Informe 1

Metapelitas Regionales



Cristian Chico Pulido, Camila Isabel Fernández Riveras, Alejandro Cruz Sancho, Jessica Natalia Serpa Herrera

Petrología Metamórfica - 3º Grado Geología

Índice

Análisis previo al Campo....3
1) Localización del mapa geológico:....3
2) Litologías presentes. Sus protolitos, clasificación y mineralogía:....4
3. Estructuras observables....5
4. Tipo de metamorfismo....5
5. Edad de protolitos y metamorfismo....6
Introducción....7
1.1 Localización geográfica....7
1.2 Encuadre geológico....7
Características Geológicas....10
2.1 Descripción de las litologías en campo y su estructura....10
Parada 1....10
Parada 2....12
Parada 3 (Berzosa)....12
Parada 4....13
Parada 5....14
2.2 Petrografia....14
Lámina 24L....14
Lámina 25L....15
Punto 1 - Puerto Hiruela (láminas 11, 26 y 33)....16
Punto 2 - El Cardoso (lámina 34)....17
Punto 3 - Hayedo de Montejo (lámina 27)....18
Punto 4 - Berzosa (lámina 28)....20
Punto 6 (lámina 29)....21
Punto 7 (láminas 30 y 43)....22
Discusión y Conclusiones....24
3.1 Tipo de Metamorfismo....24
3.2 Evolución Metamórfica....25
3.3 Relación deformación y metamorfismo....27
3.4 Contexto Tectónico....28
3.5 Conclusiones....29
Bibliografía....31

Análisis previo al Campo

1) Localización del mapa geológico:

La zona de estudio corresponde a la hoja 458 del MAGNA, con el nombre de Prádena.

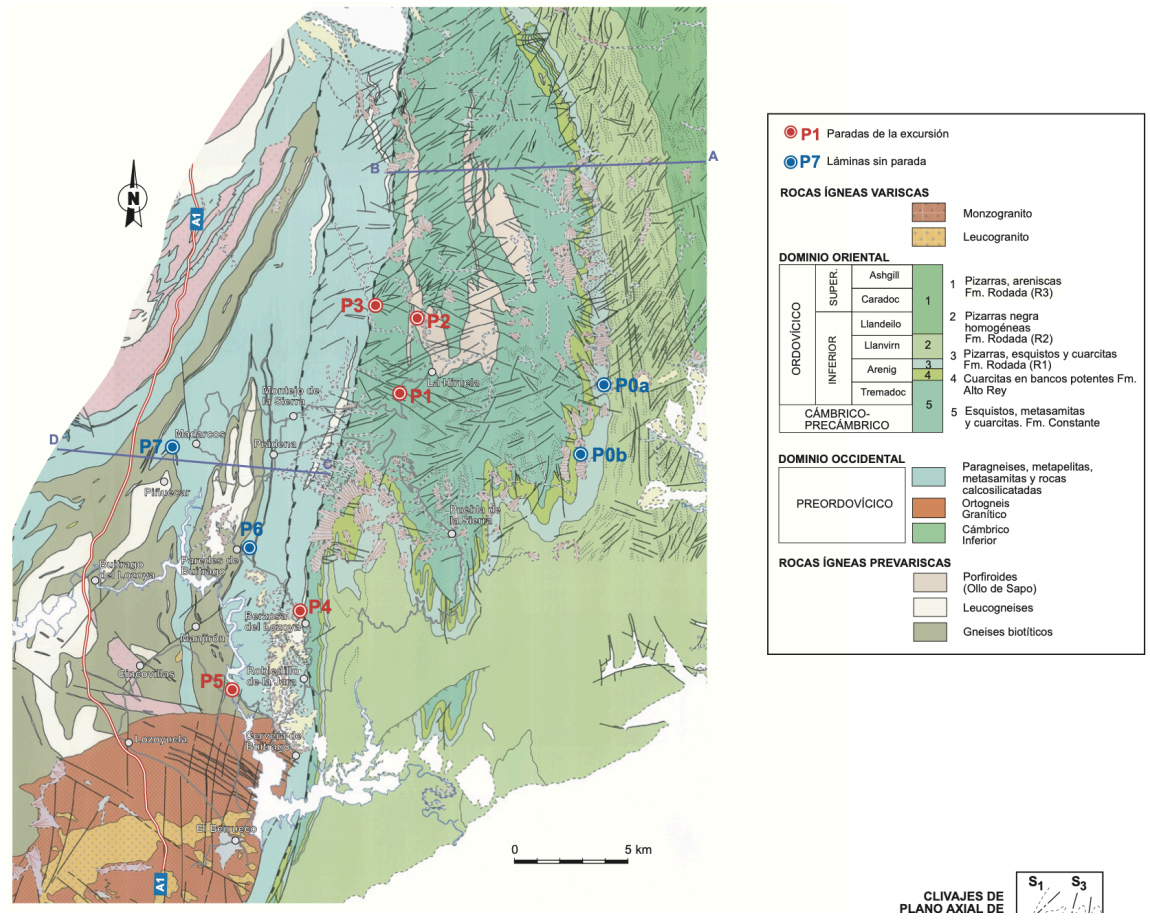


Imagen 1: Mapa Geológico de la zona de estudio con las paradas marcadas. Campus Virtual.

2) Litologías presentes. Sus protolitos, clasificación y mineralogía:

En la zona de estudio que comprende la región de Somosierra y la Hoja de Prádena, se observan dos grandes conjuntos litológicos. Estos son el zócalo hercínico (principalmente está compuesto por rocas ígneas y metamórficas) y la cobertera sedimentaria (con rocas del Mesozoico, Terciario y Cuaternario).

A continuación se detallan las litologías principales del zócalo hercínico, que componen el foco central de la salida de campo:

a) Los metasedimentos constituyen una serie potente de origen principalmente sedimentario, que sufrirían una deformación durante la orogenia hercínica. Sus protolitos serían los siguientes:

Paragneises, esquistos biotíticos y micacitas que derivan de protolitos pelíticos (arcillas y limos); metareniscas y cuarcitas que proceden de protolitos detríticos (arenas y areniscas feldespáticas o de cuarzo); rocas de silicatos cálcicos y mármoles cuyos protolitos son sedimentos

carbonatados e impuros; y por último porfiroides posiblemente derivados de rocas metavolcánicas de grano fino.

Desde un punto de vista mineralógico es importante destacar que en las metapelitas (los esquistos y paragneises ya nombrados) la mineralogía varía con el grado metamórfico. Incluye cuarzo, plagioclasa, biotita, moscovita, sillimanita y granate. En zonas de alto grado aparece feldespato potásico, cordierita y distena como mineral relicto. En cuanto a los mármoles, contienen principalmente calcita y dolomita como es lógico, además de tremolita y wollastonita en algunos casos. Por último, las rocas calcosilicatadas presentan anfíboles, piroxenos (diópsido), granates cálcicos, plagioclasa y cuarzo.

b) En cuanto a los ortogneises, se sabe que son rocas de origen ígneo que han sufrido metamorfismo y deformación.

   Sus protolitos son gneises glandulares (mesócratos-melanócratos) que derivan de intrusiones de tipo granodiorítico y se caracterizan por sus visibles glándulas de feldespato; gneises glandulares y leuconeises que procede de protolitos graníticos o leucogranitos, que se pueden parecer en aspecto a los anteriores; gneises bandeados relacionados con los glandulares pero con una estructura de bandas alternantes.

   En cuanto a la mineralogía se puede decir que están compuestos esencialmente por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. Pueden contener minerales índice como sillimanita, cordierita y granate según las condiciones de presión y temperatura alcanzadas.

c) Prestando atención a las rocas orto-derivadas básicas e intermedias, hay que mencionar las ortoanfibolitas que derivan de rocas básicas (como basaltos) y están compuestas principalmente por plagioclasa y anfíbol; y a las metadioritas, cuyo protolito es una diorita o cuarzodiorita que contiene plagioclasa, clinopiroxeno, anfíbol y granate.

d) Por último se observa la cobertera sedimentaria, compuesta por arenas, arcillas y gravas del cretácico (pertenecen a la Facies Utrillas), sedimentos de origen continental como arenas y bloques del terciario (neógeno) y para terminar los depósitos fluviales o de ladera del cuaternario.

3. Estructuras observables

Se puede interpretar una primera fase de deformación que presenta una foliación penetrativa visible en las rocas. Se trata de una deformación continua que afectó a todas las rocas bajo un régimen de cizalla simple subhorizontal. Se puede observar como relictos en la esquistosidad interna, en porfiroblastos o en charnelas de pliegues posteriores, ya que fue reorientada por las fases siguientes. Una segunda fase de deformación caracterizada por foliación, lineación, pliegues y zonas de cizalla dúctil; los pliegues son tumbados, isoclinales y asimétricos, a menudo interfoliares con flancos muy estriados. Tanto esta primera fase como la anterior presentan una vergencia hacia el Este, y los contactos litológicos se paralelizan en este episodio.

La tercera fase de deformación presenta pliegues mayores y menores con foliación del plano axial y alienación, es la S3 que se manifiesta como una

esquistosidad de crenulación muy penetrativa en el Oeste, llegando a borrar fábricas previas. La orientación principal de esta tercera fase es NE-SO, buzando entre 30 y 70º hacia el E-SE. Los ejes de los pliegues búzan de 20 a 80º hacia el SE

La cuarta y quinta fase de deformación (D4 y D5) presentan pliegues de gran longitud de onda y pequeña amplitud. Repliegan suavemente las estructuras anteriores. En D4 pueden aparecer una crenulación incipiente en zonas de charnela.

4. Tipo de metamorfismo

En la zona de estudio se desarrolla un metamorfismo regional de carácter polifásico y progrado, caracterizado por una zonación mineral muy marcada que aumenta su intensidad de Este a Oeste. El metamorfismo afecta a todo el zócalo hercínico de la región, presenta una clara zonalidad regional. El sector orental se sitúa en la parte profunda del grado medio, caracterizado por la presencia de paragénesis estables de moscovita y sillimanita, mientras que el sector centro-occiendetal alcanza el grado alto, donde se produce el desarrollo de feldespato potásico y cordierita.

En cuanto a las condiciones de presión y temperatura La evolución metamórfica se divide en tres etapas principales ligadas a la orogenia hercínica:

Etapa Inicial (M1) que ocurre durante las fases de deformación D1 y D2. Se caracteriza por condiciones de presión intermedia (6-7 Kbars) y temperaturas crecientes que llegan hasta los 650 °C. En este momento se forman minerales como granate, distena y sillimanita. La etapa de Clímax por otro lado se desarrolla entre las fases D2 y D3, persistiendo hasta el final de esta última. Se produce un descenso de la presión (de 6,5 Kbar a unos 3,5 - 2,5 Kbars) y un aumento de la temperatura hasta alcanzar el clímax térmico de unos 675 °C. Estas condiciones de baja presión y alta temperatura sitúan a la roca en el campo de la fusión anatéctica.

La etapa Retrógrada es posterior a la fase D3 y se define por un descenso continuado tanto de la presión como de la temperatura. Se generan paragénesis de grado bajo con moscovita, clorita y albita.

En resumen, la trayectoria metamórfica de la zona (trayectoria P-T-t) muestra un camino que comienza en presiones intermedias y evoluciona hacia un clímax de baja presión y alta temperatura antes de su enfriamiento final.

5. Edad de protolitos y metamorfismo

Los protolitos de la zona se clasifican principalmente en dos grupos: Primero los metasedimentos, una serie potente d eorigen sedimentario con una edad pre-ordovicica, probablemente precambrica. Algunos datos indican que la serie sedimentaria debe ser anterior a los 580 Ma, ya que los ortogneises que la instruyen tienen esa edad. Por otra parte, las rocas ígneas pre-hercínicas, son los ortogneises.

Los protolitos de estas rocas son de origen ígneo y por lo tanto presentan diversas dataciones según el método: las determinaciones mediante Rb/Sr

indican edades que oscilan entre 494 ± 10 Ma (tipos metagraníticos) y 471 ± 12 Ma (leuconeises de El Villar de Prádena). Dataciones por U-Pb en circones sugieren edades más antiguas, situadas entre 540-560 Ma (finales del Cámbrico). Otros estudios relacionan este magmatismo con la fase sárdica (entre 470 y 500 Ma) o incluso con el final de la orogenia cadomiense (hasta 618 Ma).

Hablando de la edad el metamorfismo hay que entender que el metamorfismo que afecta a la región es de carácter hercínico (o varisco). Este proceso es polifásico y se desarrolla durante el Paleozoico:

- Etapas M1 y M2: Se producen durante el ciclo hercínico principal. La etapa M1 ocurre durante las fases de deformación hercínica D1 y D2. La etapa M2, que representa el clímax térmico, persiste hasta el final de la fase D3.
- Etapa M3: Es un metamorfismo retrógrado subsecuente a la fase D3 que perdura hasta la finalización del ciclo hercínico.
- Fracturación tardía: Tras el metamorfismo principal, ocurren etapas de fracturación tardihercínicas, como la etapa Malagón, cuya edad se sitúa en el límite Permo-Carbonífero.

Finalmente, las fuentes mencionan que la orogenia alpina (durante el Terciario) fracturó el zócalo ya metamorfizado, pero no generó un nuevo metamorfismo regional en estas rocas

Introducción

1.1 Localización geográfica

El área de estudio se sitúa en el sector oriental del Sistema Central español, en el entorno de Somosierra–Hayedo de Montejo, constituyendo junto con la Sierra de Ayllón el extremo oriental de dicha cordillera. Esta región forma parte del borde meridional de la Meseta castellano-leonesa.

El relieve está dominado por la alineación montañosa de la Sierra de Guadarrama y su prolongación hacia el este, con altitudes que oscilan generalmente entre 1.600 y 2.000 m, alcanzándose cotas superiores a los 2.100 m en sectores próximos. Las zonas más deprimidas se localizan en los márgenes de la sierra, destacando hacia el sureste el valle del río Lozoya, donde se alcanzan altitudes en torno a 950–1.000 m.

La zona presenta una cobertura vegetal dominada por pinares hasta cotas elevadas (~1.800–1.900 m), mientras que a mayores altitudes predominan matorrales y pastizales de alta montaña. En cotas más bajas se desarrollan formaciones de robles y encinas.

Las paradas de campo se distribuyen a lo largo de un perfil aproximadamente E–O, en torno a las coordenadas 41.03° N y 3.50° W (sistema WGS84), cubriendo una sección representativa de la evolución metamórfica regional. El acceso se realiza mediante carreteras locales que conectan localidades como Montejo de la Sierra, La Hiruela y Berzosa del Lozoya.

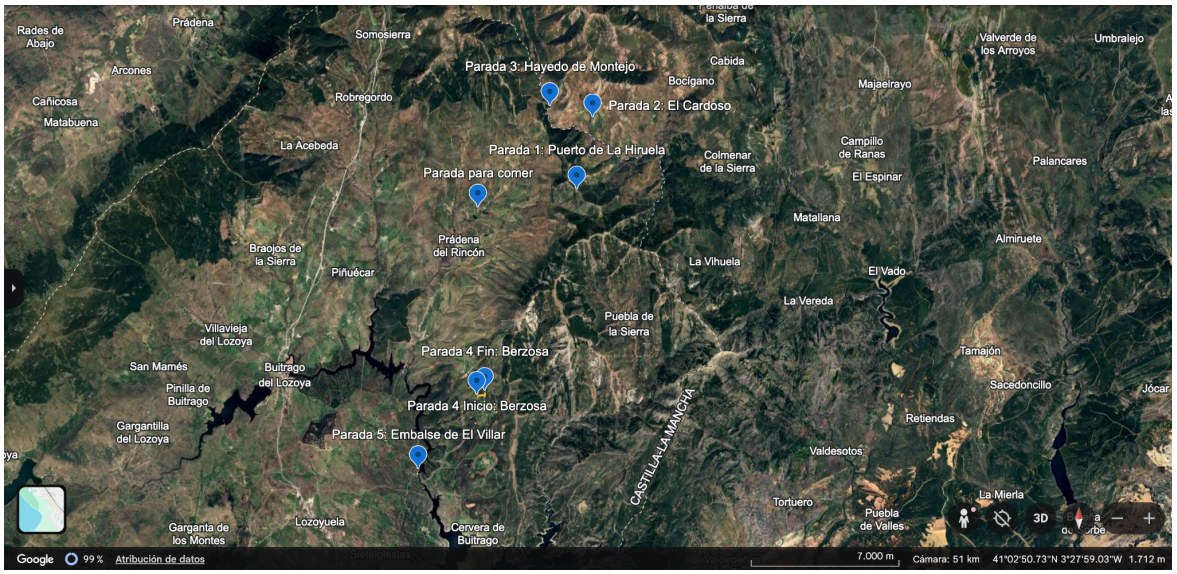


Imagen 2: Fotografía de las paradas realizadas en la salida en Google Earth

1.2 Encuadre geológico

El área estudiada se encuadra dentro del Macizo Ibérico, concretamente en la zona Centroibérica, una de las principales unidades geotectónicas definidas para

este dominio. Esta zona se caracteriza por la presencia de materiales precámbricos y paleozoicos afectados por la orogenia Varisca, responsable de la estructuración, metamorfismo y magmatismo regional. Los materiales aflorantes pueden agruparse en dos grandes conjuntos: Un zócalo hercínico, constituido por rocas metamórficas e ígneas (gneises, esquistos, anfibolitas, rocas calcosilicatadas y granitoides), que representan la evolución profunda de la corteza durante la orogenia. Una cobertera sedimentaria mesozoica y cenozoica, de menor relevancia en la zona de estudio. Desde el punto de vista estratigráfico, destacan las series preordovícicas formadas por paragneises, metapelitas y metasamitas, así como materiales de naturaleza volcánica ácida (porfiroides tipo "Ollo de Sapo"). Sobre estas unidades se disponen materiales ordovícicos y silúricos de carácter transgresivo.

En el contexto estructural, el Sistema Central ha sido interpretado como un orógeno polifásico, con varias fases de deformación dúctil y frágil superpuestas. Estas fases generan pliegues, foliaciones penetrativas y zonas de cizalla, destacando en el área de estudio la zona de cizalla de Berzosa, que separa dominios con diferente grado metamórfico. Se distinguen dos dominios principales:

- Dominio occidental (Guadarrama): caracterizado por metamorfismo de medio a alto grado, con presencia de anatexia y abundancia de granitoides.
- Dominio oriental (Somosierra–Ayllón): donde predominan materiales ordovícicos y postordovícicos afectados por metamorfismo de bajo a medio grado, sin desarrollo significativo de plutonismo tardivarisco.

El metamorfismo regional presenta una marcada zonación barroviana, con una progresión de minerales índice desde clorita y cloritoide en zonas de bajo grado, hasta granate, estaurolita y sillimanita en condiciones de mayor temperatura y presión. La evolución tectonometamórfica del área está relacionada con procesos de engrosamiento cortical durante la colisión varisca, seguidos de una fase de extensión y descompresión tardivarica, que favoreció el desarrollo de zonas de cizalla y procesos de fusión parcial.

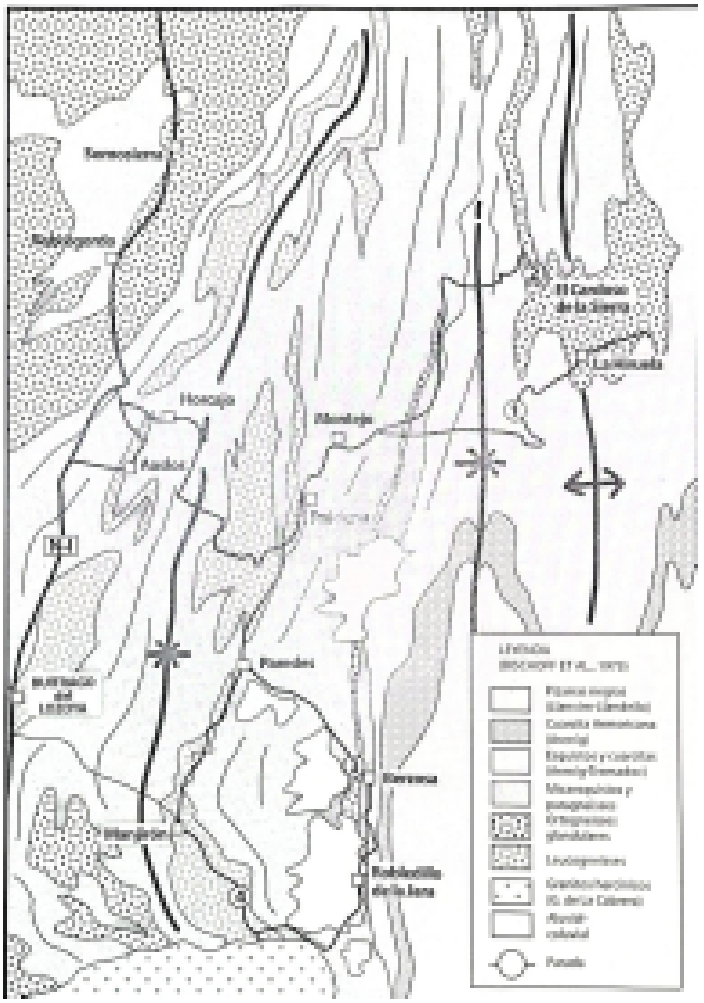


Imagen 3: Esquema simplificado de mapa geológico de la zona utilizado en la salida de campo.

Características Geológicas

2.1 Descripción de las litologías en campo y su estructura

El trabajo de campo se ha desarrollado a lo largo de un perfil aproximadamente E–O en el sector de Somosierra–Berzosa, permitiendo analizar la evolución de las litologías y estructuras en relación con el gradiente metamórfico regional. Las rocas observadas corresponden principalmente a metasedimentos paleozoicos (metapelitas y metasamitas), junto con metavulcanitas ácidas (porfiroides) y cuerpos filonianos tardíos (pegmatitas), todos ellos afectados por la deformación y el metamorfismo varisco. Desde el punto de vista estructural, se reconoce una deformación polifásica, con al menos tres fases principales:

- **D1**: asociada al engrosamiento cortical, escasamente preservada, reconocible en inclusiones en porfiroblastos.
- **D2**: responsable de la foliación principal (S2), penetrativa y regional.
- **D3**: caracterizada por procesos de crenulación y desarrollo de kink bands. Fases posteriores **(D4–D5)** presentan carácter local y menor desarrollo.

Parada 1

En esta parada afloran metapelitas (filitas y esquistos) correspondientes a un metamorfismo de bajo a medio grado, con un claro desarrollo de estructuras tectónicas asociadas a deformación dúctil.

1. <u>Características estructurales:</u>

La roca presenta una foliación penetrativa (S2) bien desarrollada, definida por la orientación preferente de micas, con una dirección aproximada de N45E y buzamiento de 40°E. Asimismo, se reconocen pliegues cilíndricos tumbados, con charnelas engrosadas, cuyas direcciones son próximas a N35W y buzamientos en torno a 45°, lo que indica su formación en condiciones dúctiles. Se identifican además estructuras de deformación tardía, como kink bands, que evidencian episodios posteriores de acortamiento o reajuste tectónico, posiblemente vinculados a zonas de cizalla. Las capas presentan orientaciones variables, destacando medidas como N170E/52SE, mientras que las diaclasas muestran direcciones N50E/36SE, reflejando una compleja historia deformacional.

2. <u>Litología y mineralogía:</u>

La litología dominante corresponde a filitas con granate y cloritoide. La matriz está compuesta fundamentalmente por moscovita orientada, que define la foliación, junto con niveles de cuarzo y posibles biotitas. El granate aparece como porfiroblastos de pequeño tamaño, mientras que el cloritoide se presenta tanto

como: porfiroblastos sintectónicos (pequeños, en paragénesis), como cristales de mayor tamaño, no orientados, interpretados como crecimientos posteriores asociados a una segunda foliación.

Esta coexistencia sugiere una evolución metamórfica progresiva con recristalización parcial y eventos superpuestos.

3. Otras observaciones:

Se observa un pliegue menor isoclinal en bancos centimétricos de cuarcita, donde la estratificación (S0) es aproximadamente paralela a la foliación (S1), con orientación N40E/20E. Asimismo, se identifica una vena de cuarzo de origen hidrotermal, discordante con la foliación, lo que indica circulación de fluidos en etapas tardías del sistema.

En zonas próximas se reconocen: cuarcitas con anfíbol y granate (relacionadas con la lámina 11), presencia de cuarzo ahumado, y afloramientos de esquistos de mayor tamaño de grano, con paragénesis más evolucionadas (granate, estaurolita, cloritoide y anfíboles), lo que indica un incremento local del grado metamórfico.



Imagen 4: Fotografía de la vena de cuarzo vista en campo, se utiliza como referencia un bolígrafo azul.



Imagen 5: Fotografía de muestra recogida en campo, Filita con granate (derecha) y Cuarcita con anfibol y granate.

Parada 2

En esta parada se identifican rocas de origen ígneo volcánico transformadas por metamorfismo, correspondientes a metavulcanitas ácidas tipo porfiroides, que en algunos casos pueden evolucionar hacia ortogneises.

1. Litología y mineralogía:

Las rocas presentan una textura característica con porfiroclastos de feldespato potásico y cuarzo, inmersos en una matriz recristalizada rica en biotita y moscovita, lo que confiere un aspecto esquistoso. La presencia de estos minerales indica condiciones de metamorfismo de grado bajo a medio, sin desarrollo de minerales índice de mayor grado como la estaurolita.

2. Características estructurales:

La foliación presenta una orientación de N25E/50E, y se observa una lineación mineral con dirección aproximada de 105° e inmersión de 50°, indicando una deformación no coaxial. Estos rasgos sugieren una importante componente de deformación tectónica asociada al metamorfismo regional.

3. Otras observaciones:

En el afloramiento se identifican también niveles de rocas de silicatos cálcicos, con presencia de granates tipo grosularia, lo que indica variaciones composicionales del protolito y posibles procesos metasomáticos.



Imagen 6: Fotografía de muestra de campo de metavulcanita con silicatos cálcicos.

Parada 3 (Berzosa)

Esta parada se sitúa en el ámbito de la zona de cizalla de Berzosa, donde se observa una clara relación entre deformación tectónica y procesos metamórficos de mayor grado.

1. Litología y procesos:

Afloran pegmatitas de grano grueso, asociadas a cuerpos plutónicos, interpretadas como el resultado de procesos de fusión parcial (anatexia). Estas se desarrollan en un contexto de descompresión durante fases extensionales tardivariscas. El encajante está constituido por esquistos, en los que se reconocen estructuras como boudinage, indicando contrastes reológicos durante la deformación.

2. Interpretación

El conjunto de evidencias sugiere condiciones de mayor grado metamórfico hacia el oeste, coherentes con un incremento térmico asociado a procesos profundos de la corteza y a la evolución tectono-metamórfica del sistema.

Parada 4

En esta parada se observa una gran variedad litológica asociada a procesos ígneos y metamórficos.

1. <u>Litología:</u>

Destaca la presencia de pegmatitas, caracterizadas por su grano muy grueso y mineralogía compuesta por cuarzo, feldespatos y micas, representando las últimas fases de cristalización de un magma. Estas intruyen en rocas metamórficas, actuando como cuerpos discordantes.

2. <u>Rocas metamórficas asociadas:</u>

Se identifican: esquistos con distena (cianita), junto con estaurolita, biotita, moscovita, cuarzo y granate, leucogneises, de carácter leucocrático, con abundancia de minerales claros, y nuevos niveles de esquistos. Las capas presentan buzamientos suaves, en torno a 20°, lo que sugiere una deformación menos intensa o reorientación posterior.



Imagen 7: Fotografía muestra de campo donde la Pegmatita instruye en Fm.Constante.

Parada 5

En esta parada se reconoce un claro ejemplo de alto grado metamórfico, con desarrollo de migmatitas.

1. Características principales:

La roca presenta un bandeado composicional (no foliación), con alternancia de: leucosomas (bandas claras), ricos en cuarzo y feldespato, mesosomas/melanosomas (bandas oscuras), correspondientes a la parte menos fundida. La mineralogía incluye feldespato potásico y sillimanita, indicativa de condiciones de alta temperatura.

2. Interpretación:

Estas rocas representan procesos de fusión parcial (anatexia), en los que el protolito original queda parcialmente obliterado, dificultando su identificación. Este estadio corresponde al máximo grado metamórfico observado en el área, coherente con la evolución térmica regional.

2.2 Petrografia

Lámina 24L

1. Contexto: corresponde a metapelitas del sector de bajo a medio grado metamórfico dentro de la zonación barroviana del área de estudio.
2. Textura: la roca presenta una textura lepidoporfiroblástica, definida por una matriz foliada rica en micas, en la que destacan porfiroblastos de mayor tamaño.Se observa una foliación S2, marcada por la orientación preferente de los filosilicatos. Los porfiroblastos muestran escaso contenido en inclusiones, lo que indica un crecimiento relativamente limpio en fases avanzadas del metamorfismo.
3. Mineralogía: Moscovita, Cloritoide, Cuarzo, Ilmenita (opacos).
4. Relación blastesis–deformación: El cloritoide aparece como porfiroblasto poiquiloblástico, aunque con escasas inclusiones, lo que sugiere una blastesis sincinemática tardía respecto a la foliación principal (S2). La orientación de las micas indica que la deformación y recristalización han sido simultáneas.
5. Interpretación metamórfica: La presencia de cloritoide es característica de condiciones de bajo a medio grado metamórfico, típicamente asociadas a la zona de cloritoide dentro de una serie barroviana. Esto sugiere condiciones aproximadas de: T ≈ 400–500 °C y P moderada.



Imagen 8: Fotografía lámina delgada 24L, nícoles paralelos (izquierda) y nícoles cruzados (derecha).

Lámina 25L

1. Contexto: corresponde a metapelitas del sector de bajo a medio grado metamórfico, dentro de la serie barroviana del área de estudio.
2. Textura: la roca presenta una textura granolepidoblástica, con desarrollo de una foliación S2 marcada por la orientación de filosilicatos. Los minerales muestran una textura mayoritariamente xenoblástica, indicando recristalización en condiciones metamórficas sin desarrollo de formas cristalinas bien definidas. La foliación es continua y está controlada por la alineación de micas, mientras que el cuarzo aparece en dominios granoblásticos.

s1	s2	s3
	cloritoide	
	moscovita	
cuarzo	cuarzo	
	biotita	

Tabla 1: análisis textural crenulación minerales diagnósticos

3. Mineralogía: Biotita, Cloritoide, Clorita, Cuarzo, Minerales opacos.
4. Relación blastesis–deformación: el cloritoide aparece como porfiroblasto, indicando crecimiento durante el metamorfismo. La coexistencia de cloritoide + clorita + biotita sugiere una evolución progresiva del metamorfismo, donde parte de los minerales de bajo grado (clorita) aún no han sido completamente consumidos. La orientación de biotita y clorita define la foliación principal, lo que indica una blastesis sincinemática respecto a la fase D2.
5. Interpretación metamórfica: la asociación mineral (cloritoide + biotita ± clorita) es característica de condiciones de bajo a medio grado metamórfico, situándose en la transición entre: zona de clorita, zona de biotita e inicio de zona de cloritoide. Esto indica condiciones aproximadas de: T ≈ 400–500 °C y P moderada; y una evolución prograda dentro de una serie barroviana.

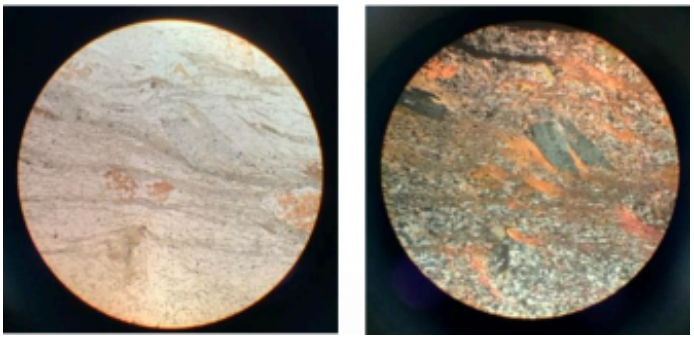


Imagen 9: Fotografía lámina delgada muestra 25L, nícoles paralelos (izquierda) y nícoles cruzados (derecha).

Punto 1 - Puerto Hiruela (láminas 11, 26 y 33)

1. Contexto: las láminas corresponden a metapelitas situadas en el sector oriental del área de estudio. Este dominio se caracteriza por condiciones de bajo a medio grado metamórfico, dentro de una zonación barroviana regional. Estas rocas representan estadios intermedios en la evolución metamórfica, permitiendo analizar la progresión desde asociaciones de bajo grado hacia condiciones más avanzadas.
2. Textura: las muestras presentan texturas predominantemente lepidogranoblásticas a granolepidoporfiroblásticas, definidas por una matriz foliada rica en filosilicatos (micas), en la que se desarrollan porfiroblastos de mayor tamaño. Se observa una foliación S2 bien desarrollada, marcada por la orientación preferente de biotita y moscovita. En algunas láminas (especialmente la 26), se reconocen: texturas poiquiloblásticas, con abundantes inclusiones en porfiroblastos dominios granoblásticos de cuarzo con contactos suturados desarrollo incipiente de crenulación, indicativa de deformación posterior (D3).

s1	s2	s3
	cloritoide	
	granate	
	moscovita	
		estaurolita
	biotita	
cuarzo		

Tabla 2: análisis textural crenulación minerales diagnósticos

3. Mineralogía: minerales principales: Cuarzo, Moscovita, Biotita, Cloritoide, Granate (en algunas muestras). Minerales accesorios: Opacos (ilmenita) y Clorita (retrogradación parcial).

4. Relación blastesis–deformación: clara relación entre crecimiento mineral y deformación: la foliación S2 está definida por la orientación de micas (deformación sintectónica); el cloritoide aparece como porfidoblasto, generalmente con pocas inclusiones por crecimiento durante fases avanzadas de D2; el granate (lámina 26) presenta inclusiones internas, lo que indica una blastesis sincinemática, registrando fases previas de deformación; la presencia de crenulación sugiere una fase posterior (D3), que afecta a la foliación principal. Se reconoce una evolución en la que deformación y metamorfismo están estrechamente acoplados
5. Interpretación metamórfica: la asociación mineral principal, es el diagnóstico de condiciones de bajo a medio grado metamórfico dentro de una serie barroviana. Esta paragénesis se sitúa en el intervalo transicional entre la zona de cloritoide y la zona de granate, reflejando un incremento progresivo de las condiciones térmicas durante la evolución metamórfica. Dicha asociación es consistente con un rango aproximado de 400–550 °C y presiones intermedias, típicas del metamorfismo regional asociado a engrosamiento cortical. La coexistencia de minerales índice correspondientes a distintos estadios de la zonación metamórfica (cloritoide y granate) sugiere una evolución prograda no completamente equilibrada, en la que las reacciones metamórficas han progresado de manera heterogénea. Este hecho podría estar relacionado con factores como variaciones composicionales locales, cinética de reacción limitada o cambios en las condiciones P–T durante la deformación.

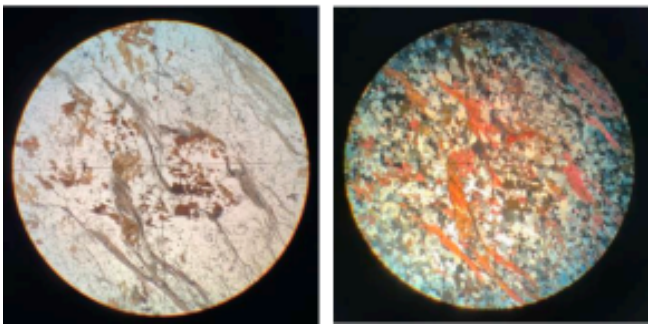


Imagen 10: Fotografía lámina más representativa muestra 26M, nícoles paralelos (izquierda) y nícoles cruzados (derecha).

Punto 2 - El Cardoso (lámina 34)

1. Contexto: la lámina corresponde a materiales situados dentro del dominio oriental del área de estudio, caracterizado por condiciones de bajo a medio grado metamórfico. Estas rocas se asocian a protolitos de naturaleza ígnea ácida (metavulcanitas tipo porfiroides) afectados por metamorfismo regional varisco.
2. Textura: la roca presenta una textura lepidogranoporfiroblástica, en la que coexisten una matriz granoblástica de cuarzo y feldespatos, una foliación definida por filosilicatos (biotita y moscovita), porfiroblastos de mayor tamaño dispersos. La foliación es penetrativa, aunque menos marcada

que en metapelitas típicas, debido a la mayor proporción de minerales granulares. Se observa una recristalización significativa, con desarrollo de contactos intergranulares y cierta tendencia a texturas equilibradas.

3. Mineralogía: minerales principales: Cuarzo, Plagioclasa, Feldespato potásico, Biotita, Moscovita. Minerales accesorios: Titanita, Clorita (producto de retrogradación).
4. Relación blastesis–deformación: la foliación está definida por la orientación de biotita y moscovita, lo que indica una blastesis sincinemática respecto a la deformación principal (D2). La presencia de clorita asociada a biotita sugiere procesos de retrogradación, probablemente vinculados a una disminución de la temperatura durante la evolución tardía del sistema. Los minerales feldespáticos y el cuarzo muestran una recristalización más equilibrada, lo que indica condiciones relativamente estables durante parte del metamorfismo.
5. Interpretación metamórfica: la asociación mineral **c**uarzo + feldespatos (plagioclasa y K-feldespato) + biotita + moscovita, junto con la ausencia de minerales índice de mayor grado (como granate o estaurolita), indica condiciones de bajo a medio grado metamórfico, en el entorno de la zona de biotita dentro de la serie barroviana. La presencia de clorita secundaria refleja una etapa de retrogradación, asociada a la evolución post-pico del metamorfismo. Registra condiciones aproximadas de: T ≈ 400–500 °C y P moderada, una evolución caracterizada por un metamorfismo progrado seguido de un enfriamiento posterior.

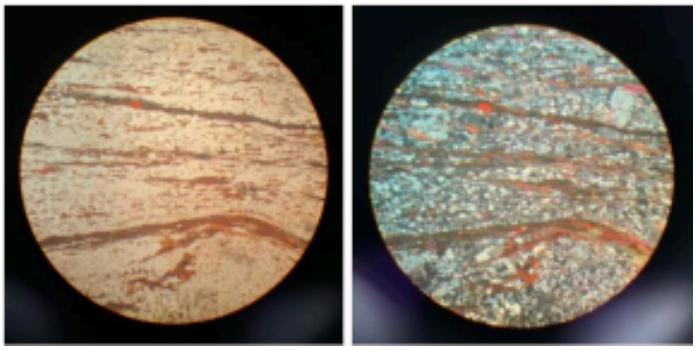


Imagen 11: Fotografía lámina delgada 34M, nícoles paralelos (izquierda) y nícoles cruzados (derecha).

Punto 3 - Hayedo de Montejo (lámina 27)

1. Contexto: la lámina corresponde a metapelitas pertenecientes al dominio metamórfico de grado medio del área de estudio, representando un estadio más avanzado dentro de la evolución barroviana respecto a las láminas de cloritoide.
2. Textura: la roca presenta una textura lepidogranoporfiroblástica, caracterizada por una matriz foliada rica en filosilicatos sobre la que destacan porfiroblastos bien desarrollados. Se observa una foliación penetrativa (S2) definida por la orientación de biotita y moscovita, que envuelve parcialmente a los porfiroblastos. Los porfiroblastos muestran textura poiquiloblástica, con abundantes inclusiones, lo que indica crecimiento durante la deformación. En algunos sectores se aprecia una

incipiente crenulación (S3), que afecta localmente a la foliación principal.

s1	s2	s3
	sillimanita	
	feldespatos	
	biotita	
	cuarzo	
distena		
		sericita
	granate	
	estaurolita	

Tabla 3: análisis textural crenulación minerales diagnósticos

3. Mineralogía: minerales principales: Granate, Biotita, Moscovita, Cuarzo. Minerales accesorios: Clorita (retrogradación parcial) y Opacos.
4. Relación blastesis–deformación: el granate aparece como porfiroblasto idioblástico a subidioblástico, con inclusiones internas que definen una foliación previa, lo que indica una blastesis sincinemática respecto a la fase D2. La foliación externa rodea a los granates, evidenciando una relación clara entre crecimiento mineral y deformación progresiva. La presencia de clorita asociada a los bordes del granate sugiere procesos de retrogradación, probablemente ligados a una disminución de temperatura durante la evolución tardía.
5. Interpretación metamórfica: la asociación mineral granate + biotita + moscovita + cuarzo es característica de condiciones de grado medio metamórfico, correspondientes a la zona de granate dentro de una serie barroviana. Esta paragénesis indica un aumento progresivo de la temperatura respecto a las asociaciones con cloritoide, situándose en condiciones aproximadas de: T ≈ 500–600 °C y P moderada. La presencia de clorita como fase secundaria indica una etapa de retrogradación, posterior al pico metamórfico. La lámina registra una evolución prograda bien desarrollada hasta condiciones de grado medio, seguida de un reajuste retrógrado.

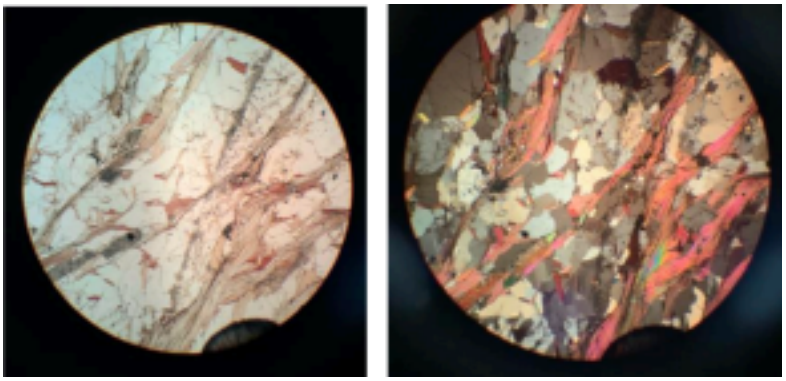


Imagen 12: Fotografía lámina delgada 34M, nícoles paralelos (izquierda) y nícoles cruzados (derecha).

Punto 4 - Berzosa (lámina 28)

1. Contexto: la lámina corresponde a metapelitas del dominio metamórfico de grado medio del área de estudio, representando un estadio más avanzado dentro de la evolución barroviana respecto a las asociaciones con cloritoide y próximo a condiciones más elevadas dentro de la zona de granate.
2. Textura: la roca presenta una textura lepidogranoporfiroblástica, definida por una matriz foliada rica en filosilicatos, sobre la que destacan porfiroblastos bien desarrollados. La foliación principal (S2) está definida por la orientación preferente de biotita y moscovita, que delimitan dominios micáceos alternando con dominios cuarzo-feldespáticos de carácter más granoblástico. Los porfiroblastos muestran textura poiquiloblástica, con inclusiones de cuarzo y minerales opacos, lo que evidencia un crecimiento sincinemático durante la deformación principal. Se reconoce localmente una crenulación incipiente (S3) que afecta a la foliación S2, indicando una fase deformacional posterior.
3. Mineralogía: minerales principales: Granate, Biotita, Moscovita, Cuarzo. Minerales accesorios: Plagioclasa (escasa), Opacos, Clorita (producto de retrogradación).
4. Relación blastesis–deformación: el granate aparece como porfiroblasto idioblástico a subidioblástico con abundantes inclusiones internas, que definen una foliación previa, lo que indica una blastesis sincinemática respecto a la fase D2. La foliación externa rodea y se adapta a los porfiroblastos, evidenciando una evolución progresiva en la que crecimiento mineral y deformación están estrechamente acoplados. La aparición de clorita en los bordes de biotita y granate indica procesos de retrogradación, asociados a una etapa de enfriamiento posterior al pico metamórfico.
5. Interpretación metamórfica: la asociación mineral principal, con presencia subordinada de plagioclasa, es indicativa de condiciones de grado medio metamórfico, correspondientes a la zona de granate dentro de una serie barroviana. Esta paragénesis refleja un incremento térmico respecto a asociaciones de menor grado, situándose en un rango aproximado de: Temperatura 500–600 °C y Presión intermedia. La abundancia y desarrollo del granate, junto con su carácter poiquiloblástico, sugiere condiciones próximas al pico metamórfico dentro de este intervalo de grado. La presencia de fases retrógradas (clorita) indica una evolución posterior caracterizada por una disminución de la temperatura, sin que se haya producido una reequilibración completa del sistema. La lámina 28 registra un estadio avanzado de la evolución prograda, seguido de una incipiente retrogradación, coherente con la evolución tectonometamórfica regional.

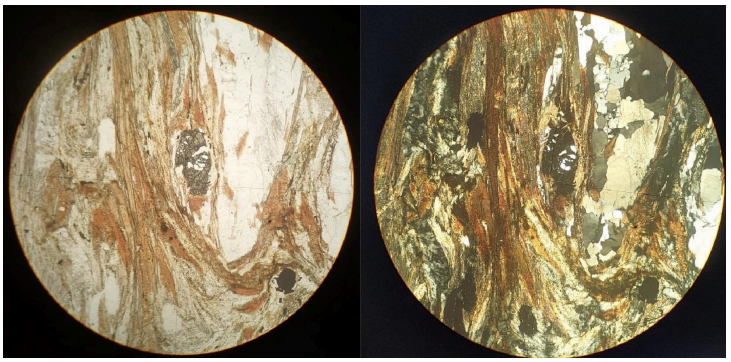


Imagen 13: Fotografía lámina delgada 28, nícoles paralelos (izquierda) y nícoles cruzados (derecha).

Punto 6 (lámina 29)

1. Contexto: la lámina corresponde a una roca metamórfica de origen pelítico, en la que se reconoce una fábrica asociada a deformación regional. La ausencia de información de campo limita la contextualización espacial, por lo que la interpretación se basa exclusivamente en las relaciones texturales y mineralógicas observadas en lámina delgada.
2. Textura: la muestra presenta una textura lepidoblástica a lepidogranoblástica, definida por la orientación preferente de minerales laminares que configuran una foliación penetrativa. Se distinguen dominios micáceos alternando con dominios más ricos en cuarzo, que presentan una textura más equigranular. La foliación aparece continua y bien desarrollada, lo que indica una deformación dúctil significativa. No se observa un desarrollo claro de porfiroblastos de gran tamaño, lo que sugiere que la recristalización ha sido relativamente homogénea.
3. Mineralogía: minerales principales: Biotita, Moscovita, Cuarzo. Minerales accesorios: Opacos.
4. Relación blastesis–deformación: la foliación está definida por la orientación de biotita y moscovita, lo que indica una blastesis sincinemática respecto a la fase principal de deformación. El cuarzo aparece en dominios más granoblásticos, mostrando recristalización dinámica, lo que sugiere condiciones de deformación dúctil con reorganización mineral. La ausencia de minerales índice claros de mayor grado limita la interpretación del grado metamórfico, aunque la presencia de biotita permite acotar un mínimo de condiciones.
5. Interpretación metamórfica: la asociación mineral observada es compatible con condiciones de bajo a medio grado metamórfico, situándose al menos dentro de la zona de biotita en una serie barroviana. La ausencia de minerales índice de mayor grado (como granate, estaurolita o sillimanita) sugiere que la roca no ha alcanzado condiciones metamórficas más elevadas, o bien que su composición no favorece su desarrollo. Se refleja un metamorfismo regional asociado a deformación dúctil, con recristalización sincinemática y desarrollo de una foliación bien definida.

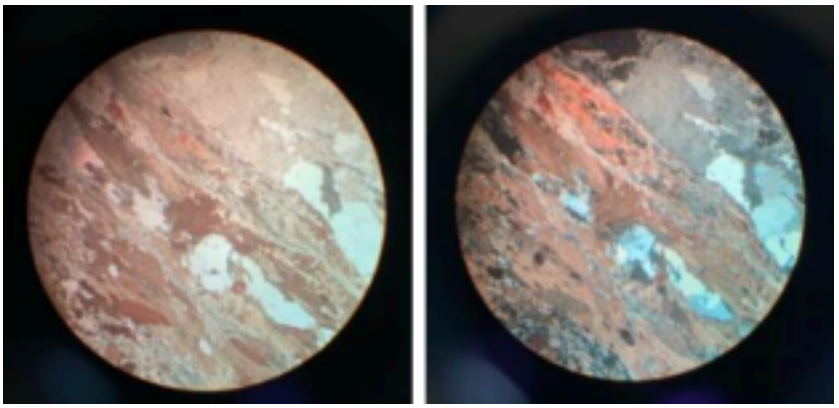


Imagen 14: Fotografía lámina delgada 29, nícoles paralelos (izquierda) y nícoles cruzados (derecha).

Punto 7 (láminas 30 y 43)

1. Contexto: las láminas corresponden a rocas metamórficas de origen pelítico que representan condiciones más avanzadas dentro de la evolución metamórfica regional del área de estudio. Su análisis conjunto permite caracterizar estadios de grado medio a medio-alto, en continuidad con las asociaciones previamente descritas.
2. Textura: ambas muestras presentan texturas lepidogranoblásticas a lepidogranoporfiroblásticas, definidas por una foliación penetrativa desarrollada por la orientación de filosilicatos. Se observa una clara diferenciación entre dominios micáceos, que definen la foliación y dominios cuarzo-feldespáticos, con textura más granoblástica. En algunos sectores se aprecia una recristalización más avanzada del cuarzo, con contactos intergranulares más equilibrados, lo que sugiere condiciones térmicas relativamente elevadas dentro del contexto regional. La foliación principal puede aparecer parcialmente modificada por estructuras posteriores (crenulación incipiente), indicando la superposición de fases deformacionales.
3. Mineralogía: minerales principales: Granate, Biotita, Moscovita, Cuarzo. Minerales accesorios: Plagioclasa (escasa), Opacos, Clorita (producto de retrogradación).
4. Relación blastesis–deformación: la foliación está definida por la orientación preferente de biotita y moscovita, lo que indica una blastesis sincinemática respecto a la fase principal de deformación (D2). El cuarzo muestra evidencias de recristalización dinámica, lo que sugiere condiciones de deformación dúctil en régimen térmico suficientemente elevado como para favorecer la reorganización textural. La posible presencia de crenulación indica una fase posterior (D3), que modifica parcialmente la fábrica principal sin llegar a obliterarla.
5. Interpretación metamórfica: la asociación mineral es compatible con condiciones de bajo a medio grado metamórfico, correspondientes a la zona de biotita dentro de una serie barroviana. No obstante, el mayor desarrollo de recristalización y la organización textural más equilibrada

respecto a otras muestras sugieren condiciones relativamente más avanzadas dentro de este intervalo de grado. La ausencia de minerales índice de mayor grado limita la asignación precisa dentro de la zonación metamórfica, por lo que la interpretación debe considerarse prudente. Estas láminas reflejan un metamorfismo regional asociado a deformación dúctil, con recristalización progresiva y desarrollo de una foliación bien establecida.

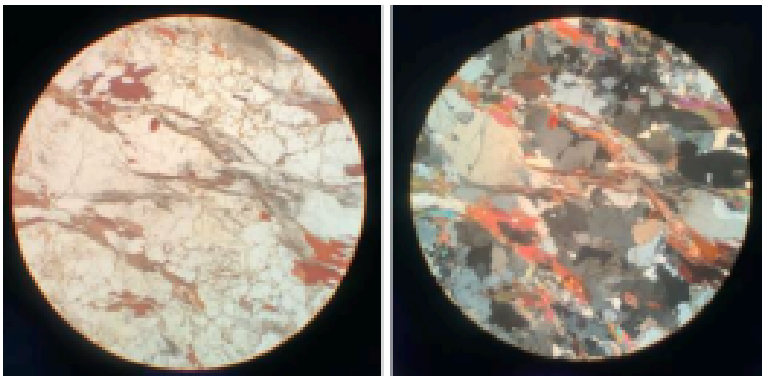


Imagen 15: Fotografía lámina delgada 43M, nícoles paralelos (izquierda) y nícoles cruzados (derecha).

Discusión y Conclusiones

3.1 Tipo de Metamorfismo

El conjunto de observaciones realizadas, tanto en afloramiento como en lámina delgada, permite interpretar que las rocas estudiadas han sido afectadas por un metamorfismo regional de tipo dinamotérmico, asociado a la evolución tectónica de la orogenia Varisca en el ámbito de la Zona Centroibérica. Este tipo de metamorfismo se caracteriza por desarrollarse a gran escala, afectando a extensos volúmenes de corteza, y por estar controlado tanto por el incremento de temperatura como por la presión y la deformación asociadas a procesos de engrosamiento cortical. En este contexto, las rocas de origen pelítico y volcánico ácido han experimentado una recristalización progresiva, dando lugar a asociaciones minerales y fábricas características de condiciones metamórficas regionales. Desde el punto de vista petrográfico, la presencia de asociaciones minerales como cuarzo + moscovita + biotita ± cloritoide ± granate es coherente con una serie metamórfica barroviana, típica de contextos orogénicos colisionales. Esta serie refleja un incremento progresivo de las condiciones de presión y temperatura, en el que se suceden distintas zonas metamórficas definidas por la aparición de minerales índice.

En este sentido, las asociaciones observadas permiten situar el área de estudio dentro de un intervalo comprendido entre el bajo y el grado medio metamórfico, alcanzándose localmente condiciones próximas al desarrollo de minerales de mayor estabilidad, como el granate. La distribución de estas asociaciones sugiere la existencia de un gradiente metamórfico regional, en el que se registra una evolución progresiva de las condiciones P–T. Asimismo, las evidencias texturales indican que el metamorfismo estuvo estrechamente ligado a la deformación. La presencia generalizada de foliaciones penetrativas definidas por la orientación de filosilicatos, junto con el desarrollo de porfiroblastos con inclusiones internas, apunta a una cristalización sincinemática durante las principales fases de deformación. Este acoplamiento entre metamorfismo y tectónica es característico de los procesos orogénicos, donde la deformación dúctil favorece la reorganización mineral y la formación de nuevas paragénesis en equilibrio con las condiciones P–T.

Por otro lado, la identificación puntual de procesos de retrogradación, evidenciados por la transformación parcial de minerales como biotita o granate en clorita, indica una evolución posterior caracterizada por una disminución de la temperatura. Esta etapa retrógrada puede relacionarse con procesos de exhumación y descompresión, que afectan a las rocas tras alcanzar las condiciones máximas del metamorfismo.

Los datos obtenidos permiten concluir que el área estudiada registra un metamorfismo regional progresivo, desarrollado en un contexto de colisión continental, con una evolución desde condiciones de bajo grado hacia grado medio, seguido de una etapa de reajuste retrógrado. Este patrón es coherente con los modelos geodinámicos propuestos para el Sistema Central, donde la orogenia Varisca generó un metamorfismo de tipo barroviano asociado a la construcción y posterior evolución del orógeno.

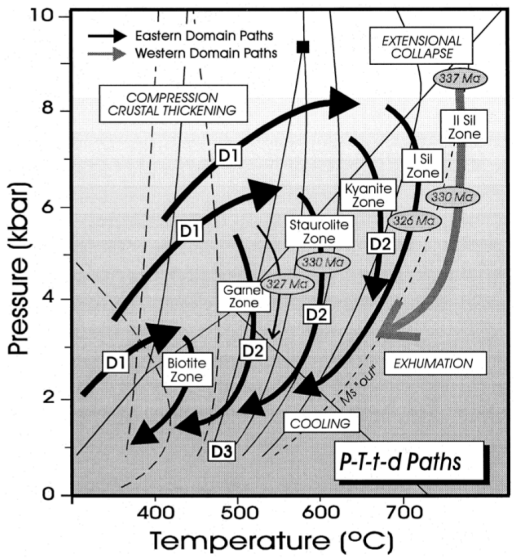


Figura 1. Esquema P-T sacado de Escuder et al 1998, observamos la evolución metamórfica de la zona.

3.2 Evolución Metamórfica

El conjunto de datos petrográficos obtenidos permite reconstruir una evolución metamórfica progresiva (prograda) bien definida, coherente con una trayectoria típica de tipo barroviano asociada a un contexto orogénico colisional. Las etapas iniciales del metamorfismo quedan registradas por asociaciones minerales características de bajo grado, en las que la presencia de cloritoide junto a moscovita y cuarzo, y localmente biotita, indica condiciones relativamente bajas de temperatura dentro del campo de estabilidad de estos minerales. Estas paragénesis reflejan las primeras fases de enterramiento y calentamiento, en un contexto de incremento progresivo de las condiciones P–T. A medida que progresa el metamorfismo, se observa la aparición de biotita como fase estable, lo que marca el tránsito hacia condiciones más elevadas dentro de la serie barroviana. Este cambio mineralógico implica la activación de reacciones metamórficas dependientes de la temperatura, que transforman asociaciones de menor grado en nuevas paragénesis más estables bajo condiciones más energéticas.

El avance hacia condiciones de grado medio queda evidenciado por el desarrollo de granate como mineral índice, frecuentemente en forma de porfiroblastos con inclusiones internas. Estas texturas poiquiloblásticas constituyen un registro directo de la evolución sincinemática del sistema, ya que preservan relictos de foliaciones previas y documentan el crecimiento mineral durante la deformación. La aparición del granate indica un incremento significativo de la temperatura y una mayor aproximación a las condiciones de pico metamórfico dentro del intervalo estudiado. La coexistencia de minerales correspondientes a distintos estadios (como cloritoide y granate en algunas muestras) sugiere que el sistema no alcanzó un equilibrio químico completo a escala de muestra. Este comportamiento puede atribuirse a factores como la heterogeneidad composicional de los protolitos, la cinética limitada de las reacciones

metamórficas o la evolución continua de las condiciones P–T durante la deformación, que impide la estabilización total de las paragénesis.

Las evidencias texturales y estructurales indican que esta evolución prograda tuvo lugar en estrecha relación con la deformación regional, particularmente durante la fase responsable del desarrollo de la foliación principal. La cristalización sincinemática de minerales como biotita, cloritoide o granate, junto con la orientación preferente de los filosilicatos, pone de manifiesto que el crecimiento mineral y la deformación estuvieron acoplados durante gran parte de la historia metamórfica.

Finalmente, se reconocen indicios de una etapa retrógrada, manifestada por la transformación parcial de minerales de mayor grado en fases más estables a menor temperatura, como la cloritización de biotita o granate. Esta retrogradación refleja un descenso de las condiciones térmicas, probablemente asociado a procesos de exhumación y descompresión durante las etapas finales de la evolución tectónica. La evolución metamórfica registrada en el área se interpreta como una trayectoria continua desde condiciones de bajo grado hacia grado medio, seguida de un enfriamiento posterior, configurando una trayectoria P–T de tipo horario (clockwise) característica de orógenos colisionales. Este patrón es consistente con un modelo de engrosamiento cortical progresivo durante la colisión varisca, seguido de una fase de descompresión y reajuste térmico, en la que las rocas evolucionan hacia condiciones más superficiales.

Tabla 4: Parámetros composicionales y valores de proyección AFM para las muestras 15 y 25. Los valores de A, F y M corresponden a las proporciones catiónicas brutas derivadas de los análisis de microsonda electrónica. El componente A se calcula como Al−3K para corregir el efecto de la moscovita/feldespato potásico en la proyección.

Muestra / Mineral	Al (cationes)	K (cationes)	A = (Al - 3K)	F (Fe)	M (Mg)
ROCA 15 (Zona de la Sillimanita)					
Granate (Grt15)	0.980	0.000	**0.980**	2.087	0.426
Biotita (Bt15)	1.940	0.946	**-0.898**	2.362	2.476
Plagioclasa (Pl15)	0.661	0.006	**0.643**	0.002	0.000
ROCA 25 (Zona del Granate)					
Granate (Grt25)	1.063	0.000	**1.063**	2.424	0.363
Biotita (Bt25)	2.051	0.876	**-0.577**	2.339	2.039
Plagioclasa (Pl25)	0.549	0.002	**0.543**	0.002	0.000

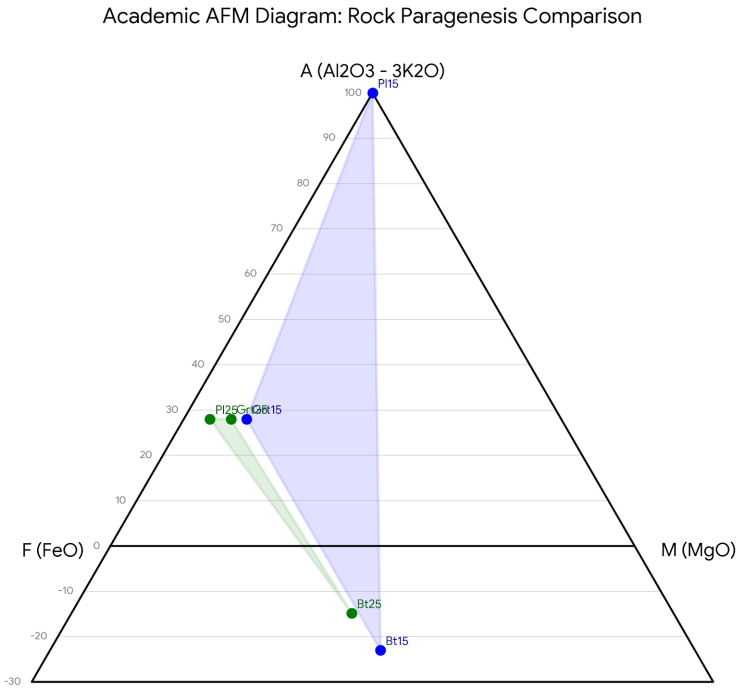


Figura 2. Diagrama de proyección ternaria AFM (A=Al2O3−3K2O; F=FeO; M=MgO) para las asociaciones minerales de las muestras estudiadas. Los polígonos sombreados representan las facies de equilibrio (paragénesis) entre granate (Grt), biotita (Bt) y plagioclasa (Pl). La trayectoria entre la Roca 25 (zona del granate) y la Roca 15 (zona de la sillimanita) indica una evolución hacia mayores condiciones de grado metamórfico

3.3 Relación deformación y metamorfismo

El análisis conjunto de las estructuras observadas en campo y de las microestructuras identificadas en lámina delgada pone de manifiesto una estrecha relación entre deformación y metamorfismo a lo largo de la evolución tectonometamórfica del área de estudio. A escala de afloramiento, se reconoce una deformación polifásica, en la que al menos tres fases principales han contribuido a la estructuración de las rocas. La primera fase (D1), asociada al engrosamiento cortical inicial, se encuentra escasamente preservada, siendo identificable principalmente a través de relictos incluidos en porfiroblastos o en dominios menos afectados por la deformación posterior. Esta fase habría generado una foliación temprana (S1), actualmente transpuesta o parcialmente obliterada.

La segunda fase de deformación (D2) constituye el evento dominante, responsable del desarrollo de la foliación principal (S2), penetrativa y de carácter regional. Esta foliación está definida por la orientación preferente de filosilicatos como biotita y moscovita, y representa la principal fábrica tectonometamórfica observada tanto en campo como en lámina. La abundancia de estructuras asociadas a esta fase, como pliegues isoclinales y la disposición sistemática de la foliación, indica que D2 corresponde a un régimen de deformación dúctil generalizado. Desde el punto de vista petrográfico, numerosas evidencias indican que el crecimiento mineral tuvo lugar de forma sintectónica respecto a D2. En particular, la presencia de porfiroblastos de minerales como cloritoide o granate con inclusiones internas que definen foliaciones previas, junto con el desarrollo

de sombras de presión y la deflexión de la foliación en torno a estos minerales, demuestra que la blastesis mineral estuvo acoplada a la deformación. Este comportamiento es característico de condiciones en las que la recristalización y la reorganización mineral se producen simultáneamente con el acortamiento tectónico.

La tercera fase de deformación (D3) se manifiesta mediante el desarrollo de crenulación y estructuras de menor escala que afectan a la foliación principal. Estas estructuras indican una reorientación posterior del campo de esfuerzos, en condiciones posiblemente de menor temperatura o diferente régimen tectónico, y reflejan una evolución progresiva hacia estados más avanzados de la historia deformacional.

Las fases tardías (D4–D5), aunque de carácter más local y menos desarrolladas, pueden estar relacionadas con procesos de fracturación o reajuste tectónico en condiciones más superficiales. La relación entre deformación y metamorfismo en el área estudiada se caracteriza por un fuerte acoplamiento durante las fases principales de la orogenia, especialmente durante D2, donde la deformación dúctil, el desarrollo de la foliación y la cristalización mineral progresiva ocurren de manera simultánea. Este patrón es coherente con un contexto de metamorfismo regional asociado a un orógeno colisional, en el que los procesos tectónicos y metamórficos forman parte de un mismo sistema evolutivo.

3.4 Contexto Tectónico

La evolución metamórfica y estructural deducida a partir del análisis de campo y de lámina delgada se enmarca de manera coherente en el contexto geodinámico de la orogenia Varisca dentro de la Zona Centroibérica del Macizo Ibérico. Este dominio representa un segmento interno del orógeno varisco, caracterizado por la implicación de materiales precámbricos y paleozoicos en procesos de deformación, metamorfismo y magmatismo asociados a la colisión continental.

El patrón metamórfico observado, definido por una progresión desde asociaciones de bajo grado (cloritoide) hacia condiciones de grado medio (granate), es consistente con un modelo de engrosamiento cortical progresivo, en el que el enterramiento tectónico de las secuencias metasedimentarias da lugar a un incremento de las condiciones de presión y temperatura. Este proceso se asocia a la convergencia y colisión entre dominios continentales durante el Paleozoico superior, responsable de la construcción del orógeno varisco. La trayectoria metamórfica inferida, de tipo horario (clockwise), refleja una evolución en la que el aumento térmico acompaña al incremento de presión durante las fases iniciales de deformación, alcanzándose condiciones próximas al pico metamórfico en el intervalo de grado medio. Este comportamiento es característico de orógenos colisionales, donde la acumulación de material cortical favorece tanto el calentamiento como la deformación dúctil generalizada.

Desde el punto de vista estructural, la predominancia de la fase D2, responsable del desarrollo de la foliación principal (S2) y del crecimiento sincinemático de minerales, indica que el metamorfismo principal estuvo íntimamente ligado a los procesos de acortamiento y apilamiento tectónico. La preservación de relictos de fases anteriores (D1) y el desarrollo de estructuras posteriores como crenulación

(D3) reflejan la naturaleza polifásica de la deformación varisca, en la que distintos regímenes tectónicos se superponen a lo largo del tiempo.

Un elemento clave en el área de estudio es la presencia de la zona de cizalla de Berzosa, que actúa como una discontinuidad tectónica de primer orden separando dominios con distinto grado metamórfico. Esta estructura, interpretada como un accidente extensional tardivarisco, está asociada a procesos de descompresión y exhumación, que explican tanto la disminución del grado metamórfico hacia el este como la presencia de fenómenos de retrogradación en las rocas estudiadas. La aparición de cuerpos pegmatíticos y evidencias de fusión parcial en sectores más occidentales refuerza la interpretación de una evolución térmica avanzada en profundidad, seguida de un ascenso progresivo de los materiales hacia niveles corticales superiores. La integración de los datos metamórficos y estructurales permite interpretar el área como parte de un sistema orogénico en el que se registra una evolución completa desde el enterramiento y engrosamiento cortical, pasando por el desarrollo de metamorfismo regional sincinemático, hasta fases tardías de extensión, descompresión y exhumación. Este modelo es plenamente coherente con los esquemas tectónicos propuestos para el Sistema Central, donde la orogenia Varisca generó una arquitectura cortical compleja, caracterizada por la superposición de eventos deformacionales y metamórficos.

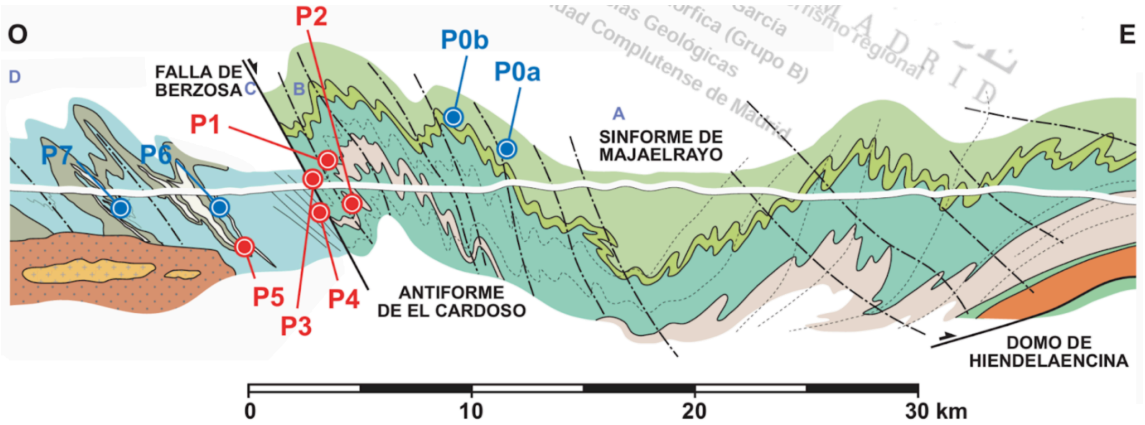


Figura 4: Esquema corte geológico con orientación O-E en el que se observa la tectónica de la zona estudiada.

3.5 Conclusiones

El estudio integrado de los datos de campo y de lámina delgada permite establecer que las rocas analizadas han experimentado un metamorfismo regional de tipo dinamotérmico, desarrollado en el contexto de la orogenia Varisca dentro de la Zona Centroibérica. La evolución metamórfica registrada responde a una trayectoria prograda continua, desde condiciones de bajo grado, caracterizadas por la presencia de cloritoide, hasta condiciones de grado medio, marcadas por la aparición de granate. Esta progresión es coherente con una serie barroviana, indicativa de un incremento progresivo de las condiciones de presión y temperatura asociado a procesos de engrosamiento cortical durante la colisión continental. Las evidencias microestructurales ponen de manifiesto un

claro acoplamiento entre deformación y metamorfismo, especialmente durante la fase D2, responsable del desarrollo de la foliación principal (S2) y del crecimiento sincinemático de minerales. La presencia de porfiroblastos con inclusiones internas y la organización de la fábrica mineral reflejan una evolución tectonometamórfica conjunta en régimen dúctil.

Se reconocen indicios de una etapa retrógrada, vinculada a procesos de enfriamiento y descompresión, probablemente relacionados con la exhumación de los materiales durante las fases tardías de la evolución del orógeno. En este contexto, la actividad de estructuras como la zona de cizalla de Berzosa habría jugado un papel clave en la reorganización tectónica y en la compartimentación del grado metamórfico.

Se concluye con ello que, el área de estudio registra una evolución coherente con un modelo orogénico colisional, en el que se suceden procesos de enterramiento, deformación dúctil, metamorfismo progresivo y exhumación, configurando una historia tectonometamórfica compleja pero bien integrada a partir de las evidencias observadas.

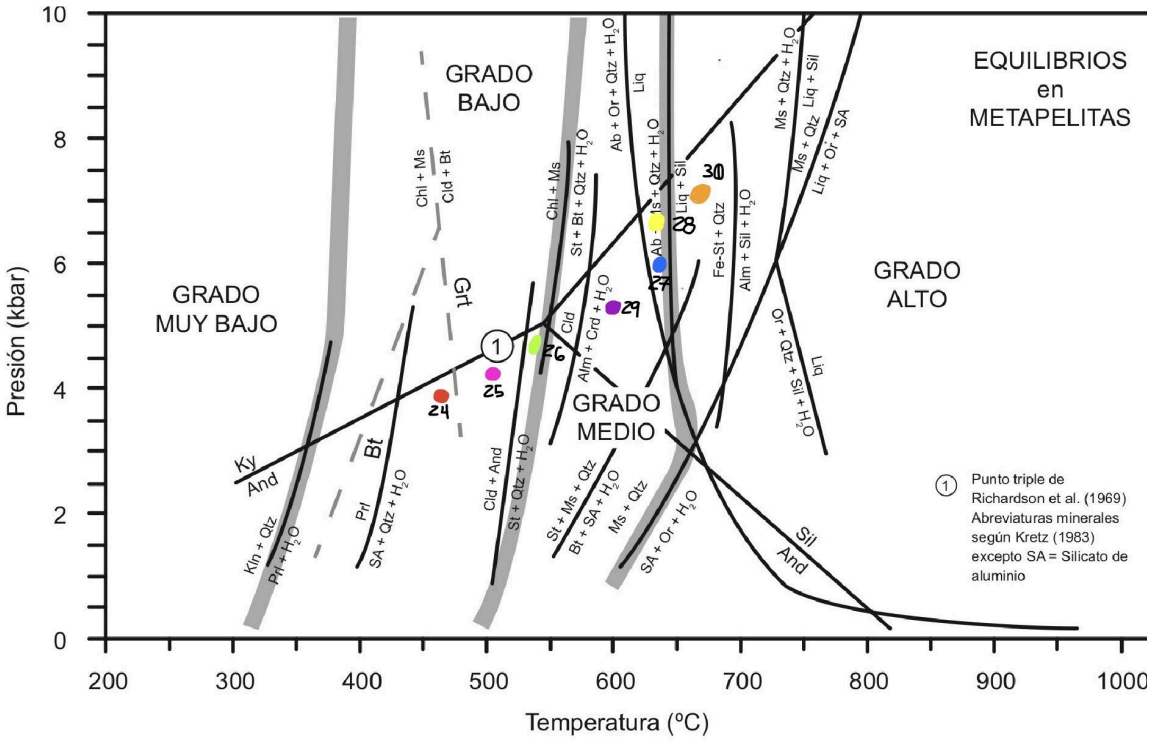


Figura 5. Diagrama P-T de Equilibrios en Metapelitas donde reflejamos las distintas láminas observadas en su campo de equilibrio metamórfico.

Bibliografía

Arenas, R., Díez Balda, M. A., & Martínez Catalán, J. R. (2004). *Zona Centroibérica*. En J. A. Vera (Ed.), *Geología de España* (pp. 61–70). Sociedad Geológica de España.

Bucher, K., & Grapes, R. (2011). *Petrogenesis of metamorphic rocks* (8th ed.). Springer.

Capote, R., & Fernández Casals, M. J. (1975). Evolución estructural del Sistema Central español. *Boletín Geológico y Minero*, 86, 3–14.

Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). *An introduction to the rock-forming minerals* (3rd ed.). Mineralogical Society.

Julivert, M., Fontboté, J. M., Ribeiro, A., & Conde, L. (1972). *Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares*. Instituto Geológico y Minero de España.

Spear, F. S. (1993). *Metamorphic phase equilibria and pressure–temperature–time paths*. Mineralogical Society of America.

Vernon, R. H. (2004). *A practical guide to rock microstructure*. Cambridge University Press.

Winter, J. D. (2010). *Principles of igneous and metamorphic petrology* (2nd ed.). Pearson.

Yardley, B. W. D. (1989). *An introduction to metamorphic petrology*. Longman.