

# El caleidoscopio geológico: una mirada microscópica sobre las rocas

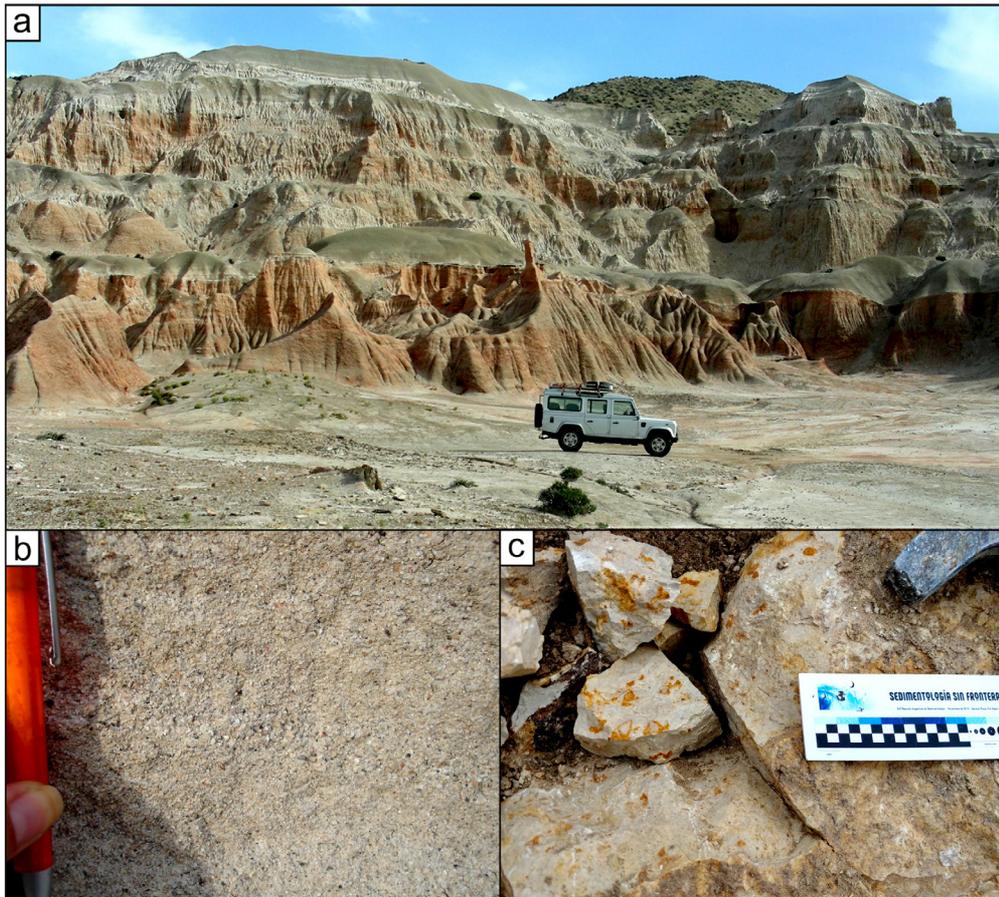


María Sol Raigemborn  
Irene R. Hernando

¿Qué características nos permiten reconocer los minerales y las rocas? ¿Cómo se observa un mineral o una roca en el campo y en el laboratorio? Los colores que se producen en el microscopio petrográfico generan un efecto óptico similar al de un caleidoscopio.

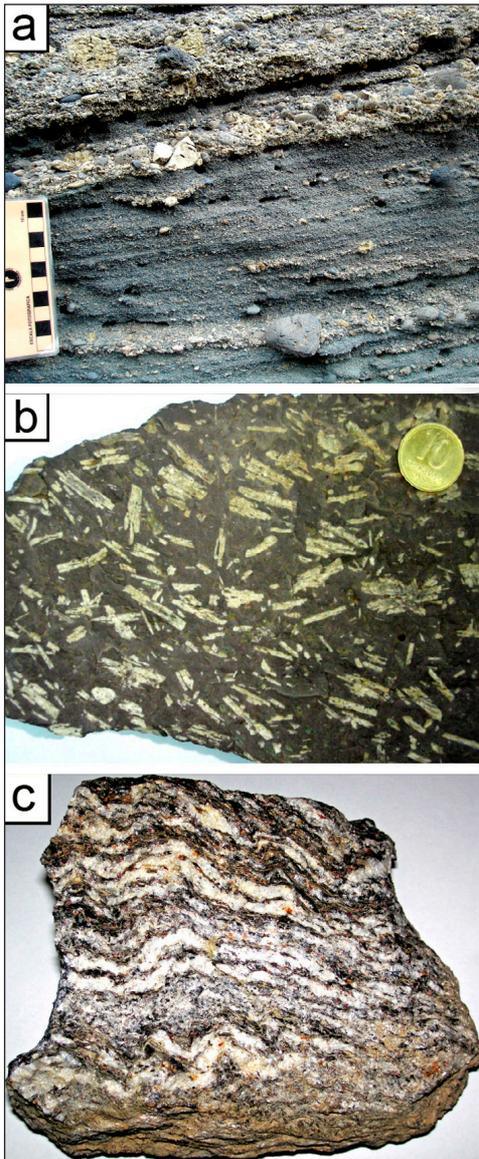
**D**esde que la corteza terrestre comenzó a enfriarse y a convertirse en roca, en la Tierra ocurrieron diversos procesos que formaron y modificaron las rocas y los depósitos inconsolidados (sedimentos) que hoy conforman el paisaje apreciable para cualquiera de nosotros. Los geólogos nos dedicamos a estudiar las rocas y los minerales que las constituyen (entre otras cosas), y uno de los principales objetivos de los trabajos de campo geológicos es la observación y recolección de datos de rocas y de sedimentos.

Frecuentemente los estudios geológicos comienzan con una tarea de campo, es decir, un trabajo a escala macroscópica, de las rocas que se encuentran expuestas o aflorando en un sitio determinado, por ejemplo en una montaña (Fig. 1a). Si bien los geólogos contamos con los conocimientos suficientes para poder definir a escala regional qué tipo de rocas integran nuestra zona de estudio, aportándonos datos



1. Las rocas sedimentarias a diferentes escalas de trabajo. a, un afloramiento de rocas sedimentarias (escala macroscópica) permite diferenciar rocas rojizas intercaladas con rocas gris-verdosas. Observación de rocas a escala mesoscópica. b, rocas rojizas de grano relativamente grueso (2 mm de diámetro en promedio); c, de las rocas gris-verdosas de grano fino (< a 0,03 mm de diámetro)

sobre el contexto geológico, muchas veces necesitamos valernos de herramientas que nos ayudan a magnificar la escala de observación. En una primera instancia podemos utilizar la lupa (escala mesoscópica), la cual suele ser pequeña y con aumentos que incrementan el campo visual entre 10 y 20 veces (llamadas lupas de mano), o puede ser de mayor tamaño y con aumentos más potentes, pero dada su envergadura no es posible utilizarlas en el campo y sólo nos ayudarán en el laboratorio. En esta escala de observación de especímenes de roca a muestra de mano, es posible determinar a qué tipo de roca corresponde nuestro ejemplar y definir algunos de sus datos composicionales y texturales (Fig. 1b y c). El paso siguiente de observación es la escala microscópica, o microescala de observación. Esta escala utiliza como instrumento un microscopio que magnifica el objeto de estudio entre 20 y 400 veces, aunque algunos consiguen



2. Fotografías de los distintos grupos de rocas. a, roca sedimentaria; b, roca ígnea (volcánica); c, roca ígnea (plutónica).

incrementar la imagen hasta 1000 o 1500 veces. Los estudios microscópicos permiten determinar y clasificar a las rocas sobre la base de una variedad de propiedades o características específicas.

## ¿Mineral o roca?

Un mineral no es lo mismo que una roca. Un mineral es un sólido que se encuentra de forma natural, que tiene una estructura atómica (cristalina) definida, que es de origen inorgánico, y que su composición química debe ser constante. En cambio, las rocas son sólidos que están compuestos por uno o más

minerales, dispuestos en diferentes arreglos según el tipo de roca que se trate.

## No todas las rocas son iguales

Una roca es un agregado consolidado de uno o más minerales, y a veces también de sustancias no cristalinas como el vidrio volcánico, que constituyen cuerpos geológicamente independientes y mapeables. Las rocas se forman mediante diversos procesos que ocurren en la superficie terrestre o en su interior. Así, hay tres grandes grupos de rocas: sedimentarias, ígneas y metamórficas (Fig. 2).

Las *rocas sedimentarias* se forman a través de la interacción de procesos físicos, químicos y biológicos. Las denominadas rocas sedimentarias clásticas, están formadas por fragmentos o clastos (Fig. 2a) que derivan de rocas ígneas, metamórficas y/o sedimentarias formadas previamente. Estos clastos son liberados a través de procesos de meteorización mecánica y química, y luego son transportados hacia el lugar de deposición, que es la llamada cuenca sedimentaria. Cuando los sedimentos son recién depositados en una cuenca sedimentaria aún no están consolidados, pero a medida que éstos se van enterrando bajo sedimentos más jóvenes, llegan a litificarse convirtiéndose así en rocas sedimentarias. Las rocas sedimentarias clásticas se integran principalmente de clastos de minerales como cuarzo y feldespatos, y clastos de rocas de diferente tipo. Otros minerales comunes en las rocas sedimentarias son los minerales de las arcillas, las micas, los carbonatos, la glauconita, los óxidos, los sulfuros y los minerales pesados. Por último, el material que se dispone entre estos clastos (matriz o cemento o una mezcla de ambos), puede estar formado por minerales silíceos (principalmente cuarzo), carbonatos (mayoritariamente calcita), minerales de las arcillas y óxidos de hierro, entre otros.

Las *rocas ígneas* se forman por la solidificación de un magma (un fundido que incluye también gases disueltos y que se encuentra a temperaturas entre 1200 °C y 700 °C), ya sea en la superficie terrestre (*rocas volcánicas*; Fig. 2b) o dentro de la

corteza terrestre (*rocas plutónicas*; Fig. 2c). La velocidad a la que se enfría el magma influye mucho en el aspecto de la roca ígnea y en el tamaño de sus cristales. Si el magma se enfría lentamente en el interior de la Tierra, los cristales crecen hasta tener un tamaño suficiente como para verlos a simple vista, como ocurre en las rocas plutónicas (un ejemplo de este tipo de roca es el granito). Si el magma se enfría más rápidamente, como es el caso de las rocas volcánicas, los cristales no crecen lo suficiente como para poder verlos a simple vista, y se ven únicamente con un microscopio (o inclusive, si la velocidad de enfriamiento es muy alta, no se forman minerales sino que se forma el vidrio volcánico). Los cristales que se ven a simple vista en las rocas volcánicas, llamados fenocristales, crecieron lentamente en cámaras magmáticas en el interior de la Tierra, mientras que el resto de la roca de color homogéneo y sin cristales visibles (lo que se conoce como pasta de la roca), está formado por cristales microscópicos que han crecido por un enfriamiento más rápido.

Por último, las *rocas metamórficas* se

forman por la modificación de una roca pre-existente, es decir cualquiera de las antes mencionadas, generalmente a grandes profundidades en el interior de la Tierra donde son sometidas a cambios físicos producto de elevadas temperaturas y/o presiones, o a la acción de fluidos químicamente activos. Existen muchos tipos de rocas metamórficas, dependiendo de qué tipo de roca original fue modificada, y también dependiendo de qué manera fue modificada (si fue principalmente por el aumento en la temperatura, o de la presión), y también de la intensidad de estos cambios.

Dado que las rocas son agregados de minerales, para su reconocimiento es necesario identificar las especies minerales que contienen, determinar qué relación espacial guardan entre sí los minerales (forma, tamaño, orientación, es decir la textura de la roca) y las relaciones cuantitativas de los minerales dentro de la roca, o sea, estimar las proporciones de cada mineral.

## Petrografía y Petrología

Existe una disciplina científica dentro de la geología llamada Petrografía. Ésta es una herramienta especialmente útil que tiene como objeto la descripción e identificación de los constituyentes de las rocas y la clasificación de las mismas. La Petrología es la ciencia que se ocupa del estudio de la naturaleza y del origen de las rocas, y requiere la aplicación de técnicas de campo (macroescala) y observaciones y análisis de laboratorio (microescala).

## ¿Cómo funciona un microscopio petrográfico?

Un microscopio petrográfico es un instrumento de laboratorio que permite identificar las propiedades ópticas de los minerales y del resto de los componentes que integran las rocas. Su función es la misma que la de los microscopios que se utilizan en otras disciplinas: dar una imagen aumentada del objeto a estudiar. En este caso,



3. El microscopio petrográfico y sus partes más relevantes, junto a una foto de un corte delgado de roca (mide 4,5 cm de largo por 2,5 cm de ancho).

el objeto de estudio que se coloca sobre la platina es un corte de roca o sección delgada (Fig. 3). Esto es un fragmento de roca que por abrasión se reduce a un espesor muy delgado de 30 micrones (equivalente a 0,03 mm de espesor) montado sobre un vidrio, de modo que todos los minerales resulten transparentes, menos los óxidos y otros minerales opacos. Sin embargo, el microscopio petrográfico se diferencia en algunos detalles de un microscopio biológico, como se verá a continuación.

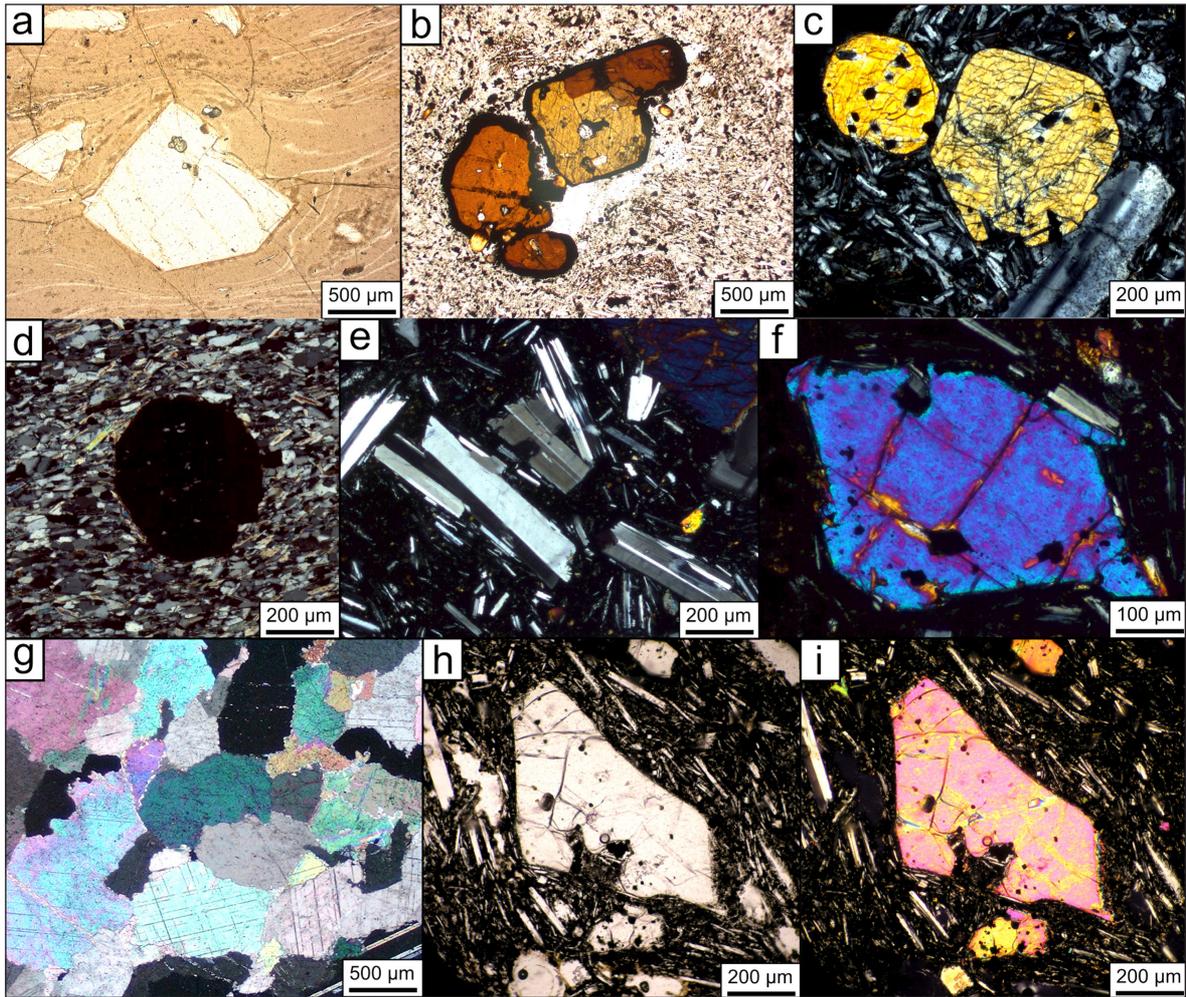
El aumento del corte de roca que se encuentra en la platina se produce por la combinación de dos lentes, el objetivo y el ocular (Fig. 3). La lente del objetivo produce una imagen nítida, mientras que el lente del ocular amplía esta imagen. Un microscopio suele tener más de un objetivo, cada uno con diferentes aumentos, para poder observar los minerales con distintos grados de detalle. Además de estas lentes, que son comunes a todos los microscopios, el microscopio petrográfico tiene un polarizador y un analizador. El polarizador se sitúa debajo de la platina y es una placa polarizante que transmite luz que vibra sólo en dirección "N-S" (o sea, adelante y atrás del microscopio). El

analizador está por encima de la platina (Fig. 3), y es una placa similar a la del polarizador pero que transmite luz que vibra en dirección "E-O" (derecha a izquierda). El polarizador está siempre fijo, pero el analizador no, y puede ponerse y sacarse a voluntad, para poder observar las diferentes propiedades ópticas de los minerales.

Mediante el uso del microscopio petrográfico se pueden estudiar las propiedades ópticas de las rocas y de los minerales y definir el tipo de roca y de minerales que estamos observando.

### Identificando a los minerales a partir de sus propiedades ópticas

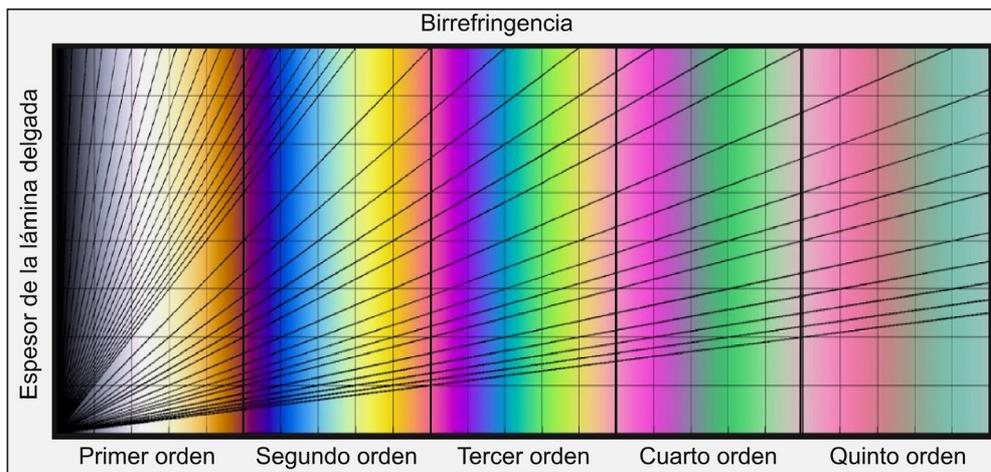
Cada mineral posee propiedades físicas y ópticas que le son propias, y que permiten su reconocimiento cuando se lo observa a simple vista, es decir con el ojo desnudo o con la lupa (propiedades físicas) o al microscopio (propiedades ópticas). Dentro del primer grupo de propiedades se destacan el color, la forma o hábito, el color del polvo fino del mineral (llamado raya), la resistencia que



4. Imágenes de diferentes minerales observados bajo microscopio petrográfico donde se observan la variabilidad de colores que los mismos pueden presentar. a, feldespato alcalino incoloro, inmerso en vidrio volcánico castaño; b, cristales de anfíbol pleocroicos con colores que varían del amarillo al castaño rojizo, y clivaje en dos direcciones; c, cristales de piroxeno con color de interferencia amarillento, con su típica forma de ocho lados y clivaje en dos direcciones perpendiculares; d, cristal de granate, isótropo; e, cristales de plagioclasa con colores de interferencia débiles, de blanco a gris; f, olivina con un color de interferencia de segundo orden azul; g, cristales de calcita mostrando colores de interferencia de órdenes altos (pasteles) debido a su muy alta birrefringencia; h-i, mismo cristal de olivina, visto sin analizador (h, casi incoloro) y con analizador (i, rosado).

presenta a ser rayado por una punta metálica (dureza), la propiedad de dejar pasar la luz o transparencia (distinguiéndose en transparentes, translúcidos u opacos), el brillo (metálico o no metálico), el clivaje (tendencia a fracturarse paralelamente a planos atómicos determinados, dependientes de la estructura cristalina del mineral), entre muchas otras. Por otro lado, las propiedades ópticas, que son las que únicamente se pueden determinar bajo microscopio, incluyen al color, la birrefringencia, el color de interferencia y el pleocroismo, entre muchas otras.

El *color del mineral* es en muchos casos una característica distintiva, aunque también existen numerosos minerales incoloros



5. Tabla de Michel-Levy: gráfico que muestra distintos colores de interferencia de los diferentes minerales para su identificación con el microscopio petrográfico.

(Fig. 4a). Vistos al microscopio, algunos minerales muestran un cambio en su coloración cuando se gira la platina. Esta propiedad se conoce como *pleocroísmo* (Fig. 4b).

Ciertos minerales presentan *clivaje*, (Figura 4c). Algunos minerales con clivaje bien desarrollado son las micas, mientras que otros minerales no lo desarrollan, como el cuarzo. La *birrefringencia* es una propiedad de los minerales que está íntimamente ligada a su estructura cristalina. Los minerales pueden tener uno, dos o tres índices de refracción (los cuales están relacionados con la velocidad a la que se propaga la luz en el interior del cristal). Así, la birrefringencia es la diferencia numérica entre los índices de refracción máximo y mínimo de un mineral. Los minerales que tienen un sólo índice de refracción no tienen birrefringencia y se los ve negros cuando se los observa con el analizador puesto. A estos minerales se los denomina isótropos (por ejemplo granates; Fig. 4d). Los minerales que poseen más de un índice de refracción se denominan anisótropos.

Cuando se observa un mineral con luz polarizada, la luz en el interior del cristal se descompone en dos rayos que vibran en dos planos perpendiculares y a velocidades distintas. Al salir del cristal, estos rayos hacen interferencia entre sí, y al observarlos con el analizador puesto, se pueden apreciar los *colores de interferencia*. Así se produce un gran rango de colores que varían desde gris y blanco (Fig. 4e), pasando por colores azules, rojos, amarillos y verdes muy intensos (Fig.

4f), hasta colores tan lavados que parecen ser colores pasteles o crema (Fig. 4g). Un dato significativo es que los colores que se observan en los minerales cuando se utiliza el analizador (color de interferencia) pueden ser muy diferentes a los colores observados sin este segundo polarizador (Fig. 4h-i).

Existe una tabla de colores conocida como Tabla de Michel-Levy (Fig. 5) que permite, de manera comparativa, asignar un color de interferencia al ejemplar que estamos observando. A partir de esta tabla podemos indicar la birrefringencia de un mineral como muy baja (primer orden), baja (segundo orden), media (tercer orden), alta (cuarto orden) y muy alta a extrema (quinto orden).

Las propiedades ópticas de los minerales, junto con otras no descritas, facilitan y permiten su reconocimiento, lo cual resulta esencial al momento de describir rocas de cualquier tipo bajo un microscopio petrográfico.

## El cuarzo y sus tonalidades

El cuarzo, un mineral muy abundante en todo tipo de rocas, posee una amplia variedad de colores o tintes vibrantes por la presencia de diminutas cantidades de sustancias (elementos químicos) en su estructura cristalina, llamadas impurezas. Por ejemplo, el cuarzo incoloro, llamado cristal de roca, está libre de dichos componentes colorantes. El cuarzo violeta (amatista) presenta pequeñas proporciones de hierro

(Fe) y aluminio (Al), el rosado hierro (Fe), manganeso (Mn) o titanio (Ti), el amarillo (citrino) tiene inclusiones de hidratos de hierro (Fe) en forma coloidal. Existe una variedad de cuarzo blanco llamado cuarzo lechoso que debe su coloración a la presencia de innumerables gotitas gaseosas y líquidas dispersas en el cristal. También hay una variedad de cuarzo azul que posee diminutas inclusiones de minerales como turmalina o rutilo que le otorgan un característico tono azulado.

### La policromía de los minerales

Si el significado de caleidoscopio puede traducirse como “observar formas hermosas” (*kalos*: bellos, *eidos*: forma, *scopeo*: observar), podríamos decir que los colores que se producen en el microscopio petrográfico genera un efecto óptico similar al de un caleidoscopio. Veamos algunos ejemplos. Cuando los granos de cuarzo son analizados bajo el microscopio petrográfico, éstos son

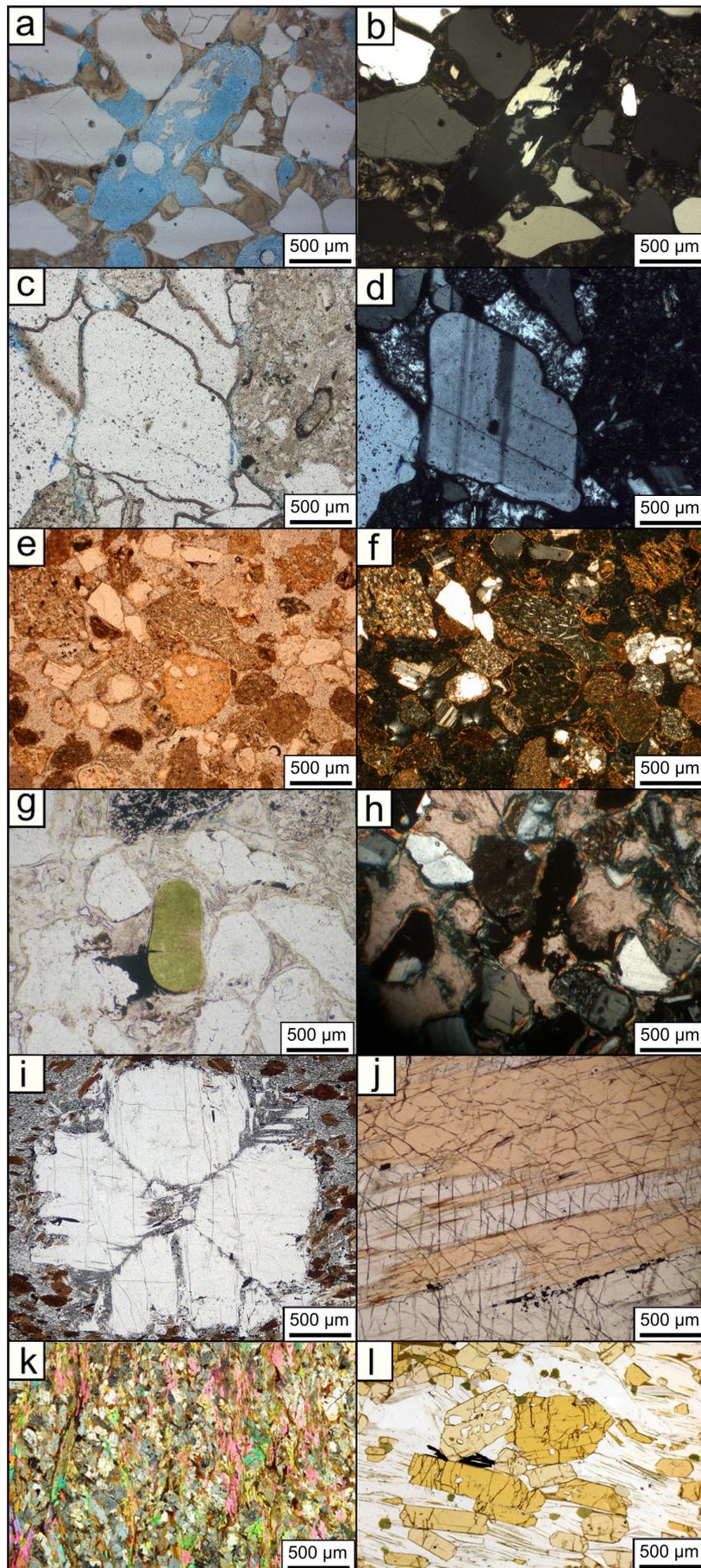
típicamente de colores claros (blancos o incoloros) sin analizador (Fig. 6a), los que se convierten en grises al usar el analizador (Fig. 6b). Los feldespatos por su parte son claros o levemente “sucios” dando un aspecto nublado, pero cuando son observados con analizador se muestran con colores débiles, en tonos grises (Fig. 6c y d). Los fragmentos de rocas sedimentarias vistos al microscopio muestran la mayor variabilidad de colores, desde claros (blancos, grises) hasta marrones oscuros y negros, pasando por tonos rojizos, con aspecto límpido o sucio, dependiendo del tipo de roca del que se trate (Fig. 6e y f). Los carbonatos, especialmente el mineral calcita, se diferencian del resto de los componentes comunes de los materiales sedimentarios ya que sus colores de interferencia son verdes y rosados pálidos (tonos pasteles) (Fig. 6g). La glauconita es un distintivo mineral de color verde claro que con el analizador se hace verde más intenso con pequeños puntos en tonos amarillentos (Fig. 6h).

En el caso de las rocas ígneas, además de tener minerales comunes como el cuarzo, los feldespatos y las micas, también es frecuente que tengan otros minerales, como los piroxenos, los anfíboles y las olivinas. Los piroxenos son en general de un color verde muy claro y sin pleocroismo o con un pleocroismo muy débil, y con colores de interferencia brillantes. La característica distintiva es que poseen clivaje en dos direcciones perpendiculares (Fig. 4c). Los anfíboles también son en general de color verde, aunque con colores de mayor intensidad y con pleocroismo (Fig. 4b). Al igual que los piroxenos, tienen clivaje en dos direcciones, aunque estas direcciones no son perpendiculares sino que forman “rombos”. Las olivinas se diferencian de los piroxenos y anfíboles por su forma y porque no presentan ni pleocroismo ni clivaje. Sus colores de interferencia también son brillantes (Fig. 4e).

Los minerales más habituales en rocas metamórficas son los ya descritos como el cuarzo, los feldespatos, las micas, piroxenos y anfíboles, aunque también tienen minerales particulares que son frecuentes en este tipo de rocas, como la sillimanita,



6. a, cristales de cuarzo incoloros; b, los mismos cristales de cuarzo vistos con el analizador, con tonos grises; c, cristal de plagioclasa (un feldespato) sin analizador; d, cristal de plagioclasa con el analizador; e, fragmentos de rocas dentro de una roca sedimentaria, sin analizador; f, fragmentos de roca con el analizador; g, cristal de glauconita con su típico color verde-amarillento; h, carbonatos con colores rosados suaves junto a otros clastos de tonos negros, grises y blancos; i, cristal de andalucita en una roca metamórfica, incoloro; j, variedad pleocroica de la andalucita con tonalidades rojiza suave; k, cristales de sillimanita con colores brillantes de birrefringencia; l, cristales de estauroлита con su pleocroismo típico con tonalidades amarillentas.



andalucita, la cianita y la estaurolita, entre tantos otros. La andalucita forma cristales prismáticos de sección cuadrada (Fig. 6i). En general es incolora, aunque a veces también puede tener un color rojizo y ser pleocroica (Fig. 6j). La sillimanita forma cristales prismáticos o fibrosos, y es incolora, aunque cuando se utiliza el analizador se ven sus colores de birrefringencia variados y brillantes (Fig. 6k). La estaurolita es típicamente pleocroica con colores que varían entre amarillento a casi incolora (Fig. 6l). Forma cristales prismáticos de seis lados y tiene una birrefringencia débil.

vía del microscopio petrográfico. El microscopio electrónico de barrido (MEB) y el de transmisión (TEM), el microscopio de catódoluminiscencia, la difracción de Rayos-X (DRX), la microsonda electrónica que realiza análisis de la composición química de los minerales, la geoquímica de roca total, y varios tipos de análisis espectroscópicos son ejemplos de las técnicas que nos permiten la caracterización óptica, geoquímica y física de las rocas. ◆

## El porqué de la microscopía

Los resultados de laboratorio que obtenemos a partir de la utilización del microscopio petrográfico se integran con las observaciones obtenidas a otras escalas de trabajo (macro y mesoescala). Por ejemplo, en el ámbito de las rocas sedimentarias, poder establecer su composición, definir las proporciones en las que se presenta cada componente definido, conocer el tamaño que presenta cada uno de éstos y comprender las relaciones que guardan entre sí (textura de la roca) provee información muy valiosa que nos ayuda a: (1) reconstruir la historia de transporte de los materiales, es decir si éstos fueron llevados por el agua, por el viento, por la gravedad, por el hielo, (2) a caracterizar el ambiente en el que ellos fueron depositados o acumulados, como por ejemplo en el mar, en una playa, en el canal de un río, en el fondo de un lago, en una duna, etc. y, (3) a establecer el área de procedencia de los materiales, es decir, de dónde vienen los componentes que integran la roca sedimentaria (de un área volcánica, de rocas sedimentarias, metamórficas o ígneas más antiguas, etc.).

Si bien el microscopio petrográfico es una herramienta básica muy útil y respetada para el estudio de la composición y fábrica de las rocas, en la actualidad existe una amplia variedad de instrumentos y técnicas de laboratorio muy sofisticadas y poderosas que complementan los datos obtenidos por

---

*María Sol Raigemborn*

*Centro de Investigaciones Geológicas y cátedra de Micromorfología de suelos. Facultad de Ciencias Naturales y Museo - UNLP. CONICET.*

*Irene R. Hernando*

*Centro de Investigaciones Geológicas y cátedra de Petrología I. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. UNLP. CONICET.*