

ANÁLISIS PRÓXIMO DE ARCILLAS PARA CERÁMICA

por

I. Bernal, H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica & J. Quintero*

Resumen

Bernal, I., H. Cabezas, C. Espitia, J. Mojica & J. Quintero: Análisis próximo de arcillas para cerámica. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **27** (105): 569-578, 2003. ISSN 0370-3908.

Se desarrolló una metodología de trabajo para establecer el denominado “Análisis próximo” para calcular la composición mineralógica cuantitativa de minerales arcillosos simples e interstratificados y de los demás minerales presentes en las arcillas con base en los datos obtenidos en el análisis químico y en el de difracción de rayos X. Se relaciona el tipo de mineral arcilloso con su comportamiento en el proceso cerámico.

Palabras clave: arcillas, análisis próximo, minerales arcillosos, cerámica.

Abstract

A methodology to establish the nominal next analysis was developed to calculate the quantitative composition of simple loamy minerals and interstratificates and of the other minerals present in the clays, based on the data obtained in the chemical analysis and in the analysis for diffraction of X rays.

Key words: Clay, next analysis, clay minerals, ceramic.

1. Introducción

El término análisis próximo o “aproximado” es un sistema de expresión de los resultados analíticos usado comúnmente en carbones y en alimentos, que permite relacionarlos con sus propiedades. Aquí se propone un sistema de cálculo que permite obtener una composición mineralógica aproximada cuantitativa.

Considerando las arcillas como un mineral natural complejo, constituido principalmente por una mezcla de sílico aluminatos cristalinos a los que denominamos minerales arcillosos y de otros silicatos y minerales de hierro, calcio, titanio, etc., acompañados frecuentemente por materia orgánica, su composición mineralógica es determinante en el comportamiento de los procesos a los que se destine.

* Área Recursos del Subsuelo, INGEOMINAS, *Diagonal 53 # 34-53, Bogotá-Colombia*, jquinter@ingeoimin.gov.co

Puesto que la mayor aplicación de las arcillas ha sido tradicionalmente para la producción de objetos cerámicos, es preocupación de los investigadores en este campo el poder relacionar los datos del análisis químico y mineralógico de la materia prima con su comportamiento cerámico.

Este sistema permite determinar la composición mineralógica cuantitativa aproximada de una materia prima, basado en el método clásico de cálculo que relaciona la composición química expresada en óxidos con los datos obtenidos por difracción de rayos X, cuando este equipo no permite cuantificarlos o no se cuenta con patrones apropiados para su validación.

2. Minerales arcillosos

Actualmente se conoce que los minerales arcillosos son numerosos y difieren entre sí por su forma, estructura, apilamiento de las capas y por la simetría de la red que forman entre sí. Estas redes estructurales no son perfectas, generalmente presentan huecos por falta de iones o por sustitución de unos iones por otros que distorsionan la estructura y generan diferencias entre familias.

Es bueno tener presente que en los depósitos naturales siempre coexisten varias clases de minerales arcillosos simples e interstratificados acompañados de óxidos de hierro o de titanio, piritas, yeso, calcita, feldspatos y otros minerales; por lo tanto, cuando se afronta el estudio de un depósito arcilloso éste no se debe limitar a los minerales que están en mayor proporción, porque, aunque en general las propiedades de los materiales se ven influidas notablemente por los constituyentes mayoritarios, los menores pueden representar un papel importante.

De acuerdo con su distribución estructural los minerales arcillosos se pueden dividir en las siguientes familias o grupos:

2.1 Filosilicatos bilaminares

Los filosilicatos bilaminares están formados por dos capas: una tetraédrica y otra octaédrica, por eso reciben los nombres de bilaminares, 1:1 ó T:O (Figura 1). Generalmente los tetraedros son de silicio, rodeados por oxígeno, aun cuando en ocasiones el silicio puede estar sustituido por iones de aluminio o de hierro. Los octaedros pueden tener como ión predominante el aluminio o el magnesio y están rodeados de oxígeno o de hidróxilos (OH). Cuando el ión dominante es el aluminio, la lámina que se forma se denomina dioctaédrica, y cuando el ión dominante es el magnesio, se dice que la capa es trioctaédrica. Los dife-

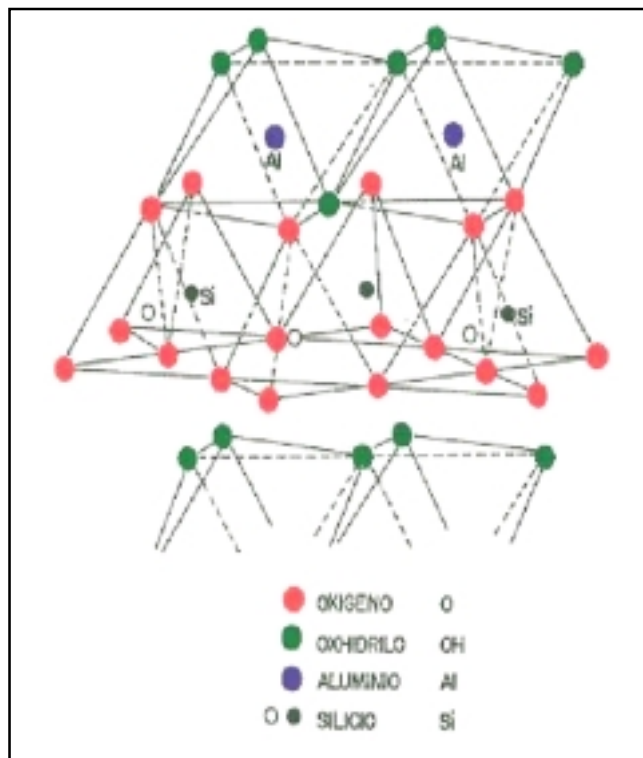


Figura 1. Estructura elemental de la Caolinita.

rentes iones están apilados en tal forma que se mantiene la electronegatividad entre ellos.

Las capas tetraédrica y octaédrica constituyen una lámina. La separación entre láminas es del orden de 7 unidades Amstrong (Å). En esta clasificación se distinguen dos familias de minerales: la de la Kandita o Caolinita (dioctaédricos) y la de las serpentinatas (trioctaédrico).

Familia de la Kandita

Según **Besoain** (1985), son posiblemente los minerales arcillosos más extendidos y frecuentes en el mundo y comprenden la Caolinita, la Haloisita, la Nacrita y la Dickita.

La composición química de la Caolinita puede expresarse como $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Los distintos minerales se distinguen por los diferentes apilamientos de las capas octaédricas y tetraédricas, la simetría de la red cristalina y la mayor o menor inclusión de moléculas de agua; al microscopio electrónico presentan formas laminares planas, ligeramente curvas o tubulares enrolladas: son dioctaédricas.

Una arcilla que presente abundancia de caolinita mayor al 20% tiende a aumentar su resistencia a la cocción, es decir, es refractaria, ofrece baja plasticidad, se seca fácilmente y no tiene buena resistencia mecánica.

Familia de las serpentinas

Incluye los minerales trioctaédricos denominados Crisotilo, Lizardita, Antigorita y Berthierita. La composición química de una Serpentina puede expresarse como $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$.

2.2 Filosilicatos trilaminares

Cada lámina está formada por dos capas de tetraedros de sílice que encierran una capa de octaedros de alúmina o de magnesia, por ésta razón se les denomina “trilaminares”, 2:1 ó T:0:T. Las láminas no son eléctricamente neutras debido a que se presentan sustituciones de unos iones por otros de diferente carga. La separación entre láminas es del orden de 10Å.

Comprenden tres familias: Esmectitas, Micas y minerales fibrosos o Atapulgita.

Familia de las Esmectitas o minerales expandibles

Esta familia incluye especies dioctaédricas como la Montmorillonita (Figura 2), la Nontronita y la Beidelita

y trioctaédricas como la Saponita, la Sauconita y la Hectorita. También se les da el nombre de Bentonitas. Su composición química varía por la capacidad de sustitución elemental y de absorción de agua; una fórmula general para una Esmectita es: $Al_{2-x}Mg_xSi_4O_{10}(OH)_2$.

En general, las arcillas expandibles, presentan estructuras que permiten que el agua penetre entre las láminas tetraédricas y octaédricas a través de enlaces de hidrógeno, lo cual determina una expansión de la celda cristalográfica y explica su alto índice de plasticidad.

En el proceso cerámico la presencia de minerales de este tipo aún cuando aumentan la plasticidad de la pasta, es inconveniente porque en el secado los objetos moldeados pierden volumen y se deforman, por eso su uso debe ser cuidadosamente controlado.

Familia de las micas

Esta familia sigue el mismo esquema de cristalización de la anterior pero sus minerales no son expandibles; a este grupo pertenecen las Vermiculitas, el Talco, la Pirofilita, la Illita, la Moscovita (Figura 3).

En la celda cristalográfica de las micas algunos silicios pueden estar reemplazados por aluminio y la diferencia de carga está balanceada por iones Potasio. La

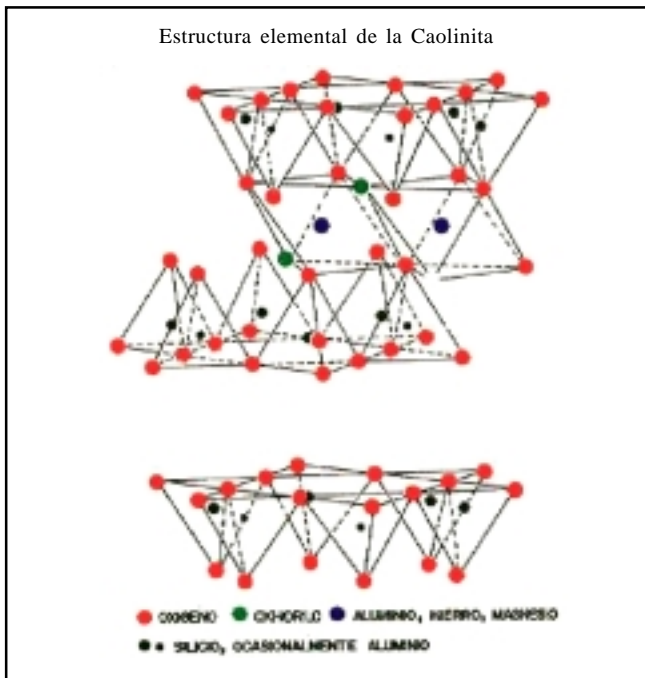


Figura 2. Estructura elemental de la Montmorillonita.

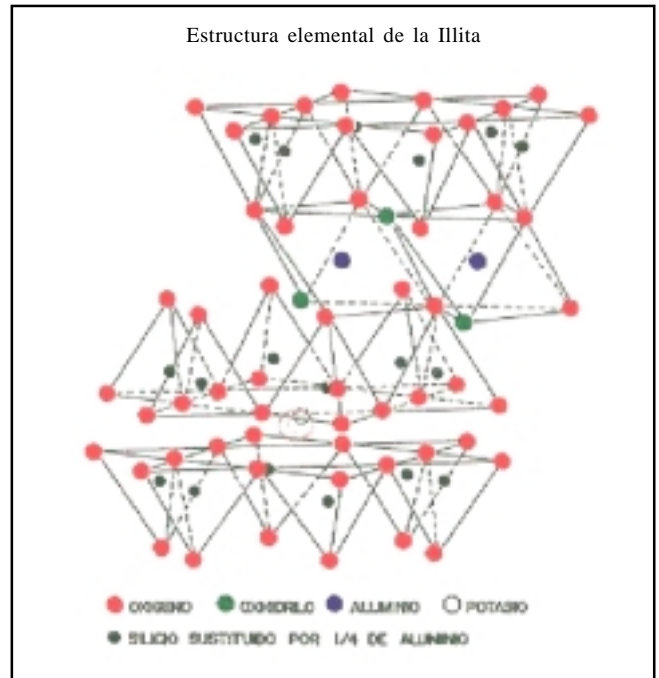


Figura 3. Estructura elemental de la Illita.

composición química de la Illita puede expresarse como $KAl_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$.

El índice de plasticidad de los minerales de esta familia es menor que el de las Esmeclitas, pero su plasticidad aumenta a medida que disminuye el tamaño del grano; la presencia de potasio en la estructura de la Illita le comunica cierto poder fundente en el proceso cerámico.

Familia de las Atapulgitas, minerales fibrosos

Pertenecen a esta familia la Sepiolita y la Paligorskita que están formadas por láminas discontinuas tipo mica. A diferencia de las ya nombradas que se presentan en láminas, estas se presentan como fibras. En su estructura se encuentra una capa basal continua de tetraedros y capas discontinuas periódicamente de octaedros. Su aplicación en el proceso cerámico es aún desconocido.

2.3 Cloritas

Son un grupo de minerales cuyas láminas están compuestas por dos capas tetraédricas y dos octaédricas por lo que se les denomina 2:1:1 ó T:O:T:O. Las láminas no son eléctricamente neutras debido a sustituciones de unos cationes por

otros de distinta carga pero de tamaño semejante. La neutralidad se logra por grupos hidróxidos y por cationes interlaminares como sodio, potasio, calcio o magnesio. La separación entre láminas es del orden de 14Å o más.

La fórmula general de las cloritas es $R_5^{++} R^{+++} Si_3 R^{+++} O_{10} (OH)_8$ en la cual R^{++} puede ser Fe ó Mg y R^{+++} puede ser Al ó Fe.

En la Tabla 1 se presenta una clasificación de los minerales arcillosos más comunes.

En la literatura se encuentran otras clasificaciones que incluyen numerosos minerales basados en otras propiedades.

3. Otros minerales

Otros minerales presentes en las arcillas son:

3.1 Feldespatos

Son aluminosilicatos constituidos por redes tridimensionales de tetraedros de Sílice en los cuales parte del Silicio se encuentra sustituido por Aluminio, lo que origina una deficiencia de carga que se ve compensada con

Tabla 1. Clasificación de los minerales arcillosos más comunes.

TIPO	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS		
T:O (Bilaminares)	1:1	KANDITAS MICAS	Caolinita Nacrita Dickita Haloisita Illita Moscovita Paragonita Pirofilita	SERPENTINAS MICAS	Antigorita Crisolito Lizardita Berthierita Flogopita Biotita Lepidolita Talco
T:O:T (Trilaminares)	2:1	ESMECTITAS (Expandibles) ATAPULGITAS (Fibroso)	Montmorillonita Beidelita Nontronita Vermiculita Paligorskita	ESMECTITAS ATAPULGITAS	Saponita Hectorita Sauconita Sepiolita
T:O:T:O 2:1:1		CLORITAS	Sudoitas	CLORITAS	Clinocloros Procloritas

Fuente: Tomada y modificada de García R. E. & Suárez B. M. (2002).

iones Potasio, Sodio y Calcio y ocasionalmente con Bario o Estroncio.

Químicamente los Feldespatos se dividen en tres grupos así:

Potásicos como la Ortoclasa y la Microclina; la composición de la Ortoclasa es: $K_2OAl_2O_3 \cdot 6SiO_2$.

Calcosódicos como la Albita y la Anortita; la composición de la Albita es: $NaAlSi_3O_8$.

Bóricos como la Hialofana y Celsiana la composición de la Celsiana es $BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$.

Estos minerales presentan alguna plasticidad pero muy baja, por eso se pueden considerar antiplásticos o desgrasantes, además como funden o sinterizan a las temperaturas comunes en el proceso cerámico se usan principalmente como fundentes.

3.2 Sílice (SiO₂)

La Sílice en forma de Cuarzo constituye el mineral más abundante en la naturaleza, de cristalización perfecta y de gran pureza. Es el principal constituyente de las arenas. Los cristales de Cuarzo cambian su estructura cristalina a 573°C produciendo cambios de volumen lo cual afecta el producto cerámico (Figura 4). Por eso debe programarse una menor velocidad de calentamiento entre 500 y 600°C cuando se efectúa el proceso cerámico para que la pasta que los contiene no sufra rupturas por esa situación.

Las partículas de sílice no presentan plasticidad y por eso son usadas comúnmente como antiplástico.

Inosilicatos. La sílice también se presenta en forma de cadenas simples o dobles formadas por tetraedros que se unen lateralmente y se conocen como inosilicatos. Estos se encuentran predominantemente en rocas ígneas; los principales son los Piroxenos y los Anfíboles.

Los Piroxenos se presentan en cadenas simples, de extensión infinita con composición química general $R^{+2}(SiO_3)_n$, siendo R^{+2} un catión alcalino, o alcalino térreo y en ocasiones Fe^{+3} o Al^{+3} . Pueden cristalizar en sistemas monoclinicos o rómbicos.

Ejemplos:

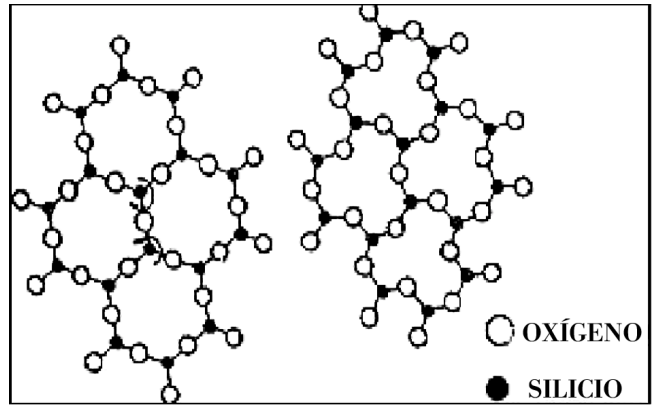
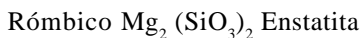
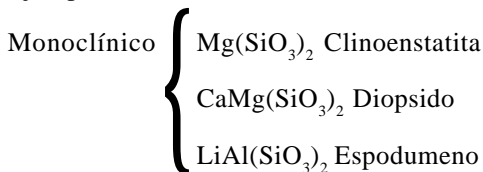
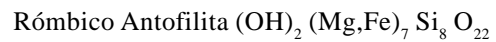
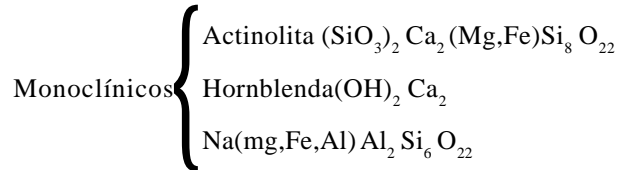


Figura 4. Arreglos cristalinos del cuarzo.

Los anfíboles presentan estructura con cadenas dobles que pueden unirse para formar anillos. Pueden cristalizar en sistemas monoclinicos y rómbicos.

Ejemplos:



3.3 Carbonato de calcio (CaCO₃)

Este mineral ejerce una acción fundente muy enérgica en las pastas cerámicas rebajando la temperatura de cocción. Por acción del calor, se descompone en óxido de calcio y desprende gas carbónico, por eso se usa también cuando se desea obtener cerámica porosa. Si aparece en la arcilla como granos grandes, la cal formada durante la cocción tiende a carbonatarse e hidratarse al salir del horno por acción del medio ambiente, produciendo grietas en el interior y erosión en la superficie de los productos como resultado del aumento de volumen.

En las pastas crudas actúa como antiplástico, aunque no reduce el encogimiento en el secado tanto como la sílice.

3.4 Minerales de hierro

Los minerales de hierro que se encuentran comúnmente en las arcillas son: Hematita, Magnetita, Goethita y

Pirita. Las tres primeras son las principales responsables del color de las arcillas y de sus productos.

Hematita α (Fe_2O_3)

Se presenta en cristales laminares, romboédricos, su color varía entre el negro, rojo intenso y gris acero con brillo semimetálico. No es magnético y es químicamente estable en ambiente oxidante.

Magnetita (Fe_3O_4)

Es una piedra magnética natural que se encuentra relativamente pura en forma de cristales cúbicos de color negro-amarillo. Sus propiedades magnéticas desaparecen por calentamiento y si no hay transformación, reaparecen por enfriamiento. En ambiente oxidante se convierte en hematita y pierde sus características magnéticas.

Goethita $HFeO_2$

Se presenta en masas continuas compactas o en masas pulverulentas de color pardo oscuro a negro acompañado de la limonita que es su forma hidratada.

Pirita FeS_2

Se presenta en forma de pequeños cristales o en granos redondeados de color amarillo latón y brillo metálico intenso. También existe otra forma de sulfuro de hierro llamado marcasita.

La pirita y la marcasita cuando se calientan a bajas temperaturas y se remueve parte de su azufre adquieren propiedades magnéticas. La marcasita se descompone más rápidamente que la pirita y por intemperismo se convierte en sulfatos.

En presencia de una atmósfera oxidante estos sulfuros se descomponen aún a bajas temperaturas, y si no se remueven los gases de combustión, pueden aparecer posteriormente como sulfatos alcalinos que difícilmente se descomponen.

Los sulfatos pueden presentarse en la superficie de los objetos cocidos en forma de eflorescencia. En presencia de una atmósfera reductora se puede formar sulfuro de hidrógeno y aún condensarse como azufre libre en las partes frías del horno.

3.5 Ilmenita $FeOTiO_2$

Este mineral se presenta como cristales tabulares romboédricos de color negro a gris con brillo semimetálico. En ambiente reductor y en caliente se vuelve magnético. Se encuentra generalmente asociado con la magnetita.

3.6 Yeso $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Este mineral se presenta en cristales monoclinicos frecuentemente transparentes e incoloros aun cuando si tiene impurezas puede presentar coloraciones. Tiene brillo vitreo con reflejo nacarado. Es muy poco soluble en agua. Su forma anhidra es la anhidrita $CaSO_4$ que se presenta en cristales rómbicos.

Esta impureza de la arcilla es la que con mayor frecuencia forma depósitos salinos en los ladrillos crudos, indeseables por la facilidad con que se transforman en manchas superficiales o permanecen dentro de este hasta que por acción de la humedad salen a la superficie formando las eflorescencias.

3.7 Minerales en estado coloidal

Prácticamente todos los minerales nombrados hasta ahora se presentan en estado cristalino. Sin embargo, en las arcillas y en los suelos, existe un grupo abundante de minerales en estado coloidal a amorfo. Los principales son el Alofano y los óxidos hidratados de hierro y de aluminio.

Alofano

Es un producto de alteración de cenizas volcánicas con liberación de cationes como Ca^{++} y Mg^{++} que proporciona al silicio y aluminio presentes propiedades coloidales. Cuando las cenizas se alteran dan origen a los materiales alofánicos.

Óxidos hidratados de hierro y aluminio

Son abundantes en suelos tropicales. Los más importantes son la Limonita $Fe_2O_3 \cdot xH_2O$ y la Gibsita $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$.

Las concentraciones naturales de hidróxidos de hierro son por lo común mezclas de Goethita con Limonita y sustancias arcillosas que presentan color pardo.

3.8 Minerales estratificados

En los suelos y en las arcillas pueden presentarse frecuentemente minerales de capas mixtas con partículas sin orientación geométrica preferida o con presencia de varios silicatos laminares semejantes. No se debe confundir lo que es un interestratificado con una mezcla de minerales (**Besoain**, 1985).

Las estructuras de estos minerales pueden ser de dos clases: regulares y al azar; son regulares cuando hay una repetición de láminas a lo largo de un eje cristalográfico y al azar cuando no la hay. Estas estructuras se presentan principalmente entre minerales trilaminares, como consecuencia de la similitud que presentan los filosilicatos entre sí.

4. Metodología de cálculo

4.1 Composición química

De los resultados obtenidos, expresados como óxidos, se calculan en cada caso los porcentajes de las especies minerales atribuibles a cada elemento, empezando por los limitantes, aplicando el método tradicional de cálculo a partir del peso molecular gramo de cada mineral y de sus componentes.

4.2 Composición mineralógica

Se asumen las siguientes fórmulas teóricas como representativas de cada mineral:

Caolinita: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. P.M. = 258 g.

Illita: $\text{KAl}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. P.M. = 399 g.

Clorita: $\text{Al}_2\text{O}_3 = 33,52\%$; $\text{SiO}_2 = 39,85\%$;

$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 4,46\%$; $\text{MgO} = 4,58\%$; $\text{CaO} = 0,15\%$; $\text{K}_2\text{O} = 1,61\%$; $\text{TiO}_2 = 1,61\%$; $\text{H}_2\text{O} = 13,8\%$

Esmectita (Montmorillonita) $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ P.M. = 360 g.

Feldespato de sodio (Albita) $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ P.M. = 524 g.

Feldespato de potasio (Ortoclasa)

$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ P.M. = 556.

Anatasa (TiO_2) P.M. = 79,9 g.

Hematita (Fe_2O_3) P.M. = 159,7 g.

Cuarzo (SiO_2) P.M. = 60 g.

Óxido de calcio (CaO) P.M. = 56 g.

Cuando se presentan dos minerales estratificados se asume que la proporción es 1:1; esta se adiciona a cada mineral arcilloso que le corresponda. Si por ejemplo la muestra contiene 2,7% de interestratificado de muestra Illita/esmectita, entonces le corresponde 1,35 a Illita, la cual se le suma a la Illita de la fase principal, y el 1,35% restante es para la Esmectita.

Asumiendo que todo el sodio (experimental) esta como feldespato, se calcula el contenido de este expresándolo

como Albita. El contenido de potasio se expresa como Illita y clorita, y el excedente de potasio como ortoclasa.

El aluminio restante (aluminio experimental – aluminio feldespático) se distribuye proporcionalmente de acuerdo con el porcentaje de los minerales arcillosos.

El cuarzo libre se calcula por la diferencia de la sílice experimental y la sílice que le corresponde a cada mineral (Albita, Esmectita, Caolinita, Clorita y Illita).

Las pérdidas por calcinación (PXC) se calculan por la diferencia de las pérdidas por calcinación experimental y el agua de constitución de los minerales arcillosos (Albita, Esmectita, Caolin, Clorita, Illita, Haloisita y Dickita); éstas pérdidas pueden ser debidas a materia orgánica y sulfuros.

El TiO_2 expresado como rutilo se calcula por la diferencia del titanio experimental y el titanio clorítico.

El Fe_2O_3 expresado como Hematita se calcula por la diferencia del hierro experimental y el hierro clorítico.

Ejemplo:

Se tomó para el cálculo una muestra de la Sabana de Bogotá, de la cual se presenta el análisis químico (Tabla 2), la composición mineralógica de la muestra (Tabla 3) y la composición mineralógica de las arcillas (análisis orientado, Tabla 4).

Los pasos a seguir son:

A) Cálculos para el feldespato de sodio (Albita). $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$.

En la Tabla 2, se observa que el porcentaje de Na_2O es 0,55, el cual se toma como limitante. Por consiguiente el porcentaje de aluminio presente en el feldespato de acuerdo con la relación estequiométrica es:

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ Feldespático} = \frac{0,55\% \text{ Na}_2\text{O} \times 102 \text{ g Al}_2\text{O}_3}{62 \text{ g Na}_2\text{O}} =$$

$$= 0,90\% \text{ de Al}_2\text{O}_3 \text{ esta presente en la Albita}$$

- El silicio presente en el feldespato es:

$$\% \text{SiO}_2 = \frac{0,55\% \text{ Na}_2\text{O} \times 360 \text{ g SiO}_2}{62 \text{ g Na}_2\text{O}} =$$

Tabla 2. Análisis químico.

Muestra	% SiO ₂	% Fe ₂ O ₃	% Al ₂ O ₃	% CaO	% MgO	% Na ₂ O	% K ₂ O	% TiO ₂	% Humedad	% Pérdidas x Calc.
Sabana	72,19	5,01	12,23	0,09	0,48	0,55	0,85	0,83	1,33	3,76

Tabla 3. Composición mineralógica.

Referencia	Minerales de arcilla					Silicatos			Sulfatos	Óxidos		Otros
	Esmectita	Caolinita	Halloysita	Illita	Clorita	Cuarzo	Feldespatos	Piroxenos	Yeso	Hematita	Anatasa	Materia orgánica
Sabana	3-10	20-30	0	3-10	< 3	40-50	1	0	< 1	< 5	< 3	0

Tabla 4. Composición mineralógica de las arcillas (análisis orientado).

Referencia	Arcillas simples				Interestratificados		
	Esmectita	Caolinita	Illita	Clorita	Illita/Esmectita	Clorita/Esmectita	Illita/Clorita
%	16,40	59,10	11,80	6,40	2,70	0,00	3,60

3,19% de ocurrencia de silicio en la Albita

Por tanto los óxidos perteneciente a la Albita en la muestra son:

$$\text{Albita} = 0,55\% \text{ de Na}_2\text{O} + 0,90\% \text{ Al}_2\text{O}_3 + 3,19\% \text{ SiO}_2 = 4,64\%$$

B) En la Tabla 4 se presenta el porcentaje de minerales arcillosos e interestratificados de la muestra. La composición total es:

$$\text{Esmectita: } 16,40\% + 2,7/2 \text{ (interestratificado)} = 17,75\%$$

$$\text{Caolinita: } 59,10\%$$

$$\text{Illita: } 11,80\% + 2,7/2 \text{ (interestratificado)} + 3,60/2 \text{ (interestratificado)} = 14,95\%$$

$$\text{Clorita: } 6,40\% + 3,60/2 \text{ (interestratificado)} = 8,2\%$$

C) Porcentaje de aluminio presente en minerales arcillosos

Tomando como limitante el aluminio obtenido experimentalmente (Tabla 2) menos el aluminio combinado en la albita se obtiene el aluminio que le corresponde a los minerales arcillosos.

$$\% \text{ de aluminio (arcilloso)} = 12,33\% \text{ aluminio (experimental)} - 0,90\% \text{ aluminio feldespático.}$$

$$\text{Aluminio arcilloso} = 11,33\%$$

D) Distribución del aluminio en los minerales arcillosos.

Con base en la composición de minerales arcillosos y el porcentaje de aluminio arcilloso, se calcula el aluminio que le corresponde a cada mineral: 11,33% de Al_2O_3 (está distribuido en las fracciones arcillosas de la muestra). Por consiguiente la distribución de aluminio en los minerales arcillosos es la siguiente:

$$\text{Esmectita: } 2,01\%$$

$$\text{Caolinita: } 6,70\%$$

$$\text{Illita: } 1,70\%$$

$$\text{Clorita: } 0,92\%$$

E) porcentaje de minerales arcilloso.

Para esto se toma como base la ocurrencia de aluminio para cada mineral arcilloso.

$$\text{E -1) Esmectita. } \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$$

El silicio presente en la Esmectita de acuerdo con la relación estequiométrica es:

$$\text{SiO}_2 = \frac{2,01\% \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot X \cdot 240\text{g SiO}_2}{102 \text{ g Al}_2\text{O}_3} =$$

$$4,73\% \text{ de SiO}_2 \text{ se encuentra en la Esmectita}$$

- El agua presente en la Esmectita es:

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{2,01\% \text{ de Al}_2\text{O}_3 \cdot X \cdot 18 \text{ g de H}_2\text{O}}{102 \text{ g de Al}_2\text{O}_3} = 0,35 \text{ g de agua.}$$

El porcentaje de Esmectita presente en la muestra es el siguiente:

$$\text{Esmectita} = 2,01\% \text{ de Al}_2\text{O}_3 + 4,73\% \text{ de SiO}_2 + 0,35\% \text{ de agua} = 7,09\%$$

F) Realizando el mismo procedimiento que el paso (e), el porcentaje obtenido para los otros minerales arcillosos es:

$$\text{- Caolinita: } \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} .$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 6,70\%$$

$$\text{SiO}_2 = 15,75\%$$

$$H_2O = 2,35\%$$

El porcentaje de caolinita es = 24,81%

- Illita: $K Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$

$$Al_2O_3 = 1,70\%$$

$$K = 0,78\%$$

$$SiO_2 = 4,00\%$$

$$H_2O = 0,31\%$$

El porcentaje de Illita es = 6,66%

Clorita: $Al_2O_3 = 33,52\%$; $SiO_2 = 39,85\%$; $Fe_2O_3 = 4,46\%$;
 $MgO = 4,58\%$; $CaO = 0,15\%$;

$$K_2O = 1,61\% ; TiO_2 = 1,61\% ; H_2O = 13,8\% .$$

El porcentaje de Clorita presente es:

$$Al_2O_3 = 0,92\%$$

$$SiO_2 = 1,09\%$$

$$Fe_2O_3 = 0,12\%$$

$$MgO = 0,13\%$$

$$CaO = 0,004\%$$

$$K_2O = 0,04\%$$

$$TiO_2 = 0,03\%$$

$$H_2O = 0,38\%$$

Clorita presente es de 2,71

G) Cuarzo libre: =

$\% SiO_2$ (experimental) - [SiO_2 feldespático SiO_2 Esmectítico + SiO_2 Caolínítico + SiO_2 Illítico + SiO_2 Clorítico]

$$\text{Cuarzo libre:} = 72,19 - (4,73 + 15,75 + 4,00 + 1,09)$$

$$= 46,62\% .$$

La muestra contiene 46,62% de cuarzo libre

H) Pérdida por calcinación (PXC)

$PXC = \% \text{ pérdidas } 0^\circ C \text{ a } 1000^\circ C \text{ (experimental) - [H}_2O \text{ esmectítica} + \% H_2O \text{ caolínítica} + H_2O \text{ Illítica} + H_2O \text{ clorítica}]$

$PXC = 5,09 - (0,35 + 2,53 + 0,31 + 0,38) = 1,7\%$; pueden ser debido a azufre y materia orgánica

I) Hematita (Fe_2O_3). La hematita presente en la muestra es:

Hematita = % Hierro (Experimental) - % Hierro Clorítico

$$\text{Hematita} = 5,01 - 0,12 = 4,89$$

La muestra contiene 4,89% de Hematita

J) Rutilo. El Rutilo presente en la muestra es:

$TiO_2 = \% \text{ Titanio (experimental) - \% Titanio clorítico.} = 0,83 - 0,03 = 0,80$

La muestra contiene = 0,80% de Rutilo

K) En resumen la concentración de minerales que contiene la muestra es como sigue:

Albita =	4,65%
Esmectita =	7,09%
Caolinita =	24,81%
Illita =	6,66%
Clorita =	2,71%
Cuarzo libre =	46,62%
Hematita =	4,89%
Rutilo =	0,80%
PXC =	1,7%
Óxido de calcio =	0,004%
Óxido de magnesio =	0,35%

5. Conclusiones

El sistema de cálculo propuesto basado en los datos del análisis químico y en el análisis por difracción de rayos X de las arcillas, nos permite determinar la composición cuantitativa de los minerales arcillosos y de los demás minerales presentes.

Los resultados mineralógicos calculados se encuentran dentro de los rangos de la composición mineralógica de la muestra, determinada por difracción de rayos X.

Utilizando el cálculo propuesto se puede llegar a visualizar con mayor precisión la distribución de todos los componentes de las arcillas.

6. Recomendación

Este cálculo se puede sistematizar de tal forma que se convierta en una herramienta valiosa en los laboratorios de

arcillas. Consideramos que el poder conocer el contenido mineralógico de una arcilla con una mayor precisión, nos permitirá estudiar la incidencia de la composición en su comportamiento tecnológico.

7. Bibliografía

Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura IICA. San José. Costa Rica.

INGEOMINAS, 2000. Subdirección de Ensayos y Servicios Tecnológicos. Manual de laboratorio de ingeniería de minerales, LIM, 026. Bogotá.

Thorez, J. 1995. Determination of clay minerals by X-Ray Diffraction and applications in Clay Geology. Universite de Liege. Belgica.

García, E. 2003. www.uclm.es/user/higueras/yym/arcillas/htm