

ENRIQUECIMIENTO DE FELDESPATOS DE AYDIN QUE CONTIENEN MINERALES MÁFICOS MEDIANTE EL MÉTODO DE CLASIFICACIÓN ÓPTICA

Yıldız Yıldırım¹, Kağan Kayacı¹, Ş. Can Genç^{1,2}, Elif Solak¹, Ahmet Bahri Güngör¹, Aykut Keskin¹

1 Kaleseramik Çanakkale Kalebodur, Çan, Turquía

2 Istanbul Technical University, Facultad de Minas, Estambul, Turquía

RESUMEN

Los feldespatos de Anatolia occidental (Turquía), uno de los recursos minerales más importantes de la industria cerámica y del vidrio, suelen encontrarse junto con minerales máficos. Sin embargo, la presencia de minerales máficos afecta negativamente a la calidad y al valor de mercado del concentrado de feldespato y causa problemas en la fabricación de productos cerámicos. En este estudio, proponemos un enfoque innovador para el enriquecimiento de los feldespatos de Aydın (Anatolia occidental), utilizando el método de clasificación óptica para separar eficazmente el feldespato de los minerales máficos en función de sus diferentes propiedades ópticas. La metodología de la investigación consistió en una serie de experimentos a escala de laboratorio, incluidos análisis mineralógicos y químicos, pruebas de clasificación óptica y caracterización de los productos procesados. Inicialmente, las muestras de feldespato de Aydın se sometieron a exhaustivas investigaciones mineralógicas y químicas para determinar su composición e identificar los minerales máficos asociados. Los resultados revelaron la presencia de minerales como hematita, turmalina y moscovita, que contribuyen a reducir la calidad del feldespato.

Para superar esta dificultad, se utilizó un sistema de clasificación óptica para separar los granos de feldespato de los minerales máficos asociados. Se realizaron pruebas de separación optimizando diversos parámetros del tamaño del material alimentado para lograr la máxima eficacia. Los productos separados se analizaron posteriormente para evaluar la eficacia del proceso de separación (FRX, DRX y propiedades en cocido). Los resultados de este estudio demostraron que el método de clasificación óptica mejoró eficazmente el concentrado de feldespato mediante la eliminación selectiva de los minerales máficos. Las muestras de feldespato procesadas presentaban una calidad mejorada, con concentraciones reducidas de minerales perjudiciales. La optimización de los parámetros de clasificación permitió mejorar la eficacia de la separación, con un aumento considerable de la recuperación y la pureza del feldespato. El método propuesto para el enriquecimiento de los feldespatos de Aydın mediante clasificación óptica proporciona una solución prometedora para la industria minera, permitiendo una utilización eficiente de los recursos minerales y mejorando la viabilidad económica de los yacimientos de feldespato. Además, la aplicación exitosa de este método contribuye a las prácticas sostenibles de procesamiento de minerales mediante la reducción de la generación de residuos y los impactos ambientales asociados con las técnicas convencionales de beneficio.

INTRODUCCIÓN

Anatolia occidental en Turquía ocupa el primer lugar en Europa en términos de potencial y producción de feldespato sódico. En 2022, se exportaron unos 8 millones de toneladas de feldespato sódico y hay un consumo interno de 2,5 millones de toneladas. Por lo tanto, Anatolia occidental tiene una producción anual de 10 millones de toneladas de feldespato [1]. Por este motivo, los recursos de feldespato sódico de Anatolia occidental se consumen rápidamente día a día y no existe ninguna materia prima natural alternativa para sustituirlos. Esta situación ha traído a la agenda el uso de rocas feldespáticas que contienen menos del 7% de Na_2O , lo que hoy en día se define como pobre / baja calidad.

Para utilizar los recursos de esta materia prima natural con bajo contenido de Na_2O , se requiere de una serie de procesos de beneficio mineral. El más conocido y utilizado es el método de flotación. Otro es la clasificación óptica. A veces, estos dos métodos se utilizan combinados. El método de beneficio óptico se ha utilizado ampliamente en los últimos años, especialmente en la industria alimentaria para la clasificación por tamaño de los granos y para separar los materiales extraños, como fragmentos de rocas, de los granos.

El principal parámetro utilizado en el enriquecimiento óptico son las propiedades ópticas, como el color, el brillo y la transparencia entre los materiales que deben recuperarse. Los feldespatos sódicos de Anatolia occidental, objeto de este estudio, contienen componentes de color claro y oscuro, transparentes y opacos, similares a las impurezas del sector alimentario.

Los feldespatos sódicos de Anatolia occidental proceden de las regiones de Aydın, Çine, Gördes y Milas (Muğla). El material son gneises de color claro y migmatitas albiticas del macizo metamórfico de Menderes. Las albitas (feldespato sódico) de las formaciones migmatíticas son de color blanco y en su mayoría puras. No es necesario ningún proceso de enriquecimiento para estas secciones. En efecto, tales zonas de materia prima contienen más del 9% de Na_2O en el peor de los casos, llegando incluso al 11%.

Las materias primas ricas en feldespato sódico asociadas a gneises (prácticamente gneises albiticos) contienen minerales opacos de óxido de hierro, rutilo, micas blancas y negras (moscovita, biotita) y turmalina. Es muy fácil separar los minerales opacos, la biotita, el rutilo y la turmalina del material de partida mediante un método óptico. Sin embargo, resulta algo difícil distinguir entre minerales de color similar, como el cuarzo y el feldespato.

El método de enriquecimiento óptico puede separar con éxito los componentes de color oscuro y claro entre sí, pero resulta problemático en el caso de minerales con el mismo color y lustre. Las propiedades texturales del material de partida también son importantes. En particular, el tamaño de liberación del grano parece ser un factor muy significativo.

La muestra de feldespato sódico enriquecida en este estudio procedía de las regiones previamente mencionadas. Tras realizar análisis mineralógicos y petrográficos en las muestras, se determinaron los tamaños de liberación de los granos mediante molienda y se prepararon las muestras para el enriquecimiento óptico. Tras una serie de procesos, se consiguió un enriquecimiento significativo en la proporción de feldespato sódico.

Con este método, los gneises con bajo contenido en albita, que aún no se utilizan, pasarán a ser aprovechables y también será posible utilizar materias primas que se desechan como residuos. Los procesos de enriquecimiento óptico garantizarán la sostenibilidad a largo plazo de los recursos de feldespato sódico de Anatolia occidental.

MATERIALES Y EXPERIMENTAL

MATERIALES

Para investigar los parámetros de enriquecimiento óptico de los feldespatos de Anatolia occidental, recogimos cuatro muestras representativas de las zonas de Aydın, Çine, Gördes y Milas (Muğla) (Fig 1). Se prepararon como mínimo 100 kg de muestra para los ensayos de enriquecimiento.

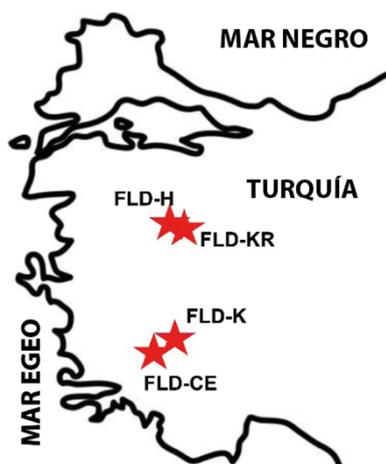


Fig 1. Localización en la imagen de Google Earth de las muestras estudiadas.

EXPERIMENTAL

La composición química de las materias primas se determinó con un espectrómetro de FRX Panalytical Axios. Las muestras se secaron a 105 °C durante 2 h. A continuación, 1 g de muestra seca se coció a 1000 (± 50) °C para determinar la pérdida por calcinación (PPC) de acuerdo con la norma EN 15309. Las muestras se prepararon inicialmente como perlas fundidas para FRX. Las perlas fundidas se crearon mezclando una muestra finamente molturada ($< 63 \mu\text{m}$) con un fundente (mezcla de tetraborato/metaborato de litio) en una proporción fundente/muestra de 9:0,9 y, a continuación, se calentaron a 1050 °C en un crisol de platino.

La composición mineralógica de las materias primas se determinó con un difractor PANalytical X'Pert Pro MPD. Los datos de DRX se recogieron en una geometría vertical Bragg-Brentano (θ/θ) (modo de reflejo rápido) 2θ entre 3° y 70° en pasos de 2θ de 0,02° y tiempo de recuento de pasos de 1 s. El tubo de rayos X (radiación Cu K α) funcionaba a 45 kV y 40 mA. En la trayectoria del haz incidente se montaron una rendija de divergencia de 1/2°, una rendija soller (0,04 rad) y una máscara fija de 10 mm. Se utilizó el método de Rietveld para determinar los resultados cuantitativos de DRX.

La microscopía óptica se basa en la interacción de la luz con los minerales. Con la muestra de feldespato se observó la interacción de la luz con los minerales albita, mica, cuarzo y anfíbol en un microscopio óptico Leica.

Los tamaños y formas de los minerales del feldespato se examinaron con un microscopio polarizador Leica modelo DM7500. Para las mediciones de color se utilizó el colorímetro X-rite SP62. Se utilizó el clasificador óptico SEA TRUER (5 canales) de la marca CIMBRIA para separar los minerales de color oscuro, la mica y el cuarzo en el feldespato sódico. La clasificación óptica es el proceso automatizado de clasificación de productos de materias primas mediante cámaras y/o láseres. Dependiendo de los tipos de sensores utilizados y de la inteligencia basada en el software del sistema de procesamiento de imágenes, las clasificadoras ópticas pueden reconocer el color, el tamaño, la forma, las propiedades estructurales y la composición química de un objeto.

EXPERIMENTAL

PETROGRAFÍA

Antes de la molienda de los materiales, se prepararon 5 secciones delgadas para las muestras representativas. Después se examinaron con el microscopio de polarización. Estos estudios revelaron que los materiales son gneis micáceo, paragneis leucocrático y gneis albítico (Figs 2a-d). Se reconocen texturas de esquistosidad bandeada y gneísica (Figs 2a, b, c). Junto a éstas, se describen texturas cataclásticas augen y porfiroblásticas. Estas rocas están formadas principalmente por cuarzo, feldespatos (sódicos y potásicos), micas biotita y moscovita junto con una cantidad subordinada de turmalina de color negro, minerales opacos (óxido de hierro), esfena, rutilo y paragénesis de circón (Figs 2a-c). Los gneises feldespáticos de las 4 áreas de Anatolia occidental están comúnmente intercalados con los esquistos de dos micas (Fig 2d). Por esta razón, la contaminación por mica y óxidos de hierro se produce durante las actividades de extracción de las materias primas feldespáticas.

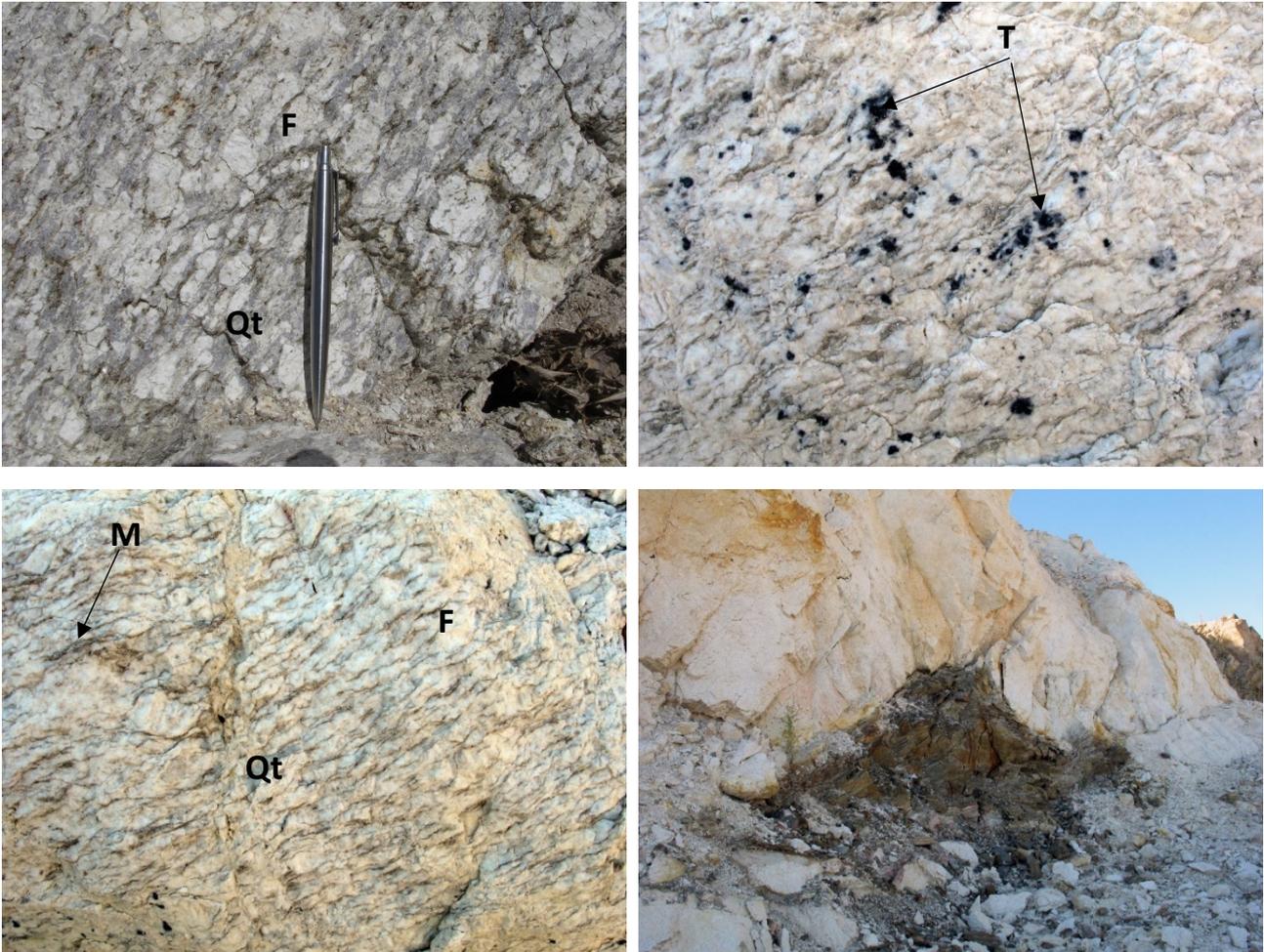


Fig 2a, b, c, d. Vistas en primer plano de los gneises feldespáticos de Anatolia occidental (a, b, c) y vista de afloramiento de las albititas (d) (Qt: cuarzo, F: feldespatos, M: biotita, T: turmalina).

SENSACIÓN ÓPTICA

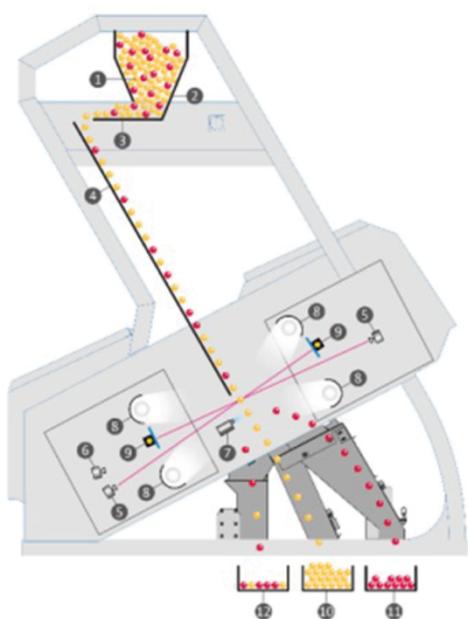
Las materias primas como los feldespatos, el granito, el cuarzo y el caolín utilizadas en la industria cerámica contienen impurezas intrínsecas en sus estructuras. Estas estructuras, ricas en hierro, titanio y metales, reducen la calidad del producto. Para eliminar estas impurezas, existen diferentes métodos de enriquecimiento [2]. El método de separación o enriquecimiento óptico es uno de ellos. En este estudio, el método de separación óptica se utiliza para garantizar el uso de los recursos de feldespato, cuyo uso está limitado debido a su bajo contenido de Na_2O .

La clasificación óptica ayuda a mejorar la calidad del producto, maximizar el rendimiento y aumentar la producción, reduciendo al mismo tiempo los costes de mano de obra.

El desarrollo de los clasificadores ópticos ha evolucionado simultáneamente con el avance de la tecnología. La clasificación óptica permite separar las partículas granulares entre sí debido a las diferencias en la reflectividad de la luz, el color y la transmitancia. Debido a estas propiedades, los clasificadores ópticos se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde la minería y el tratamiento de residuos hasta la industria alimentaria [3, 4, 5, 6].

Las principales ventajas de la clasificación óptica son las siguientes [7]: a) Reducción del consumo de energía, b) Uso eficiente de los recursos minerales, c) Reducción de las necesidades de agua, d) Reducción del impacto ambiental, y e) Aumento de la calidad.

Se utilizó el método de separación/clasificación óptica, que es más rápido, barato y sencillo que el método de flotación para separar impurezas como hierro, mica y turmalina en feldespatos de Anatolia occidental. Se utilizó la máquina de 5 canales modelo SEA TRUER desarrollada por SEA CIMBRIA ®Italia ubicada en los laboratorios de NTS machinery Mersin (Turquía).



PROCESO

1. Producto a clasificar
2. Tolva de alimentación
3. Alimentador vibrante
4. Tolva de alimentación
5. Cámaras RGBN (Color completo + Infrarrojo cercano/NIR)
6. Cámaras InGa As (opcional)
7. Sistema de eyección.
8. Iluminación
9. Retroiluminación
10. Salida de producto clasificado
11. Salida de rechazo
12. Salida de rebote



Fig 2. Esquema general del clasificador óptico Sea Truer [8]

El equipo consta de una bandeja de alimentación y una placa de flujo, una cámara/sensor de barrido lineal, válvulas de soplado de aire (boquilla) y fuentes de luz (Fig. 2). La eficacia del sistema se basa en la combinación de criterios de color real, tamaño de partícula, brillo y forma [5, 9]. El número de cámaras y el tipo de sensores a utilizar se seleccionan en función del tipo de material a clasificar. La velocidad de escaneo varía en función de la granulometría del material. Las imágenes tomadas con la cámara integrada sensible a la luz visible se transfieren al software con codificación RGB (rojo, verde, azul). La clasificación óptica se realiza por partículas. Aunque la clasificación es teóricamente posible con partículas de hasta 0,5-1 mm mediante el uso de cámaras de alta resolución, no se recomienda de forma generalizada en el procesamiento de minerales debido a la reducción de la capacidad. Por razones económicas y técnicas se prefieren las aplicaciones por encima de 10-20 mm.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las materias primas se trituraron inicialmente con una trituradora de mandíbulas de laboratorio y se redujeron a un tamaño de partícula inferior a 10 mm. Posteriormente, la muestra triturada se secó a 120°C hasta obtener un peso constante. Sobre estos materiales se realizaron análisis químicos y mineralógicos mediante FRX y DRX.

Los resultados de los análisis químicos se presentan en la Tabla 1 para las 4 muestras estudiadas.

Muestra	Contenido %									
	PPC	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
FLD-K	0,4	66,96	19,27	0,54	0,27	1,81	0,72	9,04	0,48	0,25
FLD-H	0,73	72,46	16,31	0,12	0,39	0,58	0,06	4,66	4,44	
FLD-KR	0,42	72,69	15,92	0,17	0,3	0,28	0,01	4,73	5,35	
FLD-CE	1,24	68,71	17,56	0,47	0,67	0,63	0,66	8,57	0,95	0,35

Tabla 1. Análisis químico global de las materias primas feldespáticas (las designaciones FLD-K, -C, -H, -KR y -CE indican que las muestras proceden de las diferentes zonas. PPC: pérdida por calcinación).

De la Tabla 1 se desprende que las materias primas tienen composiciones químicas variables. Especialmente Na₂O y K₂O dependen del feldespato sódico y del potásico respectivamente, el óxido de hierro se muestra como contenido de Fe₂O₃. El MgO y parte del Fe₂O₃ proceden de micas negras como la biotita y la flogopita. Para comprobar esta hipótesis, hemos realizado el análisis mediante DRX de estos materiales (Fig. 3). En la Tabla 2 se muestran los resultados de la DRX para los materiales que aparecen en la Tabla 1. El cuarzo, la albita (feldespato sódico), la ortoclasa (feldespato potásico) y, en parte, la moscovita son los principales constituyentes. La Tabla 2 también indica la fuente de hierro y magnesio que es mica ferrosa (Fe-mica) (comúnmente biotita y flogopita).

	FLD-K	FLD-H	FLD-KR	FLD-CE
Cuarzo	3,1	36,83	34,6	10,67
Albita	86,12	33,62	36,78	81,7
Ortoclasa		23,36	17,81	1,26
Moscovita	1,59	5,34	6,94	5,75
Mica ferrosa	1,48			
Clorita	3,78			
Turmalina	0,2	0,86		
Mineral con titanio				
Anfíbol	0,61			

Tabla 2. Resultados de DRX de las muestras de la Tabla 1.

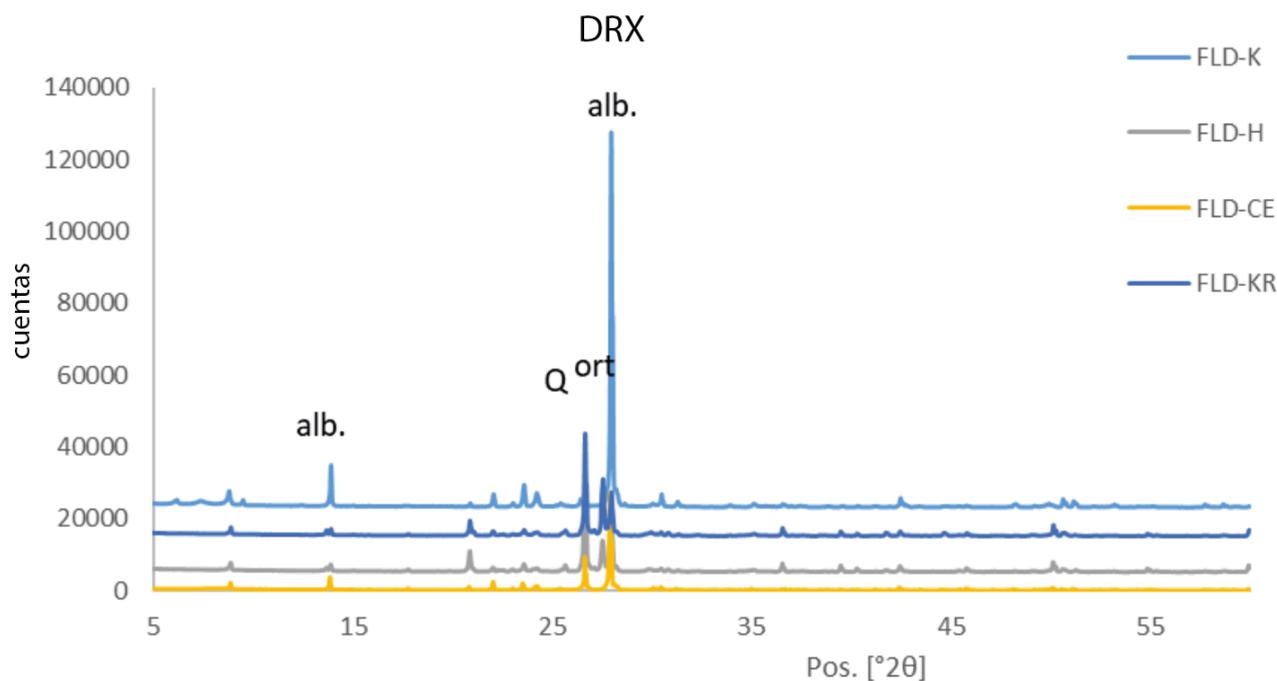


Fig 3. Diagramas DRX de las 4 muestras de feldespato de Anatolia occidental. Q : Cuarzo - Alb : Albita - Ort : Ortoclasa - m: minerales de mica (moscovita -biotita- flogopita).

Para obtener buenos resultados de la clasificación óptica, los granos deben estar separados entre sí. Para ello, las materias primas feldespáticas se molieron y tamizaron a diferentes tamaños y cada una de estas fracciones se analizó químicamente (Tabla 3). El análisis granulométrico se realizó en muestras de tamaño inferior a 10 mm.

Los residuos procedentes del tamizado se examinaron con un microscopio óptico binocular. Los datos de los estudios microscópicos indicaron que: los granos transparentes a semitransparentes, de brillo vítreo e incoloros son cuarzo; los granos negros opacos son óxidos de hierro y minerales de titanio; los de color rosado son feldespato potásico; los granos blancos opacos son feldespato sódico, las escamas incoloras transparentes moscovita y las escamas brillantes de color marrón oscuro a verdoso son biotita y flogopita (Figs 4a-h).

		PPC	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
FLD -K	+2 mm	0,5	74,33	15,07	0,44	0,15	1,34	0,4	6,95	0,38	0,18
	-2 mm + 1mm	0,56	69,95	17,4	0,79	0,25	1,58	0,66	7,82	0,51	0,23
	-1 mm + 500µm	0,58	67,16	19,1	0,7	0,21	1,68	0,71	9,07	0,45	0,2
	- 500µm + 250µm	0,42	66,48	20,08	0,33	0,14	1,71	0,44	9,74	0,35	0,11
	- 250 µm	0,73	65,44	19,76	0,39	0,39	2,01	0,87	9,14	0,56	0,37
FLD -H	+2 mm	2,72	75,89	13,11	0,11	0,37	0,45	0,09	3,02	3,99	
	-2 mm + 1mm	0,74	77,65	13,48	0,09	0,45	0,64	0,09	3,76	2,96	
	-1 mm + 500µm	1	75,48	14,66	0,23	0,5	0,88	0,1	4,47	2,44	
	- 500µm + 250µm	1,12	71,36	17,12	0,25	0,68	1,26	0,16	5,58	2,2	
	- 250 µm	2,03	66,06	20,16	0,34	1,14	1,48	0,2	6,31	2,01	
FLD-KR	+2 mm	0,38	81,37	10,93	0,15	0,15	0,18	0,01	3,32	3,25	
	-2 mm + 1mm	0,54	79,39	12,4	0,17	0,39	0,26	0,05	3,98	2,6	
	-1 mm + 500µm	0,43	78,87	12,8	0,06	0,56	0,32	0,06	4,24	2,29	
	- 500µm + 250µm	0,61	76,22	13,96	0,16	0,82	0,4	0,08	5	2,29	
	- 250 µm	0,75	75,88	14,23	0,18	0,8	0,39	0,06	4,99	2,3	
FLD -CE	+2 mm	1,17	69,15	17,72	0,33	0,51	0,62	0,44	8,49	1,04	
	-2 mm + 1mm	1,11	71,47	16,5	0,17	0,37	0,58	0,3	7,56	1,27	
	-1 mm + 500µm	1,21	68,89	17,74	0,55	0,51	0,66	0,52	8,43	1,03	
	- 500µm + 250µm										
	- 250 µm										

Tabla 3. Resultados del análisis granulométrico y del análisis químico para materiales de diferentes granulometrías comprendidas entre +2 mm y 250 µm.

El análisis granulométrico indicó que los granos mayores de 1 mm contienen varios minerales en un solo grano (Figs 4a, c, e, g). Por el contrario, los granos de tamaño -1 mm +500µm se han liberado unos de otros, como se observa en las Figs 4b, d, f, h. Una distribución granulométrica estrecha es esencial para aumentar la eficacia de la separación durante una operación de clasificación óptica. Por lo tanto, las condiciones que mantienen una proporción de 1/3 entre el tamaño de partícula más pequeño y el más grande son preferibles para una separación eficaz [10, 11]. Hemos evaluado conjuntamente el análisis granulométrico y los resultados del análisis químico, y hemos decidido utilizar el intervalo granulométrico de -1 mm +500µm.



Fig 4a-h. Imágenes obtenidas con un microscopio binocular de materiales tamizados de diferentes tamaños (las imágenes de la izquierda muestran los tamaños de grano de + 1 mm; las imágenes de la derecha muestran los tamaños de grano de -1 mm a +500 μ m (a, b: FLD KR, c, d: FLD-H, e, f: FLD-K, g, h: FLD-CE).

Los minerales opacos y de color oscuro, la mica, el feldespato y los granos de cuarzo se separaron y recogieron de las materias primas trituradas con ayuda de un microscopio polarizador. Además, se determinaron las características de transmitancia de la luz de los minerales mediante un microscopio polarizador. Algunos granos oscuros se clasificaron como opacos y los otros como translúcidos. Los opacos eran menas minerales como hematites, limonita y piritita. Y los otros eran minerales del tipo silicato. Para cada materia prima, se introdujeron granos opacos, de color oscuro, transparentes y opacos en el software de la clasificadora óptica. A continuación, se introdujeron materiales de distintos tamaños (véase la Tabla 3) en el dispositivo de clasificación óptica y se puso en marcha la máquina.

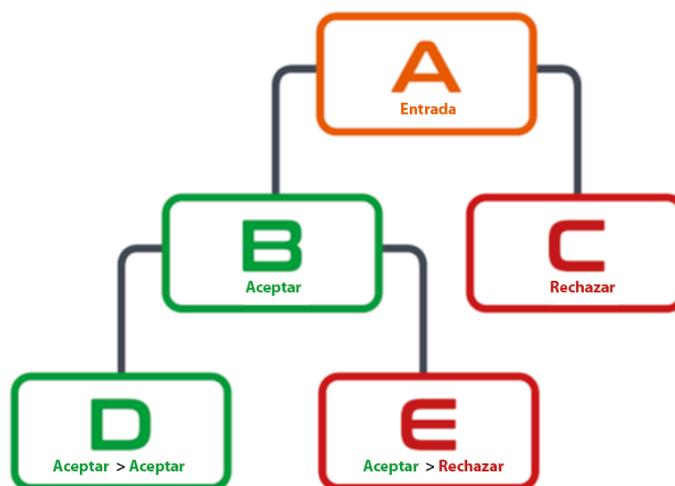


Fig 6. Sistemática de clasificación del dispositivo SEA TRUER de CIMBRIA.

La sistemática de clasificación óptica se indica en la Fig 6. Según este esquema, los minerales opacos y de color oscuro ("C" en Fig 6) se separaron de la muestra en bruto. El lote libre de minerales opacos y de color oscuro se ha sometido al proceso de la segunda etapa ("B" en la Fig 6). Durante esta etapa, se separaron los minerales de color claro, transparentes/semitransparentes (cuarzo) y los minerales opacos (mates) de color claro (feldespatos).

Se experimentaron algunas dificultades durante la clasificación óptica. Los dos problemas principales fueron los siguientes: a) si los minerales de color oscuro y claro de tamaño fino están presentes en un mismo grano, el dispositivo separó este grano como de color oscuro y lo eliminó. b) algunos granos de feldespato potásico rosáceos se clasificaron como minerales de color oscuro. De forma similar, algunos feldespatos no pudieron separarse del cuarzo. La homogeneidad del color superficial y la tonalidad gris no se perciben bien, lo que conduce a este problema [12, 13, 14]. Para solucionarlo, se volvieron a introducir las muestras en la máquina y se realizó el proceso una vez más.

Las cuatro muestras de feldespatos se clasificaron ópticamente según el esquema de la Fig. 6, y todos los materiales se analizaron químicamente (Tabla 4). La Tabla 4 revela que la etapa "D" de la clasificación óptica es la mejor para los contenidos totales de alcalinos ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) en lo que se refiere a los feldespatos sódico y potásico.

		PPC	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O + K ₂ O
FLD-K	A	0,93	65,17	19,52	0,5	0,43	1,67	1,22	9,3	0,75	10,05
	B	0,62	66,37	19,45	0,53	0,18	1,55	0,52	9,48	0,68	10,16
	C	0,48	66,76	19,02	0,52	0,32	1,58	0,55	9,08	1,01	10,09
	D	1,9	64,63	19,55	0,28	0,02	2,46	0,36	9,90	0,38	10,28
	E	0,50	76,1	13,19	0,18	0,4	0,42	0,05	3,12	5,77	8,89
FLD-H	A	0,52	75,28	14,4	0,02	0,3	0,52	0,02	3,56	5,13	8,69
	B	0,53	73,25	15,11	0,21	0,11	0,46	<0,005	3,5	6,49	9,99
	C	0,62	76,73	13,55	0,24	0,64	0,46	0,1	3,35	4,24	7,59
	D	0,32	70,32	16,47	0,09	0,04	0,48	<0,005	3,35	8,56	11,91
	E	0,5	75,77	14,03	0,24	0,47	0,47	0,05	3,28	5,04	8,32
FLD-KR	A	0,38	76,28	13,94	0,19	0,27	0,31	<0,005	3,94	4,68	8,62
	B	0,53	73,94	14,94	0,33	0,42	0,34	0,01	4,48	4,95	9,43
	C	0,45	74,62	14,74	0,18	0,59	0,39	0,03	4,69	4,18	8,87
	D	0,39	72,94	15,52	0,2	0,06	0,32	<0,005	4,28	6,26	10,54
	E	2,25	63,41	23,26	0,36	0,48	0,19	0,06	3,16	6,87	10,03
FLD-CE	A	1,24	68,71	17,56	0,47	0,67	0,63	0,66	8,43	0,95	9,38
	B	1,21	68,89	17,74	0,17	0,37	0,66	0,52	8,57	1,03	9,6
	C	1,11	71,47	16,5	0,55	0,51	0,58	0,3	7,56	1,27	8,83
	D	0,52	69,06	18,98	0,53	0,21	0,47	0,17	9,57	0,33	9,9
	E	1,1	69,15	17,72	0,33	0,4	0,62	0,44	8,01	1,04	9,05

Tabla 4. Resultados de los análisis químicos de los materiales obtenidos después de cada etapa de selección óptica (A a E en Fig 6).

Tras el proceso de clasificación óptica, se procedió a la cocción de los conos por debajo de 1200°C durante 60 minutos en un horno de laboratorio, y se tomaron medidas del color de las muestras. El índice de reflexión especular de cada muestra se midió mediante las coordenadas cromáticas L^* (blancura), a^* (rojo-verde), b^* (amarillo-azul) con el equipo de medición del color X-rite SP 62. Los parámetros de color se indican en la Tabla 5.

		L	a	b					
FLD-K	A	64,23	0,56	12,89	FLD-H	A	73,74	2,33	15,09
	B	67,26	1,55	16,58		B	73,71	1,18	13,46
	C	61,86	0,38	12,05		C	56,47	4,06	18,09
	D	80,32	1,58	20,13		D	75,76	1,09	13,89
	E	63,4	0,53	13,21		E	70,21	0,39	17,47
FLD-KR	A	69,85	2,17	19,29	FLD-CE	A	70,73	0,33	8,68
	B	73,3	1,68	8,45		B	74,77	0,1	9,48
	C	60,93	3,49	16,99		C	68,86	1,4	14,75
	D	74,59	1,01	8,04		D	75,85	0,09	9,3
	E	71,85	3,00	16,06		E	68,54	0,14	10,89

Tabla 5. Valores de los parámetros de color (L^* , a^* , b^*) de los conos cocidos formados a partir de cada una de las 4 muestras de feldepató.

CONCLUSIONES

En este estudio, la separación de minerales como los óxidos de hierro opacos, la turmalina y la mica contenidos en los feldespatos sódicos de Anatolia occidental se llevó a cabo mediante el método de clasificación óptica. Para este proceso, en primer lugar, los materiales se molieron hasta alcanzar tamaños de partícula adecuados que permitieran liberar los granos. A continuación, se aplicó un proceso de clasificación óptica en cuatro etapas. En la primera etapa, se separaron los minerales de color oscuro (biotita, flogopita, anfíbol, etc.) y los minerales opacos de óxido de hierro de las materias primas. A continuación, se separaron los minerales de color claro. Aquí, el cuarzo y los feldespatos se separaron entre sí, sobre todo teniendo en cuenta sus propiedades de transmisión de la luz y transparencia. Con este proceso de clasificación óptica en cuatro etapas, las materias primas naturales feldespáticas extraídas de 4 lugares diferentes de Anatolia occidental se enriquecieron en términos de óxidos totales de elementos alcalinos como Na_2O y K_2O . Las muestras FLD-K y FLD-CE no se enriquecieron en la medida deseada. El contenido inicial de alcalinos totales era del 10,05%. Tras el proceso de enriquecimiento en 4 etapas, este valor aumentó ligeramente hasta el 10,28%. Sin embargo, cuando se analizan los resultados, se observa que aumenta el contenido de albita (feldespato sódico) y disminuye el de feldespato potásico.

Esto indica que la fase de feldespato potásico no pudo recuperarse. La razón probable de esto es que los feldespatos potásicos son de color rosado debido a su contenido en hierro y el dispositivo de clasificación óptica lo detecta y los separa hacia el lado de los minerales de color oscuro. A diferencia de las demás, las muestras FLD-HK y FLD-K pudieron enriquecerse en proporciones satisfactorias. Como resultado de los tratamientos, los contenidos iniciales de alcalinos totales aumentaron de 8,69 a 11,91 y de 8,62 a 10,54.

Un ajuste eficaz de la velocidad de alimentación de la muestra y unas muestras bien tamizadas y sin polvo mejoran la detección en cámara y los resultados. Como resultado, el método de separación óptica, que se utiliza en la industria alimentaria, especialmente en la extracción de componentes no deseados como piedras de los cereales, también puede utilizarse con éxito en el enriquecimiento de materias primas feldespáticas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MAPEG, 2022. <https://mapeg.gov.tr/Custom/Madenistatistik>.
- [2] Sun, Dawen, 2007. Computer vision technology for food quality evolution. Academic Press, 600 pp.
- [3] Davis, E.R., 2000. Image Processing for the Food Industry. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, London.
- [4] Dowell, F.E., Boratynski, T.N., Ykema, R.E., Dowdy, A.K., Staten, R.T., 2002. Use of optical sorting to detect wheat kernels infected with *Tilletia indica*. *Plant Dis.* 86, 1011–1101.
- [5] Anselmi, B., Harbeck, H., 2000. Multicolor optical sorting: A large scale application in a feldspar treatment plant in Sardinia — Italy. *Developments in Mineral Processing V.13, C11-9-C11-16* [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(00\)80086-1](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(00)80086-1).
- [6] Dehler, M., 2003. Optical sorting of ceramic raw material. *Tile & Brick Int.* 19 (1–4), 248–251.
- [7] Cutmore, N.G., Eberhardt, J.E., 2002. The Future of Ore Sorting in Sustainable Processing. Green Processing Conference, Cairns, Qld, Australia.
- [8] CIMBRIA SEA-TN-Optical-Sorter-Datasheet
- [9] Lessard, J., de Bakker, J., McHugh, L., 2014. Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics. *Miner. Eng.* 65, 88–89.
- [10] Wotruba, H., Riedel, F., 2006. Sensor based sorting of metalliferous ores – an overview. *Sensorgestützte Sortierung. Eurogress, Aachen* (March 28–30).
- [11] Wotruba, H., 2006. Sensor sorting technology – is the minerals industry missing a chance. XXIII International Mineral Processing Congress. 1 (September 3–8).
- [12] Mular, A.L., Halbe, D.N., Derek, J.B., 2002. *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control Proceedings*. SME, pp. 1043–2442.
- [13] Udoudo, O.B., 2010. Modelling the efficiency of an automated sensor based sorter. Phd thesis. The University of Exeter Earth Resources Department, England, p. 215.
- [14] Gülcan, E., Gülsoy, E.Y., 2017. Performance evaluation of optical sorting in mineral processing – A case study with quartz, magnesite, hematite, lignite, copper and gold ores. *International Journal of Mineral Processing* 169 (2017) 129–141.