada una de las variables objeto de análisis, lo cual implica que cada variable debe ser analizada y estimada de forma independiente. Por los motivos antes expuestos, se elaboraron análisis de variografía en 16 diferentes direcciones para cada una de las variables de interés con el fin de identificar de forma adecuada los parámetros de estimación, los resultados se presentan a continuación:

➤ Al_2O_3

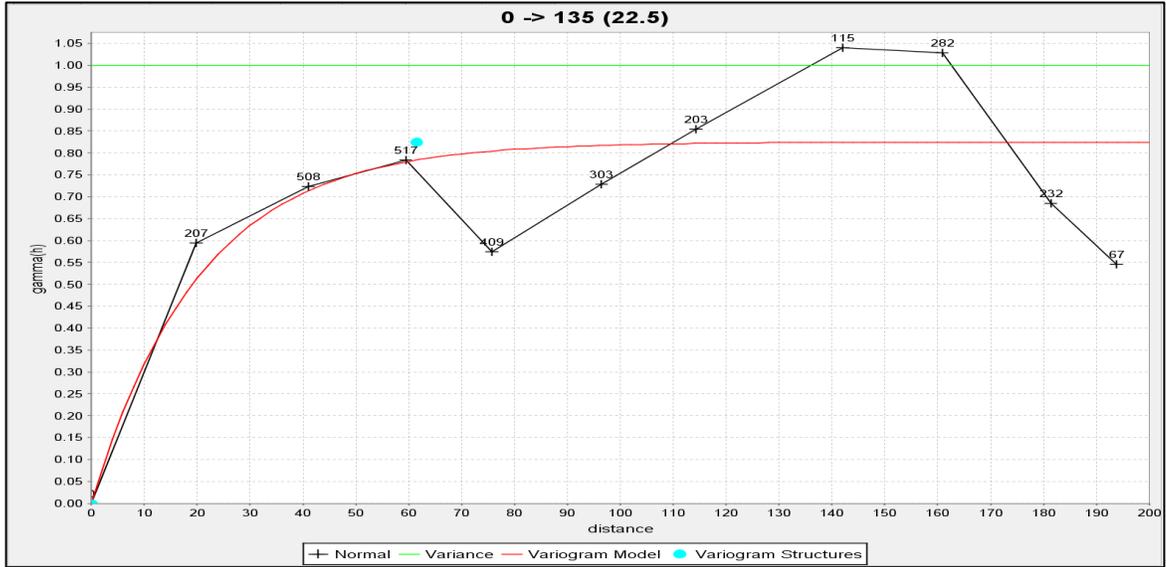
En esta variable se identificaron radios de correlación de 110 metros y el eje mayor con dirección 22.5° azimuth, en la Figura 30 se observa el variograma en dirección al eje mayor identificado, en la Figura 31 se observa el variograma del eje intermedio identificado.

Figura 30 Variograma eje mayor Al_2O_3



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 31 Variograma eje intermedio Al₂O₃

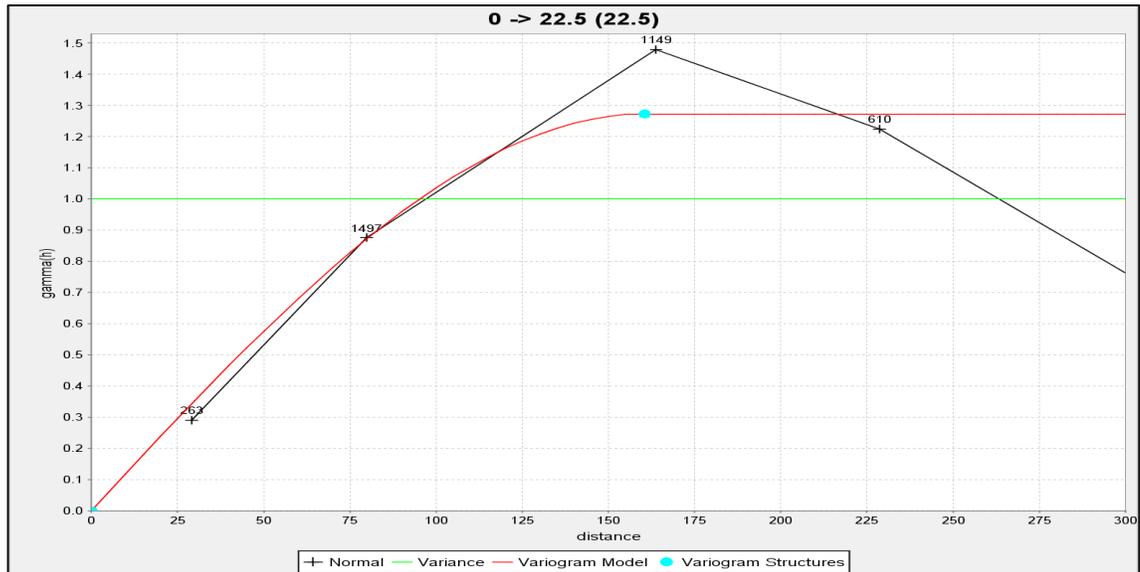


Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

➤ **Fe₂O₃**

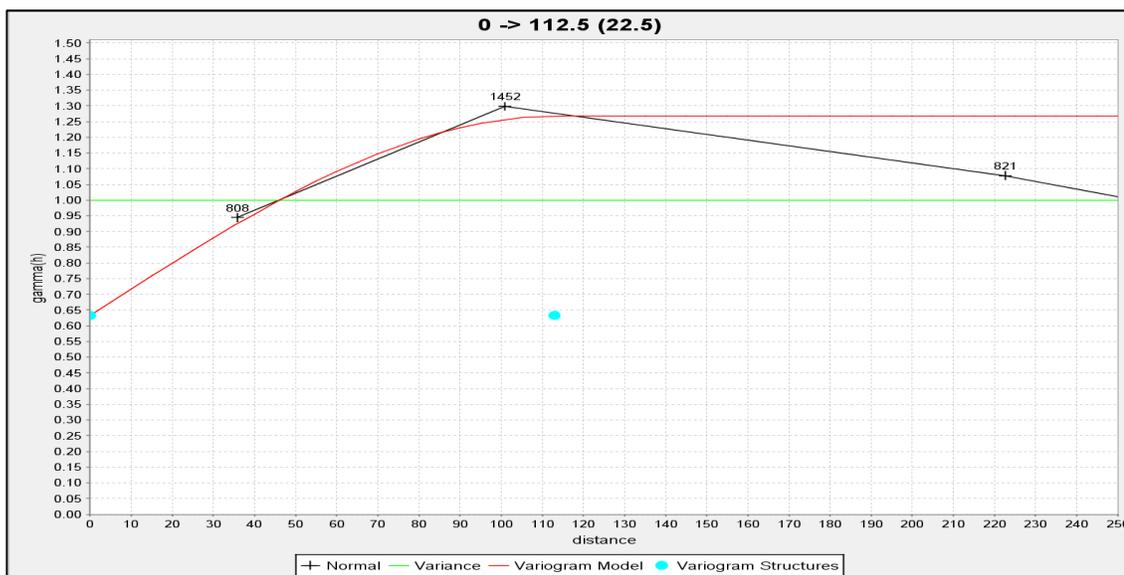
En la Figura 32 se presenta el variograma en dirección principal identificado y en la Figura 33 se presenta el variograma en la dirección secundaria asociado al Fe₂O₃.

Figura 32 Variograma dirección principal Fe₂O₃



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 33 Variograma dirección secundaria Fe₂O₃

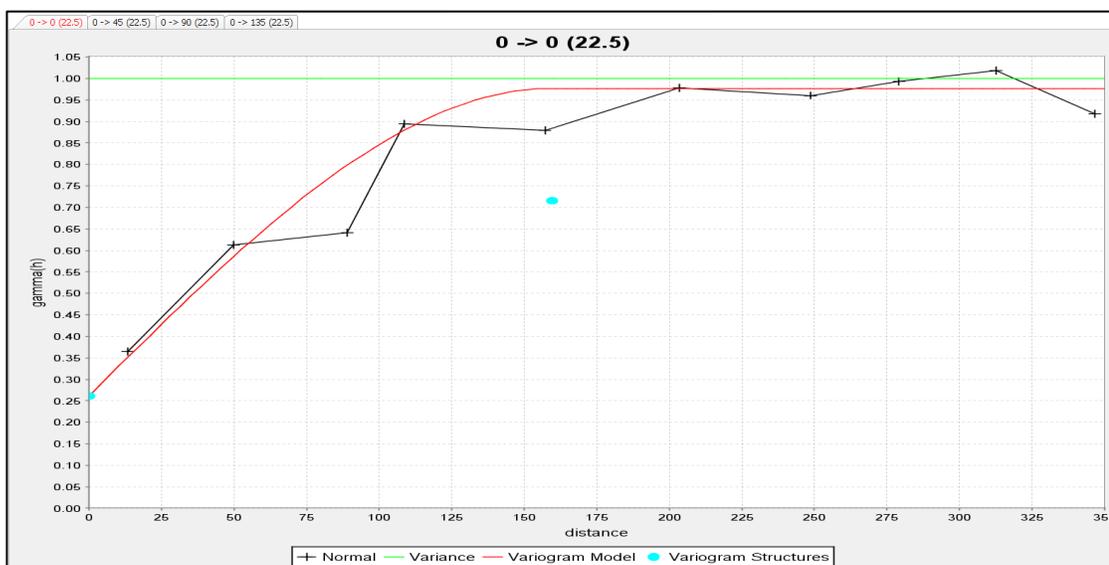


Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

➤ **SiO₂**

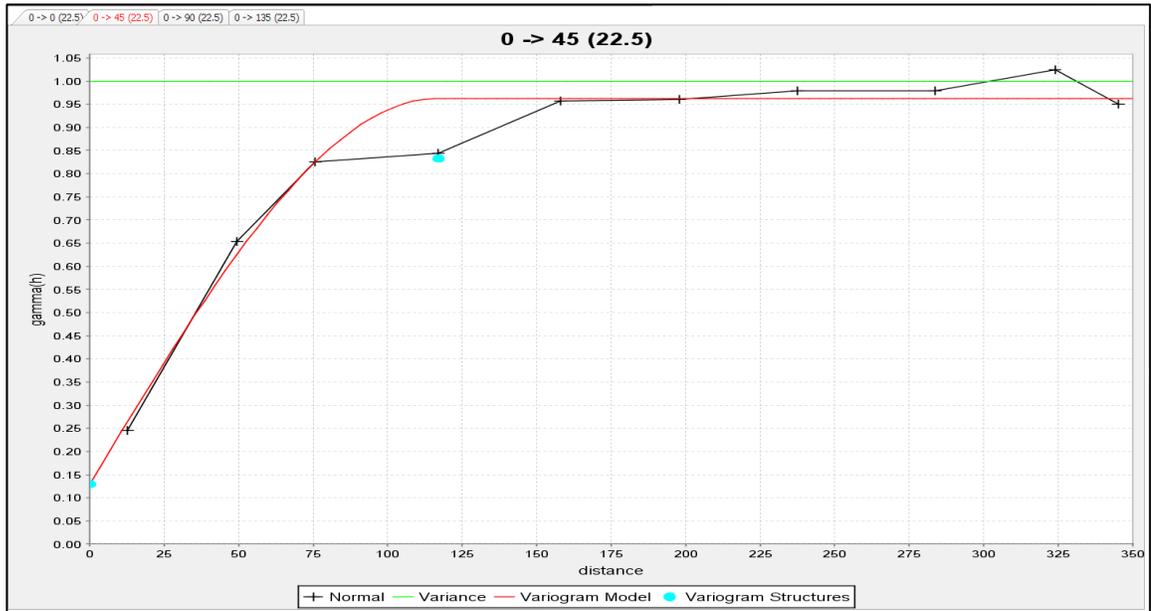
En la Figura 34 se observa el variograma en dirección principal para el SiO₂ y en la Figura 35, se observa el variograma en dirección secundaria. A diferencia del Fe₂O₃ y el Al₂O₃, en esta variable, a 0 grados azimuth se identificó la dirección de mayor correlación.

Figura 34 Variograma eje mayor SiO₂



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 35 Variograma eje intermedio SiO₂



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

En la Tabla 10 se presenta el resumen de los parámetros geoestadísticos obtenidos para el Al₂O₃, en la Tabla 11 los parámetros del Fe₂O₃ y en la Tabla 12 el resumen de los parámetros geoestadísticos del SiO₂.

Tabla 10 Resumen parámetros geoestadísticos Al₂O₃

PARÁMETROS GEOESTADÍSTICOS Al ₂ O ₃											
Variograma Al ₂ O ₃	Modelo	Lag	Pepa	Sill 1	Rango 1	Sill 2	Rango 2	Total Sill	Total Rango	Azimuth	Dip
Gam (x)	Exponencial	60	0.04	0.88	110	0	0	0.88	110	22.5	0
Gam (y)	Esférico	20	0	0.82	60	-0.08	25	0.75	62	112.5	0
Gam (z)											

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Tabla 11 Resumen parámetros geoestadísticos Fe₂O₃

PERFORACIONES CORAZONADAS											
Variograma Fe ₂ O ₃	Modelo	Lag	Pepa	Sill 1	Rango 1	Sill 2	Rango 2	Total Sill	Total Rango	Azimuth	Dip
Gam (x)	Esférico	110	0	1.27	160	0	0	1.27	160	22.5	0
Gam (y)	Esférico	110	0.63	0.63	113	0	0	0.63	112	112.5	0
Gam (z)											

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Tabla 12 Resumen parámetros geoestadísticos SiO₂

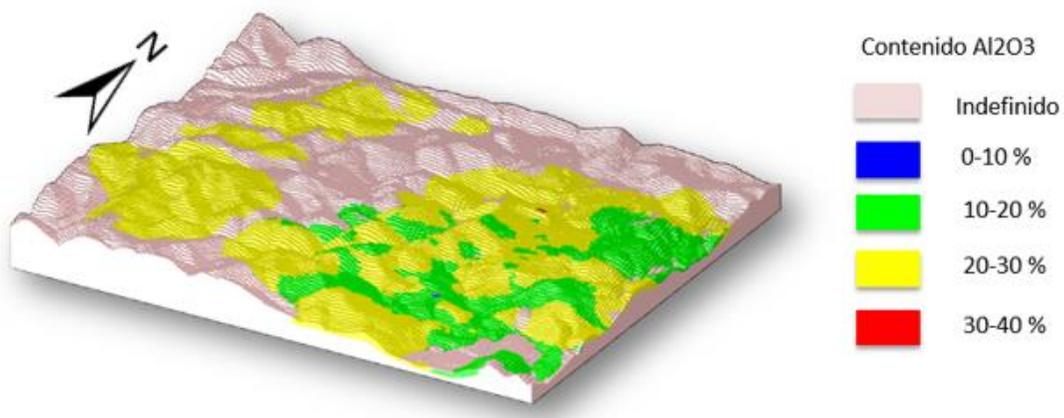
TODAS LAS CAMPAÑAS											
Variograma SiO ₂	Modelo	Lag	Pepa	Sill 1	Rango 1	Sill 2	Rango 2	Total Sill	Total rango	Azimuth	Dip
Gam (y)	Esférico	60	0.26	0.72	159.56	0	0	0.72	159.56	0	0
Gam (x)	Esférico	60	0.13	0.83	117.02	0	0	0.83	117.02	45	0
Gam (z)	Esférico	60	0.21	0.79	90	0	0	0.79	90	0	-90

Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

7.5 ESTIMACIONES

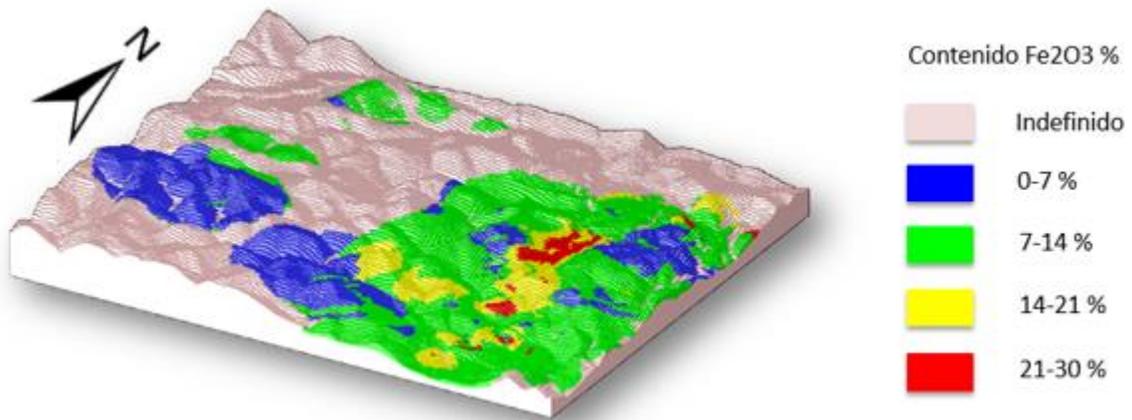
Con base en criterios geoestadísticos y en los parámetros definidos en las Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 se realizaron los procesos de estimación de los óxidos de interés, estas estimaciones se realizaron en 3 corridas diferentes donde se utilizan parámetros menos exigentes para cada una de estas corridas. La definición de la exigencia para cada corrida en la estimación se definió con base en los radios y direcciones principales de correlación, en la Figura 36, Figura 37 y Figura 38 se muestran los resultados del proceso de estimación donde el color rosa no tiene concentración, el color azul representa una baja concentración de los óxidos, el color verde una media concentración, el color amarillo una alta concentración y el color rojo representa muy alta concentración:

Figura 36 Estimación Al_2O_3



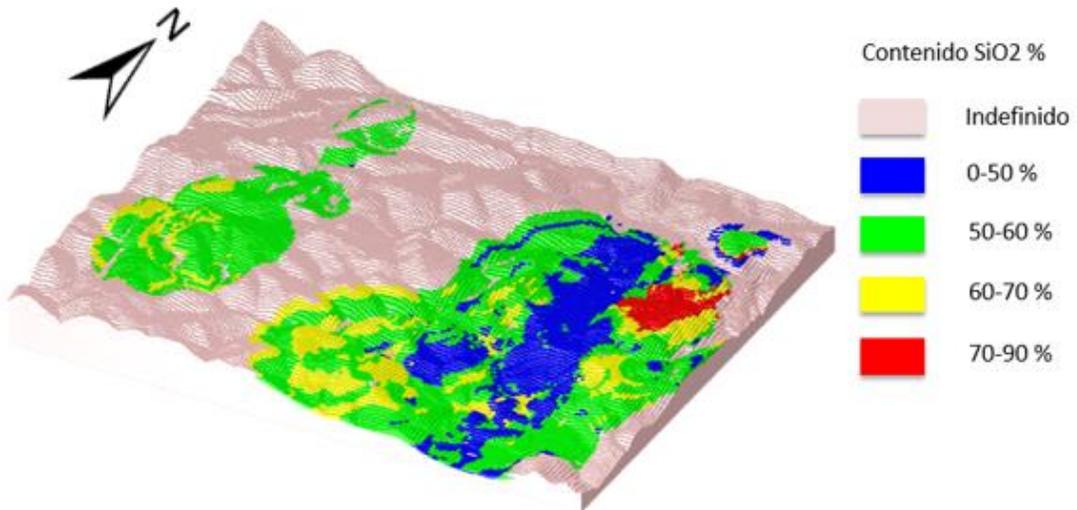
Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 37 Estimación Fe₂O₃



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

Figura 38 Estimación SiO₂



Fuente: Soluciones en Geología y Minería S.A.S.

De acuerdo a los resultados del modelo de calidad y al análisis realizado se estima que hay un porcentaje de concentración promedio de óxidos principales de Al_2O_3 : 18%, Fe_2O_3 : 10% y SiO_2 : 54%, los cuales son apropiados para ser usados en la industria cementera como puzolanas sintéticas.

Por comportamiento puzolánico se entiende “la capacidad de reacción de estos materiales con CaO, con CaO generada por la reacción de los minerales del Clinker en una solución acuosa, en presencia o ausencia de yeso, con formación de fases hidratadas que contribuyen al endurecimiento de la pasta” (Mella, A., 2004). La mayoría de los materiales puzolánico son de naturaleza acida, ósea en su composición química predominan Al_2O_3 , Fe_2O_3 y SiO_2 capaces de reaccionar y fijar el CaO.

En general las propiedades de las puzolanas dependen de la composición química y la estructura interna, radicando su gran diferencia netamente en la granulometría. Para llevar a cabo la fabricación de puzolanas sintéticas en la industria cementera se requiere que este compuesto químico por los tres óxidos principales en los siguientes rangos: Al_2O_3 : 5-20%, Fe_2O_3 : 1-14% y SiO_2 : 42-85% (Ver Tabla 13), esto orientado a la ocupación en la fabricación del cemento siendo estos valores favorables para dicho fin.

Tabla 13 Valores de composición química límite y media de puzolanas sintéticas en la industria cementera

Composición	Valor Límite (%)	Valor Medio (%)
Óxido de Silicio (SiO_2)	42-85	65
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	5-20	12.5
Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	1-14	5
Óxido de Calcio (CaO)	0-12	3.5
Óxido de Potasio (K_2O)	0-5	2
Óxido de Sodio (Na_2O)	0-5	2
Óxido de Magnesio (MgO)	0-11	1.5
Trióxido de Azufre (SO_3)	0-1	0.5
Pérdida por Calcinación (LOI)	0-15	6

Fuente: Estudio, caracterización y evaluación de puzolanas locales en la masa cerámica del ladrillo, (Mella, A., 2004).

En la industria cementera el CaO liberado en las reacciones de hidratación puede reaccionar a su vez con la puzolana contenida en el cemento, formando compuestos con propiedades aglomerantes. La actividad puzolana frente al CaO

tiene su origen en estructura inestable de los compuestos que la conforman, esencialmente compuestos derivados de SiO_2 , cristalográficamente amorfos y en la elevada superficie específica de estos (Superficie activa para la reacción).

Para lograr una variedad de aplicaciones del cemento en la actualidad se requiere utilizar en su elaboración sustancias naturales o sintéticas que le impriman al cemento las propiedades requeridas. Esta función la cumplen los llamados aditivos, existiendo una amplia gama de estos, de los cuales tenemos las puzolanas sintéticas.

La adición de puzolanas confiere características ventajosas para los cementos, tales como mayor resistencia química, menor calor de hidratación, inhibición de la reacción nociva álcalis/árido. Aplicada al concreto lo hace menos permeable y por tanto más durable, mejorando considerablemente las propiedades mecánicas de este, además propicia una disminución del contenido del cemento y produce el consiguiente ahorro de la mezcla.

La incorporación de puzolanas mejora el comportamiento del cemento ante agentes agresivos y disminuye el calor de hidratación, debiéndose adoptar, por el contrario, precauciones especiales en el curado y en el hormigonado en tiempo frío.

CONCLUSIONES

- ✓ Se identificaron los espesores promedios de los horizontes de meteorización interceptados en la campaña de exploración.
- ✓ Se comprobó la continuidad del depósito de arcillas en el sector alto rico mediante la correlación de las tres perforaciones ejecutadas.
- ✓ La variable Al_2O_3 presente una distribución normal de los datos, no presenta comportamientos de distribución diferentes en los distintos horizontes de meteorización, por este motivo, la estimación se puede realizar sin restricciones.
- ✓ La variable Fe_2O_3 presenta comportamientos multimodales que pueden estar asociados a: diferente comportamiento en los distintos horizontes de meteorización, también asociado a diferente comportamiento en los perfiles de meteorización producidos por las diferentes unidades litológicas y diferente comportamiento asociado a las inyecciones ígneas que aumentan considerablemente el contenido de SiO_2 , Al_2O_3 y disminución del contenido de Fe_2O_3 .
- ✓ La variable Fe_2O_3 presenta en general una distribución uniforme, en ninguno de los horizontes de meteorización se presenta distribución normal de los datos. Es necesario analizar de forma independiente cada uno de los horizontes de meteorización para esta variable.
- ✓ El SiO_2 presenta comportamientos que se ajustan a la distribución normal siempre y cuando los datos se analicen clasificando los datos por horizontes de meteorización.
- ✓ Se realizó un análisis geoestadístico por medio del cual se pudo determinar los rangos de correlación, direcciones preferenciales de correlación y modelos matemáticos que mejor representan las variables, obteniendo el modelo teórico exponencial para el Al_2O_3 y para el Fe_2O_3 y SiO_2 es el modelo teórico esférico.
- ✓ Se estimaron las variables de interés, se realizaron en 3 corridas diferentes donde se utilizan parámetros menos exigentes para cada una de estas corridas.
- ✓ Los resultados del modelo de calidades estiman que las variables estudiadas tienen concentraciones de Al_2O_3 : 18%, Fe_2O_3 : 10% y SiO_2 : 54% los cuales están en el rango y son propicias para ser utilizadas en la industria cementera como puzolanas sintéticas.
- ✓ La adición de puzolanas confiere características ventajosas para los cementos, tales como mayor resistencia química, menor calor de hidratación, inhibición de la reacción nociva álcalis/árido.
- ✓ La incorporación de puzolanas mejora el comportamiento del cemento ante agentes agresivos y disminuye el calor de hidratación, debiéndose adoptar,

por el contrario, precauciones especiales en el curado y en el hormigonado en tiempo frio.

RECOMENDACIONES

- ✓ Llevar a cabo una campaña de exploración en el sector de norte del área de estudio, con el fin de identificar y estudiar cuerpos de roca con características similares.
- ✓ Se recomienda realizar análisis de Difracción de Rayos X a algunas muestras de suelo que permitan asociar los mejores resultados geoquímicos con la composición mineralógica de las arcillas.

REFERENCIAS

- Carroll, et. al, 1996. A comparison of Geostatistical Techniques Used to Estimate Snow Water Equivalent, in Srivastava et al (Eds.) Geostatistics for Geotechnical and Environmental Applications ASTM STP 1238, American Society of Testing Materials, Philadelphia.
- Delgado, A. & Negrete, C. 2012. Evaluación del uso de arcillas y puzolanas en la etapa de molienda de acabado para la fabricación de cemento portland puzolánico tipo IP.
- González, H. 2001. Mapa geológico del Departamento de Antioquia. Memoria explicativa. Escala 1:400.000. Ingeominas, Bogotá. 240 P.
- Feininger, T., Barrero, D., Castro, N., Ramírez, O., Lozano, H. & Vega, J. 1970. Mapa Geológico del Oriente de Antioquia (Hojas I y II). Cuadrángulo I-9 y parte de lo cuadrángulos H-9, H-10, I-10, J-9 y J-10. Escala 1:100.000. Ingeominas. Bogotá.
- Feininger, T., Barrero, D. & Castro, N. 1972. Geología de Antioquia y Caldas (Subzona II-B). Boletín Geológico Ingeominas. Volumen 20 (2). P. 1-173. Bogotá.
- Feininger, T. & Botero, G., 1982. The Antioquian Batholith, Colombia. Publicación Geológica Especial Ingeominas. N° 12. p. 1-50. Bogotá.
- Maya, M., 1992. Catálogo de dataciones isotópicas en Colombia. Boletín Geológico Ingeominas. Volumen 32 (1-3). P. 127-188. Santafé de Bogotá.
- Mella, A., 2004. Estudio, caracterización y evaluación de puzolanas locales en la masa cerámica del ladrillo. Pág. 58-77.
- Muñoz, R., Muñoz, J., Mancilla, P. & Rodríguez-Páez, P. 2007. Caracterización fisicoquímica de arcillas del municipio de Guapi - Costa Pacífica Caucana (Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. 31 (121): 537-544. ISSN 0370-3908.
- Nelson, H., 1957. Contribution to the Geology of the Central and Western Cordillera of Colombia in the sector between Ibagué and Cali. Leidse. Geol. Medel. (Leyden). 22: 1-76
- Latorre, A., Del Rieu, J. & Rodríguez, N. 2008. La industria del cemento en determinantes y comportamiento de Colombia la demanda (1996-2005).
- Little, A., 1969. The engineering classification of residual tropical soils.
- Ocampo, E., 2005. Caracterización petrográfica de los mármoles de cementos Río Claro, sector sur, con miras a estudiar su potencial de uso, especialmente en la industria cementera y aumentar las reservas de materias primas de la empresa Cementos Río Claro S.A.

- Petigas, P., 1996. Geostatistics and their applications to fisheries survey data. Pág. 113-142
- Solá, P., Yacobaccio, H., Rosenbusch, M., Alonso, M., Maier, M., Vázquez, C. & Catá, M. 2013. Hematita vs. Arcillas: su potencial como pigmentos rojos y su uso en tres sitios de la puna jujeña (argentina) boletín del museo chileno de arte precolombino vol. 18, n° 1, pp. 67-83, Santiago de Chile issn 0716-1530.
- Soluciones en Geología y Minería S.A.S. 2014. Cartografía geológica y modelado espacial Mina Alto Rico contrato de concesión 2806 (Sonsón, Antioquia).
- Toussaint, J., 1993. Evolución geológica de Colombia. Tomo I: Precámbrico-Paleozoico. Universidad Nacional de Colombia. 229 p. Medellín.

BIBLIOGRAFÍA

- Cahuana, A., 2014. Sílice: el aliado oculto y estratégico para el desarrollo empresarial de la industria nacional.
- Celada, C., Carmona, J. & Cardona, J. 2008. Prospección geológica de superficie en el área de las licencias 4735 Mina la Serranía y 4736 Mina el Cerro. Municipio de San Carlos – Antioquia.
- Collins, D., Benalcazar, G. & Page, W., 1981. Quaternary activity on the Palestina fault zone, Northwestern Colombia (resumen): Revista CIAF, Bogotá, V. 6, No. 1-3, p.117.
- Díaz, M. 2012. Estudio del efecto conjunto de la Fluorita y el Yeso como mineralizadores en la fabricación de cemento Portland I.
- Orville, P., 1969. A model for metamorphic differentiation origin on thin layered amphibolites. American Journal Science. 267 (1): 64-86.
- Page, W. y James, M., 1981. The antiquity of the erosion surfaces and late Cenozoic deposits near Medellin, Colombia: Implications to tectonics and erosion rates”. Revista CIAF, Vol. 6. No. 1-3. pp. 421-454.
- París, G., Dart, R., & Manchette, M. 2000. Map of Quaternary faults and folds of Colombia and its offshore regions. U.S. Geol. Surv. Open-File Rept., Scale 1:2.500.000.
- Ramírez, M., 2008. Sostenibilidad de la explotación de materiales de construcción en el valle de aburra.
- Rendón, A., Caballero, A., Arias, A., González, A., Arenas, J. & Gallego, J., 2011. Estudio geológico – geomorfológico en el oriente cercano a Medellín, como apoyo a la búsqueda de actividad tectónica reciente.
- Restrepo, O. 2006. Efectos de algunas adiciones minerales colombianas en la fabricación del Clinker para cemento Portland I.