

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA



INFORME FINAL DEL TEXTO
“TEXTO: APLICACIONES DE LA QUÍMICA ANALÍTICA EN
LA MINERALOGÍA”

AUTOR: JULIO CÉSAR CALDERÓN CRUZ

PERÍODO DE EJECUCIÓN: Del 01-11-2016 al 31-10-2018

Resolución de aprobación N° 938-2016-R

Callao, 2018

PERÚ

I. ÍNDICE

	Página
TABLAS DE CONTENIDO	4
II. PROLOGO	6
III. INTRODUCCIÓN	7
IV. CONTENIDO DEL TEXTO	8
CAPITULO I: Mineralogía física	8
1. Introducción y conceptos generales	8
1.1. Definición de mineral	8
1.2. Nomenclatura mineral	8
1.3. Clasificación mineral	12
1.4. Caracterización de las sustancias minerales	23
1.5. Propiedades físicas de las sustancias minerales	24
1.6. Propiedades químicas y composición	49
CAPITULO II: Mineralogía Química	59
2. Identificación de la composición química de los minerales	59
2.1. Análisis Químico Cualitativo	59
2.1.1. Toma de muestra	59
2.1.2. Tratamiento de la muestra	61
2.1.3. Ensayos preliminares	63
2.2. Análisis Químico Cuantitativo	65
2.3. Métodos normalizados cualitativos, cuantitativos e instrumentales	70
2.4. Determinaciones analíticas	72
2.4.1. Determinación de wolframio en wolframita	72
2.4.2. Determinación de Niobio y Tántalo en columbita y tantalita	73
2.4.3. Determinación de hierro en minerales: Hematita, magnetita, limonita, pirita, ilmenita.	75

2.4.4. Determinación de calcio en piedra caliza	77
2.4.5. Determinación de manganeso en pirolusita.	79
2.4.6. Determinación de plomo por método gravimétrico	82
2.4.7. Determinación de cobre por método electrogravimétrico	82
2.4.8. Determinación de Zinc por método volumétrico	83
2.4.9. Determinación de mercurio.	86
2.4.10. Determinaciones especiales.	87
2.4.11. Determinación de silicio.	87
2.4.12. Determinación de muestras carbonatadas.	88
2.4.13. Análisis de muestras en tubos de ensayo.	88
2.4.14. Determinación de oro por ensayo al fuego (Fire-Assay)	89
2.4.15. Determinación de oro en muestras geoquímicas (Fire-Assay)- Absorción atómica.	90
2.4.16. Determinación de oro soluble por absorción atómica	98
2.4.17. Determinación de mercurio por absorción atómica	99
2.4.18. Determinación de Pb, Zn, Cu, Ag y Fe , en minerales por el método de absorción atómica	101
2.4.19. Determinación de plomo en concentrados minerales por método volumétrico	106
CAPITULO III: Estructura de la materia mineral	110
3. Enlaces de los cristales.	110
3.1. Enlaces iónicos.	110
3.2. Enlaces covalentes.	111
3.3. Enlaces metálicos.	112
4. Sólidos cristalinos.	113
5. Caracterización estructural de la materia mineral.	114
6. Cristalografía.	120
7. Ambiente sedimentario	121
V. REFERENCIALES	125
VI. APÉNDICES	128

6.1. Productos obtenidos de la identificación de minerales del primer grupo de elementos.	128
6.2. Productos obtenidos de la identificación de minerales del segundo grupo de elementos.	129
6.3. Solubilidad en agua y colores de sales y minerales.	130
6.4. Operación pulverizadora en el área de preparación de muestras inorgánicas de un centro minero.	137
6.5. Operación de las chancadoras en el área de preparación de muestras inorgánicas de un centro minero	141
VII. ANEXOS	145
7.1. Escala de dureza de Mohs	145
7.2. Escala de fusión de minerales (von Kobell)	146
7.3. Escala de permeabilidad magnética	147
7.4. Figuras de minerales: Niquelina, cobaltita, calcopirita, tennantita, bornita, plagionita, Zinkenita, miargirita, fluorita, selenita, cuarzo, autunita.	148



TABLAS DE CONTENIDO

Lista de figuras	
1.1 Índice de refracción	35
1.2 Índice de refracción	36



TABLAS DE CONTENIDO

Lista de cuadros	
1.1 Escala de Von Kobell	31
1.2 Escala de dureza	38
2.2 Escala de permeabilidad	45



II. PRÓLOGO

El presente texto “APLICACIONES DE LA QUÍMICA ANALÍTICA EN LA MINERALOGÍA” que pongo a disposición de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química que cursan la asignatura de Química Analítica es el resultado de la experiencia lograda por la cátedra tras varios años de enseñanza de la materia. Dado que los minerales están formados por elementos químicos y la mineralogía es la ciencia de los minerales, existe una estrecha relación entre la Química Analítica y la Mineralogía en lo que se refiere a la determinación de la composición de un mineral o roca mediante métodos de análisis químico, que son herramientas de la Química Analítica. El material resultante que hoy ofrezco es la primera edición y estará sujeta a una mejora continua; pero considero que proporcionará a los estudiantes una ruta de fácil acceso a las aplicaciones de la Química Analítica en la mineralogía que les permitirá conocer una variedad de técnicas analíticas para ser aplicadas en la identificación y cuantificación de analitos presentes en un mineral, para su posterior procesamiento a gran escala.

En el texto se analiza los fundamentos en los que se basa la Química Analítica y su aplicación en la Mineralogía, en lo que concierne a su función de proveer informes de ensayo, los cuales tienen diversas aplicaciones en las diferentes operaciones y procesos minero metalúrgicos, así también en proyectos de investigación de la gran y pequeña minería, considerando el análisis de elementos mayores, trazas y ultra trazas en muestras como: rocas, sedimentos, suelos, aguas, salmueras, concentrados de minerales pesados, etc.

Se pretende que el estudiante, al consultar este texto logre entender y resolver fácilmente todos sus cuestionamientos, tanto teóricos, ensayos de laboratorio y resolución de problemas.



III. INTRODUCCIÓN

En el presente texto se analiza los fundamentos en los que se basa la Química Analítica y su aplicación en la mineralogía.

Se considera la clasificación, la caracterización, las propiedades físicas y químicas de los minerales, la mineralogía química y la estructura de la materia mineral.

Se tratan, además, las propiedades analíticas consideradas como periódicas y los conceptos de sensibilidad y selectividad de las reacciones. También se incluye las operaciones y técnicas utilizadas en Análisis Cualitativo Inorgánico clásico y su comparación con los métodos instrumentales modernos.

Se estudia las propiedades de los iones presentes en los minerales, la acción de los reactivos químicos en general, las propiedades analíticas y reactivas de los elementos metálicos, así como la descripción y aplicación de los diferentes métodos de análisis químico. Se desarrolla también el estudio de los problemas sólidos, describiendo los análisis y ensayos preliminares, los métodos de disolución y de disgregación.

Finalmente, se incluye un apéndice que comprende la preparación de reactivos para la práctica docente, una lista de diversos minerales con sus respectivas formulas y diversas tablas de consulta.

El texto que se pretende escribir es importante porque existe la necesidad de contar con libros de texto, actualizados, de fácil comprensión por parte de los estudiantes. La consulta de este texto, ayudará a los alumnos a comprender fácilmente los fenómenos de transformación de la materia en lo que se refiere al equilibrio químico homogéneo y heterogéneo, e identificación de sustancias inorgánicas mediante el empleo de reacciones de identificación y marchas sistemáticas analíticas, aplicadas a la mineralogía.

El texto se justifica por que relaciona directamente a la Química Analítica, que es una asignatura obligatoria del Plan de Estudios, con la Mineralogía, que es un campo profesional, dónde nuestros egresados pueden desarrollarse profesionalmente.

IV. CONTENIDO DEL TEXTO

CAPITULO I MINERALOGÍA FÍSICA

1: Introducción y conceptos generales

1.1 Definición de mineral

La mineralogía es la rama de la geología que estudia las propiedades físicas y químicas de los minerales que se encuentran en el planeta en sus diferentes estados de agregación. Un mineral es un sólido inorgánico de origen natural, que presenta una composición química no fija, además tiene una estructura cristalina. Una observación importante es el caso del mercurio que debido a la disposición de sus átomos es un mineraloide (Hagni, 1986).

1.2 Nomenclatura mineral

El problema de la nomenclatura de las sustancias en las ciencias experimentales es fundamental para su desarrollo.

Las palabras técnicas son importantes porque evocan una serie de hechos relacionados con la naturaleza de los objetos que definen. Teniendo en cuenta los actuales medios de investigación, estas palabras serán acertadas, dependiendo del tipo del fundamento y la relevancia del hecho.

El conocimiento de los individuos y su agrupación en categorías lógicas es sólo posible mediante una nomenclatura adecuada.

El concepto de especie mineralógica ha variado mucho desde sus primeros tiempos de empirismo, hasta los actuales en los que se impone un conocimiento racional de tales especies. Claro está que en este periodo de continua evolución de los medios de estudio no fue posible adoptar una nomenclatura racional satisfactoria; algunos nombres aluden a ciertas propiedades características del mineral y otros a sus componentes químicos; más a enorme cantidad de ellos se les asignó un nombre patronímico dedicado a personalidades arbitrarias, etc. Esta nomenclatura irracional hace imposible toda sistematización. De hecho se mantiene el vocablo más conveniente, dado al mineral cuando se le estudia con más rigor, prescindiendo así de apelaciones ambiguas o aun totalmente empíricas. Hay muy pocos de los minerales comunes que se nombran por sus apelaciones más antiguas. El problema

de la modificación de nomenclatura es tan delicado cuanto necesario. No quiere decirse que deban desaparecer algunos de los nombres vulgares ya establecidos, sino aún mantenerse como simplificaciones de los sistemáticos que les dan base.

Desde las primeras sesiones de la Comisión Internacional de Nomenclatura se decidió que solo recibirían nombres específicos los extremos de las series isomorfas: los términos intermedios se designarían por el nombre del extremo más cercano seguido del nombre adjetivado de los elementos intercambiables o diadóticos, así por ejemplo tenemos: el Ca^{2+} tiene un radio de 0.99 Å en la calcita (CaCO_3), y el Mn^{2+} tiene 0.91 Å en la rodocrosita (MnCO_3); ambos pueden sustituirse mutuamente en la estructura, constituyendo un mineral que es una solución sólida completa o continua entre dos límites composicionales (representados por las moléculas de carbonato de calcio y de manganeso puras). Los límites composicionales entre los que puede oscilar el mineral (CaCO_3 y MnCO_3) se denominan términos extremos. En estos casos, la fórmula del mineral solución sólida se expresa como $\text{CO}_3(\text{Ca},\text{Mn})$, significando que los átomos de Ca^{2+} y los de Mn^{2+} deben sumar 1; una composición posible intermedia sería $\text{CO}_3(\text{Ca}_{0.75}\text{Mn}_{0.25})$, según sistema adjetivado de W.T. SCHALLER.

Así se pudieron suprimir unos 150 nombres. Al revisar el grupo de los pirocloros, sobre 50 apelaciones sólo se han retenido 3 (pirocloro, microlita y betafita), con los que se reemplazan a otros 16 con apelaciones bien definidas.

Levinson (1966, 1967) propuso un sistema de nomenclatura para las apelaciones de tierras raras (TR): al nombre específico de un mineral se añade entre paréntesis la apelación química del (o de los) elemento dominante. Así monacita (Ce), monacita (La). Esta modalidad ofrece una buena base para la adaptación de nombres ingleses a nuestro idioma, nombrando primero el radical y luego los componentes catiónicos, además de ser necesaria para su ordenación por computadora.

Se han hecho varios intentos para normar la construcción automática de los nombres minerales. Algunos se basan en su constitución cristaloquímica, como el de A. S. Povakennykh (1960), examinado recientemente por la Comisión Internacional de Nomenclatura. Las normas propuestas son:

Especies.- Solo se darán nombres propios (especiales) a las especies mineralógicas



- Los nombres propios se construyen con base química.
- Los nombres son acróstico de los elementos integrantes, citando estos por el orden expresado en su fórmula (elementos electropositivos, electronegativos o radiales).

Ej.: Nite, nictelita

Nombres con semejante composición cualitativa, pero diferente cuantitativa, se reflejarán mediante afijos griegos.

Ej.: NiAs (nicarsita), Ni₃As (trincarsita), Ni₃As₂ (triniciarsita)

Minerales de composición semejante pero con diferente estructura pueden diferenciarse mediante sufijos indicadores tilita (cadenas), filita (capas), tectita (tramas).

El agua de cristalización se indica por la partícula hi (hidra). Si un hidróxido contiene agua, en vez de la terminación -hidróxido lleva la de hidrita.

Las especies polimorfas llevan prefijo de la singonia ante el nombre de la especie más estable. (cubo-, exa-, trigo-, orto- clino, triclino).

Hasta 1992 se conocían alrededor de 3312 especies minerales y su número sigue aumentando cada año. Actualmente existen acuerdos internacionales, sobre la denominación, formulación y clasificación de los minerales. La International Mineralogical Association (I.M.A.), intenta poner orden en este tema y por ello existe la C.N.M.M.N. (Comisión de Nombres de Minerales y Minerales Nuevos) que se encarga de unificar la nomenclatura, formulación y clasificación de los minerales.

Es de destacar la labor realizada por esta comisión, para clarificar la Mineralogía de los Filosilicatos y los Inosilicatos. A lo largo de la Historia se han empleado muchas denominaciones para rocas, minerales y variedades, algunas de las cuales han dado lugar a numerosas confusiones que todavía pueden darse. Por un lado existen especies con más de un nombre (blenda y esfalerita, hematite y oligisto, idocrasa y vesubiana, titanita y esfena, etc.). Por otro lado, en muchos casos, no está muy claro cuando se habla de variedades y de especies. Por ejemplo, la esmeralda no es más que una variedad del berilo, pero es más conocido el nombre de la

esmeralda que el del berilo y muchas personas desconocen la verdadera naturaleza de esta gema.

Hoy en día se usan nombres de minerales con etimologías muy diversas. Se conservan una buena parte de los nombres conocidos en la época griega y romana, como cinabrio, cobre, plata, amatista, etc., pero el número de especies conocidas por entonces era muy reducido. Hasta el siglo XVIII no se conocían muchas especies, pero coincidiendo con el desarrollo de la Química, se empezaron a conocer nuevas especies cuyos nombres tienen una etimología muy variada en la que siguen predominando las raíces griegas y latinas, pero también aparecen nombres relacionados con personajes, con los lugares donde se han encontrado (toponímicos), etc. Más recientemente son frecuentes los nombres con raíces anglosajonas, germánicas, eslavas y francesas. La influencia de las abreviaturas ha llegado también al mundo mineral y se emplean las iniciales de los elementos constituyentes. Un ejemplo de este caso lo constituye la Banalsita ($\text{BaNa}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$). Por convenio, se usa la terminación "ita" referida al término griego "lithos" que significa piedra.

En algunos libros españoles se ha intentado castellanizar los nombres con una transcripción fonética que ha conducido a cierta confusión. Modernamente se aceptan, incluso por la Real Academia Española de la Lengua, los nombres que provienen de lenguas extranjeras e incluso del griego y latín, con pequeñas adaptaciones al castellano que se encuentran debidamente reglamentadas. Por ejemplo, se admiten Goethita, Wurtzita, Scheelita, Boehmita, Gibbsita, Smithsonita, Wulfenita, etc.

Tampoco hay que olvidar los minerales y variedades que presentan etimologías de origen español, como aragonito, jarosita o andalucita. Aunque también hay que reconocer que ciertos nombres ya no se emplean o corresponden a especies y variedades que poseen otro nombre internacionalmente admitido, como la almeriita que se conoce normalmente como natroalunita.

En julio de 2006 una fusión entre la CNMMN y la Comisión de Clasificación de los minerales, iniciada a petición de ambas comisiones, se tradujo en la "Comisión de Nuevos Minerales, Nomenclatura y Clasificación" (CNMNC)



1.3 Clasificación mineral.

La clasificación mineral se basa en la composición química y en la estructura interna, las cuales en conjunto representan la esencia de un mineral y determinan sus propiedades físicas.

De acuerdo con la composición química, los minerales se dividen en clases según el anión o grupo aniónico dominante, por ejemplo, los óxidos, los haluros, los sulfuros y los silicatos, entre otros.

Los minerales poseen el mismo anión o grupo aniónico dominante en su composición, por eso tienen semejanzas familiares y características más claras y fuertemente marcadas que aquellas que comparten los minerales que poseen el mismo catión dominante.

Los minerales relacionados por el dominio del mismo anión tienden a presentarse juntos en el mismo lugar o en yacimientos geológicos semejantes; por ejemplo: los sulfuros generalmente se presentan en agrupaciones próximas a depósitos del tipo de vetas o reemplazamientos, mientras que los silicatos forman la mayoría de rocas de la corteza terrestre. Es importante destacar que la química sola no es suficiente para caracterizar adecuadamente un mineral. Para una apreciación compleja de la naturaleza de los minerales y para la determinación de las estructuras internas se necesita el uso de los Rayos X. Los llamados principios cristalocímicos fueron utilizados por W.L. Bragg y V. M. Goldschmidt para los minerales silicatados, a los cuales se les dividió parcialmente en subclases sobre la base de la composición química y principalmente en función de la estructura interna.

Dentro de la clase de los silicatos, por lo tanto, existen silicatos a láminas y en cadenas que son subclases, basadas en la disposición estructural de los tetraedros de SiO_2 . Estos principios estructurales, en combinación con la composición química, proporcionan una clasificación lógica. En base a este esquema se tiene la siguiente clasificación:

- Elementos nativos
- Sulfuros
- Sulfosales
- Óxidos e hidróxidos



- Haluros
- Carbonatos, nitratos y boratos
- Sulfatos y cromatos
- Volframatos y molibdatos
- Fosfatos, arseniatos y vanadatos
- Silicatos

a) Elementos nativos

Son los que se encuentran en la naturaleza en estado puro, se dividen en metálicos, semimetálicos y no metálicos, y están conectados por la clase de transición de los semimetales. (Hagni, 1986)

- **Elementos metálicos.-** Son los más comunes y forman tres grupos:

Grupo del oro: oro, plata, cobre y plomo.

Los elementos de este grupo pertenecen a la misma familia en la clasificación periódica de los elementos, por lo tanto, sus átomos tienen propiedades químicas semejantes y todos son lo suficiente inertes como para encontrarse en un estado elemental en la naturaleza.

Las propiedades similares de este grupo de minerales provienen de su estructura común, por eso son blandos, maleables, dúctiles y séctiles; además, todos son buenos conductores del calor y de la electricidad, tienen brillo metálico y fractura astillosa con puntos de fusión bajos. Estas propiedades son consecuencia de su enlace metálico, y todos pertenecen al sistema cúbico por lo que tienen densidades muy elevadas.

Grupo del platino: platino, paladio, iridio y osmio.

Este grupo de metales son más duros y tiene puntos de fusión más elevados que los metales del grupo del oro.

Las características que diferencian a los minerales de este grupo dependen de las propiedades de los átomos de los distintos elementos, de ahí proviene el amarillo del oro, el rojo del cobre y el blanco de la plata.

Grupo del hierro: hierro y ferroníquel.

Los metales de este grupo son isométricos e incluyen el hierro puro (Fe), que se presenta raramente en la superficie de la Tierra, y dos especies de ferroníquel



(kamancita y taenita), que son comunes en los meteoritos de hierro. Es posible que las aleaciones de Fe-Ni de este tipo constituyan una gran parte del núcleo de la Tierra; además, se han encontrado mercurio, tántalo, estaño y zinc.

- **Elementos semimetálicos.-** Son los que se encuentran en estado nativo, aunque raramente cristalizan en un mismo sistema y forman estructuras de un mismo tipo. En este grupo se clasifica el arsénico, el antimonio y el bismuto. Los miembros de este grupo poseen propiedades físicas semejantes ya que son quebradizos, no maleables y conducen el calor y la electricidad menos que los metales nativos. Además, este tipo de enlace intermedio entre el metálico y el covalente es más fuerte y más direccional que el puramente metálico, dando lugar a una simetría menor.

- **Elementos no metálicos.-** Este tipo de minerales son de gran valor en el comercio y la industria. En este grupo, por ejemplo, se encuentra el carbón en forma de grafito o diamante y el azufre. (A.González, P.Marcos, J.Andrés, A.Franco, 1996).

b) Sulfuros

Los sulfuros son muy importantes ya que comprenden la mayoría de las menas minerales. En esta clase se incluyen los sulfoarseniuros, los arseniuros y los telururos, los cuales son similares a los sulfuros pero más raros.

La mayoría de estos minerales son reconocibles porque su brillo es metálico, son opacos, tienen colores distintivos y raya de colores característicos. Los no opacos, como el cinabrio, el rejalgar y el oropimente, poseen índices de refracción elevados y transmiten luz sólo en los bordes delgados. Muchos de los sulfuros tienen enlaces iónicos y covalentes pero otros, que poseen la mayoría de propiedades de los metales, tienen parcialmente enlaces metálicos. Algunos ejemplos son los siguientes:

calcocita o calcosina (Cu_2S), galena (PbS), acantita (Ag_2S), esfalerita (ZnS), cinabrio (HgS), pirrotita ($\text{Fe}_{0,8-1}\text{S}$), pirrotina-4M: Fe_7S_8 . Algunos politipos son: pirrotina-5H: Fe_9S_{10} hexagonal; pirrotina-7H: Fe_9S_{10} monoclinico; pirrotina-11H: $\text{Fe}_{10}\text{S}_{11}$ hexagonal; pirrotina-6M: Fe_7S_8 , bornita (Cu_5FeS_4), calcopirita (CuFeS_2), pirita (FeS_2), marcasita (FeS_2), arsenopirita (FeAsS), rejalgar (As_4S_4), oropimente

(As₂S₃), estibinita (Sb₂S₃), covelina (CuS), cobaltita (CoAsS), molibdenita (MoS₂), etc.

c) Sulfosales

En este grupo de minerales el azufre toma el lugar del oxígeno en los ácidos oxigenados más comunes y más conocidos, como el ácido carbónico, ácido sulfúrico o el ácido fosfórico. Las Sulfosales son importantes porque nos pueden indicar cierto número de minerales de azufre diferentes a los sulfuros.

Muchas especies de este grupo son raras, están íntimamente asociadas con otros minerales similares y con frecuencia están imperfectamente cristalizadas. Las Sulfosales se presentan normalmente como minerales secundarios en filones hidrotermales asociados con los sulfuros más corrientes.

En raras ocasiones son compuestos que contienen plata, cobre o plomo, pero sólo unos pocos son lo suficientemente abundantes para servir de menas de estos metales, ejemplos: livingstonita (HgSb₄S₆), zinkenita (Pb₉Sb₂₂S₄₂), miargirita (AgSbS₂), berthierita (FeSb₂S₄), plagionita (Pb₅Sb₈S₁₇), tennantita (Cu₁₂As₄S₁₃), jamesonita (Pb₄FeSb₆S₁₄), semseyita (Pb₉Sb₈S₂₁), boulangierita (Pb₅Sb₄S₁₁), bournonita [3(PbCu₂)SSb₂S₃], pirargirita (Ag₃SbS₃), samsonita (Ag₄MnSb₂S₆), tetraedrita [(Cu,Fe)₁₂Sb₄S₁₃], lengenbachita (Ag₄Cu₂Pb₁₈As₁₂S₃₉), jordanita [Pb₁₄(As, Sb)₆S₂₃], estefanita (Ag₅SbS₄), etc. (A. Milovski, O.V. Konomov, 1988).

d) Óxidos e Hidróxidos

En esta clase se encuentran aquellos compuestos naturales en los que el oxígeno aparece combinado con uno o más metales, cuyo aspecto y características son diversos.

Los *óxidos*, por ejemplo, son un grupo de minerales relativamente duros, densos y refractarios; generalmente se presentan en forma accesoria en las rocas ígneas y metamórficas, y en forma de granos dendríticos resistentes en los sedimentos. Los hidróxidos tienden a ser menos duros y de menor densidad, y aparecen principalmente como aleación secundaria o como productos de meteorización, como la limonita, a partir de los compuestos de hierro, la estibiconita de la antimonita, entre otros. Dentro de la clase de óxidos hay algunos minerales que son



de gran importancia económica, entre ellos los principales minerales de hierro (hematites y magnetita), el cromo (cromita), el manganeso (pirolusita, así como los hidróxidos manganita, romancita (psilomelano) y el estaño (casiterita). El tipo de enlace en las estructuras de óxidos es por lo general fuertemente iónico. Como ejemplos de esta clase de minerales se pueden mencionar: cuprita (Cu_2O), ilmenita (FeTiO_3), espinela (MgAl_2O_4), gahnita (ZnAl_2O_4), magnetita ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$), cromita (FeCr_2O_4), crisoberilo (BeAl_2O_4), casiterita (SnO_2), rutilo (TiO_2), pirolusita (MnO_2), diásporo [$\text{AlO}(\text{OH})$], goethita [$\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$], manganita [$\text{MnO}(\text{OH})$], limonita [$\text{FeO}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$], bauxita ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$), brucita [$\text{Mg}(\text{OH})_2$], cincita (ZnO), gibbsita [$\text{Al}(\text{OH})_3$], psilomelano [$(\text{Ba}, \text{H}_2\text{O})_2\text{Mn}_5\text{O}_{10}$], etc. (A. Milovski, O.V. Konomov, 1988)

e) Haluros

Este grupo de minerales está constituido por combinaciones químicas de metales con los halógenos como el flúor, cloro, bromo y yodo. Generalmente tienen poca dureza, un peso específico bajo y brillo vítreo; su color puede variar bastante, como en el caso de la fluorita y algunos pueden considerarse de gran importancia económica. Los haluros son los ejemplos más perfectos del mecanismo de enlace iónico puro. Todos los haluros cúbicos tienen puntos de fusión de moderado a elevado, y en ese estado son malos conductores del calor y de la electricidad. La conductividad eléctrica se efectúa por electrólisis, es decir, obedece al transporte de cargas por los iones y no por los electrones y a medida que aumenta la temperatura y son liberados los iones por el desorden térmico, aumenta rápidamente la conductividad eléctrica, llegando a ser excelente en el estado de fusión. Esta conductividad de los haluros fundidos se aprovecha en los procesos industriales. Algunos ejemplos de esta clase son: halita, silvinita, carnalita, fluorita, criolita, atacamita.

f) Carbonatos

Los carbonatos son aquellos minerales que están constituidos por la combinación química de un metal con el grupo aniónico carbonato, por lo que éstos son los más difundidos.



Entre sus características se puede mencionar que poseen dureza media o baja, son generalmente blancos, pero también pueden presentar vivos colores, a veces son transparentes o translúcidos por lo que son fácilmente localizables en hermosas cristalizaciones.

A diferencia de los minerales de otras clases, los carbonatos tienen la característica de disolverse con efervescencia en el ácido clorhídrico diluido, en frío y en caliente, por lo que son fácilmente identificables. Los carbonatos anhidros importantes pertenecen a tres grupos isoestructurales:

- Grupo de la calcita: calcita, magnesita, siderita, rodocrosita, smithsonita.
- Grupo del aragonito: aragonito, witherita, estroncianita, cerucita.
- Grupo de la dolomita: dolomita, ankerita.

Además de los minerales de estos tres grupos sólo tienen importancia los carbonatos básicos de cobre: la azurita y la malaquita.

g) Nitratos

Los nitratos que se presentan escasamente en la naturaleza son fácilmente solubles en agua. El nitro sosa o nitrato de Chile es conocido por su importancia comercial. Entre los más importantes tenemos el nitro y la nitratina (nitrato de Chile).

h) Boratos

Son minerales que se encuentran, en raras ocasiones, en yacimientos utilizados industrialmente. La mayoría presentan un peso específico bajo y brillo vítreo o graso; son en gran parte incoloros, blancos, grises, transparentes o translúcidos; los compuestos hidratados se vuelven fácilmente opacos y harinosos en contacto con el aire y frecuentemente se desmenuzan.

Entre los más abundantes se encuentran la kernita, el bórax, la ulexita y la colemanita.

i) Sulfatos

Los minerales de este grupo tienen una dureza inferior a 3.5, por ejemplo las especies minerales ricas en agua, cuya dureza baja hasta 2. Sus propiedades ópticas resaltan los valores más pequeños de los índices de doble refracción.

La formación de sulfatos tiene lugar en las condiciones de elevada concentración de oxígeno, es decir, en elevada presión parcial del oxígeno en el medio ambiente y a temperaturas relativamente bajas. (Dana S., Edward, Ford E, 1979).

En esta clase de minerales se observa una gran diversidad de compuestos, pero que son poco comunes entre ellos. Los sulfatos se pueden dividir en:

Sulfatos anhidros:

- Grupo de la baritina: los sulfatos de bario, estroncio y plomo poseen cristales íntimamente relacionados por su hábito y constantes cristalográficas. Los miembros de este grupo son: baritina, celestina, anglesita.
- Anhidrita
- Crocoíta

Sulfatos básicos e hidratados:

- Yeso
- Antlerita
- Alunita

j) Volframatos y molibdatos

Se trata de un pequeño grupo de minerales de mena que son coloridos e interesantes. El tungsteno (W) tiene un peso atómico mucho mayor (184) que el molibdeno (96), ambos pertenecen a la misma familia de la tabla periódica y, debido a la contracción lantánida, tienen el mismo radio iónico. Debido a esto, cada uno de ellos puede sustituir fácilmente al otro como catión coordinador. Pero en la naturaleza es raro encontrar volframios primarios casi por completo exentos de molibdeno y viceversa. En los minerales secundarios es más común la asociación mutua de los dos elementos en solución sólida. Como ejemplos de este tipo de minerales tenemos: volframita $[(Fe,Mn,Mg)WO_4]$, scheelita $(CaWO_4)$, powellita $(CaMoO_4)$, wulfenita $(PbMoO_4)$.

k) Fosfatos, Arsenatos y Vanadatos

Esta clase comprende un gran número de minerales de vivos colores que son poco conocidos. Se caracterizan por la presencia, en el grupo aniónico, de fósforo

(fosfatos), arsénico (arseniatos) y vanadio (vanadatos). Algunos tienen una gran importancia para la extracción de elementos químicos poco comunes.

Como ejemplos se pueden mencionar los siguientes: litiofilita (LiMnPO_4), trifilita (LiFePO_4), monacita-Ce (CePO_4), monacita-La (LaPO_4), monacita-Nd (NdPO_4), monacita-Sm (SmPO_4), apatito [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$], piromorfita [$\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$], vanadinita [$\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$], eritrina [$\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$], ambligonita (LiAlPO_4F), lazulita [$(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Al}_2(\text{OH}_2(\text{PO})_4)_2$], Hauyne [$\text{Na}_3\text{Ca}(\text{Si}_3\text{Al}_3)\text{O}_{12}\text{SO}_4$], wavelita [$\text{Al}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH}, \text{F}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$], turquesa [$\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$], autunita [$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{-}12\text{H}_2\text{O}$], carnotita [$\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$]. (C. Pellent, 1993)

1) Silicatos

En la clasificación de los silicatos se encuentran alrededor de una tercera parte de los minerales conocidos. Son importantes porque muchos son preciosos como las gemas y otros se explotan industrialmente. Los silicatos son los materiales cerámicos más importantes y contribuyen de diversa manera en nuestra civilización y el nivel de vida, por ejemplo los ladrillos, las piedras, el cemento y el vidrio empleados en la construcción de los edificios que se derivan de gran parte de estos minerales.

El conocimiento de los mismos puede ampliarse ya que sabemos que la Luna y todos los planetas de nuestro sistema solar tienen cortezas rocosas de silicatos y óxidos muy parecidos a los de nuestro planeta Tierra.

Algunos son elementos de las rocas sumamente comunes, como es el caso de las rocas ígneas, las que constituyen más del 90% de la corteza terrestre. Por lo general todos los silicatos poseen una elevada dureza (6-8) y son poco alterables, están formados esencialmente por grupos tetraédricos (SiO_4), por un silicio y cuatro oxígenos dispuestos como los vértices de un tetraedro.

En la estructura de un silicato estos tetraedros pueden aislarse entre sí (neosilicatos), o bien reunirse en grupos de dos (sorosilicatos); también pueden unirse formando anillos (ciclosilicatos) y cadenas muy prolongadas (inosilicatos); o disponerse en superficies planas (filosilicatos), e incluso en construcciones espaciales formando un armazón tridimensional (tectonosilicatos). (Dana S., Edward, Ford E, 1979).



Una característica, que resulta menos detectable en las demás clases, es que constituyen familias isomorfas, es decir, que su composición química varía gradualmente de un mineral a otro, de modo que el primero y el último son totalmente diferentes entre sí.

En el caso del olivino, por ejemplo, entre el término rico en magnesio (forsterita) y el rico en hierro (fayalita) existe toda la gama de minerales de composición intermedia. Tales como:

✓ **Nesosilicatos**

Los silicatos con grupos tetraédricos SiO_4 independientes se llaman nesosilicatos (del griego nesos, que significa isla) u ortosilicatos (del griego orthos que significa normal). Los minerales de este grupo tienen valores relativamente altos de peso específico y dureza, su hábito cristalino es comúnmente equidimensional y no existen direcciones pronunciadas de exfoliación. La forsterita y la fayalita son minerales muy comunes de las rocas ígneas de alta temperatura. (Dana S., Edward, Ford E, 1979).

Entre los nesosilicatos tenemos:

- Grupo de la fenaquita: fenaquita, willemita.
- Grupo del olivino: forsterita, fayalita.
- Grupo de los granates: piropo, almandino, espersartina.
- Grupo del circón: circón.
- Grupo Al_2SiO_5 : andalucita, silimanita, cianita, topacio, estaurolita.
- Grupo de la humita: condrodita, datolita, esfena, cloritoide.

✓ **Sorosilicatos**

Los silicatos con grupos tetraédricos SiO_4 conectados, y que dan lugar a grupos Si_2O_7 , se clasifican como sorosilicatos (del griego soros, que significa montón) o disilicatos (en referencia a los dobles agrupaciones tetraédricas).

Se conocen alrededor de 70 minerales pero en su mayor parte son raros. Entre los más importantes se tienen: hemimorfita, lawsonita.

El grupo de la epidota: clinozoisita, epidota, alanita, idocrasa (vesubianita). Los minerales de este último grupo son isoestructurales y forman cristales monoclinicos.



✓ Ciclosilicatos

Si se concentran más de dos tetraedros se forman estructuras cerradas en forma de anillo y los anillos cuádruples poseen la composición Si_4O_{12} .

Este grupo de silicatos anulares reciben también el nombre de ciclosilicatos (del griego *kyclos*, que significa círculo).

Como ejemplo de estos minerales tenemos: axinita, berilo, cordierita, turmalina.

✓ Inosilicatos

Los tetraedros también pueden unirse formando cadenas simples infinitas, llamados inosilicatos (del griego *inos*, que significa hilo).

Además, estas cadenas sencillas pueden unirse después lateralmente, compartiendo más oxígenos de algunos de los tetraedros para formar bandas o cadenas dobles. (Cornelis, 2001)

En los inosilicatos existen dos importantes grupos de minerales, los piroxenos (de única cadena) y los anfíboles (doble cadena).

Entre estos dos grupos existe similitud en la cristalografía y en las propiedades físicas y químicas. Pero la mayor parte de los piroxenos y anfíboles son monoclinicos, por lo que ambos grupos tienen miembros ortorrómbicos.

El color, brillo y dureza de las especies análogas son parecidos, el peso específico y el índice de refracción son más bajos en los anfíboles que en los piroxenos. Además, los cristales tienen, a menudo diferentes hábitos.

El piroxeno se presenta en prismas gruesos, mientras que los anfíboles tienden a tener cristales alargados, a veces aciculares.

También sus exfoliaciones son distintas. Los piroxenos están formados por diferentes familias, estas son:

- Serie enstatita-ortoferrosita: enstatita, hiperstena, pigeonita.
- Serie diópsido-hedenbergita: diópsido, hedenbergita, augita.
- Grupo del piroxeno sódico: jadeíta, egirina, espodumena.
- Grupo de los piroxinoideos: wallastonita, rodonita, pectolita.

Los anfíboles están formados por las siguientes familias:

- Antofilita
- Serie de la commingtonita: commingtonita, grunereita.
- Serie de la tremolita: tremolita, actinolita, horblenda.
- Grupo de los anfíboles sódicos: glaucofano, riebeckita.

m) Filosilicatos

Cuando tres de los oxígenos de un tetraedro se comparten con tetraedros contiguos se forman láminas planas infinitamente extensas de composición unitaria Si_2O_5 , a este tipo se le denominan filosilicatos (del griego *phyllo*, que significa hoja).

Todos los miembros de este grupo tienen hábito hojoso o escamoso y una dirección de exfoliación dominante; son generalmente blandos, de peso específico relativamente bajo y las láminas de exfoliación pueden ser flexibles e incluso elásticas.

- Grupo de las serpentinas: antigorita, crisotilo.
- Grupo de minerales arcillosos: calinita, talco, pirofilita.
- Grupo de las micas: moscovita, flogopita, biotita, lepidolita, margarita.
- Grupo de la clorita: clorita.
- Grupo Apofilitas: apofilita, prehnita, crisocola.

n) Tecnosilicatos

Cuando los cuatro oxígenos de un tetraedro SiO_4 son compartidos por tetraedros contiguos se obtiene una red tridimensional de composición unitaria SiO_2 , a estos se les denomina tectosilicatos (del griego *tecton*, que significa constructor). Casi el 64% de la corteza terrestre está constituida por estos minerales formados alrededor de un armazón tridimensional de tetraedros SiO_4 . (Cornelis, 2001)

Entre los principales grupos se tienen:

- Grupo SiO_2 : cuarzo, tridimita, cristobalita, ópalo.
- Grupo de los feldespatos
 - ✓ Serie de los feldespatos potásicos: microclina, ortosa, sanidina.

- ✓ Feldespatos plagioclasas: albita, anortita.
- Grupo de los feldespatoides: leucita, nefelina, sodalita, lazurita, petalita.
- Serie de las escapolitas: marialita, meionita, analcima.
- Grupo de las zeolitas: natrolita, chabazita, heulandita, estilbita.

1.4 Caracterización de las sustancias minerales.

La caracterización total de los minerales, implica el conocimiento de la composición química, la investigación estructural y el estudio de sus propiedades, tanto físicas como químicas. Está claro, que existen interconexiones entre todos estos aspectos. Por ejemplo, las sustancias que contienen plomo suelen tener densidad elevada, aquellas que contienen ciertos elementos de transición, suelen presentar colores característicos, las estructuras laminares implican exfoliación perfecta en una dirección, mientras que las estructuras en cadena, implican exfoliación en dos direcciones, las oxisales presentan brillo vítreo, mientras que los elementos metálicos, los sulfuros y ciertos óxidos metálicos suelen tener brillo metálico o semimetálico. Por esto, cuando se realiza un simple examen organoléptico, se puede aproximar tanto la composición, como la estructura. Pero, en realidad esto no es más que una orientación válida para una parte de los minerales (recordemos que se encuentran caracterizadas una 4500 especies y variedades) y que las posibilidades en este aspecto sólo se amplían cuando se posee una gran experiencia en la observación de minerales. Por lo tanto, para el reconocimiento de minerales se debe recurrir a procedimientos más científicos que pasan por varias etapas. Inicialmente se realiza el análisis químico, primero cualitativo y luego cuantitativo. En la mayor parte de los casos, es necesario un estudio estructural, ya que existen sustancias con composiciones muy parecidas (a veces idénticas) y la forma de diferenciarlas es mediante el conocimiento de la estructura.

La primera conclusión que debe extraerse de esto es la gran dificultad que representa el reconocimiento de los minerales únicamente mediante métodos sensoriales. Esto es algo que debe ser asumido, en primer lugar por los "expertos" en Mineralogía y también por los aficionados y demás personas que solicitan información a éstos.

El reconocimiento de los minerales se inicia en el propio yacimiento, al reconocer el ambiente geológico y tomar nota exacta de la ubicación. También en el mismo lugar, se pueden reconocer algunas de sus propiedades físicas. Posteriormente, en los laboratorios, se deberán estudiar las demás características y proceder a su análisis químico para conocer su composición y relacionarla con las propiedades químicas que también se determinan. A todos estos procesos, deberá complementar el estudio estructural, el cual a su vez servirá para explicar muchas de las propiedades antes observadas e, incluso, para descubrir otras nuevas.

1.5 Propiedades físicas de las sustancias minerales. (Burriel, Lucena, 2000)

Color.

La absorción de una radiación visible o ultravioleta (ondas electromagnéticas), en una sustancia, causa la excitación de sus átomos y a la vez de sus electrones, produciéndose saltos de estos electrones a niveles de energía menos estables.

La energía de la radiación absorbida por un electrón es igual al producto de la constante de Planck (h) y la velocidad de la luz, entre la longitud de onda de la radiación absorbida. Cuanto más larga sea la longitud de onda de la radiación absorbida, menor será la energía de excitación electrónica. Por tal motivo las sustancias incoloras, generalmente absorben radiaciones procedentes de los rayos ultravioleta; en cambio las coloridas absorben radiaciones de la región visible del espectro electromagnético (4000 a 7500 Å), es por eso que se requiere menor energía para excitar una sustancia colorida que una incolora.

En consecuencia el color aparece cuando el nivel del estado excitado es cercano al nivel de energía del estado normal. Si se absorbe toda la luz visible, la sustancia aparecerá negra. Si se absorben todos los colores, menos uno el color del compuesto será precisamente del color que no se absorbió.

En general todos los cationes elementales son incoloros y solo se forman cationes coloreados de los elementos que se encuentran situados en la parte central de la tabla periódica. La aparición del color en los precipitados está relacionada con la existencia de estados electrónicos inestables de las moléculas o átomos.

Esta inestabilidad electrónica, es la responsable de la absorción de la energía luminosa correspondiente al espectro visible, apareciendo entonces el color

resultante de las zonas del espectro que no han sido absorbidas o el color complementario, si la absorción se verificó en más de una región del espectro.

La coexistencia en una molécula de átomos del mismo elemento que tengan distintos números de oxidación, casi siempre origina productos coloreados.

De acuerdo al color las sustancias se clasifican en coloridas e incoloras. Frecuentemente, una sustancia colorida presenta un determinado tono muy semejante a otras sustancias; por lo cual se hace necesario una muestra testigo para comparación. Además la variación de color depende de la cantidad de impurezas que pueda tener la muestra; puede ser que al comparar el color de la muestra tipo no sea exactamente igual, pero si debe tener cierto parecido.

Existen otras clasificaciones referentes a la naturaleza del color:

- **Idiocromáticas**

El *color* está directamente relacionado con la naturaleza química de sus componentes, de tal forma que es invariable y característico en cada compuesto. Por ejemplo la malaquita es siempre verde, la azurita es azul, el cinabrio es rojo, el oropimente es amarillo, etc.

- **Halocromáticas**

Pueden presentar varios colores debido a la existencia de impurezas, inclusiones, defectos en las estructuras cristalinas, etc. El cuarzo presenta por diversas razones, una gran cantidad de colores diferentes (ahumado, citrino, rosa, etc.).

En relación con las *sustancias* halocromáticas, es importante comentar que existen algunos elementos químicos cuya presencia, aún en concentraciones muy pequeñas, puede proporcionar intensas coloraciones en sustancias que, de por sí, son incoloras. Tales elementos son los denominados cromóforos y algunos de los más importantes son: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu. Una de las características comunes de todos los *elementos cromóforos*, es la de poseer orbitales atómicos tipo d sin completar. Son elementos o metales de transición. Esto es importante, ya que la diferencia de energía entre dos niveles electrónicos puede ser muy parecida a la aportada por una radiación visible, y dada la parcial ocupación de los orbitales d, son posibles los saltos electrónicos entre niveles, con lo cual será observable el color complementario a la radiación absorbida durante el mencionado salto. Así, por



ejemplo, la presencia de Cr en el corindón provoca el color rojo del rubí, si además existe Fe el color es algo marrón. Si las impurezas del corindón son de Co o de Ti, aparece la coloración azul del zafiro. Si en los berilos hay algo de Cr, aparece la coloración verde de la esmeralda pero si el elemento presente es el Cs, el color que adquiere es amarillo anaranjado. Pero también hay elementos que no son de transición cuya presencia puede provocar, en algún caso, diferentes coloraciones.

La coloración de ciertas sustancias puede estar causada por la existencia de diversos defectos en la estructura cristalina, como los centros de color (Centros F), que consisten en la aparición de desequilibrios de cargas en una determinada zona, produciéndose transiciones electrónicas con gran facilidad y que provocan la aparición de color. Por este motivo, algunos minerales cambian de color cuando se calientan o se someten a ciertas radiaciones. También se consideran causas de la aparición de color ciertos fenómenos de interferencia que se dan en minerales con estructura laminar, o las transiciones electrónicas entre cationes diferentes o dos estados de valencia de un mismo elemento (transiciones entre orbitales moleculares).

Un mineral presenta irisaciones cuando en la superficie pueden observarse distintas coloraciones, independientemente de la dirección en que se observe.

Las pigmentaciones están causadas por la presencia de pequeñas partículas coloreadas en un mineral que es incoloro, blanco o con coloraciones suaves. Uno de los ejemplos más conocidos es el cuarzo rojo o hematite (Jacinto de Compostela), en el cual la coloración rojiza está provocada por pequeñas partículas de hematite.

Color de la rayadura.

Muchas sustancias y especialmente los minerales, presentan colores característicos cuando se rayan o se hacen rayar sobre vidrio o porcelana. El color de la rayadura puede ser igual al de la sustancia en cuestión o diferente. Algunas sustancias al pulverizarse, presentan un color diferente del que tenían al estado masivo o cristalino. Los minerales Idiocromáticas tienen la raya del mismo color que la superficie (más intensa o menos intensa), mientras que la *raya* de los minerales halocromáticos suele ser blanca o gris. Los minerales más o menos incoloros y

transparentes tienen raya blanca, los minerales oscuros con brillo no metálico presentan la raya más clara que la superficie y los que tienen brillo metálico tienen la raya más brillante que la parte externa.

Aspecto.

En los minerales y rocas se presentan texturas que pueden ser: terrosa, pulverulenta, fibrosa, granular, escamosa, sedosa, vítrea, reticulada, cristalina, amorfa etc. Esto indica diferenciaciones específicas que ayudan enormemente, en la identificación de muchos minerales y rocas.

El aspecto se refiere al hábito que presentan los minerales, ya sea en cristales aislados, en agregados cristalinos o en masas. El hábito que adquiere un mineral, se encuentra condicionado por factores externos, como por ejemplo la temperatura, la presión o la composición química del sistema en el que se ha desarrollado.

Es importante distinguir el *hábito* de la forma cristalina, también llamada clase de simetría o grupo puntual, ya que ésta se encuentra relacionada únicamente con la naturaleza química, es decir, con la composición y con la estructura.

Para describir el hábito de los minerales se utilizan distintos términos en el caso de cristales, agregados y masas. (C. Pellent, 1993)

Los cristales pueden ser:

- **Aciculares:** Largos y delgados, como agujas: natrolita o millerita.
- **Capilares:** Hebras finas como cabellos: crisotilo.
- **Aplanados o Ensiformes:** Con forma de cuchilla o de espada: cianita.
- **Filiformes:** Como alambres, a veces retorcidos: plata.
- **Tabulares, Laminares u Hojosos:** Con aspecto de tablillas, láminas u hojas: micas, (moscovita, biotita).
- **Piramidales o Bipiramidales:** Con forma de pirámide o de bipirámide (hexagonal, cuadrada, triangular): Jacinto de Compostela o cuarzo bipiramidado.
- **Prismáticos:** Con forma de prismas: berilo.

Los agregados o asociaciones de cristales, iguales o diferentes, pueden ser:

- **Dendríticos (Dendritas):** Como las ramas de un árbol (arborescente) o como los musgos: pirolusita y oro.

- **Reticulares:** Cristales finos entrecruzados formando redes: ciertas micas o antimonita.
- **Radiales o Divergentes:** Disposiciones alrededor de un punto central: natrolita.
- **Hojosos o Foliados:** Agrupaciones de cristales laminares o tabulares. En los agregados micáceos los cristales laminares se disponen de forma paralela, haciendo posible la exfoliación o fácil separación de las láminas: mica.
- **Fibrosos:** Los cristales se presentan en agrupaciones de tipo fibroso, tanto radiales (fibroso-radiales), Wavellita, como paralelas (fibrosos). Yeso fibroso.
- **Drusas:** Los cristales recubren superficies del mismo o de otro mineral: calcita.
- **Plumosos:** Los cristales, bien tabulares o bien aciculares se disponen en forma divergente, dando lugar a un aspecto parecido al que se observa en las plumas de las aves: boulangierita, jamesonita.
- **Geodas:** En el interior de una cavidad se alojan, sin llenarla, cristales con formas diversas, generalmente pequeños: cuarzo, amatista.

Las **maclas** son un tipo de agregado formado por dos cristales de un mismo mineral con la misma forma y que han crecido juntos o mezclados.

- Las **Maclas de Contacto o de Yuxtaposición:** presentan una superficie de unión definida que separa los cristales.
- Las **Maclas de Penetración:** están formados por cristales interpenetrados con una superficie de unión irregular.

Los agregados uniáxicos son un conjunto de cristales unidos por un eje, Estauroлита.

Para las masas se emplean los términos siguientes:

- **Macizas Compactas:** Sin ningún aspecto determinado: hematite.
- **Granulares:** Masas formadas por pequeños granos de mineral. Si parecen terrones de azúcar se llaman sacaroides: yeso sacaroide.
- **Bandeadas:** El mineral aparece formado por bandas con diferente textura y color: cuarzo.

- **Botroidales:** Formas globulares o esferoidales agrupadas con el aspecto que presentan los racimos: cuarzo.
- **Reniformes o Arriñonadas:** Disposiciones radiales que originan superficies redondeadas con aspecto de riñón: hematites o hierro arriñonado.
- **Mamilares:** Amplias superficies esferoidales entrecruzadas: malaquita.
- **Coloformes:** Incluye todas las agrupaciones globulares, mamilares, etc.
- **Amigdaloides:** El mineral aparece formando nódulos con forma de almendra: ceolita.
- **Estalactíticas:** Disposición en forma de cilindros o de conos: calcita.
- **Pisolíticas u olíticas:** El mineral está formado por masas redondeadas, grandes o pequeñas: calcita.
- **Concreccionadas o Nodulares:** Se destacan masas esféricas e incluso irregulares: cobre.
- **Tuberosas:** Superficies redondeadas irregulares, con aspecto de raíces: aragonito flos-ferri. (Cornelis, 2001)

Exfoliación y Fractura.

Cuándo se aplica una fuerza superior a su resistencia, se produce la ruptura del mineral. Esta ruptura, obedece a la siguiente terminología:

- **Exfoliación:** La ruptura da lugar a superficies más o menos lisas, que coinciden con caras reales.
- **Fractura:** La ruptura origina formas irregulares.

Para la *exfoliación* se emplean los términos siguientes:

- **Perfecta:** El mineral se deja separar en láminas con gran facilidad y sin esfuerzo, tal como la mica o el yeso.
- **Buena, notable o fácil:** Es fácil exfoliar el mineral con un golpe. Muchas veces aparecen formas geométricas en los trozos de la ruptura, en este caso pueden utilizarse estas formas para adjetivar el tipo de exfoliación.
- **Mediana:** En los trozos de mineral pueden observarse planos de exfoliación dispuestos de forma aleatoria.



- **Imperfecta:** Es costoso conseguir la exfoliación.
- **Difícil:** Resulta muy difícil exfoliar el mineral. Prácticamente no presenta exfoliación.

Al ser una propiedad direccional, la dificultad y el resultado de tal ruptura puede ser muy distinto según la dirección cristalográfica seguida.

No debe confundirse la exfoliación con la partición, ya que esta última se refiere a la separación, mediante planos de macla de los individuos de un agregado.

Para definir la fractura se emplean los términos siguientes:

- **Concoidea:** Se forman superficies cóncavas o convexas de relieve suave.
- **Lisa:** Superficies planas, suaves y sin asperezas.
- **Desigual o irregular:** Aparecen superficies irregulares.
- **Fibrosa o astillosa:** El mineral se rompe como la madera, formando astillas.
- **Ganchuda:** Las superficies aparecen dentadas.
- **Terrosa:** El mineral se desmorona como un terrón.

Tenacidad.

Es la resistencia que opone un material a ser roto, molido o doblado. Para describir la *tenacidad* se emplean los términos siguientes:

- **Frágil:** El mineral se rompe con facilidad y se hace trozos con poco esfuerzo.
- **Maleable:** El mineral se lamina mediante golpes.
- **Séctil:** El mineral se secciona con una cuchilla formando virutas.
- **Dúctil:** El mineral se estira convirtiéndose en un hilo.
- **Flexible:** Cuando el mineral es doblado y no recupera su forma al cesar el esfuerzo.
- **Elástico:** Cuando el mineral es doblado, recupera su forma al cesar el esfuerzo.

Fusibilidad.

Las temperaturas de fusión de las sustancias constituyen, en algunos casos, una propiedad muy útil para su identificación.

En el caso de minerales, dado que los puntos de fusión suelen ser muy altos y de difícil acceso, la determinación de los mismos no suele ser un sistema seguro de diagnóstico.

Sin embargo, es posible una determinación aproximada de las temperaturas de fusión (p.f.) mediante comparación con una serie de minerales cuyo punto de fusión es conocido. En ello se basa la Escala de Von Kobell:

CUADRO N° 1.1
ESCALA DE FUSIÓN DE VON KOBELL

NÚMERO	MINERAL TIPO	p.f.(°C)	OBSERVACIONES
1,00	Antimonita	525,00	Funde con una cerilla
2,00	Natrolita	800,00	Funde con mechero de gas
3,00	Almandino	1050,00	Sólo funden trozos pequeños
4,00	Actinolita	1200,00	Funde al soplete
5,00	Ortosa	1300,00	Funde difícilmente al soplete y se redondean los cristales
6,00	Broncita	1400,00	Sólo funden trozos pequeños
7,00	Cuarzo	1710,00	Infusible al soplete

Fuente: Dana S., Edward Ford E., 1979)

Diafanidad.

Es una propiedad que presentan los minerales no metálicos y que consiste en que transmiten la luz en mayor o menor proporción. Se reconocen tres tipos de diafanidad:

- **Transparencia-** Se considera como una sustancia transparente, cuándo un objeto es visible con toda claridad al observarlo a través de la sustancia problema.
- **Opacidad-** Cuándo la sustancia no deja pasar la luz, salvo en las esquinas o sectores muy delgados y la visibilidad de un objeto puesto detrás es nula.



- **Translúcido-** En este caso, la sustancia transmite la luz, pero el objeto puesto detrás, solo se percibe borrosamente.

Iridiscencia.

Propiedad que tienen ciertos cristales de descomponer la luz en varios colores cuándo se observan en determinada posición con respecto a una fuente luminosa.

Lustre

Propiedad que presentan las sustancias en su superficie cuándo reflejan la luz. El lustre o brillo es una propiedad física que describe la manera en que la luz interactúa con la superficie de una roca, cristal o mineral y se refleja en ella. El lustre puede ser metálico (producido por sustancias opacas), submetálico (el de sustancias opacas cuando son gruesas pero que cuando se exfolian en láminas finas son transparentes y no metálico (producido por sustancias transparentes), dentro de este existen varios tipos de lustre que de mayor a menos índice de refracción son:

- **Adamantino:** como el del diamante —de ahí su nombre—, referido al más intenso.
- **Resinoso:** como el del azufre, es un brillo intenso y de color amarillento.
- **Vítreo:** como el del cuarzo, es el más común en los minerales.
- **Graso:** como el de las superficies de rotura del cuarzo.
- **Nacarado:** como el de la mica, algo iridiscente.
- **Sedoso:** como el del yeso, típico de los minerales de hábito fibroso.
- **Húmedo:** como el de la fluorita, que refleja muy poco la luz.
- **Córneo:** como la calcedonia, que casi no brilla.
- **Terroso:** como la bauxita, el que presentan los minerales que no reflejan la luz.

El lustre y el aspecto general de una sustancia transparente dependen básicamente de su índice de refracción.

Cuándo más alto es éste, la sustancia es menos transparente y su lustre es cada vez más adamantino.

Refracción.

Los compuestos o minerales no metálicos que refractan la luz, es decir que desvían la dirección de los rayos luminosos, lo hacen de acuerdo con su índice de refracción. La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro. Solo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos.

La refracción se origina en el cambio de velocidad de propagación de la onda señalada.

Un ejemplo de este fenómeno se ve cuando se sumerge un lápiz en un vaso con agua: el lápiz parece quebrado.

También se produce refracción cuando la luz atraviesa capas de aire a distinta temperatura, de la que depende el índice de refracción. Los espejismos son producidos por un caso extremo de refracción, denominado reflexión total.

Aunque el fenómeno de la refracción se observa frecuentemente en ondas electromagnéticas como la luz, el concepto es aplicable a cualquier tipo de onda. (J. Astor Vignau, 1991)

Se produce cuando la luz pasa de un medio de propagación a otro con una densidad óptica diferente, sufriendo un cambio de rapidez y un cambio de dirección si no incide perpendicularmente en la superficie.

Esta desviación en la dirección de propagación se explica por medio de la ley de Snell. Esta ley, así como la refracción en medios no homogéneos, son consecuencia del principio de Fermat, que indica que la luz se propaga entre dos puntos siguiendo la trayectoria de recorrido óptico de menor tiempo.

Por otro lado, la velocidad de la penetración de la luz en un medio distinto del vacío está en relación con la longitud de la onda y, cuando un haz de luz blanca pasa de un medio a otro, cada color sufre una ligera desviación.

Este fenómeno es conocido como dispersión de la luz. Por ejemplo, al llegar a un medio más denso, las ondas más cortas pierden velocidad sobre las largas (ej: cuando la luz blanca atraviesa un prisma).



Las longitudes de onda corta son hasta 4 veces más dispersadas que las largas lo cual explica que el cielo se vea azulado, ya que para esa gama de colores el índice de refracción es mayor y se dispersa más.

En la refracción se cumplen las leyes deducidas por Huygens que rigen todo el movimiento ondulatorio:

- El rayo incidente, el reflejado y el refractado se encuentran en el mismo plano.
- Los ángulos de incidencia y reflexión son iguales, entendiendo por tales los que forman respectivamente el rayo incidente y el reflejado con la perpendicular (llamada Normal) a la superficie de separación trazada en el punto de incidencia.

La velocidad de la luz depende del medio por el que viaje, por lo que es más lento cuanto más denso sea el material y viceversa.

Por ello, cuando la luz pasa de un medio menos denso (aire) a otro más denso (cristal), el rayo de luz es refractado acercándose a la normal y por tanto, el ángulo de refracción será más pequeño que el ángulo de incidencia.

Del mismo modo, si el rayo de luz pasa de un medio más denso a uno menos denso, será refractado alejándose de la normal y, por tanto, el ángulo de incidencia será menor que el de refracción.

Así podemos decir que la refracción es el cambio de dirección de la propagación que experimenta la luz al pasar de un medio a otro

El índice de refracción es el cociente que resulta de dividir el seno del ángulo de incidencia entre el seno del ángulo de refracción de un rayo luminoso que atraviesa la superficie de separación de dos medios diferentes.

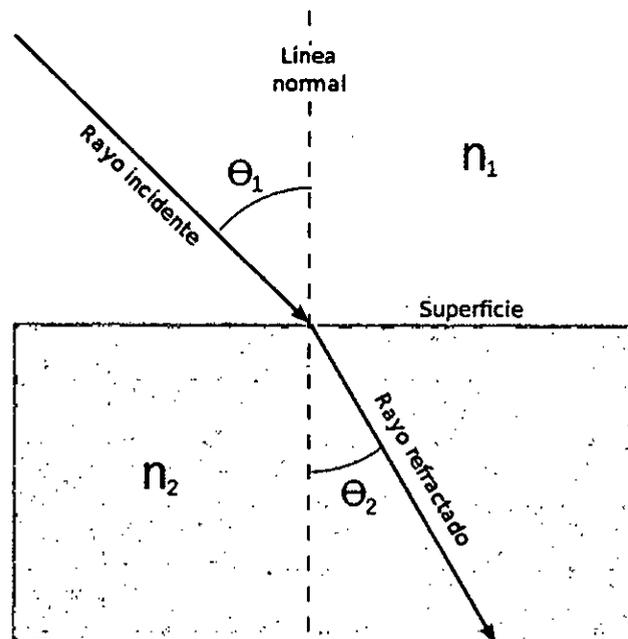
La relación entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es igual a la razón entre la velocidad de la onda en el primer medio y la velocidad de la onda en el segundo medio, o bien puede entenderse como el producto del índice de refracción del primer medio por el seno del ángulo de incidencia es igual

al producto del índice de refracción del segundo medio por el seno del ángulo de refracción, esto es:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

- n_1 : índice de refracción del primer medio
- θ_1 : ángulo de incidencia
- n_2 : índice de refracción del segundo medio
- θ_2 : ángulo de refracción

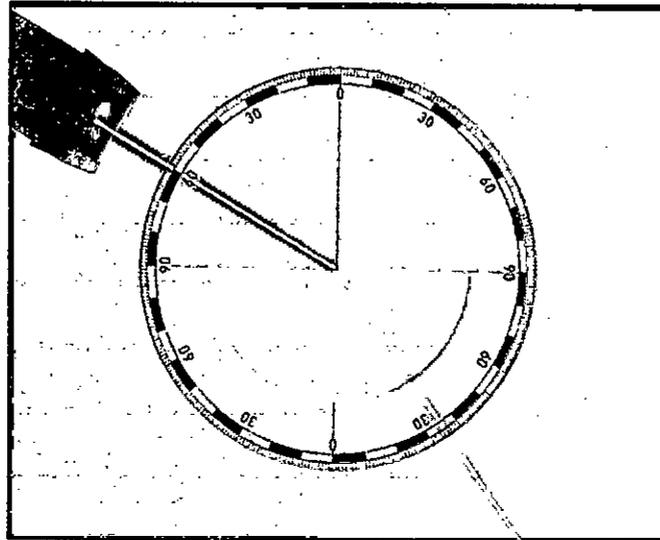
FIGURA N° 1.1
ÍNDICE DE REFRACCIÓN



Fuente: C. Pellent, 1993)



FIGURA N° 1.2
DOBLE REFRACCIÓN



Fuente: C. Pellent, 1993)

Doble refracción.

Esta propiedad física la presentan todos los compuestos que cristalizan en la clase óptica denominada cristales anisótropos, en la cual la velocidad de la luz varía generalmente con la dirección de la vibración.

En estas sustancias, un rayo de luz al penetrar en un cristal es dividido en dos rayos de luz que siguen caminos diferentes en el interior de este. Uno de los rayos se refracta obedeciendo las leyes de la refracción denominándosele rayo ordinario y al otro, como rayo extraordinario.

Estos dos rayos pueden anularse entre planos perpendiculares entre sí.

Impresión al tacto.

Se puede reconocer algunas sustancias al palpar un trozo o una cantidad de muestra lo suficientemente grande como para sentirla, ya sea áspera, lisa, untuosa, cortante, punzante, blanda, dura, adherente, sedosa, etc.

Olor.

La determinación exacta del olor que desprende un compuesto característico en algunas sustancias, proporciona una información definitiva de identificación.

Sonido.

Propiedad que presentan los metales y aleaciones metálicas tales como, los aceros, fundición gris, bronces, latones etc. Se puede también reconocer el desprendimiento de gases incoloros al percibir el ruido producto de la reacción con ácidos.

Sabor.

Algunos compuestos se pueden reconocer, probando con la punta de la lengua cantidades muy pequeñas. Los sabores pueden ser agrio, acre, salado, dulce, alcalino, ácido, amargo, desabrido, refrescante etc. No es recomendable que efectúen esta prueba personas que no tienen experiencia en este medio de identificación, pues existen sustancias que aún en cantidades mínimas (miligramos) si se ingieren son mortales. (Hein, M. ,1993).

Densidad

Esta propiedad es muy notable en el caso de minerales ya que basta sopesar con la mano y observar al mismo tiempo su aspecto físico, para determinar con una cierta seguridad a qué grupo de especies mineralógicas corresponde la muestra. Por ejemplo entre los minerales muy pesados y con aspecto bien definido tenemos los siguientes: SnO_2 (casiterita), MoS_2 (molibdenita), CaWO_4 (tungstato de calcio) (Scheelita); minerales de plomo, oro, plata y platino nativos, etc. Los minerales con densidad baja son: MgCO_3 , NaCl (halita), carbones minerales y vegetales, azufre nativo etc.

Dureza.

Es la resistencia que ofrecen las sustancias a ser rayadas. En la práctica, se hace uso de una clasificación de durezas que es la siguiente: Con la uña, se pueden rayar sólidos que tienen una dureza entre uno y tres de acuerdo con la tabla de durezas de Mohs, con una navaja se pueden rayar sólidos cuya dureza está entre cuatro y seis; con una lima o esmeril se pueden rayar sólidos cuya dureza está entre siete y ocho. Los números de dureza obedecen a una escala arbitraria llamada de Mohs elaborada comparando entre si diversos minerales y compuestos que se clasificaron de la siguiente manera:



**CUADRO N° 1.2
ESCALA DE DUREZA DE MOHS**

SUSTANCIA	NUMERO DE DUREZA
Talco (metasilicato ácido de magnesio) $(\text{SiO}_3)_4\text{H}_2\text{Mg}_3$	1
Yeso (sulfato de calcio) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; sal común (NaCl)	2
Calcita (Carbonato de calcio) CaCO_3	3
Fluorita (fluoruro de calcio) CaF_2	4
Apatita (Fosfato y fluoruro de calcio) $\text{Ca}_5(\text{CaF})(\text{PO}_4)_3$	5
Feldspato (silicato doble de aluminio y potasio) KAlSi_3O_8	6
Cuarzo (dioxido de silicio en cristales) SiO_2	7
Topacio (silicato doble de aluminio y sodio) $\text{AlNaSi}_3\text{O}_8$	8
Corindón (zafiro blanco, óxido de aluminio puro) Al_2O_3	9
Diamante (carbono puro en cristales del sistema hexagonal)	10

Fuente: Raymundo Luna Rangel, 1974

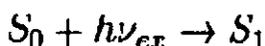
Algunos minerales y compuestos tienen propiedades físicas más específicas, tales como: fluorescencia, fosforescencia, triboluminiscencia, termoluminiscencia, pleocroísmo, piezoelectricidad, magnetismo, radiactividad.

Fluorescencia.

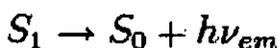
Es la emisión de luz por un cuerpo mientras este se encuentre sometido a una radiación electromagnética directa, la cual puede ser por rayos ultravioleta, catódicos, beta, X, etc. Ejemplo: CaF_2 .

En resumen la fluorescencia ocurre cuando una molécula, átomo o nanoestructura vuelve a su estado fundamental después de haber sido excitada electrónicamente.

Excitación:



Fluorescencia (emisión):



Aquí, $h\nu$ es un término genérico para la energía del fotón con h = constante de

Planck y donde ν = frecuencia de la luz. (Las frecuencias específicas de la luz excitadora y emitida son dependientes en cada sistema en particular.)

El estado S_0 se llama estado fundamental de la molécula fluorescente y S_1 es su primer estado electrónico excitado.

Además de estos estados electrónicos, que corresponden a la ubicación de los electrones de enlace de la molécula en diferentes orbitales moleculares, existen diferentes estados vibracionales para estos orbitales moleculares, estos estados vibracionales corresponden a las oscilaciones que experimentan los átomos que forman la molécula en torno a los enlaces.

Los estados vibracionales altos pueden disipar energía en forma de calor, aumentando las vibraciones de las moléculas vecinas.

Una molécula en estado de excitación electrónica, S_1 , puede adquirir un estado de menor energía por diferentes mecanismos. Puede por ejemplo sufrir un decaimiento no radiactivo en el cual la mayor parte de la energía de excitación es disipada como calor (vibraciones) hacia el disolvente.

Las moléculas orgánicas excitadas también pueden relajarse mediante conversión a un estado triplete entregando energía a otro orbital molecular para obtener al final dos orbitales con energías intermedias, finalmente alguno de estos orbitales se relaja emitiendo un cuanto de luz, por fosforescencia o mediante un segundo paso no radiactivo de decaimiento.

La fluorescencia.

Es un tipo particular de luminiscencia, que caracteriza a las sustancias que son capaces de absorber energía en forma de radiaciones electromagnéticas y luego emitir parte de esa energía en forma de radiación electromagnética de longitud de onda diferente.

La energía total emitida en forma de luz es siempre menor a la energía total absorbida y la diferencia entre ambas es disipada en forma de calor. En la mayoría de los casos la longitud de onda emitida es mayor y por lo tanto de menor energía que la absorbida, sin embargo, si la radiación de excitación es intensa, es posible para un electrón absorber dos fotones; en esta absorción bifotónica, la longitud de



onda emitida es más corta que la absorbida, sin embargo en ambos casos la energía total emitida es menor que la energía total absorbida.

En general las sustancias fluorescentes absorben energía en forma de radiación electromagnética de onda corta (por ejemplo: radiación gamma, rayos x, UV, luz azul, etc), y luego la emiten nuevamente a una longitud de onda más larga, por ejemplo dentro del espectro visible; los ejemplos más notables de fluorescencia ocurren cuando la luz absorbida se encuentra dentro del rango ultravioleta del espectro -invisible al ojo humano- y la luz emitida se encuentra en la región visible. El mecanismo de fluorescencia típico implica tres pasos secuenciales, llamados respectivamente absorción (1), disipación no radiactiva (2) y emisión (3).

El ciclo completo es muy breve, transcurre en tiempos del orden de los nanosegundos, por lo que puede considerarse prácticamente instantáneo. Es este tiempo tan corto lo que diferencia a la fluorescencia de otro conocido fenómeno luminoso, la fosforescencia.

El mecanismo de fluorescencia también se encuentra muy relacionado con el proceso de quimioluminiscencia.

Las sustancias que son capaces de emitir luz al ser excitadas por diferentes tipos de radiación se denominan fluoróforos.

Es posible obtener una amplia variedad de colores por fluorescencia, dependiendo de la longitud de onda que emita el compuesto fluorescente.

El fenómeno de fluorescencia posee numerosas aplicaciones prácticas, entre las que se encuentran por ejemplo análisis en mineralogía, gemología, sensores químicos (espectroscopia fluorescente), pigmentos y tintas, detectores biológicos y lámparas fluorescentes. [Luna Rangel, 1974]

Fosforescencia.

Propiedad que tienen algunas sustancias de seguir emitiendo ondas electromagnéticas visibles (luz) por cierto tiempo, a pesar de que haya cesado la exposición de la sustancia a las radiaciones electromagnéticas. Ejemplo: mineral tipo calcita.

La fosforescencia es el fenómeno en el cual ciertas sustancias tienen la propiedad de absorber energía y almacenarla, para emitirla posteriormente en forma de

radiación. A aquellos elementos que ofrecen fosforescencia se les conoce como foto-reactivos, es decir que requieren luz para obtener la propiedad, es un elemento de la foto-sensibilidad que por medio de la radiación adquieren la energía necesaria para almacenarla y exponerla posteriormente.

El mecanismo físico que rige este comportamiento es el mismo que para la fluorescencia, no obstante la principal diferencia con ésta es que hay un retraso temporal entre la absorción y la reemisión de los fotones de energía.

En la fosforescencia, las sustancias continúan emitiendo luz durante un tiempo mucho más prolongado, aun después del corte del estímulo que la provoca, ya que la energía absorbida se libera lenta (incluso muchas horas después) y continuamente.

Este fenómeno es aprovechado en aplicaciones tales como la pintura de las manecillas de los relojes, o en determinados juguetes que se iluminan en la oscuridad.

No obstante, una de sus aplicaciones más conocidas es el empleo de materiales fosforescentes en los monitores y televisores basados en un tubo de rayos catódicos.

En esta tecnología se emplea un haz de electrones que va realizando un barrido de la pantalla con una frecuencia típica de 50 (en Europa) o 60 Hz (en EE.UU.). La pantalla está recubierta de material fosforescente, lo que permite la persistencia de la imagen entre barridos sucesivos.

Igual que en el caso de la fluorescencia existen ciertos minerales que también tienen propiedades fosforescentes. Éstos son minerales muy extraños y raros de encontrar, pero muy espectaculares dado que el tener fosforescencia implica que también tienen fluorescencia.

Su luminiscencia viene dada, en general, por la presencia de iones de elementos de las tierras raras en su estructura. Cabe destacar por ejemplo la willemita, cuya fosforescencia es verde y viene dada por la presencia de arsénico en su estructura.

La presencia del arsénico es muy pequeña y eso hace que se considere como una impureza. Sin embargo, no todas las willemitas tienen fosforescencia, pues según



su zona de formación, si ésta no es rica en arsénico no contendría este elemento como impureza y no haría fosforescencia.

Triboluminiscencia.

Propiedad que tienen ciertas sustancias de hacerse luminosas cuando se rayan o frotan. Esta propiedad la tienen los minerales no metálicos anhidros con definidos planos de crucero.

Emisión de luz subsecuente a deformación o a fractura vía mecánica o térmica. Se trata de un fenómeno óptico que se genera cuando algunas especies químicas y determinados materiales están sometidos a trituración, tensión, agitación, calor o cualquier otro procedimiento que conlleve ruptura de enlaces químicos. Este fenómeno no ha sido enteramente elucidado. Parece ocurrir por separación y reunificación de cargas eléctricas.

El color, la intensidad y la duración de los destellos triboluminiscentes dependen de la naturaleza del material ensayado.

Cristaloluminiscencia.

Generación de luz durante el proceso de cristalización de un compuesto.

Algunas sustancias desprenden cierta luminosidad cuando empiezan a cristalizar de un líquido madre. Ejemplo el trióxido arsenioso As_2O_3 .

Termoluminiscencia.

Es toda emisión de luz, independiente de aquella provocada por la incandescencia, que emite un sólido aislante o semiconductor cuando es calentado. Se trata de la emisión de una energía previamente absorbida como resultado de un estímulo térmico.

Esta propiedad física, presente en muchos minerales, es utilizada como técnica de datación.

En general, los principios que gobiernan la termoluminiscencia son esencialmente los mismos de aquellos responsables de todos los procesos luminiscentes y, de esta

forma, la termoluminiscencia es uno de los procesos que componen el fenómeno de la luminiscencia. Ejemplo la apatita (fosfato y fluoruro de calcio) $\text{Ca}_4(\text{CaF})(\text{PO}_4)_3$.

Pleocroísmo.

Algunos minerales poseen una absorción selectiva de la luz en diferentes direcciones cristalográficas, presentando diferentes coloraciones cuando se examinan bajo una fuente luminosa en diversas posiciones. Ejemplo mineral tipo turmalina ($\text{H}_9\text{Al}_3(\text{BOH})_2\text{Si}_4\text{O}_{19}$).

El pleocroísmo es la facultad que presentan algunos minerales de absorber las radiaciones luminosas de distinta manera en función de la dirección de vibración.

Por esta propiedad, un mismo cristal puede aparecer con coloraciones diferentes dependiendo de la orientación en que haya caído en la preparación microscópica.

En los cuerpos isótropos, la coloración no depende de la dirección en que se propagan los rayos luminosos en su seno.

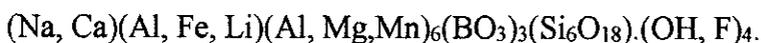
No ocurre lo mismo con los cuerpos birrefringentes, pues en éstos el color visible depende del ángulo que forman los rayos con los ejes cristalinos.

Así, un cristal de circón es oscuro en el sentido de su eje óptico y gris azulado en una dirección perpendicular al mismo.

En un cristal que posea varios ejes, el color variará según las caras: es típico el caso de la cordierita, una de cuyas caras es de color gris amarillento, en tanto las otras dos son de color azul claro y oscuro.

Las coloraciones visibles son dos (dicroísmo) en los cristales birrefringentes que sólo tienen un eje, y tres (tricroísmo) en los que tienen dos ejes. [Luna Rangel, 1974]

Esos fenómenos se deben a la existencia en el cristal de direcciones privilegiadas en las cuales son refractados los rayos según su longitud de onda.



La piezoelectricidad

Proviene del griego piezein, estrujar o apretar, es un fenómeno que ocurre en determinados cristales que, al ser sometidos a tensiones mecánicas, en su masa

adquieren una polarización eléctrica y aparecen una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie.

Este fenómeno también ocurre a la inversa: se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico.

El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible: al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico, recuperan su forma.

Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos que carecen de centro de simetría.

Una compresión o cizallamiento provocan disociación de los centros de gravedad de las cargas eléctricas, tanto positivas como negativas. Como consecuencia, en la masa aparecen dipolos elementales y, por influencia, en las superficies enfrentadas surgen cargas de signo opuesto.

Ejemplo cristales de cuarzo.

Magnetismo.

Algunos minerales en su estado natural son capaces de ser atraídos por un imán, es decir tiene propiedades magnéticas.

Otros materiales se comportan como imanes. Todas las aleaciones de carbono y hierro (aceros) tienen propiedades magnéticas a la temperatura ambiente. Ejemplo: Fe_3O_4 (magnetita), sulfuro de hierro II no estequiométricas.

Ante un campo magnético, las sustancias pueden presentar los siguientes comportamientos:

- **Sustancias magnéticas** son atraídas o repelidas:
- **Ferromagnéticas y paramagnéticas:** Son atraídas.
- **Diamagnéticas:** Son repelidas.
- **Sustancias no magnéticas** no son influidas:



CUADRO N° 2.2

ESCALA DE PERMEABILIDAD MAGNÉTICA

TIPO DE MAGNETISMO	MINERAL	PERMEABILIDAD RELATIVA
Ferromagnéticos	Hierro	100
	Magnetita	40.18
	Franklinita	35.38
	Ilmenita	24.7
Paramagnéticos	Pirrotina	6.69
	Siderita	1.82
	Hematita	1.32
	Goethita	0.84
	Pirolusita	0.71
Diamagnéticos	Granates	0.4
	Cuarzo	0.37
	Cerussita	0.3
	Pirita	0.23
	Dolomita	0.22
	Mispiquel	0.15
	Magnesita	0.15
	Calcopirita	0.14
	Yeso	0.12
	Cinabrio	0.1
	Cuprita	0.08
	Smithsonita	0.07
	Ortosa	0.05
	Galena	0.04
Calcita	0.03	

Fuente: C. Pellent, 1993)

Las sustancias que presentan poca permeabilidad magnética han de ser introducidas en *campos magnéticos* de gran intensidad para que su comportamiento sea observable.

En 1948, Taggart estableció una clasificación de los minerales basándose en su permeabilidad magnética relativa al hierro, el cual se considera como la sustancia más magnética, como se muestra en la tabla 2.2

Radiactividad.

o radioactividad es un fenómeno físico por el cual los núcleos de algunos elementos químicos, llamados radiactivos, emiten radiaciones que tienen la propiedad de impresionar placas radiográficas, ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, entre otros.

Debido a esa capacidad, se les suele denominar radiaciones ionizantes (en contraste con las no ionizantes).

Las radiaciones emitidas pueden ser electromagnéticas, en forma de rayos X o rayos gamma, o bien corpusculares, como pueden ser núcleos de helio, electrones o positrones, protones u otras.

En resumen, es un fenómeno que ocurre en los núcleos de ciertos elementos, inestables, que son capaces de transformarse, o decaer, espontáneamente, en núcleos atómicos de otros elementos más estables.

La radiactividad ioniza el medio que atraviesa.

Una excepción lo constituye el neutrón, que posee carga neutra (igual carga positiva como negativa), pero ioniza la materia en forma indirecta.

En las desintegraciones radiactivas se tienen varios tipos de radiación: alfa, beta, gamma y neutrones.

La radiactividad es una propiedad de los isótopos que son "inestables", es decir, que se mantienen en un estado excitado en sus capas electrónicas o nucleares, con lo que, para alcanzar su estado fundamental, deben perder energía.

Lo hacen en emisiones electromagnéticas o en emisiones de partículas con una determinada energía cinética.

Esto se produce variando la energía de sus electrones (emitiendo rayos X) o de sus nucleones (rayo gamma) o variando el isótopo (al emitir desde el núcleo electrones, positrones, neutrones, protones o partículas más pesadas), y en varios pasos sucesivos, con lo que un isótopo pesado puede terminar convirtiéndose en uno mucho más ligero, como el uranio que, con el transcurrir de los siglos, acaba convirtiéndose en plomo. La radiactividad se aprovecha para la obtención de energía nuclear, se usa en medicina (radioterapia y radiodiagnóstico) y en aplicaciones industriales (medidas de espesores y densidades, entre otras).



La radiactividad puede ser:

- Natural: manifestada por los isótopos que se encuentran en la naturaleza.
- Artificial o inducida: manifestada por los radioisótopos producidos en transformaciones artificiales.

Propiedades eléctricas.

Las propiedades eléctricas, y en concreto la conductividad eléctrica, están relacionadas con los enlaces químicos presentes en las sustancias. La presencia de enlaces de tipo metálico proporciona una gran conductividad, la cual es característica de ciertos metales y aleaciones. Pero la mayor parte de las sustancias minerales se encuentran formadas por enlaces iónicos y covalentes, siendo más escasas las sustancias de naturaleza metálica. Según el *comportamiento eléctrico*, las sustancias se clasifican en:

Conductoras: Presentan enlaces metálicos y bandas de conducción. Suelen ser conductores los elementos metálicos y algunos sulfuros, arseniuros y óxidos.

Dieléctricas, aislantes o no conductoras: La mayor parte de las sustancias son aislantes.

La conductividad eléctrica de las sustancias depende de la dirección en que se mida sobre el cristal. Por ejemplo, los cristales de oligisto presentan una conductividad menor en la dirección del eje principal que en las direcciones perpendiculares a él. Si al calentar una sustancia dieléctrica se vuelve conductora, se dice que es piroeléctrica. Sin embargo, cuando la conductividad se alcanza al suministrar una *presión* en determinadas direcciones y puntos de la red cristalina, se dice que ese material es piezoeléctrico. Por ejemplo, son piroeléctricos la turmalina y la hemimorfita, mientras que el cuarzo es piezoeléctrico. Algo más frecuente es encontrar sustancias triboeléctricas, las cuales adquieren carga por frotamiento, ejemplo el azufre.

Absorción Y Pleocroismo

Cuando la luz atraviesa un cristal, una parte de la energía queda absorbida. La cantidad de energía absorbida es directamente proporcional al camino recorrido por el haz luminoso (camino óptico). Si la cantidad de energía absorbida es poca,



el cristal es transparente y cuanto mayor sea la cantidad de energía absorbida, más oscuro se observará el cristal. Pero no todas las longitudes de onda son absorbidas en la misma cuantía, de tal manera que, en el caso de la luz blanca (polarizada) si un color (longitud de onda) queda absorbido en su mayor parte, se observará su complementario.

En cristales cúbicos y en sustancias amorfas la absorción de luz es igual de intensa en todas las direcciones, pero en cristales anisótropos depende de la dirección, de tal manera que variando ésta se observan diferentes colores e intensidades, dando lugar al fenómeno del pleocroísmo.

En cristales uniaxiales, como por ejemplo la turmalina, se observan dos tipos de colores, dependiendo de la orientación. Se trata de un cristal dicroico. En cristales biaxiales, pueden observarse tres colores y se denominan tricroicos.

El pleocroismo puede ser más o menos débil y no todos los cristales presentan siempre un mismo tipo de pleocroismo característico, sino que puede haber varias posibilidades (A. Orio, 1982.)

Extinción Óptica

Se ha mencionado que los minerales anisótropos presentan cuatro posiciones de extinción y otras cuatro de máxima iluminación. Dependiendo de cuál sea la orientación respecto a los hilos reticulares del microscopio en la que se dé la extinción, podemos tener los casos siguientes:

- Extinción recta o paralela: Se produce cuando los bordes o las caras de exfoliación del cristal, son paralelos a alguno de los hilos reticulares del microscopio, produciéndose la extinción de forma coincidente con tales hilos.
- Extinción oblicua: Se produce cuando los bordes o las caras de exfoliación del cristal se extinguen formando un cierto ángulo con los hilos reticulares (ángulo de extinción).
- Algunos minerales presentan un fenómeno de extinción consistente en el oscurecimiento del cristal mediante una sombra que le recorre. Se trata de una extinción ondulante.

1.6 Propiedades químicas y composición

El conocimiento de las propiedades químicas de los minerales constituye un paso importante para su determinación. Algunas de las propiedades o características químicas, como por ejemplo la solubilidad, son básicas para la realización del Análisis Químico. (Burriel, Lucena, 2000)

El hecho de que una sustancia sea soluble en agua nos da una idea de su constitución y del tipo de enlaces existentes en la estructura. Muchas sales necesitan la acción de los ácidos para disolverse, e incluso puede ser necesaria además la acción de oxidantes para conseguir disolver la sustancia. El agua regia es una mezcla, en la proporción 3:1, de Ácido Clorhídrico y de Ácido Nítrico, que actúa como ácido, como oxidante y como suministrador de ligandos Cl, para la formación de complejos. La acción combinada de estos tres efectos permite disolver, no sólo al oro, sino también numerosos sulfuros de metales nobles. En el caso de los silicatos, sólo se conseguirá una perfecta disolución mediante el Ácido Fluorhídrico (FH), ya que sólo el flúor forma enlaces más fuertes con el silicio que el oxígeno.

También son importantes las reacciones que se pueden manifestar cuando se somete una sustancia a calentamiento. Esto es particularmente importante en el caso de sustancias que contienen volátiles o entidades capaces de generarlos. Estos volátiles pueden ser anhídrido carbónico (procedente de carbonatos), agua, halógenos, mercurio, etc.

El estudio cuidadoso de los procesos de deshidratación es importante, no sólo para averiguar la cantidad de agua retenida en una sustancia, sino que constituye un dato decisivo en el estudio estructural, ya que no basta con conocer cuánto agua contiene, sino que también hay que saber cómo se encuentra.

En las sustancias, el agua puede encontrarse de tres formas:

- **Agua de interposición:** No forma parte de la sustancia propiamente dicha, sino que se encuentra incluida en el interior de los cristales, sin integrarse en la estructura. Mediante un ligero calentamiento esta agua se vaporiza y tiende a salir al exterior rompiendo las paredes cristalinas, dando lugar a la decrepitación. Este tipo de agua suele estar contenido en la halita y por ello decrepita cuando se calienta.

- **Agua de cristalización:** Es habitual en compuestos que cristalizan en medio acuoso y forma parte de la estructura, influyendo decisivamente en ellas. Por ejemplo, la anhidrita es rómbica, mientras que el yeso es monoclinico y la única diferencia entre ellos son las dos moléculas de agua con que cristaliza el yeso.

El agua de cristalización puede encontrarse de diversas maneras en la red cristalina. En la mirabilita o Sal de Glauber, un calentamiento a 100 °C provoca la pérdida simultánea de las 10 moléculas de agua, lo cual quiere decir que todas ellas se encuentran en posiciones estructurales muy similares. Sin embargo, en la melanterita, el calentamiento provoca el desprendimiento de 6 moléculas de agua, en primer lugar y posteriormente, a 300 °C, se desprende la séptima, queriendo ello decir que no todas ellas se encuentran igualmente retenidas por la estructura.

La pérdida de agua de cristalización suele ocurrir a temperaturas bajas, incluso hay numerosas sustancias, como por ejemplo la epsomita, que pierden una parte de sus moléculas de agua de cristalización a temperatura ambiente, si la atmósfera se encuentra suficientemente seca. Se dice que esta sustancia es eflorescente.

La pérdida de agua de cristalización puede ser irreversible si el calentamiento ha sido muy elevado.

La heulandita pierde agua cuando se calienta en forma progresiva, como puede observarse a través de la variación gradual en sus propiedades ópticas, cuando se deja enfriar se produce también una recuperación gradual del agua. Pero cuando el calentamiento se realiza por encima de 150°C no se produce la recuperación del agua al enfriar. (Burriel, Lucena, 2000)

- **Agua de constitución:** Las moléculas de agua no existen individualmente en el compuesto, sino que se forman durante el calentamiento. Para desprender el agua de constitución se necesitan temperaturas muy elevadas y además se trata de procesos irreversibles. Este tipo de agua se encuentra en numerosos filosilicatos, como el talco.

En la práctica no es fácil distinguir entre un agua de cristalización y un agua de constitución.

La deshidratación no es el único proceso que puede observarse durante el calentamiento de sustancias minerales, ya que también pueden darse los siguientes:

- **Oxidaciones:** Ocurren cuando están presentes elementos que pueden poseer más de una valencia o estados de oxidación (Fe, Mn, Cr, S,...).
- **Disociaciones térmicas:** Las más conocidas son las que dan los carbonatos, por el desprendimiento de anhídrido carbónico.
- **Recristalizaciones:** Pueden ser de diversos tipos, como por ejemplo, el paso de ópalo a cuarzo. También se incluyen los cambios estructurales en una sustancia.
- **Reacciones en estado sólido:** Si la muestra es un carbonato y contiene impurezas de sílice, se pueden formar silicatos.

En los dos últimos casos es necesario el uso de técnicas como la difracción de Rayos X o el Análisis Térmico Diferencial (ATD), para detectar los procesos.

El estudio de la composición y la estructura de los minerales constituyen la base de su conocimiento, ya que ello condiciona las restantes características.

Tradicionalmente, el estudio químico de los minerales ha seguido dos vías:

A.- Análisis químico

Permite conocer la composición de la sustancia mineral. El análisis químico presenta dos etapas. En primer lugar se realiza el **análisis cualitativo** que sirve para determinar cuáles son los elementos y entidades presentes en la muestra. Posteriormente conviene realizar el **análisis cuantitativo** para determinar el contenido exacto de cada elemento o entidad. El resultado de este estudio permite obtener la fórmula química de la sustancia que forma el mineral. Es importante señalar que los caracteres analíticos no corresponden al conjunto de las entidades que forman la sustancia, sino a cada una de ellas por separado. Por ejemplo, el anión cloruro presenta las mismas características analíticas independientemente de la sustancia en que se encuentre (salvo interferencias), pero los distintos minerales que contienen cloruros no deben presentar más caracteres analíticos comunes.



La química analítica es una rama de la química que comprende los métodos empleados para determinar los componentes de una sustancia, su relación de composición, sus propiedades químicas y su comportamiento químico frente a otras sustancias. La química analítica se divide en: Química Analítica Cuantitativa y Química Analítica Cualitativa. (Burriel, Lucena, 2000)

La Química Analítica Cualitativa estudia los medios para poder identificar los componentes químicos de una muestra tomando como base a teorías, leyes aplicables y procedimientos para la disolución, precipitación, reacciones etc.

La Química Analítica Cuantitativa, mediante la aplicación de técnicas analíticas cuantitativas, determina la composición de las sustancias, identificadas por técnicas de análisis cualitativos. (Burriel, F., Arribas, S., Lucena, F., Hernández, J., 2000)

B.- Estudio estructural

Permite conocer la disposición espacial de los elementos y entidades que forman el mineral. Al contrario que en el apartado anterior, los caracteres estructurales están asociados al conjunto completo de entidades que forman la sustancia. Por ejemplo, dos cloruros metálicos distintos no tienen por qué presentar ninguna similitud estructural.

Aunque estas vías parecen independientes, la realidad es que los datos obtenidos en ambos casos son complementarios y sólo juntos pueden suministrar una idea de la verdadera naturaleza del mineral y, en general, de cualquier sustancia química.

Es necesario saber relacionar las características físicas de los minerales con su naturaleza química, ya que si bien las primeras dependen de esta, a su vez pueden llegar a convertirse en un medio para su estudio y conocimiento.

El Análisis Químico Cualitativo o Análisis Cualitativo permite conocer los elementos o las entidades iónicas presentes en una sustancia. Esta etapa del análisis es necesaria para realizar la determinación cuantitativa correcta.

Para realizar un Análisis Químico de cualquier sustancia sólida, es conveniente conocer algunas de las características físicas que nos pueden orientar sobre su naturaleza. Esto puede abreviar considerablemente una serie de ensayos en el laboratorio. (Burriel, F., Arribas, S., Lucena, F., Hernández, J., 2000)

Dependiendo de la naturaleza de la muestra y de los datos que se tienen sobre ella, hay varias formas de realizar un Análisis Cualitativo:

A. Cuando se intuye o percibe la composición de una sustancia, se puede recurrir directamente a los ensayos específicos para las probables entidades. Hay que tener en cuenta que si dos o más entidades pueden tener comportamientos químicos parecidos ante un determinado ensayo (se interfieren), hay que separarlos antes del análisis propiamente dicho.

B. Cuando se tienen grandes dudas sobre la composición o se ignora totalmente, hay dos posibilidades:

- ✓ Realizar una serie de **ensayos de tipo general**, tanto por *vía seca*, como por *vía húmeda* y deducir, a partir de ellos, los elementos probables. Posteriormente se van realizando los ensayos específicos de tales elementos.
- ✓ Realizar **marchas sistemáticas analíticas** por *vía húmeda* que permitan separar en grupos todas las posibles entidades y comprobar, en cada uno de esos grupos, la presencia o no de los componentes correspondientes. Existen marchas analíticas para cationes (la de los sulfuros, la del hidróxido de amonio, la del hidróxido de sodio, la del carbonato de amonio y la de los carbonatos) y también reacciones de identificación de aniones. La realización de *marchas analíticas* requiere más trabajo y mejores medios que la opción anterior.

Una de las ventajas de las *marchas analíticas* es que se evitan las interferencias, pero deben ser realizadas con gran cuidado para que cada elemento o grupo de cationes aparezca según corresponda y no se pierda en otros, ya que sería difícil detectarlos.

En Mineralogía, el esquema de trabajo más generalizado es el que se detalla a continuación: Aplicando ensayos por *vía seca* y ensayos por *vía húmeda*

Se incluyen en este apartado una serie de ensayos que se realizan por la acción más o menos directa del fuego (ensayos *piragnósticos*).

Estos ensayos son orientativos, ya que no todos los minerales responden necesariamente a todos ellos.

Ensayos por vía seca (Burriel, F., Arribas, S., Lucena, F., Hernández, J., 2000)

- **Ensayos a la llama**

Las sales de ciertos cationes (alcalinos, alcalino-térreos, metales de transición) y de ciertos aniones (halogenuros, etc.) dan coloraciones características cuando se colocan a la llama de un mechero de gas. Otras sales dan luminiscencia a la llama. Los nitratos y los cloratos deflagran (avivan la llama al desprenderse oxígeno). Los sulfuros y los halogenuros decrepitan (estallan en pequeños trozos emitiendo sonidos). Otros minerales llegan a fundirse.

El uso de la llama para observar el color emitido por algunos elementos es, en ciertos casos, muy orientativo.

El método consiste en mezclar el mineral pulverizado con unas gotas de ácido clorhídrico y formar una pasta que se toma con un alambre de platino (o de nicrom, aleación de níquel y cromo) y se coloca a la llama oxidante de un mechero de gas. Si se observa algún color característico, puede indicar la presencia de determinados elementos. Hay que decir que este ensayo, al igual que otros de la vía seca es sólo orientativo y muchos elementos no dan nunca colores característicos y otros necesitan mucha concentración para ser observados.

- **Ensayos en tubo cerrado**

Se realizan colocando el mineral en el fondo de un tubo de vidrio que se somete a un intenso calentamiento. Como consecuencia pueden observarse cambios de color, fusiones, decrepitaciones, desprendimiento de agua (que condensa luego en las paredes más frías del tubo) o desprendimiento de otros gases con olores y colores característicos.

Son muy interesantes los sublimados que pueden aparecer en las paredes del tubo y que se relacionan con elementos tales como azufre, arsénico, antimonio o mercurio.

Una vez terminado el calentamiento, es conveniente comprobar si el residuo que permanece en el fondo del tubo es magnético, sobre todo si sospechamos la presencia de elementos tales como hierro, cobalto, níquel o titanio.

También puede realizarse el mismo ensayo mezclando previamente el mineral con algún fundente, como el bisulfato potásico (previamente seco) que ayuda a descomponerse a ciertos sulfuros.

- **Ensayos en tubo abierto**

Se emplea un tubo acodado y abierto por ambos lados. Se coloca el mineral pulverizado en el mismo codo y se calienta dejando una rama casi horizontal, mientras que la otra permanece inclinada, a modo de chimenea. Con ello se favorece el paso de aire por el mineral caliente (al contrario de lo que ocurre en el tubo cerrado).

Las reacciones que tienen lugar son, en muchos casos, similares a las que se dan en tubo cerrado, pero en otros casos, el aporte de oxígeno da lugar a procesos de oxidación que conducen a diferentes resultados. Por ejemplo, un mineral ferroso pasa a magnetita en tubo cerrado, mientras que en tubo abierto pasa a hematite. Es conveniente observar también el proceso de enfriamiento, ya que puede haber reacciones reversibles.

- **Ensayos a la perla**

Los ensayos a la perla se suelen realizar mezclando el mineral pulverizado, bien con bórax o bien con otras sales. El fundamento de estos ensayos se encuentra en la formación, por medio del calor, de sales más o menos complejas, en las que se integran los cationes de los minerales, dando lugar a coloraciones características. Al igual que los demás ensayos de vía seca no todos los elementos dan coloraciones. El ensayo a la perla se puede realizar con hilos (idealmente de platino) o sobre soportes de escayola. El tipo de llama empleado influye, ya que se verifican procesos de oxidación-reducción.

La llama del mechero ha de ser siempre reductora, pero según se use el soplete se obtendrá un dardo oxidante o reductor y los colores de las perlas pueden ser diferentes en cada caso.

También puede ocurrir que los colores de las perlas, una vez formadas, evolucionen a medida que se van enfriando y por ello conviene observarlas en caliente y en frío.

- **Ensayos sobre carbón**

Se trata de uno de los ensayos más clásicos de la Mineralogía y requiere una especial destreza por parte del operador. Se considera que este ensayo es orientativo sobre la presencia de determinados elementos, en su mayoría metales de transición

y semimetales tales como arsénico, antimonio, bismuto, selenio y telurio. Sin embargo, otros elementos no presentan comportamiento característico.

El ensayo puede realizarse calentando el mineral sólo sobre el carbón o mezclado con ciertos reactivos, como yoduro potásico, cromato potásico, carbonato sódico, azufre, etc. Es importante observar el residuo obtenido como consecuencia de la reducción efectuada por el carbón y también el aspecto de la aureola que rodea al residuo.

Modernamente se realiza este ensayo usando un soporte de escayola y mezclando el mineral con carbón.

Ensayos por vía húmeda (David Harvey, 2002)

Son los ensayos realizados sobre las disoluciones procedentes del tratamiento del mineral con disolventes, ya sean ácidos o básicos. En ocasiones, es necesario realizar una disgregación en crisoles con la ayuda de fundentes.

En las disoluciones del mineral, junto a sus componentes en forma iónica, aparecen los correspondientes a las sustancias que han intervenido en el proceso de solubilización.

Esto hay que tenerlo en cuenta a la hora de realizar los análisis.

Para encontrar los iones presentes en la disolución, hay dos opciones:

A. Realizar marchas analíticas. Esta opción se adopta en muy contadas ocasiones.

B. Realizar una serie de ensayos generales, tanto para cationes, como para aniones, consistentes en hacer reaccionar pequeñas porciones de la disolución con los reactivos siguientes: HCl 5M, H₂SO₄ 5N, NaOH 5M, NH₄OH 5M, Na₂CO₃ al 20%, (NH₄)₂CO₃ 3M, K₄[Fe(CN)₆] 0,5M, BaCl₂ 0,5M, AgNO₃ 0.1M, Na₂S 0,5M, KCN 0,5M, H₂O₂ 3%, KI 0,5N

El uso de cada uno de estos reactivos debe estar condicionado por el tipo de disolvente que se haya usado para tratar al mineral. Por ejemplo, si el mineral se ha disuelto en ácido clorhídrico (HCl), no se debe añadir nitrato de plata, pues aparece un precipitado blanco de cloruro de plata (AgCl) causado por los cloruros del citado ácido. Por supuesto, tampoco debe añadirse el propio ácido clorhídrico como reactivo general.

Después del uso de los reactivos generales quedarán descartados un buen número de iones y sólo de unos pocos iones será probable su presencia. Para terminar de concretar se recurre a los reactivos específicos de cada una de las entidades.

Una vez encontrada la composición química cualitativa, puede determinarse la mineralogía de la muestra objeto de estudio mediante sus propiedades físicas. Sin embargo, ello no es siempre posible y hay que llegar a conocer la composición cuantitativa para conocer la fórmula. Pero incluso, conociendo la composición química o la fórmula, no siempre se identifica la especie por completo (esto ocurre fundamentalmente en los silicatos) y hay que determinar la estructura.

La aplicación del análisis químico cualitativo no puede ser suficiente para reconocer el mineral, entonces es necesario aplicar el análisis químico cuantitativo, y se debe profundizar más en el estudio. El Análisis Cuantitativo de una sustancia permite obtener su fórmula química. (Judith F. Rubinson, Kenneth A. Rubinson, 2000)

Para realizar el Análisis Cuantitativo de sustancias minerales, o inorgánicas en general, deben tenerse en cuenta una serie de consideraciones:

1.- Es importante realizar una **buena toma de muestra**. Para realizar un *Análisis Cualitativo* basta con tomar una porción del material a estudiar para detectar los elementos o entidades que contiene.

Cuando se va a realizar un estudio cuantitativo, la muestra ha de ser representativa y su composición debe ser muy próxima a cualquiera de las diversas porciones que se podrían formar.

Para ello, siempre que se pueda, debe homogeneizarse el material del que se va a tomar la muestra y proceder a sucesivos cuarteos, previa molienda si fuese necesario.

Si la cantidad de muestra es muy pequeña y se puede emplear íntegramente para el análisis, no son necesarias las consideraciones anteriores.

2.- Se debe fijar un nivel de detección o contenido mínimo que se quiere cuantificar, pues ello va a condicionar el método (o los métodos) a emplear. Si la diferencia de contenidos entre todos los elementos a determinar es muy grande, probablemente haya que recurrir a más de un método o a realizar varias preparaciones.

Hay que tener en cuenta que los métodos clásicos suelen tener límites de detección más altos que los llamados instrumentales; pero el uso de estos últimos suele ser más caro y a veces, innecesario.

Por otro lado, no siempre se puede escoger el método a emplear, más bien será necesario ceñirse a los medios disponibles en cada momento.

3.- La preparación de la muestra para el análisis es una etapa decisiva para la obtención de un resultado adecuado. La pesada debe realizarse con sumo cuidado ya que es imprescindible para los cálculos posteriores al análisis. Si la muestra tuviera humedad, debe secarse antes de la pesada. Es conveniente condicionar el peso de la muestra al tipo de método que se va a emplear y al contenido previsible de las entidades objeto de análisis.

Hoy en día hay una gran cantidad de Métodos Analíticos para aplicar a las diversas muestras problema inorgánicas, entre estos tenemos:

A. Métodos Clásicos

- Métodos Gravimétricos
- Métodos Volumétricos

B. Métodos Instrumentales o Físico-Químicos

- Métodos Ópticos
- Métodos Eléctricos
- Métodos Térmicos
- Métodos Mecánicos
- Otros Métodos

CAPITULO II MINERALOGÍA QUÍMICA

La composición química es la propiedad más importante para identificar los minerales y para distinguirlos entre sí. El análisis de los minerales se realiza con arreglo a unos métodos normalizados de análisis químico cuantitativo y cualitativo. Los minerales se clasifican sobre la base de su composición química y la simetría de sus cristales. Sus componentes químicos pueden determinarse también por medio de análisis realizados con haces de electrones.

2. Identificación de la composición química de los minerales

2.1 Análisis químico cualitativo

2.1.1 Toma de muestra

La muestra debe ser representativa del sistema que se quiere estudiar, esto significa que la cantidad de muestra a analizar debe representar la composición total de aquello que se investiga y además deben mantenerse las proporciones de los distintos componentes que la integran. Para obtener una muestra representativa es necesario tener en cuenta dos aspectos:

- a) Tomar muestras que no presenten signos de alteración, contaminación, ni que estén expuestas a la meteorización, a menos que el objeto de estudio sean precisamente la alteración o la contaminación.
- b) El tamaño de las muestras debe ser el apropiado como para representar completamente al sistema en estudio. Así, si la roca es homogénea, no es necesario más que una del tamaño de un puño de una mano.

Pero, si la muestra es heterogénea (cuyo extremo lo representan las pegmatitas) será necesario extraer un mayor volumen a fin de que todos los minerales queden incluidos.

En general al efectuar el muestreo se deben tener en cuenta 4 aspectos: naturaleza del material, método de toma de muestra, tamaño y cantidad de especímenes, precauciones especiales.

- **Naturaleza del material.** Cada tipo de muestra se obtendrá de un modo particular de acuerdo a su naturaleza. Del mismo modo se envasará y procesará según sus características. Para este caso en particular sólo nos referiremos a



muestras sólidas, entre ellas a las rocas, pudiendo ser éstas mono o poliminerales. Se Excluye los sedimentos y suelos

- **Modo de tomar la muestra.** De acuerdo al tipo de material que va a ser muestreado se adoptará la forma más adecuada. Así para muestras sólidas, y en caso particular rocas, se utilizan mazas y piquetas. Se obtiene un volumen importante al cual se le quita todo el material alterado o que sea susceptible de meteorizarse, dejando un núcleo fresco; siempre considerando el tamaño de acuerdo a sus características.

- **Tamaño y cantidad de ensayos por muestra**

El tamaño de la muestra a tomar dependerá de la homogeneidad o heterogeneidad del material. En el caso de muestrear rocas de composición prácticamente monomineral, tales como mármoles, cuarcitas, concentrados minerales, rocas de grano fino, se requerirá una cantidad menor de material para obtener una muestra representativa que la que se necesitará en los casos de gran variabilidad composicional, tamaño de grano (por ejemplo pegmatitas), sedimentitas con variación composicional en capas, etc. Como guía general podemos dar algunos valores más o menos aceptados:

0,5-1 Kg para rocas de grano fino (menor a 0,1 cm) y equigranulares.

1-2 Kg para rocas de grano medio (entre 0,1 cm y 1cm).

2-4 Kg para rocas de grano grueso, porfíricas (entre 3 y 5 cm).

6 Kg a mas para rocas con tamaño de grano similar al anterior pero, en parte, pegmatíticas. (B. Mason, 1960)

El número de ensayos a realizar, cualquiera sea su naturaleza, dependerá del tipo de trabajo programado, del área a cubrir, del grado de detalle requerido, etc. En general cuando sea necesario procesar un gran número de muestras se sacrificarán exactitud y precisión de los análisis. El área a muestrear siempre debe ser previamente estudiada desde el punto de vista geológico a través de imágenes satelitales, aerofotografías, antecedentes bibliográficos, etc., debiendo tener mucho conocimiento de los distintos tipos litológicos, contactos, diferenciaciones, tipos de exposición (con o sin cobertura vegetal), presencia de suelos desarrollados en distinto grado, grados y tipos de

alteración, etc. Podemos considerar 2 casos: de un único tipo litológico, o el de varios tipos litológicos. En el primer caso, por ejemplo un Plutón granítico, se hacen perfiles transversales y/o longitudinales, se eligen los lugares de muestreo comenzando con los contactos (zona de contaminación con roca de caja) y luego se puede hacer un muestreo sistemático o al azar. Si la exposición es buena se puede muestrear cada tantos metros (se marcan los lugares de muestreo) en forma sistemática o sobre una grilla. Si el muestreo es al azar se puede proceder de igual modo pero tomando sólo algunas de las muestras. Se pueden usar tablas de números al azar. En el segundo caso, como por ejemplo en perfiles estratificados, debe indicarse como están ubicados los estratos. El muestreo de los mismos será sistemático o al azar. Como regla general debe recordarse que a mayor homogeneidad y menor tamaño de grano, menor cantidad de muestras. (L.G. Berry, B. Mason)

- **Precauciones importantes**

Es fundamental que las muestras sólidas sean frescas, es decir, hay que evitar las superficies meteorizadas. Las muestras se toman en bloques grandes de manera de poder desechar la parte superficial. Los mayores inconvenientes se presentan con la oxidación superficial de Fe^{2+} a Fe^{3+} y con la alteración de minerales por hidratación o hidrólisis. La selección del tipo de envasado de las distintas muestras no debe considerarse como un tema menor, ya que de ello depende el resultado final del trabajo o estudio. Cada una de ellas debe colocarse en bolsas de lona o plástico de alta resistencia, con identificación dentro y fuera de las mismas. La nomenclatura utilizada debe indicar localidad, número de muestra y fecha de toma de la misma, por ejemplo: CG- 15/06/18, que significa Cerro Grande, muestra 15, campaña junio de 2018.

2.1.2 Tratamiento de la muestra

Considerando la dureza del material se seguirán todos o algunos de los siguientes pasos:

- a. Trituración
- b. Cuarteo
- c. Porfirización o pulverización

- d. Cuarteo
- e. Tamizado
- f. Mezclado

El material debe estar limpio, sin rastros de suelo, ya que, podría alterar el valor real de la relación inicial calculada y así conducir a conclusiones erróneas. Por ello el trozo de roca se lava con cepillo, se enjuaga y seca. Luego con una maza se rompe en tres fracciones: una destinada a cortes delgados, otra a análisis químicos y la tercera para guardar en archivo, ya que muchas veces, con posterioridad se requieren otros análisis. Para poder llevar a cabo el análisis químico es necesario que el material sea un polvo fino, impalpable. Si la roca es dura debe ser sometida a los siguientes pasos:

1. Se hace pasar por una máquina trituradora (chancadora) a mandíbulas, de acero templado de gran dureza, que permite obtener fracciones tamaño grava aproximadamente (menores a 1cm), que se recoge en un cajón donde hay una bolsa de nylon sin usar para evitar la contaminación con las muestras pasadas con anterioridad. Ambas mandíbulas deben limpiarse con alcohol entre muestra y muestra y deben secarse perfectamente. También pueden utilizarse para este paso prensas hidráulicas.
2. El material obtenido en (1) se homogeniza y cuartea para reducir el volumen de material.
3. Posteriormente se procede a moler o pulverizar uno de esos cuartos en un molino de vidia (carburo de tungsteno (WC)) construido con esa aleación que es más dura aún que los minerales que forman la muestra. Este tipo de material, dada su gran dureza, evita la contaminación por ruptura del mismo y asegura la correcta molienda. Se muele hasta la malla deseada. Es muy importante evitar la oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} ya que al moler se produce un aumento de la superficie específica y un aumento de la T° por rozamiento. Hay que proceder rápidamente y dejar enfriar el instrumental en caso de calentamiento.

En el caso de que se desee determinar W y/o Co se debe efectuar la molienda de otro cuarto en un molino de Fe. Cuando la roca no es tan dura se puede realizar la molienda en morteros. Los hay de diferentes materiales: ágata (SiO_2 , variedad de la



calcedonia), mullita $\{Al_6[O_5(SiO_4)_2]\}$, de dureza 6-7, o sillimanita ($Al_2O[SiO_4]$) cuya dureza es $6 \frac{1}{2} - 7 \frac{1}{2}$. Para evitar la contaminación no deben utilizarse morteros de porcelana a menos que se realice un análisis de RAI (Residuo Ácido Insoluble) o se muele muestra para hacer DRX (Difracción de Rayos X) y nunca se debe usar mortero de vidrio. En el caso de que el material sea blando se puede saltar el paso de la chancadora y llevar la muestra cuarteada directamente al molino ya que con golpes de piqueta se puede triturar. En casos de blandura extrema (talco) simplemente utilizando morteros de ágata o aún de cerámica se puede alcanzar el tamaño de grano deseado. (L.G. Berry, B. Mason, 1992)

4. A continuación se vuelve a homogeneizar y cuartear, con el objetivo de obtener un volumen adecuado de material representativo de la muestra original.

5. En la etapa de tamización se utilizan tamices del tipo de los usados para sedimentos:

Tamaño de tamiz (en Ø): 500, 300, 150, 75, 45, 35, 25.

Tamiz N° (malla): 30, 50, 100, 200, 325, 400, 600.

Para análisis de elementos mayoritarios y minoritarios se utiliza la fracción 75/200. Para análisis de elementos vestigio se utiliza la fracción 45/325. Las micas presentan problemas tanto en la molienda como en el tamizado debido a su hábito laminar.

6. Por último, antes de pesar el material que va a ser analizado, se debe mezclar a fin de volver a homogeneizar y así evitar que los minerales más densos que pudieran haberse depositado en el fondo del envase luego de un tiempo de guardados se descarten accidentalmente y la muestra deje de ser representativa del sistema.

2.1.3 Ensayos preliminares

En el caso de realizar análisis químicos por vía húmeda, si la muestra problema es desconocida, se deben efectuar ensayos cualitativos para determinar la naturaleza de la misma y previamente deben definirse las condiciones de solubilidad. Para eso se utiliza, en primer lugar, agua destilada, bidestilada, nanopura o desionizada fría. Si la muestra continúa sin poder ser solubilizada, se prueba con agua caliente, luego con ácidos o bases débiles, fuertes, agua regia. Si todavía no se disuelve se recurre a la utilización de disgregantes, que son sustancias sólidas que se agregan a la

muestra seca de tal modo que la mezcla de ambos tenga una temperatura de fusión inferior a la de las especies individuales, por lo que llevada la mezcla a un horno, a una temperatura adecuada, se produce la fusión y se obtiene una perla que luego se disuelve en medio ácido y en esas condiciones se prosigue con el análisis.

- En agua se disuelven las evaporitas.
- En HCl (1:3), no oxidante, los carbonatos en general, yeso, apatita, monacita, galena, blenda, ilmenita, olivina, anortita.
- En HNO₃ (1:3), oxidante: sulfuros con exclusión de HgS, y metales como Ag⁰, Hg⁰, Cu⁰.
- En agua regia (3 HCl: 1 HNO₃, medio oxidante): HgS y metales preciosos como Au⁰ y Pt⁰.
- La casiterita se descompone en KOH e NaOH;
- El rutilo se disuelve en H₂SO₄ y álcalis; todas las formas de Al₂O₃ (hidratadas y deshidratadas) se disuelven en álcalis; la celestina se disuelve en H₂SO₄ diluido y la anglesita en sales de amonio.
- Los silicatos se atacan con HF o con mezcla de HF – HClO₄, muchas veces previo agregado de HNO₃ para oxidar el Fe²⁺ a Fe³⁺.
- Los disgregantes más utilizados son los alcalinos, como por ejemplo, Na₂CO₃ y Li₂B₄O₇. Estos disuelven silicatos como el zircón (ZrSiO₄) y la sílice.

Las técnicas de análisis geoquímicos tienen por objeto hallar la composición química de los materiales, ya sea de forma directa sobre la propia muestra, o mediante ensayos con reactivos (vía húmeda).

Los resultados de los análisis se dan en forma de óxidos únicamente para los elementos mayoritarios y minoritarios, tales como SiO₂, Al₂O₃, MnO, CaO, P₂O₅, etc. o expresados en ppm como elementos, o como cationes y aniones para elementos vestigios o que se encuentren en ese material en bajas concentraciones (SO₄²⁻, Na⁺, etc). Estos resultados permiten trazar gráficas y diagramas de gran valor para deducir mecanismos de formación y procedencia de materiales. Primeramente se realizan ensayos destinados a adquirir una primera aproximación



al quimismo de la muestra. Estos son muy sencillos, expeditivos y económicos. Uno muy común es el ensayo al soplete para identificar los cationes del 4° y 5° grupo. Para ello expondremos a la llama de un mechero (Bunsen o Mecker) ya sean soluciones acuosas o muestras sólidas de estos elementos. Para la pureza de la llama se emplea un hilo de platino, engarzado en un trozo de varilla maciza de vidrio o metal como soporte. Por ejemplo, si se impregna la punta de una varilla con una gota de disolución de Ca^{2+} , el color observado es rojo ladrillo. Estas llamas coloreadas proporcionan una vía de ensayo cualitativo muy adecuada para detectar estos elementos en mezclas y compuestos puros. Esto es debido a que la energía, en forma de calor, suministrada por una llama excita fuertemente a los átomos que componen la muestra. Los electrones de éstos saltarán a niveles superiores desde los niveles inferiores pero no permanecerán mucho tiempo en ese estado excitado y al volver al estado fundamental emitirán energía en forma de luz, que será característica de cada elemento. Es lo que se denomina espectro de emisión atómica. Colores característicos de algunos elementos químicos: Sodio: amarillo naranja (como las luces del alumbrado público) Potasio: Violeta, Calcio: rojo ladrillo, Estroncio: rojo carmín bario: verde, Litio: rojo escarlata, Cobre: azul verdoso. La llama de un mechero con una buena regulación tiene 2 conos: interno, externo y la zona interconal. (L.G. Berry, B. Mason, 1992)

2.2 Análisis químico cuantitativo

El conocimiento de la composición química cualitativa puede no ser suficiente para reconocer el mineral y se debe profundizar más en el estudio.

El Análisis Químico cuantitativo de una sustancia permite obtener su composición cuantificada, con indicadores de concentración tales como: porcentaje, Mol/L, g/L, ppm, ppb, mg/L, etc.

Para realizar el Análisis Cuantitativo de sustancias minerales, o inorgánicas en general, deben tenerse en cuenta una serie de consideraciones:

1.- Es importante realizar una buena toma de muestra. Para realizar un Análisis Cualitativo basta con tomar una porción del material a estudiar para detectar los elementos o entidades que contiene. Cuando se va a realizar un estudio cuantitativo,

la muestra ha de ser representativa y su composición debe ser muy próxima a cualquiera de las diversas porciones que se podrían formar. Para ello, siempre que se pueda, debe homogeneizarse el material del que se va a tomar la muestra y proceder a sucesivos cuarteos, previa molienda si fuese necesario.

Si la cantidad de muestra es muy pequeña y se puede emplear íntegramente para el análisis, no son necesarias las consideraciones anteriores.

2.- Hay que fijar un nivel de detección o contenido mínimo que se quiere cuantificar, pues ello va a condicionar el método (o los métodos) a emplear. Si la diferencia de contenidos entre todos los elementos a determinar es muy grande, probablemente haya que recurrir a más de un método o a realizar varias preparaciones.

Hay que tener en cuenta que los métodos clásicos suelen tener límites de detección más altos que los llamados instrumentales, pero el uso de estos últimos suele ser más caro y a veces, innecesario.

Por otro lado, no siempre se puede escoger el método a emplear, más bien será necesario ceñirse a los medios disponibles en cada momento.

3.- La preparación de la muestra para el análisis es una etapa decisiva para la obtención de un resultado adecuado. La pesada debe realizarse con sumo cuidado ya que es imprescindible para los cálculos posteriores al análisis. Si la muestra tuviera humedad, debe secarse antes de la pesada. Es conveniente condicionar el peso de la muestra al tipo de método que se va a emplear y al contenido previsible de las entidades objeto de análisis. (Burriel, Lucena, 2000)

Hoy en día existe una gran cantidad de Métodos Analíticos para aplicar a la gran cantidad de sustancias y combinaciones que se pueden encontrar. Para simplificar, se expone la siguiente clasificación:

A. Métodos Clásicos

- Métodos Gravimétricos
- Métodos Volumétricos

B. Métodos Instrumentales o Físico-Químicos

- Métodos Ópticos
- Métodos Eléctricos



- Métodos Térmicos
- Métodos Mecánicos
- Otros Métodos

La denominación de Métodos Instrumentales no es muy adecuada, aunque se conserva por motivos históricos. Algo más adecuada sería la segunda denominación.

Dado que en Análisis Mineral no se usan todos los métodos analíticos, sólo se comentarán los más aplicados en este campo.

A.1 Métodos gravimétricos:

Se realiza la determinación hallando el peso de la sustancia que se desea analizar, bien en estado puro, o bien formando algún compuesto con determinadas características estequiométricas y con una cierta estabilidad.

Las etapas a seguir en un análisis gravimétrico son:

1. Pesar la muestra (previa realización de una adecuada toma de muestra y secado si fuera necesario).
2. Disolver o disgregar. No se deben emplear como disolventes o fundentes sustancias que contengan elementos que se quieren determinar.
3. Provocar la formación de una sustancia sólida poco soluble que contenga el elemento a determinar.
4. Aislar el sólido, lavándole y secándole.
5. Realizar la pesada.
6. Realizar los cálculos. El contenido en elementos se suele dar en forma de óxidos.

Estas etapas pueden variar en algunos casos.

Dependiendo del método empleado para obtener la fase sólida, hay varios métodos gravimétricos:

A.1.1-Precipitaciones. Son los métodos más importantes y los más clásicos de los métodos gravimétricos. Mediante una reacción química se forma un precipitado con una fórmula química definida, que ya sea por sí misma o mediante alguna transformación (calcinación,...), pueda ser objeto de pesada. Como ejemplo se

puede mencionar la determinación de sulfatos con sales de bario la determinación de calcio con oxalatos, etc.

A.1.2-Electrodeposición. Puede ser considerado también como un método Instrumental Eléctrico. Se forma una fase sólida por la acción de la corriente eléctrica que provoca, mediante procesos de oxidación-reducción, la deposición de ciertas sales o metales en el ánodo o en el cátodo del sistema. De esta forma se determinan algunos metales, pero no se trata de un método de aplicación general.

A.1.3- Métodos de extracción. Se usa un disolvente que, de forma selectiva, ataca a todos los componentes de la muestra a excepción de aquel que se desea pesar. Se emplea para el análisis de aleaciones que contienen oro u otros metales nobles.

También se puede disolver selectivamente el metal que se desea analizar y a continuación separarle del solvente mediante una evaporación.

A.1.4- Métodos de volatilización, desprendimiento gaseoso y de absorción.

Se usan para determinar un componente capaz de formar una sustancia volátil en una determinada reacción. La sustancia volátil puede quedar retenida en un absorbente y quedar determinada por pesada. Por ejemplo, se determinan carbonatos mediante un ataque con ácidos y absorbiendo el anhídrido carbónico, previa eliminación de humedad con un desecante.

También puede pesarse el residuo que queda después de una volatilización. Así se determina el agua de hidratación de numerosas sustancias.

Es importante que no se pueda formar más de un compuesto volátil a la vez.

A.2 Métodos volumétricos:

Estas técnicas se basan en la medida del volumen de un reactivo empleado para llevar a cabo una reacción. Esta operación se denomina valoración o titulación. En general, los métodos volumétricos son más rápidos y tan fiables como los gravimétricos.

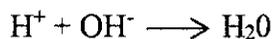
Las etapas a seguir en un análisis volumétrico son:

- 1.- Pesada de la muestra.
- 2.- Disolución o disgregación de la muestra. Enrasar a volumen conocido
- 3.- Valoración mediante la reacción adecuada y determinación del punto final.
- 4.- Realización de los cálculos.

Dependiendo de la reacción que se lleve a cabo, hay varios tipos de métodos volumétricos:

A.2.1- Neutralizaciones Acido-Base.

Se basan en la realización de reacciones de neutralización entre un ácido y una base, también llamadas protolisis:



Hay que tener en cuenta que estas reacciones se suelen llevar a cabo en medios acuosos.

Se trata de hacer reaccionar una sustancia con un ácido o con una base, de tal manera que el resultado lleve a la formación de agua. Este proceso puede ser más o menos evidente y pueden estar implicadas especies muy variadas, siempre que sean capaces de reaccionar con las especies de disociación del agua: H^+ o OH^-

El punto final de estas reacciones se puede detectar mediante cambios de color o virajes que experimentan una serie de sustancias indicadoras, sensibles a las variaciones de pH.

A.2.2- Reacciones de oxidación-reducción.

Se hace reaccionar una sustancia oxidante con otra reductora, o viceversa, siendo el fundamento de estos procesos la transferencia electrónica entre sustancias reductoras y oxidantes.

Se pueden usar estos procesos cuando un elemento pueda presentar más de un estado de oxidación con cierta estabilidad y el paso de uno a otro se puede realizar mediante reacciones sencillas. Algunos sistemas susceptibles de valorarse de esta forma son los siguientes:

A.2.3- Volumetrías de precipitación.

Se trata de hacer aparecer un precipitado o fase sólida de baja solubilidad. Realmente estos procesos no se usan mucho en el análisis de sustancias minerales, si exceptuamos algunos halogenuros que precipitan con la plata. Normalmente son procesos lentos y suelen necesitar un indicador para detectar el punto final.

A.2.4- Volumetrías de formación de complejos; (complexometrías).

Se trata de procesos relativamente modernos, dado que no resultaba fácil formar complejos ordinarios con la suficiente estabilidad y son frecuentes los equilibrios



relacionados con otras especies complejas secundarias. A todo ello hay que añadir las dificultades para encontrar indicadores adecuados.

Pero estos métodos experimentaron un auge desde 1946, cuando G. Schwarzenbach, publicó un trabajo sobre complejos organometálicos. Concretamente utilizó el Ácido Etilen Diamino Tetraacético (EDTA) y sus derivados, fundamentalmente su sal disódica, para el análisis de calcio y magnesio. (David Harvey, 2000)

Desde 1948, se fue generalizando el uso del EDTA, así como numerosas sustancias relacionadas (complexonas) para la determinación de muchos cationes metálicos que forman parte de los minerales. Hoy en día, existen innumerables métodos analíticos basados en complexometrías y que abarcan un amplio rango de posibilidades, incluidas las eliminaciones de las interferencias.

Estos procesos requieren el uso de indicadores, siendo los más utilizados: Negro de Eriocromo T, Naranja de Xilenol, Muréxida, Calcón (Ácido Calcón-carboxílico), etc.

Existen métodos para la valoración simultánea de dos o más elementos.

En todas las volumetrías es necesario normalizar las disoluciones empleadas con el uso de patrones o sustancias que pueden formar soluciones estables con suficiente pureza, se debe considerar la importancia de los indicadores, que son sustancias químicas, generalmente de naturaleza orgánica, que no intervienen de forma decisiva en el proceso, pero que, como consecuencia del mismo, experimentan cambios químicos que se reflejan en cambios de color. (David Harvey, 2000)

2.3 Métodos normalizados cualitativos, cuantitativos e instrumentales.

La validación de un método analítico es un paso fundamental para asegurar que los resultados entregados por dicho método son confiables. Cuando se realiza la validación de un método por parte del laboratorio, lo que se busca es poder determinar con fundamento estadístico que el método es adecuado para los fines previstos. En este sentido, es importante que para el proceso de validación se asigne a un responsable de realizar dicha tarea. De manera que, la validación se efectúe en forma metódica, ordenada, trazable y confiable. Es importante que el laboratorio

tenga claridad antes de iniciar la validación de cuáles son los requerimientos del método para establecer el alcance de la validación. Es esencial, entonces conocer el método a validar y su aplicabilidad, es decir, el analito, su concentración (nivel, LMP, LMR, etc.) y la matriz (o matrices) en las cuales se desea utilizar. En general, se establece que el laboratorio debe validar:

1. Métodos no normalizados: Corresponden a métodos desarrollados por el laboratorio o métodos nuevos (ejemplo: publicado en revista científica), o bien, a métodos que tradicionalmente se han utilizado en el laboratorio pero que no están normalizados. (David Harvey, 2000)

2. Método normalizado con una modificación significativa.

Cuando se trata de un método empleado tradicionalmente por el laboratorio que no esté normalizado, se puede realizar una Validación Retrospectiva, es decir, en base a los datos experimentales que el laboratorio dispone, para la cual se realizará la recopilación de la mayor cantidad de datos históricos disponibles, para luego realizar un proceso de ordenamiento y selección de los datos recopilados, estos datos pueden ser: curvas de calibración, resultados de ensayos, cartas de control, ensayos de aptitud, etc. A través de estos, se deberán determinar los parámetros de validación, y evaluar si los resultados obtenidos para los fines de la son aceptable. En caso de ser un método nuevo (o uno antiguo del que no se dispongan de datos suficientes) se debe realizar una Validación Prospectiva, generando a través de análisis datos experimentales. En algunos casos se puede realizar lo que se conoce como validación menor o verificación cuando se trate de:

- a) Métodos normalizados.
- b) Métodos normalizados usados fuera de su alcance propuesto. Ejemplo: uso en otra matriz.
- c) Ampliaciones y modificaciones menores de métodos normalizados. Ejemplo: uso en otros analitos.
- d) Cuando se trate de métodos previamente validados, que haya sufrido alguna alteración significativa por lo cual deben volver a evaluarse. Estas variaciones pueden ser; cambio de equipo, cambio de componentes de equipo como columnas,

detectores, cambio analista, cambio de la matriz que contiene la muestra o de nivel de concentración del analito de interés, entre otros.

La verificación, tiene generalmente como objetivo, el comprobar que el laboratorio domina el método de ensayo normalizado y lo utiliza correctamente, en caso de tratarse de un método normalizado modificado para la verificación se requiere solo realizar aquellas pruebas que indiquen que la variación realizada no afecta el ensayo. En ocasiones, lo que se busca a través de una validación es demostrar que un método es equivalente a otro. El objetivo de la validación y la verificación, es demostrar que el método utilizado por un laboratorio es adecuado para la aplicación en la que se propone utilizar, así, como también demostrar que las modificaciones que pudieron haberse realizado no afectan su desempeño, ni la confiabilidad de los resultados por este entregado. (Swedish National Food Administration. 2007).

2.4 Determinaciones analíticas

2.4.1 Determinación de wolframio en la wolframita [(Fe,Mn,Mg)WO₄]

Pulverizar una porción de mineral en un mortero, pesar entre 0,5 a 0.8 gramos de mineral pulverizado, colocar en una capsula de porcelana y cubrir con 25 a 30 ml de HCl concentrado. Se tapa la cápsula con un embudo y se deja hasta el día siguiente. Se calienta en baño maria sin quitar el embudo, para que el ataque se efectúa lentamente y el ácido disminuya lo menos posible. En esta forma se calienta durante 3 horas, luego se agita hasta el fondo de la cápsula con una varilla de vidrio, se lleva al Volumen primitivo con más HCl concentrado y se sigue el calentando en la misma forma unas 2 a 3 horas más, tiempo en el cual el residuo es de un color amarillo nítido. Se quita el embudo, luego se oxida con 6 a 8 gotas de HNO₃, se calienta por treinta minutos, se agrega otro volumen igual de HNO₃ y se lleva a sequedad en el baño maria. Una vez seco, se lleva a la estufa y se calienta a 120°C por 2 horas, con el objetivo de la insolubilización absoluta del ácido tungstico así como de la sílice, resultando también así la sílice menos soluble en los disolventes posteriores. Se deja enfriar la cápsula, se agrega 10 cc HCl (1:1) y se digiere á baño maria, durante 15 minutos, agitando la cápsula de vez en cuando a fin de que el HCl moje bien el contenido. Luego se añade unos 150 ml de H₂O desionizada, se agita y se deja reposar. Una vez que se ha depositado el ácido tungstico (H₂WO₄) de color

amarillo se decanta la solución á través de un filtro. La cápsula se llena de HCl al 2%, se agita y reposa nuevamente (si la solución ha pasado turbia, se vuelve a filtrar hasta que sea perfectamente límpida). La operación de lavado con HCl al 2% se hace por 3 veces, hasta que el líquido pase incoloro. La solución así obtenida, será solución (b) y contiene Fe, Mn y Ca. El residuo de la cápsula, se trata con NH_4OH 1/5 y se hierve para que el WO_3 se disuelva bien y precipiten las sales de Fe y Mn, que hayan podido quedar sin disolverse en el HCl. Se filtra entonces por el mismo filtro anterior, recogiendo en una cápsula de platino tarada. Se trata 5 veces la cápsula y el filtro con NH_3 al 2% caliente y se recoge en la cápsula de platino. Se evapora, calcina y pesa. El peso obtenido consta de ($\text{WO}_3 + \text{imp.} + \text{SiO}_2$), se trata dos veces con HF y H_2SO_4 , luego se evapora y calcina quedando como precipitado ($\text{WO}_3 + \text{impurezas}$), las impurezas se deben al hierro y manganeso que han podido ser arrastrados por el hidróxido de amonio. Conviene pues, disolver el calcinado en soda, pasándolo previamente con la piseta a un vasito para evitar que la soda ataque al platino. Se hierve unos 5' a 10' y la parte insoluble se separa por filtración, se lava con agua caliente, se calcina y pesa, restándolo del peso anterior. Obtenemos así al WO_3 puro. (A. del Valle, M.P. Niño, J., 1987)

2.4.2 Determinación de Nb y Ta en columbita (FeNb_2O_6) y Tantalita $[(\text{Fe},\text{Mg},\text{Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6]$.

Se pulveriza el mineral. Con Tantalitas se empleen 20 a 25 gr, con Columbitas 30 a 35 gr. Se funde el material durante 45' con 10 gramos de NaHSO_4 . Terminada la disgregación se hierve repetidas veces con HCl 0.1 M, se neutralizan los ácidos metálicos residuales con NH_4OH 6M y se digiere a calor suave por un día con $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ agitando constantemente. Se Filtra y lava con agua caliente para liberarse del $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ y luego con HCl caliente y diluido. Los geles se pasan lavando en cápsula de platino, se agrega poco a poco HF puro y se calienta a fuego lento. La solución conteniendo el exceso de HF se filtra.

El residuo de aspecto arenoso contiene además del azufre, un poco de Ta_2O_5 . Se vuelve a fundir, y la nueva solución fluorhídrica se agrega a la anterior, se calienta

el filtrado hasta hervir y se agrega una solución concentrada de HKF_2 poco a poco hasta que no haya más separación.

Reposando por 10 minutos se filtra el K_2TaF_7 antes que el K_2NbF_7 empiece a cristalizar, se lava con HF 0.1 M.

Se evapora la solución a la mitad se filtra y lava los cristales esperados.

Para recuperar el Ta_2O_5 que queda en la solución, se evapora a sequedad, se le agrega H_2SO_4 hasta que emita humos blancos.

Se hierve con HF 0.1M y precipita con HKF_2 como antes y se repite hasta que no haya más precipitado con HKF_2 y la cristalización es transparente, signo que no hay más Ta_2O_5 .

La primera cristalización es siempre mayor y es mejor trabajarla por separado de las otras cristalizaciones reunidas.

Los primeros cristales difícilmente están libre de Nb, Fe, Mn (el Fe y k), dificultan la separación del Ta y Nb formando con el Nb al precipitar con HF sales dobles aparentemente isomorfas con K_2TaF_7), se humean los cristales con H_2SO_4 , se neutraliza con NH_3 , se digiere con $\text{S}(\text{NH}_4)_2$, se lava con HCl 1M, se disuelve en exceso de HF diluido hasta 1/5 y precipita con HKF.

Se secan los cristales a 70°C hasta peso constante y se determina el Nb en la solución.

Trabajando con cuidado los primeros cristales pueden obtenerse libre de Nb; una recrystalización de una solución acuosa de HF es suficiente para hacer libre de Nb los cristales subsiguientes.

Debido a la estabilidad y composición constante de K_2TaF_7 , el Ta puede ser calculado indirectamente después de restar el TiO_2 , el cual ha sido determinado por vía colorimétrica que es más exacta que una separación del Ti.

Para pesar directamente se humea una parte del K_2TaF_7 con H_2SO_4 se hierve con agua hasta libre de K. y calcina al aire. (A. del Valle, M.P. Niño, J., 1987)

2.4.3 Determinación de hierro en minerales: hematites (Fe₂O₃), la magnetita (Fe²⁺Fe³⁺₂O₄), la limonita [FeO(OH)·nH₂O], la siderita (FeCO₃), la pirita (FeS₂), ilmenita (Fe²⁺Ti⁴⁺O₃). (Ray U. Brumblay)

Reactivos:

*Solución de cloruro mercúrico (HgCl₂): Se prepara solución saturada en agua caliente.

*Solución de cloruro estannoso: Disolver totalmente 50 gramos de SnCl₂·2H₂O en HCl concentrado y se diluye hasta 500 ml. Se agrega aproximadamente 5 gramos de estaño metálico para evitar la oxidación del Sn²⁺ al Sn⁴⁺.

*Agua exenta de oxígeno disuelto: Hervir agua desionizada durante aproximadamente tres minutos en un matraz, se tapa herméticamente para evitar la redisolución del oxígeno del aire y se enfría en agua helada. Esta agua se utiliza para diluir las soluciones de hierro antes de las titulaciones.

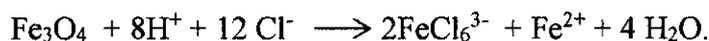
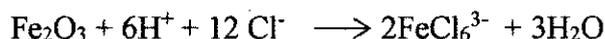
*Solución de sulfonato de difenilamina: Se disuelve 1.6 gramos de sulfonato de difenilamina de bario en 400 mL de agua. Se agrega aproximadamente 80 ml de sulfato de sodio al 6%. Se deja en reposo, el sulfato de bario precipita, se filtra y la solución se usa como indicador.

Análisis del mineral de hierro:

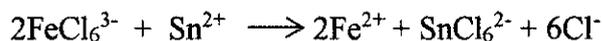
El mineral de hierro debe disolverse y el hierro se reducirá al estado ferroso, para valorarlo con una solución tipo de un agente oxidante apropiado.

Las ecuaciones para las reacciones utilizadas durante el análisis son:

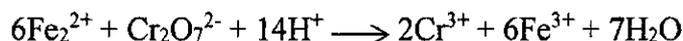
a).Disolución de los óxidos de hierro del mineral, con HCl:



b).Reducción a ion ferroso



c).Oxidación del ion ferroso en la valoración con el K₂Cr₂O₇



Procedimiento:

1. Secar el mineral en una estufa durante una hora, entre 105-110 °C
2. Pesar por triplicado entre 0,4-0,6 gramos de muestra.

3. Colocar las muestras en tres cápsulas limpias.
4. Se añaden 15 ml de HCl concentrado, se calienta lentamente. Al observar que la solución se vuelve amarilla se agrega solución de cloruro estannoso para reducir el FeCl_6^{3-} amarillo a FeCl_2 casi incoloro (no agregar más de dos gotas en exceso) del necesario. Quedará todo disuelto, cuando no se observen partículas negras o rojas o cuando ya no se vean emerger pequeñas corrientes amarillas.
5. Se transfiere toda la solución a un vaso de 600 ml que contenga 15 ml de solución saturada de cloruro mercurico, mediante lavado con agua exenta de oxígeno disuelto. Se debe formar un precipitado blanco brillante. De no formarse precipitado significa que no se agregó suficiente cantidad de cloruro estannoso para reduce todo el hierro férrico, entonces la muestra debe desecharse y preparar otra.
6. Se añade 8-10 gotas de indicador sulfonato de difenilamina.
7. Se agrega 20 ml de H_2SO_4 concentrado y 15 ml de H_3PO_4 .
8. Con agua exenta de oxígeno disuelto, se diluye hasta unos 300 ml.
9. Se valora o titula con dicromato de potasio aproximadamente 0.1N previamente valorado con hierro electrolítico.
10. Se calcula el % de hierro en el mineral mediante la ecuación:

$$\%Fe = \frac{V(K_2Cr_2O_7)(N)(meq Fe)(100)}{\text{gramos de muestra}}$$

No todos los minerales que contienen hierro son solubles en solución de HCl. Puede ser que la disolución ha sido incompleta y que se observa material de color negro en la capsula, significa que ha podido quedar hierro sin disolver. Por seguridad, para evitar pérdidas, se sigue el siguiente procedimiento:

- Se filtra el residuo en papel de filtro, recibiendo el filtrado en un matraz de 500 ml.
- Se lava con agua el papel y los sólidos sin disolver hasta que el color amarillo del FeCl_6^{3-} se elimine completamente.
- Se seca y quema lentamente el papel en un crisol.
- Se agrega aproximadamente 3 gramos de Piro sulfato de potasio en el crisol.

- Se funde lentamente.
- Se enfría el crisol y se agrega 10 ml de HCl 6M.
- Se añade el contenido del crisol al filtrado del paso 1.
- Se hierve hasta reducir el volumen hasta 50 ml.
- Se procede como en el caso anterior.

2.4.4 Determinación de calcio en piedra caliza. (Ray U. Brumblay, 1979)

Reactivos:

*Solución saturada de oxalato de amonio: Esta solución se prepara agregando 5 gramos de oxalato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ en 100 ml de agua desionizada, se agita por espacio de 30 minutos y se filtra. La solución será utilizada en el análisis y debe ser recién preparada.

*Solución diluida de oxalato de amonio $[(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}]$: Esta solución se prepara disolviendo 1 gramo de sal en 1000 mililitros, se usa para transferir el precipitado del papel de filtro hacia otro recipiente y también para hacer el primer lavado del precipitado. Para continuar con el lavado será necesario emplear una solución menos concentrada, para lo cual se toma 20 ml de esta solución y se diluye hasta 1 litro.

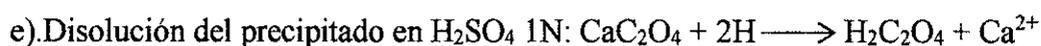
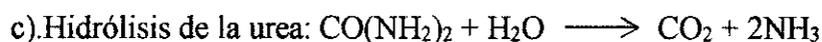
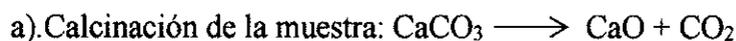
*Solución de permanganato: Disolver 3 gramos de permanganato de potasio KMnO_4 en 500 ml de agua desionizada, calentar durante 1 hora, sin llegar a la ebullición.

Esta solución se deja en reposo en la oscuridad por lo menos durante un día, luego filtrar en crisol Gooch con asbesto como medio filtrante o con un crisol con lana de vidrio. La solución se guarda en un frasco de vidrio limpio, previamente enjuagado con ácido sulfúrico.

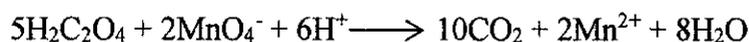
Separación y análisis del calcio: La muestra se seca, se pesa y luego se calcina para expulsar el CO_2 , el residuo se disuelve en una solución caliente de HCl. Esta solución se diluye, se añade oxalato, se agrega urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ y se deja hidrolizar, permitiendo la precipitación del oxalato de calcio (CaC_2O_4), se filtra se lava y se disuelve en H_2SO_4 1M. La solución de oxalato de calcio obtenida se valora con la solución de permanganato aproximadamente 0,1N valorada con el tipo primario oxalato de sodio ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$).



Las ecuaciones para las reacciones utilizadas durante el análisis son:



f). Valoración con permanganato:



Procedimiento

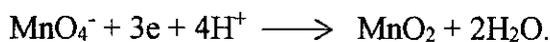
1. Secar la muestra durante una hora entre (105 a 110)°C
2. Pesar la muestra (por triplicado), los pesos oscilan entre 0,25 a 50 gramos cada una.
3. Calcinar la muestra en un crisol de platino, empezando lentamente y luego elevar la Temperatura en forma gradual hasta llegar a los 900°C, esta temperatura debe lograrse después que han transcurrido 20 minutos.
4. Enfriar y colocar los crisoles en vasos de 250 ml.
5. Agregar 10 ml de agua y 10 ml de HCl concentrado.
6. Calentar para disolver todas las sales de calcio.
7. Lavar los crisoles y sacar de los vasos.
8. Calentar a 90°C la solución de $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ al 5% y se añaden 100 ml a la solución de cada muestra tratada.
9. Agregar 2 gotas de indicador rojo de metilo.
10. Agregar 10 gramos de urea a cada muestra.
11. Calentar a ebullición hasta que el color del indicador vire al amarillo. La urea se hidroliza dando NH_3 y CO_2 . El NH_3 neutraliza lentamente al ácido, subiendo el pH de la solución.
12. Dejar decantar y filtrar primero la solución clara, y luego por transferencia a un crisol Gooch, con celulosa o lana de vidrio como medio filtrante.

13. Se pasa el precipitado al crisol empleando un frasco lavador que contenga solución diluida de oxalato de amonio diluido. Lavar el precipitado con esta disolución.
14. Lavar el precipitado con agua desionizada fría por cuatro veces.
15. Se saca el crisol Gooch, se lava exteriormente y se coloca en un vaso de 250 ml.
16. Añadir 100 ml de agua, agitar el crisol y adicionar a-7 ml de H₂SO₄ concentrado.
17. Mediante una bureta adicionar 25 ml de KMnO₄. Se obtiene un color rosado
18. Cuando empieza a decolorarse inmediatamente calentar a 60 °C.
19. Se valora añadiendo gota a gota permanganato de potasio hasta un color rosado persistente por 30 segundos a una temperatura de 60°C.
20. Se calcula el porcentaje de CaO en la muestra mediante la siguiente ecuación.
(Brumblay, 1979)

$$\%CaO = \frac{V(KMnO_4)(N)(meq Ca)(100)}{\text{gramos de muestra}}$$

2.4.5 Determinación de manganeso en la pirolusita.

El permanganato de potasio tiene la propiedad de reaccionar en soluciones neutras o ligeramente básicas, según la reacción:



Reactivos:

*Solución de permanganato de potasio valorada, considerando el cambio de tres electrones en medio neutro, para el cálculo de la normalidad.

*crema de óxido de cinc: este reactivo se prepara mezclando óxido de cinc (ZnO) y agua, justo en el momento del análisis. Se necesita 10 gramos de óxido de cinc y agua hasta formar una pasta o crema.

Análisis de la muestra

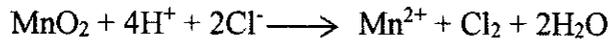
La muestra es disuelta en HCl concentrado para reducir al dióxido de manganeso a Mn²⁺. El HCl y el Cl₂ son expulsados por ebullición con ácido sulfúrico.



El excedente de ácido es neutralizado con carbonato de sodio (Na_2CO_3), luego se le agrega pasta de óxido de cinc y se valora a 95°C con solución valorada de permanganato de potasio.

Durante el análisis ocurren las siguientes reacciones:

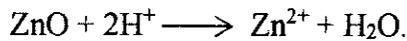
1. El MnO_2 se disuelve con el HCl concentrado ocurriendo la siguiente reacción:



2. El carbonato de sodio neutraliza al ácido sulfúrico en forma parcial:



3. El ácido sulfúrico también reacciona con el ZnO :



El objetivo de los iones cinc es la de desplazar cualquier ion manganeso que pudiera ser adsorbido sobre el MnO_2 precipitado durante la valoración.

4. Otro de los objetivos del Zn como ZnO es la de reducir la concentración del hidronio, logrando precipitar al hierro III como $\text{Fe}(\text{OH})_3$, si estuviera presente.

5. Por todo lo expuesto se entiende que la reacción ocurre casi en medio neutro



Procedimiento:

1. Secar el mineral a la temperatura entre $(105-110)^\circ\text{C}$ durante una hora
2. Pesar aproximadamente 1 gramo de muestra al 0.1 mg en un matraz Erlenmeyer de 500 ml.
3. Agregar 25 ml de HCl concentrado y se hierve a fuego lento hasta disolver totalmente, de quedar partículas insolubles, calentar hasta apariencia constante.
4. Agregar 10 ml de H_2SO_4 concentrado y hervir dentro de la campana extractora, hasta la aparición de humos blancos densos.
5. Enfriar y agregar 50 ml de agua lentamente, agitando constantemente..
6. Pasar a un matraz aforado de 500 ml.
7. Adicionar 100 ml de sulfato de cinc (ZnSO_4) al 5% en peso.
8. Agregar Na_2CO_3 poco a poco con agitación para evitar la formación de espuma en exceso. Se debe agregar lo suficiente para neutralizar todo el ácido, teniendo

cuidado de que no se forme precipitado; de ser así, agregar gotas de ácido sulfúrico concentrado hasta redisolver.

9. Añadir crema de ZnO, para precipitar al Fe³⁺ en caso de que esté presente.

10. Enfriar a T° ambiente, diluir hasta 500 ml, agitar y dejar en reposo.

11. Del matraz aforado de 500 ml extraer con pipeta, 100 ml de la solución clara y se vierten en un matraz de 500 ml.

12. Calentar a 95°C y valorar con permanganato de potasio previamente valorado. El MnO₂ que precipita perjudica la visión del cambio de color, se evita agitando vigorosamente el matraz, dejando reposar, el MnO₂ coagula, permitiendo ver el color rosado del líquido en los bordes de la superficie, donde la solución tiende a ascender por las paredes del matraz.

El punto final de la valoración se alcanza cuando aparece un visible color rosado persistente a la temperatura de ebullición durante 10 segundos.

13. Calcular el porcentaje de manganeso en la muestra considerando que se extrajo la quinta parte del volumen total que contenía a la muestra. Se emplea la siguiente ecuación:

$$\%CaO = \frac{V(KMnO_4)(N)(meq Mn)(100)}{\text{gramos de muestra}/5}$$

Los posibles errores además de los ya conocidos en las valoraciones permanganométricas, son:

* De haber sulfuros, es posible que además de HCl se deba agregar HNO₃ para asegurar una completa descomposición de la muestra.

Estos al final se volatilizan con el ácido sulfúrico.

* Cuando el MnO₂ se precipita de una disolución que contiene manganeso este ion es adsorbido considerablemente, por ese motivo se le agrega Zn²⁺ en alta concentración para desplazar al manganeso.

* Se debe evitar la presencia de iones férrico, pues este oxida al Mn²⁺, por eso se debe agregar pasta de ZnO, para que aumente el pH y precipite El Fe(OH)₃.



* Después de agregarse la pasta de ZnO, el oxígeno del aire oxidará al Mn^{2+} . Por lo tanto habiendo agregado esta pasta, se debe realizar inmediatamente el análisis.

(Ray U. Brumblay, 1979)

2.4.6 Determinación de plomo, método gravimétrico

Se determina la cantidad de plomo en un concentrado a partir del precipitado, sulfato de plomo ($PbSO_4$) El precipitado se filtra, se lava, se calcina y se pesa como $PbSO_4$ a partir del peso del precipitado se calcula el porcentaje del plomo.

El método consiste en pesar 0,5 g de muestra seca, finamente pulverizado, atacar con 10 ml de HNO_3 y 50 ml de H_2SO_4 sulfatar por 20 minutos hasta obtener una solución pastosa, enfriar, retomar con agua hasta 75 ml, hervir, luego retirar y enfriar. Filtrar en el crisol gooch y lavar con H_2SO_4 1 : 4 y agua; se calcina a $500^\circ C$ por 5 minutos, se enfría y pesa (P_1), luego disgregar con solución caliente de acetato de amonio al 20%, cuidando que no se quede precipitado alguno en el crisol. Calcinar a $500^\circ C$ por 20 minutos, enfriar y pesar (P_2) y se calcula mediante la siguiente relación :

$$\% Pb = \frac{(P_2 - P_1) \times 0,6834 \times 100}{Wm}$$

Donde :

P_2 : Peso del crisol más precipitado

P_1 : Peso del crisol vacío

Wm : Peso de la muestra

0,6834 : Factor gravimétrico

2.4.7 Determinación de cobre por método electrogravimétrico

Las diferencias de las masas del cátodo antes y después de la electrólisis es igual a la masa del cobre depositado en una muestra de concentrado de cobre.

El método consiste en : pesar 2 g de muestra de concentrado de cobre, adicionar 30 ml de HNO_3 y calentar hasta desprendimiento de vapores nitrosos, añadir 10 ml de HCl y calentar por 2 minutos, luego retirar. Añadir agua hasta un volumen de 100

ml, hervir y enfriar, filtrar en papel whatman N° 40, la solución filtrada se lleva a hervir hasta conseguir una solución pastosa.

Agregar 5 ml de H_2SO_4 y llevar a la plancha hasta eliminar vapores blancos, agregar agua hasta un volumen de 100 ml, hervir y enfriar; filtrar en papel whatman N° 40, agregar a la solución filtrada 2 ml de H_2SO_4 y llevar al equipo de electrodeposición, a la tensión de 2 v, se obtiene la densidad de corriente necesaria para que el proceso se desarrolle normalmente.

La electrólisis se prosigue hasta la decoloración total de la solución, lo que requiere de 1 hora aproximadamente; después de lo cual se comprueba la precipitación total del cobre.

Terminada la electrodeposición, lavar el cátodo con agua y alcohol, colocar en la estufa por 3 minutos y luego retirar, enfriar por 2 minutos rápidamente; sumergir por algún tiempo los electrodos en HNO_3 diluido caliente 1 : 1, retirar los electrodos de la solución, enjuagarlos con agua corriente primero y luego con agua destilada y alcohol, llevarlo a la estufa por 3 minutos y guardarlos.

$$\% Cu = \frac{(P_2 - P_1) \times 100}{W}$$

Donde :

P_1 : Peso del cátodo de la electrólisis

P_2 : Peso del cátodo después de la electrólisis

2.4.8 Determinación de Zinc por método volumétrico

Se utiliza el más importante de los complejones, el ácido etil – diamin – tetra – acético (EDTA) y su sal disódica, la que se llama complejón III, que con el zinc forma un compuesto complejo, el ensayo se aplica a un concentrado de zinc.

Estandarización del zinc metálico:

- Pesar entre 0,12 g – 0,15 g de zinc metálico (99,99%) con precisión de 0,1 mg a un matraz de 500 mL.

- Adicionar 20 mL de ácido clorhídrico 1:1 (HCl), llevar a plancha caliente hasta disolución del zinc metálico y presente estado pastoso.
- Bajar y lavar las paredes hasta aprox. 50 mL de agua.
- Adicionar aprox. 40 mL de solución amoniacal, colocar en la plancha y llevar a ebullición durante 4 min.
- Bajar y lavar las paredes del matraz hasta aprox. 300 mL de agua.
- Enfriar y adicionar 1 á 2 gotas de azul de bromotimol..
- Adicionar 25 mL de solución tampón.
- Ajustar el pH usando ácido clorhídrico 1:1 hasta decolorar la solución, ello indicara un pH de $5,3 \pm 0,5$.
- Adicionar de 1 á 2 gotas de Xilenol Orange y titular con solución de EDTA

El resultado de la titulación conlleva a determinar el valor del factor de zinc metálico o equivalente gramo de zinc por mL de solución de EDTA:

$$f = \frac{G}{V}$$

Dónde :

- f** : Factor de zinc metálico o equivalente gramo de zinc por mL de solución estándar.
- G** : Peso del zinc.
- V** : Cantidad usada de solución estándar de EDTA (gasto).

Procedimiento de la determinación de zinc en la muestra (método 01)

- Pesar para una muestra de concentrado de zinc $0,250 \text{ g} \pm 0,0002 \text{ g}$ (w)
- Pesar para una muestra de alimentación $0,500 \text{ g} \pm 0,0002 \text{ g}$ (w), vaciar con cuidado, cada una, en un vaso de precipitación de 400 mL codificado, con ayuda de la brocha destinada para este fin

- Adicionar 5 mL de ácido nítrico (HNO_3), llevar a la plancha caliente para descomponer este por calentamiento en la plancha de ataque hasta la eliminación de vapores nitrosos.
- Agregar 0,1 g de KClO_3 hasta tomar una coloración pardo rojizo.
- Adicionar 5 mL de ácido clorhídrico (HCl) y llevar hasta sequedad. Entonces retirar de la plancha y dejar enfriar.
- Adicionar 5 mL de ácido clorhídrico (HCl) q.p. y 20 ml de agua desionizada, llevar a la plancha hasta ebullición, por aprox. 3 min.
- Retirar de la plancha y lavar con agua caliente la luna de reloj y paredes del vaso
- Adicionar 10 mL de peróxido de hidrógeno (1:10), 15 mL de $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ y unos 30 mL de solución extractiva para el Zinc, con el objetivo de precipitar y posteriormente separar el fierro.
- Llevar a la plancha de calentamiento hasta hervir durante 10 minutos hasta que se forme en el vaso el “anillo de fierro”.
- Retirar de la plancha y lavar las paredes del vaso y luna de reloj con agua caliente.
- Filtrar con papel Whatman N° 4 (filtración rápida) y lavar tres veces con solución amoniacal caliente y 03 veces con agua destilada caliente.
- El tiempo de lavado debe ser entre 5 min a 7 min. En tiempo más prolongado el zinc es absorbido por el hidróxido de fierro, fenómeno de oclusión.
- Adicionar de 1 á 2 gotas de azul de bromotimol (el medio se tomará color azul violáceo).
- Calibrar el pH con solución de ácido clorhídrico 1:1 hasta que decolore la solución, ello indicara el pH aproximado de 5,3
- Adicionar 25 mL de solución tampón para amortiguar el pH calibrado
- Enfriar y adicionar 1 á 2 gotas de solución de Xilenol Orange y titular con solución de EDTA



- El punto final de viraje es un color amarillo Champagne
- Registrar el gasto (V) de solución de EDTA y proceder al cálculo

Método 02:

- pesar 0,3 g de muestra de concentrado de zinc.
- se ataca con 3 ml de H₂SO₄ 10 ml de HNO₃ y 10 ml de HCl y agua hasta 150 ml.
- adicionar 2 ml de H₂O₂ y calentar por 10 minutos.
- adicionar 45 ml de solución extractiva (solución de cloruro de amonio al 10%) y una pizca de persulfato de amonio, hervir por 15 minutos y enfriar.
- *Filtrar en papel whatman N° 40, lavar con solución extractiva 1 : 10 y agua caliente hasta un volumen de 300 ml.
- agregar 15 ml de CH₃COOH y enfriar, ajustar el pH a 5,3 y titular.
- Al comenzar la titulación se debe agregar a la muestra 2 ml de NH₄F al 5% y 15 ml de Na₂SO₃ al 10% e indicador xilenol orange, lo suficiente como para teñir la solución color grosella.
- abrir la llave de la bureta cuidadosamente y observar el viraje a amarillo, el cual indica el punto final de la solución.

El porcentaje de zinc se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\% Zn = \frac{V \times F \times 100}{pm}$$

De donde :

- V** : Volumen de EDTA gastado en ml
- F** : Peso de Zn metálico/volumen estandarizado
- pm** : Peso de la muestra

2.4.9 Determinación de mercurio

Pesar 0,5 g de muestra en un vaso de 150 ml, adicionar 3,75 ml de HNO₃ y 125 ml de HCl fumante, homogeneizar y dejar por 12 horas a temperatura ambiente,

posteriormente pasar a un tubo de prueba y aforar a 25 ml con agua desionizada y cuantificar en absorción atómica por arrastre de vapor.

2.4.10 Determinaciones especiales

Perdidas por calcinación:

Consiste en calcinar las muestras hasta temperatura constante, servirá para tener la muestra libre de humedad y poder realizar algunas otras determinaciones analíticas. El método es el siguiente : tarar y codificar los crisoles, colocándole un número o marca con lápiz en la parte inferior, pesar 1 g de muestra (P_1) luego colocar en la mufla, empezando a temperatura ambiente hasta 400°C, desde ese momento se toma el tiempo (20 minutos), se retira de la mufla de 400°C y luego se coloca en la mufla de 500°C por 20 minutos, retirar de la mufla, enfriar, desecar, luego de ello pesar (P_2)

El cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\% P \text{ calcinación} = (P_2 - P_1) \times 100$$

El porcentaje de pérdidas por calcinación sirve para regular el pH de soluciones en concentrados de muestras.

2.4.11 Determinación de silicio

El método de análisis consiste en : pesar 0,5 o 1 g de acuerdo a la muestra, en vaso de 400 ml, tacar con 10 ml de HCl, 10 ml de HNO₃ y 10 ml de HClO₄ colocar en la plancha a 300°C hasta completa sequedad.

Retirar de la plancha y retomar con 10 ml de HCl, filtrar en caliente, con papel whatman N° 42 con agua desionizada caliente, lavar bien hasta eliminar el ácido del papel.

Colocar el papel en el crisol del platino, llevar al mechero hasta que se queme (cenizas), luego llevar a la mufla a 900°C por 20 minutos, hasta color blanco, enfriar y secar (desecador), pesar (P_1) atacar el crisol con 2 gotas de H₂O dos gotas de H₂SO₄ y 9 ml de HF, colocar al mechero hasta sequedad, retirar de la mufla, enfriar, secar (desecador), pesar (P_2), por diferencia de peso se calcula el porcentaje de sílice en la muestra.

El cálculo es el siguiente:

$$\% \text{ Si calcinación} = (P_2 - P_1) \times 100$$

Donde :

P₁ : Peso del crisol del platino más precipitado blanco

P₂ : Peso del crisol del platino limpio

2.4.12 Determinación de muestras carbonatadas:

Este tipo de muestras generan dificultades para su digestión, por lo general se levantan en forma de espumas con la siguiente pérdida de muestra. Se distinguen dos tipos :

- a) Muestras de color marrón oscuro (arenosas) Estas muestras son extraídas de sedimentos, para una fácil digestión se ataca la muestra con los respectivos ácidos y se deja por media hora a temperatura ambiente, luego de ello se pone en la plancha eléctrica a 200°C. obteniéndose excelentes resultados por el comportamiento dócil de la muestra.
- b) Muestra blanco, es la que proviene del mineral rico en carbonatos, son las más dificultosas porque rápidamente generan grandes globos de aire, saliéndose del vaso y por consiguiente la pérdida de muestra. Para salvar este inconveniente se abre la muestra con HNO₃, después que la digestión ha avanzado se agrega el HCl en el porcentaje adecuado, obteniéndose muy buenos resultados.

2.4.13 Análisis de muestras en tubos de ensayo:

Este tipo de digestión actualmente se está utilizando en el laboratorio de minerales de la empresa; luego de varias corridas experimentales de la misma muestra, se analizó tanto en vasos como en tubos, lo que concluye que es posible digestar las muestras en tubos.

El método de análisis es muy similar al realizado en vaso. La digestión es con HNO₃ y HCl a 80°C en baño maría, se pesa 0,25 g de muestra y se digesta en 10% del

volumen de HN_3 y 5% de HCl a 80°C en baño maría por espacio de 2 horas, con agitación cada 20 minutos, se deja enfriar y se afora al volumen de 25 ml (tamaño del tubo de ensayo) con agua ultra pura, previa homogeneización se envía al laboratorio instrumental.

Los análisis para la absorción atómica se han optimizado digestandando con HNO_3 y HCl en una proporción de 20% cada uno por 2 horas a 80°C en baño maría, luego se adiciona 5% más HCl y se afora al volumen deseado con solución de nitrato de aluminio previa homogeneización, es enviada para la cuantificación por absorción atómica.

2.4.14 Determinación de oro por ensayo al fuego método (fire-assay)

Los pasos a seguir en este análisis son:

- a) La reducción de litargirio a plomo, la fusión parcial y descomposición del nitrato, así como la fusión de sílice y carbonato de sodio.
- b) Se lleva a cabo casi todas las reacciones en el crisol, el litargirio por intermedio del agente reductor (harina) es reducido a plomo, en el cual se produce la amalgamación del oro y la plata; así como la escoria. El carbonato de sodio y el bórax reaccionan con los componentes ácidos y básicos originando también escoria; se generan gases como: CO_3 , CO , SO_2 , N_2 .
- c) Se completa toda la escoria tratándose de que se mantenga lo más líquida posible para que caiga toda partícula pequeña de plomo colectando de esta manera toda traza de oro y plata. Luego es vaciado a la lingotera una vez enfriada la escoria, el plomo se saca con ayuda de una picota y luego martillándosela en un yunque para darle forma cúbica apropiada para su copelación.
- d) El vaciado de muestras hacia la lingotera se hace bajo campana extractora de gases. Se debe hacer un monitoreo de control de temperatura, especialmente para un rango de temperatura de 500°C a 1200°C . (David Harvey, 2002)

Procedimiento del análisis

Se pesa 30 g de muestra, se llevan a crisoles que contengan Flux (es una mezcla de litargirio, sílice, bórax y carbonato de sodio), las cantidades utilizadas varían de acuerdo a las características mineralógicas, luego se homogeniza y se funde.



La copelación se realiza a una temperatura de 950°C, el botón plomo argentífero es colocado en la copela para eliminar así el plomo y las impurezas metálicas que suelen acompañarlo. Para esta operación es indispensable que la copela este bastante caliente, para lo cual el horno de mufla es encendido previamente para que tome la temperatura necesaria que debe variar entre 800°C y 1100 °C que es el punto de fusión de la plata y el oro. Las copelas vacías se deben colocar por lo menos 15 minutos antes para que estén calientes. El plomo se funde a los 327°C, pero solamente entre 800°C y 850°C aparece la superficie brillante y empieza a volatilizarse; esta temperatura se denomina, temperatura mínima de copelación o temperatura crítica.

La proporción de oro y plata debe estar en una relación de 1: 3, es decir 3 de plata y 1 de oro, si no es así el ataque con el HNO₃ no se llevará a cabo, por lo tanto es necesario echar plata en exceso, en caso contrario si se copeló se realiza la encuartación que consiste en envolver el dore que contiene plata metálica con lámina de plomo suficiente para la recopelación.

El doré es depositado en tubos de vidrio de 10 ml y se ataca con HNO₃ al 15% hasta disolver toda la plata, por un tiempo aproximado de 50 minutos, luego se añade 5 mL de HCl concentrado, se calienta a fuego lento por 30 minutos en este tiempo se elimina los vapores nitrosos, al terminar se le deja enfriar y se le afora con agua para su lectura respectiva.

2.4.15 Determinación de oro en muestras geoquímicas, método (fire assay) – absorción atómica (método 01) (Área de Vía Seca Laboratorio Analítico Cerro SAC., 2012).

Este método se emplea para determinar oro en muestras geoquímicas: exploraciones, perforaciones diamantinas (La perforación diamantina es aquella perforación que se realiza empleando una broca diamantada, que por lo general es destinado a cortar las rocas de un determinado terreno, perforaciones RCD (El Sistema de Perforación por Circulación Inversa).

Procedimiento:

Se pesa 30 g de muestra en crisoles grandes. El botón de plata – oro (doré) obtenido del proceso de fundición y copelación es disuelto en agua regia, luego es aforado,

homogenizado y finalmente se determina la ley del oro por lectura en el equipo de absorción atómica.

- Se sigue el mismo procedimiento en determinación de oro por método de Fire Assay, hasta el paso de obtención del doré
- El botón de plata – oro (doré) obtenido de la fundición y copelación se coloca en el tubo de ensayo con aforo de 10 ml
- Añadir 1,5 ml de ácido nítrico al 15%, llevar a la plancha de calentamiento a temperatura de 105°C hasta disolver la plata (45 minutos)
- Luego se le agrega de (3 a 4) ml de HCl concentrado, llevando a temperatura de 130°C, la reacción terminará cuando se disgrega totalmente el oro y cuando se haya eliminado vapores nitrosos (aprox. 45 minutos)
- Enfriar y añadir 1 mL de nitrato de aluminio al 2%, luego enrasar con agua desionizada, tapar y agitar para homogenizar la solución.
- Dejar en reposo para su acondicionamiento y/o centrifugar y leer por absorción atómica

Cálculos:

$$Au = \frac{C \times A2 \times V}{A1 \times P}$$

Dónde:

Au	:	Ley de oro en ppb
C	:	Concentración del estándar en ppm
A1	:	Lectura de absorción del estándar
A2	:	Lectura de absorción de la muestra
V	:	Volumen de la solución en mL
P	:	Peso de la muestra en gramos

Equipos y Materiales:

- Equipo de absorción atómica
- Equipo de absorción atómica
- Plancha de ataque
- Extractor de gases ácidos
- Racks para tubos de ensayo
- Tubos de ensayo pyrex con aforo y reborde de 10 mL – 5 mL
- Dispensadores graduados
- Tapones de jebe para tubos de ensayo

Reactivos:

- Ácido nítrico (p.a.)
- Ácido clorhídrico (p.a.)
- Agua desionizada
- Nitrato de aluminio al 2%

Método 02

Método de ensayo validado para determinar oro en muestras geoquímicas, exploraciones (sondajes) (Área de Vía Seca Laboratorio Analítico Cerro SAC., 2012).

El método consiste en fundir la muestra homogenizada con una mezcla fundente para concentrar el oro y la plata en un botón de plomo (régulo). Este botón es luego copelado para la obtención del botón de oro y plata (doré) que luego de limpiado y pesado es tratado con agua regia para la disolución de la plata y oro. Dentro de los componentes del fundente el bórax disuelve la gran mayoría de óxidos metálicos y cantidades de sílice de la muestra, el carbonato de sodio actúa sobre la sílice de la muestra formando silicatos de sodio y la sílice actúa como escorificador del hierro formando los silicatos correspondientes.

Este método es aplicado para determinar oro por el método instrumental, absorción atómica. Por lo general la ley de plata presente en este tipo de muestras es baja por lo que se usa nitrato de plata para el encuartado del oro.

Método aplicable a muestras con contenido de Oro : Menor a (10 ppm)

Antes de aplicar el método se verifica la ley de plata por análisis instrumental, para tomar la decisión del uso o no del nitrato de plata.

Equipos y materiales:

- Horno eléctrico, con control automático de temperatura, control interno de ventilación, con alcance de temperatura máxima de 1 100°C
- Campana extractora de Polvos
- Ultra micro balanza, precisión de 0,1 ug
- Balanza analítica, precisión 0,0001 g
- Plancha eléctrica con control automático de temperatura
- Mechero bunsen, y/o mufla de calcinación
- Mesa de fierro de 0,70 m x 1,70 m x 0,85 m de alto
- Mesa de fierro de 0,50 m x 0,70 m x 0,85 m de alto
- Lingoteras cónicas de capacidad 125 mL
- Planchas porta dore (oro y plata)
- Espátula de acero inoxidable
- Yunque
- Porta copelas
- Martillo de 0,906 Kg (2 Lb)
- Porta crisoles de madera (Anaqueles)
- Porta crisoles de porcelana de madera
- Tenazas especiales de fierro para crisoles, copelas y régulos
- Alicata punta de loro para dores
- Cepillos de cerda gruesa

- Pinzas para calcinar crisoles de porcelana
- Pinzas quirúrgicas
- Guantes de cuero
- Chaleco y/o mandil de cuero aluminizado
- Mascaras de protección facial
- Crisoles refractarios de 30 g
- Crisoles de porcelana de 30 mL
- Copelas de 80 g de peso
- Bolsas de polipropileno
- Material de vidrio Usual de laboratorio.

Reactivos:

- Fundentes.
- Plomo electrolítico laminado libre de plata y oro
- Plata electrolítica de pureza 99,9% mínimo
- Harina de trigo de uso común
- Ácido nítrico al 15% y 50% de concentración
- Hidróxido de amonio (p.a.)
- Ceniza de Hueso
- Nitrato de potasio
- NaCl (sal de mesa.)
- AgNO₃.

Acondicionamiento de crisoles.- Los crisoles de arcilla han deben estar limpios y ser colocados sobre una bandeja o cargador.

Cada uno de ellos será rotulado con el código o número de identificación de la muestra y siempre de forma ordenada.

Pesado.- Las muestras de minerales para los ensayos de plata y oro son preparadas hasta obtener un tamaño de partícula de 75 µm, equivalente a malla N° 200 (100%)

Las muestras preparadas son colocadas en sobres de papel y trasladadas a la sala de balanzas donde se le es entregada al analista para el desarrollo de los ensayos.

Pesar la muestra según su naturaleza, que varía de entre 15 g a 50 g dependiendo del tipo y la calidad que esta presenta. Registrar (**P**) y homogenizar la mezcla en la bolsa plástica, con movimientos manuales de tal manera que no produzca contaminación alrededor y echarla al crisol.

Respecto a las características del mineral

Muestras oxidadas.- En caso que las muestras sean oxidadas se le agregara 100 gramos de flux, y 2.5 gramos de harina, considerando la menor o mayor oxidación de la muestra, la cantidad de harina será menor en el caso de mayor oxidación, esto ayudara en la fundición a formar plomo líquido, lo cual recuperara todo lo metálico y las impurezas de la muestra, estas se reconocen con facilidad por el color marrón que presentan.

Muestras sulfuradas.- En caso que las muestras sean sulfuradas y presenten colores diversos, debido a la presencia de piritita (verde), color plomo debido a la presencia de (sulfuros metálicos), o blancas (alto contenido de sílice).

Se pesa 100 g de flux y se le agregara nitrato de potasio. Sobre esta mezcla rociar de (10 a 20)g de Bórax.

Fundente para geoquímicos.

Fuente (Área de Vía Seca Laboratorio Analítico Cerro SAC)

- Litargirio: 54.5%
- Carbonato de sodio: 25.5%
- Borax: 15%
- Sílice: 5%
- Nitrato de plata: 25g/50Kg

Fundición:

- ✓ Llevar los crisoles al horno previamente calentado a $750^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ y dejar por 20 minutos.
- ✓ Luego elevar la temperatura hasta $950^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ por aproximadamente 15 minutos.

- ✓ Por último elevar la temperatura del horno hasta $1070^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ por aproximadamente 20 a 25 minutos. Toda esta operación debe durar una hora.
- ✓ Terminado el tiempo de fundición retirar cada crisol revolviendo su contenido con un movimiento circular y vertiéndolo en la lingotera de acero previamente limpia, seca y rotulada según el orden de las muestras en los crisoles.
- ✓ Dejar enfriar por 15 minutos a temperatura ambiente y golpear luego con un martillo la masa fría de cada cono de la lingotera hasta liberar el botón de plomo (régulo) de la escoria (material vidriado).
- ✓ Con la ayuda de un martillo darle a este régulo la forma de un cubo, limpiándolo de la escoria

El botón de plomo debe pesar $35 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$, en caso contrario se coloca el botón en un escorificador, se añade plomo granulado y bórax y se funde nuevamente.

Si la muestra tiene abundante cobre también se escorifica para eliminar el cobre.

Copelación:

- ✓ Colocar las copelas previamente enumeradas en la mufla y precalentar hasta $950^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$ por un tiempo de 20 minutos.
- ✓ Cargar los cubos de plomo (régulo) en cada copela sin perder el orden inicial.
- ✓ Para cada análisis de muestra se colocara un título de plata conocido, y un ensayo de blanco (la última muestra de cada corrida) por cada corrida. La copelación dura aproximadamente 45 min. ± 5 minutos a una temperatura de $950^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$.
- ✓ Cuando el botón de plomo se haya fundido abrir la puerta de la mufla en pequeño ángulo para que ingrese aire y oxide el plomo por completo, para finalmente establecer en el horno una temperatura de copelación de $950^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$.

- ✓ El punto final de la copelación sucede cuando se observa un destello en cada copela (“relampagueo de plata”). El resultado es un botón de oro y plata (doré).
- ✓ Luego del destello (o la finalización del tiempo de proceso de copelación) esperar 20 segundos y retirar las copelas del horno y dejar enfriar por 10 minutos aproximadamente.
- ✓ Limpiar los doré con ayuda de un cepillo de cerda gruesa.

Pesado y partición:

- En este proceso de partición se usan tubos de ensayo con un volumen de aforo conocido, generalmente son de 5 mL.
- Colocamos el dore en los tubos de ensayo, con su respectiva gradilla de trabajo, se le agrega 0,5 ml de ácido nítrico al (1:1), proceso de disolución de la plata.

Llevamos al baño María junto con el racket de tubos por un tiempo de 40 min. Luego es retirado enfriado, y se adiciona 1,5 ml de ácido clorhídrico concentrado, se centrifuga bien la solución y se vuelve a poner nuevamente en baño María, hasta notar una aclaración parcial de la solución, donde ya no haya presencia de gases nitrosos. Se retira enfría y se afora con agua desionizada, para obtener un volumen final de 5 ml, luego los tubos son agitados y llevados al área de instrumentación para su posterior lectura en los equipos de absorción atómica.

Cálculos :

$$\text{Ley de Oro (ppb)} = \frac{V \times [L - BK] \times 1000}{P}$$

Dónde:

- V** : Volumen Final de Aforo
- L** : Lectura de muestra en ppm
- BK** : Lectura de blanco En ppm
- P** : Peso de la muestra en g
- PPB** : Partes por billón



2.4.16 Determinación de oro soluble por absorción atómica

El presente método consiste en determinar oro soluble por medio de lixiviación de la muestra en soluciones cianuradas (lotes de producción, muestras geoquímicas, DDH, RCD).

Principio del Método: Consiste en lixiviar la muestra pulverizada a -140 Mesh, con solución preparada de cianuro de sodio al 1% e hidróxido de sodio al 0,5%, el oro es leído por absorción atómica.

Equipos y Materiales:

- a) Equipo de absorción atómica
- b) Plancha de calentamiento
- c) Extractor de gases
- d) Centrífuga
- e) Shaker Thermolyne
- f) Tubos de centrífuga de polietileno de 50 mL, con su respectiva tapa
- g) Embudo de vástago largo
- h) Vaso pyrex de 1 000 mL
- i) Dispensador graduado
- j) Papel Whatman N° 91
- k) Agitador de rodillos (Cap. 36 botellas)
- l) Reactivos. - Se tienen los siguientes :
- m) Cianuro de sodio QP
- n) Hidróxido de sodio QP

Procedimiento:

- Preparar la solución cianurada de acuerdo a la cantidad requerida (concentración de cianuro de sodio 1% e hidróxido de sodio al 0,5%) mezclar en agua desionizada hasta disolver completamente y homogenizar.
- Pesar 20 g de muestra pulverizada en tubos de centrífuga.
- Adicionar 30 mL de la solución cianurada, previamente calentada a 90°C.
- Tapar el tubo de centrífuga y llevar al Shaker y/o agitador de rodillos por una hora.

- Secar los tubos y llevar a la centrifuga á 3 000 rpm por un tiempo de 5 á 10 minutos.
- Filtrar en papel whatman N° 91 en los respectivos tubos codificados (opcional).
- Leer por absorción atómica con corrector de fondo.
- Cada batch de muestra se debe leer con su respectivo blanco y patrón

Cálculos :

$$Au = \frac{VL}{P}$$

Donde :

Au (solb)	:	Contenido de oro soluble en ppb
L	:	Lectura de la solución lixiviada en absorción
P	:	Peso de la muestra en g
V	:	Volumen en mL

2.4.17 Determinación de mercurio (Hg) por absorción atómica

El método determina el análisis de Hg en muestras minerales de carácter geoquímicas, tales como rocas, polvos, suelos y sedimentos.

El método describe la determinación de mercurio en solución acuosa, usando cloruro de estaño II como reductor, el mercurio en estado fundamental es leído en el espectrofotómetro de absorción atómica (técnica de generación de hidruros).

Especificaciones Técnicas:

- 1) Celda de absorción de cuarzo, 245 mm de largo, 6 mm de diámetro con ventanas de cuarzo removibles.
- 2) Gas inerte : Nitrógeno purificado
- 3) Presión requerida : 52 psi ± 10%
- 4) Reductor de mercurio : Cloruro de estaño II

- 5) Requerimiento de energía eléctrica : 100 – 120 V o 220 – 240 VAC
± 10%; 50 – 60 Hz
- 6) Dimensión del analizador: ancho 415 mm, altura 255 mm,
profundidad 410 mm, peso 12 Kg
- 7) Dimensiones del autosampler : ancho 420 mm, altura 370 mm,
profundidad 300 mm, peso 3 Kg

Materiales y Reactivos:

- a) Ácido clorhídrico concentrado (HCl 35% – 38% QP)
- b) Ácido nítrico concentrado HNO₃ 65% – 70% QP)
- c) Solución estándar de mercurio de 1 000 ppm
- d) Permanganato de potasio (KMNO₄)
- e) Agua desionizada o agua purificada
- f) Nitrógeno HP o UHP
- g) Cloruro de estaño dihidratado (SnCl₂)
- h) Extractor de gases
- i) Solución estándar de mercurio de 1 000 ppm
- j) Estabilizador
- k) Pipetas volumétricas de clase A 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 y 25 mL
- l) Matraz volumétrico de 100, 200 y 250 mL
- m) Bombilla
- n) Silicona de pasta
- o) Pisceta

Preparación de Soluciones y Estándares de Calibración :

- 1) Solución Reductora de Cloruro de estaño (1,1% SnCl₂ en 3% (v/v) HCl).- Pesar 22 g de cloruro de estaño dihidratado pa (SNCl₂.2H₂O) en un vaso y disolverlo con 60 mL de HCl concentrado calentando en la plancha; enrasar con agua purificada hasta 2 L.
- 2) Solución Carrier (3% v/v) HCl.- Tomar 60 mL de HCl, enrasar con agua purificada hasta 2 L

- 3) Solución de permanganato de potasio al 5%.- Pesar 5 g de permanganato de potasio y disolverlo con agua purificada hasta 100 mL
- 4) Solución Diluyente o Blanco.- Tomar 24 mL de ácido nítrico concentrado, 8 mL de ácido clorhídrico concentrado, enrasar con agua purificada hasta 2 L
- 5) Preparación de soluciones de Calibración.- usar una solución de 1000 ppm para preparar las soluciones estándares de calibración.

2.4.18 Determinación de metales Pb, Zn, Cu, Ag y Fe por el método de absorción atómica en muestras de minerales. (Vía húmeda Laboratorio Analítico Cerro SAC).

Las muestras minerales son digeridas (atacadas) químicamente con ácidos para permitir la liberación de los diferentes elementos contenidos en ella; luego es diluida en función de la concentración necesaria en cada muestra, según su origen. Disueltas y diluidas las muestras son leídas en el equipo de absorción atómica. Este equipo utiliza la absorción de la luz para medir la concentración de átomos en fase gaseosa. Dado que las muestras se encuentran generalmente en estado líquido o sólido, los átomos o iones del analito deben de vaporizarse con una llama (en nuestro caso aire – acetileno). Los átomos absorben la luz visible o ultravioleta de una lámpara de cátodo hueco y realizan transiciones a niveles electrónicos de mayor energía. La concentración del analito se determina por la cantidad de absorción. Se aplica la ley de Lambert – Beer en la medida. El método es aplicable a muestras de:

- Planta Concentradora: Mineral de Alimentación, Concentrados (Zn, Pb y Cu), Relave
- Mineral de Geoquímicas

Analitos y concentraciones

Zinc	:	hasta 10%
Plomo	:	hasta 10%
Cobre	:	hasta 30%
Plata	:	hasta 500 g/t

El método de Absorción Atómica es una técnica con pocas interferencias, es una técnica muy selectiva. Las interferencias más conocidas se describen a continuación así como la ejecución de su control rutinario:

Interferencias espectrales. - Solapamiento de líneas. En absorción atómica es raro. Dado que las líneas de emisión de las fuentes de cátodo hueco son muy estrechas es rara la interferencia debida a la superposición de las líneas, para que exista esta interferencia la separación entre las dos líneas tiene que ser menor a $0,1 \text{ \AA}$.
Dispersión de radiación emitida. La muestra no se puede disolver completamente. Parte de la radiación emitida no llega porque es dispersada. El problema se soluciona cambiando la longitud de onda para que el elemento que antes era dispersante ahora no lo sea (elección de la longitud de onda específica del elemento a determinar).

Interferencias químicas. - La reacción del elemento a determinar con otra especie química puede afectar la absorción en el equipo. Los elementos presentes en la muestra y que acompañan a los elementos de interés (As, Sb, Bi, Fe, Mn, PbOx, ZnOx, Au) en la disolución (después de la digestión) se encuentran totalmente dispersos y sus espectros son específicos. La elección correcta de los parámetros instrumentales para cada elemento según el fabricante minimiza esta interferencia.

Interferencia ionización. - El calentamiento excesivo puede producir la ionización de las especies. Cada elemento o material de referencia (y sus diluciones) posee una concentración característica, que es verificada antes de iniciar el ensayo. La recuperación en la curva de calibración detecta esta interferencia (si la hubiere)

Interferencias físicas o de matriz. - Una temperatura de la disolución por debajo de 15° C afectan las absorbancias (se reducen) lo cual es detectado al verificar los estándares de la curva (punto medio). El ambiente de absorción atómica debe estar provisto de un acondicionamiento térmico especial.

Equipos :

- Balanza analítica. Alcance: $0,0000 \text{ g} - 220,0000 \text{ g}$ Calibrada
- Pesas patrón. Calibradas
- Planchas de Calentamiento. Calibradas
- Espectrofotómetro de absorción Atómica calibrado

- Termo higrómetros. Calibrados

Materiales y reactivos :

Digestión:

- Bandeja para transportar muestras pesadas
- Vasos de precipitado de 150 mL
- Fiolas de 50 mL, 100 mL, 200 mL
- Pizetas
- Tubos de ensayos de 18 mm x 150 mm
- Pinzas
- Lunas de reloj
- Gradillas para tubos de ensayos de 18 mm x 150 mm
- Platillos para pesado
- Bochas pequeñas o pinceles gruesos de pelo de camello
- Ácido nítrico (qp)
- Clorato de Potasio (pa)
- Peróxido de Hidrógeno(pa)
- Ácido Clorhídrico (qp)
- Agua desionizada

Absorción atómica:

- Diluciones de materiales de referencia para la curva de calibración, específica para cada elemento a determinar

Procedimiento:

1. En una bandeja colocar vasos de precipitado de 150 mL, sanos, limpios, rotulados y ordenados numéricamente.
2. Pesar la cantidad de muestra según el elemento a determinar y muestra a ensayar.
3. Colocar la muestra pesada en el vaso de precipitado debidamente rotulado. Repetir este procedimiento para cada muestra.

4. Llevar la bandeja con los vasos conteniendo la muestra pesada a la mesa de ataque en la sala de análisis.
5. Antes de proceder al ataque verificar que los equipos y reactivos para el proceso de digestión se encuentren en la sala o funcionen correctamente (ácidos y equipo extractor de gases).
6. La digestión se inicia agregando 5 ml. de ácido nítrico en cada vaso que contiene la muestra y colocando cada uno de ellos sobre la plancha de calentamiento.
7. La plancha debe estar a $230^{\circ} \text{C} \pm 30^{\circ} \text{C}$.
8. Esperar hasta que se eliminen todos los gases nitrosos.
9. Luego agregar a cada vaso, aún en la plancha, una pizca de clorato de potasio (para oxidar elementos Pb, Zn y Cu) y para las muestras en que se determinará la plata, 2 mL de peróxido de hidrógeno (para oxidar la plata).
10. Agregar 5 ml de ácido clorhídrico a todas las muestras y dejar hasta que adquiera un estado "pastoso" durante aproximadamente cinco minutos. De esta manera se completa el ataque químico de las muestras de mineral.
11. Luego, agregar 20 mL de ácido clorhídrico para las muestras en que se determina Pb, Zn y Cu y 5 mL para las muestras en que se determina Ag.
12. Esperar aproximadamente cinco minutos y retirar los vasos de la plancha con la ayuda de una pinza en forma ordenada.
13. Lavar con agua destilada las paredes de los vasos y trasvasar el contenido a fioles limpias.

Aforado:

- 1) Aforar las fioles conteniendo la muestra con agua destilada hasta 200 ml y proceder a agitar vigorosamente.
- 2) A partir de estas realizar diluciones :

Para alimentación : Tomar alícuota de 4 ml a fiola de 200 ml

Para conc. de Cu y Pb : Tomar alícuota de 5 ml a fiola de 200 ml

Para relave : Tomar alícuota de 5 ml a fiola de 50 ml

Para conc de Zn : Tomar alícuota de 5 ml a fiola de 200 ml (*)

3) Aforar con ácido clorhídrico al 10% y agitar vigorosamente. Luego trasvasar a tubos de ensayos.

(*)Adicionalmente para el conc de Zn hacer otra dilución tomando una alícuota de 5 ml a otra fiola de 50 ml

4) Trasladar los tubos de ensayo a la sala de Absorción Atómica para su lectura

Lectura en absorción atómica:

Antes de iniciar las lecturas verificar si la temperatura de las muestras está por encima de 15° C

- 1) Encender el equipo y seguir las instrucciones del manual de instructivos de uso de equipos.
- 2) Leer el blanco reactivo verificando que la lectura del elemento a determinar sea menor a su LDM
- 3) Calibrar el equipo (linealidad) y verificar con estándar para el punto medio de la curva según el elemento a determinar (porcentaje de recuperación : $\pm 5\%$).
- 4) Introducir el capilar del equipo a las muestras (en los tubos de ensayos) y proceder a la lectura.
- 5) Registrar en el formato respectivo, las absorbancias para cada concentración de la curva de calibración y para las muestras, las diluciones realizadas y la lectura de la concentración proporcionada por el equipo (ppm)
- 6) Ejecutar los cálculos respectivos para reportar en porcentaje para los elementos Zn, Pb, Cu (y otros) y de g/t para la Ag

2.4.19 Determinación volumétrica de plomo en concentrado de mineral.

(Área de Vía húmeda Laboratorio Analítico Cerro SAC).

Los pasos a seguir corresponden a un método de ensayo validado para determinar plomo en concentrados de plomo.

El método consiste en disgregar la muestra (concentrado de plomo) con ácidos y calor para luego sulfatarla y formar un precipitado de sulfato de plomo. Este precipitado es disuelto con ayuda de una solución de acetato de amonio y posteriormente titulado con una solución de EDTA usando como indicador Xilenol Orange.

Método aplicable a muestras con contenido de Plomo: entre 10% hasta 55% .

Los elementos interferentes son el fierro y zinc en altas leyes (10%).

Los compuestos interferentes son los óxidos de nitrógeno que interfieren al momento de titular, disminuyendo el gasto de titulación.

Equipos y materiales :

- Balanza analítica de 0,1 mg de sensibilidad, calibrada
- Bureta de 50 ml calibrada
- Plancha de calentamiento, calibrada
- Vasos de precipitado de 400 mL
- Lunas de reloj
- Pizetas
- Embudos
- Papel filtro Whatman N° 40 o equivalente (tipo lento)
- Probeta graduada de 25 mL y/o dosificador

a) Reactivos :

- Ácido nítrico (HNO_3) cc. 68,5%
- Ácido clorhídrico (HCl) cc. 37,5%
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) cc. 98%
- Ácido Acético glacial. cc
- Clorato de potasio (KClO_3)

- Acetato de Amonio ($\text{NH}_4\text{COOHCH}_3$)
- EDTA Sal Disódica
- Solución de Xilenol Orange (1,0%)
- Plomo metálico de 99,99% de pureza
- Agua: destilada o desionizada
- Alcohol etílico (Etanol).

Preparación de soluciones y determinación de factor:

- a) **Solución extractiva de plomo.**- Disolver 5 Kg de acetato de amonio y 1500 mL de ácido acético en cantidad suficiente de agua para 25 L de solución.
- b) **Solución de xilenol orange 1,0%.**- Se disuelve 1,0 g del indicador en 50 mL de etanol y 50 ml de agua.
- c) **Solución de edta.**- Disolver 250 g de EDTA en cantidad suficiente de agua para 25 L de solución
- d) **Estandarización del plomo metálico.**- Pesar entre 0,12 g – 0,13 g de plomo metálico (99,9%) con precisión de 0,1 mg en un matraz de 250 mL o vaso de 400 mL Agregar 25 mL de ácido nítrico 1:3 (HNO_3), tapar con luna de reloj y llevar hasta la disgregación del plomo metálico.
 - Lavar las paredes y luna de reloj hasta Aprox. 50 mL de agua destilada.
 - Adicionar de 2 a 3 gotas de solución de urea al 10%, colocar en la plancha y hervir por Aprox. 5 minutos
 - Adicionar 25 mL de solución extractiva y en la plancha hacer hervir 10 minutos aprox.
 - Bajar de la plancha y lavar las paredes del vaso y luna de reloj hasta 250 mL.
 - Adicionar de 1 a 2 gotas de Xilenol Orange y titular con solución de EDTA.

- El resultado de la titulación permite determinar el valor del factor de plomo metálico o equivalente gramo de plomo por ml de solución de EDTA.

$$f = \frac{G}{V}$$

Dónde:

- f** : Factor de plomo metálico o equivalente gramo de plomo por mL de solución estándar de EDTA
- G** : Peso del plomo
- V** : Cantidad usada de solución estándar de EDTA (gasto)

Procedimiento para la determinación de plomo en el concentrado.

- 1) Pesar 0,2500 g \pm 0,0002 g de concentrado de plomo en vasos de 400 ml
- 2) Adicionar 10 ml de ácido nítrico (HNO₃), llevar a la plancha y hervir Aprox. 2 minutos.
- 3) Agregar 0,1 g de KClO₃, hasta tomar una coloración pardo rojizo, luego en forma cuidadosa adicionar 5 ml de HCl y ver la formación del precipitado de plomo y dejar enfriar ligeramente.
- 4) Si la muestra sigue oscura, agregar 05 gotas de ácido nítrico (HNO₃).
- 5) Expulsar los vapores nitrosos para evitar interferencias.
- 6) Adicionar 15 ml de ácido sulfúrico (H₂SO₄) y aún en la plancha dejar sulfatar por espacio de 25 minutos
- 7) Bajar de la plancha y dejar enfriar por 10 minutos aprox.
- 8) Lavar con agua destilada sin retirar la luna de reloj hasta 30 ml Aprox.
- 9) Llevar a la plancha para hervir por 4 minutos.
- 10) Retirar de la plancha y dejar enfriar.
- 11) Lavar las paredes del vaso y luna de reloj hasta tener Aprox. 50 mL.
- 12) Enfriar la solución con corriente agua fría.



- 13) Filtrar la solución así obtenida con papel N° 02 y pulpa de papel. Lavar Cuatro veces con agua destilada fría.
- 14) Adicionar 25 mL de solución extractiva (solución de acetato de amonio)
- 15) Retirar el papel filtro y lavarlo con agua destilada haciendo caer el agua dentro del vaso, desmenuzar el papel y colocarlo dentro del vaso
- 16) Colocar una luna de reloj sobre el vaso y llevar a la plancha para hervir 05 minutos aprox.
- 17) Adicionar agua hasta 250 mL.
- 18) Adicionar al vaso 1 á 2 gotas de solución de Xilenol Orange y titular con solución de EDTA.
- 19) El punto final de viraje es un color amarillo.
- 20) Registrar el gasto (V) de solución de EDTA y proceder al cálculo.

Calculo del porcentaje de plomo en la muestra:

$$Pb (\%) = \frac{f \times V \times 100}{w}$$

Dónde:

- f** : Cantidad de plomo equivalente al mL de solución estándar de EDTA
V : Cantidad usada (ml) de solución estándar de EDTA
w : Peso de la muestra

CAPITULO III

ESTRUCTURA DE LA MATERIA MINERAL

3. Enlaces de los cristales:

La estructura interna de la materia se encuentra muy relacionada con el tipo de átomos que la constituyen y con las interacciones o enlaces existentes entre ellos. Estas interacciones estabilizan el cristal y las hay de varios tipos. Las distribuciones periódicas que forman los cristales pueden estar constituidas por átomos (o iones) o por moléculas, en cada caso el tratamiento será distinto.

(Jhon W. Moore, J. C., 2000).

En el caso de distribuciones atómicas, se pueden considerar tres tipos de enlaces o interacciones:

3.1 Enlaces iónicos:

En este tipo de enlace, llamado también heteropolar, los átomos se mantienen unidos porque están ionizados, o sea que cada átomo ha perdido o ganado uno o más electrones y en vez de ser eléctricamente neutro adquiere carga positiva (catión) o negativa (anión). Las fuerzas que ligan a los iones son las electrostáticas de atracción entre cuerpos de cargas opuestas. Así, en el cloruro de sodio, mediante la transferencia de un electrón de la capa externa de un átomo de Na, éste se convierte en un ión positivo (catión) y el Cl en un ión negativo (anión) y debido a esto toda la estructura resulta eléctricamente neutro.

Características de las sustancias con enlaces iónicos:

- Altos puntos de fusión, relacionados con las cargas de los iones.
- Alta solubilidad en líquidos con elevada Constante Dieléctrica, como el agua.
- Son aislantes eléctricos en fase sólida y conductores si están fundidos.
- Suelen ser diamagnéticos, aunque hay excepciones si contienen metales de transición.
- Las Propiedades Ópticas del cristal pueden deducirse de la suma de las de cada uno de los iones que lo forman.
- Presentan baja conductividad calorífica y también baja expansión y compresibilidad térmica.

- Son duros, frágiles y con buena exfoliación.
- Pueden dar lugar a soluciones sólidas.

3.2 Enlaces covalentes:

Se establecen entre átomos que comparten una porción de su densidad electrónica, la cual mantiene unidos a los núcleos.

Cuando los electrones son compartidos por dos núcleos, es un enlace covalente. Sustancias como el hidrógeno, cloro, cloruro de hidrógeno, el dióxido de carbono, el agua o el azúcar. Esas sustancias solo tienen enlaces covalentes. (Zumdahl, 1992)

Se desprende energía cuando se forma un enlace entre dos átomos. Es consecuencia, la misma cantidad de energía es la que necesita para romper ese enlace.

Se necesitan 436 KJ para romper los enlaces entre los átomos de hidrógeno en un mol de moléculas de hidrógeno. La energía que se requiere para romper un enlace covalente se llama energía de disociación de enlace. (Hein, 1993)

Los compuestos covalentes tienen puntos de fusión relativamente inferiores (menos de 300°C) y no conduce la corriente eléctrica como lo hacen los compuestos iónicos en las soluciones líquidas o acuosas.

Los átomos de hidrógeno individuales son tan inestables que solo existen separados durante un tiempo muy corto. Es por esto que cuando escribimos la fórmula de una molécula de hidrógeno, debemos escribirla como H₂ (Dos átomos de H y una molécula diatómica).

Los dos núcleos positivos atraen a los dos electrones para producir una molécula más estable que los átomos separados,

Durante el proceso de formación de enlace covalente se libera energía, en este caso se liberaron 218 KJ o 52.0 kcal de energía durante la formación de 1.00 gramo de gas hidrógeno H₂. Por lo tanto, para "romper" se necesita la misma fuerza.

Además del H₂, y Cl₂ otros 5 elementos se escriben solo como moléculas diatómicas. F₂, Br₂, I₂, O₂ y N₂. Dada la cantidad de electrones que se encuentra en los niveles de energía de valencia de estos átomos, ninguno es estable a menos que se acople con otro. Estas moléculas que comparten sus electrones por igual se llaman moléculas no polares. (Seese, 2005.)



Una molécula del H_2 alcanza su estabilidad máxima (tiene la energía potencial más baja) cuando la distancia entre los núcleos es 74 pm (0,074 nm). En este punto las fuerzas electrostáticas de atracción y repulsión se equilibran.

Cuando los núcleos de H están a 74 pm uno del otro, se requieren 436 KJ de energía para separar átomos de H de un mol de H_2 gaseoso para dar átomos de H aislados. (Jhon W. Moore, 2000).

Las características de las sustancias con enlaces covalentes son:

- Las densidades suelen ser bajas.
- Son aislantes o semiconductores en fase sólida y en fase fundida.
- Las propiedades ópticas están condicionadas por la existencia de electrones deslocalizados.
- Generalmente son diamagnéticos.
- Son insolubles en líquidos polares.
- Raramente forman soluciones sólidas.

3.3 Enlaces metálicos.

Se establecen entre átomos con un elevado carácter electropositivo que comparten una porción de su densidad electrónica, encontrándose ésta deslocalizada en la estructura. Ello hace que las sustancias metálicas posean una serie de propiedades muy características, tales como las siguientes:

- Gran conductividad térmica y eléctrica en fase sólida y en fase fundida.
- Son dúctiles, maleables y, a veces, elásticos.
- Brillo metálico, más o menos intenso, que puede ser atenuado en la superficie por alteraciones.
- Densidad elevada.
- Suelen ser ferromagnéticos o antiferromagnéticos.
- Son opacos.
- Grandes posibilidades en cuanto a las soluciones sólidas (aleaciones oro-plata, hierro-níquel).

La existencia de enlaces iónicos, covalentes o metálicos puros, es casi ficticia, ya que siempre hay un cierto carácter iónico en un enlace covalente y viceversa, aunque hay muchos casos concretos en que se da una gran proximidad a la pureza.

En principio, puede decirse que a mayor diferencia de electronegatividad, mayor carácter iónico.

En muchas sustancias pueden encontrarse varios tipos de enlace. Por ejemplo, en los sulfatos la unión S-O es fundamentalmente covalente, mientras que los cationes se unen al anión mediante interacciones esencialmente iónicas.

Se dice que estos compuestos son anisodésimicos.

Mientras que cuando todos los enlaces son iguales, como en el diamante, se trata de sustancias isodésimicas.

Las disposiciones moleculares periódicas se encuentran estabilizadas por interacciones entre las moléculas, son los llamados enlaces moleculares, entre los que se encuentran los enlaces de hidrógeno (de gran importancia en numerosas sustancias orgánicas e inorgánicas), las fuerzas de dispersión (Van der Waals), etc. Estas interacciones tienen una energía mucho menor que las establecidas entre átomos o iones. Las propiedades de estas sustancias son muy características y suelen ser menos estables.

La estabilidad de los cristales es función del tipo y de la energía de los enlaces que le forman. Por ejemplo, la gran estabilidad de los silicatos está basada en la elevada energía de enlace que posee la unión Si-O. Cuanto mayor sea el número de enlaces establecidos, mayor será la estabilidad del compuesto.

Los tectosilicatos son más estables que los nesosilicatos. Este tipo de enlace corresponde a las estructuras de los metales que se hallan al estado nativo, tales como cobre, oro, plata, platino, hierro, etc. (L.G. Berry, B. Mason, 1966)

4. Sólidos cristalinos:

Las distribuciones atómicas y moleculares constituyen las redes cristalinas que, al ser periódicas en las tres dimensiones del espacio, confieren a la materia el carácter cristalino. Cuando las distribuciones atómicas o moleculares no son periódicas o lo son a corto alcance, se dice que no están cristalizadas o que son amorfas, como por ejemplo, el ópalo.

En el caso de distribuciones moleculares es importante conocer la disposición de los átomos en la molécula y, además, la distribución de las moléculas en el espacio.

Al tratarse de distribuciones periódicas, se generan una serie de simetrías o relaciones entre puntos homólogos de la red que permiten clasificar las estructuras de acuerdo con los elementos de simetría que contienen. Cada uno de los conjuntos de simetrías existentes en la red se denomina Forma Cristalina, Clase de Simetría o Grupo Puntual. El número de estos conjuntos es 32 y cada especie mineral pertenece a uno de ellos. El espacio mínimo de la red que contiene toda la información sobre su simetría se denomina Celda Unidad. La presencia o ausencia de ciertos elementos de simetría en una red puede condicionar algunas propiedades. Por ejemplo, una sustancia que posea centro de simetría, no podrá ser piroeléctrica.

Cuando una sustancia puede pertenecer a más de una forma cristalina, se dice que es **polimorfa** y cada una de las **polimorfías** constituye una especie mineral diferente. Las sustancias que cristalizan en la misma forma cristalina, se dice que son **isomorfos**.

Los sólidos cristalinos, se caracterizan por presentar un orden en su disposición atómica interna, con sus átomos que se mantienen a intervalos invariables, dispuestos sistemáticamente en estructuras tridimensionales. Tal disposición caracteriza a las estructuras cristalinas. Cuando dicha estructura interna se traduce exteriormente en la formación de sólidos poliédricos bien desarrollados (cubos, prismas, romboedros, octaedros, etc. y sus combinaciones), limitados por caras planas, llamados cristales, se generan los minerales cristalizados. En estos, su cristalización (paso del estado fluido al sólido) se ha efectuado en condiciones favorables de tiempo y espacio, desarrollándose cristales bien formados. Cuando durante su cristalización los minerales se han interferido mutuamente, impidiendo el desarrollo de caras planas dando contornos irregulares, se originan los minerales cristalinos.

5. Caracterización estructural de la materia mineral

Las técnicas de elucidación estructural de los minerales se basan en estudiar el comportamiento de una radiación cuando interacciona con la materia. Como consecuencia de tal interacción las radiaciones son modificadas en base a fenómenos diversos (difracción, absorción, dispersión, etc.). De la interpretación de

dicha modificación se puede deducir la distribución de los átomos y de las moléculas en el espacio.

A. Difracción de Rayos X:

Los Rayos X fueron descubiertos por Wilhelm Konrad Roentgen (1845-1923) en 1895, quien recibió el Premio Nobel de Física en 1901. En realidad Roentgen aunque no llegó a conocer la naturaleza de los Rayos X, si estudió sus propiedades: En 1912 los Rayos X fueron utilizados por Max von Laue (1879-1960) y Arnold Sommerfeld (1868-1951) para el estudio de las sustancias cristalinas. Estos científicos, junto con W. Friedrich y P. Knipping (todos ellos profesores de la Universidad de Munich), hicieron incidir un haz de Rayos X sobre varias sustancias cristalinas (calcantita, esfalerita, etc.) y registraron la radiación resultante en una placa fotográfica, observando una distribución geométrica de puntos alrededor de una mancha central (correspondiente al haz de Rayos X sin modificar). Estos puntos presentan una geometría relacionada con la distribución atómica existente en cada plano reticular del cristal y a partir de ellas puede conocerse la estructura cristalina. Unos años mas tarde los físicos ingleses W.H. Bragg y W.L. Bragg (hijo del anterior), que compartieron el Premio Nobel de Física en 1915, utilizaron la Difracción de los Rayos X para deducir la estructura de numerosos cristales, empezando por la halita y siguiendo por otros más complejos.

Se pueden enumerar las siguientes propiedades de los Rayos X.

1. Se propagan en línea recta.
2. No se desvían ante campos eléctricos, ni ante campos magnéticos.
3. Atraviesan sustancias opacas.
4. Ionizan gases.
5. Provocan fluorescencia en determinadas sustancias.
6. Ennegrecen las placas fotográficas.

Actualmente se sabe que los Rayos X son de naturaleza ondulatoria.

Los Rayos X se producen cuando un haz de electrones, procedentes de un cátodo de wolframio que se mueven a gran velocidad choca contra los átomos de un elemento que funciona de ánodo (anticátodo). Como consecuencia de este choque aparece un espectro de emisión formado por dos contribuciones:



Espectro continuo: Debido a la pérdida de energía de los electrones cuando chocan entre sí y contra el metal del ánodo. Este espectro, llamada también radiación blanca, contiene un amplio rango de longitudes de onda y aumenta (en amplitud y en intensidad) cuando se eleva la diferencia de potencial (voltaje) entre el cátodo y el ánodo.

Espectro característico: Cuando el voltaje alcanza un determinado valor, los electrones adquieren una energía capaz de arrancar los electrones de las capas más internas (capa K) de los átomos que forman el ánodo. En consecuencia, los electrones de capas más externas (capas L y M) pasan a ocupar tales intersticios moleculares produciéndose una emisión de radiación X con unas longitudes de onda específicas, K para la transición L-K y K β para la transición M-K. La radiación K β puede eliminarse con un filtro, mientras que la radiación K consta, en realidad, de dos picos muy próximos entre sí (K α_1 y K α_2) y que se pueden tomar promediados. Dependiendo del metal que forme el ánodo, la longitud de onda de la radiación K toma los valores que aparecen en las tablas.

Cuando los Rayos X inciden sobre los electrones de una distribución atómica, les hacen vibrar con su misma frecuencia y absorber parte de su energía, remitiéndola en todas las direcciones, dando lugar a fenómenos de interferencia. Pero sólo en determinadas direcciones se originan interferencias constructivas al producirse frentes de onda que están en fase, es decir, cuando se verifique:

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

siendo:

- n es un número entero,
- λ es la longitud de onda de los rayos X,
- d es la distancia entre los planos de la red cristalina y,
- θ es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión.

La expresión anterior constituye la Ecuación de Bragg y establece la condición para que un determinado espaciado entre planos reticulares (familia de planos reticulares) y una longitud de onda determinada de la radiación incidente, provoque la difracción o reflexiones en planos de la misma familia, con el resultado de una mancha en la película fotográfica.



Métodos de difracción:

Existen tres métodos experimentales de difracción de rayos X

a). Método de laue

Se utiliza un monocristal fijo sobre el cual se hace incidir un haz de Rayos X blancos en dirección perpendicular a la placa fotográfica.

El haz directo forma una mancha negra sobre la placa fotográfica, aunque se suele poner una chapa de plomo para interceptarlo y que no forme tal mancha.

Cada familia de planos reticulares formará su mancha característica.

El ángulo de incidencia entre el haz de Rayos X y los distintos planos reticulares con su espaciado d es fijo. Pero como se trata de Rayos X blancos, están presentes todas las longitudes de onda.

La Ley de Bragg se cumple siempre y cuando $(2d\sin\theta)/n$ esté incluido en el rango de longitudes de onda producidos por el tubo de Rayos X y aparecerán las manchas de difracción correspondientes a cada familia de planos reticulares.

El Método de Laue es útil para estudiar la simetría de los cristales, siempre y cuando el haz incidente sea paralelo a un elemento de simetría. Pero no resulta muy aplicable para la determinación de estructuras cristalinas pues resulta difícil saber los valores de la longitud de onda para los que se produce cada señal de difracción.

b). Métodos de cristal móvil

Para ampliar las aplicaciones de la difracción de los Rayos X, Bragg consideró que usando una radiación monocromática la única posibilidad para que se cumpla la condición de difracción para un espaciado determinado, es variar el ángulo.

Esto se consigue colocando el cristal en un sistema que gire, de tal manera que para cada valor de que cumpla la condición de difracción se produzca un punto en la película.

Con ello se puede saber cuáles son los planos reticulares asociados a cada difracción.

Existen numerosas técnicas basadas en esta idea (Weissenberg, Buerger, Jong y Boumann, etc.) y estos métodos son los más empleados actualmente para la determinación de estructuras cristalinas.



c). Método de polvo

Fue desarrollado por Debye y Scherrer en Alemania durante 1916. La mayoría de las veces no se dispone de cristales adecuados para realizar el Rayos X del monocristal, en este caso se utiliza el Método de Polvo. Con este método resulta difícil, aunque no imposible, la determinación de estructuras cristalinas. Es una técnica muy útil para el reconocimiento de especies minerales y también para estudiar numerosos procesos que afectan a las fases minerales.

Para realizar el difractograma de polvo hay que moler el material a un tamaño de 50 nm. La orientación de los microcristales es aleatoria. El portamuestras se hace girar, según un ángulo, con el fin de que el haz monocromático incida sobre la muestra en un rango que permita registrar las reflexiones.

Cuando un determinado plano reticular sea capaz de producir reflexiones que cumplan la condición de Bragg, se producirá una mancha o un pico en el difractograma, correspondiente a un determinado valor del ángulo (realmente se considera 2θ).

En un difractograma de polvo se obtiene un listado de picos de difracción, junto con su intensidad, en función del ángulo 2θ (ángulo de incidencia más ángulo de reflexión). Los valores se obtienen a partir de unas tablas de conversión específicas para cada metal que forma el anticátodo.

Para cada sustancia hay una ficha en que se dispone, entre otros datos, del listado de picos de difracción.

Esto sirve para comparar con el correspondiente a la muestra que se está estudiando.

B. Espectroscopia Infrarroja (IR)

Esta técnica espectroscópica se basa la absorción de energía que experimenta una sustancia cuando se la hace incidir una radiación infrarroja. La absorción de energía se produce cuando la radiación posee una longitud de onda capaz de excitar los niveles de vibración asociados a los enlaces.

El Espectro de Absorción Infrarroja muestra las bandas correspondientes a las vibraciones de los enlaces presentes en las sustancias.

Ello proporciona una información sobre la naturaleza de tales enlaces y es, por lo tanto, una ayuda para el establecimiento de las estructuras.

C. Espectroscopia Raman

Esta técnica resulta muy adecuada cuando, por las características estructurales de una sustancia, es un complemento a la Espectroscopia Infrarroja.

Si la Espectroscopia Infrarroja está basada en la medida de la energía absorbida por los enlaces para pasar de un estado de vibración a otro de mayor energía (estado excitado), la Espectroscopia Raman se basa en la energía dispersada por los campos eléctricos de los enlaces. (P. Kerr, 1965)

El Espectro Raman de una sustancia muestra las bandas correspondientes a las vibraciones de los enlaces presentes en las sustancias cuyos campos eléctricos son capaces de dispersar una radiación incidente.

Algunas vibraciones de enlaces son capaces de absorber energía y de dispersarla al mismo tiempo, en ese caso, presentarán banda en el Espectro IR y también en el Espectro Raman. Pero hay casos de vibraciones que no dispersan o que no absorben energía, en tal caso no mostrarán banda Raman o banda IR respectivamente.

D. Espectroscopia Ultravioleta/Visible/IR Cercano

Se basa en la medida de la energía necesaria para que se produzca un salto entre los niveles electrónicos.

El rango de energía empleado para producir tales saltos abarca tres zonas del espectro.

Esta técnica, tiene múltiples aplicaciones en las diversas ramas de la Química:

- Química orgánica: Permite detectar electrones deslocalizados y caracterizar enlaces múltiples y determinados grupos funcionales.
- Química física: Permite calcular energía de enlace, así como identificar grupos cromóforos¹⁰ y auxóchromos¹⁰¹. Es de gran importancia para la determinación estructural.
- Química analítica: Existen numerosos métodos cuantitativos basados en el uso de esa técnica.
- Química inorgánica: Se aplica para la caracterización de numerosos compuestos sólidos y especies en disolución, como por ejemplo, compuestos de coordinación.

6. Cristalografía:

Los minerales presentan, en su mayor parte, un ordenamiento interno de sus átomos y moléculas. Este ordenamiento no es exclusivo del mundo mineral y lo presentan casi todas las sustancias que se encuentran en estado sólido. El ordenamiento es la causa de que existan los cristales. Las sustancias que no presentan ordenamiento o lo presentan a corto alcance, se dice que son amorfas.

El ordenamiento interno implica una periodicidad (disposición repetitiva) de los átomos y moléculas que constituyen el cristal en las tres dimensiones del espacio.

Esta periodicidad da lugar a una serie de relaciones entre átomos y moléculas homólogos o equivalentes que conducen a las operaciones de simetría.

Se denomina operación de simetría a la acción consistente en llevar un átomo a otro lugar del espacio donde existe otro igual e indistinguible de él. El conjunto de las operaciones de simetría que se pueden establecer para una distribución periódica determinada constituye un grupo matemático al que se denomina grupo puntual o clase de simetría. En total existen 32 grupos puntuales o clases de simetría.

Las clases de simetría que poseen ciertas operaciones de simetría comunes se agrupan en 7 sistemas cristalinos, Cada uno de ellos, lleva asociada una celda o retículo mínimo que posee la misma simetría que el cristal (celda unidad), Las celdas unidad son siempre paralelepípedicas, pudiendo ser:

- Primitivas: Si contienen en total 1 átomo.
- Múltiples: Si contienen más de 1 átomo.

Esto quiere decir que dentro de cada celda múltiple se podrán tomar distancias interatómicas menores que los parámetros o medidas de dicha celda. Si se consideran 3 de estas distancias mínimas no coplanarias, se define un paralelepípedo que sólo posee átomos en los vértices. Estos paralelepípedos se denominan redes de bravais y son 14. Volviendo a las celdas unidad mencionadas anteriormente, veremos que cada una de ellas posee 6 parámetros característicos, 3 distancias y 3 ángulos formados por estas distancias. Estos parámetros son característicos de cada sistema cristalino. Los ángulos se miden con un instrumento denominado goniómetro. (P. Kerr, 1965).



Como puede observarse, el Sistema Trigonal presenta 2 posibilidades. La primera de ellas posee una red prismática de las mismas características que la celda unidad hexagonal, mientras que la segunda lleva asociada una red de Bravais romboédrica (Trigonal R). En este último caso resulta útil conocer los parámetros de dicha red romboédrica, es decir la arista $a_r h$ y el ángulo mínimo entre tales aristas $a_r h$. También puede resultar útil conocer los parámetros de la celda unidad (que será múltiple), pero fundamentalmente se suele considerar la relación entre la altura del prisma y la arista de la base.

En cuanto a las clases de simetría mencionadas anteriormente, constituyen la llamada forma (forma cristalina) de los cristales.

Finalmente, resulta útil conocer el número de fórmulas por celda unidad (Z). Cuando la celda es primitiva, $Z=1$.

7. Ambiente sedimentario

Cuando los minerales ígneos y metamórficos se ponen en contacto con la atmósfera y la hidrosfera, las condiciones físicas y químicas que les rodean son muy diferentes a las que tuvieron durante su formación, por ello deben adaptarse a las mismas, experimentando cambios químicos y mineralógicos, que permitan el establecimiento de un nuevo equilibrio. (A. del Valle, M.P. Niño, J. Medina, F. Rull, 1987)

Los procesos que se dan en los ambientes sedimentarios son de dos tipos, físicos y químicos.

La combinación de ambos tipos de procesos provoca la meteorización de las rocas y los posteriores procesos de erosión, transporte, sedimentación y consolidación (diagénesis). Los procesos físicos se encuentran controlados por la temperatura y otros factores climáticos, así como actividades biológicas que existen en la zona de meteorización.

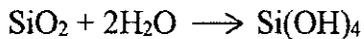
Los procesos químicos vienen dados por la presencia de agentes tales como el aire, el agua y otras sustancias que provocan reacciones de oxidación, disolución, hidrólisis, carbonataciones, etc.

Como consecuencia de lo anterior se producen una serie de materiales y que, en función de su origen y características, se clasifican del modo siguiente:



a). Resistatos:

Son los minerales que, como su nombre indica, resisten los fenómenos de meteorización o alteración, pero que han quedado libre de la roca madre al haberse alterado y desaparecido los demás componentes. Se consideran resistatos los minerales siguientes: Cuarzo, casiterita, magnetita, ilmenita, rutilo, zircón, monacita, etc. En realidad, todos estos materiales pueden estar afectados por fenómenos de alteración ya que, incluso la sílice es algo soluble en agua:



Aunque este procesos es muy lento y el ácido silícico es muy insoluble en agua (0.0002 mol/l).

La ortosa está considerada por algunos autores como un resistato, encontrándose en numerosas arenas y areniscas, pero se sabe que también se altera cuando está en ambientes húmedos y pasa a caolinita.

b). Hidrolisatos:

Se forman por la acción del agua o de disoluciones acuosas (hidrólisis) sobre aluminosilicatos.

Como consecuencia de la hidrólisis de feldespatos, se forman arcillas (si el clima es húmedo) o bauxitas (si el clima es tropical). La hidrólisis de piroxenos, anfíboles o micas da lugar a la formación de cloritas.

c). Oxidatos:

Ciertos cationes metálicos, como el Fe(II) y el Mn(II), que se encuentran en soluciones acuosas, se oxidan fácilmente a Fe(III) y a Mn(IV), los cuales precipitan en forma de óxidos (anhídros o hidratados), arrastrando incluso a otros elementos. De esta manera se han formado grandes depósitos de óxidos de Fe y Mn.

d). Carbonatos:

Cuando determinados cationes (Ca, Mg, Sr, Ba, Pb, Cu, Zn,...) se encuentran en disolución acuosa y la concentración de iones carbonato se hace suficiente, se produce la precipitación de una serie de carbonatos metálicos cuyo producto de solubilidad es bajo. Algunos de tales carbonatos son: Calcita, dolomita, magnesita y, en menor cuantía, estroncianita, witherita, cerusita, malaquita, azurita,



smithsonita, etc. En muchos casos el aporte de carbonatos corre a cargo de seres vivos.

e). Evaporatos:

La formación de los minerales anteriores da lugar a disoluciones residuales en las que una serie de iones forman sales cuando se produce la evaporación total o parcial del agua. Los iones mencionados son, en su mayor parte, alcalinos y alcalino-térreos que junto con determinados aniones (cloruros, sulfatos, nitratos, boratos, etc.) dan lugar a minerales tales como: Halita, silvinita, carnalita, polihalita, glauberita, yeso, anhidrita, thenardita, mirabilita, epsomita, hexahidrita, nitro, bórax, kernita, etc.

f). Reduzatos: Algunos autores incluyen aquí una serie de materiales en cuya formación han intervenido los seres vivos y que han aparecido en condiciones reductoras.

Los más importantes son los carbones y el petróleo. Junto a estos materiales pueden aparecer sulfuros de hierro.

Existen varias clasificaciones de rocas sedimentarias pues se pueden tomar varios criterios:

1. Atendiendo al tamaño de grano se puede hablar de:

- **Gravas:** Con tamaño de grano superior a 2 mm: Cantos rodados, cascajo, morrillos, grava, brechas.
- **Arenas:** Con tamaño de grano entre 0.02 y 2 mm: Arenas, areniscas, cuarcitas sedimentarias, grauvacas, arcosas.
- **Arcillas:** Con tamaño de grano inferior a 0.02 mm. También llamadas pelitas: Arcillas, limos, margas, loes, caolines.

2. Considerando la composición las rocas sedimentarias pueden ser:

- **Calcáreas:** Calizas (cretácicas, tableadas, oolíticas, fosilíferas, arrecifes), concreciones calcáreas (travertino, toba calcárea,



estalactitas, mármol, ónice, pisolitas), calizas lacustres (creta), dolomías, etc.

- **Silíceas:** Diatomitas (trípoli, kieselgur), pizarra silícea (líditas, etc.), pedernal (flint), rocas córneas, concreciones silíceas (geiserita), radiolarita, etc.
- **Fosfóricas:** Fosforita, guano.
- **Férricas:** Taconitas, minetas.
- **Salinas:** Sal gema, yesos, etc.
- **Carbones:** Antracita, hulla, lignito, turba.



V. REFERENCIALES

1. ALEXEIEV, V. N. **Semimicroanálisis Químico Cualitativo**. Rusia. Editorial Mir. Quinta edición. 1975.
2. ARANEO, ANTONIO. **Química Analítica Cualitativa**. Colombia. Editorial Mc Graw hill. Primera edición. 1981.
3. ASTOR VIGNAU, J. **Minerales básicos**. Barcelona. Editorial Edunsa. 1991.
4. BERMEJO, F. **Caracteres analíticos de los principales cationes**. España. Editorial Facultad de ciencias Santiago de Compostela. Tercera edición. 1970.
5. BERMEJO, F. **Tratado de Química Analítica**. España. Editorial Facultad de ciencias Santiago de Compostela. Quinta edición. 1974.
6. BURRIEL MARTI y otros. **Química Analítica Cualitativa**. España. Editorial Paraninfo. Decimoséptima edición. 2000.
7. BUSCARONS, F. **Análisis inorgánico cualitativo sistemático**. Barcelona. Editorial Martínez. Quinta edición. 1971.
8. CONCHON, J.A. **Tratamiento de Residuos Industriales Tóxicos y Peligrosos**. Santiago de Chile. Editorial Cides. Cuarta edición. 1991.
9. CORNELIS, L. **Reconocimiento de minerales**. España. Editorial Omega. 2001.
10. COTTON, F.A. y WILKINSON, G. **Química Inorgánica Avanzada**. Mexico. Editorial Limusa. 1971
11. DANA S, EDUARD FORD, E. **Mineralogía Química**. España. 1979.
12. DAVIS, A. **Risk Analysis**. Los Ángeles. Editorial Earth. Cuarta edición. 1997.
13. DEL VALLE, A, M.P. NIÑO. **Historia de la mineralogía y la Química mineral**. Valladolid. 1993
14. ELLIS, W., ESLICK, L. **Toxic pollutants**. New York. Editorial Marvin. Segunda edición. 1973.

15. GOYER, RA., DOULL, J. **Casarett and Doull's Toxicology**. New York. Ediciones Pergamon. Cuarta edición. 1991.
16. GUTIERREZ RIOS, F. **Química Inorgánica**. Barcelona. Editorial Reverté. 1978.
17. GONZÁLEZ, A., MARCOS, P., ANDRÉS, J., FRANCO, A. **Minerales estudio y reconocimiento**. Barcelona. Editorial omega. 1996.
18. HAGNI, R. **Mineralogía Para Químicos**. España. Editorial Urmo. 1986
19. KERR, P. **Mineralogía óptica**. Madrid. Editorial del Castillo. 1965.
20. LABORATORIO ANALÍTICO CERRO SAC. Cerro de Pasco. Perú
21. LUNA RANGEL, Raymundo. **Fundamentos de Química Analítica**. México. Editorial Limusa. Segunda edición. 1978.
22. MARTIN, A. **Introducción general al Análisis Cualitativo y Cuantitativo**. España. Universidad de Sevilla. 1979.
23. MASON, B. **Principios de Geoquímica**. España. Editorial Reverté. 1960.
24. MOORE, JHON W. **El mundo de la Química**. España. 2000.
25. MILOVSKI, A. KONOMOV, O.V **mineralogía**. Rusia, Editorial Mir. 1988
26. PECSOK, R.L. **Métodos modernos de Análisis Químicos**. México. Editorial Limusa. 1973.
27. PELLENT, C. **Mineralogía Química**. España. Editorial Reverté. 1993.
28. PICKERING, W.F. **Química Analítica Moderna**. España. Editorial Reverté. 1976.
29. PINO, F. **Técnicas experimentales de Análisis Cualitativo**. España. Editorial Urmo. 1979.
30. ROBERTS, W.L., Campbell, T.J., RAPP. G.R., REINHOLD, V. **Encyclopedia Of Minerals**. New York. 1990.
31. SANCHEZ BOTANERO, Pedro. **Química Analítica General**. España. Editorial Síntesis. Segunda edición. 2001.
32. VALCARCEL, M. y LOPEZ FERNANDEZ, J.M. **Tratamiento de equilibrios iónicos en disolución**. España. Editorial Sertesa. 1978
33. VOGUEL, A.I. **Química Analítica Cualitativa**. Argentina. Editorial Kapelusz. Quinta edición. 1974.



34. WALTON, H. y REYES, J. **Análisis Químico e instrumental moderno.**
España. Editorial Reverté. 1978
35. ZUMDAKE, M. **Mineralogía Química.** España. Editorial Reverté. 1992.

VI. APENDICES

6.1 PRODUCTOS OBTENIDOS DE LA IDENTIFICACIÓN DE MINERALES GRUPO I

ITEM	NOMBRE DEL PRODUCTO	FORMULA/COLOR
A	cloruro de plomo	$PbCl_2$
B	Hidróxido de plomo	$Pb(OH)_2$
C	carbonato de plomo	$PbCO_3$
D	yoduro de plomo	PbI_2
E	cromato de plomo	$PbCrO_4$
F	cloruro de mercurio I	Hg_2Cl_2
G	Cloruro de plata	$AgCl$
H	Cromato de plata	Ag_2CrO_4

Fuente. elaboracion propia

6.2 PRODUCTOS OBTENIDOS DE LA IDENTIFICACIÓN DE MINERALES
GRUPO II

ITEM	NOMBRE DEL PRODUCTO	FORMULA
A	sulfuro de mercurio II	HgS
B	óxido de mercurio II (HgO)	HgO
C	yoduro de mercurio II	HgI ₂
D	cromato de mercurio II	HgCrO ₄
E	hidróxido de cadmio	Cd(OH) ₂
F	sulfuro de cadmio	CdS
G	ferrocianuro de cadmio	Cd ₂ Fe(CN) ₆
H	hidróxido de cobre II	Cu(OH) ₂
I	ferrocianuro de cobre (II)	Cu ₂ Fe(CN) ₆
J	hidróxido de bismuto	Bi(OH) ₃
K	óxido de antimonio III	Sb ₂ O ₃
L	hidróxido de estaño	Sn(OH) ₂

Fuente: elaboración propia

6.3 SOLUBILIDAD EN AGUA Y COLORES DE SALES Y MINERALES

SUSTANCIA MINERAL	Color	Solubilidad en Agua
Compuestos de sodio, potasio y amonio		
NaCr_2O_4 , $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$, $\text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$	Amarillos	Solubles
$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	Anaranjado a rojo	Solubles
$\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$, $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$	Rojo	Solubles
KMnO_4	Violeta	Solubles
K_2MnO_4 , Na_2MnO_4 (manganatos)	Verde	Solubles
Cloroplatinato de potasio K_2PtCl_6 y el $(\text{NH}_4)_2\text{PtCl}_6$ Cloroplatinato de Amonio.	Amarillo	Insoluble
Polisulfuro de amonio, que es una mezcla de $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2 + (\text{NH}_4)_2\text{S}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{S}_5$	Amarillo	Medianamente Soluble
Compuestos de plata		
AgBr , AgI , AgAsO_2 (Arsenito de plata), Ag_3PO_4 (Fostato de plata)	Amarillo	Insoluble
pirargirita (Ag_3SbS_3),	Rojo oscuro o gris rojizo	Insoluble
samsonita ($\text{Ag}_4\text{MnSb}_2\text{S}_6$),	Negro acero	Insoluble
acantita (Ag_2S)	Gris, plomo a negro	Insoluble
miargirita (AgSbS_2),	Negro-acero con reflejos internos rojo-oscuros	Insoluble
AgCl	Blanco	Insoluble
AgNO_3	Rosa claro	Soluble
Ferricianuro $\text{Ag}_3\langle\text{Fe}(\text{CN})_6\rangle$	Anaranjado	Insoluble



Arseniato, Ag_3AsO_4	Rojo	Insoluble
Sulfuro, Ag_2S y el óxido, Ag_2O	Café a negro	Insolubles
Compuestos de plomo		
Yoduro (PbI_2), Cromato (PbCrO_4), litargirio (PbO)	Amarillo	Insolubles
Sulfuro (PbS)	Café a negro	Insoluble
Dióxido (PbO_2)	Café a rojizo	Insoluble
Minio (Pb_3O_4)	Rojo	Insoluble
zinkenita ($\text{Pb}_9\text{Sb}_{22}\text{S}_{42}$),	Gris acero	Insoluble
plagionita ($\text{Pb}_5\text{Sb}_8\text{S}_{17}$),	Negro, gris	Insoluble
Compuestos de Mercurio		
Yoduro mercúrico (HgI_2), Cromato mercúrico HgCrO_4	Rojo	Insolubles
livingstonita (HgSb_4S_6),	Gris a negro	
Yoduro mercurioso (Hg_2I_2)	Verde opaco	Insoluble
Sulfuro mercúrico (HgS)	Café a negro	Insoluble
Compuestos de bismuto		
Sulfuro (Bi_2S_3) y el yoduro BiI_3	Café a negro	Insolubles
Bicromato de bismutito (BiO_2) Cr_2O_7 , trióxido de bismuto (Bi_2O_3)	Amarillo	Insolubles
Compuestos de cobre		
tennantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$),	Gris a negro	Insoluble
calcopirita (CuFS_2),	Amarillo-latón, amarillo miel	Insoluble
Yoduro cúprico, CuI_2	Amarillo	Insoluble



Ferrocianuro cúprico $\text{Cu}_2\langle\text{Fe}(\text{CN})_6\rangle$, óxido cuproso Cu_2O	Café a rojizo	Insolubles
Oxido cúprico CuO	Negro	Insoluble
Sulfuro cúprico, CuS	Café a negro	Insoluble
Compuestos de Cadmio		
Sulfuro, CdS	Amarillo	insoluble
Oxido CdO	Amarillo-pardo	Insoluble
Compuestos de arsénico		
Arseniuro de níquel (NiAs)	Rojo cobre pálido	insoluble
Trisulfuro (As_2S_3), pentasulfuro (As_2S_5), arsenomolibdato de amonio $(\text{NH}_4)_3\text{AsO}_4 \cdot 12\text{MoO}_3$	Amarillo	Insolubles
Arsenito cúprico, $\text{Cu}(\text{AsO}_2)_2$	Verde	Insoluble
Arseniato de plata (Ag_3AsO_4)	Café rojizo a rojo	Insoluble
pirargirita (Ag_3SbS_3),	Rojo oscuro o gris rojizo	Insoluble
Compuestos de antimonio		
Pentasulfuro (Sb_2S_5) y el oxisulfuro Sb_2OS_2	Anaranjado	Insoluble
Trisulfuro, Sb_2S_3	Rojo a pardo	Insoluble
Compuestos de estaño		
Sulfuro estannoso, SnS	Pardo	Insoluble
Sulfuro estánico, SnS_2	Amarillo	Insoluble
Compuestos de aluminio		
Aluminato de cobalto, $\text{Co}(\text{AlO}_2)_2$	Azul brillante	Insoluble

Cloruro de aluminio , AlCl_3	Amarillo	Humos en humedad
Compuestos de cromo		
Oxido, Cr_2O_3 , hidróxido $\text{Cr}(\text{OH})_3$	verde	Insolubles
Cloruro, CrCl_3	Verde	Solubles
Trióxido, CrO_3	Rojo	Soluble
Alumbre de cromo y potasio $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 24 \text{H}_2\text{O}$	Violeta-rojizo	Soluble
Compuestos de cinc		
Zincato de cobalto, CoZnO_2	Verde Rinmann	Insoluble
Compuestos de manganeso		
Tricloruro, MnCl_3	Pardo	Insoluble
Oxido MnO , dióxido MnO_2 , trióxido Mn_2O_3 , tetraóxido Mn_2O_4 y eptóxido Mn_2O_7	Pardo a negro	Insolubles
Cloruro MnCl_2 , con 2,4 y 6 moléculas de agua, sulfato $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y los permanganatos de bario y plata $\text{Ba}(\text{MnO}_4)_2$, AgMnO_4 .	Rosa fuerte a pálido	Solubles
Sulfuro MnS , silicato MnSiO_3 , Carbonato MnCO_3 , fosfato mangánico $\text{MnPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y permanganatos no alcalinos	Rosa pálido a violeta	insolubles
Nitrato $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ y compuestos hidratados con 1,2,4 y 6 moléculas de agua	Rosa a incoloro	Solubles
Fosfato de manganeso y amonio $\text{MnNH}_4\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Blanco-rojizo	Insoluble
Trifluoruro MnF_3 y el manganicianuro de potasio $\text{K}_3\langle\text{Mn}(\text{CN})_6\rangle$	Rojo	Solubles
Manganocianuro de potasio $\text{K}_4\langle\text{Mn}(\text{CN})_6\rangle$	Azul	Soluble

Permanganatos de sodio NaMnO_4 , potasio KMnO_4 y calcio $\text{Ca}(\text{MnO}_4)_2$	Violeta-rojizo	Solubles
Manganatos M_2MnO_4 , M es el catión	Verde	Solubles
Compuestos de hierro		
Sulfuro FeS y el óxido FeO	Negro	Insolubles
Cloruro FeCl_2 con 1,2,4, y 6 moléculas de agua; cianuro $\text{Fe}(\text{CN})_2$; ferrocianuro de sodio y de potasio; yoduro FeI_2 , bromuro FeBr_2 y el nitrato $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.	Verde a amarillo	Solubles
Sulfato FeSO_4 con 1,5 ó 7 moléculas de agua. La sal de Mohr (sulfato ferroso amónico hexahidratado) $\text{FeSO}_4(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Verde azulado	Solubles
Ferrocianuro ferroso $\text{Fe}_2\langle\text{Fe}(\text{CN})_6\rangle$	Azul de turnbull	Insolubles
Sulfuro Fe_2S_3	Verde amarilla negro	Insoluble
Cloruro FeCl_3 y acetato, $\text{Fe}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_6(\text{OH})_3$ trihidroxihexacetato férrico	Pardo rojizo	Solubles
Fosfato dihidratado $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y el monocarbonilo $\text{Fe}(\text{CO})_9$	Blanco a amarillo	Insolubles
Sulfato $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	Amarillento	Soluble
Ferricianuro férrico $\text{Fe}\langle\text{Fe}(\text{CN})_6\rangle$	Verde claro	Insoluble
Tetracarbonilo $\text{Fe}(\text{CO})_4$	Verde oscuro	Insoluble
Ferrocianuro férrico $\text{Fe}_4\langle\text{Fe}(\text{CN})_6\rangle_3$	Azul de prusia	Insoluble
Oxido Fe_2O_3 y el hidróxido $\text{Fe}(\text{OH})_3$	Pardo rojizo	Insolubles
Sulfocianuro $\text{Fe}(\text{SCN})$ y el bromuro FeBr_3	Rojo sangre	Solubles

Nitrato nonahidratado $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ y el alumbre $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Violeta	Solubles
Compuestos de cobalto		
cobaltita (CoAsS),	Plata blanco rojizo, violeta,	Insoluble
Ferrocianuro $\text{Co}_2 \langle \text{Fe}(\text{CN})_6 \rangle$	Verde	Insoluble
Oxido CoO	Verdoso-negro	Insoluble
Sulfuro, CoS	Negro	Insoluble
Cloruro, CoCl_2	Azul pálido	Soluble
Cloruro mono y dihidratado	Violeta	Solubles
Cloruro y nitrato hexahidratado	Rojo	Solubles
Carbonato, CoCO_3	Rojizo	Insolubles
Hidróxido $\text{Co}(\text{OH})_2$ y el oxalato dihidratado, $\text{CoC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Rosa	Insolubles
Sulfato heptahidratado $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Rosa	Soluble
Silicato CoSiO_4	Violeta	Insoluble
Cianuro, $\text{Co}(\text{CN})_2$	Pardo	Insoluble
Ión complejo sulfocianuro cobaltoso $\langle \text{Co}(\text{SCN})_4 \rangle^{2-}$	Azul oscuro	Soluble
Oxido Co_2O_3	Negro	Insoluble
Hidróxido $\text{Co}(\text{OH})_3$	Pardo	Insoluble
Fluoruro CoF_3	Pardo	Soluble
Ferrocianuro, $\text{Co}_4 \langle \text{Fe}(\text{CN})_6 \rangle_3$	Rojo pardo	Insoluble
Compuestos de níquel		
Cianuro, $\text{Ni}(\text{CN})_2$	Verde	Soluble



Hidróxido $\text{Ni}(\text{OH})_2$, Carbonato NiCO_3 y el fosfato $\text{Ni}_3(\text{PO}_4)_2$	Verde claro	Insolubles
Nitrato hexahidratado $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Verde	Soluble
Sulfato NiSO_4	Amarillo-verdoso	Insoluble
Sulfuro, hidróxido, óxido	Pardo-negro	Insolubles

Fuente: elaboración propia



6.4 OPERACIÓN PULVERIZADORA EN EL ÁREA DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS INORGÁNICAS DE UN CENTRO MINERO.

FUENTE: ELABORACION PROPIA

- a) **Objetivo.**- Establecer una instrucción operativa para operar en forma adecuada el Pulverizador de anillos, de tal forma que se pulvericen las muestras a la granulometría requerida, sin alterar ni contaminarla y sin riesgos para el personal.
- b) **Campo de aplicación.**- El presente procedimiento operativo es de aplicación al área de Preparación de Muestras Inorgánicas del Laboratorio de un centro minero durante la preparación de las muestras
- c) **Documentos de referencia.**- Para la aplicación de la presente instrucción operativa no se requiere consultar otro documento.

d) Responsabilidades :

- El Jefe de laboratorio y el asistente de laboratorio químico son los responsables de implementar, mantener y hacer cumplir el presente procedimiento operativo.
- El Supervisor de Control de Calidad del Laboratorio Químico es el responsable de verificar el cumplimiento, mantener e implementar la presente Instrucción.
- Los preparadores de muestra son los responsables de conocer y aplicar el presente procedimiento operativo.

e) Consideraciones de seguridad y medio ambiente :

Uso obligatorio implementos básicos

- Lentes de seguridad
- Guantes de cuero
- Zapatos de seguridad
- Mameluco

- Mascarilla de media cara con filtros para polvos.
- e.1. Antes de proceder con el presente procedimiento cerciorarse que los equipos y materiales a usar se encuentren ordenados, limpios y operativos.
- e.2. Si se van a realizar tareas nuevas se hará un Análisis de Riesgo de las tareas a realizar.
- e.3. Realizar cualquier tarea teniendo en cuenta el compromiso de Prevención de la Contaminación y medio ambiente.

f) Especificaciones técnicas :

- Marca : Equipos
- Modelo de los equipos
- N° de Serie de los equipos
- Potencia y características del motor
- Intensidad del motor en amperios
- Ciclos: en unidades HZ
- Capacidad aproximada
- Accesorios de los equipos
- Características de los accesorios
- Dimensiones de los accesorios
- Incluir: una caja gabinete metálica con una tapa con dos amortiguadores neumáticos que sostienen la tapa del pulverizador permitiendo manipular el cabezal, con sistema de sujeción manual; un timer y recubrimiento antirruído

g) Equipos y materiales.- En la presente instrucción operativa es necesario el uso de los materiales y equipos :

g.1 Materiales:

- Olla de pulverizado
- Brocha para la limpieza de las ollas de pulverizado
- Papel Kraff , para el homogenizado y cuarteado de muestra

- Material de "Sílice" para limpieza interna de las ollas después de cada pulverizado de muestra.

g.2 Equipos:

- Estufa de Secado, para muestras
- Aire a presión para limpieza.

h) Procedimiento operativo

h.1 Requisitos iniciales:

- Verificar que las conexiones mecánicas y eléctricas se encuentren en buen estado
- Revisar que la pulverizadora esté apagada y el interior de ella se encuentre limpia.

h.2. Pasos a seguir:

- Prender el equipo extractor de polvos
- Asegurarse que toda la instalación esté limpia, especialmente las ollas de pulverizado. Limpiar bien con material de sílice y finalmente con aire comprimido
- Colocar la muestra necesaria a ser pulverizada dentro de la olla
- Presionar el botón de arranque (color verde)
- Alimentar el producto a ser procesado muy cuidadosamente, se pulveriza durante Un tiempo predeterminado a una granulometría de malla 140 mesh
- Finalizado el pulverizado se vierte el contenido en el papel Kraff, luego esta es homogeneizada para ser depositada en un sobre con su identificación respectiva}
- Concluido el pulverizado de la muestra, el pulverizador se limpia de muestra en muestra con sílice y/o arena estéril para evitar la contaminación
- Limpiar bien todo el ambiente. Apagar el equipo de extracción de polvos.

h.3 Recomendaciones:

- El control de la Operatividad del equipo se realiza a través del uso de la malla 140, para verificar la granulometría de la muestra y se usara el registro de Verificación de granulometría :
 - Estos controles se realizaran una vez por turno o guardia.
 - Reportar los resultados en una Carta de Control .Cualquier desviación de los criterios establecidos significa una no conformidad, que puede ameritar una acción preventiva o acción correctiva.
- El preparador debe usar todos los implementos de seguridad como: respirador contra polvos, gafas protectoras contra impactos y protectores de oídos.

i) Resultados esperados:

- Realizar la operación de pulverizado cumpliendo los estándares de calidad, con la finalidad de controlar las etapas de nuestro procesos productivo.
- Minimizar los riesgos de seguridad.

j) Acción inmediata para corrección:

- ✓ Anomalías: No alcanzar la granulometría necesaria.
- ✓ Posibles causas: Falla en los ajustes de tiempo de pulverizado, desgaste de los anillos o tambor de las ollas.
- ✓ Soluciones: Coordinar su revisión y mantenimiento

6.5 OPERACIÓN DE LAS CHANCADORAS EN EL ÁREA DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS INORGÁNICAS DE UN CENTRO MINERO (Fuente: elaboración propia)

- 1. Objetivo.-** Establecer un procedimiento operativo para operar en forma adecuada las Chancadora de mandíbula fina, evitando introducir contaminantes y riesgos al personal.
- 2. Campo de aplicación.-** El presente procedimiento operativo es de aplicación al área de Preparación de Muestras Inorgánicas de un laboratorio de un centro minero.
- 3. Documentos de referencia.-** Para la aplicación de la presente instrucción operativa no se requiere consultar otro documento.
- 4. Responsabilidades**
 - El Jefe de laboratorio y el asistente de laboratorio químico son los responsables de implementar, mantener y hacer cumplir el presente procedimiento operativo.
 - El Supervisor de Control de Calidad del Laboratorio Químico es el responsable de verificar el cumplimiento, mantener e implementar la presente Instrucción.
 - Los preparadores de muestra son los responsables de conocer y aplicar el presente procedimiento operativo.
- 5. Consideraciones de seguridad y medio ambiente**
 - Uso obligatorio de los implementos básicos :
 - Lentes de seguridad
 - Guantes de cuero
 - Zapatos de seguridad
 - Mameluco
 - Mascarilla de media cara con filtros para polvos.

5.1 Antes de proceder con el presente procedimiento cerciorarse que los equipos y materiales a usar se encuentren ordenados, limpios y operativos.



5.2 Si se van a realizar tareas nuevas se hará un Análisis de Riesgo de las tareas a realizar.

5.3 Realizar cualquier tarea teniendo en cuenta el compromiso de Prevención de la Contaminación y medio ambiente.

6. Especificaciones técnicas :

- Potencia del Motor: KW, hp
- Máximo tamaño de alimentación: 50 mm, 2", etc.
- Tamaño proa.
- Medidas: ancho, profundidad, altura, peso, ancho de mandíbula
- Apertura inferior: Ajustable
- Recipientes para muestras:
- Suministro de contenedores plásticos de PP .
- Accionamientos de equipos.

7. Equipos y materiales.- En la presente instrucción operativa es necesario el uso de los materiales y equipos :

7.1 Materiales:

- Bandejas colectora.
- Espátulas.

7.2 Equipos:

- Estufa de Secado, para el secado de muestras
- Aire a presión para limpieza.

8. Procedimiento operativo :

8.1 Requisitos de inicio:

- Verificar que las conexiones mecánicas y eléctricas se encuentren en buen estado.
- Revisar que la chancadora esté apagada y el interior de ella se encuentre limpia.
- A fin de asegurarse que las fuerzas producidas en la trituración estén uniformemente repartidas a través de los rodillos de ajuste, el rodillo debe estar en contacto con la espalda de la mandíbula en todo su ancho.

La verificación recomendada es “La prueba del Papel”. Esta prueba, asegura que los rodillos estén tanto paralelos como bien en contacto con las mandíbulas.

- Realizar el encendido del equipo a través del interruptor on / off.

8.2 Pasos a seguir:

- Prender el equipo de extractor de polvos
- Asegurarse que toda la instalación esté limpia, especialmente que no exista nada entre las mandíbulas. Limpiar bien con aire comprimido
- Colocar el depósito que colectará el material procesado al final del chut de descarga
- Presionar el botón de arranque. Esperar que se estabilice el equipo por lo menos unos 60 segundos en funcionamiento
- Alimentar el producto a ser procesado muy cuidadosamente en forma pausadamente, nunca debe de llenarse totalmente el espacio entre las quijadas
- Después de procesar un lote, recuperar los finos con la ayuda de aire comprimido antes de procesar otro lote. De ser necesario apagar la chancadora presionando el botón de parada (botón rojo) y limpiar con aire comprimido. Nunca debe de introducir la mano entre las mandíbulas cuando el equipo está en funcionamiento
- Al terminar el trabajo, limpiar bien toda la chancadora usando aire comprimido
- Apagar la Chancadora presionando el botón de parada (color rojo)
- Limpiar bien todo el ambiente. Apagar el equipo de extracción de polvos.

8.3 Recomendaciones:

- El control de la Operatividad del equipo se realiza a través del uso de la malla 10, para verificar la granulometría de la muestra y se usara el registro de Verificación de granulometría por cada turno.

- En caso de producirse algún ruido extraño, apagar inmediatamente el equipo y avisar al área de mantenimiento
- Las muestras de tamaño mayor a 12.70 cm (5") se deben de romper previamente en la chancadora primaria
- El preparador debe de usar todos los implementos de seguridad como: respirador contra polvos, gafas protectoras contra impactos y protectores de oídos.

9. Resultados esperados:

- Realizar la operación de la chancadora cumpliendo los estándares de calidad, con la finalidad de controlar las etapas de nuestros procesos productivos
- Minimizar los riesgos de seguridad.

10. Acción inmediata para corrección:

- **Anomalías:** No alcanzar la granulometría deseada
- **Posibles causas:** Falla en los ajustes de las mandíbulas, falla en las fajas, desgaste de las placas.
- **Soluciones:** Coordinar su revisión y mantenimiento

VII: ANEXOS**7.1. ESCALA DE DUREZA DE MOHS**

TABLA N° 7.1
ESCALA DE DUREZA DE MOHS

SUSTANCIA	NUMERO DE DUREZA
Talco (metasilicato ácido de magnesio) $(\text{SiO}_3)_4\text{H}_2\text{Mg}_3$	1
Yeso, (sulfato de calcio), $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; sal común (NaCl)	2
Calcita, (Carbonato de calcio), CaCO_3	3
Fluorita, (fluoruro de calcio), CaF_2	4
Apatita, (Fosfato y fluoruro de calcio) , $\text{Ca}_4(\text{CaF})(\text{PO}_4)_3$	5
Feldespato (silicato doble de aluminio y potasio) KAlSi_3O_8	6
Cuarzo (dioxido de silicio en cristales), SiO_2	7
Topacio (silicato doble de aluminio y sodio), $\text{AlNaSi}_3\text{O}_8$	8
Corindón (zafiro blanco, óxido de aluminio puro), Al_2O_3	9
Diamante (carbono puro en cristales del sistema hexagonal)	10

[Fuente: Raymundo Luna Rangel]



7.2 ESCALA DE FUSIÓN DE MINERALES

TABLA N° 7.2
ESCALA DE FUSIÓN DE MINERALES

NÚMERO	MINERAL TIPO	p.f (°C)	OBSERVACIONES
1	Antimonita	525,00	Funde con una cerilla
2	Natrolita	800,00	Funde con mechero de gas
3	Almandino	1050,00	Sólo funden trozos pequeños
4	Actinolita	1200,00	Funde al soplete
5	Ortosa	1300,00	Funde difícilmente al soplete y se redondean los cristales
6	Broncita	1400,00	Sólo funden trozos pequeños
7	Cuarzo	1710,00	Infusible al soplete

Fuente: Dana S., Edward Ford E., 1979



7.3 ESCALA DE PERMEABILIDAD MAGNÉTICA

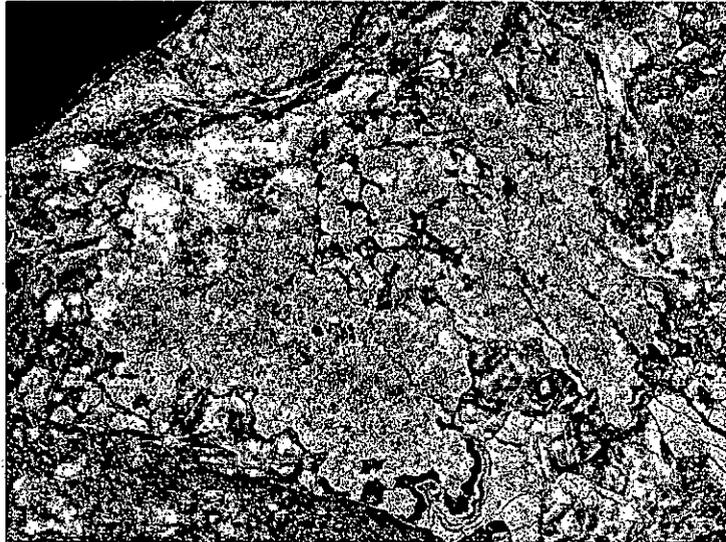
TABLA N° 7.3
ESCALA DE PERMEABILIDAD MAGNÉTICA

TIPO DE MAGNETISMO	MINERAL	PERMEABILIDAD RELATIVA
Ferromagnéticos	Hierro	100
	Magnetita	40,18
	Franklinita	35,38
	Ilmenita	24,7
Paramagnéticos	Pirrotina	6,69
	Siderita	1,82
	Hematites	1,32
	Goethita	0,84
	Pirrolusita	0,71
Diamagnéticos	Granates	0,4
	Guarzo	0,37
	Cerusita	0,3
	Pirita	0,23
	Dolomita	0,22
	Mispiquel	0,15
	Magnesita	0,15
	Calcopirita	0,14
	Yeso	0,12
	Cinabrio	0,1
	Cuprita	0,08
	Smithsonita	0,07
	Ortosa	0,05
	Galena	0,04
Calcita	0,03	

Fuente: C. Pellent, 1993

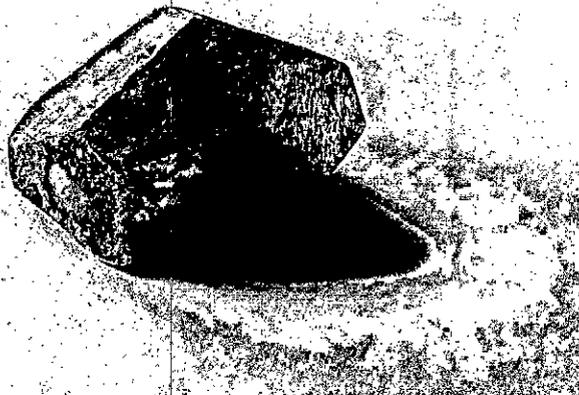
7.4 FIGURAS DE MINERALES

**FIGURA N° 7.3.1
MINERAL DE ARSENICO (NiAs)**



Fuente: Pellent, C. Mineralogía Química

**FIGURA N° 7.3.2
MINERAL DE COBALTO (CoAsS)**



Fuente: Dana S., Eduard Ford, E. Mineralogía Química.



FIGURA 7.3.3
MINERAL DE COBRE (CuFeS_2)



Fuente: Dana S., Eduard Ford, E. Mineralogía Química.

FIGURA 7.3.4
MINERAL TENNANTITA ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$)



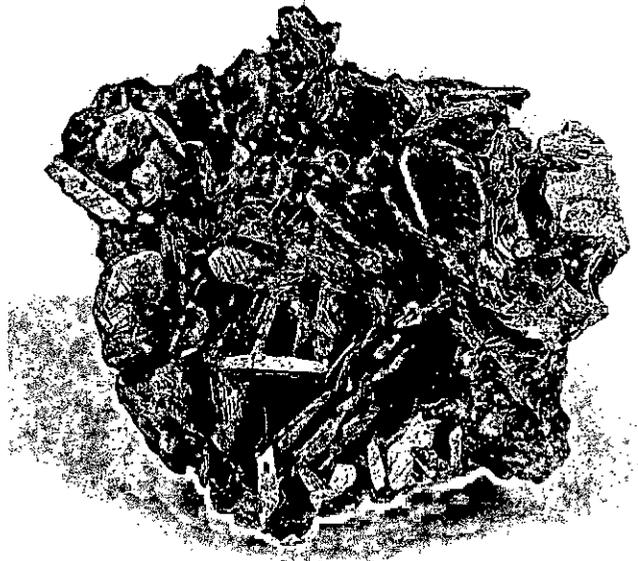
Fuente: Dana S., Eduard Ford, E. Mineralogía Química.

FIGURA 7.3.5
MINERAL BORNITA ($Cu_5Fe_4S_4$)



Fuente: A. del Valle, M.P. Niño. Mineralogía Y La Química Mineral.

FIGURA 7.3.6
MINERAL PLAGIONITA ($Pb_5Sb_8S_{17}$)



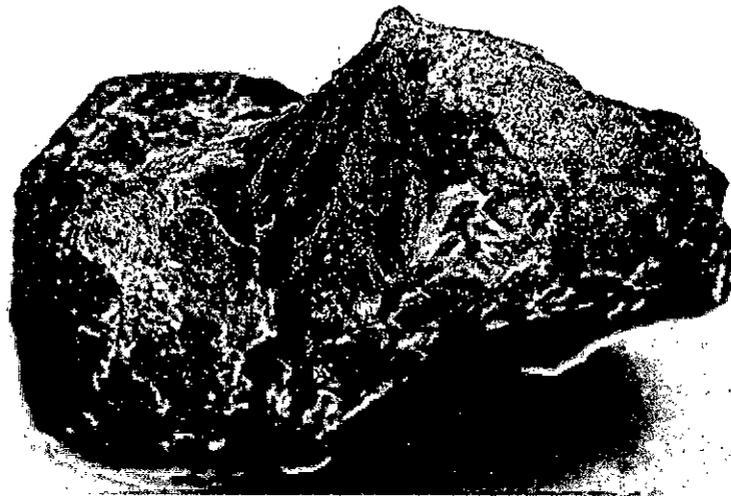
Fuente: A. del Valle, M.P. Niño. Mineralogía Y La Química Mineral.

FIGURA 7.3.7
MINERAL ZINKENITA ($Pb_9Sb_{22}S_{42}$)



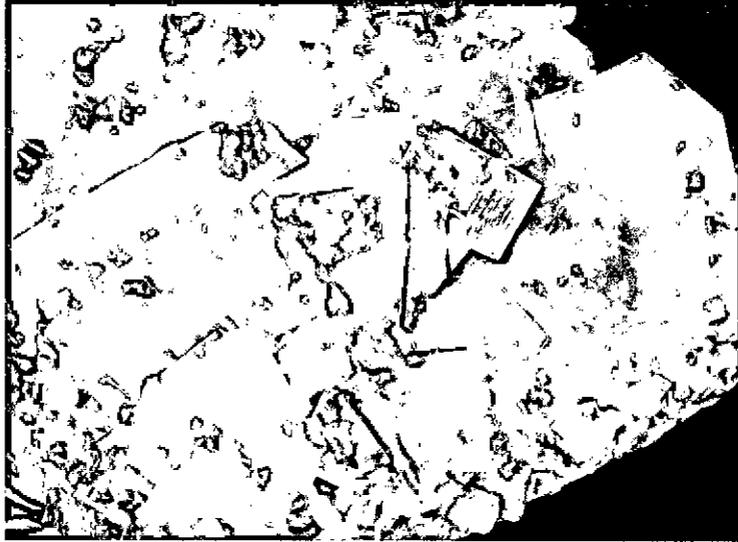
fuelle: C. Pellant. Manual De Identificaci3n De Rocas y Minerales.

FIGURA 7.3.8
MINERAL MIARGIRITA ($AgSbS_2$)



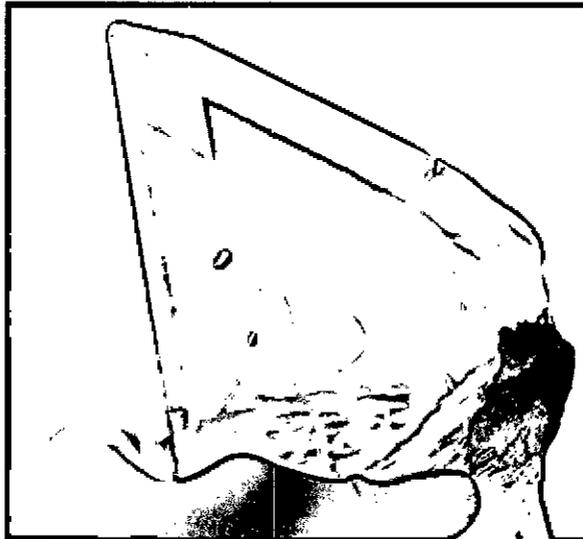
Fuente: C. Pellant. Manual De Identificaci3n de Rocas y Minerales.

FIGURA 7.3.9
MINERAL FLUORITA (CaF₂)



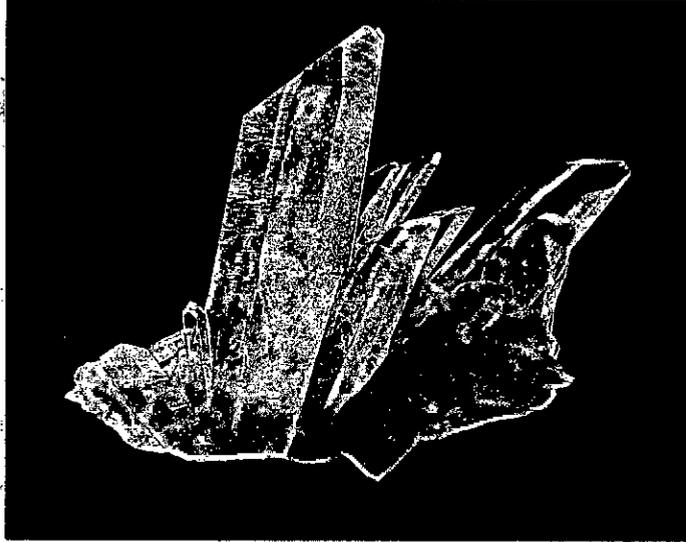
Fuente: Roberts, W.L., Campbell, T.J., Encyclopedia Of Minerals

FIGURA 7.3.10
MINERAL SELENITA (CaSO₄ · 2H₂O)



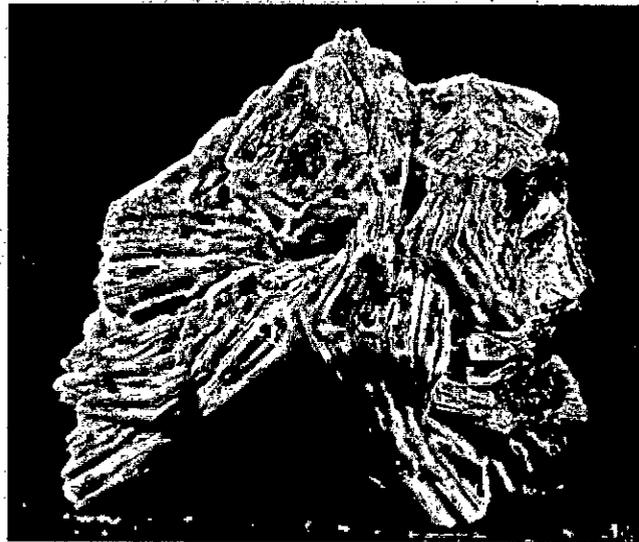
Fuente: Roberts, W.L., Campbell, T.J., Encyclopedia Of Minerals

FIGURA 7.3.11
MINERAL CUARZO (SiO₂)



Fuente: Roberts, W.L., Campbell, T.J., Encyclopedia Of Minerals

FIGURA 7.3.12
MINERAL AUTUNITA [Ca(UO₂)₂(PO₄)₂·10-12H₂O]



Fuente: Roberts, W.L., Campbell, T.J., Encyclopedia Of Minerals