

# TRABAJO FIN DE MÁSTER

## SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LOS GRANITOS DEL PIRINEO

***Autor: Manuel Porquet Pardina***

***Directores: Luis Alberto Longares (UZ) y Emilio L. Pueyo (IGME)***

**Máster Universitario en**

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

**Noviembre de 2014**



**Universidad  
Zaragoza**

**Departamento de Geografía  
y Ordenación del Territorio**



## Resumen

*En el presente trabajo se han georreferenciado las estaciones de medida de anisotropía de susceptibilidad magnética pertenecientes a 21 cuerpos graníticos distribuidos a lo largo del Pirineo. Además se ha realizado una labor de homogeneización de la información que se ha plasmado en la generación de cartografías de síntesis, tanto a escala de cadena como de forma individual (batolito), siguiendo los estándares de la Norma Cartográfica de Aragón. Estos datos provienen de distintas publicaciones sobre anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) como técnica para caracterizar la estructura y deformación interna de los granitos, su modo de emplazamiento y su relación con la evolución estructural de las rocas encajantes.*

**Palabras Clave:** ASM, Pirineos, Granito, Georreferenciación

## Abstract

*This work deals with the geopositioning of twenty one granites and its measurement sites, along the Pyrenees, also the generation of cartographies both individually and global according to the Mapping Standards of Aragón. Data has been provided from different papers about the magnetic susceptibility and its anisotropy (AMS) as a technique in determining the internal structures of plutonic rocks and its emplacement*

**Key Words:** AMS, Pyrenees, Granite, Geopositioning

## Índice

|    |  |         |
|----|--|---------|
| 1. | Introducción y antecedentes.....                     | pág. 1  |
| 2. | Objetivos .....                                      | pág. 3  |
| 3. | Contexto geológico.....                              | pág. 4  |
|    | 3.1. Generalidades de la cadena Pirenaica .....      | pág. 4  |
|    | 3.2. Orogenia hercínica en el ámbito Pirenaico ..... | pág. 6  |
|    | 3.3. Cinemática de los granitos del Pirineo .....    | pág. 6  |
| 4. | Datos .....  | pág. 13 |
|    | 4.1. Origen.....                                     | pág. 13 |
|    | 4.2. Generalidades teóricas de la ASM .....          | pág. 14 |
| 5. | Metodología.....                                     | pág. 17 |
|    | 5.1. Recopilación de la información .....            | pág. 17 |
|    | 5.2. Extracción de la información .....              | pág. 17 |
|    | 5.2.1.Tablas de datos.....                           | pág. 17 |
|    | 5.2.2.Cartografías .....                             | pág. 19 |
|    | 5.3. Georreferenciación de los datos.....            | pág. 20 |
|    | 5.4. Generación de las cartografías .....            | pág. 28 |
|    | 5.4.1. La Norma Cartográfica de Aragón .....         | pág. 28 |
|    | 5.4.2. Diseño de las fichas individuales .....       | pág. 29 |
|    | 5.4.3. Diseño de los mapas generales .....           | pág. 32 |
|    | 5.5. Generación de los metadatos .....               | pág. 35 |
| 6. | Resultados .....                                     | pág. 39 |
|    | 6.1. Mapas generales .....                           | pág. 39 |
|    | 6.2. Fichas individuales y base de datos.....        | pág. 39 |
| 7. | Conclusiones .....                                   | pág. 40 |

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 8. Agradecimientos ..... | pág. 42 |
| 9. Bibliografía .....    | pág. 43 |

ANEXOS

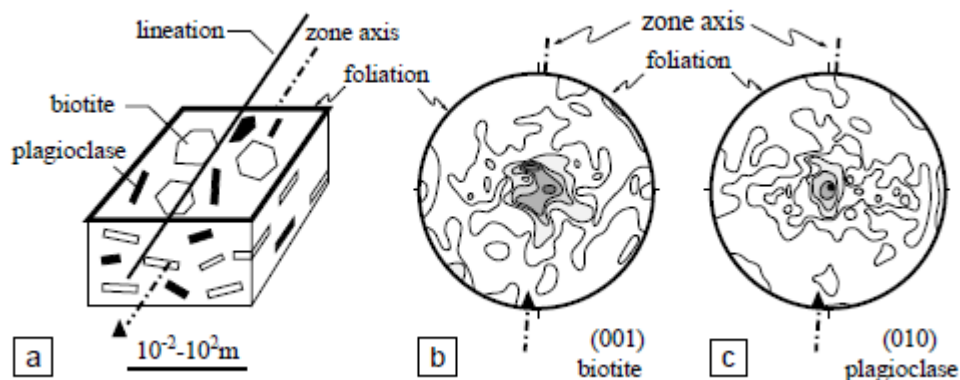
Mapas Generales (6.1)

Tablas de datos, por orden alfabético (6.2)

## 1. INTRODUCCION Y ANTECEDENTES

Durante las dos últimas décadas del siglo XX, los estudios sobre análisis estructural de granitoides en la Cadena Hercínica aumentaron de manera considerable, aplicando en mayor o menor grado los métodos clásicos de la geología estructural, la anisotropía de la susceptibilidad magnética y la gravimetría, para lograr descifrar la estructura interna de estos macizos, proponiendo diferentes modelos de emplazamiento y estableciendo una clara relación entre morfología tridimensional en profundidad y el modelo evolutivo del emplazamiento (Hilario, 2012). Los primeros estudios se realizan aplicando únicamente técnicas clásicas de análisis estructural, es decir, medidas sistemáticas sobre afloramiento de estructuras planares y lineares, con el apoyo de la gravimetría en algunos casos. La gravimetría se basa en el estudio de las variaciones de las medidas del campo gravitatorio terrestre en superficie que son debidas a la influencia de cuerpos de diferente volumen o densidad que se encuentran en el subsuelo. Se considera que cuando existe una anomalía gravimétrica, existe un cuerpo causante de la misma. Este cuerpo tendrá una masa, y por tanto, una densidad anómala en relación con las rocas que lo rodean. La causa de la anomalía puede ser un paleorrelieve, un cuerpo granítico, una cuenca sedimentaria, etc. A partir del análisis gravimétrico se puede definir la forma y la densidad del cuerpo causante de la anomalía.

La orientación de la fábrica magmática de un granito puede deducirse a partir de medidas de campo. Según Bouchez (1997), el plano de foliación se obtiene a partir de las medidas de al menos dos planos de corte naturales paralelos a la traza biotita y/o a la de feldespato potásico. A continuación, se localiza una sección de afloramiento paralelo a esta foliación con el fin de averiguar si los minerales tienen una lineación definida según la dirección de ese plano. La lineación puede medirse de forma más sencilla a partir de marcadores alargados, como los ejes mayores en el caso de los megacrismos de feldespato o de anfíboles. Sin embargo, si la biotita es el único marcador presente en la roca, descifrar la lineación puede entrañar dificultad por el hecho de que no tiene morfologías alargadas (Figura 1) De hecho, la lineación marcada por los cristales de biotita, y de en general el resto de cristales tabulares no alargados, viene definida por un “eje de zona”, o eje alrededor del cual se disponen estadísticamente las caras más largas de los cristales. En otras palabras, el eje de zona es el eje de rotación definido estadísticamente por los cristales presentes. Generalmente se encuentra paralelo o casi paralelo a la lineación medida en feldespatos, anfíboles y plagioclasas (fig1a).



**Figura 1.** Lineación y foliación magmática definidos a partir de las subfábricas de biotita y plagioclasa. (a) la lineación definida tanto por la fábrica linear de la plagioclasa como por el eje de los cristales de biotita. (b) y (c) diagramas “equal area” pertenecientes al granito de Guerande (200 medidas proyectadas dentro del plano de foliación), ilustrando la lineación magmática definida por el eje representado con el triángulo negro, y calculado como el polo sobre el plano mejor encajado. (Bouchez, 1997)

Sin embargo, como se ha comentado, estos métodos estructurales clásicos presentaban ciertas limitaciones que a menudo imposibilitaban la toma de medidas directa en el campo, obligando a utilizar métodos muy laboriosos.

La susceptibilidad magnética de las rocas es un tensor de segundo grado, es decir, una propiedad anisótropa que se puede representar por un elipsoide al que habitualmente se denomina como “fábrica magnética” (Rochete, 1987). La orientación de este elipsoide depende de la orientación preferente de los minerales responsables del magnetismo inducido. La orientación preferente se debe a la suma de los factores intrínsecos (anisotropía cristalina) y a los externos (deformación) (Tarling y Hrouda, 1993). Cuando la anisotropía cristalina, mimetiza la anisotropía de la susceptibilidad magnética de los minerales (como en el caso de los filosilicatos; Martín Hernández and Hirt, 2003) la medida de la ASM da una información muy valiosa sobre los procesos de deformación.

La aplicación de las técnicas de ASM al estudio de granitos ha dado resultados excelentes en el caso de los macizos calco-alcalinos ya que en estos el hierro existente se aloja preferentemente en biotita (denominados granitos no-magnéticos o de la serie de la ilmenita; Ishihara, 1977), en granitos de otros orígenes (serie de la magnetita) los resultados deben ser interpretados con más precaución (Pueyo et al., 2005). En cualquier caso, el método de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (ASM) es, hoy en día, la técnica más eficaz para abordar el estudio de la fábrica interna de los plutones graníticos (Bouchez, 1997), especialmente cuando estos presentan débil orientación preferente de los minerales (débil anisotropía).

Los datos de fábrica magnética permiten construir mapas de trayectorias de la foliación y de la lineación, que junto con el estudio de la estructura del encajante, de las relaciones de contacto y de la geometría tridimensional de la intrusión, sirven de soporte para la interpretación del proceso de emplazamiento, lo que a su vez permite avanzar en la construcción de un modelo geodinámico regional (Román-Berdiel et al., 2006).

La aplicación de esta técnica a los batolitos pirenaicos representó uno de los primeros hitos en el estudio de la ASM en granitos (Bouchez et al., 1990; Gleizes et al., 1993; Leblanc et al., 1994) y, además, ha supuesto una verdadera revolución en la investigación de la orogenia hercínica. En primer lugar porque muchos de esos batolitos eran interpretados anteriormente como post-tectónicos (o tardí hercínicos) y en segundo lugar porque su anisotropía ha cambiado la interpretación de las fases de deformación (Gleizes et al., 1998). En la actualidad, la práctica totalidad de los cuerpos graníticos ha sido estudiada por esta técnica (Pueyo et al., 2006)

Pero si algo caracteriza a la totalidad de los trabajos recopilados aquí, correspondientes a toda la zona del Pirineo, es la ausencia de la información geográfica asociada a los mismos, algo indispensable en estos días en los que el papel y lápiz están dejando paso a las tabletas y las pantallas táctiles. Por tanto, resultaba necesaria la digitalización de la información, así como la georreferenciación de todos los cuerpos y todas las estaciones de medida de cada cuerpo, de cara a un manejo de información más acorde al siglo XXI. Esta información además estará accesible en los servidores del Instituto Geológico y Minero de España, en un formato y siguiendo unos estándares (proyección ETRS89, acceso a metadatos, cartografía acorde con la NCA) que facilitarán su consulta para usos posteriores.

El proceso ha sido lento, en ocasiones tedioso, al tener que homogeneizar series de información de gran volumen. En concreto, se han manejado 21 cuerpos graníticos, con más de 2200 estaciones de medidas asociadas

Además, la georreferenciación no ha resultado sencilla, porque la información de partida con la que se contaba era muy pobre, con cartografías realizadas a mano alzada, como se mostrará más adelante, que prácticamente nunca coincidían exactamente con las cartografías base sobre las que se ha trabajado, y sobre las que era muy difícil encontrar puntos de referencia fiables. Por ello, aunque cada cuerpo se ha tratado con la máxima precisión posible, el hecho de que las cartografías de origen no fueran de calidad, habrá provocado probablemente un error aleatorio muy difícil de cuantificar, que si bien quizá no resulte demasiado importante en la morfología de los cuerpos, sí que debe estar presente en lo referente a las coordenadas obtenidas para cada estación de medida.

## 2. OBJETIVOS

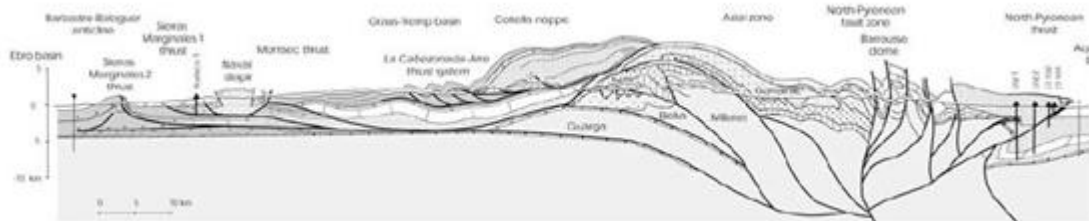
El objetivo principal del presente trabajo es la generación de cartografías mediante SIG que reflejen las propiedades magnéticas de los distintos batolitos graníticos presentes en el Pirineo, lo que se traduce en:

- La homogeneización de los datos de origen y su digitalización
- La georreferenciación de los distintos cuerpos y sus estaciones de medida
- La generación de cada una de las distintas cartografías dentro de los estándares de la Norma Cartográfica de Aragón, tanto a nivel de batolito como para el Pirineo en su totalidad, de las siguientes variables:
  - Susceptibilidad magnética
  - Foliación magnética
  - Lineación magnética
- La preparación de todo el material para ser implementado en los *WMS* del IGME.

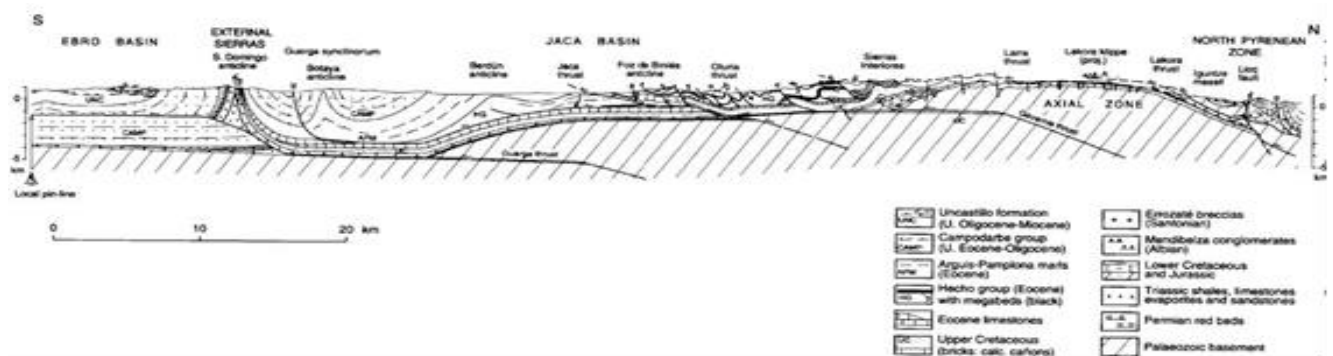
### 3. CONTEXTO GEOLÓGICO

#### 3.1. Generalidades de la cadena Pirenaica

Los Pirineos se extienden entre el Golfo de Lion, en el Mediterráneo, y el Golfo de Vizcaya, en el Océano Atlántico. Si bien desde el punto de vista geográfico constituye una entidad bien definida, siendo la frontera natural entre Francia y España, sus límites geológicos deben ser precisados al formar parte de una Cordillera mucho más extensa (Vera et al., 2004). El límite oriental no presenta problemas en la vertiente surpirenaica por constituirlo el límite físico del Mar Mediterráneo. Sin embargo, en la vertiente norpirenaica las escamas de las Corbieres tienen continuidad geológica con las láminas cabalgantes de Languedoc aunque, por posición geográfica, se incluyen siempre en los Pirineos. El límite occidental se sitúa en la alineación estructural que separa en superficie la Cuenca Vasco-Cantábrica mesozoica de la Cuenca terciaria de Jaca-Pamplona, si bien desde el punto de vista tectónico, la corteza oceánica del Atlántico en la latitud del Norte peninsular presenta deformaciones hasta la anomalía 33 (Roest, W. R., & Srivastava 1991) (Figuras 2 y 3):



**Figura 2.** Sección transversal a lo largo de los Pirineos centrales (Martinez-Peña&Casas, 2003)



**Figura 3.** Sección transversal a través de los Pirineos Occidentales, desde el margen sur de la Zona Norpirenaica hasta la Cuenca del Ebro (Teixell, 1996)

Tradicionalmente se diferencian 4 zonas estructurales según la clasificación clásica de Mattauer de 1968 (Figura 4):

La zona Norpirenaica, caracterizada por afloramientos de materiales Variscos, conocidos como Macizos Norpirenaicos. El límite norte de esta zona está dado por el Cabalgamiento Frontal Norpirenaico (CFN) al oeste y el cabalgamiento de los Petites Pyrénées al este (CPP). El límite meridional está marcado por la Falla Norpirenaica.

Zona de la Falla Norpirenaica: Es una delgada zona que separa la Zona Axial de la Zona Norpirenaica, y está caracterizada por la existencia de un metamorfismo térmico importante. Entre la Zona Axial y los Macizos Vascos la falla norpirenaica está mal definida y el paso de las estructuras vergentes al norte y al sur es progresivo.

Zona Axial y Macizos Vascos: el Pirineo Axial comprende un extenso afloramiento del basamento Varisco situado al sur de la Falla Norpirenaica hasta la línea de cabalgamientos que marca el comienzo de la zona Surpirenaica. En este marco se encuentran algunas de las cumbres más altas de los pirineos como son el Aneto (3404m), Posets (3369m) o el Balaitus (3144m) cuya cima es Cretácica. Los materiales Variscos que se encuentran en la zona Axial forman parte del borde meridional de la rama europea del arco orogénico. Estos materiales están formados por sedimentos del Proterozoico Superior hasta el carbonífero sinorogénico y por granitoides Variscos. Posteriormente este basamento ha sufrido una deformación heterogénea durante la orogenia Alpina. Observamos de esta forma que la mayoría de estos sedimentos están afectados por deformaciones posteriores. Sin embargo, los plutones han conservado la mayor parte de sus características Hercínicas. Este fenómeno es de gran interés ya que a través del conocimiento de su estructura interna podemos precisar mejor la tectónica regional Hercínica.

La Zona Surpirenaica: está formada por los materiales post-variscos que están afectados por cabalgamientos imbricados y pliegues asociados de vergencia sur. El límite sur de la Zona Surpirenaica está dado por los Cabalgamientos Frontales Surpirenaicos que se sitúan sobre la Cuenca del Ebro, y que dan lugar a las Sierras Marginales en la Unidad Surpirenaica Central y a las Sierras Exteriores en su vertiente occidental.



**Figura 4.** Estructura general de los Pirineos. Extraído de Vera 2004. CFNP: Cabalgamiento frontal Norpirenaico. CPP: Cabalgamiento de los Petites Pyrenées. CFSP: Cabalgamiento frontal Surpirenaico. SE: Sierras Exteriores.



### 3.2. Orogenia hercínica en el ámbito Pirenaico

Los materiales variscos aflorantes en los Pirineos constituyen un segmento del orógeno varisco que, a pesar de la reestructuración alpina, conservan buena parte de las características sedimentarias y estructurales originales. Los afloramientos de estos materiales se distribuyen en tres dominios (Zona Norpirenaica, Macizos Vascos y Zona Axial) individualizados por la Falla Norpirenaica y separados por materiales del ciclo alpino, que presentan características estratigráficas y/o estructurales diferenciadas.

Las rocas paleozoicas de la Zona Axial pirenaica representan el basamento de la cordillera de los Pirineos. En estas rocas es posible reconocer la existencia de cabalgamientos alpinos, generalmente dirigidos hacia el sur, que dan lugar a un destacado levantamiento del basamento y a una rotación variable de las estructuras variscas previas. El desarrollo de pliegues y foliaciones tectónicas alpinas en estos materiales es muy limitado, de modo que la mayor parte de las estructuras observables en el Paleozoico de la Zona Axial pirenaica son variscas. Esta Zona Axial ha sido dividida tradicionalmente en dos dominios estructurales denominados *infraestructura* y *supraestructura* (Vera et al., 2004). La *infraestructura* presenta esencialmente un buen desarrollo de estructuras subhorizontales, con trazado aproximado E-O. Algunas de estas se desarrollan contemporáneamente con el momento álgido del metamorfismo varisco. Por su parte, la *supraestructura* se caracteriza por el desarrollo de pliegues y foliaciones tectónicas asociadas, generalmente con un trazado E-O, que se disponen desde subverticales a fuertemente vergentes al sur.

### 3.3. Cinemática de los granitos del Pirineo

Los afloramientos de rocas intrusivas constituyen uno de los elementos característicos de la Zona Axial Pirenaica, con una fuerte influencia en el paisaje. Las intrusiones de mayor desarrollo (Panticosa, Maladeta, Mont Louis-Andorra...) alcanzan la escala batolítica y se constituyen como complejos plutónicos que registran una historia intrusiva multiepisódica. La mayor parte de esas intrusiones se emplazó de modo simultáneo o con posterioridad al pico del metamorfismo regional varisco. La clasificación de los macizos intrusivos pirenaicos ha sido abordada bien considerando el tipo de zonación petrológica que presentan los distintos cuerpos intrusivos, o bien su nivel de emplazamiento, esquema que se puede simplificar según si se encuentran en materiales de la supraestructura o de la infraestructura, ambos definidos con anterioridad.

Macizos intrusivos de la supraestructura: este conjunto representa el mayor número de afloramientos y la mayor superficie aflorante del plutonismo varisco en los Pirineos. Los contactos, claramente intrusivos, cortan a los pliegues y esquistosidad de plano axial generados por la fase principal Varisca, e incluso a cabalgamientos tardíos que los afectan (Casas et al., 1989) Este grupo incluye algunos de los macizos de mayores dimensiones, como son Cauterets-Panticosa, Maladeta, Mont Luis – Andorra, Querigut-Millas, Saint Laurent-La Jonquera, junto con otros de menor superficie aflorante, como Aya, Néouvielle, Bassiès, Marimanha, etc.

Macizos intrusivos de la infraestructura: estos cuerpos intrusivos son mucho menos numerosos y extensos que los anteriores. Afloran en forma de stocks, diques o sills, generalmente lacolíticos, de dimensiones reducidas, en el interior de complejos metamórficos. Los afloramientos más representativos aquí tratados son los macizos de Trois Segneurs y Aston.

En la mayor parte de granitos pirenaicos (paramagnéticos) existe buena correlación entre la susceptibilidad magnética y los tipos petrográficos que Gleizes (1993) resume de la siguiente forma:

$Km > 300 \times 10^{-6} \text{ SI}$  □ dioritas y gabrodioritas

$300 \times 10^{-6} \text{ SI} > Km > 100 \times 10^{-6} \text{ SI}$  □ tonalita

$Km < 100 \times 10^{-6} \text{ SI}$  □ granodioritas

En total, durante los últimos 20 años se ha estudiado con las técnicas de la ASM 21 cuerpos graníticos, de los cuales se resume a continuación la información más relevante, y los modelos de emplazamiento deducidos de algunos de ellos. Se presentan en orden geográfico de oeste a este, mientras que en la tabla 1 se han resumido las características principales.

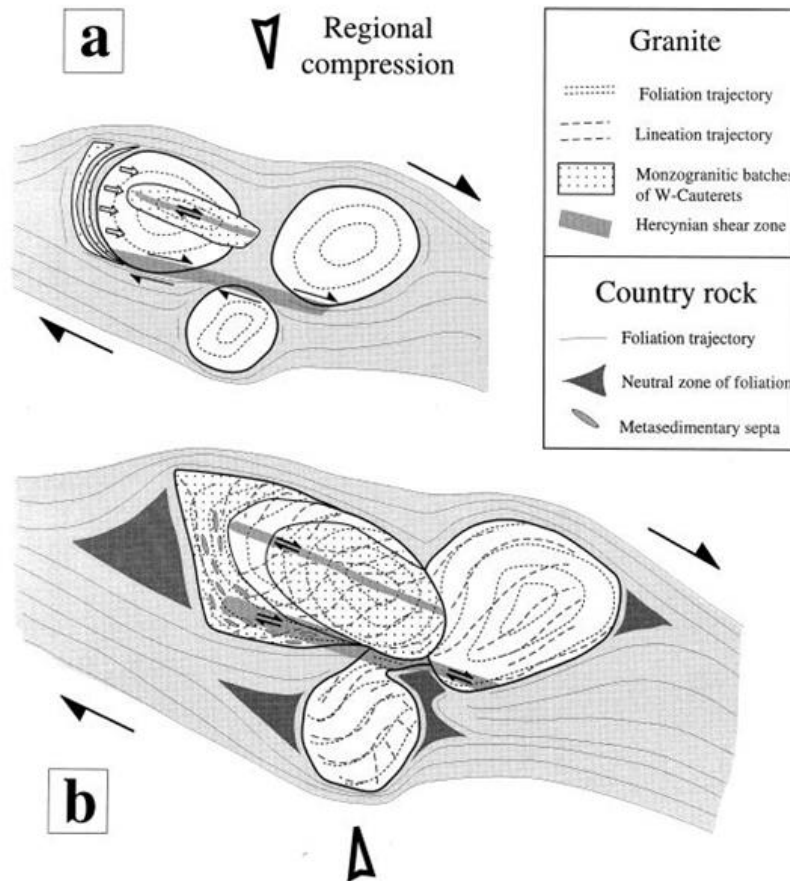
Aya (Olivier et al., 1999): El plutón granítico de Aya, con una extensión aproximada de unos 60km<sup>2</sup> y situado en los denominados Macizos paleozoicos Vascos, se encuentra encajado en materiales de edades entre Devónico Superior y Carbonífero. Los valores medidos de susceptibilidad magnética (K) oscilan entre los  $12 \times 10^{-6}$  y los  $633 \times 10^{-6}$  S.I. Los valores más bajos ( $< 200 \times 10^{-6}$  SI) se encuentran en la parte norte y en el borde sur, mientras que los más altos ( $> 400 \times 10^{-6}$  SI) ocupan el sector centro-oriental del plutón.

Eaux Chades (Izquierdo et al., 2012): La intrusión de Eaux-Chades ha sido una de las últimas en ser estudiada. Es el plutón más occidental del Pirineo Axial, y a pesar de su pequeña superficie (aprox 19km<sup>2</sup>), su estudio es de interés porque su topografía permite un estudio continuo a lo largo de 1200m en la vertical. Los valores medios de susceptibilidad magnética se mueven rangos de entre los  $19 \times 10^{-6}$  SI en el núcleo de la intrusión, hasta los  $320 \times 10^{-6}$  SI en los bordes. El estudio de la ASM deja claro que este cuerpo no es una extensión occidental de Cauterets.

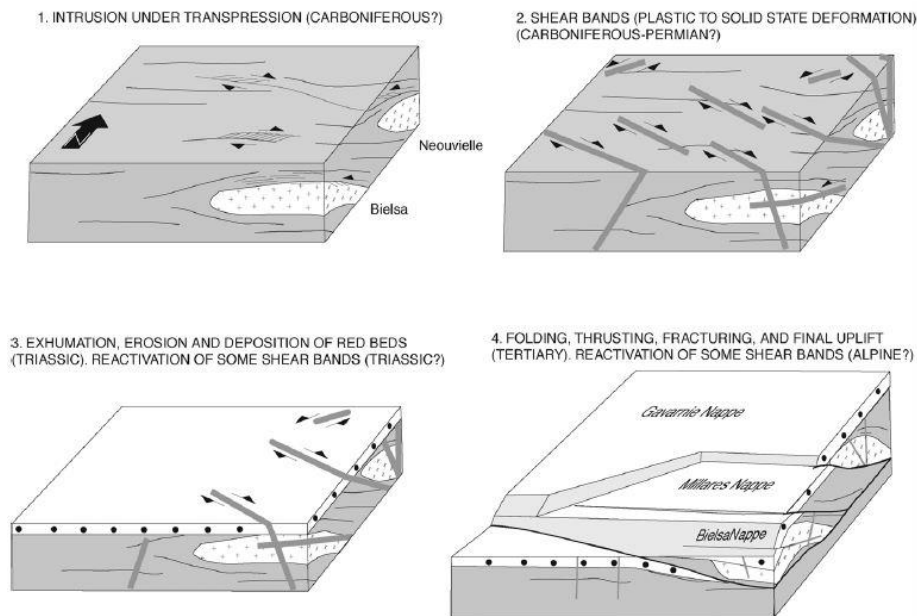
Cauterets-Panticosa (Gleizes et al., 1998): El complejo plutónico Cauterets-Panticosa es uno de los mejor conocidos de entre todos los granitos del Pirineo (Figura 5). Ocupa un área de unos 250km<sup>2</sup>, y se sitúa en el sector oeste de la Zona Axial, donde esencialmente los dos plutones de Cauterets (Este y Oeste) afloran en territorio francés mientras que el de Panticosa lo hace en suelo español. En general no se alcanzan valores superiores a los  $500 \times 10^{-6}$  SI de susceptibilidad magnética, y sus disposición tanto en Panticosa (Santana et al., 1992, Santana 2001 y 2002) como en Cauterets-Este refleja una zonación concéntrica.

Neouvielle (Gleizes et al., 2001): El plutón de Neouvielle tiene una forma aproximadamente triangular, que alcanza aproximadamente los 100km<sup>2</sup> de superficie. La susceptibilidad magnética no excede los  $540 \times 10^{-6}$  SI en las zonas de valores máximos, mientras que los valores más bajos se mueven en torno a  $160-180 \times 10^{-6}$  SI. Los primeros se dan en los bordes mientras que los segundos se encuentran en el centro, confirmando la zonación concéntrica habitual definida por Alibert et al. (1998)

Bielsa (Román et al., 2004): El plutón de Bielsa cubre una superficie de unos 60km<sup>2</sup>, con una morfología alargada que sigue el eje NO-SE (Figura 6). Los valores de K oscilan entre los  $170 \times 10^{-6}$  SI y los  $822 \times 10^{-6}$ , si bien la mayor parte del macizo tiene valores relativamente bajos, dejando la media aproximadamente en torno a  $180 \times 10^{-6}$  SI. Susceptibilidades superiores a  $300 \times 10^{-6}$  SI se encuentran solo en 7 de las 60 estaciones y se localizan en el sector norte.



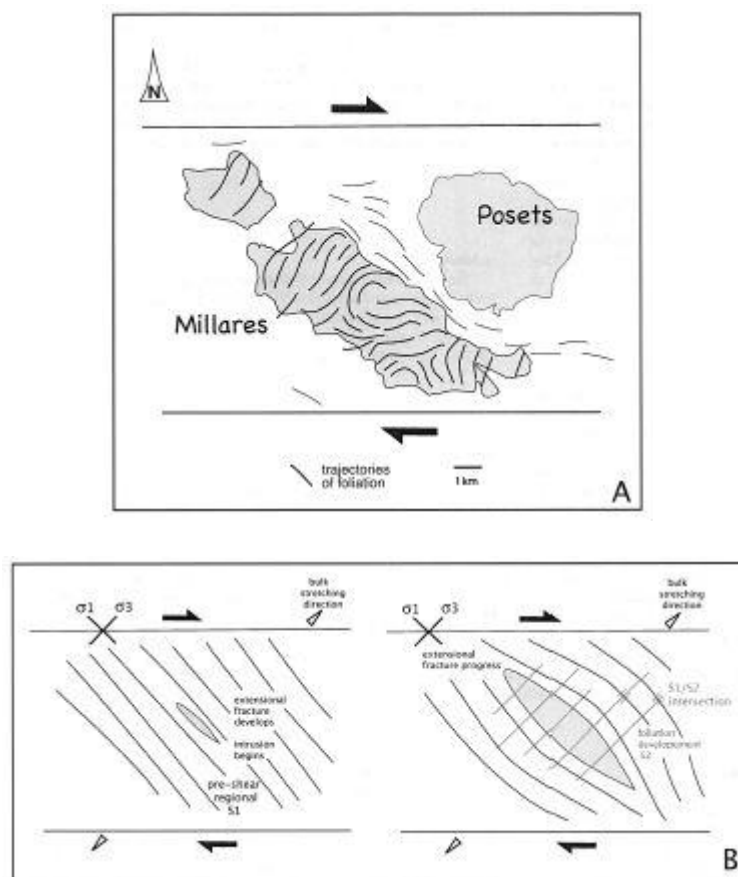
**Figura 5.** Modelo de emplazamiento y deformación coetánea del complejo Cauterets-Panticosa: (a) al comienzo de la intrusión de las últimas cantidades de magma; (b) al final del emplazamiento del magma (Gleizes et al., (1998))



**Figura 6.** Bloque-diagrama mostrando la evolución propuesta para el macizo de Bielsa desde su intrusión en el Carbonífero hasta su apariencia definitiva, en época terciaria. En el primer cuadro, la transpresión queda reflejada por la componente dextral en el plano horizontal, y la componente inversa en el plano vertical.

Bordères (Gleizes et al., 2006): El plutón de Bordères, de unos 20km<sup>2</sup> de extensión, muestra una zonación concéntrica, y a partir del estudio de la AMS se deduce una morfología de domo con el eje mayor siguiendo una inclinación N100°E. Los valores de K varían desde los 90x10<sup>-6</sup> SI en el sector central, hasta los 700x10<sup>-6</sup> SI conforme nos desplazamos hacia los bordes.

Millares (Román et al., 2006): El plutón de Millares es alargado, con orientación NO-SE y unas dimensiones aproximadas de 10x2km. Muestra una zonación composicional concéntrica. Los valores de K varían entre  $70 \times 10^{-6}$  y  $470 \times 10^{-6}$  SI. Cerca del 60% del macizo presenta bajas susceptibilidades ( $< 300 \times 10^{-6}$  SI) dejando la media aproximadamente en  $270 \times 10^{-6}$  SI (Figura 7).

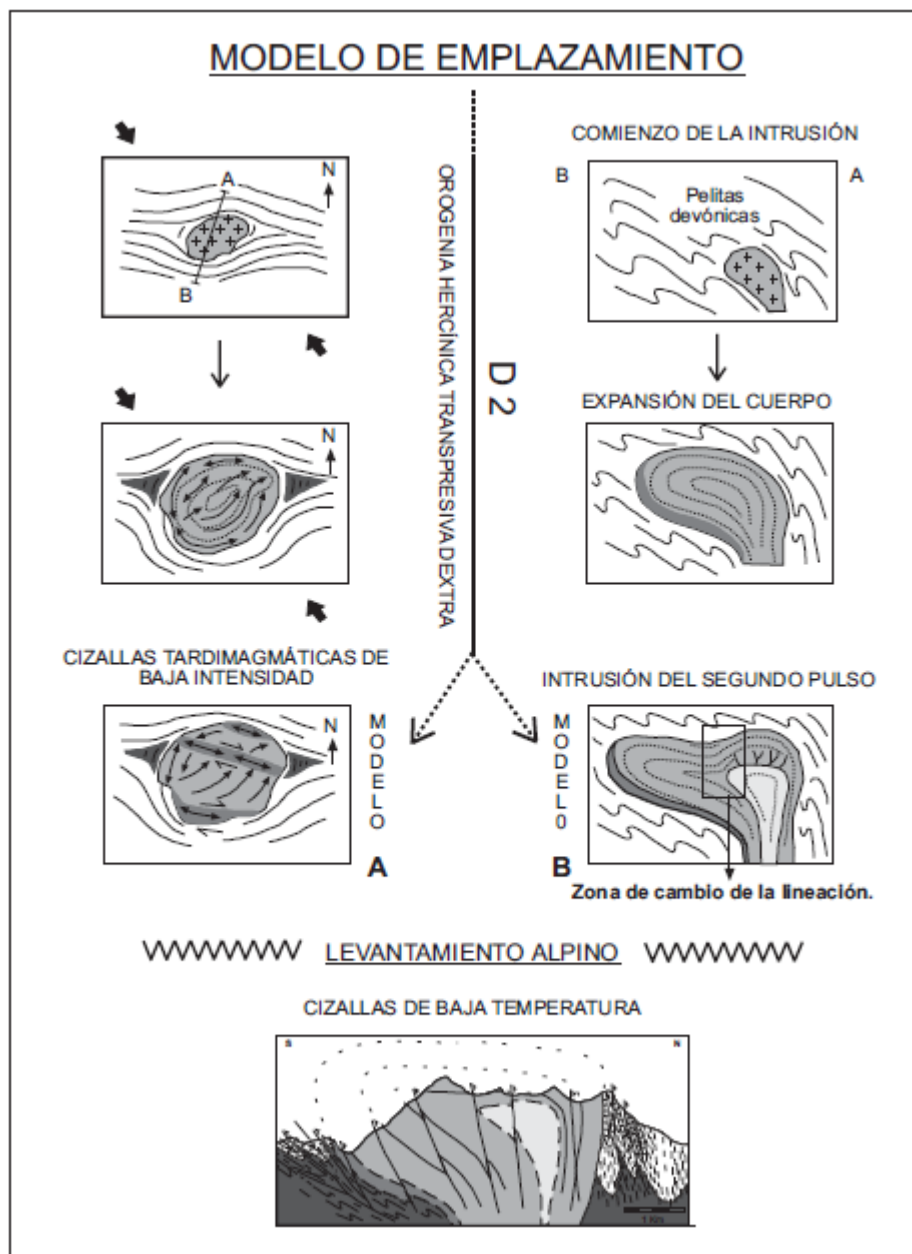


**Figura 7:** (A) Modelo de emplazamiento y deformación coetánea propuesto para el plutón de Millares. (B) Esquema general del contexto cinemático del modelo propuesto.

Posets (Hilario, 2004): El plutón de Posets presenta una forma circular, con aproximadamente  $20 \text{ km}^2$  de extensión, encajado en una sucesión sedimentaria de edad Devónico medio (Figura 8). Los valores de K no son muy elevados, oscilando entre  $179 \times 10^{-6}$  SI y  $354 \times 10^{-6}$  SI, presentando un valor medio Km de  $270 \times 10^{-6}$  SI. El reparto de estos valores en las estaciones reflejan, una vez más, una zonación concéntrica, en este caso con el núcleo situado en el cuadrante NE, donde se localizan las susceptibilidades más bajas, que aumentan conforme nos alejamos del mismo.

Lys (Hilario, 2004): El macizo de Lys se sitúa inmediatamente al norte del de Posets, y presenta una extensión aproximada de  $55 \text{ km}^2$ . Los valores K presentes son por lo general bajos, aunque globalmente muestran una dispersión importante, desde los  $32 \times 10^{-6}$  SI hasta los  $570 \times 10^{-6}$  SI, con un valor medio de  $210 \times 10^{-6}$  SI.

Maladeta (Leblanc et al., 1994): Emplazado en materiales de edades desde Cámbrico-Ordovícicas hasta Carboníferas, y con un área de unos  $400 \text{ km}^2$ , el plutón de Maladeta es uno de los de mayor extensión de todo el Pirineo. Las magnitudes obtenidas de la susceptibilidad magnética se encuentran entre los  $40 \times 10^{-6}$  SI y los  $620 \times 10^{-6}$  SI, valores nuevamente habituales en los granitos predominantemente paramagnéticos.



**Figura 8.** Modelo de emplazamiento del plutón de Posets: la deformación principal hercínica es de naturaleza transpresiva dextra, definido como un proceso de deformación progresivo y continuo en el tiempo (Gleizes et al, 1998). Figura de Hilario, 2012.

Marimanha (Antolín, 2006): El plutón de Marimanha aflora en la Zona Axial del Pirineo y se dispone con una morfología triangular, alargada hacia el sur, con dimensiones de, aproximadamente 8x6km en los ejes (32km<sup>2</sup>). Los valores de susceptibilidad K obtenidos para cada estación se encuentran entre los 28x10<sup>-6</sup> SI y los 470x10<sup>-6</sup> SI, encontrando la mayoría de ellos por debajo de los 300x10<sup>-6</sup> SI, lo que deja un valor medio final para todo el plutón de 203x10<sup>-6</sup> SI.

Lacourt (Gleizes, 1992): El granito de Lacourt, con unos 16km<sup>2</sup> de superficie, aflora dentro de una serie cámbrico-ordovícica, en el extremo occidental del macizo de Arize. Los valores de susceptibilidad medidos en sus 21 estaciones oscilan desde los 160x10<sup>-6</sup> SI hasta los 460x10<sup>-6</sup> SI.

Ercé (Gleizes, 1992): El plutón de Ercé se sitúa en el extremo occidental del macizo de Trois Segneurs, y su parte observable alcanza los 37km<sup>2</sup>. Los valores de susceptibilidad se encuentran entre los 94x10<sup>-6</sup> SI y los 353x10<sup>-6</sup> SI, y ofrecen una zonación que puede relacionarse directamente con la zonación petrográfica.

Bassiès (Gleizes, 1992): Dentro del sector norte de la Zona Axial, sobre suelo francés, y con una morfología parecida a la de un paralelogramo, encontramos el plutón de Bassiès, con una orientación NE-SO y una superficie aproximada de unos 90km<sup>2</sup>. Las magnitudes K medidas varían desde los 34x10<sup>-6</sup> SI hasta 250x10<sup>-6</sup> SI

Trois Segneurs (Gleizes, 1992): El macizo de Trois Segneurs pertenece a la Zona Norpirenaica, y como la mayoría de los granitos Pirenaicos, tiene carácter paramagnético. Esto queda demostrado por las magnitudes medidas de K, que varían desde los 180x10<sup>-6</sup> SI hasta los 330x10<sup>-6</sup> SI. Su superficie apenas supera los 10km<sup>2</sup> y tiene una morfología característica parecida a la de un “croissant”.

Foix (Bouchez et al., 1990): El plutón d Foix se encuentra, al igual que el de Lacourt, en el macizo de Arize, y con una morfología aproximadamente triangular supera los 40km<sup>2</sup> de superficie. Los valores de K varían desde los 20x10<sup>-6</sup> SI hasta 390x10<sup>-6</sup> SI, y en general se pueden dividir en grupos que se correlacionan con el tipo de roca, señalando la típica zonación concéntrica, con los valores más bajos en el núcleo (leucogranitos), aumentando hacia los bordes (monzogranitos y granodioritas).

Aston (Denèle et al., 2009): el macizo de Aston se encuentra dentro de los denominados ortogneises, que, básicamente, son producto del metamorfismo sufrido por una roca granítica. Es el único de este tipo en este trabajo, si bien, al disponer de los datos AMS publicados, se ha incluido y se ha trabajado como uno más. Su superficie tiene unas medidas de 35x14km. En este caso particular, se han alcanzado valores superiores a los 1000x10<sup>-6</sup> SI debido a la presencia de minerales ferromagnéticos, aunque tan solo se da en 4 de las más de 240 estaciones de medida presentes.

MontLuis-Andorra (Gleizes et al., 1993): El plutón de Mont Louis-Andorra es, con diferencia, el mayor de los presentes en el Pirineo, y su superficie alcanza casi los 600km<sup>2</sup>. Está encajado en materiales de edades que van desde el Cámbrico hasta el Carbonífero inferior. Las 254 estaciones de medida muestran valores de K que van desde los 14x10<sup>-6</sup> SI hasta los 360x10<sup>-6</sup> SI. El empleo de métodos de krigging a la hora de cartografiar de forma continua esta variable se ha tomado como referencia para las cartografías de este trabajo, como se detallará más adelante.

Quérigut (Auréjac et al., 2004): El plutón granítico de Quérigut, de unos 200km<sup>2</sup> de tamaño, aflora entro de la Zona Axial. Se pueden encontrar valores de K desde 10x10<sup>-6</sup> SI hasta 540x10<sup>-6</sup> SI, de nuevo dispuestos (aproximadamente) concéntricamente, con los valores más bajos en el núcleo, aumentando hacia los bordes.

St Arnac-Ansignan (Olivier et al., 2008): Por último, el complejo St.Arnac-Ansignan es el complejo granítico situado más al este, exceptuando el de La Jonquera, del que no existen datos publicados. Estos dos plutones, de 25 y 5km<sup>2</sup> respectivamente, se han trabajado como un único cuerpo, debido a su pequeño tamaño, y a que el estudio original de AMS también se dio en estos términos. Los valores de K son inferiores a 500x10<sup>-6</sup> SI, indicando de nuevo un dominio paramagnético.

**Tabla 1.** Estudios de la ASM en los Pirineos, ordenados geográficamente (Oeste-Este), incluyendo los autores y el año de publicación o lectura de tesis doctoral (modificado de Pueyo et al., 2006)

| <i>Nombre</i>       | <b>Estaciones</b> | <b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b> | <b>Estaciones/km<sup>2</sup></b> | <b>Kmean (10-6 S.I.)</b> | <b>Año publicación/phD</b> | <b>Autor/es</b>   |
|---------------------|-------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------|---|
| Aya                 | 93                | 57                                 | 1.6                              | 174                      | 1999                       | P. Olivier, L. Améglio, H. Richen, F. Vadeboin.                       |
| Eaux Chades         | 28                | 19                                 | 1.5                              | 304                      | 2012                       | E. Izquierdo  |
| Cauterets-Panticosa | 310<br>(200+110)  | 252<br>(210+42)                    | 1.2                              | 211                      | 1998                       | G. Gleizes, D. Leblanc, V. Santana, P. Olivier, J.L. Bouchez          |
| Neouvielle          | 132               | 104                                | 1.3                              | 220                      | 2001                       | G. Gleizes, D. Leblanc, V. Santana, P. Olivier, J.L. Bouchez          |
| Bielsa              | 60                | 58                                 | 1.0                              | 180                      | 2004                       | T. Román Berdiel, A.M. Casas, B. Oliva, E.L. Pueyo, C. Rillo          |
| Borderes            | 64                | 21                                 | 3.0                              | 323                      | 2006                       | G. Gleizes, G. Crevon, A.Asfawossen, P.Barbey                         |
| Millares            | 54                | 30                                 | 1.8                              | 270                      | 2006                       | T. Román Berdiel, A.M. Casas, B. Oliva, E.L. Pueyo, C. Liesa, R. Soto |
| Posets              | 69                | 21                                 | 3.3                              | 270                      | 2004                       | A. Hilario Orús   |
| Lys                 | 101               | 55                                 | 1.8                              | 211                      | 2004                       | A. Hilario Orús   |
| Maladeta            | 253               | 415                                | 0.6                              | 213                      | 1994                       | D. Leblanc, G. Gleizes, P. Lepinasse, P. Olivier, J.L. Bouchez        |
| Marimanha           | 62                | 32                                 | 1.9                              | 203                      | 2006                       | B. Antolin, T. Románl, A.M. Casas, I. Gil Peña, B. Oliva, R. Soto     |
| Lacourt             | 21                | 16                                 | 1.3                              | 274                      | 1992                       | G.Gleizes   |
| Ercé                | 46                | 37                                 | 1.2                              | 169                      | 1992                       | G.Gleizes   |
| Bassiès             | 88                | 90                                 | 1.0                              | 172                      | 1991                       | G. Gleizes, D. Leblanc, J.L. Bouchez                                  |
| Trois Segneurs      | 34                | 10                                 | 3.4                              | 237                      | 1996                       | D. Leblanc, G. Gleizes, L. Roux, J.L. Bouchez                         |
| Foix                | 69                | 45                                 | 1.5                              | 172                      | 1990                       | J.L. Bouchez, G. Gleizes, T. Djouadi, P. Rochette                     |
| Aston               | 247               | 345                                | 0.7                              | 183                      | 2009                       | Y. Denèle, P. Olivier, G. Gleizes, P. Barbey                          |
| Mont Louis-Andorra  | 254               | 550                                | 0.5                              | 195                      | 1993                       | G. Gleizes, A. Nédélec, J.L. Bouchez, A. Autran, P. Rochette,         |
| Querigut            | 121               | 200                                | 0.6                              | 227                      | 2004                       | J.-B. Auréjac, G. Gleizes, H. Diot, J.L. Bouchez                      |
| St Arnac            | 117               | 30                                 | 3.9                              | 303                      | 2008                       | P. Olivier, G. Gleizes, J.L. Paquette, C. Muñoz                       |

## 4. DATOS

### 4.1. Origen

Los datos utilizados para la realización de este proyecto provienen de diferentes publicaciones y tesis elaboradas por distintos autores, desde el año 1990 hasta el año 2006, listadas en el apartado de bibliografía.

Habitualmente los datos de ASM se presentan en los artículos en forma de tablas de información, como la que se muestra en la figura 9, por lo que ha sido necesario su transformación a formato Excel para su posterior uso en los SIG.

| N° site | K (10 <sup>-5</sup> SI) | K1     | K3     | Ppara % | N° site | K (10 <sup>-5</sup> SI) | K1     | K3     | Ppara % | N° site | K (10 <sup>-5</sup> SI) | K1     | K3     | Ppara % |
|---------|-------------------------|--------|--------|---------|---------|-------------------------|--------|--------|---------|---------|-------------------------|--------|--------|---------|
| 1       | 29.6                    | 314/55 | 149/34 | 2.1     | 45      | 39.0                    | 316/64 | 207/9  | 3.8     | 89      | 17.6                    | 280/17 | 186/16 | 2.7     |
| 2       | 32.9                    | 271/65 | 96/25  | 2.5     | 46      | 27.6                    | 66/71  | 164/2  | 1.7     | 90      | 17.2                    | 296/33 | 175/41 | 1.4     |
| 3       | 46.5                    | 238/30 | 142/14 | 2.5     | 47      | 14.6                    | 158/16 | 3/71   | 2.1     | 91      | 15.8                    | 68/16  | 163/15 | 1.8     |
| 4       | 33.9                    | 40/58  | 154/14 | 3.6     | 48      | 14.7                    | 295/17 | 197/27 | 1.7     | 92      | 14.3                    | 276/30 | 171/21 | 2.7     |
| 5       | 31.2                    | 74/3   | 340/21 | 2.5     | 49      | 14.9                    | 265/3  | 179/28 | 1.9     | 93      | 20.8                    | 247/9  | 148/43 | 2.5     |
| 6       | 29.0                    | 2/59   | 184/31 | 2.6     | 50      | 22.1                    | 75/20  | 188/50 | 2.2     | 94      | 25.7                    | 297/61 | 147/25 | 5.8     |
| 7       | 28.2                    | 339/67 | 134/21 | 3.2     | 51      | 20.2                    | 288/22 | 172/45 | 2.4     | 95      | 27.5                    | 248/4  | 154/47 | 3.1     |
| 8       | 17.3                    | 347/63 | 121/20 | 5.9     | 52      | 19.8                    | 112/18 | 252/60 | 2.7     | 96      | 26.3                    | 253/23 | 150/25 | 2.2     |
| 9       | 17.0                    | 345/43 | 172/47 | 6.7     | 53      | 23.7                    | 91/4   | 216/85 | 1.8     | 97      | 16.6                    | 7/26   | 151/58 | 2.7     |
| 10      | 19.8                    | 27/51  | 153/24 | 2.3     | 54      | 16.8                    | 336/12 | 220/66 | 1.9     | 98      | 25.1                    | 267/13 | 172/20 | 1.9     |
| 11      | 20.4                    | 337/61 | 210/19 | 4.0     | 55      | 19.1                    | 203/16 | 300/21 | 2.3     | 99      | 23.5                    | 272/25 | 164/43 | 3.0     |

**Figura 9.** Ejemplo de tabla de información con datos de ASM para el plutón de Nouvielle. Extraído de Gleizes et al, 2001.

Sin embargo, no todas las publicaciones presentaban el mismo tipo de datos, sino que se han dado distintas dificultades a la hora de organizar la información de la forma más homogénea posible, como se comentará más adelante.

En total, se ha trabajado con más de medio centenar de publicaciones, obtenidas tanto de internet como de la biblioteca universitaria, así como de la base de datos del IGME.

El formato habitual ha sido digital (.pdf), si bien en algunas ocasiones se ha tenido que recurrir a formato papel y posterior escaneo del mismo, como por ejemplo la Tesis de Gérard Gleizes (1990).

Una vez recopilada la información, tanto de carácter general sobre la ASM, como a nivel particular de cada granito, el siguiente paso ha sido su procesado tanto a tablas Excel en el caso de los datos, como a imágenes en el caso de las cartografías existentes en las publicaciones. De nuevo se han dado distintos aspectos a tratar, que se comentan en el apartado 4.2.

Tan solo en uno de los casos, en concreto en el del plutón de Eaux Chades, se pudo contar con los datos georreferenciados originales, obtenidos en el campo por Esther Izquierdo para su tesis doctoral (Izquierdo, 2012), a la que le agradezco su colaboración a la hora de enviarme esta información.

Además de la información de ASM propiamente dicha, se ha contado con una serie de recursos online y cartografías base muy útiles tanto para la georreferenciación en primer lugar, como para la generación de las cartografías finales.

En primer lugar, una serie de recursos online obtenidos de las siguientes fuentes:

- Instituto Geológico y Minero de España - IGME ([www.igme.es](http://www.igme.es)): Hojas MAGNA, escala 1:50.000, para la georreferenciación de los cuerpos graníticos sobre territorio español.
- Infraestructura de Datos Espaciales de Aragón (IDEARAGON) - SITAR (<http://sitar.aragon.es/>): Hojas PNOA 2009, 0.5m de píxel, como material de apoyo visual en las tareas de georreferenciación
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières - BRGM (<http://www.brgm.fr/>): Cartografía geológica en formato .kmz a escala 1:50.000 para
- Google Earth: A partir de esta herramienta se ha podido trabajar sobre la cartografía francesa (.kmz), para el trazado de los cuerpos graníticos y su posterior exportación a ArcGIS (apartado 5.3)



Además, para la realización de las tres cartografías generales del Pirineo se ha empleado el mapa geológico de los Pirineos de Barnolas et al., (2008) a escala 1:400.000, que está simplificado y “clonado” a partir del mapa estructural clásico de Choukroune y Seguret (1973). Este proceso de clonado y simplificación fue llevado a cabo por Javier Ramajo durante el transcurso de la Tesis Doctoral de María José Ramón.

## 4.2. Generalidades teóricas de la ASM

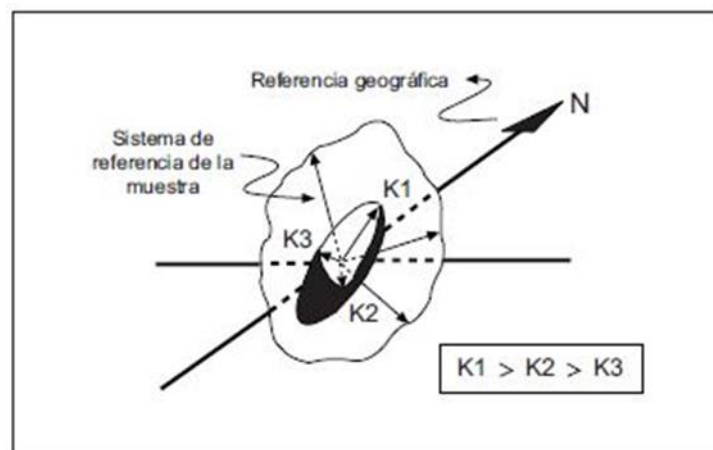
Para una mejor comprensión acerca de la información que se ha manejado y que se va a representar posteriormente, se ha preparado este apartado, en el que se introducirá de forma breve la base teórica en la que se fundamenta la ASM. Para obtener más información o completar en otros aspectos sobre lo que se va a exponer a continuación, son destacables, entre otros, los siguientes trabajos: Jover (1986), Rochette (1988), Gleizes (1992), Bouchez (1997) o el libro de Tarling y Hrouda (1993).

“Un cuerpo isótropo que es sometido a la acción de un campo magnético inductor

$H$ , presenta una imantación inducida de intensidad constante  $M$  tal que:

$M = K H$  siendo  $K$  un escalar definido como la susceptibilidad magnética”.

Para un cuerpo anisótropo,  $K$  es un tensor de 2º orden que se representa por un elipsoide, de tal manera que midiendo el campo inducido en varias direcciones se obtienen los tres vectores que corresponden a los tres ejes del elipsoide de la susceptibilidad magnética siendo, según la figura 10.



**Figura 10.** El elipsoide de la anisotropía de la susceptibilidad magnética (Hilario, 2012)

La técnica de la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética se basa en la medida de la susceptibilidad magnética ( $K$ ) de una muestra cilíndrica standard (25mm de diámetro y 22mm de altura) en distintas direcciones con la finalidad de determinar dicho elipsoide magnético. Este método se basa, como se ha comentado, en el hecho de que la  $K$  de un cuerpo relaciona la magnetización inducida  $M$  con el campo magnético  $H$ . En el sistema internacional tenemos que el  $H$  y  $M$  se miden en Amperios partido por metro (A/m). Al tener las mismas unidades, la susceptibilidad  $K$  es adimensional, por lo que en las cartografías de este trabajo se ha representado de tal forma, especificando las unidades en SI.

Las diferentes variables que aparecen reflejados en las tablas de las publicaciones se explican a continuación. Cabe destacar que, si bien todas ellas han sido digitalizadas e incluidas en la base de datos final, tan solo tres han tomado parte en la generación de las cartografías, como son la susceptibilidad magnética media ( $K_m$ ), la foliación magnética y la lineación magnética.

## Datos direccionales

Estos datos se refieren a la foliación y lineación magnética, estando estos orientados respecto al referencial de la muestra y esta respecto al sistema de referencia geográfico. Las relaciones directas entre el elipsoide magnético y los elementos que definen la fábrica magnética son los siguientes:

- lineación magnética: paralela a K1
- foliación magnética: plano perpendicular a K3

donde K1 es el eje de máxima susceptibilidad y K3 el de mínima

## Datos cuantitativos de índole escalar

Utilizando las intensidades de los ejes K1, K2 y K3 se pueden obtener mediante sencillas operaciones aritméticas una serie de parámetros que informan sobre la geometría del elipsoide de la anisotropía de la fábrica magnética. A la hora de calcular estos parámetros es recomendable corregir el efecto de la contribución diamagnética para evitar valores anormalmente altos de la tasa de anisotropía, en rocas con valores bajos de K, como es el caso de los granitos estudiados.

- Susceptibilidad magnética media :  $K_m = 1/3 (K1 + K2 + K3)$

Este dato se ha encontrado publicado siempre de forma similar en todos los artículos, con la única diferencia de las unidades en las que estaba expresada, a veces en  $10^{-5}$  en el sistema internacional (S.I) y otras en  $10^{-6}$  S.I. En el presente trabajo todos los valores se han representado en términos de  $10^{-6}$  S.I.

- Anisotropía total:  $P = (K1/ K3)$ .

En ausencia de minerales ferromagnéticos y eliminando la contribución diamagnética tenemos que  $P_{para} = (K1-D) / (K3-D)$ , entonces:

$$P_{para} \% = 100 \times [(K1 + 1.4/K3 + 1.4) - 1]$$

Representa el grado de anisotropía total de la roca.

- Parámetro de anisotropía corregida de Jelinek:  $P' = \exp \{ 2[(\mu_1 - \mu_m)^2 + (\mu_2 - \mu_m)^2 + (\mu_3 - \mu_m)^2] \}^{1/2}$   
Donde  $\mu_1 = \ln K1$ ,  $\mu_2 = \ln K2$ ,  $\mu_3 = \ln K3$ ,  $\mu_m = (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)/3$
- Anisotropía linear (LS = K1/ K2)

$$LS \text{ para} \% = 100 \times [(K1 + 1.4/ K2 + 1.4) - 1]$$

Caracteriza la intensidad de la lineación o el grado de alargamiento del elipsoide de la ASM.

- Anisotropía planar (FS = K2/ K3)

$$FS \text{ para} \% = 100 \times [(K2 + 1.4/ K3 + 1.4) - 1]$$

Caracteriza la intensidad de la foliación o el grado de aplastamiento del elipsoide de la AS

- Parámetro de Flinn:  $P_{Flinn} = LS_{para} / FS_{para}$  de modo que:

Si  $P_{Flinn}$  varía entre 0 y 1, el elipsoide será aplastado (fábrica planar)

Si  $P_{Flinn} > 1$ , el elipsoide será alargado (fábrica linear)

- Parámetro de forma de Jelinek:  $T = 2 [ \log (K2/ K3) / \log (K1/ K3) ] - 1$

Si  $T = 1$  el elipsoide será aplastado.

Si  $T = -1$  el elipsoide será alargado.

Si  $T = 0$  será un elipsoide plano-linear.

## 5. METODOLOGÍA

El proceso de digitalización de la información se ha llevado a cabo siguiendo una serie de pasos que se describen a continuación, y que van desde la búsqueda de la información en distintas fuentes, hasta la generación final de los archivos de metadatos correspondientes a cada una de las cartografías finales generadas.

### 5.1. Recopilación de información

El primer paso ha consistido en la recopilación de la información que se va a utilizar para la georeferenciación. Esta información proviene de distintas publicaciones y tesis de un gran número de autores, que han obtenido los datos de campo para uno o varios granitos, según el caso. Muchos de los artículos consultados se han obtenido directamente de la base de datos del IGME, pero para otros ha sido necesario acudir a la Biblioteca Universitaria, o directamente a la web.

Este proceso de recopilación, unido a la lectura de todas las publicaciones (tanto las de cada granito como las más genéricas sobre AMS) ha empleado un volumen de tiempo considerable, y ha resultado de gran importancia la correcta organización de la información, ya que el volumen es muy elevado.

### 5.2. Extracción de la información

#### 5.2.1. Tablas de datos

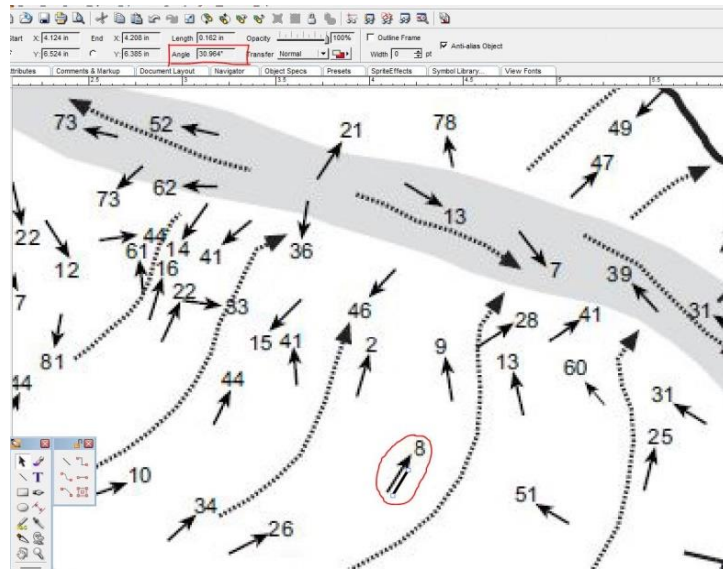
En primer lugar, las tablas de información existentes en las publicaciones se digitalizaron a formato Excel. Este ha sido quizá el proceso más duradero en el tratamiento de la información original. Los artículos con los que se ha trabajado tenían distintas formas de presentar la información, tanto en lo referente al formato, como a las variables. En muchos casos, no se daba la posibilidad de copiar “directamente” los datos a tablas Excel, y aunque así fuera, debían ser sometidos a un posterior repaso. Estamos hablando de unas 2300 líneas de información, cada una con entre 5 y 10 datos a corroborar.

A continuación se han listado los distintos problemas con los que se ha tenido que tratar, y cómo se han resuelto:

No en todos los casos se cuenta con toda la información, sino que es frecuente que falte alguno de los parámetros. Afortunadamente, las tres variables principales ya mencionadas con anterioridad (Km, y la orientación de K1 y K3), que son las utilizadas para las cartografías objetivo de este trabajo, sí que se encontraban en todos los casos. Con las variables secundarias simplemente se ha señalado su ausencia o presencia para que quede constancia en la base de datos.

Se han dado dos casos, en los granitos de Posets y Lys, en los que los parámetros K1 y K3 de las tablas se daban en formato escalar (magnitudes de los ejes), y no direccional, como se van a representar. Para obtener los direccionales, se ha recurrido a las cartografías de las publicaciones y se han realizado las medidas manualmente mediante el software “Canvas” de *acdsee* software, que ayudaba a trazar las líneas y obtener las direcciones (Figura 11). En total se han tratado 2 granitos (Lys y Posets), y un total de 350 medidas manuales.

Además, en el caso de Lys, no existía una cartografía en la que apareciesen las estaciones numeradas, por lo que la información de la tabla no podía asociarse directamente a cada estación. Esta numeración también se realizó a mano, cotejando cada dato de las cartografías de Km y Pp con la tabla (para un total de 101 estaciones)



**Figura 11.** Ejemplo de la toma manual de direcciones para K1 y K3 mediante el software Canvas, en el caso del plutón de Lys (Hilario, 2012). A cada vector se le trazaba una línea paralela (marcado con un círculo), para la cual el programa nos daba su dirección (arriba, marcado con un rectángulo)

También, en el caso del plutón de Bassiès, el primer artículo que se obtuvo no contaba con las estaciones numeradas, ni con tabla de datos, de forma que se tuvo que trabajar sobre las distintas cartografías, numerándolas en el mismo orden para generar la tabla “manualmente”. Más adelante se accedió a la tesis de Gleizes (1991), a partir de la cual se pudo reconstruir la información anterior de forma más fiable.

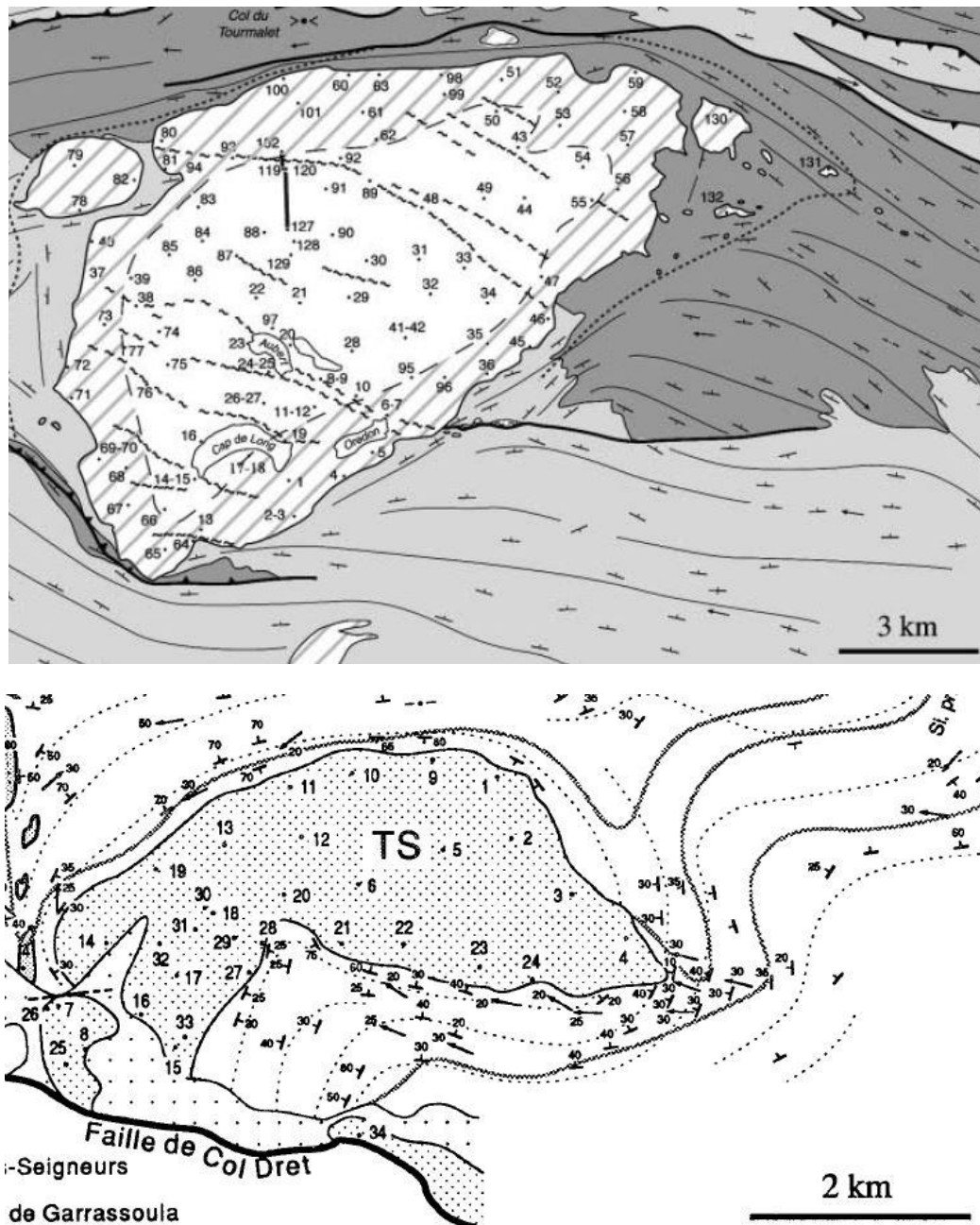
Por último, en función del tipo de la procedencia del autor o su “escuela” (Toulouse, Bilbao o Zaragoza), la foliación magnética aparece reflejada en las tablas o como K3 (es decir, perpendicular a la foliación), o directamente como plano perpendicular que es el que se representa en las cartografías. Para el caso que nos ocupa, la variable que se ha introducido en todas las tablas ha sido K3, por lo que para 7 de los granitos ha habido que transformar la foliación en K3, calculando la perpendicular al plano para la dirección, y el complementario para el buzamiento (p.e para una foliación 140/27 tenemos que K3 es 50/63). Este trabajo se ha realizado con el software StereonetTM de Richard Allmendinger (Allmendinger et al., 2012; Cardozo y Allmendinger, 2013) (<http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/>).

Además, y relacionado con lo anterior, ha habido que revisar los datos prácticamente uno por uno, ya que algunos autores expresan la dirección sobre 360° directamente, mientras que otros lo hacen sobre 180° añadiendo después la componente de dicha dirección (N, S, W, E). Esto vuelve a ser un problema, ya que, en el primer caso, la dirección 210 es equivalente a 30W, pero obviamente no a 30E. Y aunque para la lectura y la comprensión no hay problema, el ArcGIS no entiende que 30W sea en realidad 210.

Finalmente, se han obtenido las 21 tablas correspondientes a cada uno de los 21 cuerpos graníticos, con un total de 2210 estaciones de medida y más de 12 mil datos distintos.

### 5.2.2. Cartografías

Las cartografías de las publicaciones resultan claves en la georreferenciación, si bien ya se ha comentado que no cuentan con una resolución y/o calidad lo suficientemente alta como para una georreferenciación de alta precisión. En ellas se muestran los *sites* o estaciones de medida que deberán georreferenciarse posteriormente. En las figura 12 puede observarse lo complicado que es encontrar puntos de referencia fiables sobre los que realizar la operación. El proceso de extracción ha consistido en un simple recorte de la imagen, y guardado de la misma en formato .jpg, para su posterior uso en el software ArcGIS:



**Figura 12.** Ejemplo de dos cartografías extraídas directamente de las publicaciones; Neouville, arriba (Gleizes et al., 2001) y Trois Segneurs, abajo (Gleizes,1992)

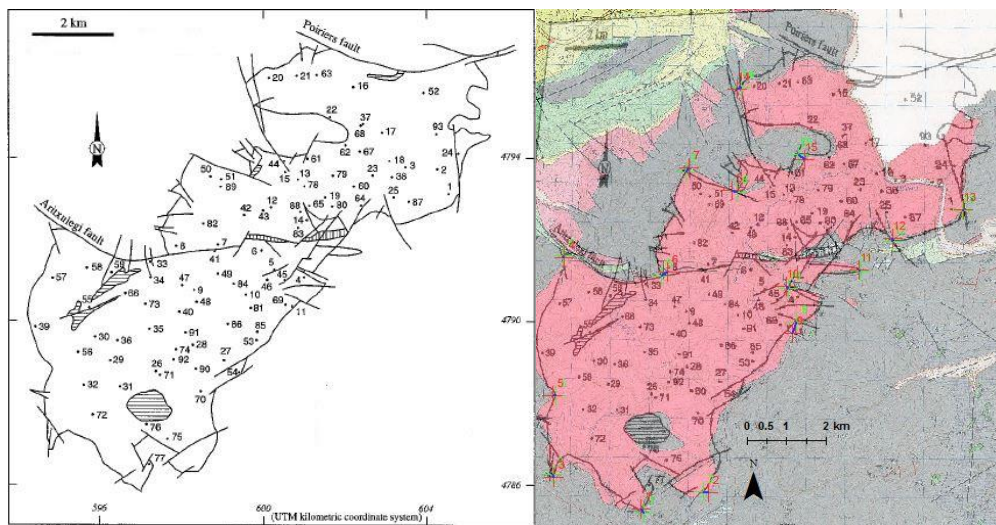
### 5.3. Georreferenciación de los datos

Una vez finalizadas las tareas de extracción y homogeneización de los datos, se ha llevado a cabo el paso de la extracción de la información geográfica. Los pasos que se describen a continuación configuran la digitalización y organización de la información en el software ArcGIS para su posterior representación cartográfica. Básicamente, primero se han generado los archivos individuales (capas *shape*), tanto polígonos (granitos) como puntos (estaciones), y después se han importado en una *geodatabase* de forma que todos los cuerpos mantengan una serie relaciones topológicas que minimicen los posibles errores que se puedan haber generado durante la digitalización de los mismos.

#### Georreferenciación cuerpos

Para la georreferenciación de los cuerpos graníticos se han seguido dos métodos distintos en función de si se encuentran en España o en Francia, debido a la diferente información con la que se contaba para cada uno de los casos.

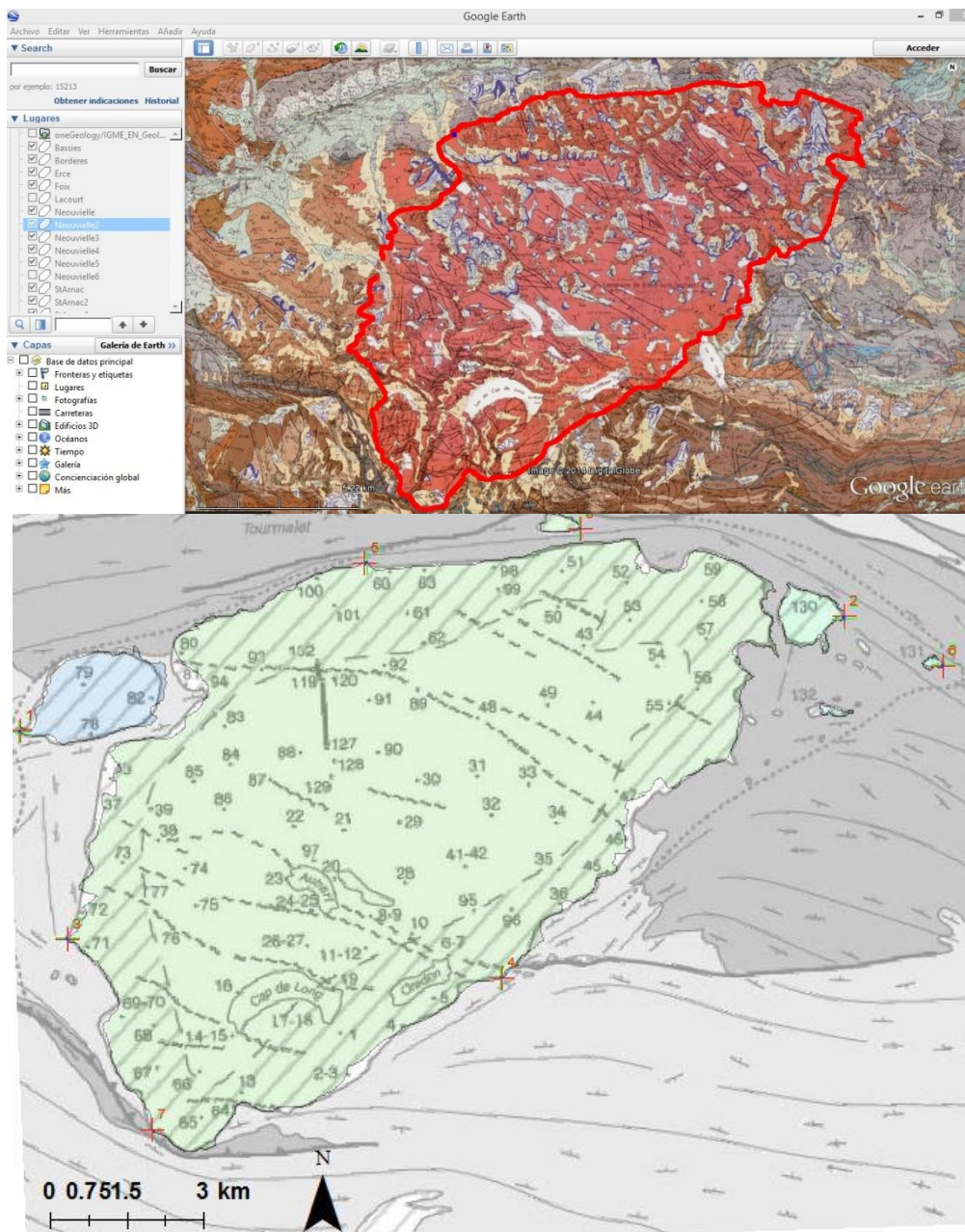
Para los granitos en territorio español se utilizaron, cuando fue posible, las hojas MAGNA 1:50.000, que se han descargado de la página oficial del IGME desde el enlace <http://info.igme.es/cartografia/magna50.asp>), y que se encuentran bajo el sistema de proyección ED1950, por lo que en primer lugar han tenido que transformarse al sistema ETRS89, sobre el que se ha trabajado en todo momento, y al que ya pertenecían el resto de capas utilizadas. Sobre las cartografías originales se ha podido tomar, en mayor o menor medida, puntos de referencia sobre todo en las “esquinas” de los cuerpos, así como otros vértices significativos, de forma que pudieran tener su equivalente en las hojas MAGNA (Figura 13). Además, se ha contado con la ayuda del PNOA en algunos casos, así como con un mapa base a escala 1:400.000 (Barnolas et al., 2008). Los granitos georreferenciados bajo este sistema han sido: Aya, Bielsa, Maladeta, Millares, MontLouis-Andorra y Posets. En la figura 12 se muestra un ejemplo del archivo .jpg georreferenciado ya sobre el terreno.



**Figura 13.** Ejemplo de georreferenciación en territorio español. Granito de Aya: a la izquierda, la cartografía original (Olivier et al., 1999). A la derecha, ya situada sobre la hoja MAGNA (hoja 65, IGME)

Para los granitos sobre superficie francesa el método seguido fue un poco más complejo, tanto por las herramientas utilizadas como por el número de pasos que había que seguir. En este caso, se utilizó una cartografía de detalle 1:50.000 del *Bureau de Recherches Géologiques et Minières* (BRGM u Oficina de Investigaciones Geológicas y Mineras) en formato .kml, que se utilizó sobre la herramienta *Google Earth*.





**Figura 14.** Ejemplo de georreferenciación en territorio francés. Granito de Neuvieille. Arriba, el trazado sobre la herramienta Google Earth. Abajo, la georreferenciación de la cartografía original (Gleizes et al., 2001) sobre el trazado anterior.

Con esta base cartográfica pudo trazarse el perímetro de los cuerpos graníticos con bastante precisión (Figura 14, arriba). Estos trazados se guardaron en formato .kml, cargándolos posteriormente en el software *ArcGIS*. Cabe destacar que *Google Earth* trabaja en WGS84 sobre una proyección cilíndrica, proyección que, a nivel práctico, es prácticamente equivalente al ETRS89 utilizado en la georreferenciación, por lo que no eran necesarias transformaciones posteriores. Es decir, los cuerpos trazados en *Google Earth* aparecían correctamente de forma directa situados en *ArcGIS*. Una vez realizado este paso, el proceso es el mismo que con los granitos en territorio español, esto es, búsqueda de “puntos de referencia” entre las cartografías .jpg y estas capas .kml (Figura 14, abajo).



El proceso de georreferenciación se lleva a cabo en 3 fases: el establecimiento de los puntos de control, el cálculo de las funciones de transformación y la transferencia de los ND originales a la posición corregida, las cuales se explican de forma breve a continuación:

#### Fase 1: Establecimiento de los puntos de control:

Se convierte en la fase más crucial y la que demanda mayor atención, puesto que depende exclusivamente del usuario. La calidad del ajuste dependerá de la precisión con la que se localicen estos puntos, y de cómo definan realmente los errores geométricos de la imagen.

Es necesario atender a tres aspectos en la selección de los puntos de control: el número, la localización y la distribución de los mismos, si bien cada uno se ha tratado con matices para poder aplicarlo a la información disponible:

- En primer lugar, la determinación del número de puntos, que es función del tamaño y de la complejidad de la imagen. Para el caso en el que nos encontramos, se pueden dar los siguientes casos en cuanto al número de puntos mínimos requeridos:
  - 3 para un ajuste de primer grado
  - 6 para un ajuste de segundo grado
  - 10 para un ajuste de tercer grado

En función de si la zona es plana o con relieve acusado, la ecuación a utilizar debe ser más simple o compleja. Al encontrarnos en los Pirineos, se ha establecido una ecuación de segundo grados para todos los casos, y se han escogido un número de puntos que van desde los 7 en el menor de los casos hasta un máximo de 15. La diferencia entre un menor o mayor número de puntos ha dependido, sin embargo, de la mayor disponibilidad para encontrar puntos “fiables”, y no del mayor o menor tamaño del cuerpo granítico, si bien se ha intentado respetar esta relación.

- Un segundo aspecto es que la localización de los puntos debe ser claramente identificable en la imagen y en el documento de referencia y en zonas no sujetas a cambios.

Es este punto el que más complicado resulta de cumplir por razones obvias. Las cartografías de las que se dispone son muy básicas, y resulta imposible encontrar puntos de control de calidad como pudieran ser cruces de carretera, caminos etc. La localización se ha limitado a la búsqueda de “esquinas” o “formas” significativas que pudieran distinguirse tanto en la imagen original como en la georreferenciada.

- Por último, la distribución de los puntos debe ser uniforme sobre todo el territorio de la imagen.

Este punto se ha cumplido teniendo en cuenta que la distribución ha sido lo más uniforme posible siempre en términos de los bordes de los granitos, y no del total de la superficie.

## Fase 2: Cálculo de las funciones de transformación

Estas funciones son las que ponen en relación las coordenadas de la imagen (fila y columna) con las del mapa de referencia (X e Y). Tiene cierta similitud con un análisis de regresión, como se muestra a continuación:

- Análisis de regresión:

Variable independiente  $\rightarrow X$

Variable dependiente  $\rightarrow Y$

Se dispone el valor de ambas variables, medidas en una serie de casos y, a partir de ellos se obtiene una ecuación que permite estimar Y a partir de los nuevos valores de X

- Georreferenciación:

Variables independientes  $\rightarrow$  fila y columna

Variables dependientes  $\rightarrow$  coordenadas de referencia X e Y

Se dispone de valor de ambas variables para una serie de puntos de control y, a partir de ellos, se obtiene una ecuación que permite estimar las coordenadas de referencia X e Y a partir de los restantes valores de fila y columna.

Se trabaja con funciones polinómica, de forma que el orden del polinomio depende de la complejidad de la zona: un polinomio de orden 1 se utilizará para zonas de topografía llana, uno de orden 2 para zonas de topografía compleja y uno de orden 3 para zonas de topografía muy compleja.

En el caso que nos ocupa, se ha utilizado un polinomio de segundo orden, de forma que:

$$X_i = a_0 + a_1f_i + a_2c_i + a_3f_i^2 + a_4c_i^2 + a_5f_i c_i$$

$$Y_i = b_0 + b_1f_i + b_2c_i + b_3f_i^2 + b_4c_i^2 + b_5f_i c_i$$

donde

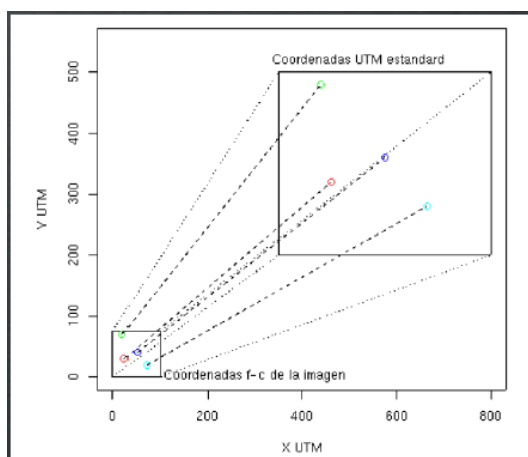
$X_i$  e  $Y_i$  son las coordenadas estimadas X e Y,

f y c son las coordenadas conocidas del fichero,

$a_0 \dots a_n$ ,  $b_0 \dots b_n$  son los coeficientes de regresión

Los coeficientes de regresión se calculan a partir de aplicar un ajuste por mínimos cuadrados. Este método establece que el cuadrado de las diferencias entre los valores calculados y los valores observados (residuos) es mínimo.

Estos coeficientes permiten aplicar la modificación al sistema de coordenadas (Figura 15).



**Figura 15.** Modificación del sistema de coordenadas (Chuvieco, 2008)

La calidad del ajuste general se evalúa a través del error cuadrático medio (Root Mean Squared Error o RMSE), tal que:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 + (x_i - \hat{x})^2}{n}}$$

donde

$y_i, x_i$  son las coordenadas estimadas;

$y, x$  son las coordenadas reales;

$n$  es el número de puntos de control.

Es el usuario el que define previamente la tolerancia del RMSE. En el caso que nos ocupa, al tratarse de mapas sin proyección previa, el error no puede cuantificarse con unidades. La tolerancia escogida ha sido la de 5 unidades de medida. En la tabla 2 se recogen el nº de puntos de control para cada granito, así como el RMSE obtenido:

**Tabla 2.** Relación entre el nº de puntos de referencia y el error obtenido (sin unidades definidas) para cada granito. (Nota: Cauterets-Panticosa se georreferenciaron como un solo cuerpo)

| Nombre                     | Nº puntos | Error  | Nombre                 | Nº puntos | Error  |
|----------------------------|-----------|--------|------------------------|-----------|--------|
| <i>Aston</i>               | 9         | 3.5195 | <i>Lis-Caillaouas</i>  | 10        | 3.7007 |
| <i>Aya</i>                 | 15        | 4.8668 | <i>Maladeta</i>        | 10        | 3.516  |
| <i>Bassies</i>             | 11        | 3.63   | <i>Marimanya</i>       | 7         | 2.0254 |
| <i>Bielsa</i>              | 10        | 2.2151 | <i>Millares</i>        | 10        | 1.065  |
| <i>Borderes</i>            | 10        | 4.1508 | <i>ML-Andorra</i>      | 10        | 3.5666 |
| <i>Cauterets-Panticosa</i> | 8         | 2.0196 | <i>Neouvielle</i>      | 8         | 0.9016 |
| <i>Eaux Chades</i>         | 10        | 0.7687 | <i>Posets</i>          | 8         | 3.1023 |
| <i>Erce</i>                | 10        | 1.6677 | <i>Querigut</i>        | 10        | 4.6654 |
| <i>Foix (Arize)</i>        | 10        | 3.7587 | <i>St Arnac</i>        | 14        | 4.3911 |
| <i>Lacourt</i>             | 10        | 4.7548 | <i>Trois-Seignerus</i> | 9         | 3.5431 |

Si bien en ninguno de los casos se ha sobrepasado el límite definido de 5 unidades, suele ser recomendable aplicar algún proceso de validación posterior que pueda contrastar los resultados para comprobar que el proceso de georreferenciación ha sido óptimo. El método más habitual de validación suele ser mediante la toma de una serie de puntos de verificación, los cuales el usuario los considera lo suficientemente fiables como para tener dicha función. Estos puntos no se utilizan en el cálculo de la ecuación de ajuste y permiten estimar el RMSE real del proceso. Esto es así porque evita el posible sesgo de una incorrecta distribución de los puntos de control, ya que no evalúa el error sobre ellos si no sobre la muestra de puntos de verificación independientes de los anteriores.

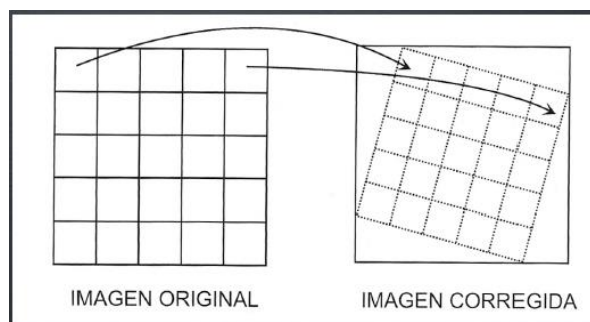
Sin embargo, si hay algo que caracteriza todo el proceso seguido hasta ahora, es que la toma de puntos de las imágenes originales con respecto a los puntos de los mapas georreferenciados no se ha podido realizar con la precisión que hubiéramos deseado. Por esto, la búsqueda de unos puntos de verificación que validen el proceso carece de sentido, ya que dichos puntos serían igual de (poco) fiables que el resto, cuando lo habitual es que sean puntos con precisión contrastada (por ejemplo, tomados con GPS en el campo).

Por tanto, lo que se ha llevado a cabo ha sido una validación visual, con la que se ha comprobado que el ajuste entre la cartografía original y la de referencia fueran lo más precisas posibles.

### Fase 3: Transferencia de los ND originales a la posición corregida

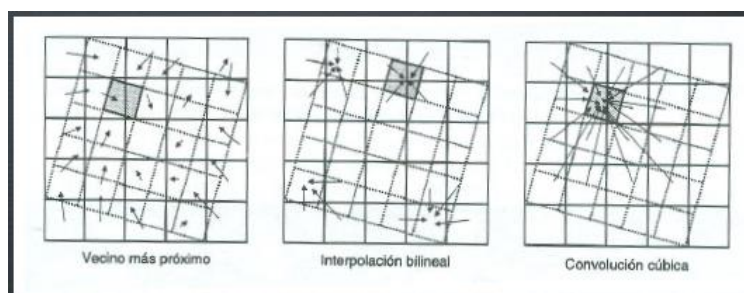
Las funciones de transformación crean una matriz posicionada correctamente, pero vacía. Suponen solo un trasvase de coordenadas, pero no de ND. Esta tercera fase consiste precisamente en el “llenado” de esta matriz, en transferir los ND de a imagen original a la nueva matriz correctamente posicionada.

La situación ideal correspondería a que cada píxel de la imagen corregida tuviera su correspondiente píxel de la imagen original (Figura 16):



**Figura 16.** Hipotética situación ideal en la transferencia de píxeles (Chuvieco, 2008)

Sin embargo, la situación real nos lleva a que cada píxel de la nueva imagen se sitúa entre varios de la original, lo que nos ofrece 3 métodos distintos de transferir los ND (Figura 17):



**Figura 17.** Métodos de transferencia de ND para situaciones “reales” (Chuvieco, 2008)

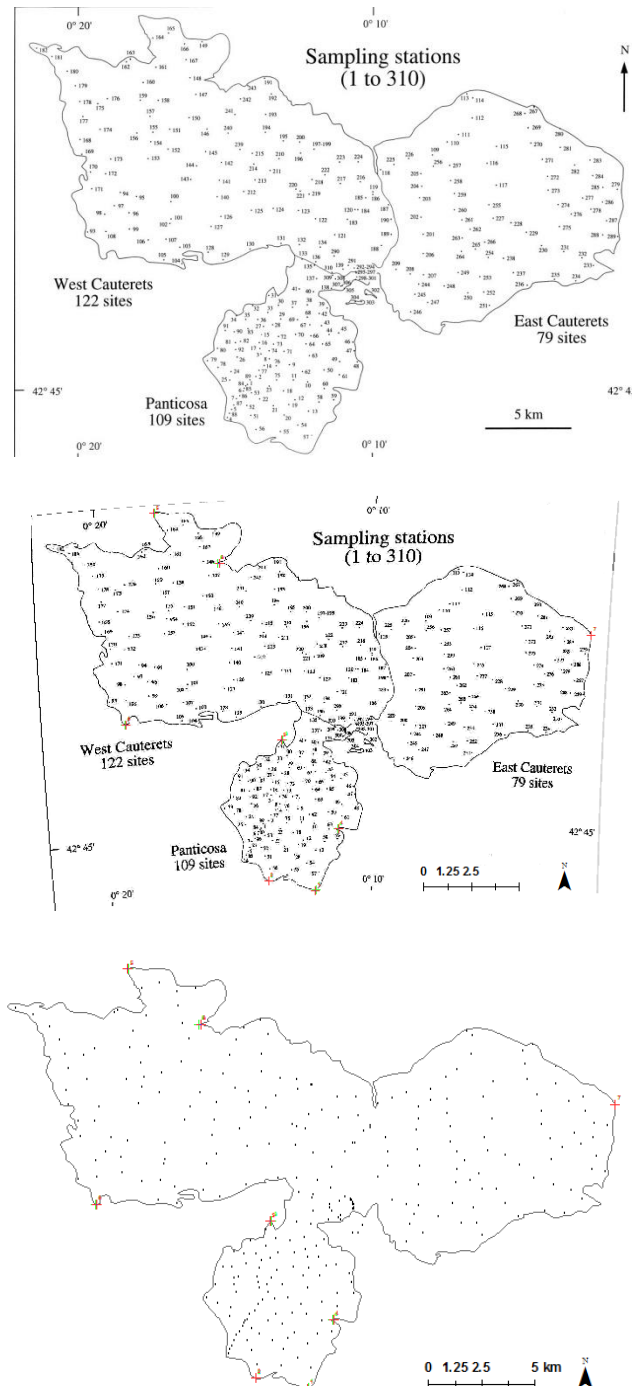
Los detalles de cada método pueden consultarse en Chuvieco (2008). Aquí resaltaremos que el método escogido ha sido el del vecino más próximo, puesto que es el método más simple y rápido, y cabe recordar que las imágenes que se están georreferenciando no son imágenes de satélite en las que todos los píxeles tengan valores concretos, sino que solo el contorno de los granitos es la zona de interés a georreferenciar.

Tras completar la georreferenciación de cada granito, el paso siguiente ha consistido en la creación de la capa *shape* de tipo polígono, y la posterior edición de la misma, trazando el nuevo polígono exactamente sobre el mapa georreferenciado. En total, se han generado 21 capas de polígonos individuales.

Por último, de cara a las cartografías generales que representarán valores medios, todos los granitos se han unido en una sola capa, para facilitar su uso en las cartografías generales.

## Georreferenciación estaciones

Una vez georreferenciadas las superficies, el siguiente paso ha consistido en la digitalización de los *sites* o estaciones de medida. En total se han generado 2223 puntos, a partir de los siguientes pasos: una vez georreferenciada cada cartografía de las publicaciones, se genera una nueva capa de puntos sobre la misma, y se van marcando una a una todas las estaciones (Figura 18), teniendo en cuenta, que la generación de puntos debe hacerse siguiendo la numeración original de los mapas, de forma que después, al relacionar cada capa de puntos con su tabla de información, cada fila con los datos de los parámetros concordase con el punto en cuestión



**Figura 18.** Sucesión de pasos para el granito Caunterets-Panticosa. Arriba, la cartografía original (Gleizes et al., 1998) En medio, la cartografía georreferenciada. Abajo, las dos capas generadas a partir de la georreferenciación.

A las tablas de atributos generadas para cada capa de puntos se les incorporó los campos X e Y, y mediante la herramienta “*field calculator*”, se les asignó las coordenadas correspondientes.

### Unión de las tablas de información con las capas

Una vez digitalizada la información numérica y georreferenciadas tanto los granitos como las estaciones de medida, se ha procedido a relacionar ambos tipos de información. Para ello, cada capa de estaciones debía unirse con su tabla correspondiente. En algunos casos, la numeración de las estaciones tenía lagunas, por lo que no podía relacionarse directamente el número de estación con su posición en la tabla de atributos. Por ello, se decidió incorporar un nuevo campo a cada tabla, llamado ID, este sí es totalmente continuo, así como uno con el mismo nombre a cada capa, de forma que este campo fuera el nexo de unión entre capa y tabla.

### Creación de la *geodatabase*

Por último, de cara a una organización óptima de los datos, y a establecer relaciones geométricas entre los mismos, toda la información se ha almacenado en una *geodatabase*, que consta de los siguientes elementos:

- 21 capas de polígonos, correspondientes a cada uno de los granitos
- 21 capas de puntos, cada una con su tabla de atributos correspondiente extraída de las publicaciones
- Las 42 capas anteriores se han importado desde un *feature dataset* con el objetivo de poder fijar relaciones geométricas entre ellas. Para ello se ha generado una *topología* según la cual:
  - los puntos deben estar siempre dentro de los polígonos, y así evitar posibles errores en la situación de las estaciones.
  - además los polígonos no pueden coincidir en el espacio
- Capa de Europa para el mapa auxiliar
- Capa de unidades geológicas a escala 1:400.000 como referencia
- Mapa georreferenciado de Barnolas et al, 2008.
- Capa de la Zona Axial para el mapa auxiliar

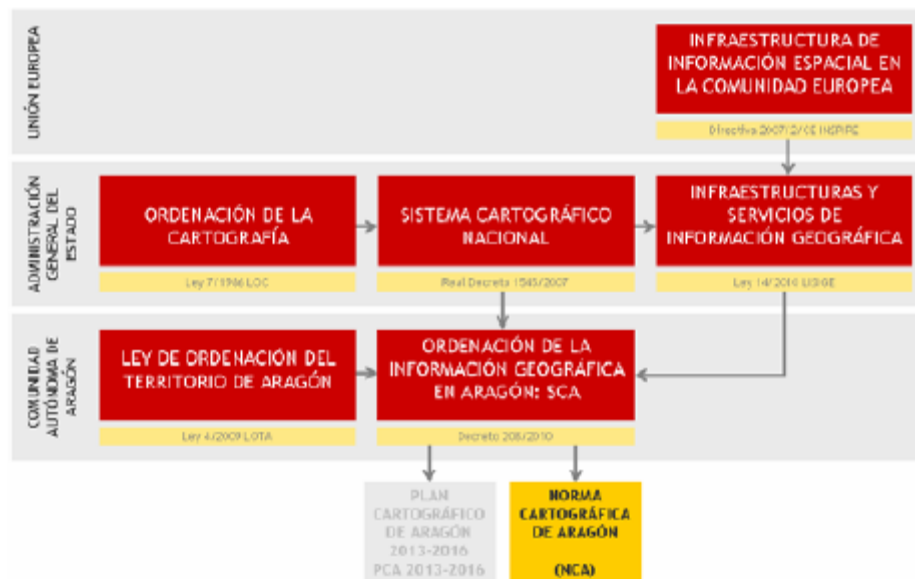
## 5.4. Generación de las cartografías

Con toda la información perfectamente organizada y georreferenciada, el último paso ha consistido en la generación de las distintas cartografías que se habían propuesto en los objetivos iniciales del proyecto. Éstas consisten en el diseño de 3 mapas generales del Pirineo, en los que se reflejen respectivamente la susceptibilidad media de cada granito, su foliación y su lineación.

A estos 3 mapas generales se les unen un total de 21 fichas, una por cada granito, compuestas cada una por 3 mapas sencillos en los que se representan las mismas 3 variables, esta vez acompañadas de las estaciones de medida.

### 5.4.1. La Norma Cartográfica de Aragón

La Norma Cartográfica de Aragón, a efectos legales, se constituye como un componente dentro del Sistema Cartográfico de Aragón (SCA), y se incluye en un conjunto de normas de ámbito autonómico, nacional y europeo, en lo que se refiere a la gestión de la Información Geográfica tal como se muestra en la figura 19:



**Figura 19:** Marco legal en el que se enmarca la NCA (elaboración: CINTA)

Esta norma se ha diseñado con el objeto de gestionar toda la información geográfica generada por la Administración, ya sea básica (cartografía, topográfica, ortofotos etc.), temática (agricultura, medioambiente etc) o derivada.

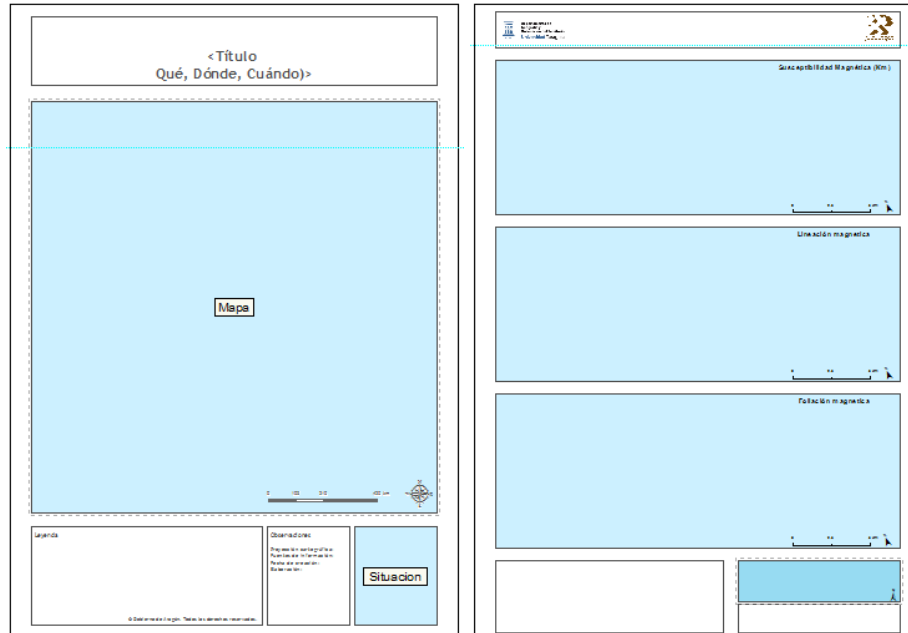
La NCA no establece ni impone un modelo de datos único para la elaboración de información geográfica, sino que establece las directrices para seguir los modelos de datos previamente establecidos por las especificaciones técnicas previas existentes y las publica para su conocimiento legal por parte de todos los actores (Organismos, Institutos, Entidades...)

En el caso que nos ocupa, se han tenido en cuenta principalmente dos puntos importantes de la NCA, como son los metadatos (al que se le dedica el apartado 5.5) y la presentación cartográfica, ambos directamente relacionados con el contenido del Máster del que este trabajo forma parte, y explicados a continuación.

En la NCA se han desarrollado plantillas para facilitar el trabajo a la hora de confeccionar tanto mapas como informes territoriales, que se han empleado en el presente trabajo. En concreto, las fichas individuales están diseñadas en formato DIN A3 vertical, mientras que los 3 mapas generales se han generado en formato DIN A2 apaisado.

#### 5.4.2. Diseño de las fichas individuales

A pesar de seguir las pautas de la NCA, ha sido necesario modificar ligeramente el diseño de las plantillas originales, de forma que, para cada granito, se puedan representar las 3 variables en un mismo documento DIN A3. Para ello, se ha dividido la hoja de forma que se muestren tres mapas. En el primero (arriba) se muestra la *susceptibilidad magnética*, en el segundo la *lineación magnética*, y en el tercero la *foliación magnética* (Figura 20). Por supuesto, en la parte superior del documento aparece el título del mismo, y en la inferior aparecen elementos como la leyenda o el mapa auxiliar.



**Figura 20.** Plantilla original de la NCA para cartografías, en tamaño A3 vertical (izquierda), junto a una adaptación de la misma para las fichas individuales

Para cada una de estas tres variables, se ha trabajado una simbología distinta, acorde con la que se usa habitualmente en este campo, y en el caso de Km se ha tenido que realizar una preparación previa a la representación como se detallará a continuación. Además, se han añadido una serie de gráficos e histogramas que suelen ser habituales en las publicaciones sobre AMS, y que aunque no están relacionados directamente con los contenidos del Máster y por ello no se profundiza en su elaboración en la presente memoria, sí deben ser incluidos igualmente en las cartografías.

#### *Susceptibilidad magnética*

Como variable continua que es, los datos de los que se dispone de la susceptibilidad magnética para cada granito se han interpolado, de forma que la representación cubra toda la superficie y no solo se representen en los puntos en los que se encuentran las estaciones de medida. Si bien algunos autores realizaron las cartografías de isoclinas de sus publicaciones prácticamente “a mano”, simplemente trazando estas isoclinas a partir de los valores de cada estación (siguiendo criterios geológicos difícilmente implementables en los métodos de interpolación habituales), algunos otros sí que emplearon métodos geoestadísticos, como por ejemplo Gleizes et al. (1992), que al tratarse además del autor tal vez más importante en este campo, se ha utilizado como referencia para la generación de las cartografías en este trabajo.

Los métodos geoestadísticos, que podríamos agrupar bajo la denominación genérica de *kriging*, han experimentado un notable avance en los últimos años, gracias al desarrollo de los SIG y su potencialidad de cálculo. Se trata de métodos de interpolación complejos desde un punto de vista matemático, que si por algo vienen definidos es porque tratan de integrar en su proceso de cálculo aspectos relacionados con la variabilidad espacial de los datos.



Tratando de describir estos métodos de forma sencilla, podríamos decir que, al igual que en otros casos de métodos de interpolación, la estimación de un valor en un punto se realizará a partir del valor de los puntos de observación vecinos, pero los pesos de ponderación se basarán no solo en la distancia entre esos puntos, sino también en la relación espacial que se establece en el valor de estos puntos.

No entraremos en cómo es el proceso de cálculo, sino que simplemente destacaremos que, dentro de los diversos tipos de krigging (ordinario, simple, universal...), la elección de un tipo u otro vendrá dada por parámetros finales y estadísticos de error que se dan en las cartografías finales, y para las que el ordinario ha sido el que ha ofrecido los mejores resultados.

Con respecto a la simbología empleada, no ha sido posible encontrar referencias en cuanto a simbología en color, puesto que la totalidad de la información empleada y consultada contaba con cartografías en blanco y negro. Con el fin de obtener unos mapas más “vivos” se ha decidido obviar estos precedentes y se la ha otorgado una gama de verdes que, sin llamar mucho la atención (es decir, manteniendo esa “sobriedad” de publicaciones antiguas), da un aspecto sencillo y a su vez permite una interpretación rápida de los datos.

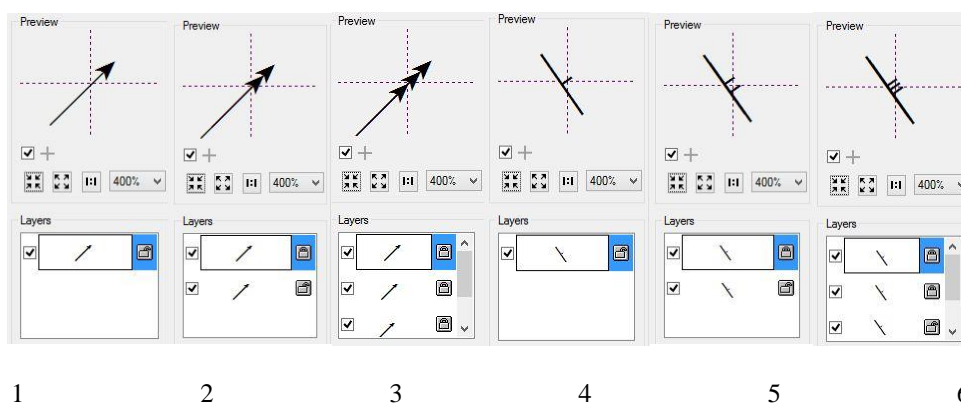
Por su parte, las estaciones aparecen acompañadas de su número de estación. De esta forma, en el anexo de esta memoria se ha añadido la tabla correspondiente a cada granito, donde se pueden consultar qué datos corresponden a cada estación.

Por último, se ha añadido el histograma en el que se reflejan el número de estaciones con respecto al valor de susceptibilidad magnética de cada una de ellas, expresado en barras cada  $50 \times 10^{-6}$  S.I. En cada histograma aparecen indicados el nº de estaciones presentes.

### *Lineación magnética y Foliación magnética*

Para la representación de estas dos variables se ha escogido la simbología de Román et al. (1995, 2006), que resulta clara y fácil de leer, con la que trabaja el grupo de la Universidad de Zaragoza “Geotransfer”.

En ambos casos se ha utilizado el editor de símbolos de ArcGIS. En primer lugar se ha cargado la biblioteca de símbolos de carácter geológico, y se han escogido los apropiados tanto para la foliación como para la lineación. A continuación, sabiendo que se iba a trabajar con tres niveles para cada variable, se han editado de forma simple pero efectiva, esto es, duplicando y triplicando en cada caso el símbolo, de forma que se adaptaran a esa simbología de referencia (figura 21).



**Figura 21.** Generación de los símbolos de lineación (1 – entre 0 y 30° de inmersión -, 2 – entre 30° y 60° -, 3 – entre 60 y 90°) y foliación (4, 5, 6) a partir de símbolos originales (1, 4)

Para la representación sobre el papel, los símbolos están orientados en función del valor del azimut de K1 (lineaciones magnéticas) o de la dirección de la foliación (plano cuya normal es K3), contando, obviamente, desde el Norte geográfico como es habitual en geología. Hay que tener en cuenta que muchas de las cartografías se han girado para optimizar la geometría del cuerpo granítico al espacio de representación, dato que hay que tener en cuenta para conocer la dirección de K1 y K3 en cada esta-

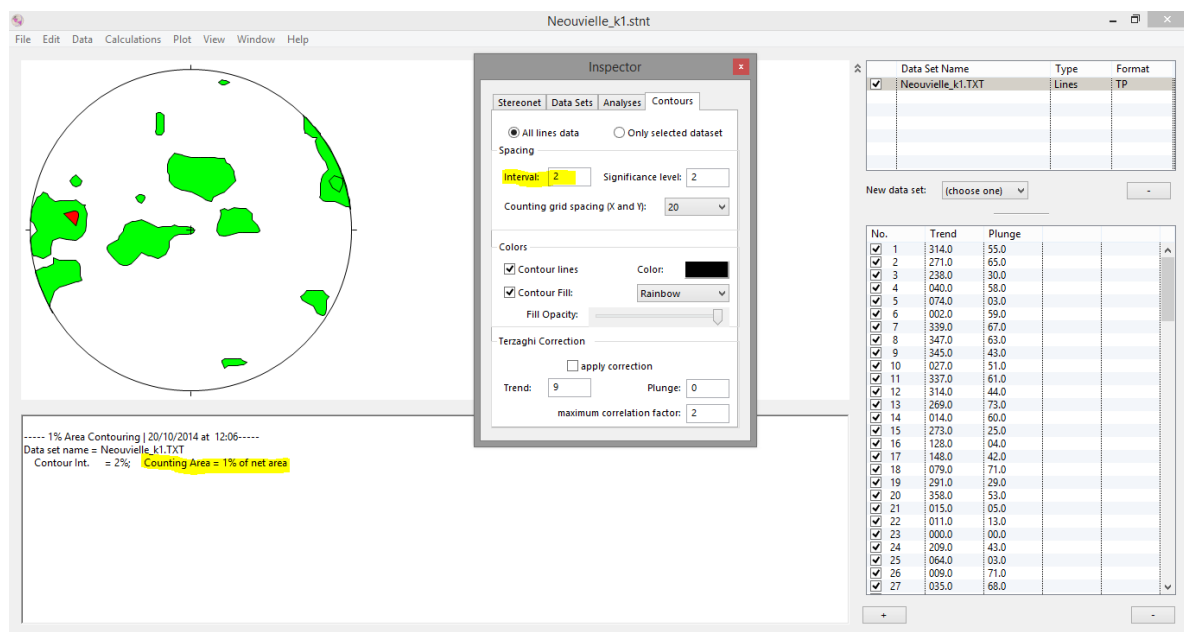
ción (no hay que dar por sentado que el Norte “apunta” hacia arriba). Por otra parte, aunque en algunas publicaciones aparecen, junto a cada símbolo, los valores de buzamiento o inclinación, en este caso se ha decidido obviar por dos motivos: el primero tiene que ver con la claridad de las cartografías, que en muchos de los granitos (los que tienen más densidad de estaciones) iban a quedar demasiado “saturadas” de información; el segundo, que al añadir las tablas con los datos al final, y tener en el mapa superior el nº de cada estación, es rápido y sencillo consultar que nº de estación es cada una y ver, si interesa, los valores numéricos correspondientes a cada una.

Por último, como en caso de la susceptibilidad magnética, en la que se han añadido los histogramas, para los mapas de lineaciones y foliaciones magnéticas se han añadido las proyecciones estereográficas que resumen la información, y que suelen ser también un elemento habitual de las publicaciones en este campo.

Para ello, se ha utilizado el software Stereonet (Richard W.Allmendinger, ©2011-2014), cuya versión para Windows tiene algunas limitaciones en lo que se refiere a la representación de los datos (Figura 21). Los parámetros establecidos para la representación son los siguientes (ver “NOTA” en las leyendas de los mapas generales):

Intervalo de contornos:  $\underline{2}$  → Esto indica una desviación estándar del 2% a la hora de representar los valores. Valores más altos implicarían círculos más grandes puesto que abarcarían más datos.

Tipo de representación: 1% área → Esto implica que, independientemente del número de estaciones (datos), el área que se genera es el 1% del total. Con el método alternativo (Kamb), estos círculos sí que variarían en función del nº de datos introducidos.



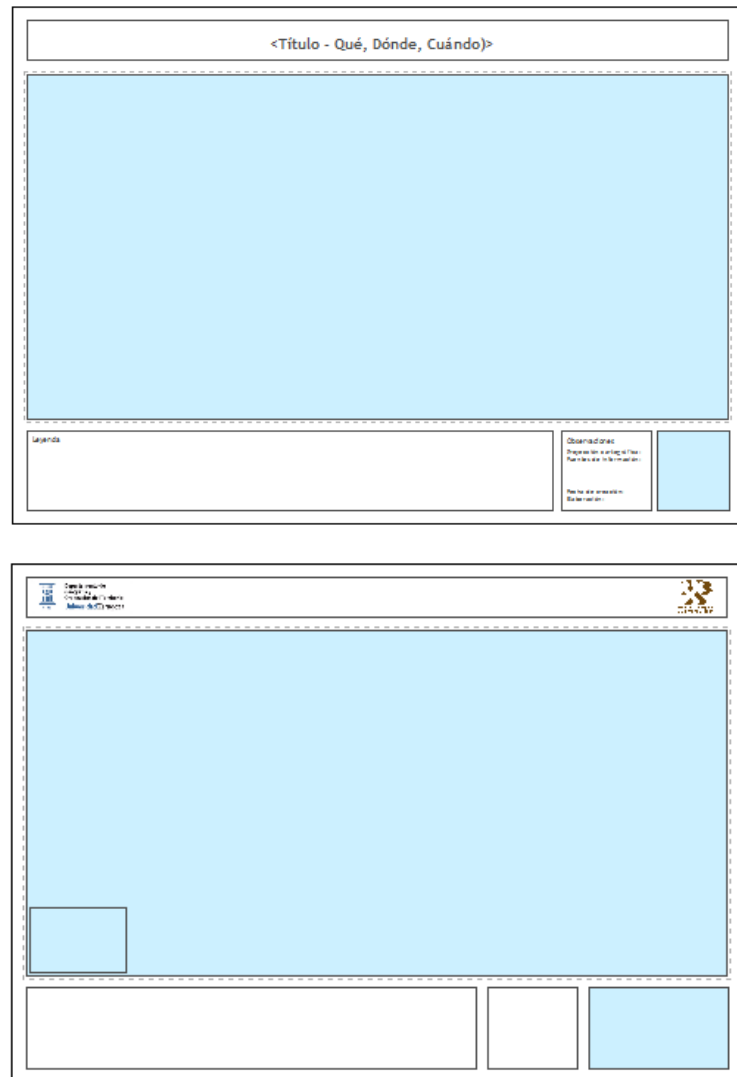
**Figura 21.** Pantalla principal de Stereonet, con el menú de opciones en el centro. En amarillo resaltado las opciones de intervalo y tipo de representación.

Con respecto a las gamas de colores utilizadas en estos gráficos, como ya se ha comentado, el programa no da opción a personalizarlas, ni permite extraer una leyenda, por lo que la lectura que se puede hacer, aunque es intuitiva y permite una interpretación somera de los datos, no es la más adecuada para una interpretación a fondo de los mismos. También conviene recordar que no es el objetivo del trabajo, por lo que los gráficos presentados son suficientes.

### 5.4.3. Diseño de los mapas generales

Para la generación de los mapas generales, a tamaño DIN A2, se ha utilizado toda la información recogida en las fichas individuales, y se ha distribuido en tres cartografías, una por cada variable trabajada (Km, F, L)

De nuevo se ha trabajado sobre una plantilla diseñada bajo la NCA, que se ha alterado ligeramente para incluir correctamente el mapa auxiliar (Figura 22) así como un pequeño recuadro en la parte inferior izquierda del marco principal, y que corresponde a la zona del plutón de Aya, y que se explicará a continuación. El diseño de todos mapas es el mismo, por lo que entre ellos tan solo cambia la información representada.



**Figura 22.** Plantilla original de la NCA para cartografías, en tamaño A2 horizontal (arriba), y debajo su adaptación para los mapas generales.

Por ello, en primer lugar se van a comentar aspectos generales que engloban a los tres mapas, y después se comentarán brevemente aspectos relativos a la simbología de los mismos, que prácticamente coinciden con los explicados en el capítulo sobre las fichas individuales.

## Aspectos generales:

*Problema “Aya”:* La totalidad de los plutones representados se encuentran distribuidos a lo largo del Pirineo de forma relativamente homogénea, excepto el plutón de Aya, que se encuentra ubicado en los Macizos Vascos, en el sector más occidental. Este hecho dificultaba a la hora de mostrar todos los plutones en un mismo espacio, ya que se debía trabajar a una escala demasiado grande que no iba a permitir observar en detalle la simbología. Por ello, se decidió acortar esa escala y abarcar en el mapa principal todos los plutones “agrupados” excepto el de Aya, al cual se le dedicó un cuadrante propio (al modo Islas Canarias), en el sector suroeste del mapa (Figura 22, abajo). Para tratar de evitar que el lector pueda malinterpretar esta ubicación, se trabajó en dos aspectos: el primero y más obvio, señalar en el mapa auxiliar convenientemente cada uno de los dos sectores representados, tanto el mapa principal (el más grande que abarca nuestros veinte plutones) como este segundo mapa solo para de Aya; y en segundo lugar, que el propio cuadrante de Aya se ha diseñado de forma que aparezca representado el Mar Cantábrico. Este detalle permite apreciar de un solo vistazo que ese plutón no está en “su sitio”, sino que se trata de una pequeña licencia para poder apreciar con mayor detalle el resto del mapa. Además, la escala y la orientación de ambos mapas es la misma, por lo que el tamaño del plutón de Aya tiene la misma relación con la realidad que el resto del mapa principal.

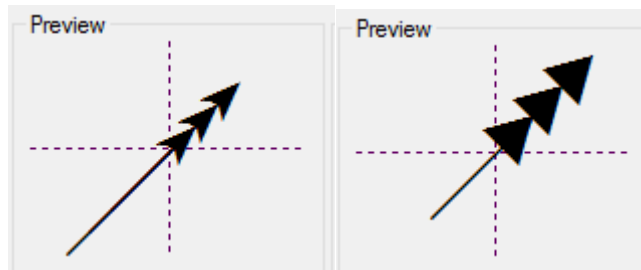
*Mapa base:* Con el objetivo de dotar a las cartografías de una información más completa, que no sólo se ciña a los aspectos geofísicos de los granitos, sino que también recoja (de forma simplificada) las diferentes unidades de la cordillera pirenaica, se ha recurrido a la cartografía de Barnolas et al., (2008). Sin embargo, con el fin de que la visualización de estas unidades no pesara demasiado con respecto a la información que realmente se quiere transmitir, esta cartografía se ha modificado con un retoque a partir de la herramienta de transparencia, que, permitiendo distinguir su contenido, lo mantiene en un segundo nivel sin que interfiera en la información principal. Tanto en la leyenda como en el espacio dedicado a la información del mapa se hace referencia a este hecho, quedando reflejado que se trata de una cartografía realizada previamente por otros autores.

*Información adicional:* Por último, y del mismo modo que en las fichas individuales, cada plutón se ha representado junto a su histograma de valores de Km y representación estereográfica de K1 y K3. Este ha sido un punto delicado, puesto que ya de por sí se trataba de un mapa con mucho contenido informativo, y añadir otros 21 gráficos a cada una de las cartografías podía saturar en exceso el contenido de información para el lector. Sin embargo, al tratarse de un mapa de grandes dimensiones, y al repartir de forma homogénea todos estos gráficos, finalmente se ha considerado oportuno añadir dicha información adicional.

## Simbologías:

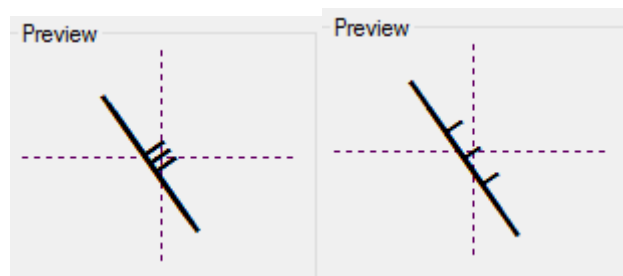
Las simbologías empleadas para cada uno de los tres mapas generales coinciden con las utilizadas en las fichas individuales, ya que la información que se representa es la misma, con la única diferencia de la escala que se emplea.

Sin embargo, al realizar las primeras pruebas de impresión se apreció un problema importante: las simbologías de la lineación y de la foliación magnética (K1 y K3 respectivamente) utilizadas en las fichas individuales (Figura 21 del apartado anterior) no se distinguían con claridad. Por ello se debió recurrir a una modificación de la simbología original, recurriendo de nuevo al editor de ArcGIS. En el caso de la lineación, los símbolos empleados (flechas) dejaban, en algunos casos, dificultad para distinguir la dirección en la que señalaban. Esto se ha solventado en la medida de lo posible añadiendo unas nuevas “puntas de flecha”, más grandes que, sin incrementar el tamaño total del símbolo, sí que permiten una mejor apreciación de hacia dónde marcan (Figura 23).



**Figura 23.** Diferencia de los símbolos de lineación entre las fichas individuales (izquierda) y los mapas generales (derecha)

En el caso de la foliación, los símbolos también se modificaron ligeramente (Figura 24), en este caso no de forma tan llamativa como en el anterior, sino que simplemente se modificaron de forma que las líneas del lado de buzamiento estuvieran más separadas para tener una mejor apreciación de las mismas, puesto que si no, al tener un tamaño tan pequeño, era casi imperceptible distinguir si había una, dos o tres.



**Figura 24.** Diferencia de los símbolos de foliación entre las fichas individuales (izquierda) y los mapas generales (derecha)

Por su parte, la susceptibilidad magnética se ha representado en la misma gama de colores, que ahora, al estar en un contexto global, denota las diferencias existentes ya no solo dentro de cada plutón, sino también entre distintos cuerpos. En este caso, no se han incluido las ubicaciones de las estaciones, puesto que ocuparían una parte demasiado grande la superficie, dificultando la lectura del mapa.

## 5.5. Generación de metadatos

Los metadatos son un conjunto estructurado de descriptores de un recurso, el cual puede ser un dato, un servicio... Constituyen el mecanismo para caracterizar los datos y aplicaciones, lo que posibilita que otras aplicaciones puedan hacer uso de dichos datos o invocar sus servicios. Básicamente, describen el contenido, calidad, condición y otras características de los datos. En el caso que nos ocupa, hablaríamos de metadatos geográficos como los que describen datos geográficos o geoespaciales.

Los principales usos (beneficios) de los metadatos son:

Organizar y mantener la inversión de una organización en datos; esto es no depender de la disponibilidad de quién los construyó

Proporcionar información para catálogos de datos geográficos; esto conlleva evitar esfuerzos por duplicado asegurando que una organización esté enterada de su existencia; también posibilita una localización de los datos disponibles relevantes para su trabajo etc

Proporcionar información para la transferencia de los datos, facilitando su visualización y su acceso.

En relación con la NCA, el Metadato es el germen de la Infraestructura de Datos Espaciales, y como tal, en la Norma se detallan los flujos de trabajo que hay que tener en cuenta para poder catalogar la información geográfica. La regla básica es que cualquiera sistema informático pueda descubrirla, encontrarla o explotarla al estar catalogada bajo norma de catalogación ISO 19115 en el caso de unidades o productos cartográficos (que es el caso que nos ocupa) e ISO 19119 en el caso de servicios geográficos. Además, en el caso de las herramientas de catalogación, existen una serie de funcionalidades que deben cumplir, como son:

- Posibilidad de creación, edición y modificación de metadatos
- Verificación de condicionalidad y ocurrencia de los elementos de metadatos
- Exportación de los metadatos creados a XML según los formatos estipulados por ISO, FGDC y Dublin Core
- Importación de metadatos almacenados en ficheros XML según los formatos anteriores
- Presentación de resultados en formatos legibles (HTML o texto con etiquetas)

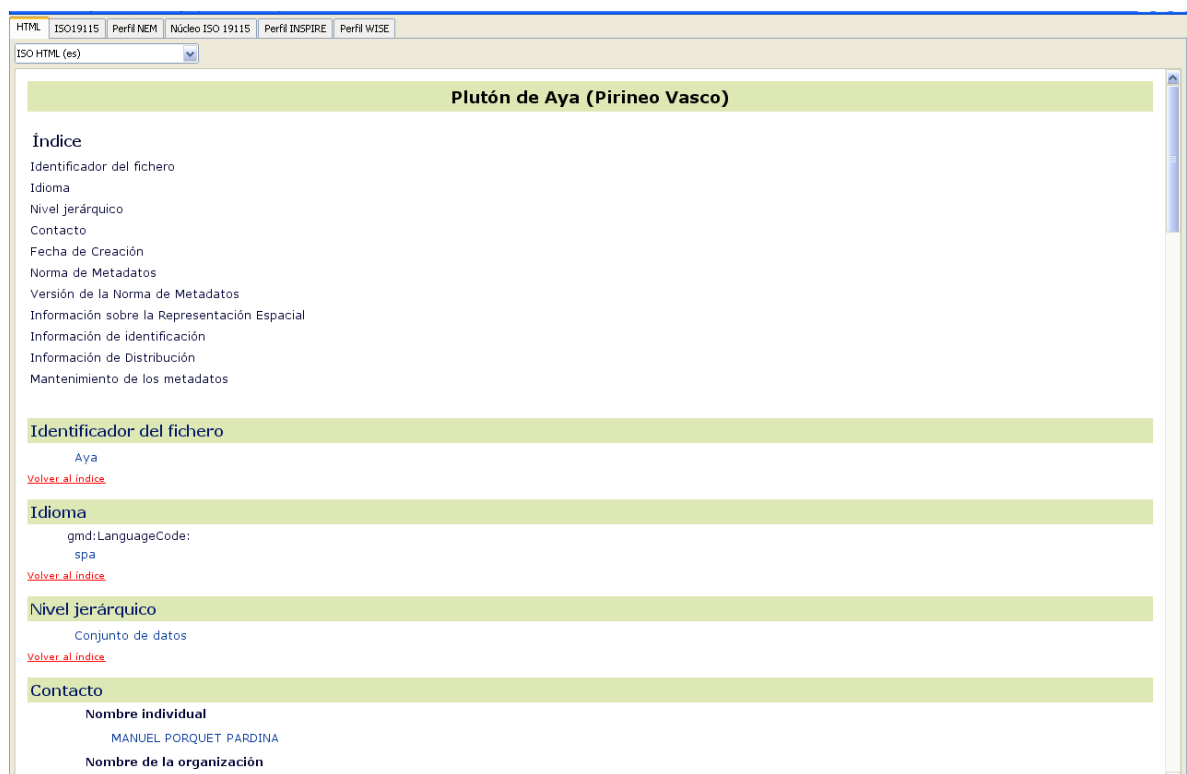
Así pues, se han elaborado hasta 21 archivos de metadatos, uno por cada capa de estaciones, que al fin y al cabo son las que contienen toda la información digitalizada (las capas de polígonos no cuentan con más información que la superficie de cada cuerpo). El software empleado, CatMDEdit (<http://catmdedit.sourceforge.net>), es una herramienta *open source* que presenta las siguientes características:

- Distribuidor
- IDEE
- Grupo de Sistemas de Información Avanzados (IAAA), Universidad de Zaragoza
- GeoSpatiumLab
- Descripción
- Herramienta Open Source multiplataforma y multilingüe
- Funcionalidad

- Definición y gestión de repositorios
- Edición de metadatos para distintos estándares y perfiles
- Herramientas para facilitar la edición de metadatos
- Ayuda en línea
- Agenda de contactos, repositorio de tesauros
- Selección de extensión geográfica
- Generación automática de metadatos
- Intercambio e metadatos según distintos formatos
- Presentación de metadatos según distintos estilos
- Conexión con aplicaciones de gestión de datos

Conforme se generaban las nuevas capas shp, tanto los polígonos como los puntos, aparecían archivos de metadatos asociados a cada uno de esos archivos .shp. Sin embargo, estos metadatos aparecidos por defecto no cuentan con apenas información relevante, por lo que, a partir del CatMDEdit se han generado unos totalmente nuevos que sí recojan esta información indispensable (identificación del fichero, contacto, fecha de creación, información de identificación...)

A continuación, se muestra un ejemplo del proceso seguido durante la edición de uno de estos archivos de metadatos, en este caso, el correspondiente al plutón de Aya, para lo cual se han efectuado varias capturas de pantalla que muestran los detalles del metadato en formato HTML para una lectura más cómoda (Figura 25) :



**Nombre del cargo**

BECARIO

**Información de contacto**

Teléfono

Voz

976555282

Dirección

Punto de entrega

CALLE MANUEL LASALA 44 - 9ºB

Ciudad

ZARAGOZA

Código postal

50006

Country

ESPAÑA

**Rol**

Creador

[Volver al índice](#)

**Fecha de Creación**

2014-09-30

[Volver al índice](#)

**Norma de Metadatos**

ISO 19115

[Volver al índice](#)

**Versión de la Norma de Metadatos**

ISO19115:2003/Cor 1 2006

[Volver al índice](#)

**Información sobre la Representación Espacial**

**Objetos geométricos**

Tipo de Objeto Geométrico

Superficie

[Volver al índice](#)

**Información de identificación**

**Mención**

Título

Plutón de Aya (Pirineo Vasco)

Fecha

Fecha

2014-09-30

Tipo de Fecha

creation

**Resumen**

Georreferenciación del Plutón granítico de Aya, como parte del Trabajo Final del "Máster Universitario en Tecnologías de la Información para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección"

**Descripción de Palabras Clave**

Palabra clave

CIENCIA

Palabra clave

CIENCIAS DE LA TIERRA

Palabra clave

GEOFÍSICA

Palabra clave

GEOMAGNETISMO

Tipo

theme

Nombre del Tesauro

Título



Tesouro de la UNESCO

Fecha  
2005-11-15  
Tipo de Fecha  
publication

**Constricciones sobre el recurso**

Limitación de Uso  
No existen limitaciones de uso.

Constricciones de otro tipo  
Debe tenerse en cuenta que el presente geodataset ha sido creado con la finalidad de servir como cobertura de base en los trabajos relacionados con la Anisotropía de la Susceptibilidad Magnética. El Instituto Geológico y Minero de España, así como los autores originales de cada uno de los trabajos, agradecen a todos los usuarios de nuestras coberturas por favor se sirvan citar la fuente de procedencia de la información gráfica en sus trabajos

**Idioma**  
gmd:LanguageCode:  
spa

**Categorías de Temas**  
Información geocientífica

**Extensión**

Descripción  
Georreferenciación según el Sistema de Referencia Terrestre Europeo (ETRS 89)

Elemento geográfico

Límite de longitud Oeste  
-1.85175936

Límite de longitud Este  
-1.67801599

Límite de latitud Sur  
43.20493455

Límite de latitud Norte  
43.32402948

[Volver al índice](#)

---

**Información de Distribución**

**Formato de distribución**

Nombre  
SHP - ArcView ShapeFile

Versión  
ArcGIS 10.2

**Formato de distribución**

Nombre  
ARCG - ARC/INFO Generate format

Versión  
10.2

**Formato de distribución**

Nombre  
DBF - dBase File

Versión  
10.2

[Volver al índice](#)

---

**Mantenimiento de los metadatos**

**Frecuencia de mantenimiento y actualización**  
Irregular

[Volver al índice](#)

**Figura 25.** Ejemplo del metadato creado para el plutón de Aya mediante el software CatMDEdit

## **6. RESULTADOS**

### **6.1 Mapas generales**

Los 3 mapas en formato A2, debido a su gran tamaño, se encuentran adjuntos al final de esta memoria. En ellos se encuentra reflejada toda la información detallada en los apartados anteriores.

### **6.2 Fichas individuales y base de datos**

A continuación se muestran, por orden alfabético, las cartografías individuales de cada uno de los granitos, obtenidas a partir de los datos trabajados y explicados con anterioridad.

A cada ficha le sigue su tabla de datos correspondiente, que consta de la información básica (Nombre, Coordenadas de las estaciones, numeración y variables medidas en el campo).

## 7. CONCLUSIONES

La presente memoria es fruto de las prácticas realizadas en el Instituto Geológico y Minero de España como parte del Trabajo Final del “Máster en Tecnologías de la Información para el medioambiente: SIG y Teledetección”.

Este capítulo se ha enfocado desde dos puntos de vista distintos: en primer lugar un breve resumen sobre las conclusiones de este trabajo propiamente dichas, y un segundo apartado subdividido en varios puntos de interés que recogen más detalladamente todo lo que ha tenido que ver con las prácticas en sí (conocimientos aplicados, la resolución de problemas, la evaluación de las mismas etc):

1) Las conclusiones acerca del trabajo realizado son las siguientes:

- a. Se ha homogeneizado una gran cantidad de información con las dificultades que ello conlleva. Concretamente, se han recopilado los datos de 21 granitos, que albergan un total de 2223 estaciones de medida con más de 12000 datos originales. Cada una de estas estaciones ha recibido unas coordenadas como producto del proceso de georreferenciación, y además ha visto digitalizada toda la información proveniente del trabajo de campo.
- b. Esta georreferenciación se ha llevado a cabo no con poca dificultad, debido al formato en el que se encontraba la información original (papel/pdf) y por tanto a la ausencia total de una información geográfica de base (coordenadas, puntos de referencia fiables...)
- c. A partir de toda la información anterior se han:
  - i. Elaborado 21 fichas individuales, una por cada granito, que muestran cartográficamente la distribución de las 3 variables principales (Km, K1, K3)
  - ii. Elaborado 3 mapas de síntesis que recogen toda la información desde la perspectiva del conjunto de los Pirineos
- d. Todo el trabajo realizado se ha diseñado con el propósito de ser implementado en los servidores del IGME.

2) En cuanto a lo acontecido a lo largo del periodo de prácticas desde el punto de vista del Máster cursado, se pueden destacar los siguientes aspectos:

*Aplicación de los conocimientos y competencias adquiridas durante el Máster que se han aplicado para la realización de estas prácticas:*

Han sido bastantes y variados los conocimientos adquiridos durante el año que se han tenido que poner en práctica para los distintos pasos aplicados en la metodología de este trabajo.

En primer lugar, todo lo referido a la georreferenciación; esto es sin duda el núcleo del trabajo, y si bien no han podido seguirse paso a paso los procesos seguidos durante la asignatura correspondiente, ésta sirvió también para poder “improvisar” ante la necesidad de georreferenciar objetos que, a diferencia de en los ejemplos vistos en clase en los que era sencillo encontrar puntos de referencia, en este caso no contaban estos puntos ni con ningún apoyo que pudiera ayudarnos a validar el proceso posteriormente.

Otro aspecto utilizado aunque en este caso de forma más somera ha sido el de la interpolación de los valores de la susceptibilidad magnética. Aunque durante el curso la aplicación de estos métodos se realizó solo en variables climáticas (temperatura y sobre todo precipitaciones), para conseguir cartografías continuas a partir de información puntual era necesario aplicar estos mismos métodos, si bien en muchas de las publicaciones consultadas muchos de los autores realizaban sus cartografías a mano. Pero uno de los objetivos de este trabajo era digitalizar y adecuar la información a esta era de la tecnología, por lo que usar métodos modernos como el krigging estaba más que justificado.

La generación de metadatos también ha sido un conocimiento adquirido durante el máster que se ha aplicado de forma directa en la realización de este trabajo y sobre todo de la base de datos que hay detrás del mismo. Hoy en día resulta indispensable para que la información tenga un fácil acceso, esté organizada etc.

Otro punto importante ha sido el diseño de las cartografías, donde obviamente el manejo de ArcGIS adquirido en distintas asignaturas a lo largo del año ha resultado indispensable (creación de simbologías, adecuación de escalas, organización y colocación de elementos etc).

#### *Relación de los problemas planteados durante el desarrollo de las prácticas y el procedimiento seguido para su resolución:*

En general se han dado distintos conflictos de mayor o menor importancia durante el desarrollo de las prácticas, que se han ido solucionando de la mejor forma posible, y que si bien no han restado calidad al producto final, sí que podrían haber sido resueltos quizá en un periodo más breve de tiempo de haberme enfrentado antes a hechos parecidos.

Un problema que en general ocupó bastante tiempo fue que, al no disponer de la tesis de Gleizes, G (1992), no contaba con las tablas de información de varios de los granitos allí presentes, y para dos de las variables como son K1 y K3, de índole direccional, empecé a hacer las mediciones con el software CANVAS directamente sobre el mapa. Esto tuve que hacerlo también con los plutones de Hilario (2012) ya que en dicha tesis no aparecían, aunque sí que disponía de ella. La diferencia es que finalmente, cuando me hice con una copia de Gleizes (1992), ya había empleado mucho tiempo en realizar decenas de medidas.

El siguiente conflicto digno de mencionar con el que me encontré fue con el problema de la georeferenciación de los plutones, puesto que, como se ha mencionado ya en varios apartados, los mapas de las publicaciones carecían de cualquier tipo de información geográfica de apoyo, así como de cualquier posible punto de referencia que tuviera algo de fiabilidad. Debido esto, acudí a hablar con la profesora que durante el curso había impartido la asignatura “2.7 Georeferenciación”, a la cual le comenté el problema y la posible solución (apartado 4.2 de este trabajo), para que en su caso me diera el visto bueno, como así fue.

#### *Valoración de qué ha aportado a mi formación la experiencia profesional durante el periodo de prácticas.*

Hay distintos aspectos de mi formación a los que la realización de estas prácticas ha aportado mucho, y el principal quizá ha sido, además del hecho de afianzar y perfeccionar muchos de los contenidos aprendidos durante las clases del Máster, el poder estar en un ambiente volcado en la investigación, en el que he tenido que aprender a desenvolverme, desde los primeros compases, cuando todo era búsqueda y lectura de información, hasta los últimos y sobre todo a partir de ahora, cuando muchas de las cosas reflejadas en estos capítulos tienen como objetivo final la salida a una publicación, si todo va según lo previsto, para la revista Journal of Maps.

Además, aunque ya poseo un nivel de inglés moderado, no he dejado de aprender vocabulario científico a lo largo de todas las prácticas, puesto que la mayor parte de las publicaciones se encuentran en este idioma. Y como he mencionado en el punto anterior, también he tenido que dedicar bastante tiempo al francés para poder abarcar un mayor abanico de publicaciones.

#### *Evaluación global de las prácticas*

La experiencia de las prácticas en el IGME, tanto por el tema que he trabajado como por cómo se han desarrollado, ha sido sin duda muy buena. Este Máster es cursado mayoritariamente por Licenciados en Geografía, y para unas prácticas de un tema tan concreto como pueda ser el que he tratado yo, es bastante recomendable que la persona haya cursado los estudios de Geología con anterioridad.

Personalmente el trato que he recibido por mi tutor Emilio Pueyo ha sido inmejorable, puesto que me ha aportado toda la información y ayuda que he necesitado, aunque como es lógico en algunos

momentos (sobre todo al final) sus obligaciones profesionales me han impedido “robarle” todo el tiempo que me hubiera gustado.

Por otra parte, el apoyo de mi tutor en la Universidad, Luis A. Longares, también ha sido excelente, revisando y aconsejándome siempre para todos los temas relacionados con las cartografías y la redacción de esta memoria.

Por todo ello, considero que ha sido una experiencia muy positiva, y espero que pueda valerme para mi futuro profesional, especialmente a corto plazo.

## **8. AGRADECIMIENTOS:**

Para poder realizar este trabajo hay que tener en cuenta a una serie de personas sin las cuales no habría sido posible:

En primer lugar, a todos los autores mencionados a lo largo de toda la memoria y especialmente a los mencionados en las cartografías, pues son sus datos los que he utilizado para el desarrollo de las mismas.

A todo el personal del IGME en Zaragoza con los que he compartido estos meses y que me han tratado especialmente bien.

A todos los profesores del Máster por su tiempo dedicado durante el curso.

A la Universidad de Zaragoza y en concreto al Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio por su colaboración, especialmente a Luis A. Longares como coordinador de este trabajo.

Y por último, a Emilio, sin el cual nada de esto habría sido posible

## 9. BIBLIOGRAFÍA:

- Allmendinger, R. W., Cardozo, N., & Fisher, D. (2012). Structural Geology Algorithms. *Vectors and Tensors in Structural Geology*, 289.
- Antolín Tomas, B. (2006). Estudio Estructural del Plutón de Marimanha (Pirineo). *Posgrado de Iniciación a la investigación en Geología, Universidad de Zaragoza*, 128 p.
- Antolín-Tomás, B. Román-Berdiel, T. Casas-Sainz, A. Gil-Peña, I. Oliva, B. Soto, R (2006): Structural and magnetic fabric study of the Marimanha granite (Axial Zone of the Pyrenees). *Int J Earth Scie.*
- Auréjac, J.-B., Gleizes, G., Diot, H., Bouchez, J.L. (2004). Le complexe granitique de Quérigut (Pyrénées, France) ré-examiné par la technique de l'ASM: un pluton syntectonique de la transpression des hercyniennes. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 175, 2: 157-174.
- Barnolas, A.; Pujalte, V. (eds) (2004). Capítulo III: La Cordillera Pirenaica. In: Geología de España; Vera, J. A. (main editor). *Sociedad Geológica de España - Instituto Geológico y Minero de España - Madrid* (ISBN 84-7840-546-1), 231-343.
- Barnolas, A., Gil-Peña, I., Alfageme, S., Ternet, Y., Baudin, T., Laumonier, B., 2008. Mapa geológico de los Pirineos a escala 1:400 000. IGME/BRGM ISBN: 978-2-7159-2168-9.
- Bouchez, J.L. Gleizes, G. Djouadi, T. Rochette, P (1990): Microstructure and magnetic susceptibility applied to emplacement kinematics of granites: the example of the Foix pluton (Frenche Pyrenees). *Tectonophysics* 184 (1990), 157-171.
- Bouchez, J. L., Gleizes, G. (1995). Two-stage deformation of the Mont-Louis-Andorra granite pluton (Variscan Pyrenees) inferred from magnetic susceptibility anisotropy. *J. Geol. Soc. London*, 152: 669-679.
- Cardozo, N., & Allmendinger, R. W. (2013). Spherical projections with OSXStereonet. *Computers & Geosciences*, 51, 193-205.
- Choukroune, P., Séguret, M. (1973). Carte structurale des Pyrénées, 1/500.000, *Université de Montpellier – ELF Aquitaine*.
- Chuvieco, E. (2008). Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio. *Barcelona, Ed. Ariel Ciencia, 3ª ed., 594 pp.*
- Denèle, Y., Olivier, Ph., Gleizes, G., Barbey, P. (2009): Decoupling between the middle and upper crust during transpression-related lateral flow: Variscan evolution of the Aston gneiss dome (Pyrenees, France). *Tectonophysics* 477, 244-261.
- Denèle, Y., Paquette, J.L., Olivier, Ph., Barbey, P. (2012): Permian granites in the Pyrenees: the Aya pluton (Basque Country). *Terra Nova*, 24, 105-113.
- Enrique, P. (1989): Caracterización geoquímica mediante elementos mayores de los granitoides de la vertiente meridional del Pirineo Central. *Studia Geologica Salmanticensia*, vol. esp 4: 41-60.
- Evans, N. G., Gleizes, G., Leblanc, D., Bouchez, J.L. (1997). Hercynian tectonics in the Pyrenees: a new view based on structural observations around the Bassiès granite pluton. *Journal of Structural Geology*, 19, 2(2): 195-208.
- Evans, N., Gleizes, G., Leblanc, D., Bouchez, J.L. (1998). Syntectonic emplacement of the Maladeta granite (Pyrenees) deduced from relationships between Hercynian deformation and contact metamorphism. *J. Geol. Soc. London*, 155: 209-216.
- Gleizes, G., Bouchez, J.L. (1989). Le granite de Mont-Louis (Zone axiale des Pyrénées): anisotropie magnétique, structures et microstructures. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 309(II): 1075-1082.
- Gleizes, G. (1990): Structure des granites hercyniens des Pyrénées de Mont Louis-Andorre a la Maladeta. *These de doctorat. Université de Toulouse III*
- Gleizes, G., Leblanc, D., Bouchez, J.L. (1991). Le pluton granitique de Bassiès (Pyrénées Ariégeois): zonation, structure et mise en place. *Journal of Geophysical Research*, 312, 7: 755-762.

- Gleizes, G., Bouchez, J.L., Lespinasse P., Roux L. (1992). Structure du granite de Lacourt (Arize occidentale): une signature syntectonique de phase 2 dans l'Hercynien des Pyrénées. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, 128: 53-57.
- Gleizes, G., Nédélec, A., Bouchez, J.L., Autran, A., Rochette, P. (1993). Magnetic susceptibility of the Mont Louis-Andorra ilmenite-type granite (Pyrenees): a new tool for the petrographic characterization and regional mapping of zoned granite plutons. *J. Geophys. Res.*, 98: 4317-4331.
- Gleizes, G., Leblanc, D., Bouchez, J.L. (1997). Variscan granites of the Pyrenees revisited: their role as syntectonic markers of the orogen. *Terra Nova*, 9: 38-41.
- Gleizes, G. Leblanc, D. Santana, V. Olivier, P. Bouchez, JL. (1998): Sigmoidal structures featuring dextral shear during emplacement of the Hercynian granite complex of Cauterets-Panticosa (Pyrenees). *Journal of Structural Geology*, Vol 20, N°9/10, pp 1229 to 1245
- Gleizes, G., Leblanc, D., & Bouchez, J. L. (1998). The main phase of the Hercynian orogeny in the Pyrenees is a dextral transpression. *Geological Society, London, Special Publications*, 135(1), 267-273.
- Gleizes, G., Leblanc, D., Olivier, P., Bouchez, J.L. (2001). Strain partitioning in a pluton during emplacement in transpressional regime: the example of the Néouvielle granite (Pyrenees). *Int. J. Earth Sci.*, 90: 325-340.
- Gleizes, G., Crevon, G., Asrat, A., Barbey, P. (2006): Structure, age and mode of emplacement of the Hercynian Bordères-Louron pluton (Central Pyrenees, France). *Int. J. Earth Sci.* 95: 1039-1052
- Hilario, A., Santana, V., Tubía, J. M., & Aranguren, A. (2003). Internal structure and emplacement of the Posets pluton (Spanish Pyrenees). In *EGS-AGU-EUG Joint Assembly* (Vol. 1, p. 4228).
- Hilario, A., Aranguren, A. Tubía, J. M., Pinotti, L., (2003). Estructura del plutón sincinemático de Lys. *Geogaceta* 34, 51-54.
- Hilario Orús, A. (2004). Relación entre magmatismo y deformación en la transversal de Benasque a Luchon (Zona Axial del Pirineo), *Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco*, 300 p.
- Ishihara, S., (1977): The magnetite series and ilmenite series granitic rocks. *Mining Geol.*, 27: 293-305.
- Izquierdo-Llavall, E., Román-Berdiel, T., Casas, A. M., Oliva-Urcia, B., Gil-Peña, I., Soto, R., & Jabaloy, A. (2012). Magnetic and structural study of the Eaux-Chaudes intrusion: understanding the Variscan deformation in the Western Axial Zone (Pyrenees). *International Journal of Earth Sciences*, 101(7), 1817-1834.
- Izquierdo-Llavall, E., Aldega, L., Cantarelli, V., Corrado, S., Gil-Peña, I., Invernizzi, C., & Casas, A. M. (2013). On the origin of cleavage in the Central Pyrenees: Structural and paleo-thermal study. *Tectonophysics*, 608, 303-318.
- Izquierdo-Llavall, E., Casas-Sainz, A. M., & Oliva-Urcia, B. (2013). Heterogeneous deformation recorded by magnetic fabrics in the Pyrenean Axial Zone. *Journal of Structural Geology*, 57, 97-113.
- Leblanc, D. Gleizes, G. Lespinasse, P. Olivier, Ph. Bouchez JL (1994): The Maladeta granite polydiapir, Spanish Pyrenees: a detailed magneto-structural study. *Journal of Structural Geology*. Vol 16, n°2, pp 223 to 235.
- Leblanc, D., Gleizes, G., Roux, L., Bouchez, J.L. (1996). Variscan dextral transpression in the French Pyrenees: new data from the Pic des Trois-Seigneurs granodiorite and its country rocks. *Tectonophysics*, 261: 331-345.
- Martín-Hernández, F., & Hirt, A. M. (2003). The anisotropy of magnetic susceptibility in biotite, muscovite and chlorite single crystals. *Tectonophysics*, 367(1), 13-28.
- Martínez-Peña, B., Casas-Sainz, A. (2003). Cretaceous-Tertiary tectonic inversion at the Cotiella Nappe (Southern Pyrenees, Spain). *International Journal of Earth Sciences (Geol. Rundschau)*, 92: 99-113.

- Olivier, P., Ameglio, L., Richen, H. and Vadeboin, F., (1999): Emplacement of the Aya Variscan granitic pluton (Basque Pyrenees) in a dextral transcurrent regime inferred from a combined magne-tostructural and gravimetric study. *J. Geol. Soc. London*, 156, 991–1002.
- Olivier, P., Gleizes, G., Paquette, J.L., Muñoz-Sáez, C., (2008): Structure and U Pb dating of the Saint Arnac pluton and the Ansignan charnockite (Agly Massif): a cross section from the upper to the middle crust of the Variscan Eastern Pyrenees. *Journal of the Geological Society*, V 165, p 141-152
- Paquette, J.-L., Gleizes, G., Leblanc, D., Bouchez, J.L. (1997). Le granite de Bassiès (Pyrénées): un pluton syntectonique d'âge Westphalien. *Géochronologie U-Pb sur zircons*. CRAS Paris, 324: 387-392.
- Pueyo, E.L., Román-Berdiel, M.T, Bouchez, J.L., Casas, A.M., Larrasoaña, J.C. (2004). Statistical significance of magnetic fabric data in studies of paramagnetic granites. In: *Magnetic Fabric: Methods and Applications*. (Eds: Martín-Hernández, F., Lüneburg, C. M., Aubourg, C. & Jackson, M.) Geological Society of London Special Publication, 238: 395–420.
- Pueyo, E. L., Bouchez, J. L., Román-Berdiel, T., & Gleizes, G. (2005). Are paramagnetic granites free of ferromagnetism. In *Proceeding of the IAGA meeting Toulouse* (Vol. 1323).
- Pueyo, E. L.; López, M. A.; Bouchez, J. L.; Román, M. T.; Cuevas, J.; Antolín, B.; Gleizes, G.; Oliva, B.; Soto, R.; Larrasoaña, J. C.; Casas, A. M. ; Hilario, A.; Santana, V.; Olivier, P.; Aranguren, A.; Tubía, J. M.; Vegas, N.; Leblanc, D.; Auréjac, J. B.; Rodríguez-Pintó, A.; Mochales, T.; Pueyo-Anchuela, O.; Gil-Peña, I.; Gil-Imaz, A.; Navas, J. and the GeoKinDPyr group, 2006. The Pyrenean AMS database, state of the art and future tasks. *Proceedings Geokin3Dpyr*, (2006 en prensa), 6 páginas.
- Ramón Ortiga, M.J., 2013. Flexural unfolding of complex geometries in fold and thrust belts using paleomagnetic vectors. *Unpublished PhD University of Zaragoza*, 228 pp. <http://zaguan.unizar.es/record/11750>
- Robador, A., Samsó, J.M., Ramajo, J., Barnolas, A., Clariana, P., Martín, S., Gil-Peña, I., 2011. Mapa Geológico Digital continuo E. 1: 50.000, Zona Pirineos Vasco-Cantábrica (Zona-1600). *GEO-DE. Mapa Geológico Digital continuo de España*. [on- line]. *Sistema de Información Geológica Continua: SIGECO. IGME*. Editor: J. Navas. <http://cuarzo.igme.es/sigeco/default.htm>
- Rochette, P. (1987): Magnetic susceptibility of the rock matrix related to magnetic fabric studies. *J.Struct.Geol.*9,1015-1020.
- Rodríguez-Méndez, L., Cuevas, J., & Tubía, J. M. (2013). Geological map of the central Pyrenees between the Tena and Aragon valleys (Huesca). *Journal of Maps*, 9(4), 596-603.
- Rodríguez-Méndez, L., Cuevas, J., Esteban, J. J., Tubía, J. M., Sergeev, S., & Larionov, A. (2014). Age of the magmatism related to the inverted Stephanian–Permian basin of the Sallent area (Pyrenees). *Geological Society, London, Special Publications*, 394(1), 101-111.
- Roest, W. R., & Srivastava, S. P. (1991). Kinematics of the plate boundaries between Eurasia, Iberia, and Africa in the North Atlantic from the Late Cretaceous to the present. *Geology*, 19(6), 613-616.
- Román-Berdiel, T., Pueyo-Morer, E. L., & Casas-Sainz, A. M. (1995). Granite emplacement during contemporary shortening and normal faulting: structural and magnetic study of the Veiga Massif (NW Spain). *Journal of Structural Geology*, 17(12), 1689-1706.
- Román-Berdiel, T. Casas, A. Oliva-Urcia, B. Pueyo, E.L. Rillo, C (2004): The main Variscan deformation event in the Pyrenees: new data from the structural study of the Bielsa granite. *Journal of Structural Geology*, 26, 2004, 654-677
- Román-Berdiel, T. Casas, A. Oliva-Urcia, B. Pueyo, E.L. Liesa, C. Soto, R. (2006): The Variscan Mil-lares granite (central Pyrenees): Pluton emplacement in a T fracture of a dextral shear zone. *Geodinamica acta* 19/3-4. 197-211.



- Román-Berdiel, T.; Aranguren, A.; Casas, A.M.; Cuevas, J.; Pueyo, E.L.; Tubía, J.M., (2006): La lineación magnética en los granitos hercínicos del Noroeste de la Península Ibérica. 95-102 pp. *In: MAGIBER I: Paleomagnetismo en la Península Ibérica.*
- Santana, V., Bouchez, J. L., Gleizes, G. and Tubia, J. M. (1992) Estructura del plutón granítico de Panticosa (Pirineos). *III Congreso Geológico de España, Salamanca 2, 179±185.*
- Santana, V. J. (2001): El plutón de Panticosa (Huesca, Pirineos): Estructura y modelo de emplazamiento a partir del Análisis de la Susceptibilidad Magnética. *Tesis doctoral. Univ. del País Vasco, 146 p.*
- Santana Torre, V. J. (2002). El plutón de Panticosa (Pirineos Occidentales, Huesca): Fábrica magnética y modelo de emplazamiento. *Revista de la Sociedad Geológica de España, 15(3-4), 175-191.*
- Tarling, D., & Hrouda, F. (Eds.). (1993). *Magnetic anisotropy of rocks. Springer.*

## **ANEXOS**

Se incluyen las tablas de datos de los granitos, en orden alfabético.