

Mineralogía Óptica I

Preparado por: Dr P. J. Caffè

Introducción

El Microscopio de Polarización

Secciones delgadas y el microscopio de polarización

Una sección delgada de roca está preparada de una manera especial. La muestra de roca es cortada primero en pastillas de ~0.5-1 cm de espesor y pegada a un vidrio por algún tipo de resina sintética o bálsamo natural (como el bálsamo de Canadá). Luego es vuelta a cortar con una sierra fina para adquirir un espesor de alrededor de 2 mm. Por último es desgastada por abrasivos de diferente granulometría, hasta alcanzar un espesor de 0.03mm (30 micrones). A este espesor, la mayoría de los minerales son más o menos transparentes y pueden, por lo tanto, ser estudiados en un microscopio de refracción usando luz transmitida. Las secciones delgadas o “cortes” consumen mucho tiempo, trabajo y dinero – cada una us\$ 15 – así que por favor, trátenlas con cuidado. El refrán que dice “el que rompe paga” aquí se transforma en otro: “el que rompe, devuelve haciendo.”

El instrumento que usaremos para observar secciones delgadas es un *microscopio de polarización*. Estos también son caros! (entre us\$ 3000 a us\$ 15000) y necesitan ser tratados con aún más cariño, especialmente las lentes (oculares y objetivos). Antes de usar un microscopio es importante saber

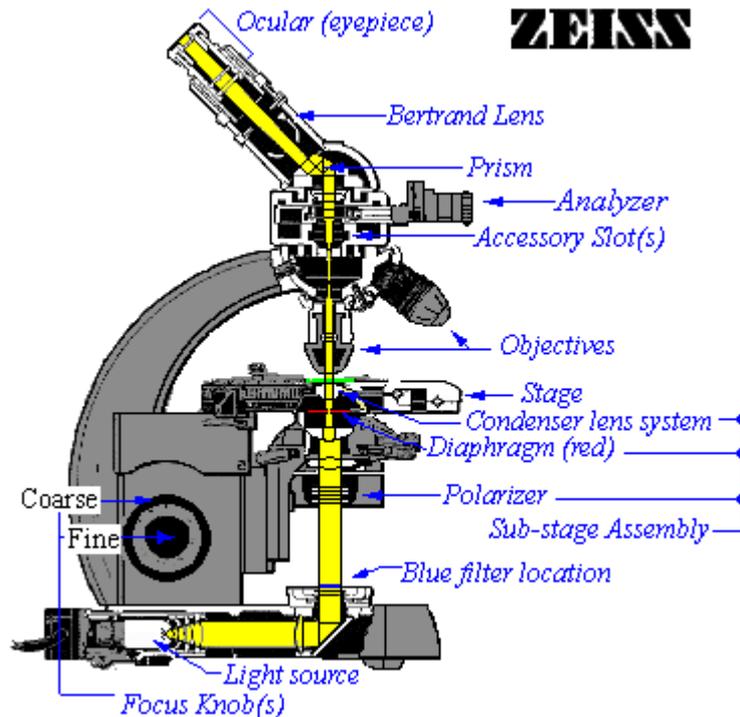
- a) cómo se comporta la luz polarizada
- b) cuáles son las propiedades ópticas de los minerales
- c) cuáles son las partes que integran el microscopio y cuál es su mejor funcionamiento.

Deberemos conocer y familiarizarnos con las siguientes partes y dispositivos (desde la base al tope, siguiendo el camino de los rayos luminosos):

- Control y fuente de iluminación
- Conjunto de sub-platina (polarizador, diafragma de iris y condensador)
- Tornillos de enfoque macro y micrométrico
- Platina rotativa y sujetadores de muestra
- Objetivos individuales o montados en revolver
- Analizador
- Lente de Amici-Bertrand (sólo para observaciones conoscópicas)
- Ocular con hilo reticular

La figura 1 muestra un microscopio petrográfico muy similar al que usted dispone para los trabajos prácticos. Para utilizarlo con propiedad y aplicar esta metodología en la identificación de los minerales, debemos familiarizarnos con él y con las partes esenciales que lo constituyen. Las descripciones que en él figuran son compiladas de Kerr (1959) y González Bonorino (1976).

El cuerpo mayor del microscopio se denomina estativo o pie, en el cual se observan instalados varios dispositivos ópticos y mecánicos que conformarán el microscopio petrográfico de polarización.



En orden, de arriba abajo se observan:

Ocular (pueden ser dos si el microscopio es binocular): contiene una lente que usualmente oscila entre 10X y 12X, la cual es usada para magnificar la imagen producida por el o los objetivos cuando miramos una sección delgada o un mineral a grano suelto. Generalmente es enfocable, y dispone de una cruz reticular que se orienta según dos direcciones: N-S y E-O.

La magnificación de la imagen obtenida desde la sección delgada o mineral observado, no es nada más que la combinación de las magnificaciones producidas por el ocular y el objetivo en conjunto. Por ejemplo, si se está mirando una sección usando un objetivo de 4X y el ocular es de 10X, la magnificación total será de 40X.

Lente de Amici-Bertrand (Bertrand lens en Fig. 1): es una lente localizada en el tubo del microscopio, justo debajo del ocular. La lente eleva el campo de visión (es decir, la imagen) de las figuras de interferencia obtenidas por conosocopia, al plano de foco del ocular.

Prisma (prism en Fig. 1): desvía los rayos luminosos por el tubo del microscopio, con tal de mantener la platina horizontal y la muestra lo más perpendicular posible al pasaje de los rayos cuando estos pasan por ella y por el objetivo. Microscopios más avanzados, como los utilizados en investigación, permiten además manipular este o varios prismas adicionales de manera que los rayos sean desviados en otras direcciones, por ejemplo hacia una cámara de fotos, de televisión o algún dispositivo digital (computadora).

Analizador (Analyzer en Fig. 1): se trata de una placa polarizante de la luz, ya sea un film polarizante o un prisma de nicol, el cual puede ser deslizado hacia el camino de los rayos. La dirección de vibración de la luz (polarización, se verá un tanto más adelante) está dirigida a 90° respecto del polarizador inferior con que cuenta el microscopio. Cuando polarizador y analizador están ubicados a 90° uno del otro, se estará viendo la sección delgada con Polarizadores o "Nicoles" Cruzados (NC).

Ranura de inserción de accesorios (Accessory slot): permite la inserción de placas accesorias entre ocular y objetivos. Están orientadas de manera tal que los accesorios sean colocados a 45° de las direcciones preferenciales de vibración de polarizador y analizador. Las placas accesorias más comunes son:

- la cuña de cuarzo
- la placa de mica
- la placa de yeso

Objetivos (Objectives): es el sistema de magnificación primaria del microscopio. Un microscopio de estudiante generalmente posee de tres a cuatro objetivos dispuestos en un dispositivo rotatorio denominado revólver; los aumentos más usuales son: 2.5X, 3.2X, 10X, y 40X.

Los objetivos son para-focales, lo que significa que cuando son intercambiados, teóricamente deberían necesitar como máximo un pequeño reenfoque (EN LA REALIDAD ESTO ES MUY DISTINTO!!!)

Durante el cambio de objetivos de diferente aumento se recomienda rotar el revolver usando el anillo dentado del borde y NUNCA girarlo desde los objetivos (si hacen esto último verán que difícil es volver a ubicar el mineral y sobre todo pasarán por la experiencia -nada agradable- de tener que re-centrar el objetivo).

Platina (Stage): es la placa o base rotativa sobre la cual se colocan los portaobjetos y secciones delgadas. La platina rota a través de los 360° y es calibrada para mediciones bastante precisas ($\pm 2^\circ$ ó $\pm 1^\circ$). Generalmente dispone de un tornillo de platina que la ajusta o fija y puede tener dos abrazaderas para sostener los preparados en su lugar.

Asociación de sub-platina:

Integrado por el sistema de lente condensadora, el diafragma y el polarizador inferior.

Sistema de lente condensadora (Condenser lens system):

Diafragma (Diaphragm): permite la mayor o menor apertura del campo luminoso antes de que el rayo de luz atraviese la muestra. Es muy útil para practicar el relieve y destacar contrastes en minerales contiguos y de escasa diferencia de índices de refracción.

Polarizador (Polarizer): está constituido por un nicol de calcita (en los microscopios más antiguos) o una lámina polarizante (en los más modernos) que provoca que la luz vibre en un único plano. Raras veces es giratorio, aunque algunos microscopios disponen de esta posibilidad. El plano de polarización cambia de microscopio en microscopio, y como es obvio, deberá ser perpendicular al plano en el que el analizador preferencialmente polariza la luz.

Fuente de luz (Light source): puede ser solar (espejo) o artificial (más común)

Filtros (Filter location): facilitan la observación o destaque de algunas longitudes de onda por la absorción de las otras, generalmente durante la fotomicrografía. El filtro azul o celeste, que absorbe las longitudes de onda amarillentas de los filamentos de focos, es usualmente utilizado para la observación normal de un corte delgado.

Tornillos de enfocado (Focus knobs) Micro y macrométricos, permiten el movimiento vertical del conjunto de subplatina y platina para el enfoque del objeto de estudio.

La naturaleza de la luz polarizada

La luz viaja como vibraciones electromagnéticas en las cuáles la dirección de vibración es **transversal a la dirección de propagación**. Los movimientos ondulatorios transversales de este tipo se dice que están **polarizados en un plano** cuando todas las vibraciones posibles yacen en un solo plano. La luz del sol es no polarizada, pero cuando es reflejada desde una superficie se convierte en parcialmente polarizada, como es exhibido en la siguiente figura. Una de las formas que existe entonces para polarizar la luz es la reflexión sobre una superficie que sea capaz de “absorber” parte de la energía luminosa (que ingresa por refracción a un medio diferente del aire). Este es el principio de construcción de el **prisma de Nicoll**, que en el pasado era construido con cristales de calcita para fabricar los polarizadores y analizadores de los microscopios petrográficos de la época.

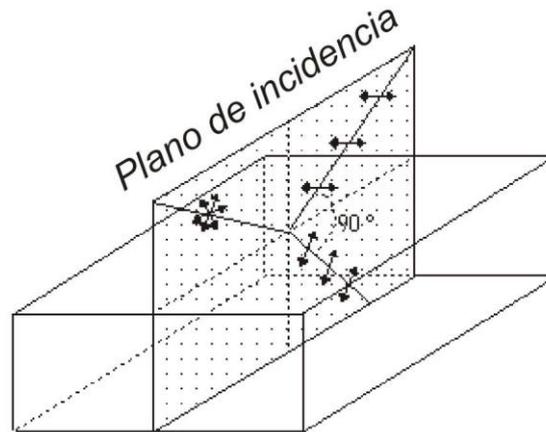


Figura 1. Reflexión de la luz. En el rayo incidente la luz vibra en todas direcciones. En el reflejado lo hacen en un solo plano. Otras direcciones de vibración son dispersas. Notar que en el rayo refractado la dirección de vibración de la luz es perpendicular a la que presenta el que es reflejado.

Indices de Refracción

El comportamiento de la luz que entra en un cristal es, como se verá más abajo, diferente del comportamiento de la luz en el aire o incluso el vacío. Este comportamiento está fundamentalmente controlado por la estructura cristalina interna. Tal vez la propiedad más importante a entender es entonces el índice de refracción de la sustancia.

El **índice de refracción (n)** de una sustancia cualquiera está definido como:

$$n = V_v / V$$

donde V_v es la velocidad de la luz en el vacío y V es la velocidad de la luz en la sustancia. Para nuestro propósito, asumiremos que el índice de refracción de la luz en el aire (medio de transmisión que usaremos) es esencialmente igual a la del vacío, por lo tanto:

$$V_v = V_a = 1, \text{ y}$$

$$n = 1 / V$$

La luz se ralentiza cuando desde el vacío entra en una sustancia con densidad mayor (cualquier gas, sólido o líquido). Si el medio en el que se está propagando la luz es el aire ocurre exactamente lo mismo, ralentizándose cuando ingresa a un medio más denso (en este caso líquidos o sólidos, sean estos últimos cristalinos o no), de manera que el índice de refracción (**n**) siempre será mayor a 1. La mayoría de los

minerales tienen índices de refracción entre 1.32 y 2.40, y los valores más comunes oscilan entre 1.50 y 1.80.

Pero cuidado!!...El índice de refracción del mineral no es necesariamente el mismo en todas direcciones. Recordar que aquellos sistemas cristalinos que ustedes estudiaron y aprendieron (o eso espero), estaban caracterizados por un número de ejes específico y relaciones axiales que variaban de un sistema a otro. La simetría interna de un mineral es el resultado de la orientación de los átomos o complejos iónicos en capas reticulares..... el arreglo de esos átomos determinará cómo la luz interactúa con el cristal!!

Doble Refracción

La mayoría de las sustancias cristalinas son **anisótropas** – sus propiedades físicas (en las que incluimos los índices de refracción) difieren si son medidas en diferentes direcciones. Los cristales que pertenecen al sistema **cúbico** son la excepción y se dice que son **isótropos** – sus propiedades físicas no varían en distintas direcciones. Cuando un rayo de luz ordinaria (no polarizada) entra a un cristal anisótropo, este es en general dividido en dos rayos refractados según dos direcciones de vibración distintas. Este fenómeno es conocido con el nombre de **doble refracción**. Este fenómeno se sigue repitiendo cuando la luz está polarizada

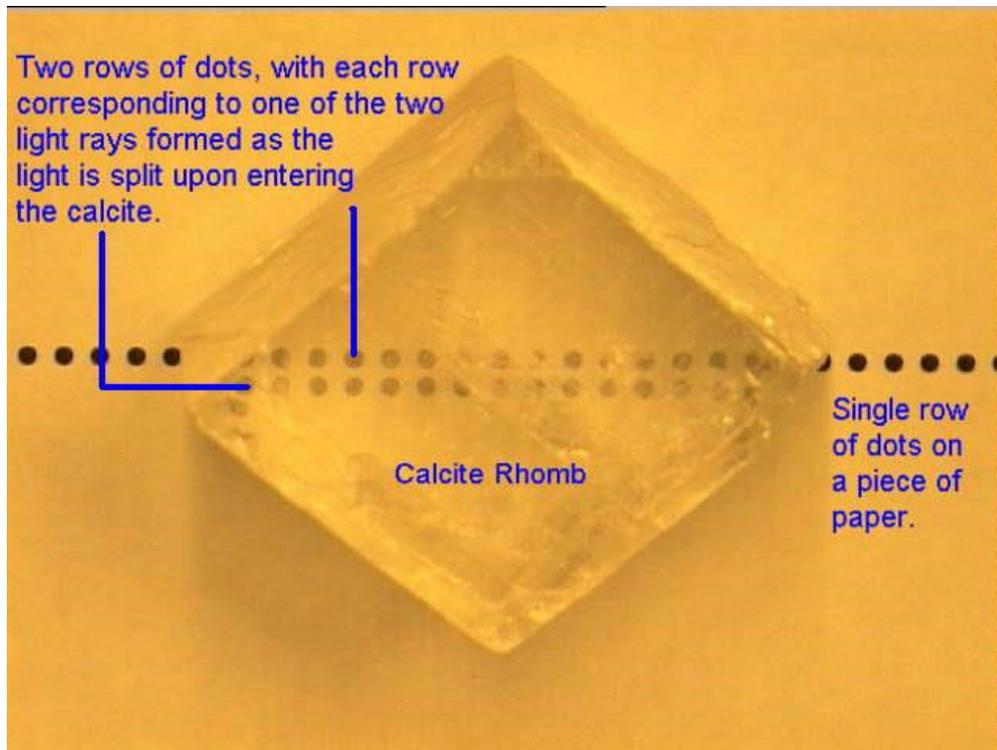


Figura 2. Propiedad de doble refracción en romboedro de calcita. Se generan dos imágenes de la misma línea de puntos, ya que la luz incidente se divide en dos rayos (dos índices de refracción diferentes) que vibran en planos diferentes.

Forma, Hábito, Clivaje y Fractura

La forma de los cristales y el arreglo de los planos de clivaje o superficies de fractura dentro de ellos son muy útiles para la identificación del mineral.

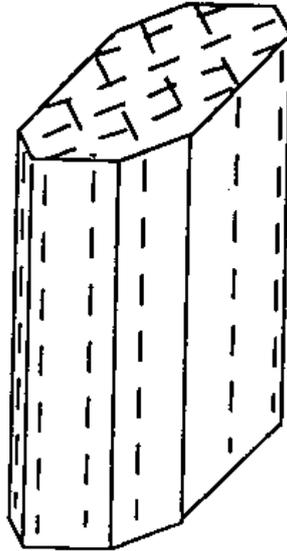


Figura 3. Cristal de piroxeno mostrando las trazas de sus planos de clivaje característicos (110). Notar que una sección prismática mostrará sólo una dirección de clivaje (**clivaje prismático**), mientras que una basal exhibirá dos direcciones intersectándose a 90° una de la otra.

Un fenocristal de augita

Esta sección delgada muestra un cristal **euhedro** de augita.

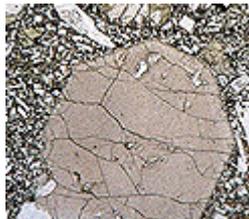


Figura 4. Cristal de augita euhedro. Casi todo el cristal exhibe un contorno de formas geométricas, resultado de la sección de caras cristalográficas del mismo. Notese la fracturación del cristal que atraviesa irregularmente al mismo en dirección perpendicular a las caras más elongadas (prisma monoclinico).

Un cristal **euhedro** es aquél que presenta una forma donde casi todo su contorno responde a secciones de caras o formas cristalográficas propias de la clase de simetría del mineral. Obviamente estas formas no son perfectas, y algunos bordes pueden estar rotos o deformados por el crecimiento contiguo de otro mineral (ejemplo: anfíboles y piroxenos).

Un cristal **subhedro** presenta sólo algunas formas cristalinas, pero mucho de su contorno es irregular o no coincidente con ninguna forma propia de la clase de simetría (ejemplo: plagioclasa y biotita).

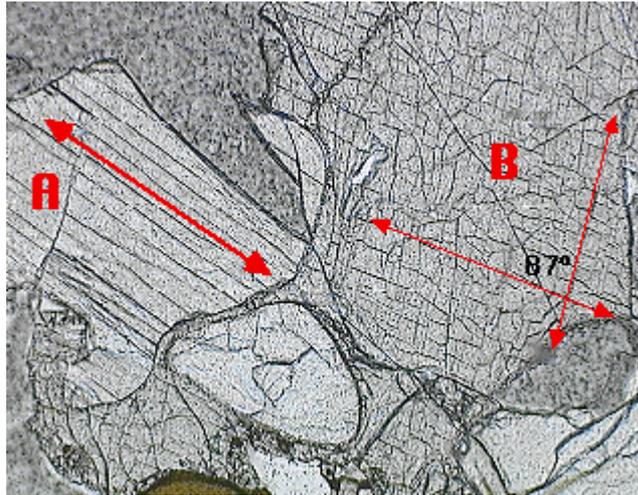
Un cristal **anhedro** es el que se caracteriza por no tener una forma definida, sus contornos son ameboides o muy irregulares (ejemplo: cuarzo y ortoclasa).

Una terminología equivalente a la anterior puede ser:

idiomorfo = euhedro; **subidiomorfo** = subhedro; **xenomorfo** = anhedro

A veces es útil definir el **hábito** del mineral. Numerosos minerales son anhedrales y tienen sin embargo un hábito definido (ejemplo: ópalo – coloforne) que, puestos a determinar un mineral desconocido, nos brinda más información que sólo consignar que no dispone de contornos cristalográficos. En microscopía, los hábitos se denominan de la misma manera que lo hacemos en macroscopía (Trabajo Práctico 9).

La siguiente foto (Fig. 5) muestra cristales de la misma especie mineral (augita) exhibiendo direcciones de **clivaje** muy bien desarrolladas. El cristal marcado con la letra **A** ilustra un clivaje solo, y es una sección prismática del cristal (ver más arriba la Fig. 3). El cristal **B** en cambio muestra dos clivajes (peor definidos), que se cortan casi a 90° en una sección basal del mineral. Las flechas materializan las direcciones de los clivajes.



La distinción del clivaje es muy importante por dos causas:

- a) algunas especies minerales son muy parecidas bajo el microscopio, pero se distinguen precisamente porque sus direcciones de clivaje son distintas, o porque en algunos casos carecen de clivaje o lo presentan con diferente calidad, y
- b) las direcciones de clivaje materializan direcciones cristalográficas cuando el mineral es anhedral o cuando no podemos saber (la mayoría de las veces) qué forma o cara cristalográfica estamos observando. Conociendo cuáles son las direcciones de clivaje y cuánto divergen en su posición con los índices de refracción (que veremos luego midiendo el ángulo de extinción), podremos definir cuál podría ser la especie mineral observada.

En el caso de la **fractura**, es útil conocer cuál es la forma en que algunos minerales se fracturan y cómo se ve esto al microscopio. En la Fig. 5 se observan trazas de fracturación más o menos perpendiculares a los contornos prismáticos del cristal. Algunas especies minerales no tienen direcciones de clivaje específicas (por ejemplo el epidoto), pero si tienen una fracturación muy característica que junto al color, pleocroísmo, hábito y forma nos dan fuertes indicios de cuál es la especie mineral investigada.

Relieve

Cuando miren al microscopio notarán rápidamente que en las secciones delgadas algunos minerales son claramente visibles (esto significa, se observan muy bien los detalles de su textura superficial, clivaje, etc.) mientras que otros aparecen casi sin detalles e incluso, si son incoloros, resulta muy difícil verlos o distinguirlos de la base del corte (vidrio o pegamento). Esta es la propiedad que se denomina **relieve**.

Los minerales que tienen índices de refracción que difieren marcadamente de aquél que existe en el medio de inmersión del mineral (aceite, agua o el pegamento de montaje y cobertura de la sección delgada o del grano suelto) se ven muy bien en la sección delgada y se dicen que tienen un **alto relieve**. Los minerales con **bajo relieve** tienen índices de refracción cercanos a aquél del medio de inmersión (comúnmente es ~ 1.54 ; si es agua es ~ 1.33).

El relieve es una propiedad distintiva muy útil para los minerales de origen ígneo y algunos metamórficos; todos los minerales máficos (máfico: oscuro, rico en Mg y Fe) muestran altos relieves pero todos los félsicos (de colores claros y composición carente de Fe, Cr y Mg, con excepción de muscovita) muestran bajos relieves.

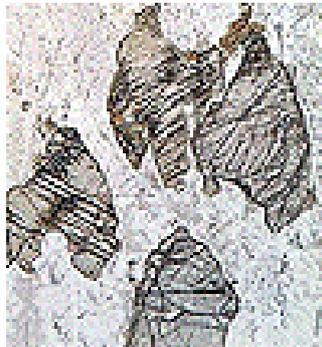


Figura 5. Esta es una sección delgada con ejemplos de relieves contrastados. El mineral con alto relieve es un clinopiroxeno y los de bajo relieve son plagioclasas.

La línea de Becke

La línea de Becke es una línea luminosa que se forma en el borde de los minerales, a raíz del efecto difractor de la luz que estos contornos tienen cuando los minerales están inmersos en un medio de diferente índice de refracción.



Figura 6

Por regla general, cuando el índice de refracción del mineral es mayor al del medio circundante, al **alejarse la distancia focal** del microscopio se produce un movimiento de la línea de Becke **hacia el mineral** (hacia adentro). Por el contrario, si el mineral tiene un índice de refracción inferior al medio de inmersión, al alejar la distancia de trabajo la línea se moverá **hacia fuera** (hacia el medio circundante).

Así que si la línea se mueve hacia **adentro** $n_{\min} > n_{\text{med}}$ y si lo hace hacia fuera $n_{\min} < n_{\text{med}}$

siempre que el movimiento de la distancia focal sea alejándose de la muestra. Caso contrario estas relaciones se invierten.

Color y Pleocroismo

En la primer fotografía (Fig. 4) hemos observado que augita puede aparecer con un color levemente rosado bajo luz polarizada en un plano(LPP) – este es el resultado de la absorción selectiva de ciertas longitudes de onda dentro de aquellas que comprenden la luz blanca aportada por el sistema de iluminación. La anisotropía mostrada por los minerales no-cúbicos en sus propiedades físicas, también puede ser vista en el fenómeno de absorción de la luz. Cuando se verifica anisotropía en la absorción, la llamamos **pleocroismo** y es útil como propiedad distintiva, ya que no es muy común. El pleocroismo es evidente en la sección delgada cuando los minerales sufren cambios de color a medida que son rotados en la platina a condiciones de LPP.

En las siguientes dos fotografías se ve el mismo cristal de biotita, bajo LPP. La primera foto (Fig. 7) está tomada con el clivaje orientado en la dirección E-O de los hilos del retículo.

Fig. 7 Biotita E-O

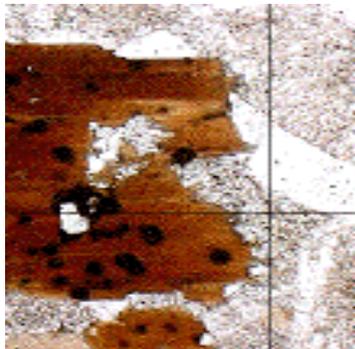
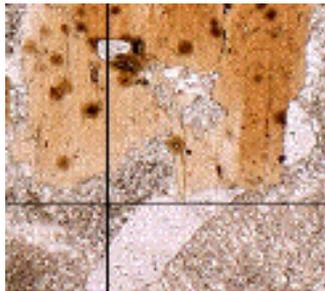


Fig. 8 Biotita N-S

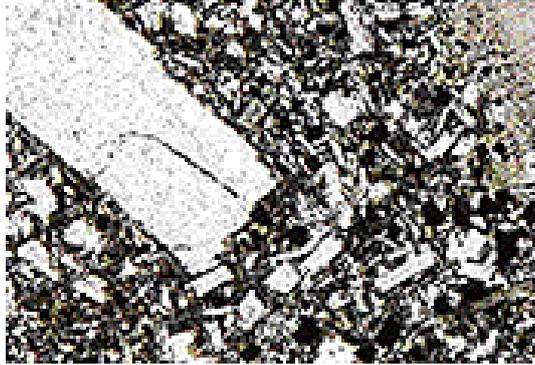
En esta segunda figura (Fig.8) , la platina fue rotada 90° de manera que el clivaje se orienta ahora en sentido N-S. Note la variación de color entre ambas fotos. Esto es el **pleocroísmo**.



Los puntos negros están causados por daño del mineral a partir de la radiación producida por inclusiones diminutas de zircón, el cual usualmente porta elementos radiactivos como U y Th.

Opacidad

Algunos minerales, típicamente los sulfuros y óxidos de mena (mineralización metálica), no son transparentes en sección delgada, sino que son opacos. Para estudiarlos deberemos usar otra forma de microscopio – un microscopio de reflexión -. Es importante darse cuenta que mientras un mineral opaco podría parecer isótropo, este no es el caso. Magnetita, perteneciendo al sistema cúbico, es isótropo; sin embargo hematita, que pertenece al sistema hexagonal (división romboédrica) es anisótropo. No obstante ello, ambos son óxidos de hierro, son opacos y parecen isótropos en luz polarizada transmitida.

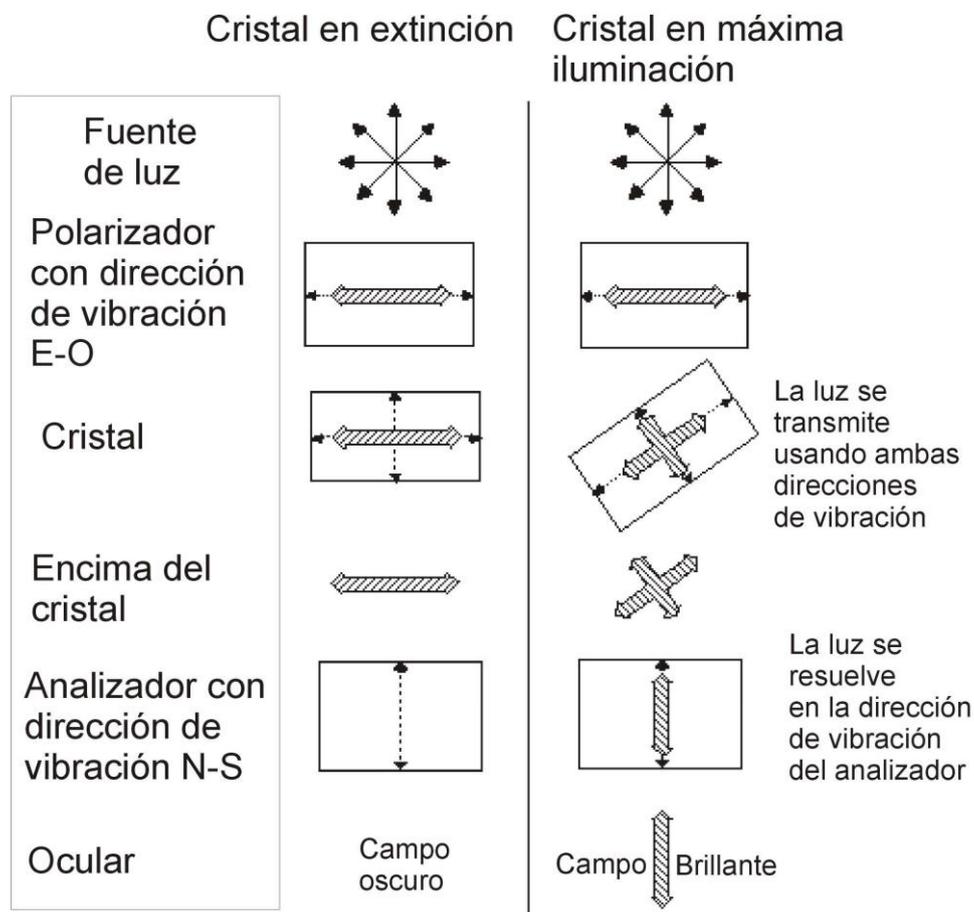


Observaciones ortoscópicas a nicoles cruzados (con analizador)

Direcciones de vibración de una sección

Consideremos primero qué pasará sin el analizador, suponiendo que la luz proviene del polarizador vibrando en dirección E-W: en ciertas posiciones del espécimen mineral el plano de polarización será paralelo a alguna de las direcciones de vibración del cristal. En esta situación, toda la luz transmitida utiliza sólo una de las direcciones de vibración, ya que no hay componente de vibración en el plano de la otra. Por el contrario, si el plano de polarización es oblicuo a algunas de las direcciones de vibración del cristal, la luz atravesará este último dividiéndose en dos rayos, esto es siguiendo las dos direcciones de vibración preferenciales del espécimen. Estos dos rayos vibrarán en planos perpendiculares.

Ahora consideremos el caso de que interponemos el analizador (polarizante en sentido N-S) en el camino de los rayos. Observamos que, en un giro de 360° de la platina, el mineral pasa por cuatro posiciones de iluminación máxima y cuatro posiciones de extinción. Así, cada posición de extinción diverge 90° de la siguiente. Dicha situación se plantea cuando existe coincidencia entre alguna de las direcciones de vibración del cristal y el plano en que la luz vibra a partir de su polarización antes de ingresar al mismo (polarizador E-W) como indica la figura siguiente.



Entre las cuatro posiciones de extinción, algo de luz es capaz de pasar a través del analizador, porque dicha luz utiliza ambas direcciones de vibración del cristal, ninguna de las cuales es normal a la dirección de vibración del analizador.

Colores de interferencia

Un rayo de luz blanca originalmente polarizado según un plano, pasa a través de cristales anisótropos como dos rayos con diferentes velocidades.

Cuando insertamos el analizador, los dos rayos son recombinados en el plano de este último, interfiriéndose uno a otro en la medida de que estén fuera de fase. La diferencia de fase depende de:

- El espesor de la sección
- La longitud de onda de la luz
- La diferencia entre los índices de refracción de los dos rayos (constante para todas las longitudes de onda si no hay dispersión), la cual se denomina **birrefringencia**.

Así, para un grano mineral dado en una sección particular, la longitud de onda es la única variable y la diferencia de fase variará para las diferentes longitudes de onda que componen la luz blanca polarizada. De aquí surge que ciertos colores serán reforzados por causa de las diferencias de paso que coinciden con un rango completo de longitudes de onda (interferencia constructiva), mientras otros son en cambio debilitados cuando las diferencias de fase envuelven sólo la mitad de una longitud de onda (interferencia destructiva).

El resultado es un rayo coloreado, esto es, el grano aparece coloreado cuando cruzamos el analizador, debido a la remoción de ciertas longitudes de onda de la luz blanca original. Para una discusión más rigurosa acerca de los colores de interferencia consultar los apuntes teóricos y los libros de Donald Bloss y González Bonorino.

Birrefringencia

El máximo color de interferencia es a menudo diagnóstico de un mineral anisótropo y esto se observa en secciones delgadas que exhiben simultáneamente los índices de refracción máximo y mínimo. La diferencia numérica entre los dos índices es la **birrefringencia**. Por ejemplo, la augita tiene un índice máximo y uno mínimo de 1.724 y 1.700, respectivamente, dando una birrefringencia de 0.024. Como este valor absoluto difícilmente nos dice nada si no medimos con exactitud los índices de la augita, usamos la **tabla de Michel Levy**, que resume las relaciones entre los colores de interferencia, birrefringencia y espesor de la sección delgada.

Angulo de extinción

El ángulo de extinción de un grano dado es el ángulo entre una dirección cristalográfica específica del cristal y alguna de sus direcciones de vibración. Así, en una sección dada, existen dos ángulos de extinción posibles, uno para cada dirección de vibración. Sólo uno de éstos ángulos es característico, generalmente el que se toma con el ryo más lento. El ángulo de extinción es una característica diagnóstica de muchos minerales. Como ocurre con los colores de interferencia, el valor del ángulo de extinción varía con la sección del mineral (con su posición dentro del corte delgado). Es importante registrar el carácter de la extinción en la mayoría de los granos de un mineral en un corte delgado, de manera tal que siempre determinemos el máximo ángulo de extinción observable. Se aplicarán las siguientes generalizaciones:

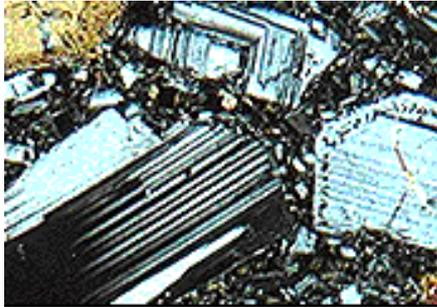
- Minerales que pertenecen a los sistemas ortogonales (tetragonal, hexagonal y ortorrómbico) extinguen siempre en forma **paralela o recta**
- Minerales que pertenecen al sistema monoclinico a menudo mostrarán extinción **oblicua**, aunque algunas veces pueden dar extinciones rectas.
- Minerales triclinicos en general mostrarán extinciones **oblicuas**.

Para tomar el ángulo de extinción de un mineral llevamos una dirección cristalográfica identificable a posición N-S (ayudándonos con los hilos del retículo del ocular) y tomamos el valor angular en la platina graduada. Luego llevamos el mineral a extinción moviendo la platina en dirección de las agujas del reloj y volvemos a tomar el valor angular. La diferencia nos da el ángulo de extinción.

Direcciones cristalográficas: un borde recto del mineral; trazas del clivaje; un alargamiento marcado en cristales subhedros o anhedros; una superficie de macla.

Maclado

Una consecuencia de la simetría de la estructura interna de los cristales es el posible crecimiento de cristales maclados. Maclas repetidas es una característica prominente de muchas especies minerales, particularmente en los feldespatos plagioclasas. El cristal se observa dividido en lamellas con orientaciones ópticas alternantes. El diseño rayado, blanco y negro alternante, surge de la orientación diferencial de un grupo de lamellas respecto de las contiguas, que tienen una orientación divergente: así, cuando algunos cristales de la macla están extinguidos, otros presentan iluminación y viceversa.



Elongación

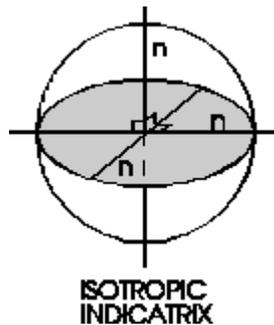
Un mineral puede estar característicamente elongado en una dirección cristalográfica específica. Podemos conocer qué dirección de vibración es coincidente con ese alargamiento preferencial de un cristal. Para ello usamos láminas compensadoras, como la de yeso o “rojo de 1° orden”. A su vez esto nos permite identificar qué rayo está atravesando la dirección de vibración que observamos.

Colocamos el mineral en posición de máxima iluminación, con su elongación máxima dentro del primer cuadrante (NE) e insertamos la placa de yeso. Como en la dirección NE-SW vibra el rayo más lento de la placa de yeso, si producimos adición significa que el rayo del mineral es coincidente en fase con el rayo lento del yeso: hemos identificado *el rayo lento del mineral* por lo que la elongación del mismo es **positiva** o **largo-lento**. Si ocurre en cambio una sustracción, la interferencia entre el rayo del mineral y el rayo lento de la placa de yeso es destructiva (fuera de fase) por lo que estaremos observando *el rayo más rápido del mineral*: decimos que la elongación es **negativa**, o bien **largo-rápido**.

INDICATRICES OPTICAS

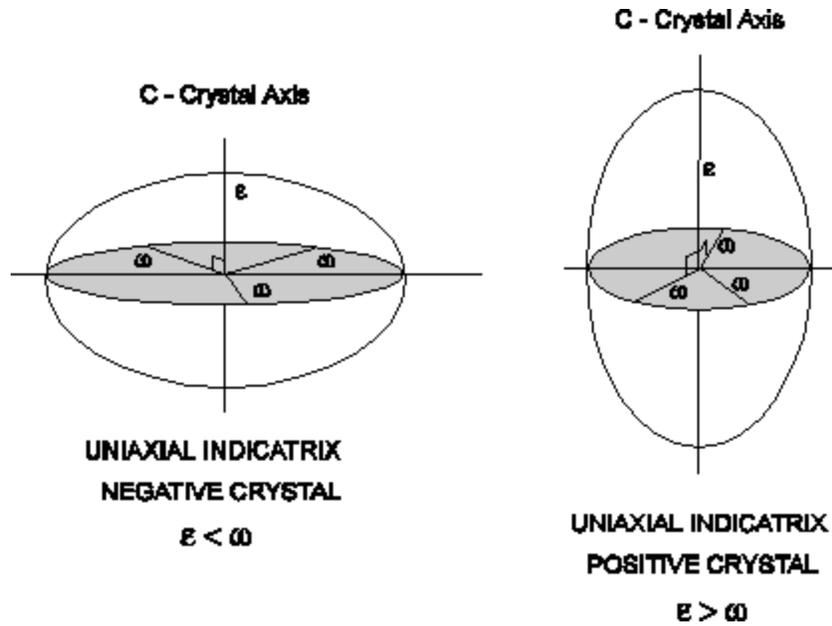
La indicatriz es básicamente una construcción geométrica cuya forma está determinada por los índices de refracción y las orientaciones de un cristal. Las indicatrices son usadas como una ayuda en la determinación o entendimiento del comportamiento óptico de los cristales. Específicamente, una indicatriz es un elipsoide con un número exclusivo de semi-ejes; éstos últimos, serán tantos como el número de índices de refracción distintivos del cristal (1-2 ó 3 según el caso), cuyas propiedades ópticas son descriptas justamente por la indicatriz. Ya que existen tres “clases ópticas” de minerales (isótropos, anisótropos uniaxiales y anisótropos biaxiales), se pueden definir tres diferentes tipos de indicatrices.

En los minerales isótropos la indicatriz es una esfera, a causa de que existe sólo un índice de refracción y éste es el mismo en todas direcciones.



La forma en que usamos una indicatriz es muy simple. Dibujemos primero un vector que pase a través del centro de la indicatriz, paralelo a la dirección de propagación de la luz que está pasando por el cristal. Luego dibujemos un plano perpendicular a ese vector. La intersección de ese plano con la superficie de la indicatriz será una elipse, cuyos ejes son proporcionales en su largo a los índices de refracción del mineral y que están orientados paralelamente a las direcciones de vibración preferenciales del cristal. Como una indicatriz isotrópica es una esfera todas las secciones que pasen a través de su centro serán círculos (“elipses deformadas”) con radios iguales al radio de la esfera. A la vez, como todos los radios del círculo son equivalentes, la sección de la indicatriz señala que habrá sólo un índice de refracción (n) y que por lo tanto no hay restricción en la orientación de la dirección de vibración de la luz a medida que esta pasa por el material isotrópico: atraviesa el mineral vibrando en la dirección determinada por el polarizador. Así el rayo de luz sólo define un índice de refracción (*es decir que la doble refracción o birrefringencia no ocurre*) y la dirección de vibración del rayo de luz único es paralela a la dirección con que el nicol inferior polarizó la luz. Consecuentemente, cuando la luz alcanza el polaroide superior (analizador), será completamente absorbida y el cristal se observará extinguido. Rotando la sección el cristal se mostrará exactamente igual, ya que la sección de la indicatriz continúa siendo un círculo.

La siguiente clase de indicatriz es la uniaxial, que describe la óptica de los cristales dimétricos, los cuales tienen dos índices de refracción distintivos (*sistemas hexagonal y tetragonal*). La indicatriz uniaxial tiene sólo dos ejes y es una figura geométrica tridimensional que se parece a un elipsoide semi-deformado (elipsoide de revolución, que surge de hacer girar una elipse sobre su diámetro mayor). La orientación de la indicatriz es tal que su eje particular (es decir el eje vertical, que es el que otorga la elipticidad) está orientado paralelamente al eje C del cristal. El largo de este eje es proporcional al valor de un índice de refracción que llamaremos **epsilon** (ϵ). Epsilon es el índice de refracción del rayo extraordinario. Los ejes horizontales de la indicatriz, los cuales son perpendiculares al eje vertical, son todos proporcionales en longitud a un índice de refracción que llamaremos **omega** (ω) y definen una sección circular en la indicatriz. Omega es el índice del rayo ordinario. Como **epsilon** puede ser ya sea mayor o menor que **omega** (dicho de otra manera el rayo extraordinario puede ser más lento o más veloz que el ordinario), es que hay dos posibles formas para la indicatriz uniaxial.

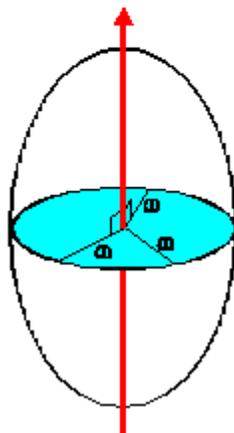


La figura muestra que si **epsilon** es menor que **omega** (el cristal es uniaxial negativo), la indicatriz es un elipsoide oblado (dibujo de la izquierda). Si **epsilon** es en cambio mayor que **omega** (el cristal es uniaxial positivo), la indicatriz es un elipsoide prolado (dibujo de la derecha). Los dibujos también exhiben las secciones circulares de radio **omega**. El eje particular de la indicatriz, es perpendicular a la sección circular y siempre paralelo al eje C del cristal, y es llamado **eje óptico**. El nombre de indicatriz uniaxial viene del hecho de que existe sólo una sección circular y, consecuentemente, un eje óptico para esta clase de indicatriz. Para entender la óptica de los cristales uniaxiales es necesario considerar tres casos.

Primer caso: *El cristal está orientado con su eje C perpendicular al plano de la platina*

En la figura se muestra la dirección de propagación del rayo incidente sobre el cristal como una flecha roja.

UNIAXIAL INDICATRIX
POSITIVE CRYSTAL
 $\epsilon > \omega$
C - Crystal Axis

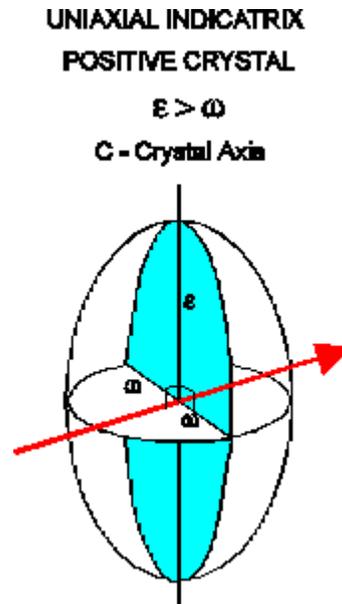


La sección transversal a la indicatriz y perpendicular al rayo incidente es la sección circular de radio **omega** (círculo relleno). Como esta sección es circular, existe sólo un índice de refracción y no doble refracción. En adición, no hay control sobre la dirección de vibración de la luz cuando esta pasa por el cristal. Finalmente, rotando la platina (o dicho de otra forma, rotando al cristal) no cambia la sección de la indicatriz. Estos resultados son similares a lo

observado para la indicatriz isótropa, por lo que el cristal uniaxial se comporta como isótropo **sólo cuando está orientado de esta manera** (está siempre en extinción). Así, si encontramos un mineral uniaxial que debería ser birrefringente pero que se ve siempre extinto durante el giro completo de la platina, estamos seguros que el cristal está orientado con su eje C perpendicular al plano de esta última.

Segundo caso: *El eje C del cristal está orientado paralelamente al plano de la platina*

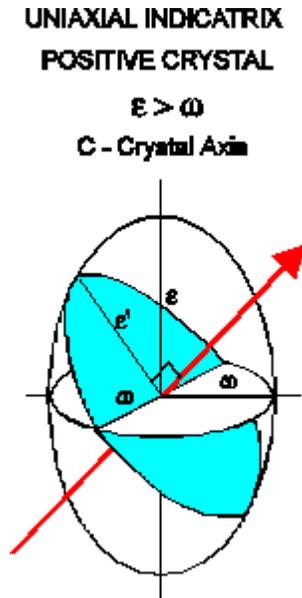
En este caso, la luz incidente viaja a través del cristal en forma perpendicular al eje C cristalográfico. La figura inferior ilustra este caso. El camino de la luz es mostrado nuevamente como una flecha roja y la sección perpendicular a esta dirección es la elipse rellena.



La sección elíptica tiene radios iguales a **epsilon** y **omega**. Como estos índices de refracción son los máximo y mínimo posibles (respectivamente para un mineral uniaxial positivo cuya indicatriz está orientada como en la figura), un cristal con esta orientación tendrá la máxima birrefringencia posible para una especie mineral. En otras palabras, nos mostrará el mayor color de interferencia posible. Si el cristal está orientado tal que ninguna dirección de vibración sea paralela a la dirección preferencial de vibración del polarizador inferior (o sea formando un ángulo entre 1° y 89° con los hilos del retículo), el cristal no estará extinguido y mostrará un color de interferencia determinado por su birrefringencia. Durante la rotación de la platina el cristal sufrirá extinción cada 90° (extinción recta o paralela), cuando alguna de las direcciones de vibración del cristal sea paralela al polarizador inferior. Otra cosa muy útil a notar es que, cuando el cristal extingue, las propiedades asociadas con la dirección de vibración pueden ser observadas (cuando los índices de refracción son paralelos al polaroide inferior). Ejemplos de esto son las propiedades de pleocroismo (luz paralela) y de relieve diferencial. La identidad del índice observado en una posición de extinción específica puede ser determinada con el uso de la placa compensadora de yeso o de mica, como lo vimos la clase anterior.

Tercer caso: El eje C del cristal no es ni perpendicular ni paralelo al plano de la platina.

Este caso queda ilustrado en la figura siguiente, donde una dirección de propagación cualquiera es mostrada por un rayo de color rojo. La sección perpendicular al rayo también se observa rellena.



La sección tiene, como en el caso anterior, una forma elíptica, con ejes proporcionales a **omega** y a un índice intermedio entre **omega y epsilon** denominado **epsilon prima**. Dado que el valor de este índice es intermedio, la birrefringencia que producirá un cristal orientado al azar **será siempre menor que la máxima birrefringencia posible del cristal**. La magnitud de la birrefringencia variará con la orientación del eje C. Cuando este último es perpendicular a la platina, el mineral se ve extinguido (birrefringencia mínima). La birrefringencia aumenta a medida que el ángulo entre el eje C y la platina decrecen hasta hacerse igual a cero (paralelo al plano de la platina), donde la birrefringencia es máxima. En consecuencia, los cristales orientados con su eje C al azar mostrarán colores de interferencia intermedios, determinados por tal orientación.

Cristalografía y Óptica

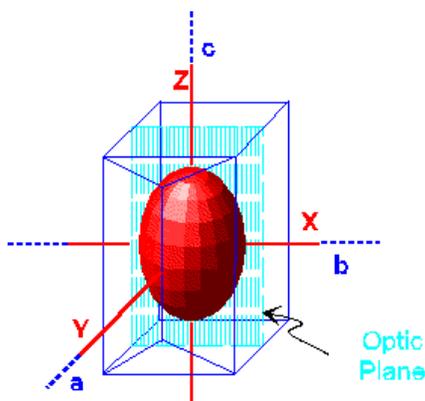
Como recordatorio breve, en la siguiente tabla detallamos las relaciones entre óptica y cristalografía para los 6 sistemas cristalinos.

Sistema Cristalino	Ejes cristalográficos	Clase Óptica	Indices de refracción	Indicatriz
Isométrico	$a_1=a_2=a_3$	Isótropa	1-n	Esfera
Tetragonal Hexagonal	$c > a_1=a_2=(a_3)$ $a^* \perp c$	Anisótropa uniaxial	ϵ y ω $\epsilon > \omega$ (+) $\epsilon < \omega$ (-)	Elipsoide de revolución Eje de revolución o particular = ϵ Eje horizontal = ω
Ortorrómico	$a \neq b \neq c$ Mutuamente \perp	Anisótropa biaxial	α, β y γ $\alpha < \beta < \gamma$	Elipsoide. Direcciones de vibración paralelas a los ejes cristalográficos.
Monoclínico	$a \neq b \neq c$ $b \perp$ al plano a-c	Anisótropa biaxial	α, β y γ $\alpha < \beta < \gamma$	Elipsoide. Una dirección de vibración es paralela a algún eje cristalográfico.
Triclínico	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$	Anisótropa biaxial	α, β y γ $\alpha < \beta < \gamma$	Elipsoide. Las direcciones de vibración pueden tener cualquier orientación respecto de los ejes cristalográficos.

Minerales Biaxiales

Para estudiar ópticamente los minerales biaxiales es necesario especificar 3 diferentes índices de refracción: n_{α} , n_{β} , n_{γ} son desde ahora en más los nombres de índices usados en el texto que sigue. Si bien hay 3 índices de refracción posibles (mayor, intermedio y menor), en cada sección de un mineral bajo el microscopio que observen, la luz sigue dividiéndose en sólo dos rayos – **RÁPIDO** y **LENTO**. La terminología *ordinario* – *extraordinario* no es más usada en adelante. En este caso ambos rayos se comportan como lo hacía el rayo extraordinario en los minerales uniaxiales.

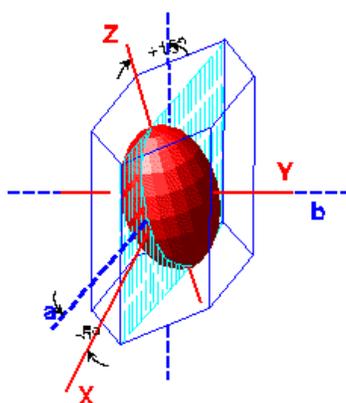
La máxima birrefringencia de un mineral biaxial está definida como en los minerales uniaxiales: $\Delta = (n_{\gamma} - n_{\alpha})$.



ORTORRÓMBICO

- 3 ejes cristalográficos de largo desigual, mutuamente perpendiculares uno al otro.
- Los 3 planos de simetría perpendiculares entre sí corresponden con las secciones principales de la indicatriz.
- Los ejes cristalográficos **deben coincidir** con los ejes de la indicatriz, no existiendo necesariamente coincidencia dimensional entre éstos (es decir que **Z** no necesariamente debe coincidir con **c**, etc).

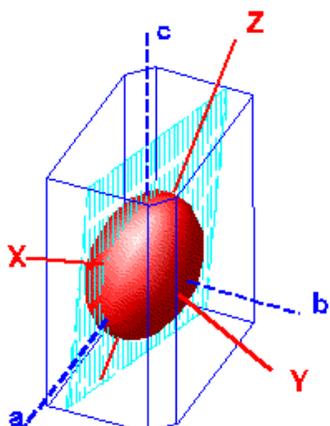
e.g. Olivine - $X=b, Y=c, Z=a$
OPX - $X=b, Y=a, Z=c$



MONOCLÍNICO

- El eje cristalográfico **b** coincide con un eje binario y es perpendicular a un plano de simetría (010). Los ejes **a** y **c** son perpendiculares a **b** pero se intersectan entre sí a un ángulo $>90^\circ$.
- Un eje de la indicatriz (X, Y o Z) coincide con el eje cristalográfico **b**; los dos restantes yacen en el plano 010 pero no son necesariamente paralelos a **a** o **c**.
- El ángulo entre **a** o **c** y un eje cualquiera de la indicatriz es:
 - +ve si X, Y o Z cae en el ángulo obtuso
 - ve si X, Y o Z cae en el ángulo agudo

e.g. CPX - $X=b, Z^{\wedge}c=35-48^\circ$
Hornblende - $Y=b, X^{\wedge}a=+3$ to $-19^\circ, Z^{\wedge}c=12-34^\circ$



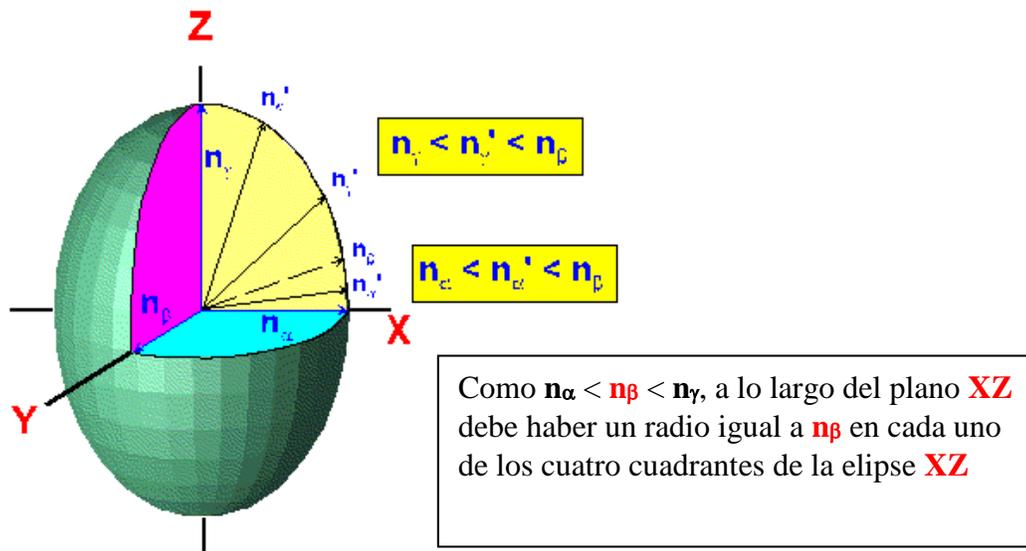
TRICLINICO

- Los 3 ejes cristalográficos, tienen diferentes largos y se cruzan a ángulos distintos de 90°
- No hay más elementos de simetría que un centro de inversión
- Salvo por azar, los ejes de la indicatriz no son paralelos a los ejes cristalográficos.

e.g. Microcline
Plagioclase

Indicatriz Biaxial

La indicatriz biaxial es un elipsoide cuyos tres ejes son mutuamente perpendiculares entre sí (X, Y y Z), pero no son iguales dimensionalmente. Los ejes X, Y y Z de la indicatriz no siempre contienen a las direcciones de vibración del mineral. Los índices **alfa**, **beta** y **gamma** se orientan paralelamente a los ejes de la indicatriz: X coincide con **alfa**, Y con **beta** y Z con **gamma**. La indicatriz biaxial es un elipsoide tridimensional **siempre alargado según la dirección Z**.



Los radios de la indicatriz se distribuyen siempre de manera tal que **alfa** es el menor, **beta** intermedio y **gamma** el mayor. Los radios con longitudes intermedias entre alfa y beta son llamados **alfa-prima** (α'), mientras que los que tienen longitudes intermedias entre beta y gamma son denominados **gamma-prima** (γ').

La indicatriz biaxial tiene 3 secciones principales, todas ellas elipses:

- Ejes X - Y = n_α & n_β
- Ejes X - Z = n_α & n_γ
- Ejes Y - Z = n_β & n_γ

Secciones al azar hechas a través de la indicatriz también forman elipses.

La indicatriz uniaxial exhibía una única sección circular de radio ω (perpendicular al eje óptico, o sea ϵ). Una indicatriz biaxial exhibe dos secciones circulares de radio = n_β ; las secciones circulares se intersectan a lo largo del eje Y de la indicatriz, el cual también tiene radio = n_β .

Observemos el plano X - Z de la figura anterior.

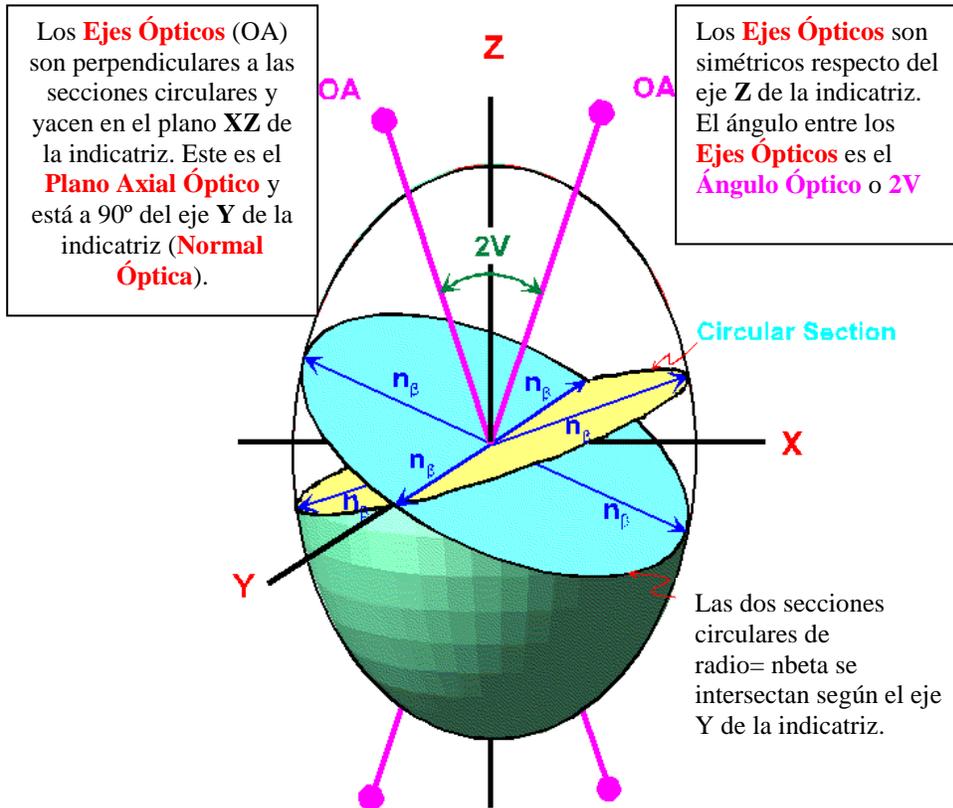
Los ejes de la elipse son n_α y n_γ .

Los radios varían desde n_α pasando por n_β hasta n_γ .

Recordar que si $n_\alpha < n_\beta < n_\gamma$, algunos de los múltiples radios de esa elipse serán iguales a n_β en el plano X - Z. Asimismo, la longitud de la indicatriz a lo largo del eje Y también tiene un valor n_β , de forma

tal que el eje Y y los radios que en el plano X - Z tengan valor $= n_{\beta}$ definirán secciones circulares con radio n_{β} . Así, a diferencia de la indicatriz uniaxial, en donde se reconocía una sola sección circular, en la indicatriz biaxial es posible encontrar dos secciones de este tipo, las cuales se cortan a lo largo del eje Y de la indicatriz y pasan por el centro de la misma, divergiendo una de otra a un ángulo específico $2V$.

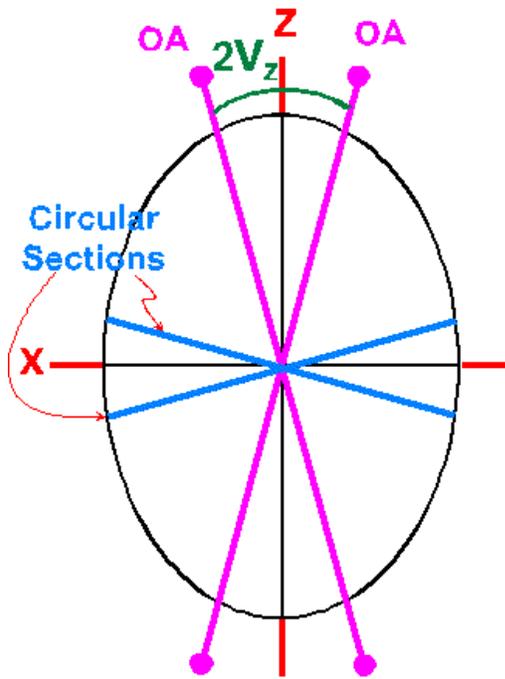
Los ejes ópticos son las perpendiculares a esas superficies circulares, los cuales también deberán pasar por el centro de la indicatriz. Los dos ejes ópticos yacen en el plano X-Z de la indicatriz (de ahora en más llamado **PLANO AXIAL OPTICO**) y están separados uno de otro por un ángulo igual a $2V$. El eje Y de la indicatriz es normal al *plano axial* y es llamado **normal óptica**. Las secciones circulares y los ejes ópticos son ilustrados en la figura de más abajo.



Posición de los Ejes Ópticos – Signo Óptico

En la figura anterior se ilustraron los ejes ópticos y secciones circulares perpendiculares a ellos. Dependiendo del valor de beta, el bisector del ángulo agudo ($<90^\circ$) entre los ejes ópticos será ya sea el eje Z de la indicatriz o bien podrá ser X. Cuando beta tiene un valor más cercano a alpha que a gamma Z será la bisectriz aguda. Cuando beta tiene un valor más parecido a gamma que a alpha estaremos frente al caso contrario. Cuando el eje Z bisecta el ángulo agudo entre los ejes ópticos el cristal es llamado biaxial positivo. En forma opuesta, si es el eje X el que oficia de bisectriz aguda, el cristal se denomina biaxial negativo. El ángulo $2V$ siempre se toma como el ángulo más agudo que existe entre los ejes ópticos.

En la figura siguiente **Z** ocupa la posición de bisectriz aguda (B_{xa}). El mineral tiene signo óptico positivo. En dicho caso **X** es la bisectriz obtusa (B_{xo}) de la indicatriz.

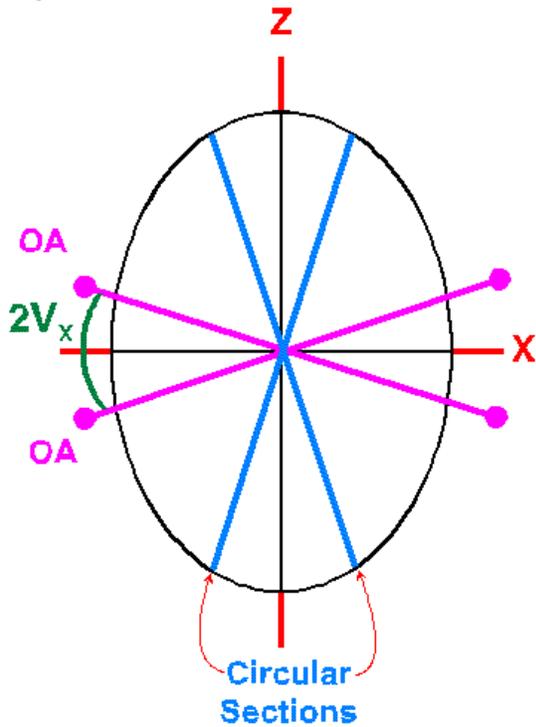


(+)

Bisectriz Aguda (Bxa) = Z

Bisectriz Obtusa (Bxo) = X

En el caso de que X sea la Bxa, Z ocupará el lugar de la Bxo y el mineral será ópticamente negativo.



(-)

Bisectriz Aguda (Bxa) = X

Bisectriz Obtusa (Bxo) = Z

En el caso especial $2V = 90^\circ$, el mineral es ópticamente neutro.

Otra convención usada es para identificar el ángulo entre los ejes ópticos: lo llamaremos ángulo $2V_X$ si **X** es la Bxa; y $2V_Z$ si **Z** es la Bxa.

Estos ángulos pueden variar entre 0 a 180° , tal que se cumpla la siguiente relación:

$$2V_X + 2V_Z = 180^\circ$$

Usando esta convención el signo óptico se determina por lo siguiente:

- si $2V_Z < 90^\circ$, el mineral es +.
- si $2V_Z > 90^\circ$, el mineral es -.

La luz que viaja a través de un mineral biaxial es separada en dos rayos diferentes, como vimos más arriba – Ambos rayos (LENTO y RAPIDO) vibran a 90° uno del otro.

Las direcciones de vibración de los rayos son definidas, o determinadas, por los ejes de la elipse observada (sección transversal de indicatriz), la cual está siempre orientada a 90° de la normal de la onda (dirección de propagación del rayo).

El índice de refracción correspondiente al rayo RAPIDO estará siempre entre n_{alfa} y n_{beta} y se nomina, como también se dijo antes, n_{alfa} '. El índice de refracción del rayo LENTO estará siempre entre el valor de n_{beta} y el de n_{gamma} , y corresponderá a un n_{gamma} '.

1. X – siempre corresponde al rayo rápido y tendrá el n más bajo del mineral.
 - RI = n_{alfa} , siempre rápido
2. Y – será ya sea el rayo rápido o el más lento de la sección dependiendo de qué otro eje de la indicatriz esté en la misma y su índice de refracción estará entre el menor y el mayor del mineral.
 - RI = n_{beta} , rápido o lento
3. Z – siempre corresponde al rayo más lento y tendrá el mayor índice de refracción.
 - RI = n_{gamma} , siempre lento.

Obtención de una figura de interferencia

Para obtener y observar una figura de interferencia usando el microscopio debemos:

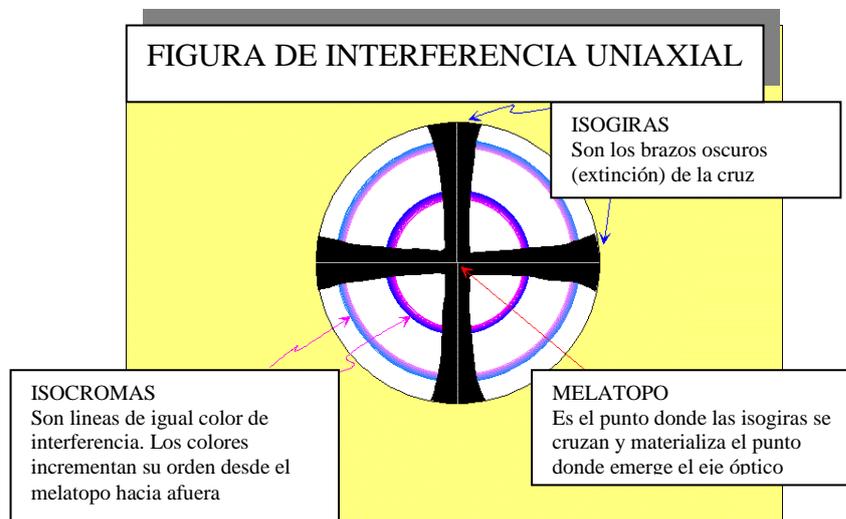
1. Usar la mayor iluminación posible, focalizar sobre el grano de mineral que se desea observar, preferiblemente uno libre de fracturas y de inclusiones.
2. Incorporar el condensador auxiliar de luz convergente y reenfocar.
3. Cruzar los nicoles.
4. Insertar la lente de Bertrand o remover el ocular y mirar el tubo del microscopio.

No veremos el grano de mineral sino la figura de interferencia de los rayos cónicos, la cual aparece en la superficie superior de la lente de objetivo usada.

La figura de interferencia consiste de un patrón de colores de interferencia y de una o dos bandas negras que pueden formar una cruz. La naturaleza y diseño de la figura es dependiente de la orientación del cristal.

Para los minerales uniaxiales se considerarán tres tipos diferentes de figuras:

1. Figura de Eje Óptico – El eje óptico es perpendicular a la platina (Primer caso de indicatriz uniaxial)
2. Figura de Flash – El eje óptico está horizontal o paralelo a la platina (Segundo caso).
3. Figura de eje Óptico descentrada – El eje óptico está inclinado (Tercer caso)



Signo Óptico

Usamos la lámina compensadora. Si se trata de una figura centrada de eje óptico usamos el primer y tercer cuadrante definidos por la cruz negra (isogiras). Agregamos la lámina compensadora y determinamos si hay adición o sustracción en las bandas de colores (isocromas). El principio está basado sobre el mismo concepto que usamos para identificar los índices de refracción mayor (rayo lento) y menor (rayo rápido) o la elongación del mineral. Si hay adición significa que **gamma** del yeso (rayo lento del yeso) coincide con **epsilon** del mineral y que éste último corresponde al índice de refracción del rayo más lento, por lo tanto será más grande que **omega**, índice en este caso correspondiente al rayo más rápido. Por lo tanto si **epsilon** es mayor que **omega** el mineral uniaxial es **positivo**.

Si por el contrario en los cuadrantes 1 y 3 existe sustracción, esto indicará que **epsilon** es el índice menor (rayo rápido) y que el signo óptico es **negativo**.

En figuras excéntricas de eje óptico este procedimiento es similar, sólo que debemos tener en claro cuál cuadrante estamos observando. Para ello debemos girar la platina 360°, de manera que observando el pasaje de las isogiras podemos darnos cuenta en qué posición de la figura estamos comparando el signo óptico.

Las figuras de flash son inútiles a la hora de brindar información acerca del signo óptico, a menos que sigamos dos pasos. Primero observar la dirección en que se difumina la figura. Esta última dirección indica la posición del eje óptico sobre la platina (recordar que yace paralelo a esta última en este caso). Luego debemos quitar el sistema de iluminación conosópica y la lente de Bertrand, y proceder como en una observación ortoscópica normal. Como el eje óptico siempre está ocupado por el rayo extraordinario (de índice **epsilon**), agregando la placa de yeso en dirección paralela al eje óptico, y analizando si hay adición o sustracción para saber si se trata del rayo lento o el más veloz, podremos determinar el signo óptico del mineral.

Figuras de interferencia biaxiales

Las figuras de interferencia biaxiales se obtienen de la misma manera que las uniaxiales.

1. Con la lente de mayor aumento y fuente al tope de la luminosidad, enfocar un grano de mineral libre de fracturas e inclusiones
2. Rebatir el condensador auxiliar (lente convergente) y reenfocar abriendo la apertura de diafragma al máximo.
3. Cruzar los nicoles.
4. Insertar la lente de Bertrand o remover el ocular y mirar en el tubo del microscopio.

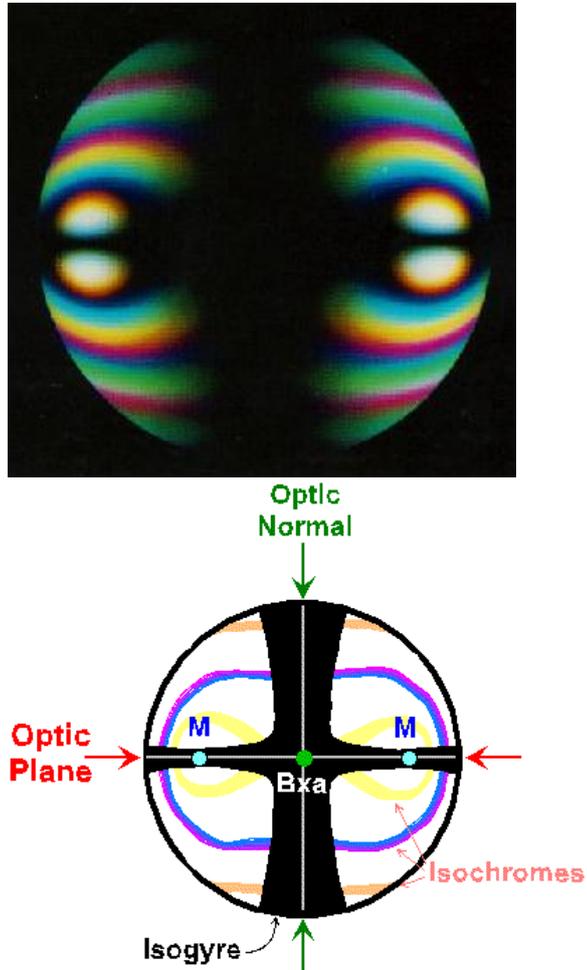
No se verá el grano, sino una figura de interferencia, la cual aparece en el tope de la lente objetivo. La apariencia de la figura depende de la orientación del grano de mineral y de su indicatriz dentro de él.

Examinaremos 5 casos:

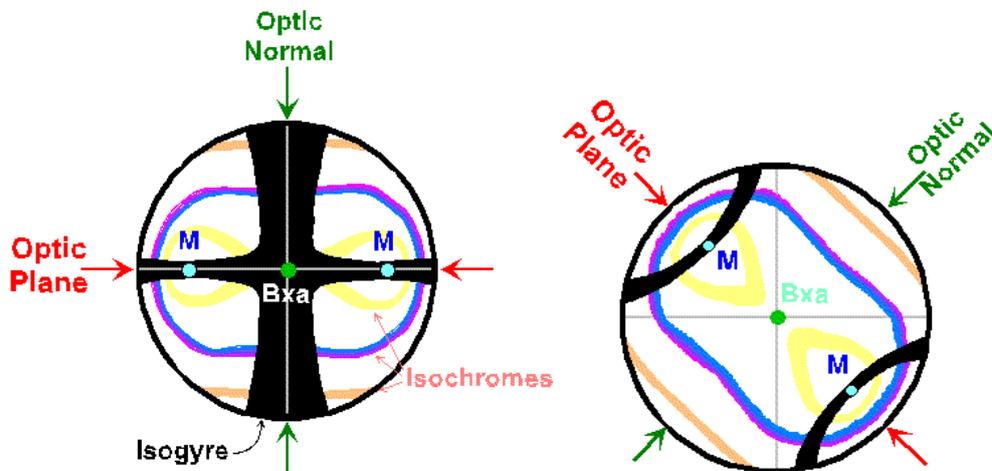
1. Bisectriz aguda centrada
2. Figura centrada de Eje Óptico
3. Bisectriz Obtusa centrada
4. Figura de Normal Optica centrada o Figura de Flash biáxica
5. Orientaciones al azar (caso más común).

Figura de Bisectriz Aguda centrada

La Figura de Bxa (ver más abajo) es obtenida cuando la bisectriz aguda está orientada perpendicularmente al plano de la platina. La imagen de la izquierda es una vista de la figura directamente desde el microscopio, mientras que la de la derecha es una esquematización de la misma con sus componentes detallados.



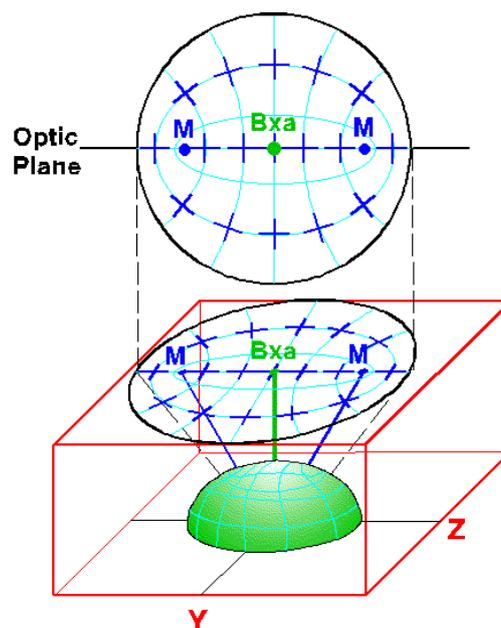
Si el ángulo $2V$ del mineral es bajo, entonces los melatopos yacen dentro del campo de la visual cuando la platina es rotada. Las isocromas forman un óvalo o figura de 8 alrededor de los melatopos, mientras el patrón de las isogiras cambia a medida que la platina va rotando.



En extinción (imagen anterior, a la izquierda) las isogiras forman una cruz con brazos paralelos a los hilos del retículo. Rotando la platina a una posición a 45° de la extinción (máxima iluminación; imagen de la derecha) la cruz se divide y las isogiras formarán dos hipérbolas que yacen en los cuadrantes opuestos. Los melatopos siempre contienen al Plano Axial.

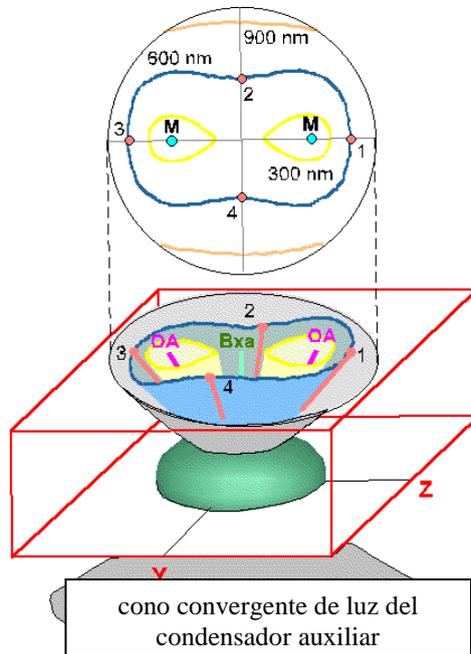
Formación de las isogiras e isocromas

Ya que estamos mirando la figura de interferencia de Bxa, figurémosnos la forma en que isogiras e isocromas son formadas. Si tenemos una figura de Bxa significa que la indicatriz (de hecho la sección del corte) está en posición vertical, como vista desde arriba y no de frente. Cuando rotamos la platina, deberíamos imaginarnos que lo hacemos con un eje de rotación en la Bxa. Las direcciones de vibración rotan conjuntamente a todo el cristal alrededor de este eje. En la imagen de más abajo se exhibe la indicatriz dentro del mineral, y las direcciones de vibración de la luz que lo atraviesan, proyectadas sobre la superficie de la indicatriz.



En la figura de interferencia, donde las direcciones de vibración que atraviesan el mineral son paralelas a las direcciones de polarización del microscopio, el color de interferencia resultante será negro – esto es la isogira. Al rotar la platina, la posición de las direcciones de vibración sobre la superficie de la indicatriz rotarán, resultando en el cambio de forma y en el movimiento de las isogiras en la figura.

Las isocromas son una expresión de la variable retardación de la luz en conosocopia.



Con la lente convergente en su lugar, un cono fuertemente convergente de luz es enfocado en el grano mineral. Sólo la luz que sigue uno de los ejes ópticos emerge del grano con cero retardo. Este punto es el **MELATOPO (M)**, de los cuales hay dos en los minerales biaxiales.

La luz que viaja a través del mineral a lo largo de cualquier otro camino mostrará variados grados de retardo dependiendo del espesor atravesado y la birrefringencia del mineral. El retardo aumenta hacia afuera concéntricamente desde el melatopo. Cerca del melatopo la luz experimenta menor birrefringencia ya que atraviesa el menor espesor del mineral, y por lo tanto tiene el menor retardo. El retardo incrementa lentamente desde los melatopos hacia la bisectriz aguda (Bxa). Este incremento de birrefringencia es parcialmente compensado por un camino más corto a recorrer por los rayos.

El resultado es que la isocroma está “apretada” hacia la Bxa , definiendo una forma de 8. El nº de isocromas depende de:

1. La birrefringencia parcial experimentada por la luz;

la diferencia entre

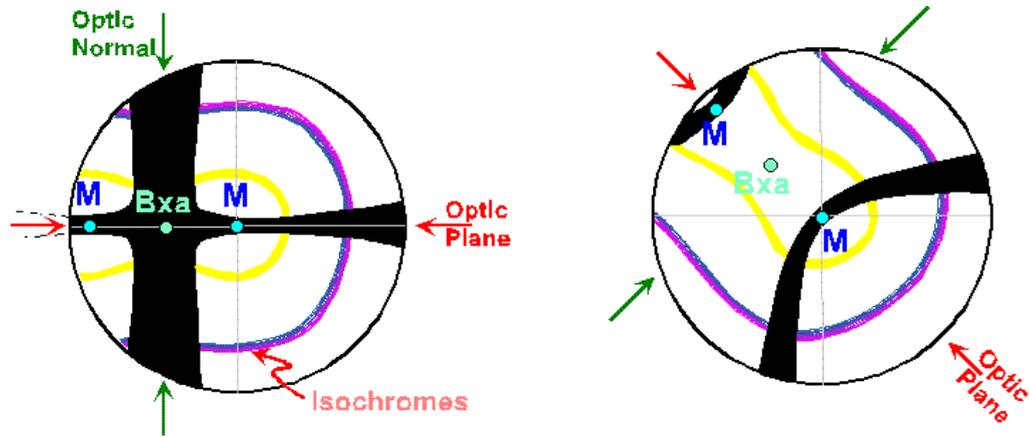
- n_{α} y n_{γ} para minerales biaxiales positivos σ
- n_{β} y n_{γ} para minerales biaxiales negativos, γ ;

2. el espesor del cristal.

alta birrefringencia & cristales espesos = numerosas isocromas

Figura centrada de eje óptico biaxial

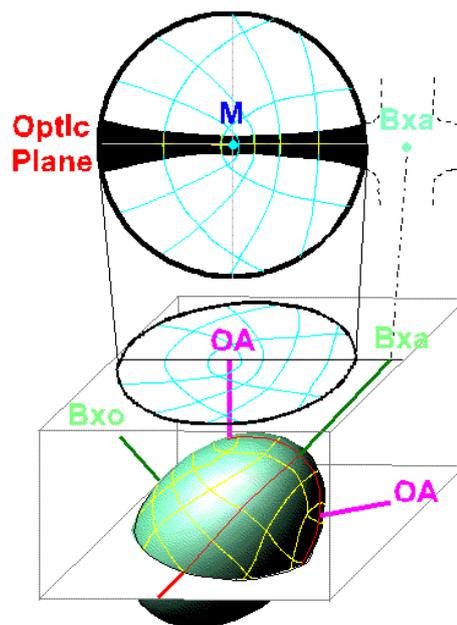
Angulo $2V < 30^\circ$

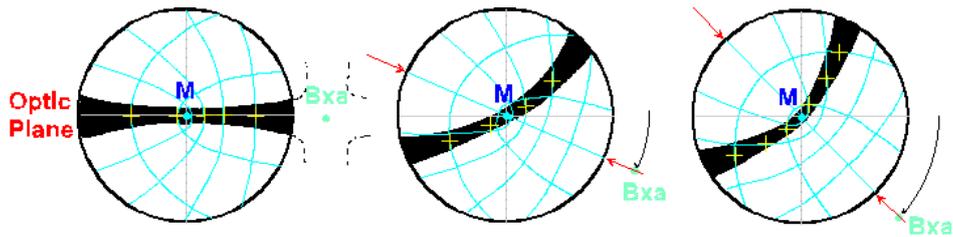


Esta figura se produce cuando uno de los ejes ópticos yace perpendicular al plano de la platina (eje vertical), y en forma correspondiente el segundo eje óptico y la Bxa están inclinados. En el block-diagrama inferior se puede observar esta disposición, además de la posición de Bxo y de la Normal Óptica. El melatopo vertical justo se posiciona en el cruce de los hilos del retículo. Como en los minerales uniaxiales, las secciones que se comportan como isotropas son las que brindarán una figura totalmente centrada de eje óptico. Esto es porque la sección perpendicular al eje óptico de la indicatriz es de forma circular, por lo que γ' o α' son iguales a β . Algunas figuras levemente descentradas pueden obtenerse de secciones con birrefringencia mínima (γ' o α' son $\approx \beta$).

En extinción, la cruz de la isogira será visible en el campo de vista del objetivo, como se muestra en la figura de arriba a la izquierda, siempre y cuando $2V < \sim 30^\circ$. De otra manera, el centro de la cruz estará desplazado del campo visual. El centro de la cruz de las isogiras siempre representa la posición de la Bxa. Si $2V$ es muy pequeño ($1 - 5^\circ$), la figura parece una figura de eje óptico uniaxial descentrada, aunque son fácilmente identificables y no hay posibilidad de errores al respecto.

Angulo $2V > 50^\circ$





Con un $2V > \sim 50^\circ$ son visibles sólo un melatopo con su respectiva isogira. El centro de la cruz (Bxa) yacerá fuera del campo de visión. Con el mineral en extinción se ve sólo un brazo de la isogira paralelo a alguno de los hilos del retículo, el cual se estrecha hacia la salida del melatopo. El plano axial de la indicatriz estará contenido por la isogira, mientras que la Bxa y el segundo melatopo se ubicarán ambos fuera del campo de visión.

Rotando la platina en sentido de las agujas del reloj (figura inferior), la cruz se deshace fuera del campo del objetivo, y la isogira pivota alrededor del melatopo en dirección contraria a las agujas del reloj. Cuando el plano axial está NS o EW la isogira está recta, formando uno de los brazos de la cruz, y el mineral está en extinción. Con el plano axial a 45° la isogira mostrará su máxima curvatura y la posición de la Bxa estará hacia el borde convexo de la isogira.

En esta posición el ángulo $2V$ puede ser estimado aproximadamente usando la figura de más abajo como guía. Una regla a seguir es que a mayor rectitud de la isogira en la posición de 45° , mayor es el ángulo $2V$.

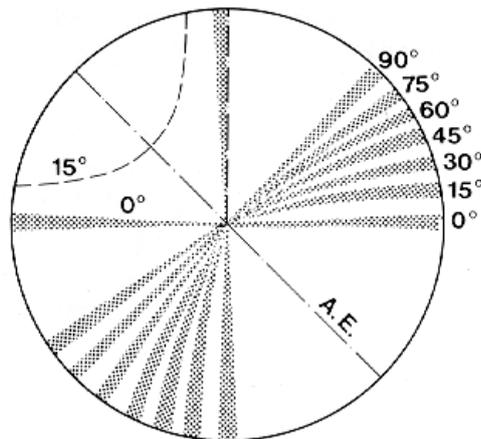
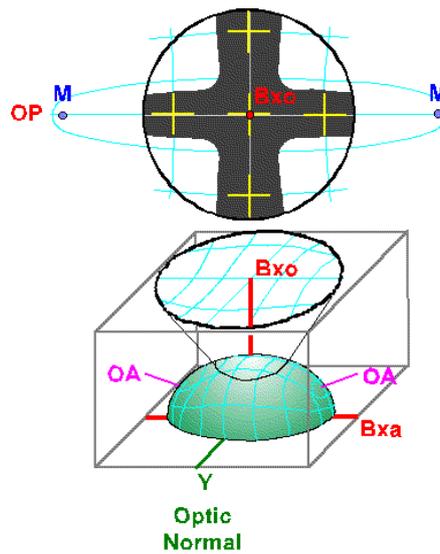


Figura de bisectriz obtusa



La figura de Bisectriz obtusa (Bxo) es producida cuando la Bxo es perpendicular al plano de la platina. El ángulo entre la Bxo y los ejes ópticos es $> 45^\circ$. Los melatopos, por lo tanto, siempre caerán afuera del campo visual.

El patrón de isocromas y las direcciones de vibración son similares a los de la figura de Bxa, no obstante la cruz de las isogiras es generalmente más difusa que en el caso de la figura de Bxa. El plano axial continuará paralelo a los hilos EW o NS.

Rotando la platina la cruz se desarma y abandona el campo visual en los cuadrantes en que el plano axial está siendo rotado, como en la figura de Bxa.

La cruz de las isogiras se parte con una rotación de sólo 5° o 15° .

Si $2V = 90^\circ$, la Bxa y Bxo son idénticas, convirtiendo al mineral en ópticamente neutro.

Si $2V$ es pequeño ($\sim 5^\circ$ o menos), la figura de Bxo recuerda a una figura de Normal Optica o Flash Biaxial, que es la próxima que estudiaremos.

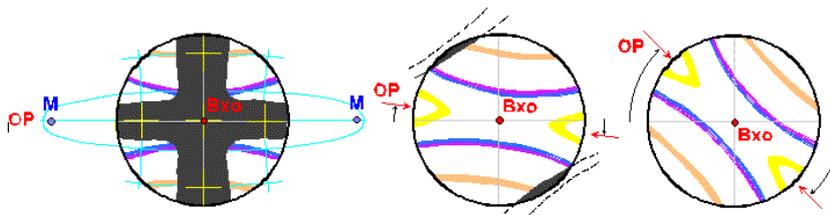
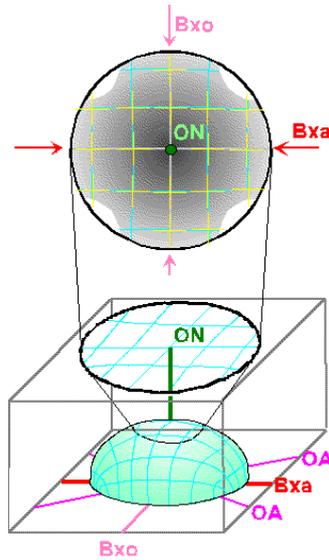


Figura de normal óptica o Flash biaxial

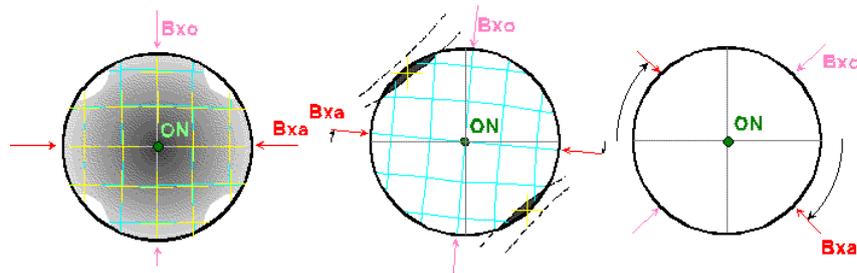
Una figura de Normal Óptica es similar a la figura de flash uniaxial, y es producida cuando la Normal Óptica (beta o Y) está en posición vertical. En esta orientación, el plano axial óptico, conteniendo a Bxa, Bxo y a los ejes ópticos, yace paralelo a la platina del microscopio. El grano que producirá esta figura de interferencia es justamente aquél que exhiba la máxima birrefringencia, o dicho de otra forma, los máximos colores de interferencia.



Las direcciones de vibración de los dos rayos existentes en la figura de interferencia son similares a aquéllas en la figura de flash uniaxial. Cuando los ejes X y Z de la indicatriz son paralelos a las direcciones de polarización de los nicoles, la figura de flash biaxial es una amplia y desenfocada cruz con sólo los bordes más externos iluminados.

Como la figura uniaxial de flash, con una pequeña rotación de $< 5^\circ$ de la platina, la cruz de isogiras se rompe y deja el campo visual, provocando que el mismo se vea totalmente iluminado. La dirección en la cual la cruz se desarma, indica la posición de la Bxa.

Atentos!!! Si el $2V = 90^\circ$ la isogira en forma de cruz no se parte cuando rotamos la platina, simplemente se disuelve con una rotación de 5° !!!!



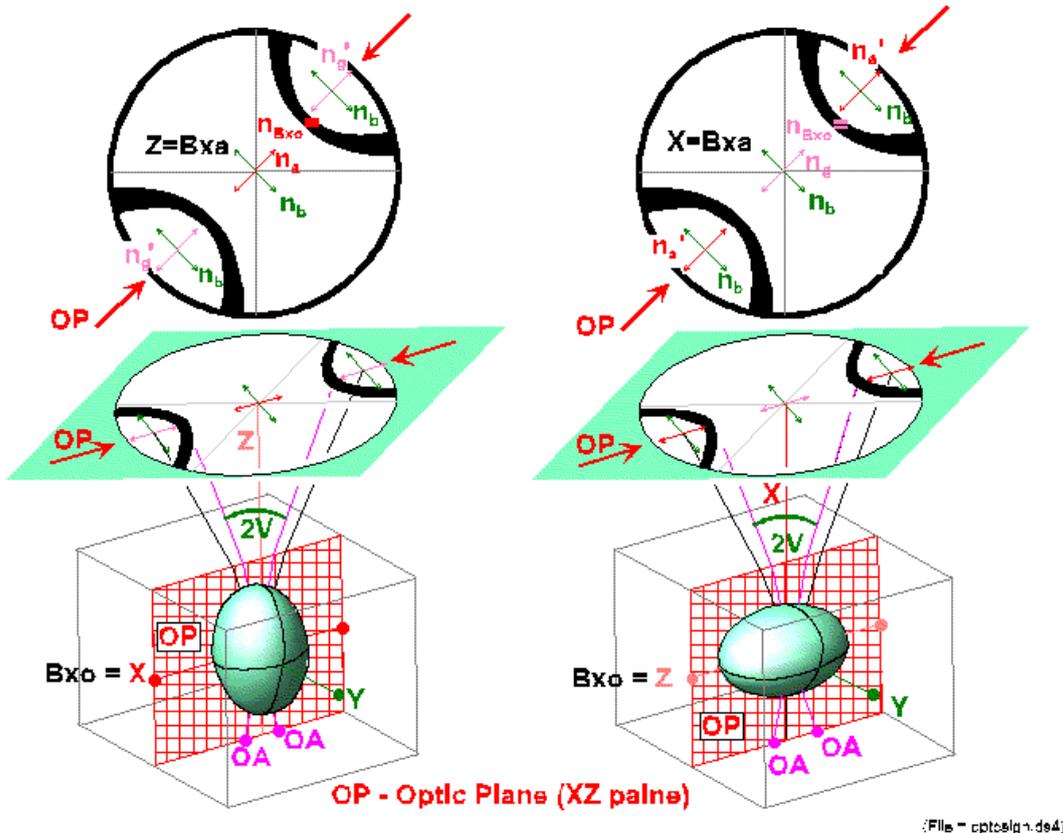
DETERMINACION DEL SIGNO OPTICO

Figura centrada de BxA

En una figura centrada de BxA dos rayos se pueden propagar a lo largo de la Bisectriz Aguda del mineral: el rayo más lento (con n_{γ}) o bien el rayo más rápido (con n_{α}). Algunos de estos 2 rayos emergen en el centro de la cruz de isogiras. El otro rayo que vibra en la figura será siempre el rayo de velocidad intermedia (n_{β}).

En extinción ambas direcciones de vibración están coincidiendo con los polarizadores.

1. Un rayo vibra paralelo al eje Y de la indicatriz y tiene un índice de refracción n_{β} . Esta orientación es paralela a la normal óptica, y en la figura corresponde al brazo más ancho de la cruz.
2. El otro rayo vibra paralelo a la Bxo y tiene un índice de refracción n_{Bxo} . Esta dirección de vibración también es paralela al plano axial óptico y corresponde al brazo más fino de la cruz.



Para minerales ópticamente positivos, la bisectriz obtusa es el eje X y $n_{Bxo} = n_{\alpha}$, correspondiendo al rayo rápido (recordar que $n_{\alpha} < n_{\beta} < n_{\gamma}$). Para minerales ópticamente negativos la Bxo es el eje Z y $n_{Bxo} = n_{\gamma}$, correspondiendo al rayo más lento. **Se debe entonces determinar si el rayo que vibra paralelo a la Bxo es el más lento o el más rápido.**

Para determinar esto, la figura de interferencia debe ser rotada de manera tal que el plano axial quede orientado en posición NE-SW.

Los pasos a seguir en la definición del signo óptico con esta figura son:

1. **Obtener una figura de interferencia de BxA.**
2. **Insertar la placa accessoria.**

Observamos si con el plano axial a 45° tenemos adición o sustracción. Si tenemos adición (hacia la parte cóncava de la isogira) quiere decir que $n_{\beta} > n_{Bxo}$, con lo que Bxo será X.

Si Z es la Bxa, en la zona central de la figura habrá sustracción, puesto que en el plano de la platina (perpendicular a la Bxa) estará vibrando el rayo rápido con n_{α} .

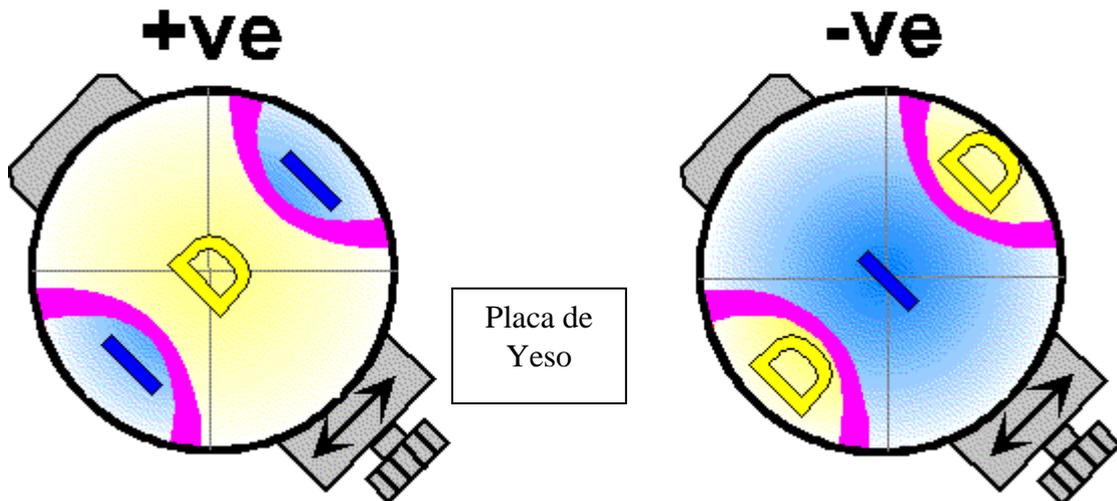
Si se verifica sustracción hacia la zona cóncava, quiere decir que $n_{\beta} < n_{Bxo}$, con lo que Bxo será Z. En la zona central de la figura se observará adición, puesto que allí estará vibrando el rayo más lento con n_{γ} .

3. Interpretar el signo.

Si X es la Bxo, entonces el mineral será positivo

Si Z es la Bxo el mineral es ópticamente negativo

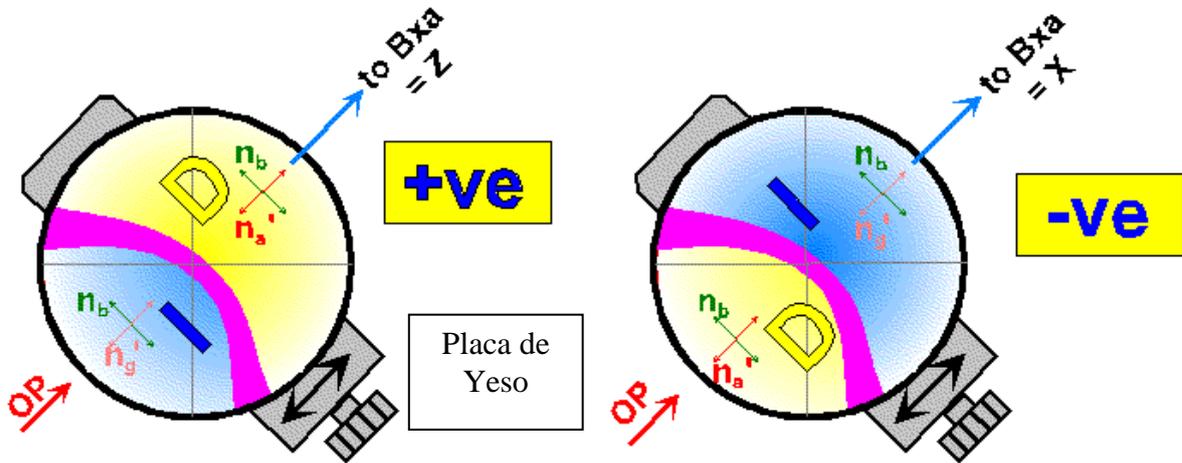
$$I = \text{lento}_{\text{min}} + \text{lento}_{\text{placa}} \quad D = \text{rápido}_{\text{min}} + \text{lento}_{\text{placa}}$$



Nota: La metodología seguida por González Bonorino es exactamente opuesta a esta, ya que la posición del plano axial que este autor sugiere diverge 90° de la propuesta en este apunte.

Figura de Eje Óptico

Si ambos melatopos yacen en el campo visual, se procede como en la figura centrada de Bxa. Si sólo un melatopo es visible, tendremos que considerar que la figura es la mitad de una figura centrada de Bxa. Con un solo melatopo, cuando el plano axial es orientado a 45° el borde convexo de la isogira apuntará hacia la Bxa.



La isogira se curva en directa proporción al valor de $2V$. Si $2V = 90^\circ$, el grado de curvatura y su dirección es casi imposible de determinar. La isogira aparece como una banda recta y puede ser confundida con una figura excéntrica de eje óptico de minerales uniaxiales. No obstante, cuando rotamos la platina el brazo de la isogira de un mineral biaxial girará alrededor del melatopo. En el caso que el $2V$ sea $= 90^\circ$ el mineral se considera neutro.