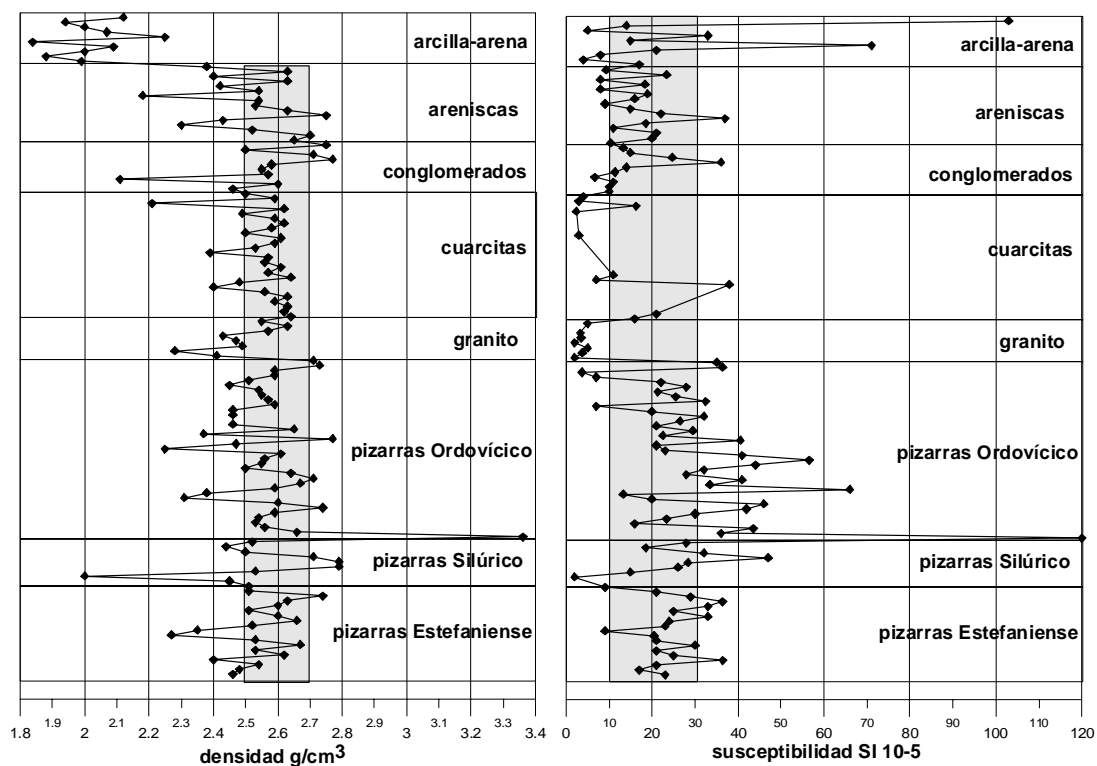


ESTABLECIMIENTO DE BASES METODOLÓGICAS PARA LA OBTENCIÓN DE CARTOGRAFÍA GRAVIMÉTRICA 1:50.000. APLICACIÓN A LA MODELIZACIÓN 2D Y 3D EN VARIAS ZONAS DE LA PENINSULA IBERICA.



CAPITULO 3

INFORME PETROFÍSICA

Autor: Juan Luis Plata (2009)

INDICE CAPITULO 3

3. INFORME DE PETROFÍSICA	5
3.1 INTRODUCCIÓN	5
3.1.1. Objetivo	5
3.1.2. Observaciones sobre la densidad en prospección gravimétrica	6
3.1.3. Datos técnicos sobre las determinaciones	9
3.1.3.1. Cálculo del peso específico (densidad aparente seca).....	10
3.1.3.2. Determinación de la susceptibilidad magnética	14
3.1.3.3. Datos suministrados en los informes de laboratorio	15
3.2. ZONA DEL BIERZO.....	17
3.2.1. Recogida de muestras en campo	17
3.2.2. Informes de laboratorio	19
3.2.3. Fichero de resultados.....	19
3.2.4. Clasificación por origen estratigráfico	20
3.2.5. Clasificación y análisis por litologías.....	24
3.2.5.1. Clasificación y rangos de variación generales	24
3.2.5.2. Arcillas	26
3.2.5.3 Arenas.....	28
3.2.5.4. Areniscas	29
3.2.5.5. Brechas	31
3.2.5.6. Caliche.....	32
3.2.5.7. Conglomerados.....	33
3.2.5.8. Cuarцитas.....	35
3.2.5.9. Granito.....	38
3.2.5.10. Pebble	39
3.2.5.11. Pizarras	41
3.2.6. Análisis de conjunto y determinación de valores a adoptar para la Gravimetría ..	48
3.2.7. Conclusiones sobre la densidad.....	53
3.2.8. Estudio susceptibilidad-densidad	58
3.2.9. Determinaciones efectuadas con el instrumento Core Logger MSCL.....	63
3.2.9.1. Características técnicas de las mediciones	63
3.2.9.2 Informe de laboratorio y fichero de resultados	67
3.2.9.3. Análisis de los resultados	68
3.2.10. Mediciones de velocidad con el instrumento Pundit.....	72
3.2.11. Conclusiones sobre los diferentes métodos de determinación utilizados	76
3.3. ZONA DE ALCUDIA	77
3.3.1. Recogida de muestras en campo	77
3.3.2. Informes de laboratorio	81
3.3.3. Fichero de resultados.....	82
3.3.4. Clasificación y análisis por litologías.....	85
3.3.4.1. Areniscas-arcosas y grauvacas	85
3.3.4.2. Pizarras, esquistos y neis	88
3.3.4.3. Cuarцитas, corneanas y anfíbolitas	90
3.3.4.4. Rocas intrusivas y tobas	91
3.3.5. Clasificación de las muestras por origen estratigráfico.....	95
3.3.6. Comparación de valores con otros muestreos	105
3.3.7. Análisis del Bouguer y la densidad	107
3.3.8. Caracterización densidad-susceptibilidad	111

ANEXO A. Copia en papel de los Informes de Laboratorio 07/0461, 07/0607 y 07/0625

ANEXO B. Copia en papel del fichero PETROFISICA BEMBIBRE(LEON). xls

ANEXO C. Copia en papel de los Informes de Laboratorio 09/0211 y 09/0130

ANEXO D. Copia en papel del fichero PETROFISICA ALCUDIA. xls

Nota: Estos Anexos están editados en un volumen independiente, y sólo se archiva en la Biblioteca de Informes de Grupo de Geofísica. Los correspondientes ficheros están recogidos en el Anexo Informático.

ANEXO INFORMÁTICO

Nota: la indicación dada [] en algunos figuras hace referencia al nombre del fichero de datos o gráfico correspondiente, consultable en el Anexo Informático de este informe.

Nota: debido a la peculiaridad de las diferentes aplicaciones informáticas utilizadas, en algunas ocasiones se utiliza la coma como separador decimal. No obstante, el criterio general empleado ha sido el uso del punto decimal.

3. INFORME DE PETROFÍSICA

3.1 INTRODUCCIÓN

3.1.1. Objetivo

Uno de los objetivos fundamentales del Proyecto *“Establecimiento de bases metodológicas para la obtención de cartografía gravimétrica 1:50.000”* es el desarrollo metodológico para la mejora de la interpretación geológica de campañas de gravimetría regional. En este contexto, el presente estudio petrofísico está encaminado a la determinación del contraste de densidad más adecuado a utilizar en la preparación de modelos del subsuelo para la interpretación de la gravimetría efectuada en las zonas del Bierzo, con una extensión algo mayor que la de una hoja 1:50.000 (unos 850 km²), y en la zona de Alcudia, en forma de perfil de unos 120 km de longitud.

Por otra parte, dado el carácter de desarrollo metodológico del mencionado Proyecto, se pretende realizar una caracterización petrofísica de las distintas litologías y unidades geológicas presentes, para lo que se ha incluido la medición de la susceptibilidad magnética.

Así mismo, dentro de la intencionalidad de ampliación de metodologías para determinación de las propiedades físicas de las rocas, y para verificar las prestaciones de nuevos instrumentos disponibles en el Laboratorio del IGME en Tres Cantos, parte del muestreo se destinará también a la medición de la densidad y susceptibilidad mediante el instrumento para testificación geofísica de testigos Multi Sensor Core Logger (MSCL), añadiendo de forma experimental la medición de la velocidad y resistividad. La velocidad se determinará también mediante el instrumento Pundic de medición en probetas, a efectos comparativos.

3.1.2. Observaciones sobre la densidad en prospección gravimétrica

Las rocas están formadas por una matriz de densidad **dm** y los poros, cuya proporción en volumen ocupado viene dado por la porosidad **Po**, rellenos de un fluido de densidad **df**. Se denomina densidad aparente de la roca a la relación entre su masa y el volumen que ocupa, y viene dada por:

$$d_{\text{aparente}} = dm (1 - Po) + df Po$$

El objetivo de la gravimetría es la determinación de la distribución de la densidad de las rocas del subsuelo mediante la observación de las perturbaciones que las masas de las estructuras geológicas originan en el campo gravitatorio terrestre medido sobre la superficie. El método gravimétrico se basa en la ley de la gravitación universal de Newton:

$$F = G m_1 m_2 / r^2$$

donde F es la fuerza de atracción entre las masas m_1 y m_2 , r la distancia entre ellas y G la constante de la gravitación universal. Por lo tanto, la masa que interviene en la lectura del gravímetro es la masa total de las rocas (matriz y poros con su fluido de relleno), y en consecuencia, la densidad que da lugar a las anomalías gravimétricas es la densidad aparente.

La anomalía gravimétrica utilizada es la denominada Anomalía de Bouguer, definida como la diferencia entre el valor de la gravedad medida u observada [$g_{\text{observada}}$] y un valor teórico [$g_{\text{teórica}}$]

$$AB = g_{\text{observada}} - g_{\text{teórica}}$$

En Gravimetría aplicada tiene más interés determinar la variación espacial de la Anomalía de Bouguer que su valor absoluto en un lugar, ya que es dicha variación lo que permite detectar la existencia de modificaciones en el valor de la aceleración de la gravedad producidas por las diferencias de densidad de las estructuras del subsuelo.

Para calcular la gravedad teórica se parte de la gravedad normal g_0 existente sobre una superficie de referencia o geoide (aproximado por un elipsoide) a nivel del mar, y depende de

la latitud geográfica y sistema de referencia adoptado (elipsoide y valor absoluto de la gravedad de partida). Para trasladar este valor de la gravedad normal a la cota z donde se han realizado las mediciones se tiene en cuenta la diferencia de altura o corrección de aire libre f_z , y la masa existente entre la superficie del geoide (cota del mar) y la superficie topográfica donde se realizan las mediciones. La atracción de esta capa de terreno, denominada corrección de placa de Bouguer es $2\pi G d z = b d z$, con $b = 0,04191$ mGal/m, donde z es la altura de la estación y d es la *densidad de reducción* o densidad homogénea asignada a los terrenos. Se trata por lo tanto de un valor de densidad global, no relacionado directamente con ninguna litología específica. El utilizar un valor u otro para la densidad de reducción no supone nada más que modificar en una constante el valor de la gravedad teórica, dada por:

$$g_{teórica} = g_0 - f_z + b d z + T$$

Sin embargo, dado que la superficie de la Tierra no es totalmente plana, hay que tener en cuenta el relieve topográfico con excesos y defectos de masa respecto a la capa plana supuesta por la placa de Bouguer. Como consecuencia, se hace necesario calcular la atracción gravitatoria T que ejercen sobre la estación de medida todas las masas situadas por encima (elevaciones del terreno) o por debajo (depresiones) de la misma, hasta una cierta distancia para la que pueden suponerse de efecto despreciable. La densidad asignada a estas masas es también la densidad de reducción, por lo que para que no se produzcan falsas anomalías de gravedad por insuficiencia de la corrección calculada, esta densidad de reducción debe ser lo más parecida posible a la densidad de las masas de rocas por encima de la cota más baja de la zona prospectada. Para determinar la densidad de reducción es preferible utilizar métodos analíticos (como perfiles de Nettleton, método DENSAD, etc.) con los que obtener una densidad única que minimice la correlación entre la topografía y la variación de la Anomalía de Bouguer. La única utilidad de la densidad de las rocas determinada en laboratorio en este aspecto es la de orientar sobre el valor a adoptar, pero no para utilizar dichos valores directamente (el uso de varias densidades en el cálculo de la corrección topográfica exigiría el uso de varios mapas de anomalía de Bouguer, calculados a diferentes densidades de reducción).

La variación relativa de la Anomalía de Bouguer entre las estaciones de medida es consecuencia de que el subsuelo no tiene una densidad homogénea (densidad de reducción), como supone la gravedad teórica. La distribución de densidades del subsuelo es la que sin

embargo ha sido detectada por la gravedad medida. Para efectuar una interpretación cuantitativa se calcula la anomalía que produce una determinada distribución de masas de la corteza o modelo del subsuelo, comparando esta anomalía con la AB medida. Para asignar valores de densidad a este modelo es para lo que es de mayor utilidad disponer de valores reales de la densidad de las rocas, teniendo en cuenta que en la interpretación habrá que modificar tanto la geometría como la densidad atribuida al modelo hasta encontrar la mejor coincidencia con los valores medidos, imponiendo los valores de densidad determinados en laboratorio un límite a los rangos de variación aceptables. Puesto que la gravedad es el resultado de la Ley de Newton, se entiende que varias combinaciones de masas (m) y distancias al punto de observación (r) son posibles para producir el mismo valor de gravedad. En consecuencia puede existir más de un modelo de distribución de masas del subsuelo que de lugar a la misma anomalía gravimétrica, lo que se denomina problema de la indeterminación, que puede ser minimizado con un buen conocimiento de la densidad real de las rocas.

De lo que se trata, por lo tanto, en el presente estudio es de la determinación de la densidad aparente más representativa de cada una de las unidades litológicas existentes en el área de la prospección gravimétrica, para su uso en la modelación o inversión de las anomalías. A este respecto deben tenerse en cuenta algunos aspectos limitativos:

- Las propiedades físicas de las rocas dependen de su composición mineralógica, y lo que puede determinarse en laboratorio es el valor de una propiedad para una determinada litología. Para las unidades geológicas entendidas como unidades estratigráficas (Formaciones) o cronológicas (Pisos) no tiene sentido la determinación de sus parámetros petrofísicos, a no ser que estén compuestas por un único tipo de litología.
- Ninguna roca es completamente homogénea en ninguno de sus parámetros petrofísicos, por lo que el valor medido es el de la muestra tomada, y puede no ser representativo de la densidad con la que actúa a efectos gravimétricos el total de la masa de roca existente.
- La toma de varias muestras para una misma litología puede permitir obtener *una aproximación* a este valor representativo.

- Cuando las muestras se recogen en afloramientos de la superficie, hay que tener en cuenta la posible alteración por meteorización, que puede distorsionar bastante el valor de la densidad respecto de la roca sin alterar.
- Por otra parte, la porosidad (tanto primaria como secundaria por fracturación) puede ser diferente en superficie que en profundidad, así como el contenido de fluido en los poros, lo que hace variar la densidad (Figura 3.1). Por esta razón, la densidad que suele tener interés determinar es la densidad aparente para rocas secas.
- La profundidad, y por lo tanto la compactación (sobre todo en rocas sedimentarias detríticas), puede ser también un factor importante en la diferencia entre la densidad de una muestra de superficie y su valor en profundidad.
- Todos estos factores hacen que aunque la metrología para la determinación de la densidad en laboratorio pueda tener una precisión instrumental y operativa de 0.01 g/cm^3 , no es realista aceptar diferencias inferiores a 0.05 g/cm^3 como indicativas de cambios representativos.
- Puesto que se precisa conocer la densidad aparente, no deben utilizarse métodos que proporcionan la densidad de la matriz (a veces denominada densidad real), como el picnómetro de helio. La práctica normal es la determinación de la densidad aparente para muestras secas, lo que debe tenerse en cuenta para no utilizar métodos que proporcionan la densidad aparente con la roca húmeda o con agua (Figura 3.1).

3.1.3. Datos técnicos sobre las determinaciones

En todas las muestras se ha medido la **densidad** (peso específico aparente) y susceptibilidad magnética.

El peso específico aparente se ha efectuado según la norma PTE-MI-013 Ed0, que incluye la absorción y porosidad en %. Para su cálculo se tomaron muestras de unos 0,3 a 0,6 kg, cortadas con martillo de los 4-5 kg de roca recogidos en campo. Estos fragmentos de roca se pesaron primero en aire y luego sumergidos en agua (principio de Arquímedes) mediante una balanza hidrostática. En algunas muestras, debido a encontrarse en forma no compacta (arenas y/o arcillas), se determinó la densidad en muestra parafinada (Norma PTE-ET-075 Ed 0) y su humedad (Norma PTE-ET-059 Ed 0).

3.1.3.1. Cálculo del peso específico (densidad aparente seca)

Aunque el concepto de densidad es sencillo (relación entre la masa y el volumen), su determinación en laboratorio puede dar lugar a ciertas ambigüedades. Cuando en el volumen ocupado por una masa no hay poros, la relación masa/volumen es la densidad real **dm** (Figura 3.1). Cuando en el volumen hay poros, dicha relación se denomina densidad aparente, que a su vez puede referirse a la que existe cuando los poros están rellenos de aire (densidad aparente seca **da**), o puede referirse a la que existe cuando todos los poros contienen agua o roca saturada (densidad aparente húmeda saturada **dh**); o si sólo parte de los poros contiene agua, se trata de densidad aparente húmeda no saturada **dhn**.

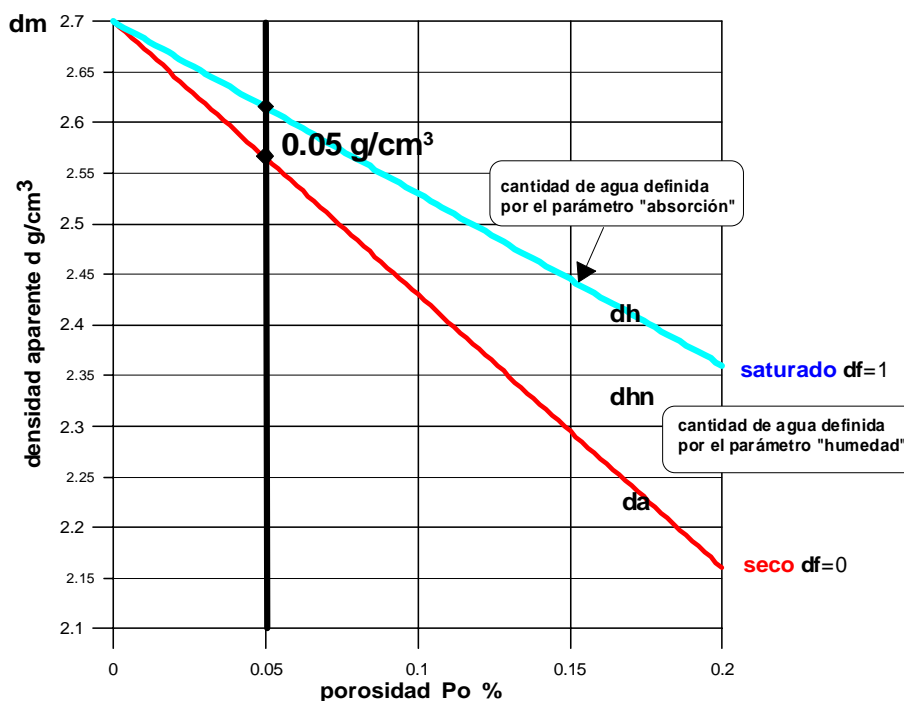


Fig. 3.1 Variación de la densidad en función de la porosidad y contenido de los poros para una roca con densidad de la matriz de 2.7 g/cm³. Para un 5% de porosidad puede haber una variación de 0.05 g/cm³ entre roca seca y roca saturada de agua. Para un 20 % esta variación es de 0.2 g/cm³. Se ilustra los diversos conceptos de densidad aparente da, dh y dhn [dens-poro]

Como se ha indicado en el apartado 3.2, la densidad que interesa determinar para estudios gravimétricos es la densidad aparente, dada genéricamente por:

$$d_{aparente} = dm (1 - Po) + df Po$$

Aunque las rocas pueden estar saturadas de agua, normalmente lo que interesa determinar es la densidad aparente para muestras secas **da=dm (1-Po)**. En general, la masa total de la

muestra, considerando que todos sus poros están ocupados por el mismo fluido, viene dada por

$$\mathbf{m} = \mathbf{V} (1 - \mathbf{Po}) \mathbf{dm} + \mathbf{V} \mathbf{Po} \mathbf{df}$$

m = masa de la muestra saturada

V = volumen de muestra (matriz + poros)

Po = porosidad en tanto por uno

dm = densidad de la matriz (denominada también densidad real)

df = densidad del fluido que rellena los poros (aire = 0, agua = 1)

En una muestra seca ($\mathbf{df}=0$) **m** es igual a la masa de la matriz

$$\mathbf{ms} = \mathbf{V} (1 - \mathbf{Po}) \mathbf{dm} = \mathbf{V} \mathbf{da}$$

ms = masa de la muestra seca o de la matriz

da = densidad de la muestra seca (densidad aparente)

En una muestra saturada de agua ($\mathbf{df}=1$)

$$\mathbf{m} = \mathbf{V} (1 - \mathbf{Po}) \mathbf{dm} + \mathbf{V} \mathbf{Po} = \mathbf{V} \mathbf{dh}$$

dh = densidad “húmeda” saturada

La masa de una muestra no saturada, lo que puede ser el caso de suelos, viene dada por

$$\mathbf{mh} = \mathbf{V} (1 - \mathbf{Po}) \mathbf{dm} + \mathbf{ma} = \mathbf{V} \mathbf{dhn}$$

mh = masa de la muestra con agua (no saturada)

ma = masa de agua que contiene una roca no saturada $\neq \mathbf{V} \mathbf{Po}$

dhn = densidad “húmeda” no saturada

En la determinación con balanza hidrostática se procede a pesar en el aire la muestra seca y la muestra saturada de agua. El peso de la muestra seca viene dado por:

$$P = m_s g = V (1 - P_o) d_m g = V d_a g$$

g = aceleración de la gravedad

Siendo la densidad aparente (peso específico aparente) $d_a = P / V g$

y la densidad de la matriz o densidad real $d_m = P / [V (1 - P_o) g] = P / [V g - V P_o g]$

El peso en aire de la muestra saturada de agua es $P_s = m g = P + V P_o g$ donde la cantidad (en peso) de agua absorbida viene dada por $V g P_o = P_s - P$ denominándose *coeficiente de absorción* a

$$C_a = (P_s - P) / P$$

y la porosidad viene dada por $P_o = (P_s - P) / V g$

Procediendo a pesar la muestra saturada dentro del agua se obtiene:

$$P_{as} = P_s - V g \quad \text{de donde} \quad V g = P_s - P_{as}$$

y por tanto, con las pesadas efectuadas puede determinarse:

$$\text{peso específico aparente} \quad d_a = P / V g = P / (P_s - P_{as})$$

$$\text{peso específico real} \quad d_m = P / (P - P_{as})$$

$$\text{porosidad} \quad P_o = (P_s - P) / (P_s - P_{as})$$

Para muestras en forma de polvo o tierra, puede seguirse otro procedimiento. En vez de pesar la muestra seca, se pesa la muestra con agua no saturada en el aire:

$$P_1 = m_h g = V (1 - P_o) d_m g + m_a g = V d_h n g$$

de donde la **densidad húmeda no saturada** viene dada por $d_h n = P_1 / V g$

Si la muestra se cubre con una masa de parafina **mp** de densidad conocida **dp** su nuevo peso en el aire será:

$$P2 = P1 + mp \cdot g \quad \text{de donde} \quad mp = (P2 - P1) / g \quad \text{y su volumen} \quad Vp = mp / dp$$

Al pesar la muestra parafinada en agua se obtiene:

$$P3 = P2 - (V + Vp) \cdot g \quad \text{y} \quad V \cdot g = P2 - P3 - Vp \cdot g$$

lo que permite calcular la **densidad húmeda no saturada** por:

$$d_{hn} = P1 / [P2 - P3 - Vp \cdot g]$$

La **humedad** se define como la relación entre la masa de agua que contiene la roca **ma** y la masa de la roca seca **ms**

$$h = ma / ms$$

Se determina pesando la muestra húmeda (de peso P_{mh}) en un contenedor de peso conocido P_c , obteniendo un peso inicial $P_i = P_c + P_{mh}$. Desecando la muestra en una estufa hasta peso constante, se obtiene un peso final $P_f = P_c + P_{ms}$, de donde el peso de la muestra seca es $P_{ms} = P_f - P_c$. Por diferencia se obtiene el peso del agua absorbida $P_a = P_f - P_i$ y la absorción por P_a / P_{ms} .

A partir de la masa de una muestra no saturada $m_h = V (1 - P_o) \cdot d_m + m_a = m_s + m_a = V \cdot d_{hn}$ se obtiene:

$$m_a = V \cdot d_{hn} - m_s = V \cdot d_{hn} - V \cdot d_a$$

por lo que puede ponerse la humedad como:

$$h = (V \cdot d_{hn} - V \cdot d_a) / V \cdot d_a = (d_{hn} - d_a) / d_a$$

con lo que también puede calcularse la **densidad aparente seca**, una vez conocida la humedad, por:

$$d_a = d_{hn} / (1 + h)$$

Debe por lo tanto distinguirse en las determinaciones de laboratorio entre:

Densidad de la matriz o densidad real d_m = masa de la matriz / volumen que ocupa la matriz

Densidad aparente d_a o densidad seca = masa de la matriz / volumen total de la muestra (matriz + poros)

Densidad húmeda saturada d_h = masa de la matriz + agua en todos los poros / volumen total de la muestra (matriz + poros)

Densidad húmeda no saturada d_{hn} = masa de la matriz + agua en algunos poros / volumen total de la muestra (matriz + poros)

3.1.3.2. Determinación de la susceptibilidad magnética

Las medidas de susceptibilidad magnética se han realizado con el instrumento Multi-sensor Core-Logger (MSCL) utilizando el sensor MS2E incorporado en el equipo. Este sensor está diseñado para realizar medidas de alta resolución de susceptibilidad magnética a lo largo de superficies lisas con una rugosidad inferior a un 1 mm. Tiene un área de respuesta de 10.5 mm de longitud x 3.8 mm de profundidad, disminuyendo la respuesta un 50% a una profundidad de medida de 1 mm y al 10% a 3.5 mm, es decir, son mediciones que sólo consideran los primeros 2-3 mm de roca. Las especificaciones de este instrumento son: frecuencia de operación 875 Hz, Intensidad del campo 300 A/m, y Sensibilidad: $3 \cdot 10^{-8}$ (S.I.). Para cada muestra se han efectuado de una a tres mediciones.

Este sistema determina la susceptibilidad magnética K volumétrica específica de la muestra en el SI, expresando los valores en unidades $\times 10^{-5}$ SI. Puesto que los valores de susceptibilidad en el sistema C.G.S se expresan en cantidades $\times 10^{-6}$, al ser $K_{SI} = 2\pi K_{cgs}$, los valores dados en el SI $\times 10^{-5}$ son totalmente comparable a los valores expresados en el C.G.S.

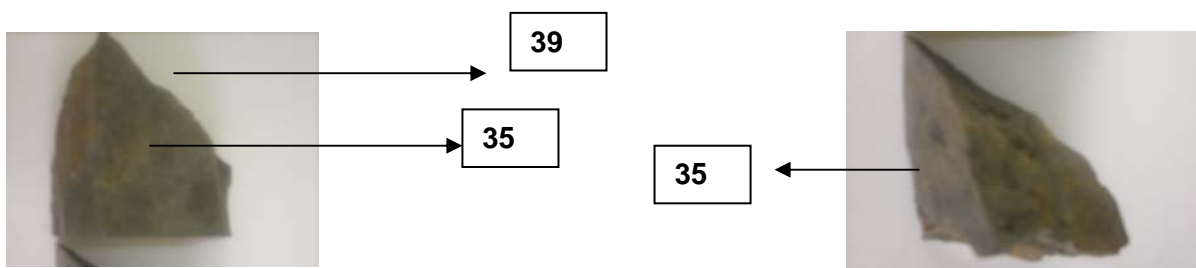
3.1.3.3. Datos suministrados en los informes de laboratorio

Para cada muestra se especifican los siguientes valores:

MUESTRA: B001

peso específico aparente (g/cm ³)	% absorción	Porosidad (%)
2,73	1,74	4,75

Susceptibilidad magnética (unidades SI* 10⁻⁵)



En algunas muestras (nº 44, 46, 47, 58 100, 101,102, 130, 131, 132 y 133 de la zona del Bierzo), debido a su fragilidad (se trata de arcillas, caliche y conglomerados), en vez de la absorción y porosidad en % se ha medido la humedad (norma PTE-ET-059 Ed0), para lo que se han cogido dos fragmentos, uno para determinación de la humedad y otro para la determinación de la densidad aparente por pesada en balanza hidrostática de la muestra parafinada.

MUESTRA: B100

Peso específico aparente (Densidad húmeda no saturada) (g/cm ³)	Densidad seca (Peso específico aparente) (g/cm ³)	Humedad (%)
2.11	2.08	1.35

Susceptibilidad magnética (unidades SI* 10⁻⁵) = 11



Para determinar densidad y la susceptibilidad de la muestra **BO22** ha sido necesario compactarla y ponerla en un soporte especial



determinando su densidad con el picnómetro de helio (Accupyc 1330), tratándose por lo tanto para esta muestra de la densidad real (densidad de la matriz), de valor 2.76 g/cm^3 .

3.2. ZONA DEL BIERZO

3.2.1. Recogida de muestras en campo

La zona cubierta por la campaña gravimétrica (Figura 3.2) pertenece a la hoja 1/50.000 nº 159, excepto una pequeña parte del sector occidental, que corresponde al nº 158, y unos pocos kilómetros del sur que pertenecen al nº 192. Se trata de formaciones de la Zona Astur Occidental-Leonesa, cuya leyenda se indica en la figura 3.3.

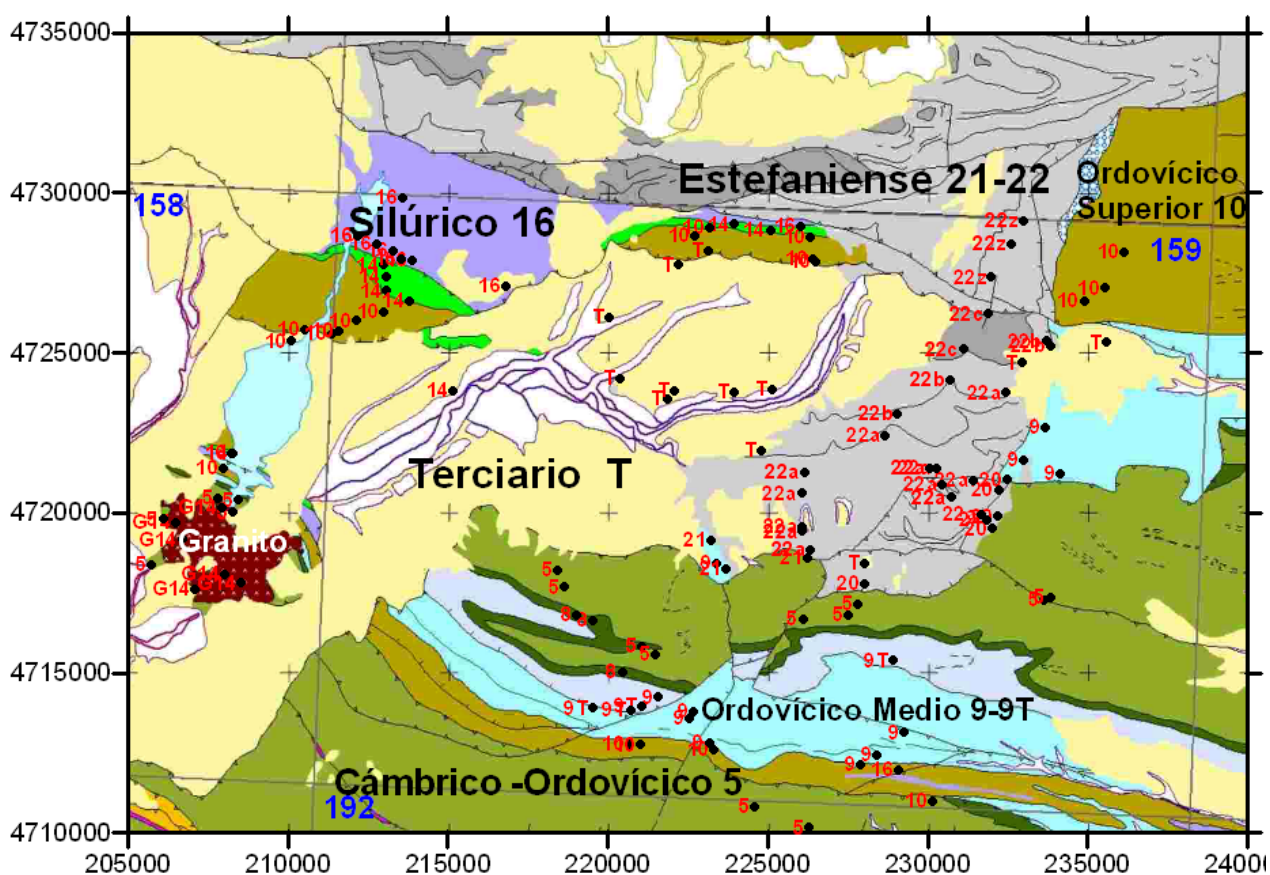


Fig. 3.2 Posición de las muestras de roca recogidas, con indicación de su código de posición estratigráfica (Figura 3). Nº de hoja 1/50.000 indicado en azul. [geologXYm; PB-modifk.xls]. Para cada piso se indica el código utilizado.

La toma de muestras fue efectuada por Kilian Motis (Geólogo), con el apoyo de Agustín González (operador de Geofísica), siguiendo el criterio de muestrear todas las formaciones aflorantes, aunque alguna pueda no ser de interés para efectuar un modelo de interpretación gravimétrica, por su poco grado de representatividad. Durante el año 2007 se realizaron varias salidas de campo (17-19 de julio, 25 de julio y 23-26 de octubre), recogiendo unos 2-3 kg de

cada muestra, excepto de unas cuantas, con las que se preveía utilizar varios métodos de determinación y de las se recogieron unos 4-5 kg de roca para cada muestra. En cada punto de muestreo se tomaron las coordenadas mediante GPS.

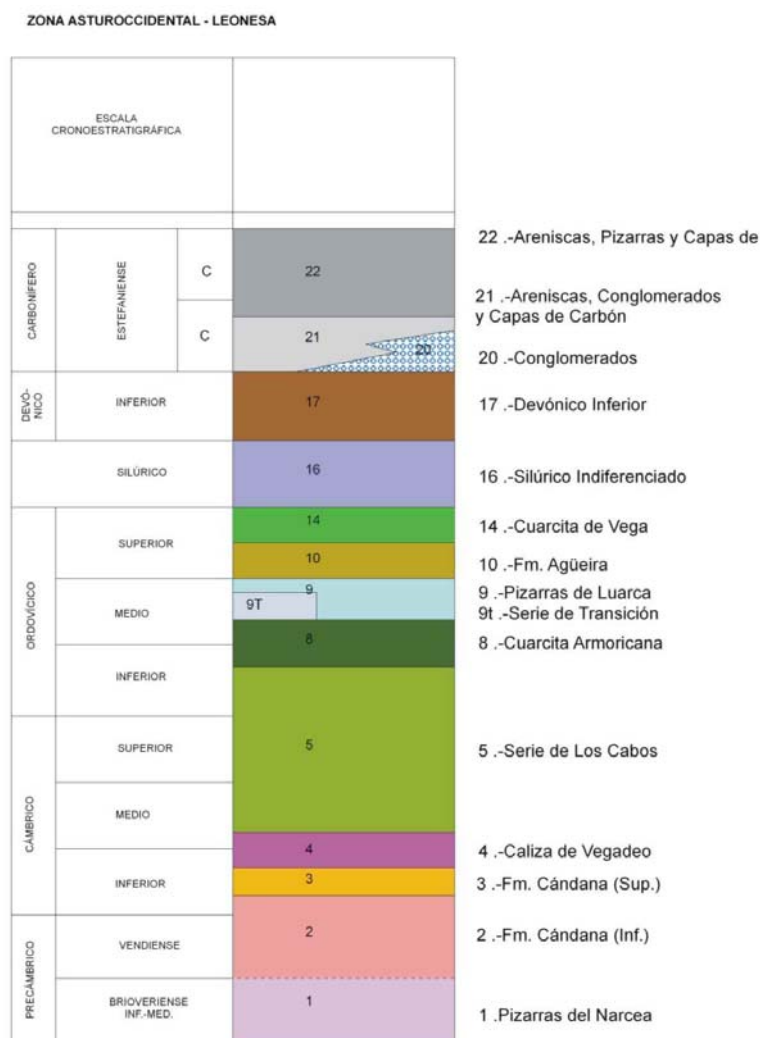


Fig. 3.3 Leyenda de la Zona Asturoccidental-leonesa de la geología de la zona prospectada.

Durante la toma de muestras de la primera campaña (muestras 1 a 36) se midió, en cada afloramiento donde se tomaron las muestras, la susceptibilidad magnética con un susceptibilímetro Kappameter modelo KT-5, metodología que se abandonó en las siguientes campañas. Este instrumento, de la casa Geofyzika, mide la susceptibilidad en un área de roca aflorante de unos 2 cm de diámetro y con la misma penetración, operando con un campo de 10 Hz y sensibilidad de 1×10^{-5} SI.

A fin de disponer de valores de densidad en muestras no superficiales, se realizó una visita a la litoteca del IGME en Peñarroya (Cordoba), seleccionando los sondeos más adecuados para

esta finalidad. Sin embargo, debido al estado de fragmentación de los testigos, no pudo llevarse a cabo su medición con el sistema MSCL.

3.2.2. Informes de laboratorio

Todas las determinaciones se han efectuado en los Laboratorios del IGME en Tres Cantos. Los resultados están recogidos en los siguientes informes de laboratorio:

- Informe **07/0461**: recoge el resultado de las 30 primeras muestras. Fueron entregadas el 22-agosto-2007 y finalizadas el 15-octubre-2007.
- Informe **07/0607**: recoge el resultado de las muestras 31 a 66. Fueron entregadas el 07-noviembre-2007 y finalizadas el 14-diciembre-2007.
- Informe **07/0625**: recoge el resultado de las muestras 67 a 136, de las que 28 se analizaron también con el sistema MSCL. Fueron entregadas el 30-noviembre-07 y finalizadas el 17-julio-2008.

El ANEXO A recoge copia en papel de dichos informes, que se encuentran además en formato digital en los ficheros **07461b.doc**, **07607b.doc** y **07625.doc**.

3.2.3. Fichero de resultados

Los resultados del análisis están recogidos en el fichero PETROFISICA BEMBIBRE(LEON). xls, con los siguientes datos:

Nº.M	X29	Y29	X30	Y30	HOJA	LITOLÓGÍA	COD	FORMACION
CÓDF	EDAD	FECHA	k (10 ⁻⁵ SI)	Peso específico aparente (gcm-3)	% absorción	porosidad (%)		
susceptibilidad magnética (SI*10-5) #1	susceptibilidad #2	susceptibilidad #3	Densidad seca (%)	Humedad (%)	S.M.(10-3SI) CAMPO			

A los datos de Laboratorio se han añadido el número de muestra en campo, los valores de las coordenadas UTM 29 determinados durante su recogida, cambiándose posteriormente al huso 30 y la hoja 1/50.000 correspondiente. La clasificación litológica y por formaciones, con sus correspondientes códigos serán comentadas posteriormente. El contenido de este fichero está recogido en el ANEXO B.

3.2.4. Clasificación por origen estratigráfico

La posición de las muestras recogidas está representada en la Figura 3.2, con indicación de la unidad cronoestratigráfica o formación a la que pertenecen. El número de muestras recogidas **M** y su relación con la litología se sintetiza en la Tabla 3.1.

Como ya ha sido comentado anteriormente (apartado 3.1.2), el estudio de la densidad con finalidad de interpretación gravimétrica debe efectuarse por litologías, no teniendo en principio validez su determinación por formaciones cronoestratigráficas, salvo que estas sean de una sola litología y que a su vez difiera de las colindantes. No obstante, para un mejor análisis de los resultados obtenidos, se presenta en este apartado una descripción del muestro desde el punto de vista estratigráfico. Las muestras se han situado además dentro de las Formaciones correspondientes. La codificación asignada en la Tabla 3.1 es la correspondiente a la leyenda de la cartografía utilizada, reproducida en la Figura 3.2.

El Terciario está formado fundamentalmente por arenas y arcillas; se ha recogido 14 muestras (Figura 3.4), aunque 3 de ellas (conglomerados, caliche y pebble) pueden considerarse no representativas (su presencia volumétrica no es significativa). El contraste de densidad que exista entre esta unidad de rocas sedimentarias y su basamento paleozoico debe considerarse el principal responsable de las anomalías gravimétricas.

M	LITOLOGÍA	FORMACIÓN	CÓDF	EDAD	
9	ARCILLAS	TERCIARIO	T	T	TERCIARIO
2	ARENAS	TERCIARIO	T	T	
1	CALICHE	TERCIARIO	T	T	
1	CONGLOMERADOS	TERCIARIO	T	T	
1	PEBBLY MUDSTONE	TERCIARIO	T	T	
3	CONGLOMERADOS	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	ESTEFANIENSE
8	ARENISCAS	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	
8	PIZARRAS	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	
1	CONGLOMERADOS	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph	
2	ARENISCAS	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph	
3	PIZARRAS	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph	
2	ARENISCAS	ESTEFANIENSE CONSTANCIA-SUPERIOR	22c	Stph	
2	PIZARRAS	ESTEFANIENSE CONSTANCIA-SUPERIOR	22c	Stph	
2	ARENISCAS	ESTEFANIENSE ALMAGARINOS	22z	Stph	
3	PIZARRAS	ESTEFANIENSE ALMAGARINOS	22z	Stph	
1	ARENISCAS	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph	
1	CONGLOMERADOS	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph	
2	PIZARRAS	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph	
2	BRECHAS	ESTEFANIENSE BASAL	20	Stph	
3	CONGLOMERADOS	ESTEFANIENSE BASAL	20	Stph	
1	CUARCITAS	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	SILÚRICO
10	PIZARRAS	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	
8	CUARCITAS	FORMACIÓN VEGA DE ESPINAREDA	14	Osup	ORDOVÍCIO
7	CUARCITAS	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	
12	PIZARRAS	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	
1	PIZARRAS	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	
1	PIZARRAS MINERALIZADAS	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	
9	PIZARRAS	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	
1	CUARCITAS	SERIE DE TRANSICIÓN	9T	Omed	
3	PIZARRAS	SERIE DE TRANSICIÓN	9T	Omed	
3	CUARCITAS	CUARCITA ARMORICANA	8	Oinf-med	
4	PIZARRAS MET. CONTACTO	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf	
6	PIZARRAS	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf	
7	CUARCITAS	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf	
6	GRANITO	GRANITO DE PONFERRADA	G14	Stph-P?	

Tabla 3.1. Numero de muestras recogidas M en cada unidad cronoestratigráfica con especificación de su litología y código asignado CODF según la leyenda de la Figura 2. EDAD: T-Terciario; Stph-Estefaniense; S-Silúrico; O- Ordovícico. El color es una codificación visual de la litología.

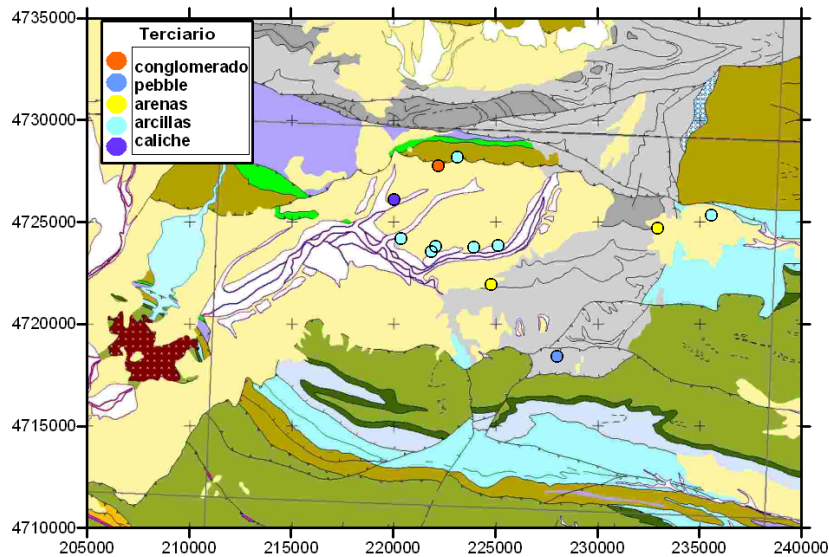


Fig. 3.4 Posición y clasificación litológica de las muestras recogidas en el Terciario. [geologXYm; terciario.xls]

En el Estefaniense se han tomado 43 muestras: 18 pizarras, 15 areniscas, 8 conglomerados y 2 brechas, cuya posición puede verse en la Figura. 3.5. Como se aprecia en la Tabla 3.1, las distintas Formaciones del Estefaniense son de composición litológica heterogénea. Las pizarras y areniscas pueden considerarse las litologías dominantes en este piso.

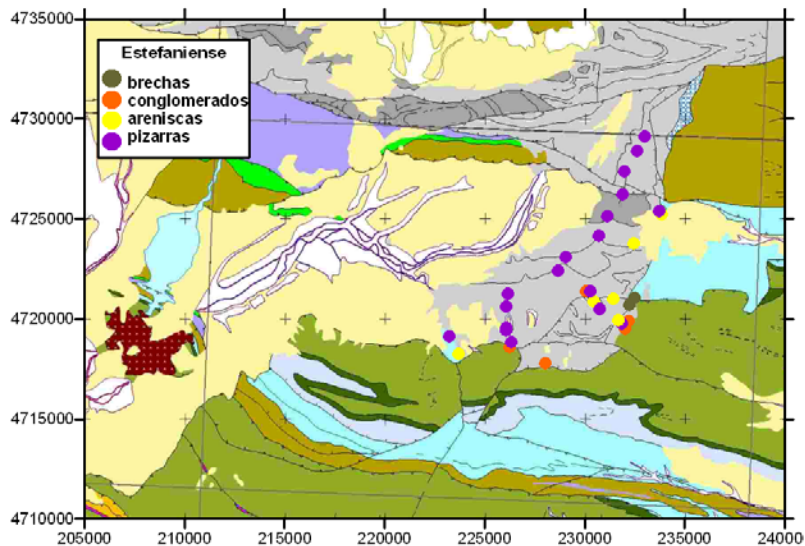


Fig. 3.5 Posición y clasificación litológica de las muestras recogidas en el Estefaniense. [geologXYm; estefaniense.xls]

De las 11 muestras recogidas en el Silúrico (Figura 3.6), 10 son pizarras, litología más representativa de este piso, para el que, en consonancia, se puede intentar determinar un valor de densidad que lo represente.

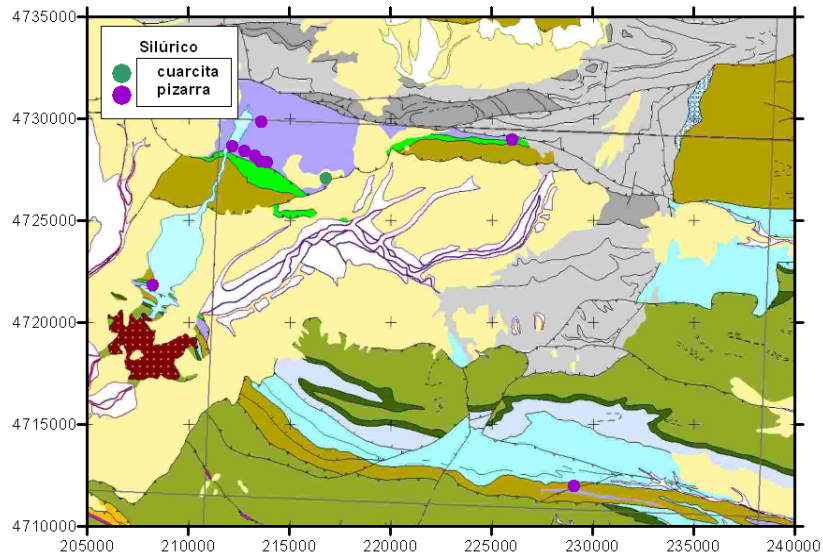


Fig. 3.6 Posición y clasificación litológica de las muestras recogidas en el Silúrico. [geologXYm; silurico.xls]

En el Ordovícico se han cogido 26 muestras de cuarcitas y 36 de pizarras (Figura 3.7). El granito forma un conjunto independiente, cuya caracterización petrofísica siempre es viable con independencia del entorno en el que se encuentre. A la formación Cuarcitas de la Vega (indicada por el código de formación 14) puede asignársele un valor propio de densidad, así como a las Cuarcitas Armoricanas (código 8), aunque puede no ser muy útil a efectos de modelización gravimétrica. La Formación Luarca (código 9) está fundamentalmente formada por pizarras, por lo que también se puede intentar caracterizarla individualmente. En el resto de las formaciones (Agüeira, código 10, y Los Cabos, código 5) son claramente multilitológicas, con presencia de cuarcitas y pizarras.

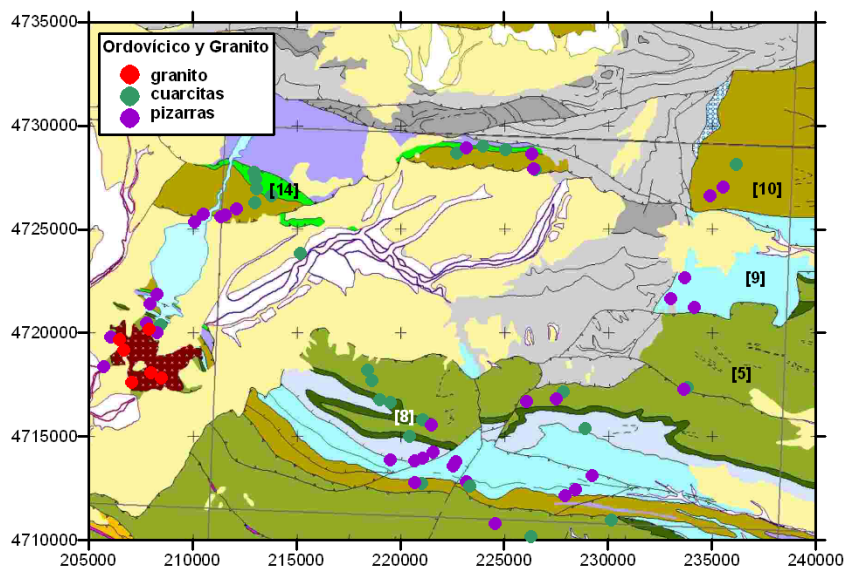


Fig. 7 Posición y clasificación litológica de las muestras recogidas en el Ordovícico. [geologXYm; paleozoicoInf.xls]

3.2.5. Clasificación y análisis por litologías

3.2.5.1. Clasificación y rangos de variación generales

En la Tabla 3.2 se recoge la clasificación de las muestras por litologías, con indicación de la situación cronoestratigráfica correspondiente. El código COD asignado a cada litología es el existente en la descripción de la leyenda del mapa geológico. Para este análisis se ha asignado un código diferente (CL), que facilita la representación gráfica de los resultados.

M	LITOLOGÍA	COD	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD
9	ARCILLAS	34	1	TERCIARIO	T	T
2	ARENAS	33	2	TERCIARIO	T	T
8	ARENISCAS	23	8	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph
2	ARENISCAS	23	8	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph
2	ARENISCAS	23	8	ESTEFANIENSE CONSTANCIA-SUPERIOR	22c	Stph
2	ARENISCAS	23	8	ESTEFANIENSE ALMAGARINOS	22z	Stph
1	ARENISCAS	23	8	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph
2	BRECHAS	21	9	ESTEFANIENSE BASAL	20	Stph
1	CALICHE	39	3	TERCIARIO	T	T
1	CONGLOMERADOS	31	2	TERCIARIO	T	T
3	CONGLOMERADOS	22	10	ESTEFANIENSE BASAL	20	Stph
1	CONGLOMERADOS	22	10	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph
3	CONGLOMERADOS	22	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph
1	CONGLOMERADOS	22	10	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph
7	CUARCITAS	11	5	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf
3	CUARCITAS	11	5	CUARCITA ARMORICANA	8	Oinf-med
1	CUARCITAS	11	5	SERIE DE TRANSICIÓN	9T	Omed
7	CUARCITAS	11	5	FORMACION AGŪEIRA	10	Osup
8	CUARCITAS	11	5	FORMACIÓN VEGA DE ESPINAREDA	14	Osup
1	CUARCITAS	11	5	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S
6	GRANITO	1	12	GRANITO DE PONFERRADA	G14	stph-P?
1	PEBBLEY MUDSTONE	32	4	TERCIARIO	T	T
6	PIZARRAS	12	6	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf
4	PIZARRAS MET. CONTACTO	18	6	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf
9	PIZARRAS	12	6	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed
1	PIZARRAS	24	6	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed
1	PIZARRAS MINERALIZADAS	19	6	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed
3	PIZARRAS	12	6	SERIE DE TRANSICIÓN	9T	Omed
12	PIZARRAS	12	6	FORMACION AGŪEIRA	10	Osup
10	PIZARRAS	12	7	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S
2	PIZARRAS	24	11	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph
8	PIZARRAS	24	11	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph
3	PIZARRAS	24	11	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph
2	PIZARRAS	24	11	ESTEFANIENSE CONSTANCIA-SUPERIOR	22c	Stph
3	PIZARRAS	24	11	ESTEFANIENSE ALMAGARINOS	22z	Stph

Tabla 3.2. Numero M de muestras recogidas en cada litología, con especificación de su unidad cronoestratigráfica correspondiente y códigos de litología (COD y CL) y formación (CÓDF) asignados.

En la Figura 3.8 se representa la variación de densidad y de susceptibilidad de todas las muestras clasificadas por litologías, en forma de pseudo-log, sin que en realidad su ordenación secuencial tenga ningún significado más que el de una ilustración gráfica.

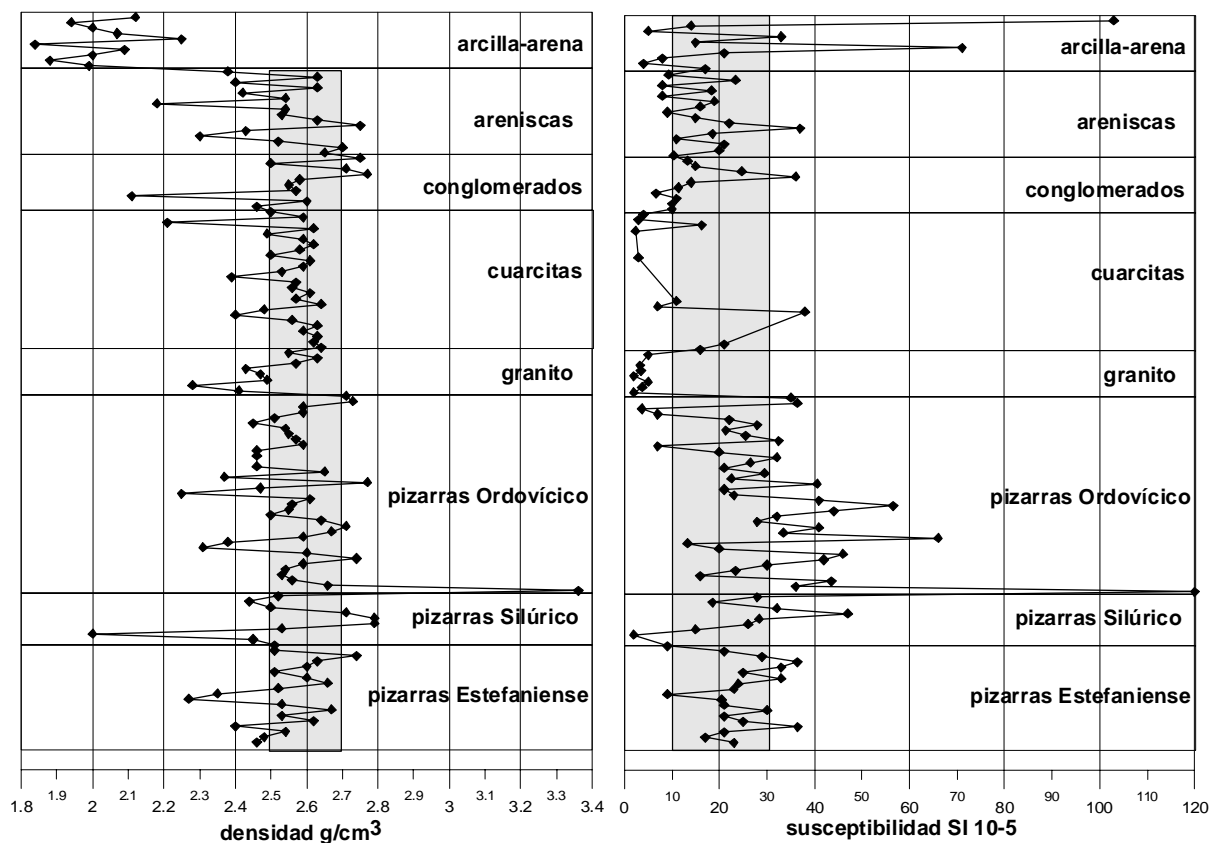


Fig. 3.8 Representación en forma de pseudo-log de la variación de densidad y susceptibilidad de todas las muestras recogidas. [logtodoslitoden, logtodoslitosus; PBcolorlitologias.xls]

La densidad de todas las muestras se encuentra prácticamente en el rango de 2.50 a 2.70 g/cm^3 , excepto las arenas y arcillas, y algunas areniscas. Las desviaciones de este rango son normalmente para valores inferiores, lo que se puede deber a la meteorización de algunas muestras. Los valores superiores para algunas pizarras podrían deberse a mineralizaciones.

La susceptibilidad de la mayoría de las muestras está en el orden de 10 a 30 $\text{SI } 10^{-5}$, excepto para las cuarcitas y los granitos, que presentan valores todavía inferiores. Las pizarras tienen valores superiores a las arcillas, areniscas y conglomerados. Solamente algunas pizarras del Ordovícico superan las 40 unidades. Debe tenerse además en cuenta que el sistema utilizado en la medición de la susceptibilidad mide este parámetro en una zona de 10 mm de roca, no

penetrando más de 3 mm. En 46 muestras se han efectuado tres mediciones y en 20 muestras dos mediciones, siendo su promedio el resultado aquí utilizado; del resto hay unas 20 muestras con valor 0. En la Figura 3.9 se presenta el rango de variación de las determinaciones efectuadas con tres mediciones, así como el valor medio. Como es habitual en mediciones de susceptibilidad, al ser una propiedad muy heterogénea, sobre todo medida en volúmenes de roca tan pequeños, las desviaciones aumentan en general con la susceptibilidad, siendo para la mayoría de las muestras superior a $10 \text{ SI } 10^{-5}$, por lo que el contraste realmente existente entre estas rocas resultará aún menor que el aparente según los valores de la Figura 3.8.

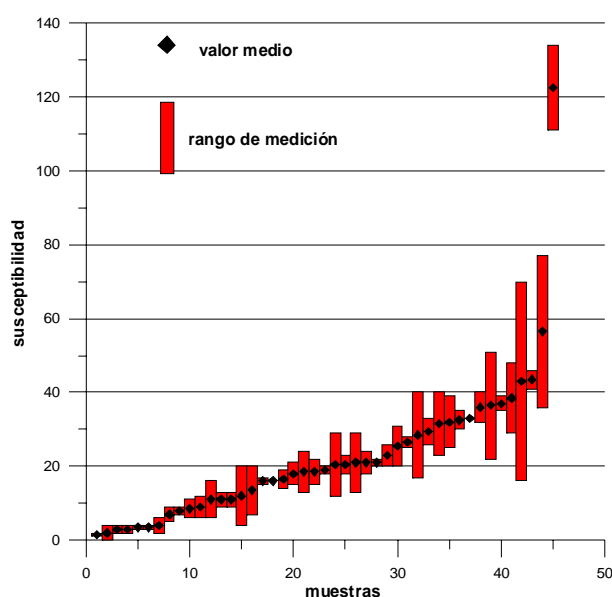


Fig. 3.9. Representación de los rangos de variación de la medición de la susceptibilidad para una misma muestra (tres determinaciones), con indicación de su valor medio. [rangos sus; rangossus.xls]

El número de muestras tomadas de cada litología no permite un análisis estadístico riguroso, por lo que, en vez de la elaboración de histogramas, se procederá en general a su representación ordenada en valores crecientes, donde se puede apreciar bien la agrupación y los rangos; el valor medio aritmético se ha determinado una vez eliminadas las muestras con escaso valor representativo.

3.2.5.2. Arcillas

Son 9 muestras, todas del Terciario, aunque la nº 22 no pudo medirse de densidad aparente, y la susceptibilidad fue determinada en muestra compactada. No hay valor de susceptibilidad

para la nº 129. Los valores medidos se especifican en la Tabla 3.3 y la posición de las muestras en la Figura 3.10.

Nº.	LITOLOGÍA	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD	k (10-5si)	d (gcm-3)
131	ARCILLAS	1	TERCIARIO	T	T	71,00	1,84
101	ARCILLAS	1	TERCIARIO	T	T	5,00	1,94
133	ARCILLAS	1	TERCIARIO	T	T	8,00	2,00
102	ARCILLAS	1	TERCIARIO	T	T	33,00	2,00
129	ARCILLAS	1	TERCIARIO	T	T		2,07
132	ARCILLAS	1	TERCIARIO	T	T	21,00	2,09
46	ARCILLAS	1	TERCIARIO	T	T	14,00	2,12
130	ARCILLAS	1	TERCIARIO	T	T	15,00	2,25
22	ARCILLAS	1	TERCIARIO	T	T	103,00	

Tabla 3.3. Valores de densidad y susceptibilidad de las arcillas [arcillas.xls!den]

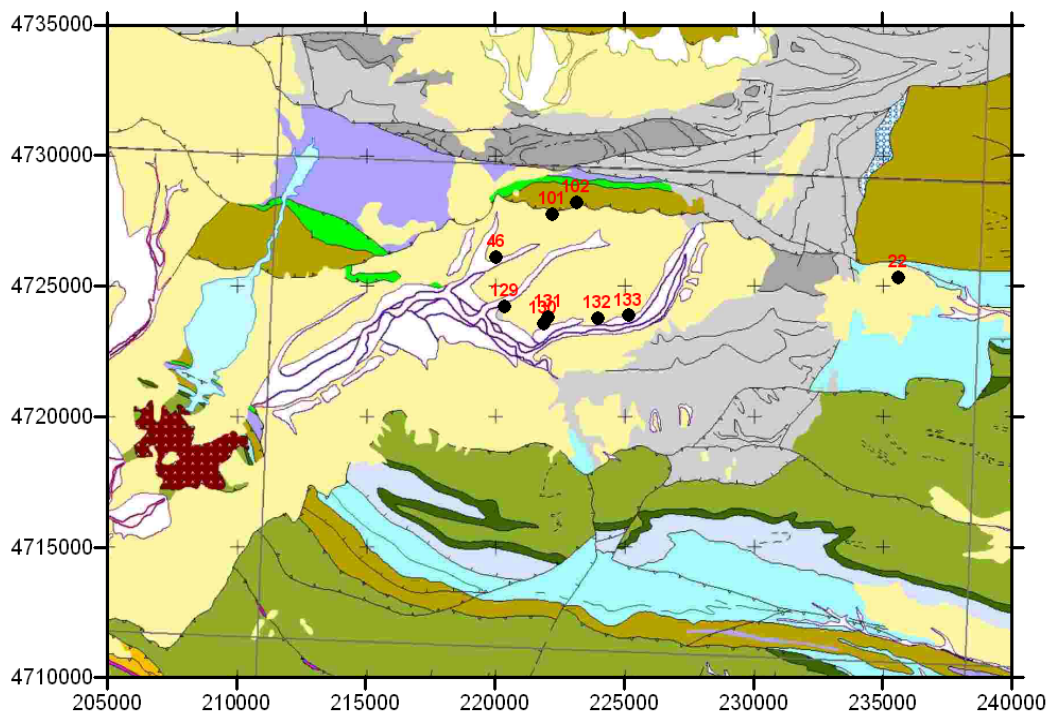


Fig. 3.10 Situación de las muestras de arcilla, con indicación del nº de muestra. [geologXYm; arcillas.xls!h1]

La distribución de los valores de sus parámetros viene indicada en la Figura 3.11. La densidad tiene una dispersión de 0.4 g/cm^3 , con valor medio de 2.04 g/cm^3 ; los valores extremos de las muestras 130 y 131 (cogidas geográficamente muy próximas, Figura 3.10) deben descartarse, presentando el resto de los valores una buena agrupación, con dispersión de 0.18 g/cm^3 , y valor medio de 2.07 g/cm^3 que es valor que debe considerarse como más representativo.

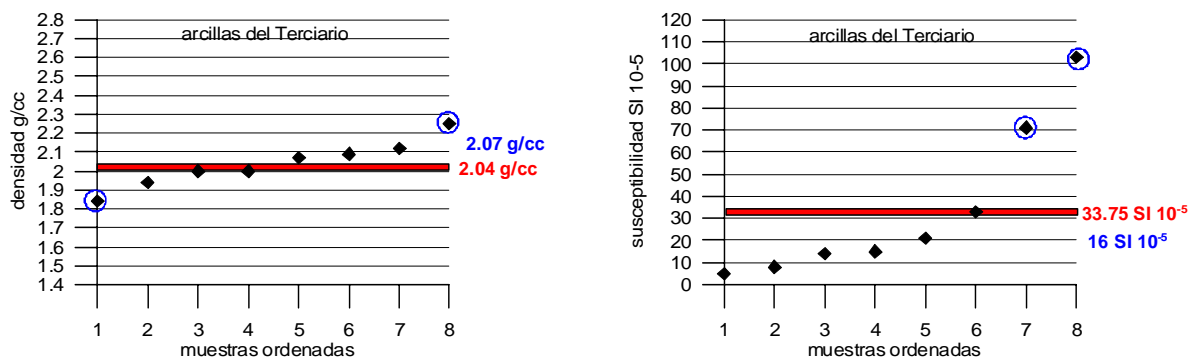


Fig.3.11 Clasificación de densidad y susceptibilidad para las arcillas. En rojo se indica el valor medio considerando todas las muestras, y en azul una vez eliminadas las muestras indicadas por un círculo.[arcillas; arcillas.xls/den, arcillas.xls/sus]

La susceptibilidad magnética, como la del resto de las rocas de este estudio, es muy baja, por lo que la dispersión aparente de la Figura 3.11 no es en realidad importante. La media del conjunto es de $33.75 \text{ SI } 10^{-5}$. No obstante, las muestras 131 y 22 pueden descartarse por tener valores relativamente superiores al grupo, pasando el valor medio a ser de $16 \text{ SI } 10^{-5}$.

3.2.5.3 Arenas

El número de muestras tomadas no es significativo, presentando una densidad media de 1.93 g/cm^3 y susceptibilidad de $10.5 \text{ SI } 10^{-5}$. Los valores de sus parámetros se especifican en la Tabla 3.4 y su posición en la Figura 3.12.

Nº	LITOLÓGÍA	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD	k (10-5si)	d (gcm-3)
44	ARENAS	2	TERCIARIO	T	T	4,00	1,88
58	ARENAS	2	TERCIARIO	T	T	17,00	1,99

Tabla 3.4. Valores de densidad y susceptibilidad de las arenas. [arenas.xls]

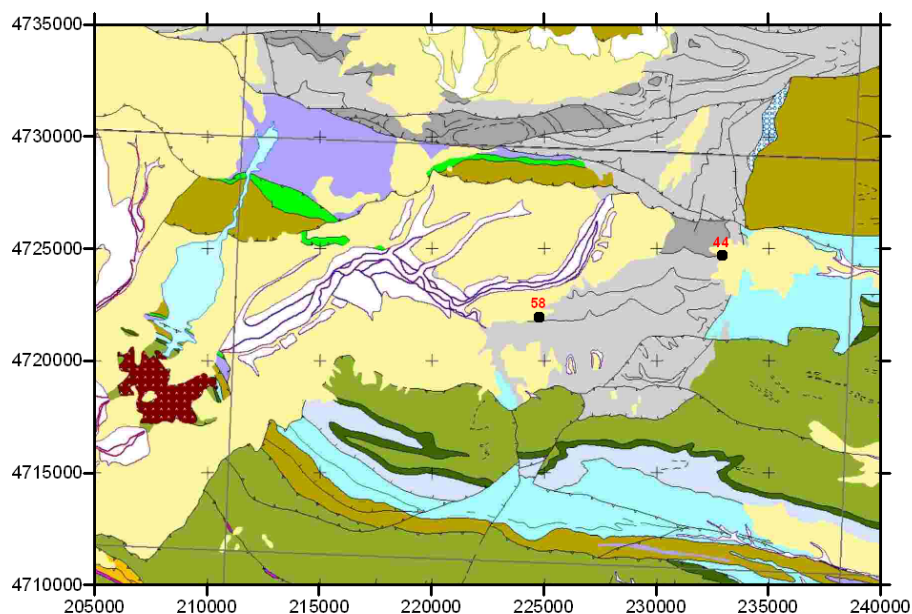


Fig.3.12 Situación de las muestras de arenas, con indicación del nº de muestra. [geologXYm; arenas.xls]

3.2.5.4. Areniscas

Se trata de 15 muestras, tomadas todas ellas en el Estefaniense. El valor de sus parámetros y situación se reflejan en la Tabla 3.5 y Figura 3.13.

Nº	LITOLOGÍA	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD	k (10-5si)	d (gcm-3)
45	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	16,00	2,18
122	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	11,00	2,30
6	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	9,33	2,38
11	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	8,00	2,40
16	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	8,00	2,42
113	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph	18,50	2,43
124	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	21,00	2,52
106	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE ALMAGARINOS	22z	Stph	15,00	2,53
42	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph	19,00	2,54
104	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE ALMAGARINOS	22z	Stph	9,00	2,54
9	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	23,33	2,63
13	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	18,33	2,63
109	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE CONSTANCIA-SUPERIOR	22c	Stph	22,00	2,63
127	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph	20,00	2,70
110	ARENISCAS	8	ESTEFANIENSE CONSTANCIA-SUPERIOR	22c	Stph	37,00	2,75

Tabla 3.5. Valores de densidad y susceptibilidad de las areniscas. [areniscas.xls/den]

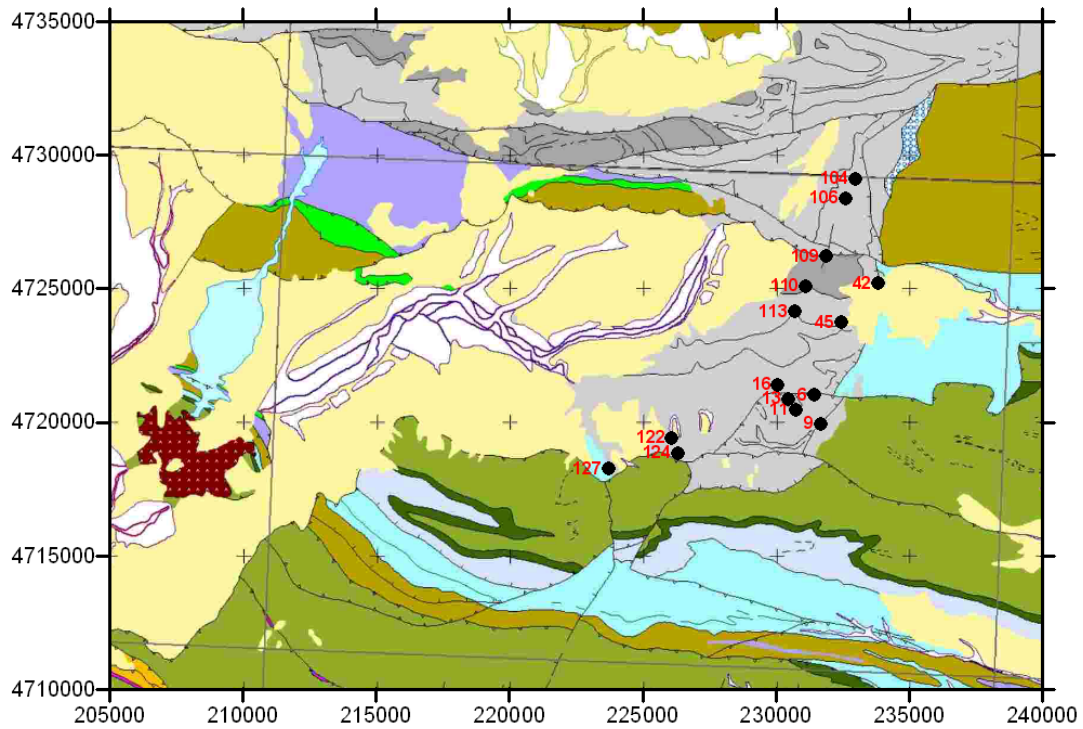


Fig. 3.13 Situación de las muestras de areniscas, con indicación del nº de muestra. [geologXYm; areniscas.xls/h1]

En la Figura 3.14 se representa el histograma de frecuencias de valores medidos que, dado el poco número de muestras, proporciona una visión insuficiente de la distribución de los valores, como ya se indicó anteriormente. En el gráfico de la Figura 3.15, con muestras ordenadas por orden creciente del valor del parámetro considerado, se aprecian mejor las propiedades de la distribución.

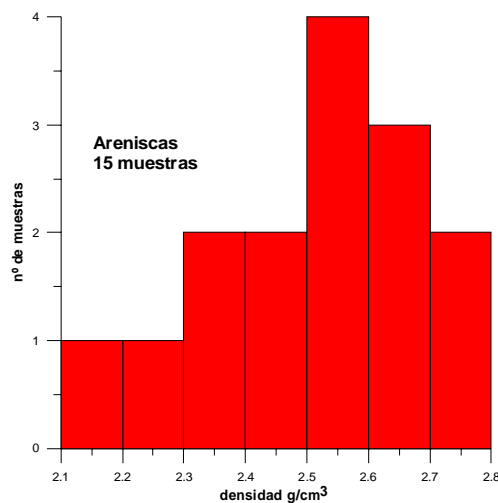


Fig. 3.14 Histograma de frecuencias de distribución de la densidad en las areniscas. [histoareniscas; areniscas.xls/den N-O]

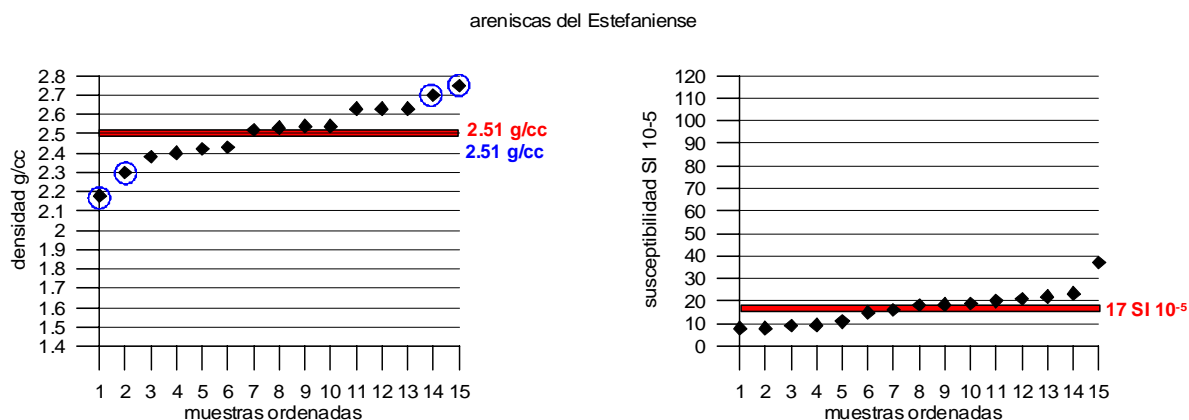


Fig. 3.15 Clasificación de densidad y susceptibilidad para las areniscas. En rojo se indica el valor medio considerando todas las muestras, y en azul una vez eliminadas las muestras indicadas por un círculo. [areniscas; areniscas.xls/den, areniscas.xls/sus]

La densidad tiene una dispersión inicial de 0.57 g/cm³. Las muestras 127 y 110 presentan valores superiores a 2.7 g/cm³ y las muestras 45 y 122 tienen valores inferiores a 2.3 g/cm³, por lo que se descartan por falta de representatividad. El valor medio resultante para el resto sigue siendo de 2.51 g/cm³, con dispersión de 0.25 g/cm³.

La susceptibilidad se agrupa bien entorno a su media de 17 SI 10⁻⁵.

3.2.5.5. Brechas

Se trata de dos muestras del Estefaniense, sin interés representativo. Su densidad es elevada, 2.7 g/cm³, y la susceptibilidad es muy pequeña (12 SI 10⁻⁵).

Nº	LITOLOGÍA	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD	k (10-5si)	d (gcm-3)
4	BRECHAS	9	ESTEFANIENSE BASAL	20	Stph	10,33	2,65
5	BRECHAS	9	ESTEFANIENSE BASAL	20	Stph	13,33	2,75

Tabla 3.6. Valores de densidad y susceptibilidad de las brechas. [brecha.xls]

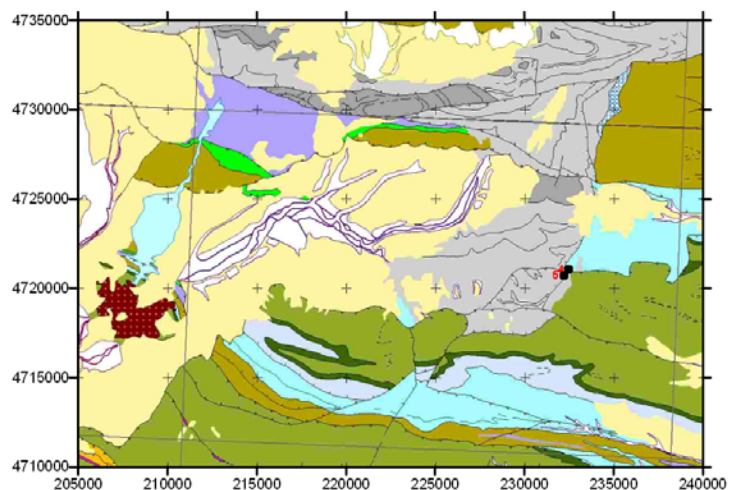


Fig. 3.16 Situación de las muestras de brechas. [geologXYm; brecha.xls]

3.2.5.6. Caliche

Es una muestra del Terciario, sin interés para este estudio, dada su prácticamente nula representatividad en la litología del área estudiada por gravimetría.

Nº	LITOLÓGÍA	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD	k (10-5si)	d (gcm-3)
47	CALICHE	3	TERCIARIO	T	T	15,00	2,50

Tabla3.7. Valores de densidad y susceptibilidad del caliche. [caliche.xls]

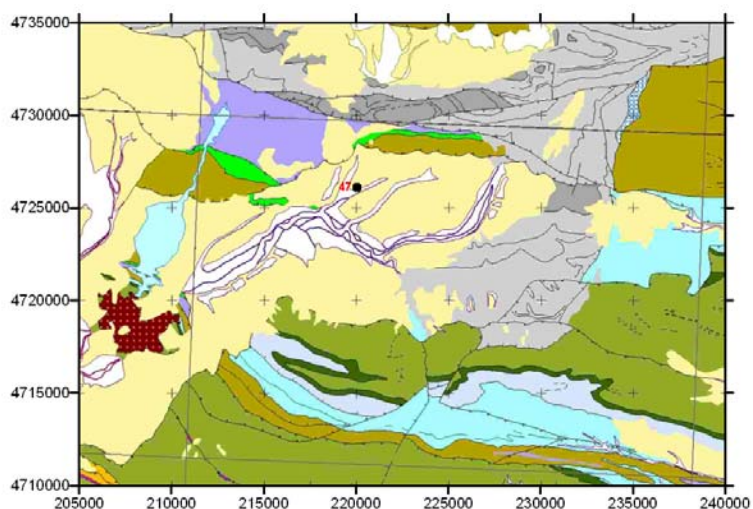


Fig. 3.17 Situación de la muestra de caliche. [geologXYm; caliche.xls]

3.2.5.7. Conglomerados

Son 8 muestras del Estefaniense y una del Terciario, que no será considerada en el análisis. El valor de sus parámetros y situación se reflejan en la Tabla 3.8 y Figura 3.18.

Nº	LITOLOGÍA	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD	k (10-5si)	d (gcm-3)
100	CONGLOMERADOS	10	TERCIARIO	T	T	11,00	2,11
118	CONGLOMERADOS	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	10,00	2,46
125	CONGLOMERADOS	10	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph	4,00	2,50
15	CONGLOMERADOS	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	11,33	2,55
18	CONGLOMERADOS	10	ESTEFANIENSE BASAL	20	Stph	6,67	2,57
12	CONGLOMERADOS	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	14,00	2,58
115	CONGLOMERADOS	10	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph	10,00	2,60
3	CONGLOMERADOS	10	ESTEFANIENSE BASAL	20	Stph	24,67	2,71
7	CONGLOMERADOS	10	ESTEFANIENSE BASAL	20	Stph	36,00	2,77

Tabla3.8. Valores de densidad y susceptibilidad de los conglomerados. [conglomerados.xls/den]

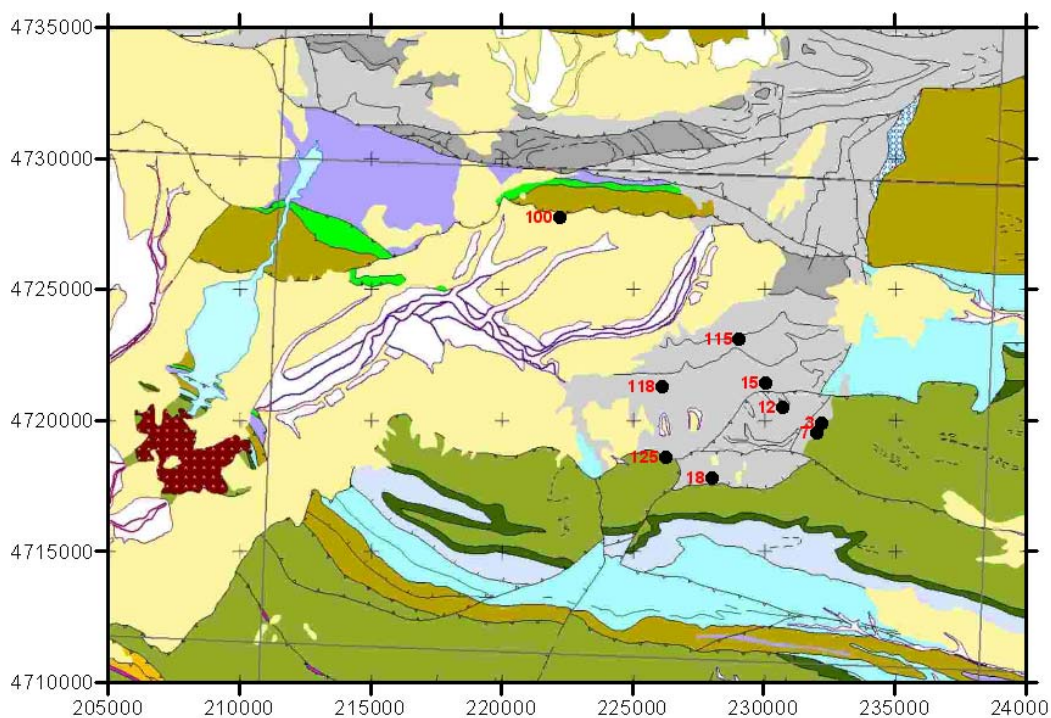


Fig. 3.18 Situación de las muestras de los conglomerados, con indicación del nº de muestra. [geologXYm; conlogmerados.xls/h1]

La clasificación en valores ordenados (Figura 3.19), presenta para la densidad una dispersión de 0.31 g/cm^3 , con valor medio de 2.59 g/cm^3 , que pasan a 0.14 g/cm^3 y 2.54 g/cm^3

respectivamente al no tener en cuenta las muestras 3 y 7, con valor superior a 2.7 g/cm^3 , ni la 100, con valor de 2.11 g/cm^3 .

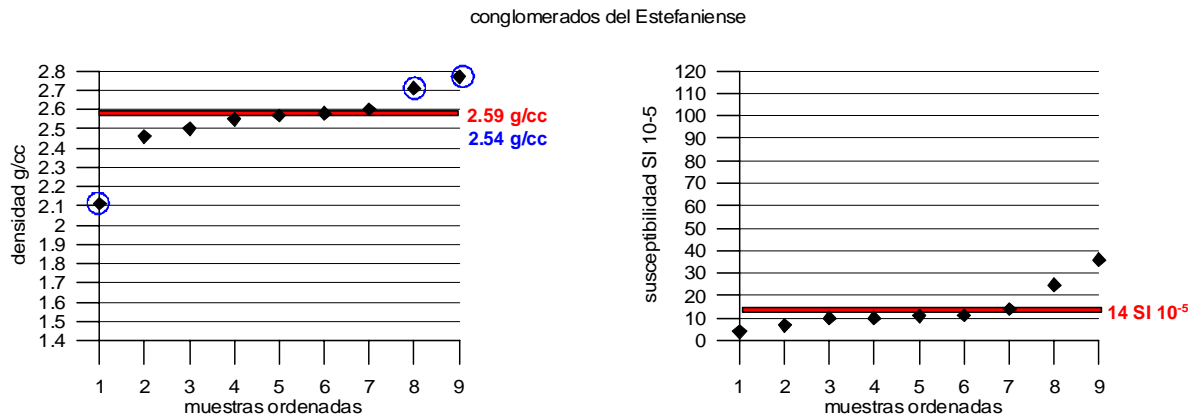


Fig. 3. 19 Clasificación de densidad y susceptibilidad para los conglomerados. En rojo se indica el valor medio considerando todas las muestras, y en azul una vez eliminadas las muestras indicadas por un círculo. [conglomerado; conglomerado.xls/den, conglomerado.xls/sus]

La susceptibilidad es muy homogénea, con valor medio de $14 \text{ SI } 10^{-5}$.

3.2.5.8. Cuarcitas

Son 27 muestras del Ordovícico Medio y Superior, excepto una muestra (nº 98) que pertenece al Silúrico y que no se ha considerado en los cálculos. El valor de sus parámetros y situación se reflejan en la Tabla 3.9 y Figura 3.20.

Nº	LITOLOGÍA	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD	k (10-5si)	d (gcm-3)
25	CUARCITAS	5	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	16,33	2,21
67	CUARCITAS	5	SERIE DE TRANSICIÓN	9T	Omed	1,00	2,39
86	CUARCITAS	5	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	0,00	2,40
82	CUARCITAS	5	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf	38,00	2,48
48	CUARCITAS	5	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf	0,00	2,49
59	CUARCITAS	5	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	3,00	2,50
66	CUARCITAS	5	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	0,00	2,53
136	CUARCITAS	5	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf	5,00	2,55
73	CUARCITAS	5	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf	0,00	2,56
87	CUARCITAS	5	FORMACIÓN VEGA DE ESPINAREDA	14	Osup	0,00	2,56
70	CUARCITAS	5	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	0,00	2,57
80	CUARCITAS	5	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	11,00	2,57
51	CUARCITAS	5	CUARCITA ARMORICANA	8	Oinf-med	0,00	2,58
19	CUARCITAS	5	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf	3,00	2,59
49	CUARCITAS	5	CUARCITA ARMORICANA	8	Oinf-med	0,00	2,59
64	CUARCITAS	5	FORMACIÓN VEGA DE ESPINAREDA	14	Osup	0,00	2,59
89	CUARCITAS	5	FORMACIÓN VEGA DE ESPINAREDA	14	Osup	0,00	2,59
63	CUARCITAS	5	FORMACIÓN VEGA DE ESPINAREDA	14	Osup	0,00	2,61
76	CUARCITAS	5	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	1,00	2,61
27	CUARCITAS	5	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf	2,33	2,62
50	CUARCITAS	5	CUARCITA ARMORICANA	8	Oinf-med	0,00	2,62
88	CUARCITAS	5	FORMACIÓN VEGA DE ESPINAREDA	14	Osup	0,00	2,63
90	CUARCITAS	5	FORMACIÓN VEGA DE ESPINAREDA	14	Osup	0,00	2,63
33	CUARCITAS MET. CONTACTO	5	FORMACIÓN VEGA DE ESPINAREDA	14	Osup	1,50	2,63
81	CUARCITAS	5	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf	7,00	2,64
99	CUARCITAS	5	FORMACIÓN VEGA DE ESPINAREDA	14	Osup	16,00	2,64
98	CUARCITAS	5	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	21,00	2,62

Tabla 3.9. Valores de densidad y susceptibilidad de las cuarcitas. [cuarcitas.xls/den]

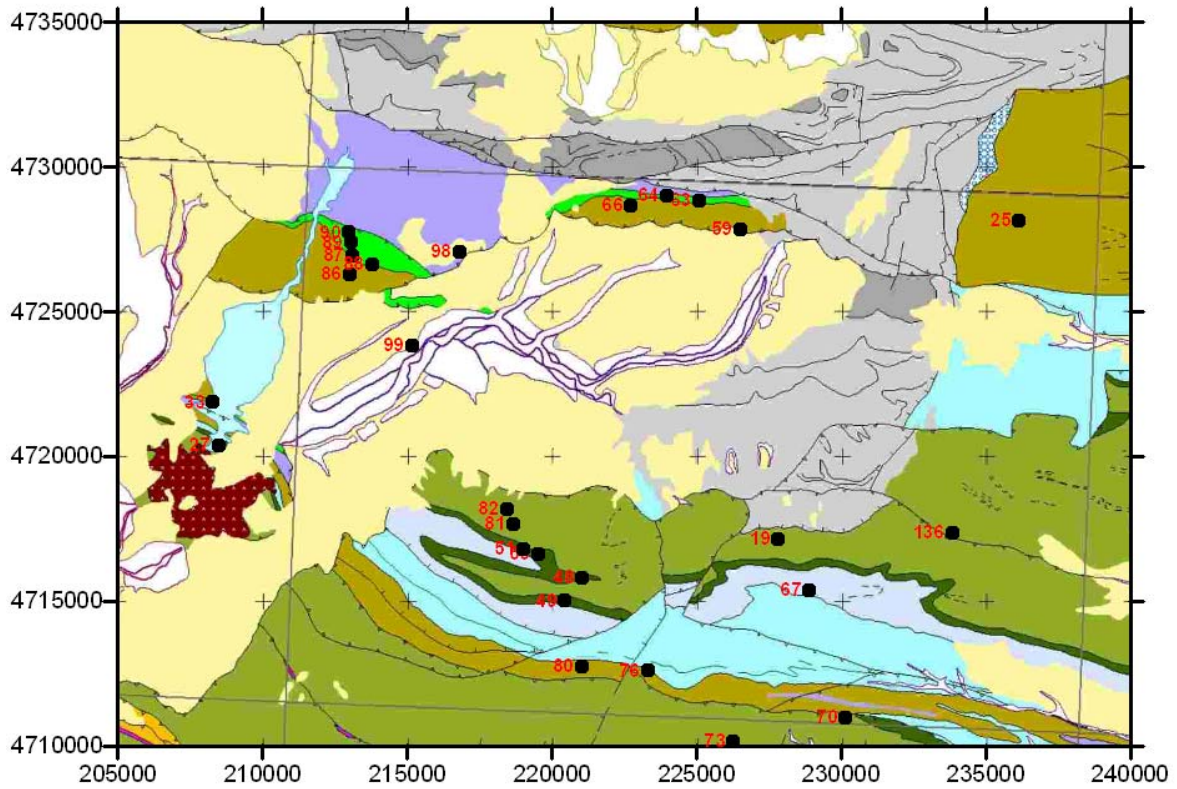


Fig. 3.20 Situación de las muestras de las cuarcitas, con indicación del nº de muestra. [geologXYm; cuarcitas.xls!h1]

El histograma de distribución por frecuencias para los valores de densidad (Figura 3.21) manifiesta que la mayor parte de las muestras tiene entre 2.5 y 2.7 g/cm³ de densidad. De nuevo, para este número de muestras el análisis de la distribución es más explícito en el diagrama de valores ordenados (Figura 3.22).

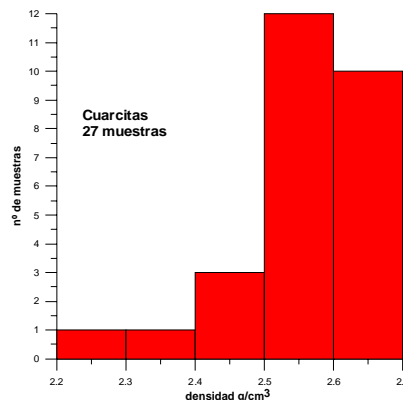


Fig. 3.21 Histograma de frecuencias de distribución de la densidad en las cuarcitas. [histocuarцитas; cuarcitas.xls/den N-O]

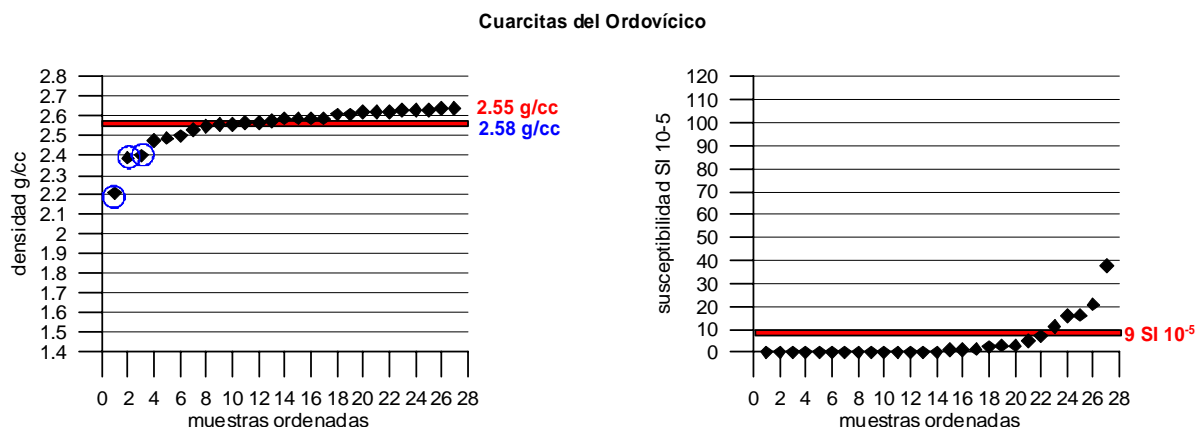


Fig.3.22 Clasificación de densidad y susceptibilidad para las cuarcitas. En rojo se indica el valor medio considerando todas las muestras, y en azul una vez eliminadas las muestras indicadas por un círculo. [cuarcitas; cuarcitas.xls/den, cuarcitas.xls/sus]

La densidad presenta muy buena agrupación, con rango o dispersión de 0.16 g/cm^3 (una vez eliminadas las muestras claramente desviadas nº 25, 67 y 86). El valor medio es de 2.58 g/cm^3 .

La susceptibilidad de la mayor parte de las cuarcitas es nula, excepto unas pocas situadas fundamentalmente en la Serie de los Cabos, con valor medio de $9 \text{ SI } 10^{-5}$.

Efectuando una clasificación por grupos estratigráficos (Figura 3.23) se obtiene para las cuarcitas de la serie de los Cabos una densidad media de 2.59 g/cm^3 , sin considerar las muestras 48 y 82 (densidad inferior a 2.5 g/cm^3). Para las cuarcitas Armoricanas la media es de 2.60 g/cm^3 , para las de la Formación Agüeira 2.56 g/cm^3 (sin considerar las muestras 25 y 82) y para las cuarcitas de la Vega 2.61 g/cm^3 . Estas diferencias son muy pequeñas, estando por debajo de la desviación normal de los valores, y además pertenecen a un número de muestras muy pequeño (de 3 a 8) para cada grupo, por lo que los resultados deben ser considerados como no forzosamente representativos.

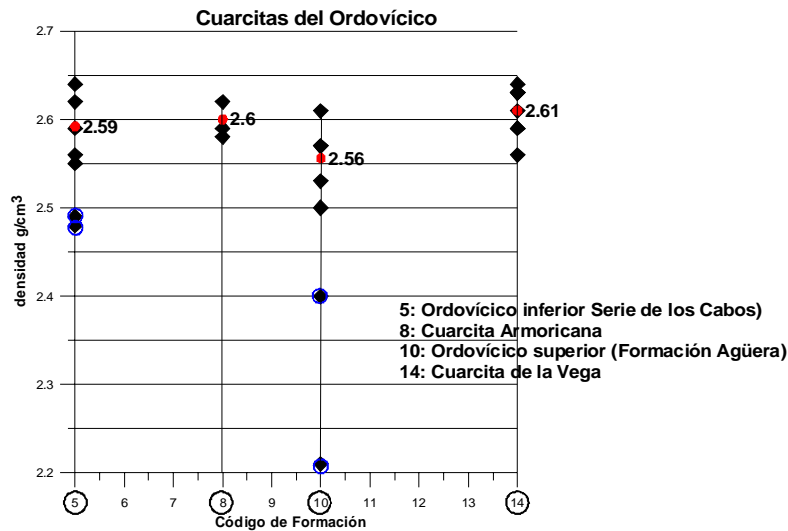


Fig.3.23 Clasificación de la densidad de las cuarcitas del Ordovícico según formaciones. El círculo azul indica las muestras no tenidas en cuenta para cálculo de la media. [clasif cuarcitas Ord; cuarcitas.xls/1 J-N, cuarcitas.xls/1 J-Q]

3.2.5.9. Granito

Son 6 muestras tomadas en el único afloramiento que aparece en la zona. El valor de sus parámetros y situación se reflejan en la Tabla 3.10 y Figura 3.24.

Nº	LITOLOGÍA	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD	k (10-5si)	d (gcm-3)
40	GRANITO	12	GRANITO DE PONFERRADA	G14	stph-P?	3,75	2,28
41	GRANITO	12	GRANITO DE PONFERRADA	G14	stph-P?	2,00	2,41
35	GRANITO	12	GRANITO DE PONFERRADA	G14	stph-P?	3,50	2,43
38	GRANITO	12	GRANITO DE PONFERRADA	G14	stph-P?	2,00	2,47
39	GRANITO	12	GRANITO DE PONFERRADA	G14	stph-P?	5,00	2,49
28	GRANITO	12	GRANITO DE PONFERRADA	G14	stph-P?	3,33	2,57

Tabla3.10. Valores de densidad y susceptibilidad de los granitos.[granito.xls/den]

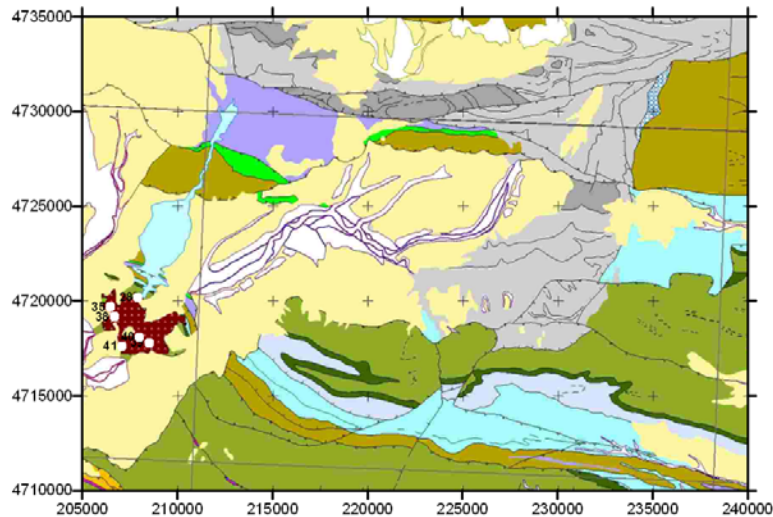


Fig.3.24 Situación de las muestras de granitos, con indicación del nº de muestra. [geologXYm; granito.xls!h1]

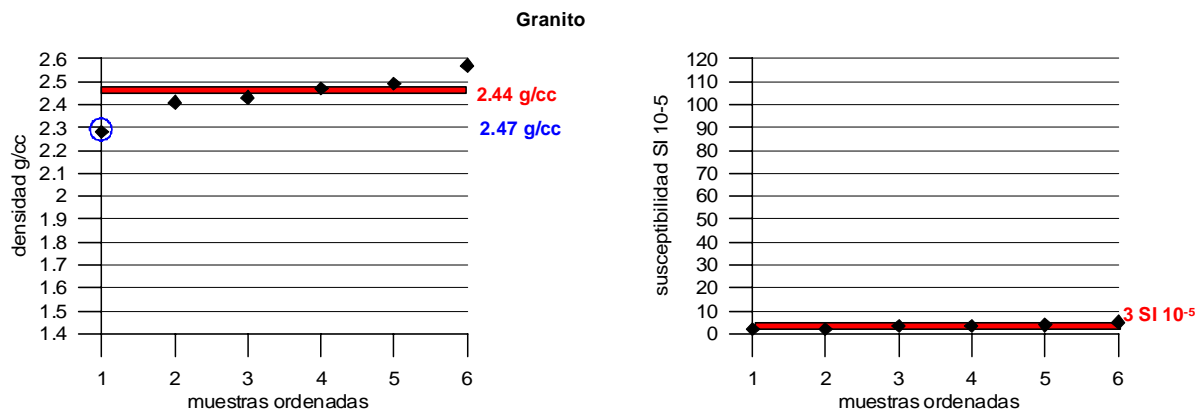


Fig.3. 25 Clasificación de densidad y susceptibilidad para los granitos. En rojo se indica el valor medio considerando todas las muestras, y en azul una vez eliminadas las muestras indicadas por un círculo. [granito; granito.xls/den, granito.xls/sus]

Sin tener en cuenta la muestra nº 40, ya que por su valor de densidad debe de estar bastante meteorizada y no es representativa, la densidad tiene un rango de 0.16 g/cm^3 , con valor medio de 2.47 g/cm^3 .

En cuanto a la susceptibilidad, muy homogénea, como corresponde a este tipo de rocas, es así mismo muy pequeña, de $3 \text{ SI } 10^{-5}$.

3.2.5.10. Pebble

Se trata de una muestra tomada en el Terciario, carente de interés para este estudio por su presencia muy puntual, mostrando una elevada densidad.

Nº	LITOLÓGÍA	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD	k (10-5si)	d (gcm-3)
17	PEBBLY MUDSTONE	4	TERCIARIO	T	T	35,00	2,71

Tabla3.11. Valores de densidad y susceptibilidad del pebble.[pebble.xls]

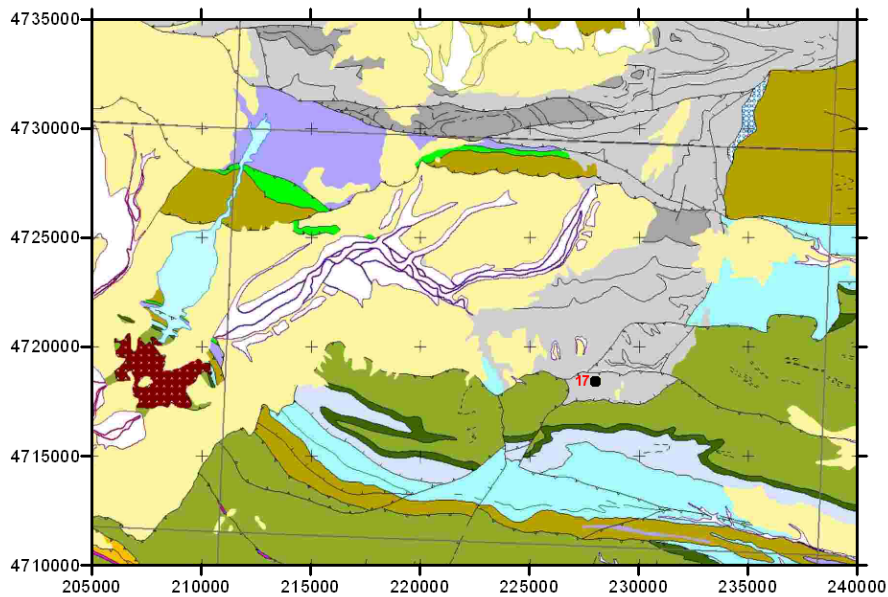


Fig. 3.26 Situación de la muestra de pebble. [geologXYm; pebble.xls]

3.2.5.11. Pizarras

Son un total de 64 muestras, de las cuales 36 están tomadas en el Ordovícico Medio - Inferior, 18 en el Estefaniense y 10 en el Silúrico. El valor de sus parámetros y situación se reflejan en la Tabla 3.12 y Figura 3.27.

Nº.M	LITOLÓGIA	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD	k (10-5si)	den (gcm-3)
55	PIZARRAS	10	SERIE DE TRANSICIÓN	9T	Omed	26,50	1,40
34	PIZARRAS	10	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	2,00	2,00
68	PIZARRAS	10	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	23,00	2,25
112	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph	20,50	2,27
85	PIZARRAS	10	FORMACION AGÛEIRA	10	Osup	20,00	2,31
111	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE CONSTANCIA-SUPERIOR	22c	Stph	9,00	2,35
60	PIZARRAS	10	FORMACION AGÛEIRA	10	Osup	22,50	2,37
84	PIZARRAS	10	FORMACION AGÛEIRA	10	Osup	13,33	2,38
120	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	36,50	2,40
92	PIZARRAS	10	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	18,50	2,44
24	PIZARRAS	10	FORMACION AGÛEIRA	10	Osup	28,00	2,45
62	PIZARRAS	10	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	0,00	2,45
53	PIZARRAS	10	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	20,00	2,46
54	PIZARRAS	10	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	32,00	2,46
56	PIZARRAS	10	SERIE DE TRANSICIÓN	9T	Omed	21,00	2,46
43	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph	23,00	2,46
65	PIZARRAS	10	FORMACION AGÛEIRA	10	Osup	21,00	2,47
123	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	17,00	2,48
75	PIZARRAS	10	SERIE DE LOS CABOS	5	Camed-Ordinf	32,00	2,50
93	PIZARRAS	10	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	32,00	2,50
23	PIZARRAS	10	FORMACION AGÛEIRA	10	Osup	22,00	2,51
69	PIZARRAS	10	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	9,00	2,51
8	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph	21,00	2,51
103	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE ALMAGARINOS	22z	Stph	25,00	2,51
91	PIZARRAS	10	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	28,00	2,52
108	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE CONSTANCIA-SUPERIOR	22c	Stph	23,00	2,52
29	PIZARRAS MET. CONTACTO	10	SERIE DE LOS CABOS	5	Camed-Ordinf	16,00	2,53
97	PIZARRAS	10	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	15,00	2,53
117	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	21,00	2,53
114	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph	21,00	2,53
26	PIZARRAS MET. CONTACTO	10	SERIE DE LOS CABOS	5	Camed-Ordinf	23,33	2,54
30	PIZARRAS	10	FORMACION AGÛEIRA	10	Osup	21,33	2,54
121	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	21,00	2,54
74	PIZARRAS	10	SERIE DE LOS CABOS	5	Camed-Ordinf	44,00	2,55
31	PIZARRAS	10	FORMACION AGÛEIRA	10	Osup	25,50	2,55
36	PIZARRAS MET. CONTACTO	10	SERIE DE LOS CABOS	5	Camed-Ordinf	43,50	2,56
72	PIZARRAS	10	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	56,50	2,56
32	PIZARRAS	10	FORMACION AGÛEIRA	10	Osup	32,50	2,57
20	PIZARRAS	10	SERIE DE LOS CABOS	5	Camed-Ordinf	3,67	2,59
21	PIZARRAS	10	SERIE DE LOS CABOS	5	Camed-Ordinf	7,00	2,59

Nº.M	LITOLOGÍA	CL	FORMACION	CÓDF	EDAD	k (10-5si)	den (gcm-3)
52	PIZARRAS	10	SERIE DE LOS CABOS	5	Camed-Ordinf	7,00	2,59
135	PIZARRAS	10	SERIE DE LOS CABOS	5	Camed-Ordinf	30,00	2,59
83	PIZARRAS	10	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	66,00	2,59
126	PIZARRAS	10	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	46,00	2,60
128	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph	33,00	2,60
105	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE ALMAGARINOS	22z	Stph	33,00	2,60
71	PIZARRAS	10	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	41,00	2,61
119	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	25,00	2,62
14	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	36,33	2,63
77	PIZARRAS	10	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	28,00	2,64
57	PIZARRAS	10	SERIE DE TRANSICIÓN	9T	Omed	29,50	2,65
37	PIZARRAS MET. CONTACTO	10	SERIE DE LOS CABOS	5	Camed-Ordinf	36,00	2,66
107	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE ALMAGARINOS	22z	Stph	24,00	2,66
79	PIZARRAS	10	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	33,50	2,67
116	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	30,00	2,67
78	PIZARRAS	10	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	41,00	2,71
94	PIZARRAS	10	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	47,00	2,71
1	PIZARRAS	10	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	36,33	2,73
134	PIZARRAS	10	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	42,00	2,74
10	PIZARRAS	10	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	29,00	2,74
61	PIZARRAS	10	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup	40,50	2,77
95	PIZARRAS	10	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	28,33	2,79
96	PIZARRAS	10	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S	26,00	2,79
2	PIZARRAS MINERALIZADAS	10	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed	120,00	3,36

Tabla3.12. Valores de densidad y susceptibilidad de las pizarras. [pizarras.xls/den]

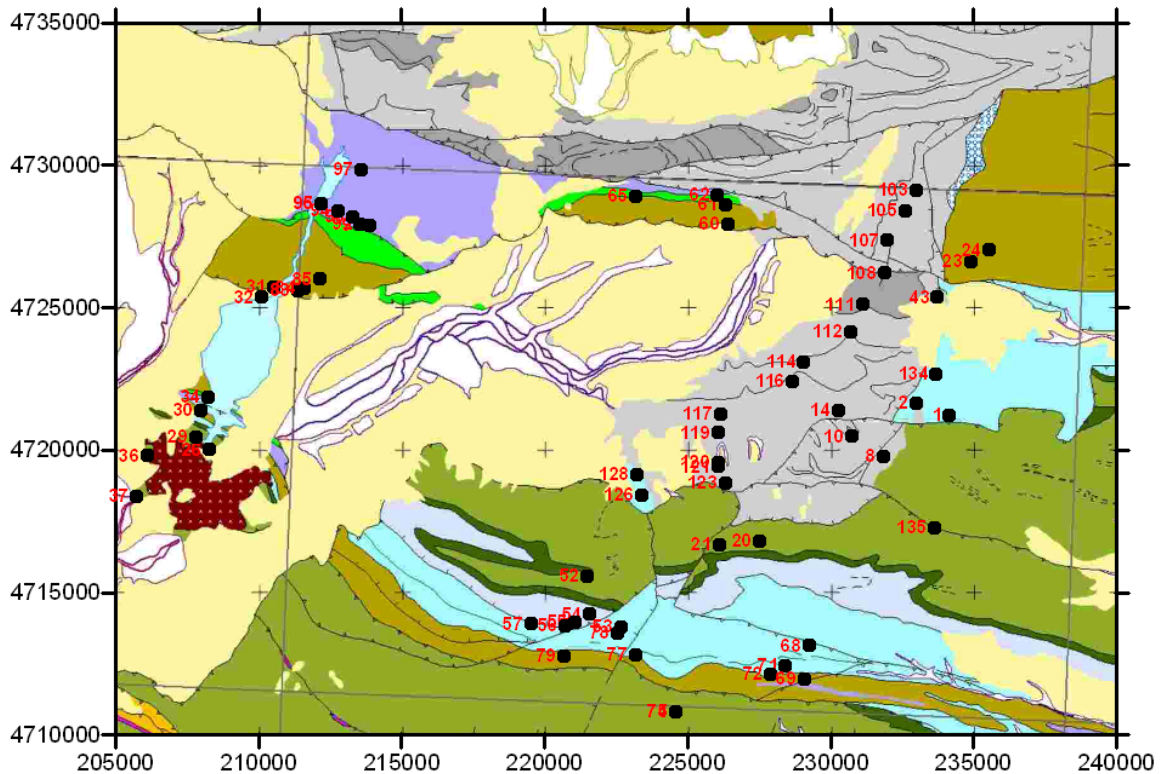


Fig. 3.27 Situación de las muestras de pizarra, con indicación del nº de muestra. [geologXYm; pizarras.xls!h1]

Es la litología más abundante en el área de estudio, y por lo tanto la más significativa para la modelación de las masas con finalidad de interpretación de las anomalías gravimétricas.

En la agrupación ordenada de la Figura 3.28 se aprecia que, en su conjunto, la densidad presenta un rango de 0.54 g/cm^3 una vez eliminadas las muestras de valor anómalo (nº 2, 34 y 55), y un valor medio de 2.55 g/cm^3 . A pesar de la aceptable agrupación este valor medio es de poca utilidad en modelación gravimétrica, debido al elevado rango de variación existente.

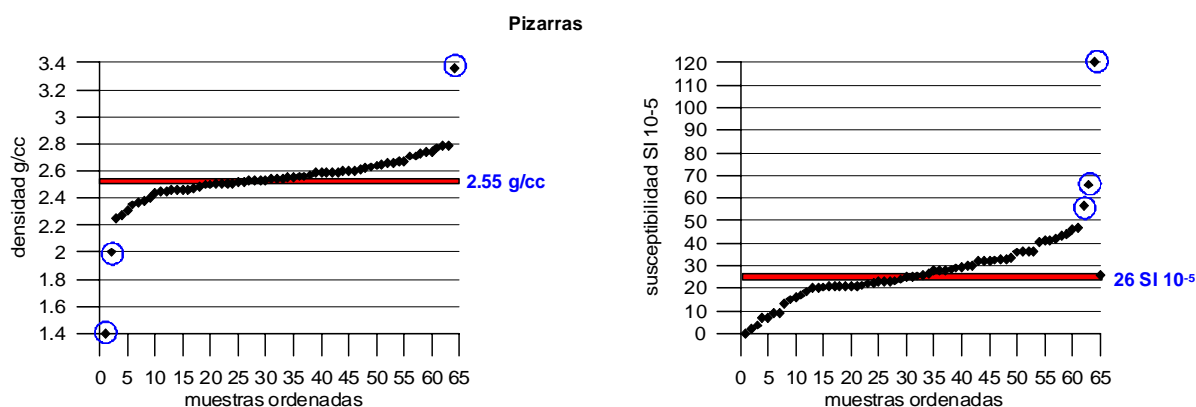


Fig. 3.28 Clasificación de densidad y susceptibilidad para las pizarras. En rojo se indica el valor medio considerando todas las muestras, y en azul una vez eliminadas las muestras indicadas por un círculo.[pizarras; pizarras.xls/den, pizarras.xls 1sus]

La susceptibilidad presenta también el mayor rango de variación de todas las litologías muestreadas, con valor medio de $26 \text{ SI } 10^{-5}$, una vez eliminadas las muestras 72, 83 y 2, que pueden estar mineralizadas.

En su conjunto, y debido a que el número de muestras tomado tiene mayor validez estadística que para otras litologías, el histograma de frecuencias (Figura 3.29) también permite apreciar que, salvo unas pocas muestras claramente desagrupadas, existe una buena agrupación del conjunto, aunque con elevado rango de variación, de forma que el 87 % de las muestras están comprendidas entre $2.4\text{-}2.8 \text{ g/cm}^3$, y el 58 % están entre $2.5\text{-}2.7 \text{ g/cm}^3$.

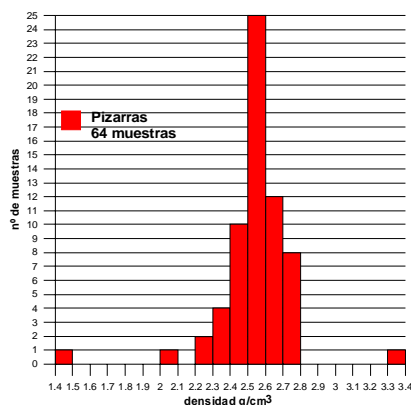


Fig.3.29 Histograma de frecuencias de la distribución de la densidad en las pizarras. [histopizarras; pizarras.xls/den N-O]

Para intentar una mejor definición petrofísica de esta litología se va a estudiar cada grupo estratigráfico de forma diferenciada. En primer lugar, se ha añadido al histograma general de la Figura 3.29, el histograma parcial de cada grupo lito-estratigráfico (Figura 3.30). Las 10 muestras del Silúrico carecen claramente, a estos efectos, de suficiente entidad, siendo las 36 muestras recogidas en el Ordovícico las principales responsables de la calidad de agrupación que muestra el histograma general.

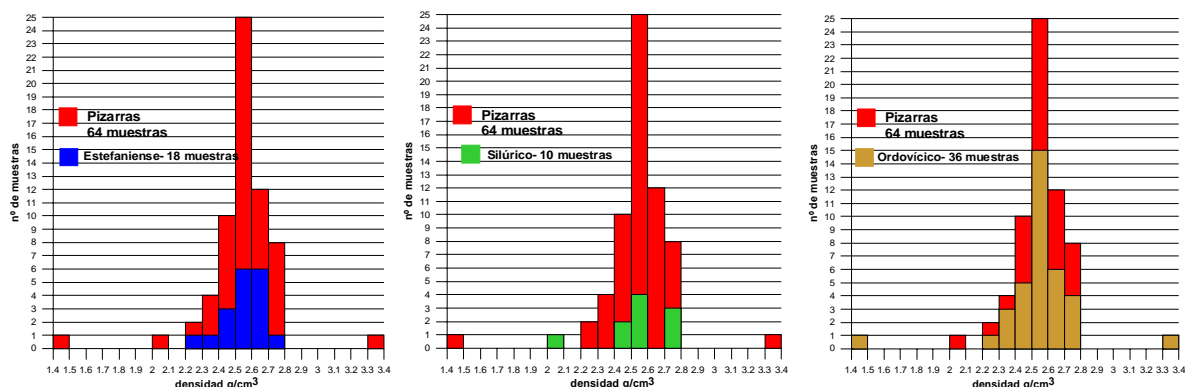


Fig.3.30 Histograma de frecuencias de distribución de la densidad en las pizarras con indicación de la aportación de las muestras recogidas en cada grupo estratigráfico. [histopizarras; pizarrasEstefaniens.xls/den I-J, pizarrasSilurico.xls/den I-J, pizarrasOrdo.xls/den I-J]

Resulta por lo tanto más ilustrativo para el análisis considerar la clasificación en valores crecientes. En la Figura 3.31 se ha añadido a la clasificación de densidad y de susceptibilidad de la Figura 3.28 una codificación en color según el grupo de pertenencia.

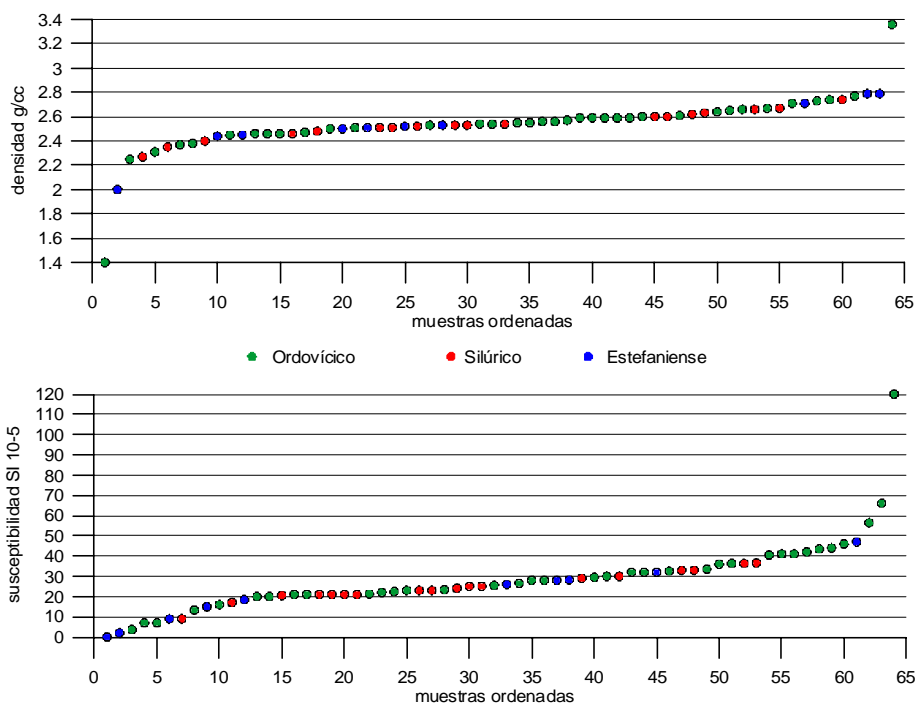


Fig. 3.31 Clasificación de densidad y susceptibilidad para las pizarras con indicación del grupo estratigráfico al que corresponde cada muestra.[todas pizarras orden Paleo]

Como se aprecia en dicho gráfico de conjunto, no existe una agrupación preferente de ningún piso estratigráfico dentro del rango de variación de las propiedades de las pizarras, por lo que, en principio no va a resultar muy factible pretender su caracterización individual.

En mayor detalle, para el conjunto de muestras tomadas en el Ordovícico (Figura 3.32), es necesario descartar la muestra nº 55, recogida en la serie de transición y con una densidad de 1.4 g/cm^3 , indicando que es una muestra muy alterada, y la nº 2, pizarra mineralizada con una densidad anómala de 3.66 g/cm^3 ; la media aritmética del resto es de 2.55 g/cm^3 . Para la susceptibilidad magnética, descartando las muestras con valores demasiado elevados para el rango presentado (nº 2, 72 y 83), el valor medio es de $27 \text{ SI } 10^{-5}$.

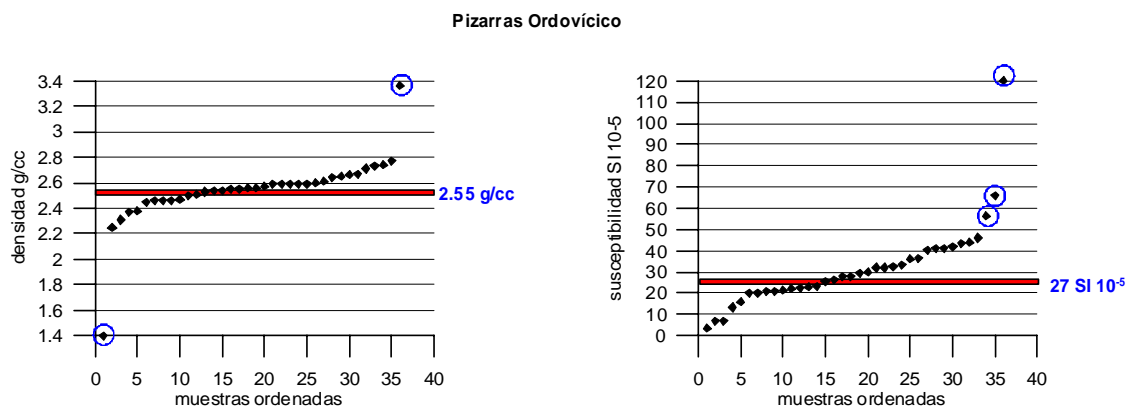


Fig. 3.32 Clasificación de densidad y susceptibilidad para las pizarras del Ordovícico. En rojo se indica el valor medio considerando todas las muestras, y en azul una vez eliminadas las muestras indicadas por un círculo. [pizarrasOrdoi; pizarrasOrdo.xls/den, pizarrasOrdo.xls/sus]

Puede establecerse una cierta distinción entre la densidad de las pizarras para las formaciones muestreadas (Figura 3.33): para el Ordovícico inferior (Serie de los Cabos, código de formación 5), y descartando el valor extremo de 2.66 g/cm^3 (muestra nº 37), la densidad media es de 2.56 g/cm^3 . En el Ordovícico medio (Pizarras de Luarca, código 9), el valor resultante es de 2.60 g/cm^3 , una vez descartadas las muestras 2, 68 y 55 (con valores de 1.4, 2.25 y 3.36 g/cm^3 respectivamente).

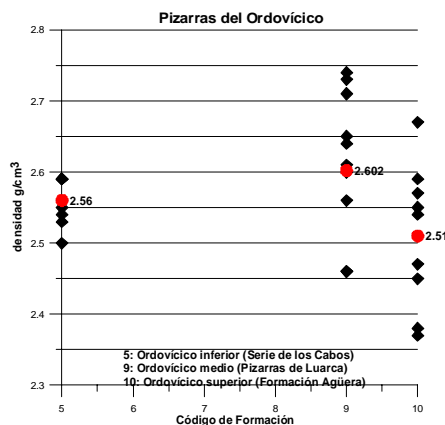


Fig. 3.33 Detalle de la distribución de densidad en las pizarras del Ordovícico, según Formaciones. [clasif pizarras Ord; pizarrasOrdov.xls/por codf]

El Ordovícico Superior (Formación Agüeira, código 10), descartando los extremos de 2.31 y 2.77 g/cm^3 (muestras 85 y 61), presenta un valor medio de 2.51 g/cm^3 . En cualquier caso, el número de muestras (de 10 a 14 para cada serie) no permite asegurar la representatividad de este resultado.

En cuanto a las muestras tomadas en el Silúrico (Figura 3.34), la n° 34 tiene una densidad demasiado baja (2.00 g/cm^3), presentando el resto una agrupación con rango de 0.4 g/cm^3 y valor medio de 2.58 g/cm^3 . No obstante, es claramente diferenciable un grupo de tres muestras, con valores superiores a 2.7 g/cm^3 . Sin este grupo, la densidad media sería de 2.49 g/cm^3 , lo que deberá tenerse en cuenta.

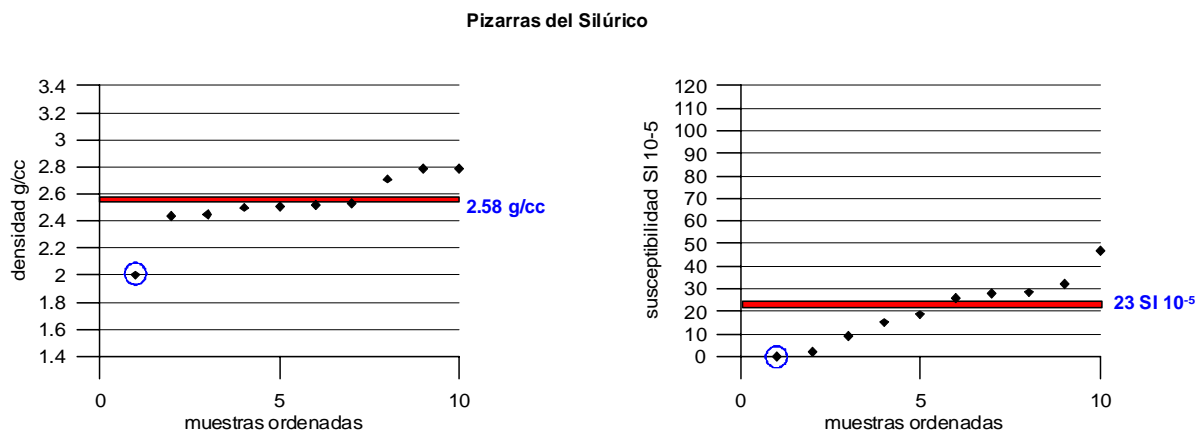


Fig. 3.34 Clasificación de densidad y susceptibilidad para las pizarras del Silúrico. En rojo se indica el valor medio considerando todas las muestras, y en azul una vez eliminadas las muestras indicadas por un círculo. [`\pizarrasSilur; pizarrasSilur.xls/den, pizarrasSilur.xls/sus`]

La susceptibilidad, descartando una muestra (n° 62) de valor nulo, tiene un valor medio de $23 \text{ SI } 10^{-5}$.

En el Estefaniense (Figura 3.35) el rango de densidad es de 0.47 g/cm^3 y el valor medio de 2.53 g/cm^3 , siendo la susceptibilidad media de $25 \text{ SI } 10^{-5}$.

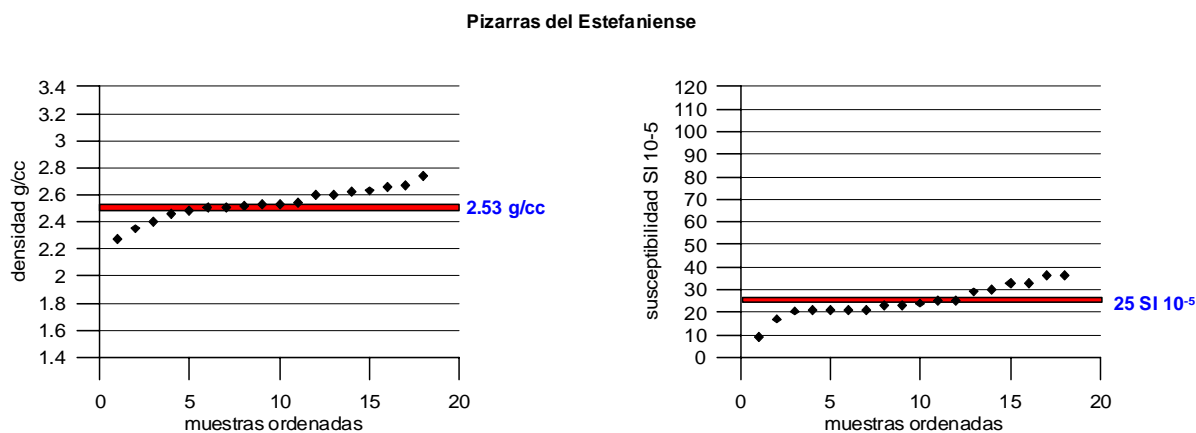


Fig. 3.35 Clasificación de densidad y susceptibilidad para las pizarras del Estefaniense. En rojo se indica el valor medio considerando todas las muestras, y en azul una vez eliminadas las muestras indicadas por un círculo. [`\pizarrasEstefa; pizarrasEstefa.xls/den, pizarrasEstefa.xls/sus`]

En resumen, en la Tabla 3.13 se sintetizan los rangos y valores medios de esta roca, según su pertenencia cronoestratigráfica:

	rango den	den media	rango suscept.	Suscept. media
todas pizarras	0,54	2,55	47	26
pizarras Ordovícico	0,52	2,55	42	27
pizarras Silúrico	0,40	2,58-2.49	47	23
pizarras Estefaniense	0,47	2,53	25	25

Tabla 3.13. Rangos y valores medios de la densidad y susceptibilidad de las pizarras.[pizarras rangos y medias.xls]

3.2.6. Análisis de conjunto y determinación de valores a adoptar para la Gravimetría.

En la Tabla 3.14 se resume el resultado de los elementos principales del análisis anteriormente efectuado. Se indica para cada litología el número de muestras disponibles, su código de clasificación CL para este informe y el piso estratigráfico donde se encuentran las muestras. Para cada parámetro se indican las muestras que se han eliminado de los cálculos por presentar valores fuera del rango normal para el resto de las muestras de cada grupo, el valor medio aritmético determinado con el resto de las muestras y el rango de variación con expresión explícita de sus valores extremos.

Para facilitar la toma de criterios a adoptar en el proceso de modelación, se han seleccionado varias formas de analizar el conjunto de datos, ya que son las diferencias y matices existentes entre los diversos grupos lo que hay que tener en cuenta a la hora de adoptar un valor y dar un límite a su variación.

Litología	n° M	CL	DENSIDAD g/cm ³				SUSCEPTIBILIDAD SI 10 ⁻⁵				piso
			eliminadas	med	extremos	rango	eliminadas	med	extremos	rango	
Arcillas	8	1	131, 130	2,07	1,94-2,12	0,18	131,122	16	5-33	28	Terciario
Arena	2	2		1,93	1,88-1,99	0,11		11	4-17	13	Terciario
Caliche	1	3		2,5				15			Terciario
Pebble	1	4		2,71				35			Terciario
Cuarcitas	27	5	25,67 ,86	2,58	2,48-2,64	0,16	98	9	0-38	38	Ordovícico
Pizarra Ordovícico	36	6	55,2	2,55	2,25-2,77	0,52	2,72,83	27	4-46	42	Ordovícico
Pizarra Silúrico	10	7	34	2,58 2,49	2,44-2,79	0,35	62	23	2-47	45	Silúrico
Areniscas	15	8	127,110, 45,122	2,51	2,38-2,63	0,25		17	8-37	29	Estefaniense
Brechas	2	9		2,71	2,65-2,75	0,1		12	10-13	3	Estefaniense
Conglomerados	9	10	100,3,7	2,54	2,46-2,6	0,14	100	14	4-36	32	Estefaniense
Pizarra Estefan.	18	11		2,53	2,27-2,74	0,47		25	9-37	28	Estefaniense
Granito	6	12	40	2,47	2,41-2,57	0,16		3	2-5	3	granito

Tabla3.14. Síntesis de los resultados del análisis individual de cada grupo litológico.[resumen medias y rangos.xls]

Una visión cualitativa de conjunto se refleja en las Figuras 3.36 y 3.37, donde se representa la distribución de valores de los parámetros considerando los valores medidos para cada muestra con independencia de su litología. La agrupación de la densidad, muestra claramente que entre las rocas del Terciario y el resto existe un contraste importante de densidad, de al menos 0.4 g/cm³. Sin embargo, la susceptibilidad magnética, es claramente homogénea dentro de un rango de variación de 40 10⁻⁵ unidades SI, por lo que solamente cabe esperar la existencia de anomalías de campo magnético de forma muy local. Sin embargo, la consideración conjunta de la densidad y de la susceptibilidad, como se verá en el apartado 3.2.8, podría presentar algún criterio diferenciador de unidades litológicas.

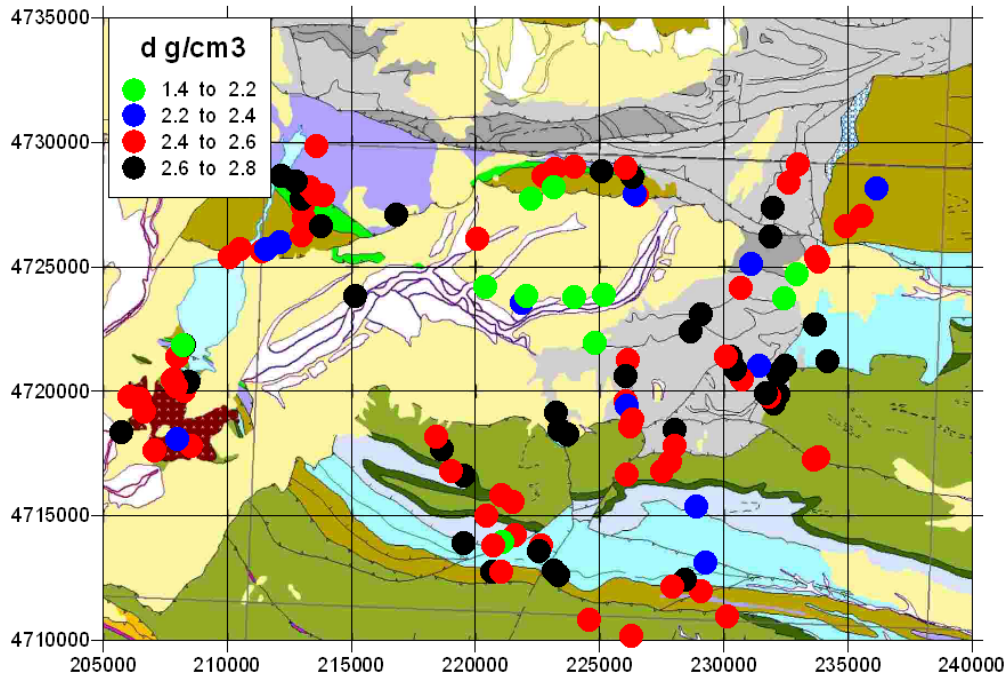


Fig. 3.36 Distribución geológica de los valores de densidad. [k y d clasificados; PB-modifk.xls]

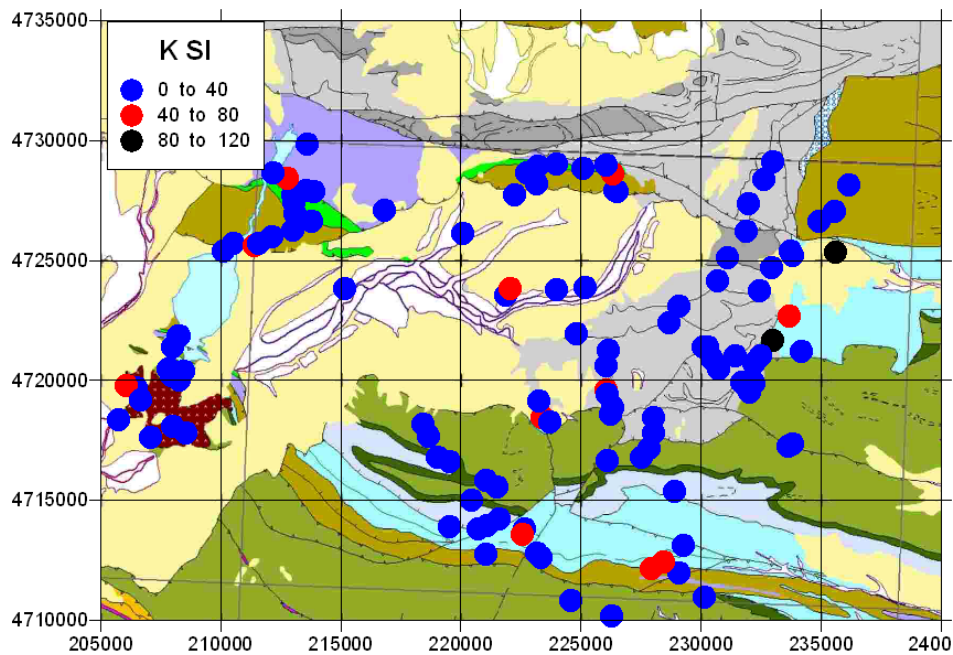


Fig. 3.37 Distribución geológica de los valores de susceptibilidad magnética. [k y d clasificados; PB-modifk.xls]

Otra forma de ver los resultados en su conjunto es la representación efectuada en la Figura 3.38, donde se visualiza el rango de variación de cada parámetro y su valor medio utilizando solamente las muestras no rechazadas en el análisis individual de cada litología. Se han incluido las muestras de caliche, pebble y brechas, que no deben ser en realidad consideradas en un análisis de conjunto, por su escasa significación. El contraste entre las rocas

sedimentarias y las metamórficas se manifiesta efectivamente de al menos 0.4 g/cm^3 . Es evidente que las pizarras, por su propia naturaleza, presentan unos rangos de variación muy grandes, y que los valores medios pueden no ser forzosamente significativos; en cualquier caso, sería muy aventurado tratar de distinguir entre las diversas pizarras de acuerdo con su origen estratigráfico.

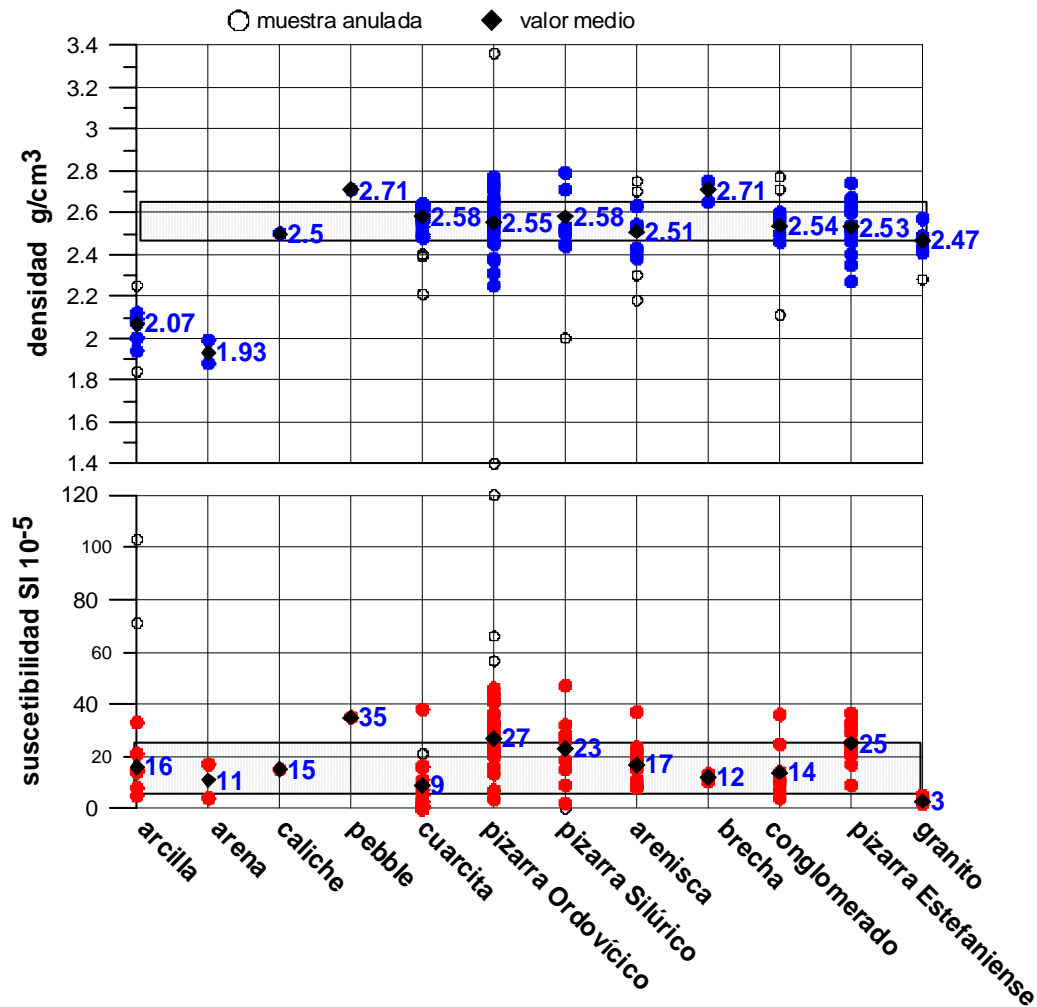


Fig. 3.38 Visión conjunta de los valores de densidad y susceptibilidad para cada litología, con especificación de su valor medio y rango de variación. Se indican las muestras que han sido rechazadas por sus valores extremos. La zona sombreada marca los rangos de 0.1 g/cm^3 y de $20 \cdot 10^{-5} \text{ SI}$ en los que están incluidos los valores medios de cada parámetro. [den-sus por litos vertical; PBcorto.xls, PBcorto simplificado.xls/todas, resumen rangos y medias.xls/solod]

En cuanto a la susceptibilidad, el amplio rango aparente que se manifiesta en la Figura 3.38 (excepto para el granito), ya se ha comentado que es debido a que se trata de valores muy bajos de este parámetro, habiéndose utilizado una escala inadecuada, que exagera sus contrastes.

Todos los valores medios de densidad de las rocas metamórficas están incluidos en un rango de 0.1 g/cm^3 , lo que hace difícil pensar en una posible diferenciación por sus anomalías gravimétricas. Lo mismo ocurre con la susceptibilidad, que para todas las rocas está en un rango de $20 \cdot 10^{-5} \text{ SI}$.

En la Figura 3.39 se propone una columna lito-estratigráfica ficticia, en la que se han dispuesto los valores de densidad dentro de cada unidad clasificados por litologías y ordenados en función del valor creciente. Las conclusiones que pueden obtenerse son las mismas ya especificadas para las representaciones anteriormente presentadas, visualizándose la posibilidad de caracterizar la densidad de algunas unidades cartografiadas.

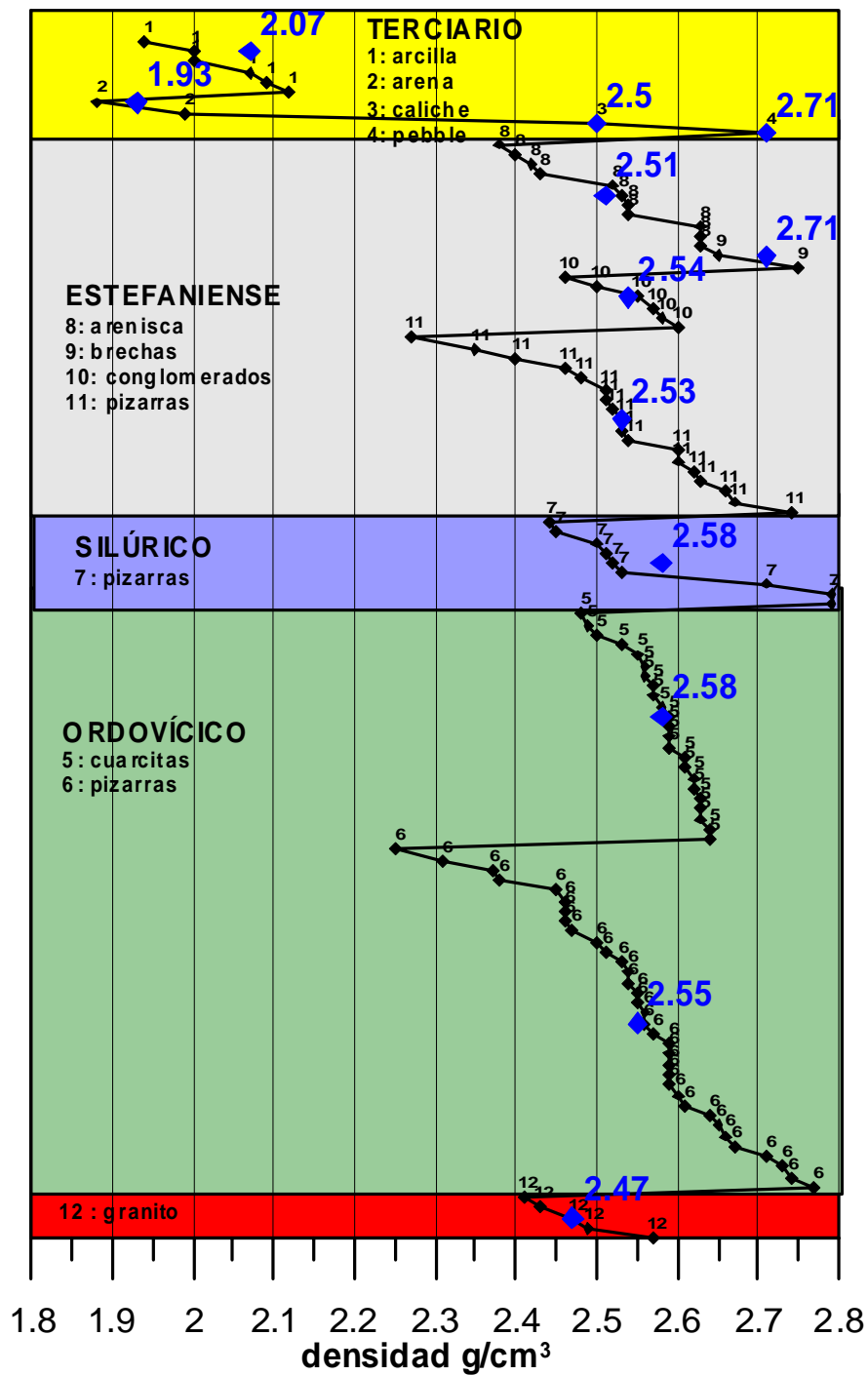


Fig. 3.39 Columna lito-estratigráfica ficticia con los valores de la densidad ordenada de forma creciente para cada litología dentro de cada unidad. Se indica el código de litología de cada muestra. Sólo se han considerado las muestras no rechazadas para cada grupo. [litos por pisos; PBcortosimplificado.xls/denbuenos, resumen medias y rangos.xls/1 E-N]

3.2.7. Conclusiones sobre la densidad

En conclusión y resumen (Tabla 3.15 y 3.16, Figuras 3.40 y 3.41):

- El Terciario, o propiamente los terrenos formados por arcillas con algunas arenas, pueden caracterizarse en un modelo gravimétrico por una densidad de 2.0 g/cm^3
- El Estefaniense, formado fundamentalmente por pizarras y areniscas, puede modelizarse con una densidad de 2.52 g/cm^3 .

M	LITOLOGÍA	FORMACION	CÓDF	EDAD		densidad		
9	ARCILLAS	TERCIARIO	T	T	TERCIARIO	2,00		
2	ARENAS	TERCIARIO	T	T				
1	CALICHE	TERCIARIO	T	T				
1	CONGLOMERADOS	TERCIARIO	T	T				
1	PEBBLY MUDSTONE	TERCIARIO	T	T				
3	CONGLOMERADOS	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph	ESTEFANIENSE	2,52		
8	ARENISCAS	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph				
8	PIZARRAS	ESTEFANIENSE CHUCHU-TORRE	22a	Stph				
1	CONGLOMERADOS	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph				
2	ARENISCAS	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph				
3	PIZARRAS	ESTEFANIENSE SARITA-NUEVA	22b	Stph				
2	ARENISCAS	ESTEFANIENSE CONSTANCIA-SUPERIOR	22c	Stph				
2	PIZARRAS	ESTEFANIENSE CONSTANCIA-SUPERIOR	22c	Stph				
2	ARENISCAS	ESTEFANIENSE ALMAGARINOS	22z	Stph				
3	PIZARRAS	ESTEFANIENSE ALMAGARINOS	22z	Stph				
1	ARENISCAS	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph				
1	CONGLOMERADOS	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph				
2	PIZARRAS	ESTEFANIENSE ANCHAS-ESTRECHAS	21	Stph				
2	BRECHAS	ESTEFANIENSE BASAL	20	Stph				
3	CONGLOMERADOS	ESTEFANIENSE BASAL	20	Stph				
1	CUARCITAS	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S			SILÚRICO	2,54
10	PIZARRAS	SILURICO INDIFERENCIADO	16	S			ORDOVÍCICO	2,57
4	PIZARRAS MET. CONTACTO	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf				
6	PIZARRAS	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf				
7	CUARCITAS	SERIE DE LOS CABOS	5	Omed-Oinf				
3	CUARCITAS	CUARCITA ARMORICANA	8	Oinf-med				
1	PIZARRAS	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed				
1	PIZARRAS MINERALIZADAS	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed				
9	PIZARRAS	FORMACIÓN LUARCA	9	Omed				
1	CUARCITAS	SERIE DE TRANSICIÓN	9T	Omed				
3	PIZARRAS	SERIE DE TRANSICIÓN	9T	Omed				
7	CUARCITAS	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup				
12	PIZARRAS	FORMACION AGÜEIRA	10	Osup				
8	CUARCITAS	FORMACIÓN VEGA DE ESPINAREDA	14	Osup				
6	GRANITO	GRANITO DE PONFERRADA	G14	Stph-P?		2,47		

Tabla 3.15. Distribución de muestras por litologías y Formaciones, con el valor de densidad que puede ser asignado en su modelación gravimétrica. [resumen por lito paleo densidad final.xls]

- Las pizarras del Silúrico presentan la ambigüedad de tener una densidad media de 2.58 g/cm^3 , que pudiera reducirse a 2.49 g/cm^3 si las muestras de mayor densidad no

resultan ser representativas. La adopción del valor 2.54 g/cm^3 puede ser un compromiso aceptable, dando así un valor creciente a la densidad de las pizarras con su edad geológica, y significando que serán difícilmente diferenciables de las litologías supra y subyacentes.

- La cuarcita del Ordovícico es una roca más homogénea, por lo que el valor medio de 2.58 g/cm^3 es una buena opción para representarlas. Solamente las Cuarcitas Armoricanas y las cuarcitas de la Formación de la Vega podrían individualizarse como formaciones con solamente esta litología, y tienen un valor medio de 2.60 g/cm^3 , pero en cualquier caso resultan, al menos en principio, unidades poco útiles para una modelación gravimétrica. Para el resto del Ordovícico esta litología hay que considerarla junto con las pizarras.
- Las pizarras del Ordovícico, cuyo valor de densidad media de 2.55 g/cm^3 , presentan una alta dispersión. Quizá podrían individualizarse las de Luarca, con densidad media de 2.60 g/cm^3 . El resto, junto con las cuarcitas, puede ser considerado con una densidad de 2.54 g/cm^3 para la Formación Agüeda y de 2.57 g/cm^3 para la Serie de los Cabos.

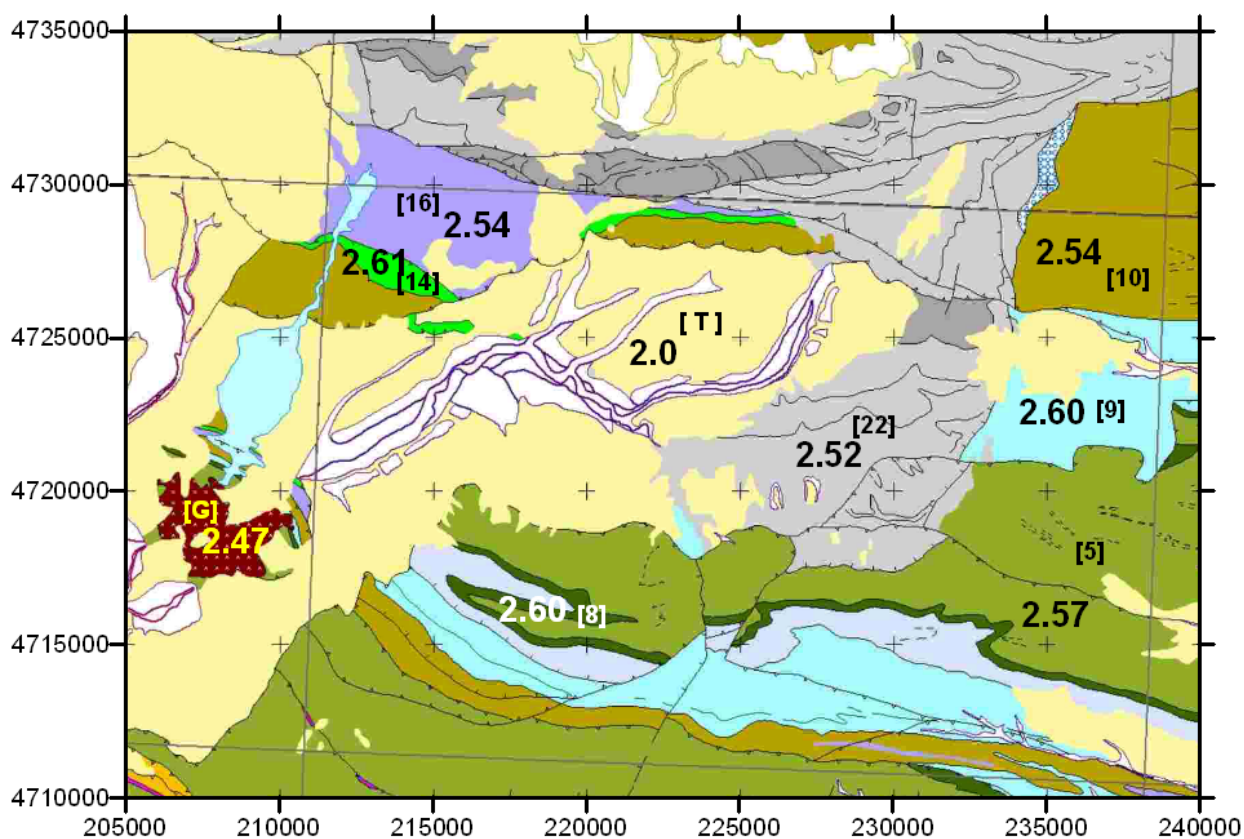


Fig. 3.40 Resumen de densidad que pueden adoptarse en la modelación gravimétrica. El valor [] se refiere al código identificador de la unidad geológica, según la Figura 3. [geologXYm]

Considerando el resultado del análisis efectuado con el detalle de la caracterización de las unidades formadas por una sola litología, que se resume en la Tabla 3.16, en la Figura 3.41 se han individualizado aquellas formaciones que están formadas fundamentalmente por una sola litología.

litología	nº m	CL	d med	piso	Cod. F.
arcillas	8	1	2,07	Terciario	T
arena	2	2	1,93	Terciario	T
caliche	1	3	2,5	Terciario	T
Pebble	1	4	2,71	Terciario	T
Cuarcitas	27	5	2,58	Ordovícico	
	7		2,59	F. Cabos	5
	3		2,6	Armoricanas	8
	7		2,56	F. Agüeira	10
	8		2,61	F. Vega	14
Pizarras	64		2,55		
Pizarra Estefaniense	18	11	2,53	Estefaniense	22
Pizarra Silúrico	10	7	2,58	Silúrico	16
Pizarra Ordovícico	36	6	2,55	Ordovícico	
	10		2,56	F. Cabos	5
	14		2,6	F. Luarca	9
	12		2,51	F. Agüeira	10
areniscas	15	8	2,51	Estefaniense	22
brechas	2	9	2,71	Estefaniense	22
Conglomerados	9	10	2,54	Estefaniense	22
Granito	6	12	2,47	granito	

Tabla 3.16. Síntesis de los resultados del análisis individual de cada grupo litológico, con detalle de la caracterización de unidades estratigráficas y/o formaciones. [resumen medias y rangos.xls/solod]

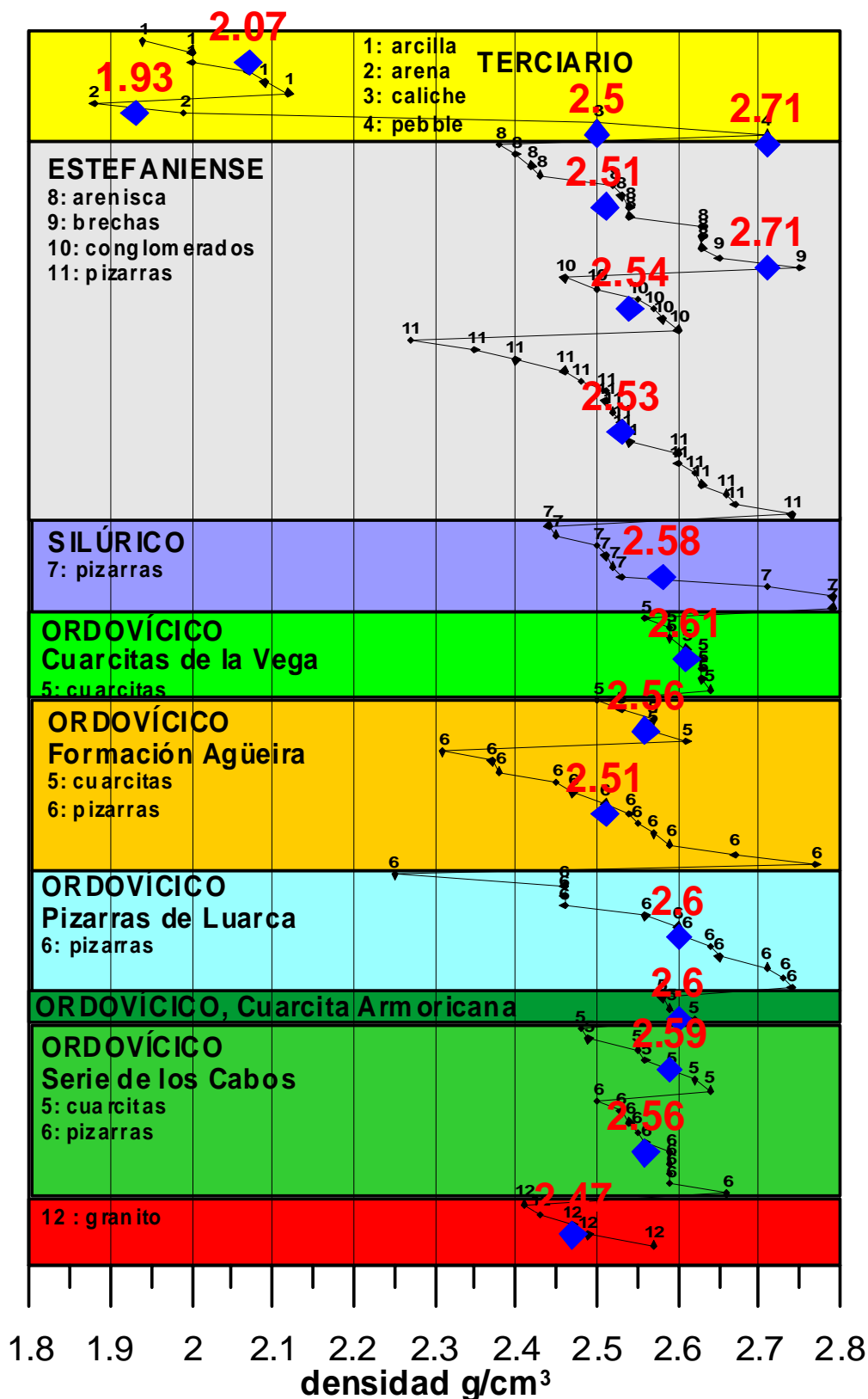


Fig. 3.41 Columna lito-estratigráfica ficticia con los valores de la densidad ordenada de forma creciente para cada litología dentro de cada unidad, diferenciando aquellas que pueden considerarse de una sola litología. Se indica el código de litología de cada muestra. Sólo se han considerado las muestras no rechazadas para cada grupo.[todos litos por todos pisos log; resumen medias y rangos.xls/solod dmed-G, den ordenada por pisos litos.xls M-seqnumber]

3.2.8. Estudio susceptibilidad-densidad

Como ya se ha comentado anteriormente (fundamentalmente en las Figuras 3.8, 3.38 y 3.39), el conjunto de rocas muestreadas presentan un escaso contraste de densidad, estando su valor medio entorno a los 2.60 g/cm^3 , excepto para las arcillas y arenas del Terciario. La susceptibilidad es aún más homogénea, además de presentar valores intrínsecamente muy bajos.

El valor de ninguna propiedad física de las rocas identifica inequívocamente a una litología. Sin embargo, la combinación de parámetros sí que permite, en algunas circunstancias, obtener criterios más selectivos para esta identificación. En las Figuras 3.42 a 3.47 se presentan las relaciones susceptibilidad- densidad por grupos lito-estratigráficos. Otra de las características de este tipo de relaciones es su capacidad para poner de manifiesto la presencia de valores anómalos, bien por la especial circunstancia que puede tener alguna muestra, bien por tratarse de posibles errores.

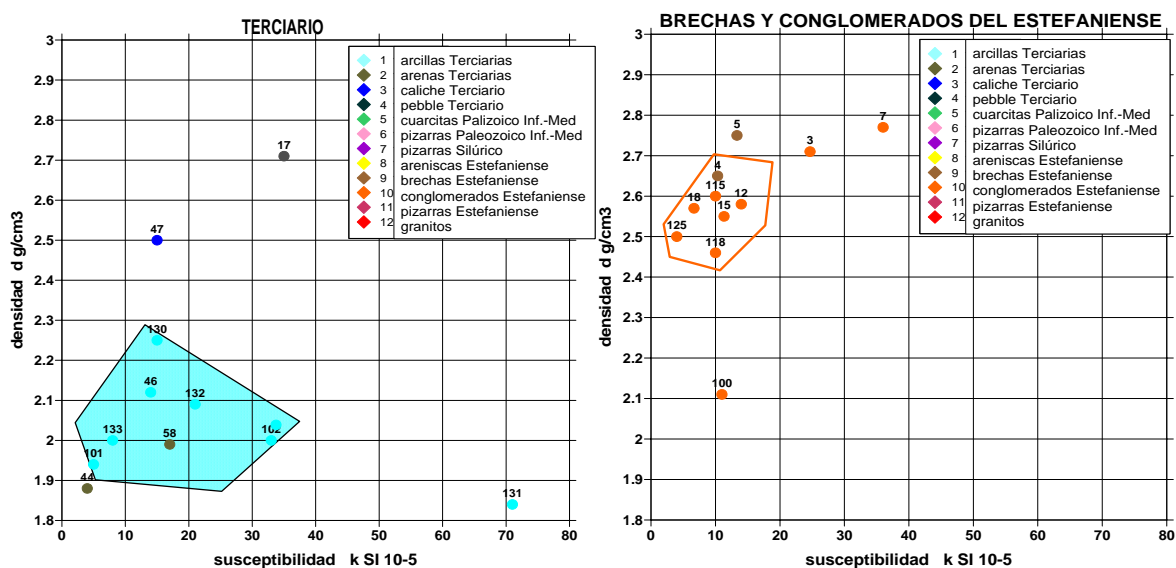


Fig. 3.42 Relación susceptibilidad – densidad para las arcillas, arenas, brechas y conglomerados. Se indica el nº de cada muestra. [Plot k-d; “lito.xls” correspondiente]

En el grupo de rocas sedimentarias del Terciario (Figura 3.42), aparte de que el caliche y el pebble tienen unas propiedades no representativas para este análisis, la muestra 131 presenta una clara anomalía, tanto en su densidad como en susceptibilidad. En las brechas y conglomerados del Estefaniense (Figura 3.42) las muestras nº 3, 7 y 10 se apartan así mismo de la agrupación más características de estas rocas por su rango k-d.

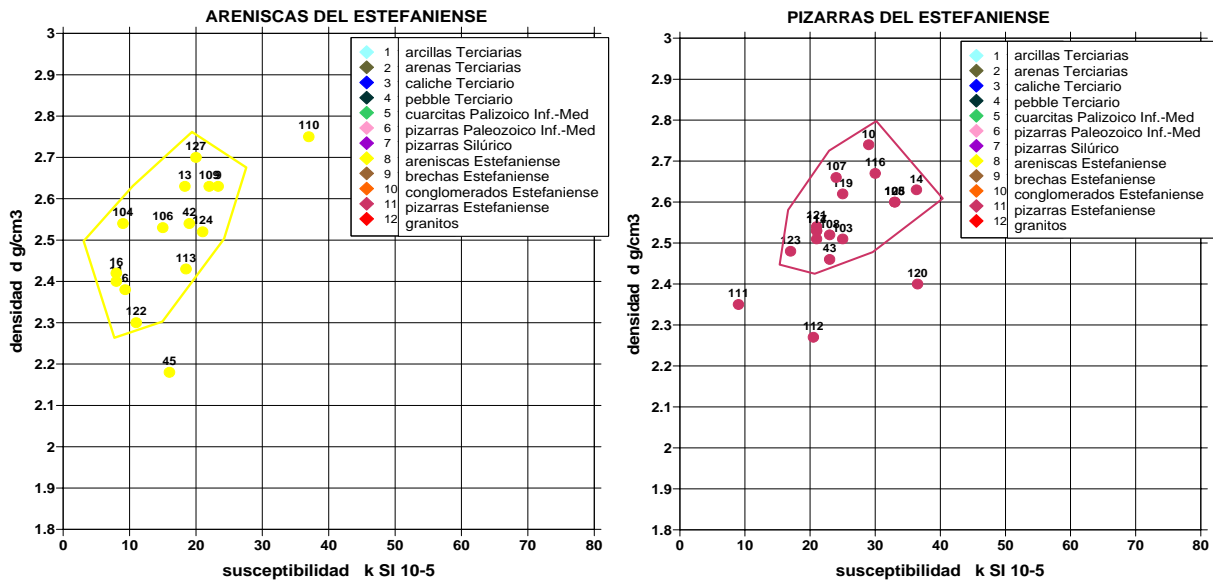


Fig. 3.43 Relación susceptibilidad – densidad para las areniscas y pizarras del Estefaniense. Se indica el nº de cada muestra. [Plot k-d; “lito.xls” correspondiente]

En las areniscas del Estefaniense (Figura 3.43) no deben tenerse en cuenta las muestras 45 y 110, presentando el resto una buena agrupación k-d, lo mismo que ocurre con las pizarras de este piso, excepto las muestras 111,112 y 120 (Figura 3.43).

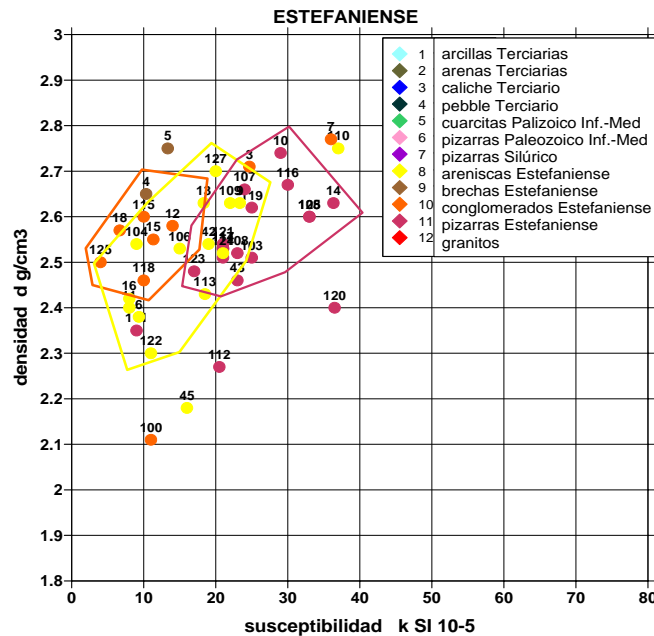


Fig. 3.44 Relación susceptibilidad – densidad para las litologías del Estefaniense. Se indica el nº de cada muestra. [Plot k-d; “lito.xls” correspondiente]

En su conjunto, dentro del Estefaniense (Figura 3.44) no existe una clara diferenciación en cuanto a la densidad de sus litologías, excepto para algunas areniscas; la densidad aumenta

con la susceptibilidad magnética para todos los grupos. La caracterización k-d difiere entre los conglomerados y las pizarras, solapándose ambos con las areniscas.

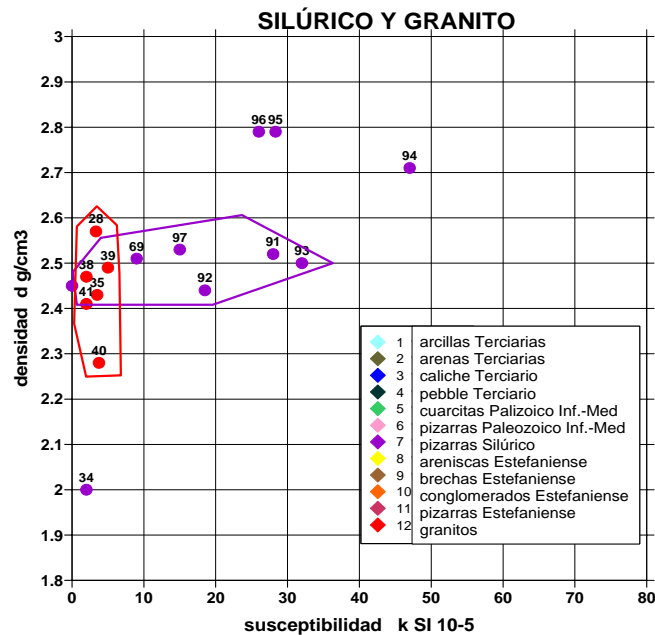


Fig. 3.45 Relación susceptibilidad – densidad para las pizarras del Silúrico y para el granito. Se indica el n° de cada muestra. [Plot k-d; “lito.xls” correspondiente]

Las pizarras del Silúrico (Figura 3.45) presentan dos claras agrupaciones, diferenciadas por su densidad; pensamos que el grupo más denso (n° 94, 95 y 96) es menos representativo de esta litología, quedando el resto bien agrupado; la muestra 34 debe descartarse. En cuanto al granito, representado en la misma Figura 3.45, se caracteriza claramente por su estrecho rango de variación de la susceptibilidad, con la muestra n° 40 destacada por su baja densidad respecto del grupo.

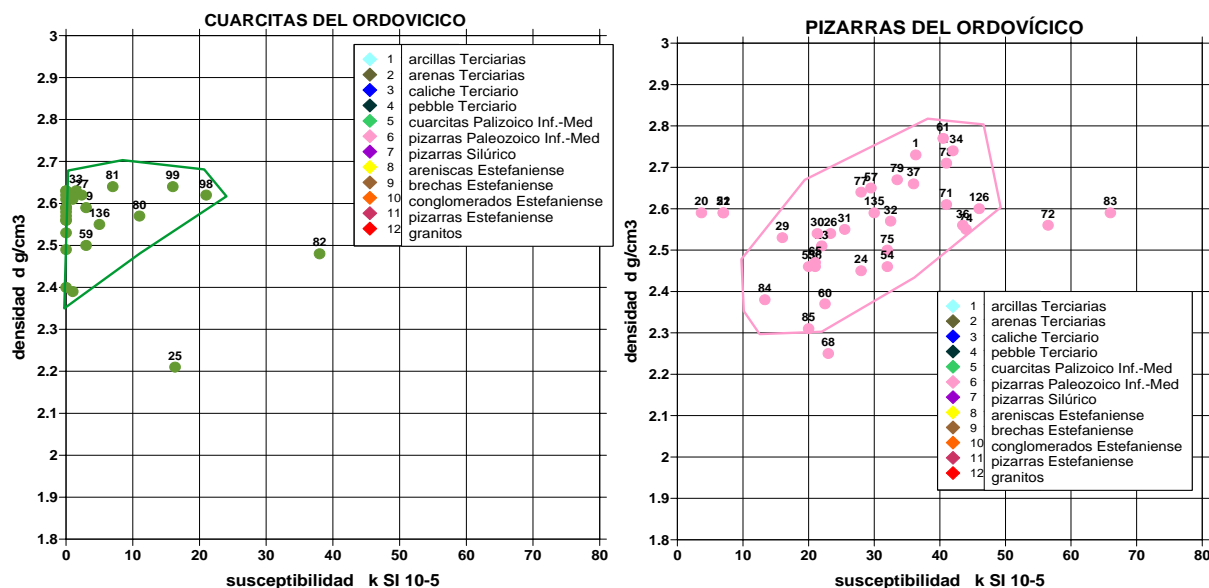


Fig. 3.46 Relación susceptibilidad – densidad para las cuarcitas y pizarras del Ordovícico. Se indica el nº de cada muestra. [Plot k-d; “lito.xls” correspondiente]

Las cuarcitas del Ordovícico están bien agrupadas (Figura 3.46), debiendo descartarse las muestras nº 25 y 82. La otra litología de este piso, las pizarras, muestran una gran dispersión, siguiendo la pauta de aumento de la susceptibilidad acompañado en general de un aumento en la densidad. Las muestras 20, 22, 72, 83, 51 y 68 no deben considerarse representativas.

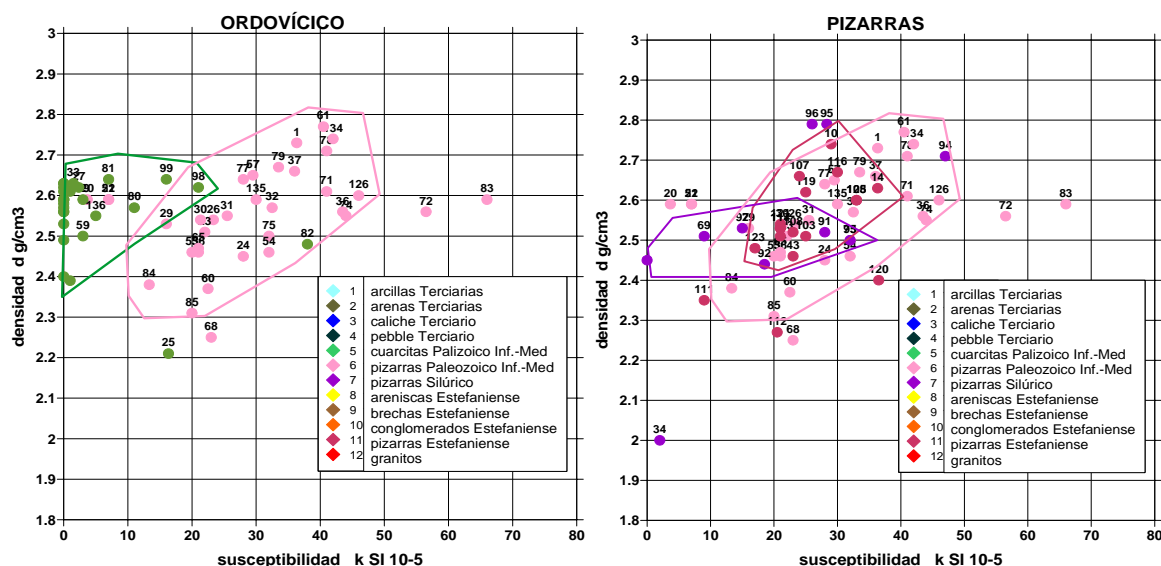


Fig. 3.47 Relación susceptibilidad – densidad para el conjunto de litologías del Ordovícico y para el conjunto de las pizarras. [Plot k-d; “lito.xls” correspondiente]

Existe por lo tanto para este piso una buena definición k-d de sus diferentes litologías (Figura 3.47).

Considerando el conjunto de las pizarras, en la Figura 3.47, es de nuevo apreciable la alta dispersión que presentan este tipo de rocas, siendo evidente que no es posible su diferenciación ni por su densidad, ni por su susceptibilidad ni por la combinación k-d.

Finalmente, en la Figura 3.48 se presentan el conjunto de litologías por sus agrupaciones k-d, con indicación de los valores k-d medios de cada grupo. Es clara la diferenciación con las rocas del Terciario. Aunque el rango total de variación de la densidad del resto de las litologías es muy amplio (de 2.3 a 2.8 g/cm³), sus valores medios quedan mucho más agrupados en el rango 2.5-2.6 g/cm³, presentando una gradación más clara en cuanto a la susceptibilidad, que es creciente desde las cuarcitas a las pizarras del Ordovícico.

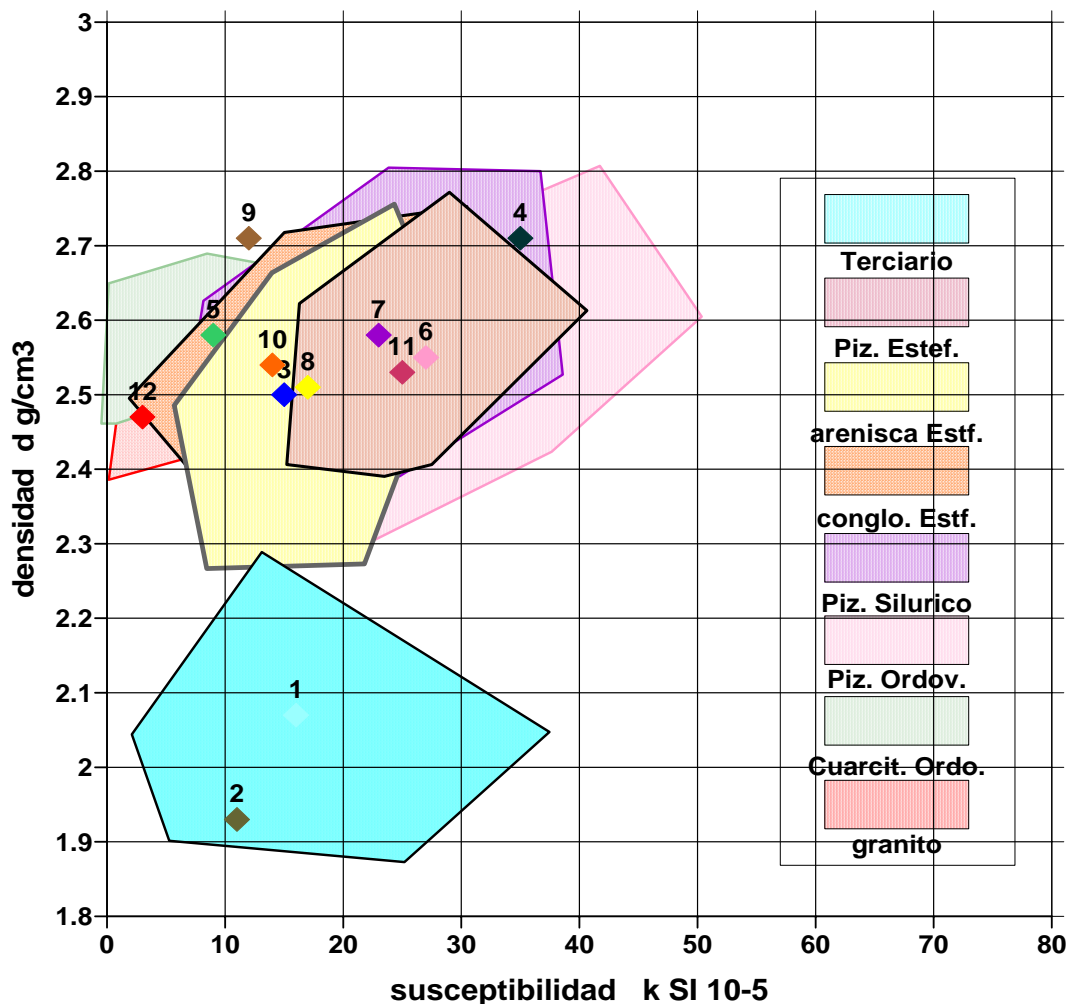


Fig.3.48 Solape de las agrupaciones susceptibilidad-densidad por grupos lito-estratigráficos. [Plot k-d; resumen medias y rangos.xls]. El valor k-d medio de cada grupo está identificado por el número de código (leyendas Figuras 3.42-3.47).

3.2.9. Determinaciones efectuadas con el instrumento Core Logger MSCL

3.2.9.1. Características técnicas de las mediciones

Con el objetivo de verificar las prestaciones de nuevos instrumentos disponibles en el Laboratorio del IGME en Tres Cantos, un conjunto de 28 muestras se ha destinado a efectuar determinación de sus propiedades físicas utilizando también el equipo de testificación geofísica para testigos Multisensor Core Logger (MSCL-81 GEOTEK). Además de las mediciones de la densidad y susceptibilidad, con este instrumento se ha efectuado la medición de la velocidad y resistividad, de forma experimental.

Las muestras utilizadas han sido las nº 68, 70, 71, 73, 74, 76, 78, 80, 81, 82, 86, 87, 88, 89, 94, 99, 104, 106, 107, 109, 113, 115, 118, 124, 125, 134, 135 y 136.

Para efectuar las mediciones con este instrumento las muestras deben estar cortadas en forma de testigos (Figura 3.49); en caso de que la muestra no pueda ser cortada, se introducen sus fragmentos en forma de polvo dentro de un contenedor especial. Para cada muestra se efectúa una serie de mediciones a lo largo de la misma (Figura 3.50).



Fig. 3.49 Testigos preparados para medición en el equipo de testificación Multi-sensor Core Logger (MSCL)



Fig. 3.50 Medidas en testigos en el equipo de testificación Multi-sensor Core Logger (MSCL)

En el análisis de parámetros físicos con el instrumento MSCL-81 se determina la densidad aparente (bulk density) mediante atenuación de rayos gamma, la velocidad sónica (ondas P), la resistividad eléctrica, y la susceptibilidad magnética ($SI \times 10^{-5}$) con anillo Bartington MS2C de 6 cm de diámetro. Como parámetros adicionales se obtiene el diámetro de los testigos, la amplitud de las ondas P, la impedancia acústica y el factor de porosidad. El espaciado de muestreo utilizado ha sido de 0,5 cm en testigos cortos y de 1 cm en testigos largos.

Las mediciones obedecen a las siguientes prescripciones técnicas:

Diámetro del testigo (DT)

Se mide mediante dos transductores de desplazamiento acoplados a los sensores de contacto para las medidas de las ondas P. Mide el diámetro en testigos enteros (o el espesor de los seleccionados) con una resolución de 0.01 mm. De las variaciones en el diámetro del testigo dependen los cálculos de la velocidad sónica, de la densidad (por atenuación de rayos gamma) y el factor de porosidad.

Velocidad de ondas P (PWV)

Mediante dos transductores ultrasónicos de contacto (ARC) se mide el tiempo de paso de las ondas de compresión (P) a través del testigo. Un transductor es vertical superior móvil, acoplado a un disco cerámico piezoeléctrico apto para trabajar con frecuencias de 250 a 5000 kHz, y otro inferior, de presión, tipo ARC. La resolución de los sensores es de 50 ns para el

tiempo de paso, lo que permite calcular la velocidad sónica con una precisión del 0.2 %, según las condiciones del testigo.

Densidad por rayos gamma (GD)

Consta de una fuente radiactiva encapsulada del isótopo radiactivo ^{137}Cs que emite radiación gamma con una energía de 662 keV a través de un colimador, y de un detector de centelleo compuesto por un cristal de 2 pulgadas de NaI(Tl) acoplado a un tubo fotomultiplicador, que mide la atenuación de la radiación tras atravesar el testigo. Para poner en marcha el dispositivo es necesario abrir uno de los dos colimadores, de 2,5 y 5 mm de diámetro respectivamente, accionando la palanca existente en la base de la cápsula protectora. El dispositivo mide cuentas por segundo (cps), que al procesarse se transforman en valores de densidad. La densidad obtenida es una densidad aparente o bulk density. La precisión de la media es superior al 1%, dependiendo del colimador y del tiempo empleado en la adquisición de cada dato. Para la calibración del dispositivo se emplean piezas de aluminio adaptadas al diámetro del testigo con el que se trabaja.

Susceptibilidad magnética SM

Este sensor caracteriza la cantidad de minerales magnéticos (especialmente magnetita u otros elementos de la serie Fe-Ti.) que existe en el testigo. El valor que se obtiene puede estar referido al volumen o a la masa específica de la muestra. Para ello se dispone de dos sensores:

- anillo MSC2m de 60 a 150 mm de diámetro, para testigos enteros, que es el utilizado en este experimento con 28 muestras.
- sensor puntual de contacto MS2E para testigos seleccionados, que tiene en cuenta la densidad y con el que se puede obtener una resolución de 5 mm en las medidas. Este sensor ha sido el utilizado en las determinaciones efectuadas para todas las muestras.

Las medidas se realizan a temperatura constante, para evitar derivas instrumentales.

Resistividad eléctrica (ER)

El sensor mide la resistividad eléctrica por inducción, sin contacto físico con el testigo. El sistema NCR opera mediante inducción en el testigo de un campo magnético de alta frecuencia producido por una bobina transmisora. En el testigo se genera, como respuesta, una corriente eléctrica de f.e.m. inversamente proporcional a su resistividad, que crea a su vez el

campo magnético secundario medido en la bobina receptora. Para medir estos campos magnéticos con precisión se desarrolla una técnica que establece la diferencia entre las lecturas tomadas por las bobinas que miden en el testigo con las realizadas por un conjunto de bobinas en el aire. Así pueden medirse resistividades entre 0.1 y 10 ohm.m con una resolución espacial en el testigo de aproximadamente 2 cm.

Un ejemplo de informe de salida de las mediciones con el instrumento MSCL está recogido en la Tabla 3.17.

PT	SN	PS	DT	PWAmp	PW Vel	Den1	SM	Imp	FP	RES
M		cm	cm		m/s	g/cc	SI			mV
0,02	1	2	5,148	34	4757,856	2,4427	25		0,0782	-1
0,03	1	3	5,174	28	4781,885	2,414	26	11543,33	0,0891	-2
0,04	1	4	5,148	25	4757,856	2,4104	28	11468,46	0,0904	-3
0,05	1	5	5,204	34	4877,226	2,3249	28	11339,18	0,1227	-2
0,06	1	6	5,194	27	4800,37	2,3075	29	11077,05	0,1292	-2
0,07	1	7	5,15	60	3955,453	2,3999	30	9492,887	0,0944	-2
0,08	1	8	5,153	58	4003,885	2,4293	31	9726,613	0,0833	-2
0,09	1	9	5,146	52	4014,041	2,4825	30	9964,662	0,0632	-1
0,1	1	10	5,145	41	4755,083	2,4303	30	11556,39	0,0829	-2
0,11	1	11	5,15	50	4652,213	2,4403	30	11352,97	0,0791	-3
0,12	1	12	5,181	70	3762,527	2,4196	27	9103,735	0,087	-4

Tabla 3.17. Ejemplo de salida de resultados de una medición con el instrumento MSCL

La nomenclatura utilizada en las tablas de resultados es la siguiente:

PT= profundidad en el testigo

SN= sección número

PS= profundidad en la sección

DT= Diámetro real del testigo

PW Amp= Amplitud onda P

PW Vel= Velocidad ultrasónica

Den= densidad aparente

SM= Susceptibilidad magnética

Imp= Impedancia acústica (vel x densidad)

FP= Fracción de porosidad

RES= Resistividad por inducción (lectura directa en milivoltios)

Estos resultados se acompañan de los parámetros de proceso necesarios para efectuar las correcciones y convertir los valores medidos en unidades de los parámetros respectivos, como el ejemplo de la tabla 3.18.

Processing Parameters				
CT	RCT=5	W=0		
PWAmp	A=1	B=0		
PWVel	PTO=15.58			
Den1	A=-.0007	B=-.059	C=9.063	
MS1	A=1	B=0	Den=1	LD=6
FP	MGD=2.65	WD=0		
RES	A=183.24	B=-1.0727	p=0	

Tabla 3.18. Ejemplo de tabla de parámetros para el proceso de los datos medidos

3.2.9.2 Informe de laboratorio y fichero de resultados

En el informe de laboratorio **07/0625** (ANEXO A), que recoge el resultado de las mediciones de densidad y susceptibilidad de las muestras 67 a 136 por métodos que denominaremos “convencionales”, se incluyen las fichas de las mediciones con el sistema MSCL. Estas muestras fueron entregadas el 30-noviembre-07 y finalizadas el 17-julio-2008.

Los resultados de la determinación por MSCL están recogidos además en un fichero para cada muestra, nombrados según la numeración de Laboratorio, y están recogidos en el ANEXO informático de este Informe. Se ha corregido la densidad en los tramos más largos para reducir los errores inducidos por la cinta adhesiva o los bastidores de metacrilato añadidos a algunos de los testigos. Los valores de resistividad (NCR) se dan en lectura directa en mV, sin corregir, por lo que no han sido considerados, aparte de estar posiblemente fuera del rango de determinación instrumental.

Los datos de los valores convencionales y las medias de cada una de las determinaciones MSCL están recogidos en el fichero **comparativa analisis.xls**, con el siguiente formato:

		Convencional		
Nº Muestra	Peso	Susceptibilidad	Porosidad	
	Específico aparente (g/cc)	Magnética SI*10-5	(%)	

Core Loger segunda				
densidad (g/cm3)	S.Mag.	Velocidad	Impedancia	Porosidad (%)
	SI*10-5	(m/s)		

Indicándose además la litología y formación a la que pertenece cada muestra.

3.2.9.3. Análisis de los resultados

En los resultados inicialmente recibidos según el formato indicado en la Tabla 3.17 se observaron algunos aspectos singulares. Por una parte, el valor medido para cada parámetro presenta en ocasiones una oscilación grande a lo largo de la muestra. Un ejemplo de esta variación se presenta en la Figura 3.51 para unas cuantas muestras seleccionadas aleatoriamente. Esta oscilación de una propiedad en mediciones efectuadas cada 10 mm no parece que pueda corresponderse con una variación real debida a heterogeneidades de la roca, como además indica el anómalo tipo de correlación que se observa, de tal manera que disminuciones de la densidad se relacionan con aumentos de la velocidad, o las fuertes caídas de valores en los extremos de las muestras. Por otra parte, los valores de porosidad son muy bajos e incluso negativos.

A la vista de estos resultados, se llevó a cabo una verificación de las mediciones y sus cálculos de corrección; la comparación entre los valores iniciales y los revisados se encuentra recogida en la Figura 3.51. La muestra nº 68 tiene los mismos valores para todos los parámetros en ambas presentaciones. En la muestra nº 88 los valores de susceptibilidad son los mismos; los de densidad se han corregido resultando del orden de 0.12 g/cm³ mayores que los inicialmente dados, mientras que los de la velocidad resultan unos 160 m/s inferiores, con aparente contradicción en estas correcciones de orden inverso. En la muestra nº 107 la densidad permanece prácticamente la misma, la velocidad resulta unos 50 m/s superior y la

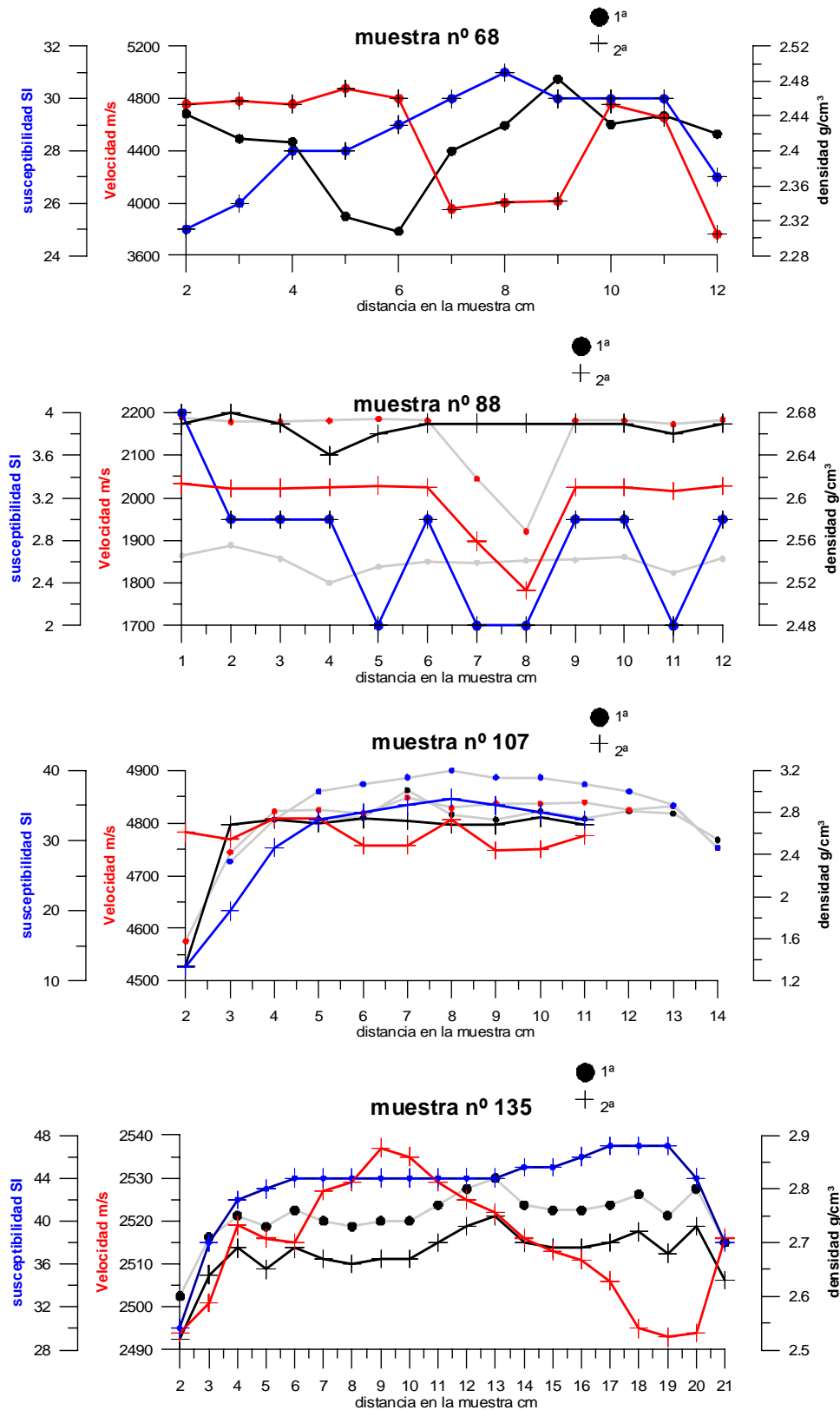


Fig. 3.51 Comparación entre los valores de velocidad, densidad y susceptibilidad originales (1ª) y revisados (2ª), para una selección de muestras.[vkd68, vkd88, vkd107, vkd135;, m068.xls, m088.xls, m107.xls, m135.xls]

susceptibilidad decrece unas $5 \cdot 10^{-5}$ SI. Finalmente, en la muestra 135 la susceptibilidad y la velocidad dadas son las mismas, mientras que la densidad queda determinada unos 0.05 g/cm^3 inferior a la dada inicialmente.

Los valores utilizados en el este análisis serán precisamente los obtenidos como resultado de la verificación de las determinaciones.

Para el total de las 28 muestras utilizadas en este experimento, las relaciones entre los valores de densidad con la velocidad y la porosidad se muestran en la Figura 3.52 y Figura 3.53.

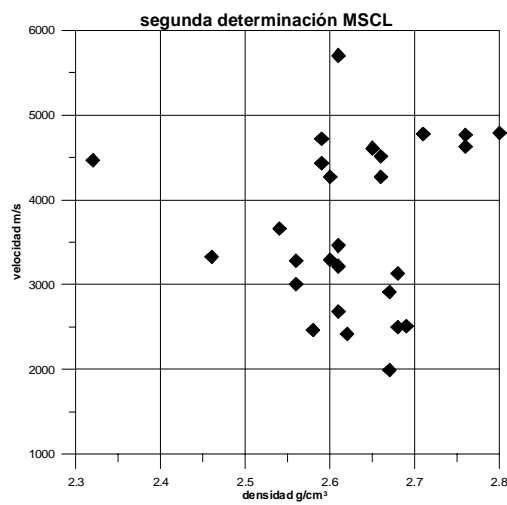


Fig. 3.52 Correlación densidad-velocidad determinadas con el sistema MSCL. [V-dsegunda; comparativaanálisis.xls]

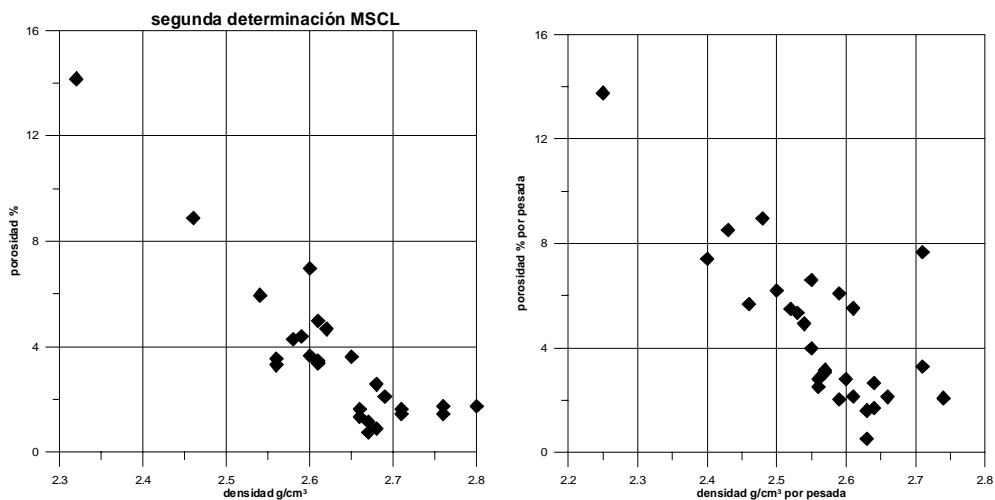


Fig. 3.53 Correlación densidad-porosidad con el sistema MSCL y su comparación con las medidas “convencionales”. [d-poroegunda, d-poro convencional; comparativaanálisis.xls]

La dispersión de d-v es muy grande, presentando una relación caótica, e indicando incluso una disminución de la velocidad asociada a un aumento de la densidad. La relación d-p presenta un buen grado de variación, inclusive mejor agrupado que para las determinaciones convencionales.

La comparación entre los valores MSCL y los obtenidos en las medidas “convencionales” (Figura 3.54) permite apreciar que la densidad determinada por el instrumento MSCL es mayor que la determinada mediante pesada de las muestras, siendo la diferencia media del orden de 0.05 g/cm^3 . Esto puede ser debido a que la determinación con el sensor MSCL se efectúa aprovechando el efecto Compton al radiar la materia; al tratarse en este caso de muestras secas, solamente los electrones de la matriz son los responsables de la captación de la radiación y emisión de nuevos rayos gamma, y por lo tanto la densidad medida resultará mayor que la aparente, siendo la diferencia mayor cuanto mayor sea la porosidad.

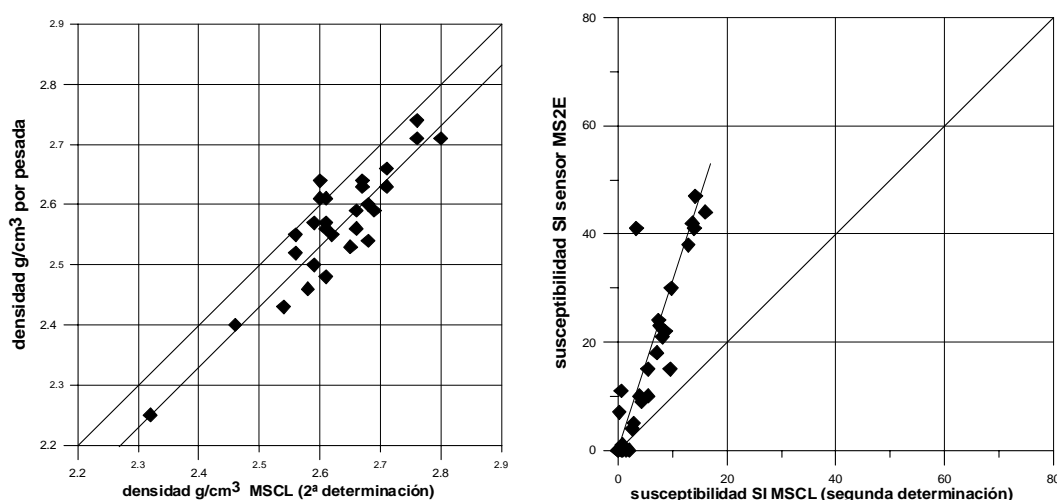


Fig. 3.54 Relación entre la densidad y susceptibilidad medidas con el sistema MSCL y el método convencional de pesadas, utilizando los valores revisados. [dlabo-dmscl2, klabo-kmscl2; comparativaanalisis.xls]

La susceptibilidad magnética medida con el MSCL es menor que la obtenida con el sensor MS2E, siendo mayor la diferencia al ir aumentando el valor de la susceptibilidad. Esta propiedad está medida con el mismo instrumento MSCL pero con dos tipos de sensores cómo se indicó anteriormente. La diferencia encontrada podría ser debida al diferente volumen de roca que miden ambos sensores, siendo este volumen menor con el MS2E. Para las muestras 1 a 36, cuya susceptibilidad magnética fue además determinada in-situ con el instrumento Kappameter KT-5, también se aprecia este tipo de diferencia, siendo en este caso

normalmente inferior el valor determinado por el sensor MS2E (Figura 3.55), resultando que

$$K_{\text{kappa}} > K_{\text{mse2}} > K_{\text{mscl}}$$

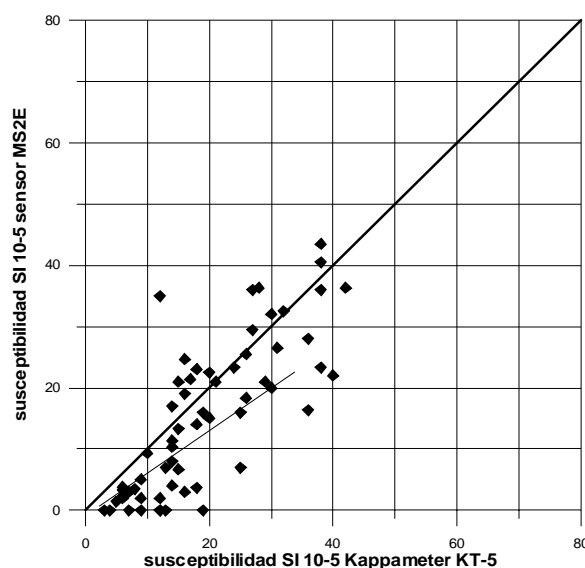


Fig. 3.55 Relación entre la susceptibilidad determinada con el sensor MS2E y el Kappameter KT-5. [kcampo-kms2e; k decampo.xls]

3.2.10. Mediciones de velocidad con el instrumento Pundit

Para verificar el origen de la mala relación entre la densidad y la velocidad medidas con el instrumento MSCL (Figura 3.52), se ha medido de nuevo la velocidad de las mismas muestras utilizadas en el MSCL con el instrumento Pundit Plus PC1006, disponible así mismo en los Laboratorios del IGME en Tres Cantos. Este instrumento utiliza, al igual que el MSCL, emisión y recepción de ultrasonidos, con dos transductores de 54 kHz (frecuencia más baja que la del MSCL), con resolución de 0.1 micro segundo (0.05 en el MSCL) y precisión de 1 m/s. Las muestras deben estar cortadas en forma prismática, con caras lisas, utilizándose una silicona especial para mejorar el acoplamiento de los sensores.

La medición MSCL se efectuó con muestras cortadas en forma de testigos cilíndricos (Figura 3.49), tomando varias medidas a lo largo del testigo con los sensores dispuestos diametralmente opuestos. Para obtener una medición comparable con el instrumento Pundit, se ha efectuado la medición en sentido transversal a la probeta disponiendo los sensores diametralmente opuestos, para la que el acoplamiento (tangencial según una arista) puede dar

lugar a una disminución de las prestaciones del equipo. Cada muestra se ha medido además de forma longitudinal (sensores en los extremos o bases del testigo).

En la Figura 3.56 se muestra la comparación entre la velocidad longitudinal y transversal de cada muestra mediante su diferencia, así como indicando el valor de la velocidad medida con el sistema MSCL, que es transversal, y nº de muestra.

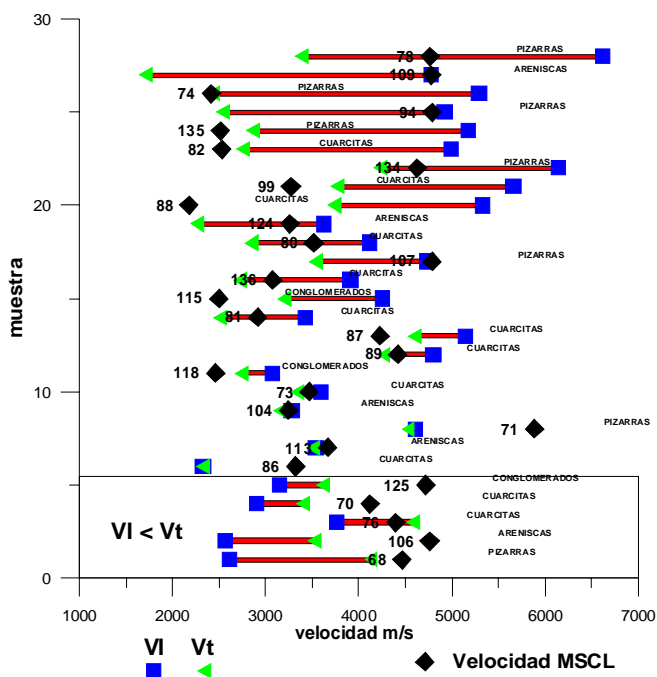


Fig. 3.56 Velocidad longitudinal VI y transversal Vt medidas con el equipo Pundit, junto con la velocidad transversal medida con MSCL. [VI-Vt-V; comparativa analisis.xls/orden vl-vt]

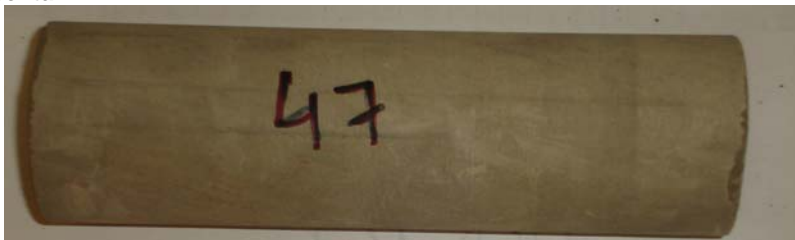
Para la mayoría de las muestras se observa una gran anisotropía, elevada incluso aún tratándose de pizarras. Para un grupo de muestras la velocidad longitudinal es inferior a la transversal. La velocidad transversal medida con MSCL es en general mayor que la medida con el instrumento Pundit. Una razón para esta elevada anisotropía puede encontrarse en las irregularidades de las muestras. En la Figura 3.57 se dan varios ejemplos. Los números pintados en las muestras son los asignados en el laboratorio, distintos de los originales dados durante el muestreo en campo.



Corresponde a la muestra 68, de 13 cm. Es una pizarra en la que la velocidad longitudinal es unos 1500 m/s menor que la transversal. Los planos de esquistosidad y las inclusiones que tiene la muestra pueden ser la causa de esta anomalía.



Corresponde a la muestra 71, de unos 12 cm. Es una pizarra que no tiene anisotropía, a pesar del corte irregular que presenta.



Corresponde a la muestra 82, de 19 cm. Es una cuarcita con una velocidad transversal unos 2500 m/s inferior a la longitudinal. No se aprecian intrusioniones en esta roca que puedan justificar esta elevada anisotropía, que puede ser debida a fallos en el acoplamiento de los sensores.



Corresponde a la muestra 78, de 12 cm. Es una pizarra que tiene una velocidad transversal más de 3000 m/s inferior a la longitudinal. En este caso si que se aprecia claramente que los planos de esquistosidad son longitudinales, lo que evidentemente favorece el tránsito de la señal.

Fig. 3.57 Fotografías de algunas de las muestras en forma de testigo utilizadas en las mediciones.

La relación entre la velocidad (transversal) medida con MSCL y Pundit se muestra en la Figura 3.58. Las mayores desviaciones no están relacionadas con la anisotropía, como puede observarse por comparación con la Figura 3.56 (por ejemplo, en la muestra nº 71 $V_l=V_t$), por lo que no se puede aducir una razón litológica para estas desviaciones, que deben ser

atribuibles a cuestiones metrológicas. En general, la velocidad determinada con el sistema MSCL es mayor que la determinada con el Pundit.

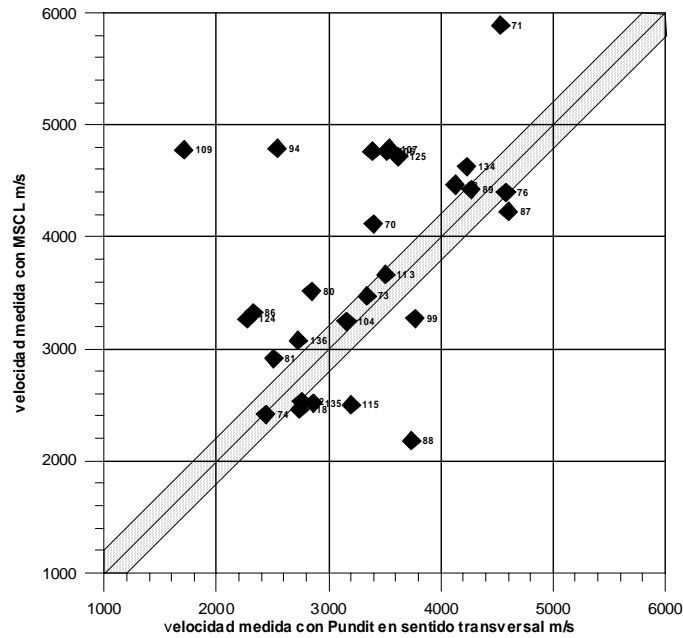


Fig. 3.58 Relación entre la velocidad transversal medida con el equipo Pundit y MSCL. [Vt-Vmscl; comparativaanálisis.xls]

La correlación entre la velocidad transversal medida con el instrumento Pundit y la densidad, tanto medida con el instrumento MSCL como con pesada, Figura 3.59, aunque presenta gran dispersión, es mejor que la obtenida anteriormente entre la velocidad y densidad determinadas con el sistema MSCL (Figura 3.52), de lo que puede concluirse que la velocidad determinada con el Pundit es más fiable.

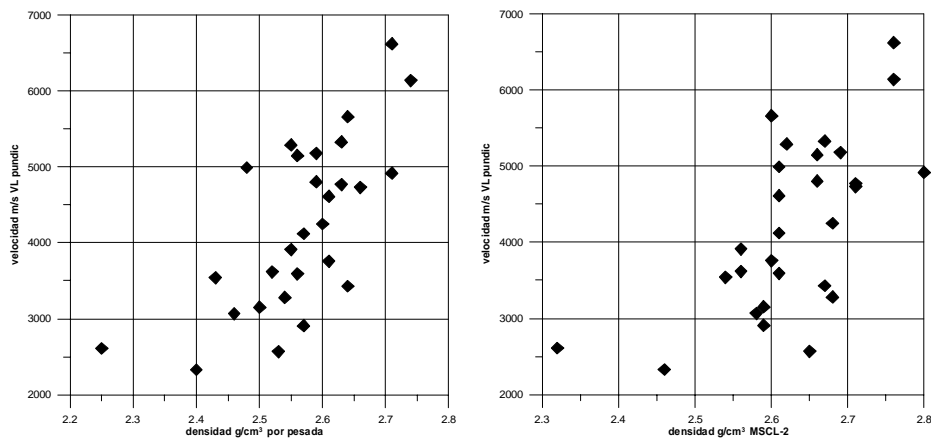


Fig. 3.59 Correlación de la velocidad medida con el sistema Pundit con la densidad MSCL y la densidad por pesada. [Vpundit-dpesada, Vpundit-dmscl2; comparativaanálisis.xls]

3.2.11. Conclusiones sobre los diferentes métodos de determinación utilizados

La determinación de la densidad para apoyo a un estudio de Gravimetría, en donde se requiere conocer la densidad aparente (seca), pensamos que es mejor realizarla por el método de pesada en balanza hidrostática, utilizando muestras de varias centenas de cm^3 .

Su determinación utilizando el método gamma-gamma con el MSCL presenta la singularidad de referirse a un valor más parecido a la densidad de la matriz, además de medirse para un menor volumen de roca, siendo por lo tanto más sensible a las pequeñas heterogeneidades litológicas.

El valor hallado para la susceptibilidad es muy sensible al instrumento utilizado, aunque todos los que han sido empleados se basan en el mismo principio de medición. El Sensor MS2E realiza determinaciones demasiado puntuales, por lo que no es el ideal para proporcionar valores globales de utilidad en la interpretación de anomalías magnéticas, siendo no obstante de gran interés en estudios mineralógicos. Los valores dados por los instrumentos de medición in situ suelen ser más sensibles a las irregularidades de la superficie de medición, dando un valor orientativo para trabajos iniciales. La determinación con el MSCL puede presentar las mismas circunstancias que para la densidad. En principio, y para su utilización en trabajos de Magnetometría, la determinación de la susceptibilidad en instrumentos en los que pueda determinarse el parámetro para un volumen de roca superior a los 100 cm^3 (tipo puentes de susceptibilidad), deben ser preferidos.

En cuanto a los valores de la velocidad, y a la vista de los resultados obtenidos, su medición con el sistema MSCL adolece de los inconvenientes antes aludidos de volumen de muestra implicado, y además, para este parámetro, la medición en sentido transversal a la probeta puede distorsionar fuertemente los resultados en casos de rocas con anisotropía.

En su conjunto, se recomienda la realización de estudios específicos orientados a mejorar las prestaciones del sistema MSCL.

3.3. ZONA DE ALCUDIA

3.3.1. Recogida de muestras en campo

La campaña gravimétrica de la denominada zona de Alcudia se ha efectuado a lo largo del perfil sísmico de reflexión ALCUDIA, de unos 235 km de longitud, en la porción que transcurre cruzando las hojas 1/50.000 nº 807 (Chillón), 808 (Almacén), 832 (Monterrubio de la Serena), 833 (Hinojosa del Duque), 857 (Valdesequillo), 879 (Peñarroya-Pueblonuevo) y 900 (Cardenchosa), cubriendo una longitud total del orden de 120 km.

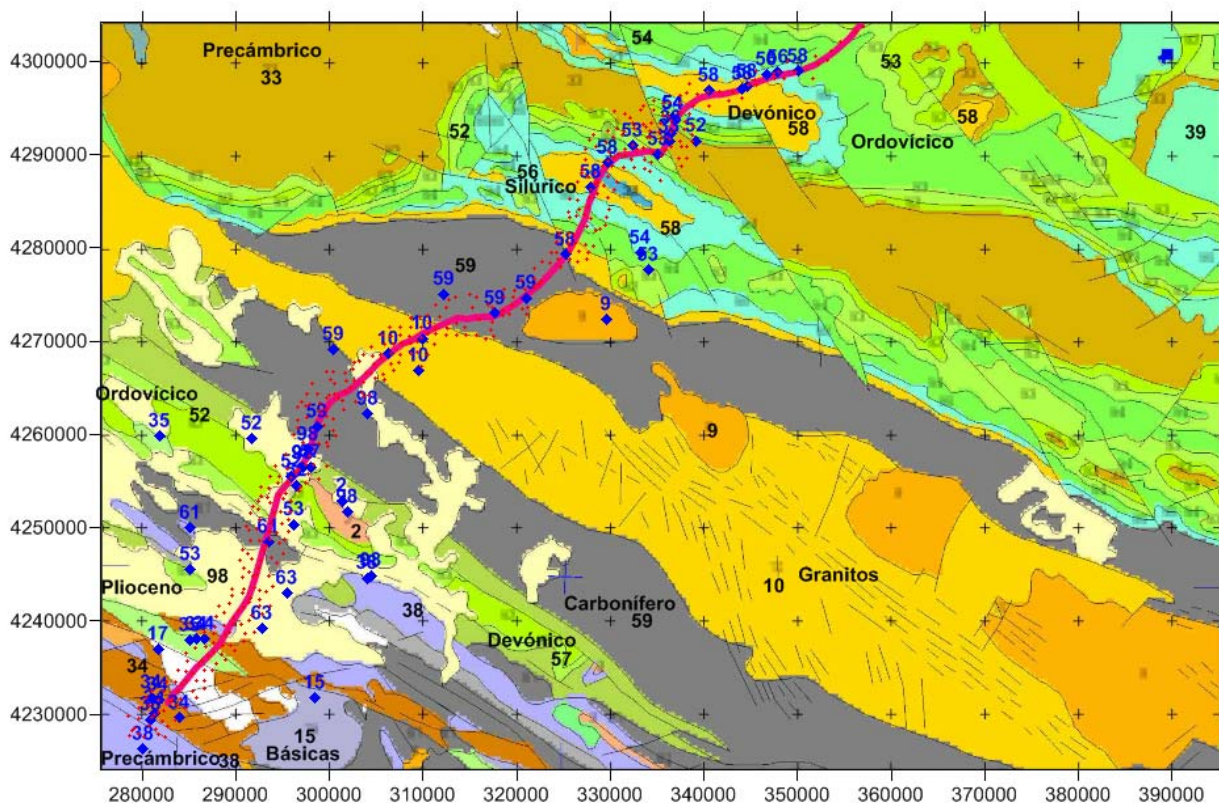


Fig. 3.60 Posición de las muestras de roca recogidas (rombo azul), con indicación de su código de posición estratigráfica (Figura 61). Línea roja: trazado del perfil sísmico. Puntos rojos: estaciones gravimétricas. La numeración en color negro se refiere a la codificación de unidades según la cartografía Magna a escala 1/100000.

Las muestras fueron tomadas por operadores del Área bajo la dirección de Luis Miguel Martín Parra y Jerónimo Matas González, geólogos expertos en la zona, del 26 al 30 de enero y del 30 de marzo al 3 de abril de 2009, sobre afloramientos, recogiendo unos 2000 g de muestra y tomando su posición con GPS, así como situándola sobre la cartografía MAGNA a

escala 1/50000. En el mismo momento de su levantamiento se efectuó una asignación litológica a cada muestra, acompañada de observaciones a la misma.

Se trata de 57 muestras, cuya posición se indica en la Figura 3.60, con indicación del código correspondiente a la unidad donde se encuentran según la leyenda del mapa geológico MAGNA a escala 1/100.000, que se reproduce, en las partes necesarias, en la Figura 3.61; el código para cada muestra se ha tomado de acuerdo con su posición sobre el mapa de la Figura 3.60, si bien en caso de discrepancia con las observaciones efectuadas en el momento de su recogida en campo, se ha respetado dicha observación.



Fig. 3.61 Leyenda parcial de la cartografía Magna a escala 1/100.000, indicando las unidades en las que se han tomado muestras mediante un círculo rojo en su código correspondiente.

En la Tabla 3.19 se reproduce la definición litológica de cada código de las unidades, según la leyenda original del MAGNA, y el número de muestras tomadas en cada una.

código magna	litología Magna 1/100.000	 piso	cod. Piso	Nº muestras
2	granitoides calcoalcalinos	Cambrico	2	1
9	granitoides de dos micas	Devonico-Pérmico	51	1
10	granitoides biogfíticos	Devonico-Pérmico	51	3
15	rocas básicas y ultrabásica	Pérmico	71	1
17	granitoides alcalinos	Pérmico	71	1
33	pizarras, grauvacas, conglomerados	Proterozoico	1	2
34	neises y anfibolitas	Proterozoico	1	6
35	esquistos, pizarras, grauvacas	Proterozoico	1	2
38	cuarcitas, neises, esquistos, pizarras, grauvacas	Proterozoico	1	3
52	conglomerados, areniscas, cuarcitas, pizarras	Ordovícico	3	4
53	ortocuarcitas, areniscas, pizarras	Ordovícico	3	5
54	pizarras, areniscas, cuarcitas, calizas, vulcanitas	Ordovícico	3	3
56	ampelitas, cuarcitas, vulcanoclásticas	Silúrico	4	2
57	pizarra, esquistos, areniscas, calizas, ampelitas	Silúrico	4	1
58	areniscas, pizarras, calizas, cuarcitas, vulcanoclásticas	Devonico	5	7
59	pizarras, grauvacas, conglomerados, calizas	Carbonífero	6	6
61	vulcanitas	Carbonífero	6	2
63	pizarras, areniscas, conglomerados, carbón, calizas	Carbonífero	6	2
98	calcarenitas, arenas, limos	Plioceno	8	5

Tabla 3.19 Litología de cada unidad Magna de la Figura 61. A cada piso se le ha asignado un código interno para este informe (de utilidad únicamente para ciertas representaciones gráficas).

Se trata por lo tanto de rocas metamórficas, excepto los afloramientos de rocas intrusivas tanto ácidas como básicas y las de Terciario. La parte central del mapa (Figura 3.60) está formada por afloramientos de granitos devónico-pérmicos (unidades 9 y 10, batolito de los Pedroches), mientras que otros granitoides (de edad cámbrica y pérmica, unidades 2, 15 y 17), afloran en el sur. Los terrenos precámbricos o proterozoicos que aparecen formando una franja NO-SE junto a algunos afloramientos menores en la parte superior del mapa (unidad 33) están formados por pizarras, grauvacas y conglomerados; en la esquina SO afloran las unidades 34, 35 y 38, formadas por pizarras- esquistos-neises, grauvacas, cuarcitas y anfibolitas.

Los terrenos ordovícicos forman delgadas franjas de la misma dirección, que bordean ambos flancos de la estructura central (unidades 52, 53 y 54), estando formadas por conglomerados, areniscas, cuarcitas, pizarras, calizas y vulcanitas. El Silúrico (unidades 56 y 57) sigue las mismas direcciones estructurales del Ordovícico, con el que aparece interestratificado; su

litología es prácticamente la misma: ampelitas, cuarcitas, pizarra-esquistos, areniscas, calizas, con algunas intrusiones de rocas vulcanoclásticas.

El Devónico sólo aflora a lo largo del flanco norte, y está formado por areniscas, pizarras, calizas, cuarcitas y vulcanoclásticas. El Carbonífero, que se sitúa en la cubeta central (unidad 59) bordeando al granito, está formado por pizarras, grauvacas, conglomerados y calizas, mientras que otras rocas de estas mismas litologías (unidades 61) sólo afloran en el sur. Existen intrusiones de vulcanitas (unidad 61) carboníferas, aflorantes también en la esquina suroeste del mapa. Finalmente, el Plioceno (unidad 98) se sitúa en el flanco sur, estando constituido por calcarenitas, arenas y limos.

Por lo tanto, excepto los granitos, las demás unidades están formadas por una mezcla heterogénea de litologías, lo que hace difícil, al menos en principio, su caracterización petrofísica (asignación de un valor fiable de la densidad o de la susceptibilidad magnética). Por otra parte, todas las formaciones del precámbrico y Paleozoico (Carbonífero, Devónico, Silúrico y Ordovícico) están constituidas por las mismas litologías, a excepción de las cuarcitas, que no aparecen en el Carbonífero, lo que producirá posiblemente una dificultad de diferenciación petrofísica entre unidades. El Plioceno, que se diferencia por estar formado por rocas sedimentarias, y las rocas intrusivas, es más posible que presenten contrastes de propiedades con el resto de las unidades.

3.2.2. Informes de laboratorio

Todas las determinaciones se han llevado a cabo en los Laboratorios del IGME en Tres Cantos. Los resultados se presentan en los Informes 09/0211 y 09/0130, que se recogen en el ANEXO C, y además se encuentran en formato digital en los ficheros **092211.doc** y **090130.doc**.

3.3.3. Fichero de resultados

A partir de los datos de campo, del posicionamiento de las muestras y de los análisis petrofísicos, se ha confeccionado un fichero general de datos, denominado *muestras Alcudia.xls*, que consta de los siguientes campos:

- número de muestra asignado en campo
- X,Y coordenadas UTM huso 30, medidas por GPS
- NH: número de hoja 1/50.000 donde se encuentra la muestra
- código unidad de Magna: asignado por la posición de la muestra en el mapa de la Figura 3.60
- litología Magna: tomada de la leyenda de la Figura 3.61
- piso Magna: tomado de la leyenda de la Figura 3.61
- código piso: asignado para este estudio petrofísico
- observaciones: realizadas en el momento de recoger la muestra en campo
- litología: según las observaciones de campo
- código de litología: asignado para este estudio petrofísico
- peso específico aparente (g/cm^3), según el Informe de Laboratorio.
- absorción %, según el Informe de Laboratorio.
- porosidad %, según el Informe de Laboratorio.
- susceptibilidad magnética ($\text{SI } 10^{-5}$), según el Informe de Laboratorio.
- distancia: calculada desde cada muestra a un punto origen de coordenadas $X= 277000$
 $Y=4225000$

La variación de densidad de las muestras, ordenadas en valores crecientes, está representada en la Figura 3.62. La densidad de 44 de las 57 muestras está comprendida entre 2.50 y 2.70 g/cm^3 , con 4 muestras de densidad inferior (llegando hasta 2.26 g/cm^3) y 9 de densidad superior (con un máximo de 3.36 g/cm^3).

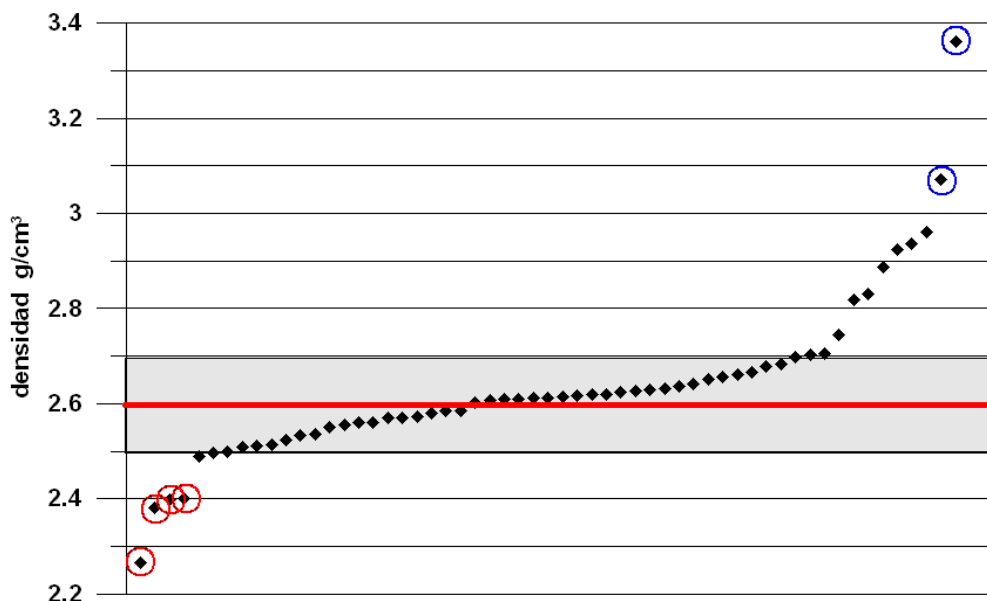


Fig. 3.62 Muestras ordenadas por orden creciente de densidad. Se señalan los valores anómalos.

Destacan por sus valores altamente anómalos las muestras nº 38 (pizarra) y nº 50 (anfíbolita), y por sus bajos valores, fuera del rango general, las areniscas nº 3, 16 (del Ordovícico) y 29 (del Plioceno), junto con la pizarra nº 17. Estas anomalías pueden deberse tanto a errores de determinación como a tratarse de muestras muy alteradas por meteorización (valores bajos) o composición (altos), y no serán tenidas en cuenta en el análisis.

La media aritmética considerando todas las muestras es de 2.63 g/cm^3 , que se reduce a 2.60 tomando solamente las que se encuentran dentro del rango $2.5\text{-}2.7$. Se trata por lo tanto de un conjunto muy homogéneo, en el que no cabe esperar grandes contrastes de densidad entre diferentes unidades. Con valores superiores se encuentran una serie de muestras (neis-51, anfíbolita-43, basalto-2-37, gabro-48 y diorita-30-31), que llegan hasta los 2.96 g/cm^3 . Su importancia en este estudio regional puede ser anecdótica. La variación de $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ respecto del valor medio de 2.6 g/cm^3 puede ser considerada como potencialmente de interés para la generación de anomalías gravimétricas, lo que se podrá verificar con un estudio individualizado por litologías.

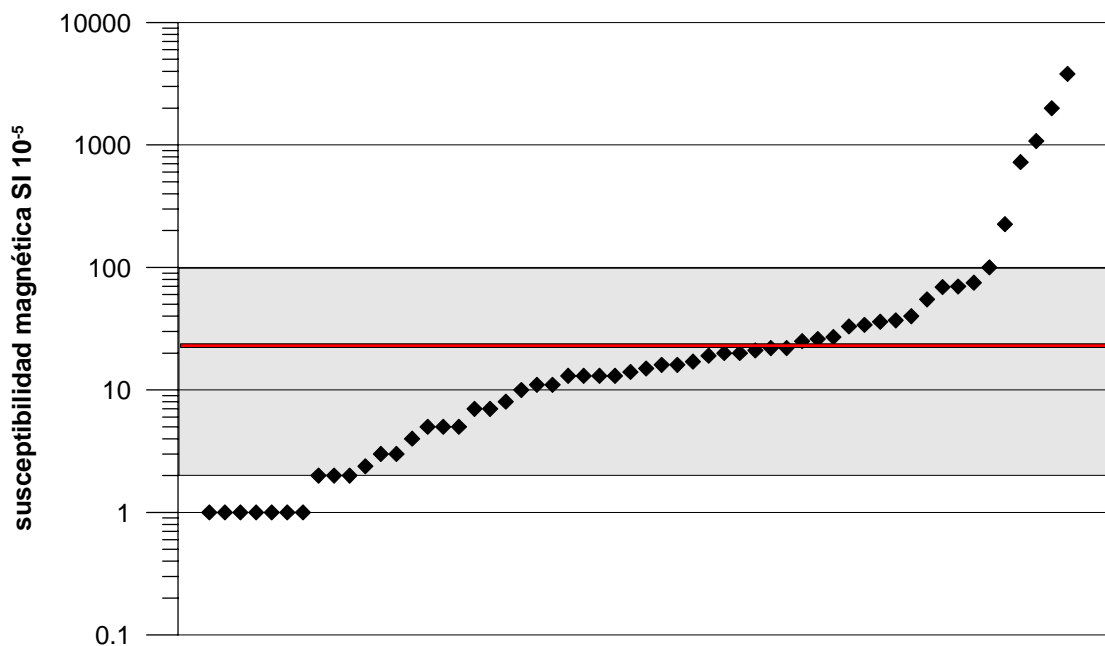


Fig. 3.63 Susceptibilidad de las muestras presentadas en orden de valores crecientes

En cuanto a la susceptibilidad magnética, los valores oscilan entre 1 SI 10^{-5} y 3800 SI 10^{-5} , aunque, como se aprecia en la Figura 3.63, sólo 5 muestras superan las 100 SI 10^{-5} (llegando a 3800 SI 10^{-5}), estando además 21 muestras por debajo de 10 SI 10^{-5} . El valor de susceptibilidad media (157 SI 10^{-5}) carece por lo tanto de todo significado, quedando en 22 SI 10^{-5} para las 44 muestras dentro del rango 2-100 SI 10^{-5} . La muestra nº 17 no tiene asignado valor de susceptibilidad. En consecuencia, se trata de rocas paramagnéticas, con valores muy bajos de susceptibilidad, que no deben de dar lugar a la existencia de anomalías de campo magnético, excepto las rocas a las que pertenezcan los valores superiores a las 100 SI 10^{-5} .

Puesto que se dispone también de los valores de porosidad, su cruce con los de densidad (Figura 3.64) pone también de manifiesto la existencia de las mismas muestras anómalas detectadas en la Figura 3.62.

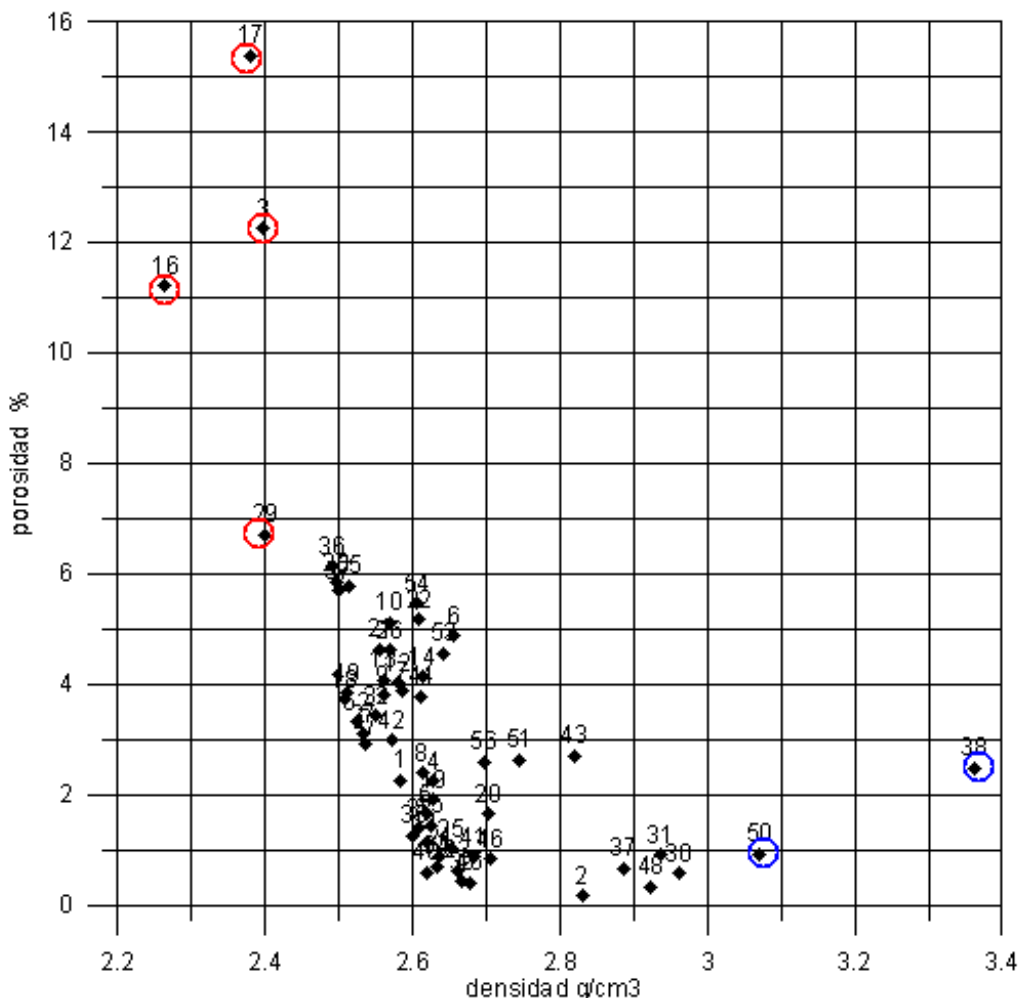


Fig. 3.64 Relación porosidad-densidad para las muestras de Alcudia

3.3.4. Clasificación y análisis por litologías

3.3.4.1. Areniscas-arcosas y grauvacas

Son 22 muestras, de las que hay de descartar los números 3, 16 y 29 por estar su densidad fuera de los rangos normales (ver Figura 3.62). Sus parámetros quedan recogidos en la Tabla 3.20, donde puede apreciarse que son rocas que se encuentran tanto en el Plioceno como en todos los pisos del Paleozoico.

M	CodM	piso magna	observaciones lito	codL	LITOLÓGÍA	DEN g/cm ³	K (SI 10 ⁻⁵)
20	59	Carbonífero	Pizarras negras con laminaciones, mosqueadas	11	Arcosa	2,70	34,00
57	52	Ordovícico	Muestra de arcosas de grano medio-grueso, Cámbrica	12	Arcosa arenisca	2,50	1,00
33	52	Ordovícico	Arcosas de grano grueso. Ordovícico	12	Arcosa arenisca	2,61	5,00
40	98	Plioceno	Muestra de arcosas	12	Arcosa arenisca	2,62	2,00
16	54	Ordovícico	Areniscas	13	Arenisca	2,26	8,00
3	56	Ordovícico	Areniscas muy finas a limolitas. Lutita	13	Arenisca	2,40	13,00
29	98	Plioceno	Areniscas	13	Arenisca	2,40	13,00
32	57	Silúrico	Arenisca cuarcítica, Silúrico	13	Arenisca	2,55	1,00
21	59	Carbonífero	Arenisca	13	Arenisca	2,56	11,00
13	58	Devónico	Areniscas	13	Arenisca	2,56	3,00
12	53	Ordovícico	Arenisca muy cuarzosa	13	Arenisca	2,58	5,00
1	58	Devónico	Arenisca de grano fino-medio de tonos grises, Devónico	13	Arenisca	2,58	3,00
5	58	Devónico	Areniscas gris claras cuarzosas, Devónico	13	Arenisca	2,62	1,00
15	58	Devónico	Areniscas gris-verdosas	13	Arenisca	2,62	7,00
4	58	Devónico	Areniscas grises de grano fino-medio con mica blanca, Devónico	13	Arenisca	2,63	20,00
19	58	Devónico	Areniscas cuarzosas de grano fino	13	Arenisca	2,63	22,00
28	59	Carbonífero	Grauvacas	14	Grauvaca	2,50	13,00
9	33	Proterozoico	Grauvaca de grano fino-medio gris oscura	14	Grauvaca	2,56	19,00
26	59	Carbonífero	Grauvacas con metamorfismo de contacto, del Culm	14	Grauvaca	2,57	11,00
10	33	Proterozoico	Grauvaca de grano fino-medio gris oscura	14	Grauvaca	2,57	17,00
8	54	Ordovícico	Grauvaca de grano medio	14	Grauvaca	2,61	2,38
41	63	Carbonífero	Muestra de grauvaca, (Carbonífero del Guadiato)	14	Grauvaca	2,68	22,00

Tabla 3.20. Areniscas. M: nº de muestras. CodM: código Magna. CodL: código de litología.

Su posición se indica en la Figura 3.65, con información del código litológico de cada muestra.

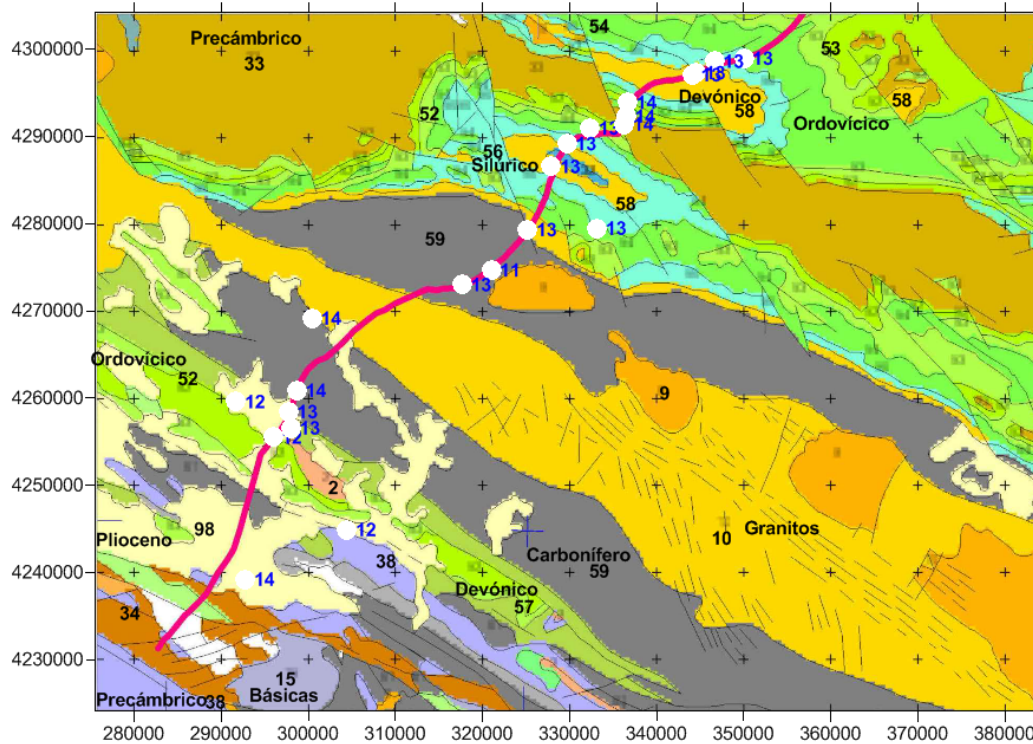


Fig. 65 Posición de las muestras de arcosas (11), arcosas-arenisca (12), areniscas (13) y grauvacas (14)

Los valores de densidad se encuentran (salvo las antedichas muestras descartadas) bien agrupados entorno a su media aritmética de 2.59 g/cm^3 , según se desprende del histograma de la Figura 3.66.

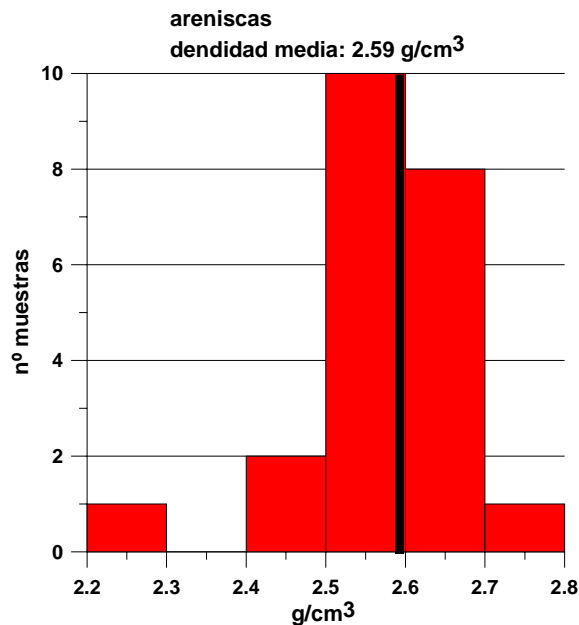


Fig. 3.66 Histograma de distribución de la densidad de las areniscas

Considerando cada tipo de arenisca por separado, las arcosas presentan una densidad media de 2.61 g/cm³, las areniscas de 2.59 g/cm³ y las grauvacas de 2.58 g/cm³.

3.3.4.2. Pizarras, esquistos y neis

Se trata de 16 muestras, de las que hay de descartar los números 38 y 17 por presentar valores anómalos de densidad.

M	CodM	piso magna	observaciones lito	CodL	LITOLOGÍA	DEN g/cm3
17	53	Ordovícico	Pizarras, (Ordovícico Medio)	21	Pizarra	2,38
27	59	Carbonífero	Pizarras con laminaciones de limolitas	21	Pizarra	2,53
7	54	Ordovícico	Pizarra gris oscura, Esquistograuwaquica	21	Pizarra	2,59
54	38	Proterozoico	Muestra de filitas laminadas	21	Pizarra	2,61
22	59	Carbonífero	Pizarras, del Culm	21	Pizarra	2,61
14	52	Ordovícico	Pizarra gris oscura	21	Pizarra	2,61
39	38	Proterozoico	Muestra de pizarras laminadas, (Cambrico Inferior Formación Azuaga)	21	Pizarra	2,67
38	63	Carbonífero	Muestra de pizarras en escombreras, Lutitas (Carbonifero Continental)	21	pizarras	3,36
36	35	Proterozoico	Esquistos biotíticos con foliación replegada, (Serie Negra)	22	Esquistos	2,49
53	38	Proterozoico	Muestra de cuarzoesquistos, de Albariza	22	Esquistos	2,64
46	35	Proterozoico	Muestra de cuarzoesquistos miloníticos, (Serie Negra)	22	Esquistos	2,70
49	34	Proterozoico	Muestra de neises blastomiloníticos de Argallón	23	neis	2,51
52	34	Proterozoico	Muestra de neises blastomiloníticos de Argallón, (Arroyo de la Zarza)	23	neis	2,52
44	34	Proterozoico	Muestra de Neises no alterada, (Zona de Zizalla Serie Negra)	23	neis	2,61
45	34	Proterozoico	Muestra de Neises no alterada, (Serie Negra)	23	neis	2,68
51	34	Proterozoico	Muestra de neises anfibólicos blastomiloníticos	23	neis	2,74

Tabla 3.21 Pizarras. M: n° de muestras. CodM: código Magna. CodL: código de litología.

Pertencen fundamentalmente al Precámbrico (Proterozoico), aunque con algunas muestras en otros pisos. Sus parámetros quedan recogidos en la Tabla 3.21.

Su posición se indica en la Figura 3.67, con información del código litológico de cada muestra.

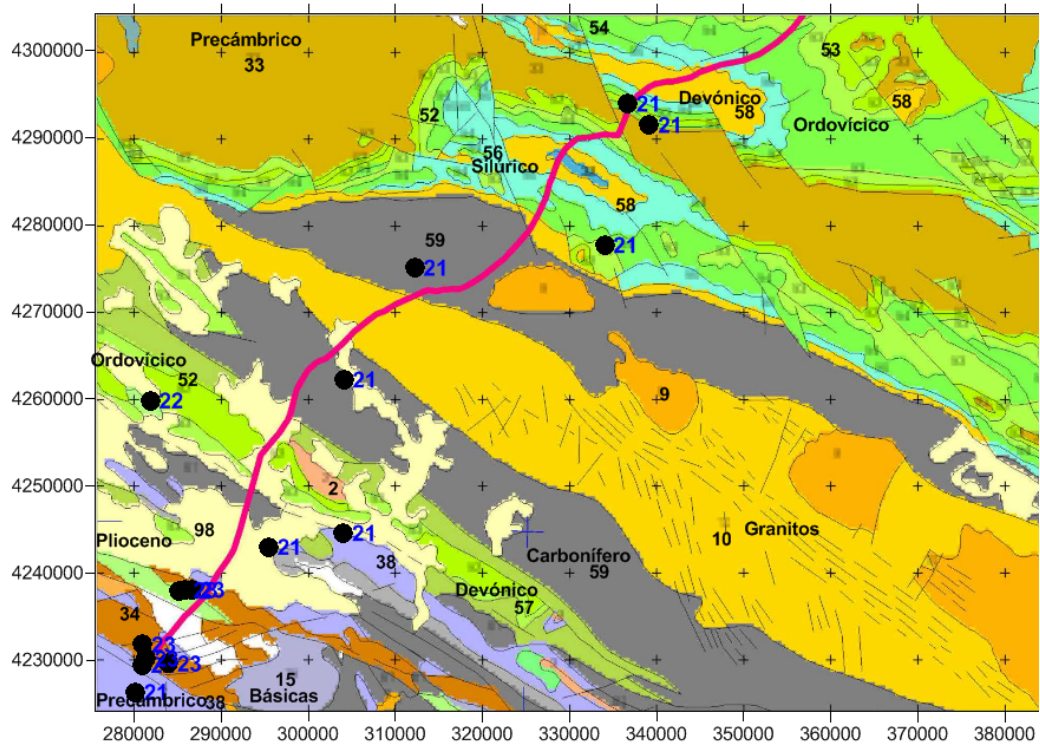


Fig. 3.67 Posición de las muestras de pizarras (21), esquistos (22) y neis (23)

Los valores de densidad se encuentran (salvo las antedichas muestras descartadas) bien agrupados entorno a su media aritmética de 2.61 g/cm^3 , según se desprende del histograma de la Figura 3.68.

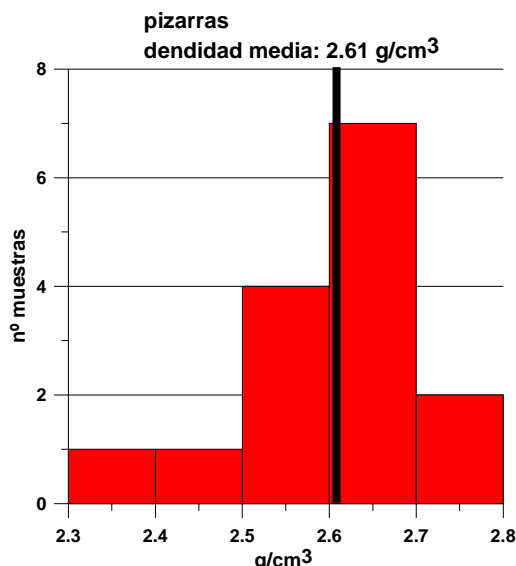


Fig. 68 Histograma de distribución de la densidad de las pizarras

No se aprecian diferencias significativas de densidad según el piso donde se encuentren, de tal forma que las pizarras del Carbonífero tienen una densidad media de 2.57 g/cm³, y las del Ordovícico y Proterozoico de 2.60 g/cm³.

3.3.4.3. Cuarzitas, corneanas y anfibolitas

Se han recogido 3 muestras de cuarzitas del Ordovícico, una corneana junto al batolito de granitoides Cámbricos y dos anfibolitas del Carbonífero y Precámbrico. La Tabla 3.22 muestra sus características y en la Figura 3.69 se indica su posición.

M	CodM	piso magna	observaciones lito	CodL	LITOLOGÍA	DEN (g/cm ³)	K (SI 10 ⁻⁵)
11	53	Ordovícico	Cuarzita blanca de grano fino, Armonicana	30	Cuarzita	2,62	1,00
35	53	Ordovícico	Cuarzitas blancas de grano medio, (Ordovícico)	30	Cuarzita	2,60	2,00
42	53	Ordovícico	Muestra de cuarzita, (Ordovícico Inferior)	30	Cuarzita	2,57	1,00
56	98	Plioceno	corneana(Metamorfismo de Contacto)	41	Corneana	2,70	55,00
43	61	Carbonífero	Muestra de anfibolitas	42	Anfibolitas	2,82	724,00
50	34	Proterozoico	Muestra de anfibolitas con granate	42	Anfibolitas	3,07	70,00

Tabla 3.22. Cuarzitas, corneanas y anfibolitas. M: nº de muestra. CodP: código Magna. CodL: código de litología.

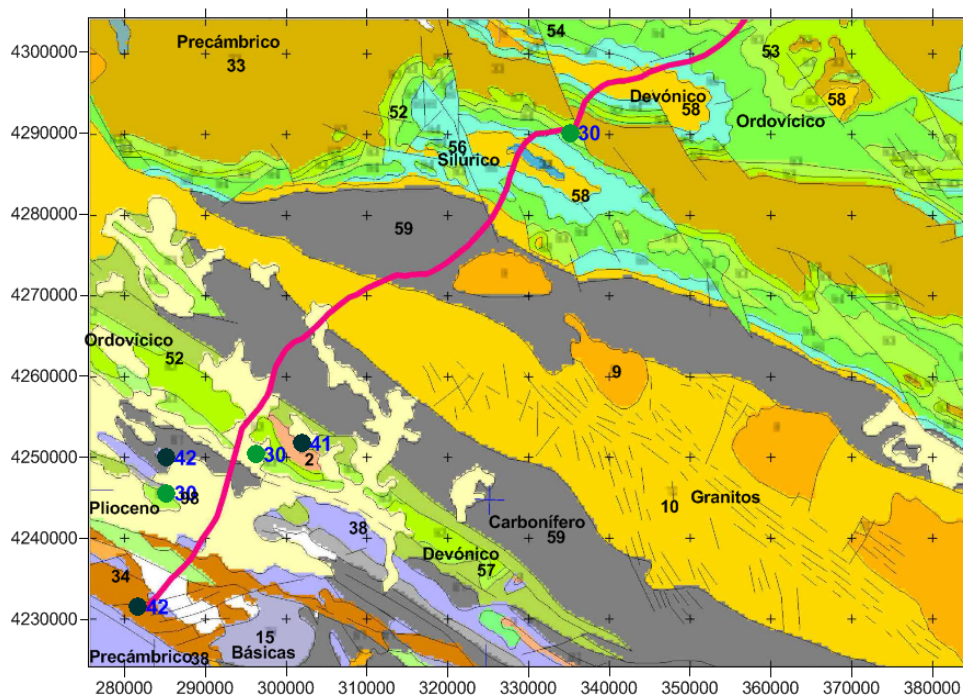


Fig. 3.69 Posición de las muestras de cuarcitas (30), corneanas (41) y anfibolitas (42)

El escaso número de muestras sólo permite obtener los valores de 2.60 g/cm^3 para las cuarcitas, 2.70 g/cm^3 para la corneana y 2.82 para la anfibolita (sin tener en cuenta la muestra nº 50).

3.3.4.4. Rocas intrusivas y tobas

Se han recogido 5 muestras de rocas intrusivas básicas (2 de basalto, 1 gabro y 2 de diorita), que afloran intercaladas en varios pisos del Paleozoico. Otras 6 muestras pertenecen a afloramientos de batolitos graníticos, y 2 tobas en el Devónico y Ordovícico. Sus características se encuentran en la Tabla 3.23 y su posición geográfica en el mapa de la Figura 3.70.

M	CodM	piso magna	observaciones lito	CodL	LITOLOGÍA	DEN (g/cm ³)	K (SI 10 ⁻⁵)
2	56	Ordovícico	Intercalación de basaltos	51	Basalto	2,83	3800,00
37	61	Carbonífero	Basaltos del Guadalbarbo	51	Basalto	2,89	2000,00
48	15	Pérmico	Muestra de gabros de grano fino, de los Ojuelos	52	Gabro	2,92	1076,00
30	98	Plioceno	Diorita de grano fino, de Valsequillo	53	Diorita	2,96	75,00
31	98	Plioceno	Diorita de grano fino, de Valsequillo	53	Diorita	2,94	100,00
18	9	Devonico-Pérmico	Granito biotítico de grano grueso	61	Granito	2,51	1,00
34	2	Cambrico	Granito biotítico de grano grueso, de Valsequillo)	61	Granito	2,63	21,00
47	17	Pérmico	Muestra de granito, de Cañada del Gamo	61	Granito	2,54	2,00
23	10	Devonico-Pérmico	Granodiorita , de los Pedroches (Cantera)	63	Granodiorita	2,66	14,00
24	10	Devonico-Pérmico	Granodiorita, de los Pedroches (Cantera)	63	Granodiorita	2,64	16,00
25	10	Devonico-Pérmico	Granodiorita, de los Pedroches (Cantera)	63	Granodiorita	2,65	13,00
6	58	Devonico	Tobas grises	70	Tobas	2,66	36,00
55	52	Ordovícico	Muestra de tobas ácidas, de Malcocinado	70	Tobas	2,51	27,00

Tabla 3.23. Rocas intrusivas y volcánicas. M: n° de muestra. CodP: código Magna. CodL: código de litología.

La densidad de las rocas básicas es evidentemente la mayor de todas las litologías contempladas en esta zona, con valores de 2.86 g/cm³ para los basaltos, 2.92 g/cm³ para el gabro y 2.95 g/cm³ para las dioritas, pudiendo asignarse para todas ellas un valor representativo de 2.91 g/cm³.

Los granitos presentan un valor medio de 2.56 g/cm³, siendo este valor superior para las granodioritas, que alcanzan una densidad media de 2.65 g/cm³. Las tobas, igualmente ácidas, tienen una densidad del orden de 2.58 g/cm³.

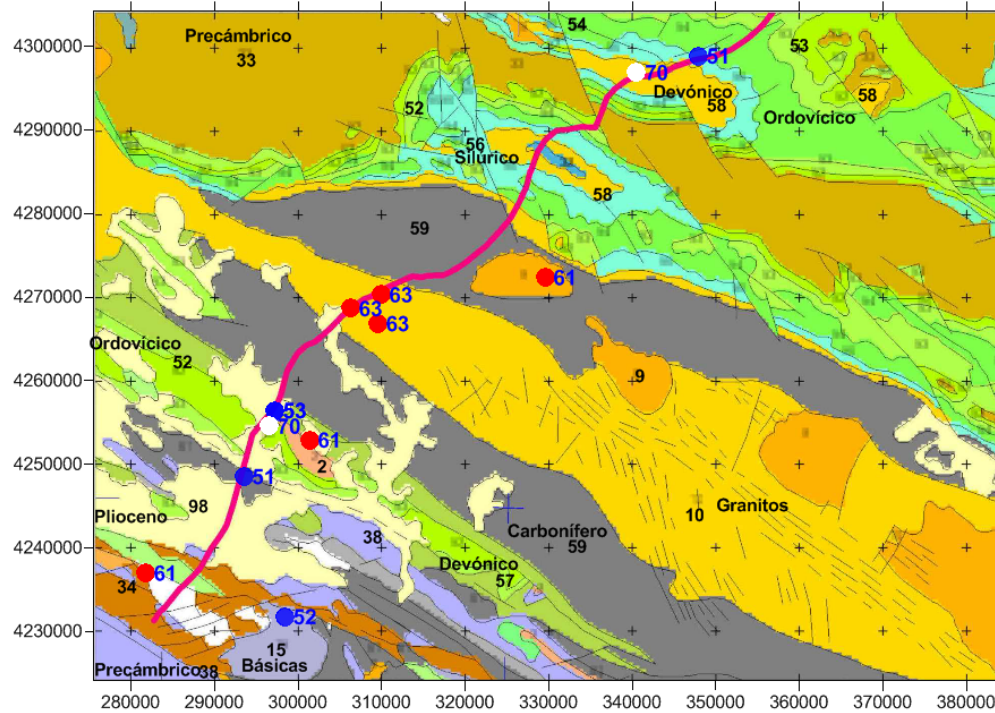


Fig. 3.70 Posición de las muestras de rocas intrusivas básicas (Basalto-51, gabro-52 y diorita-53), intrusivas ácidas (granito-61 y granodiorita-63) y tobas-70.

En la Figura 3.71 se representa el conjunto de muestras ordenadas por su clasificación litológica en forma de pseudo log. Resulta evidente que todas las rocas metamórficas presentes, y en función de las muestras tomadas, pueden ser representadas por un único valor medio de densidad de 2.60 g/cm^3 , ya que la presencia de corneanas y anfibolitas no puede considerarse mayoritaria. Por otra parte, la existencia de vulcanitas o rocas vulcanoclásticas en casi todos los pisos del Paleozoico, al tratarse de rocas básicas pueden dar lugar, por su mayor densidad (2.91 g/cm^3), a anomalías de gravedad locales, a no ser que su existencia sea tan generalizada y su distribución tan amplia geográficamente como para poder hacer aumentar de manera notable la densidad del conjunto de rocas que las contienen. Sin embargo, los granitos, debido a su presencia en grandes masas, como son las granodioritas del batolito de los Pedroches, aunque no se diferencien grandemente en su densidad (2.65 g/cm^3) de las rocas encajantes, podrían dar lugar a anomalías gravimétricas. Se hace notar, sin embargo, que llama la atención el escaso contraste, y además que éste sea positivo, ya que ello provocaría máximos en la anomalía de Bouguer, contra lo que es normal que suceda.

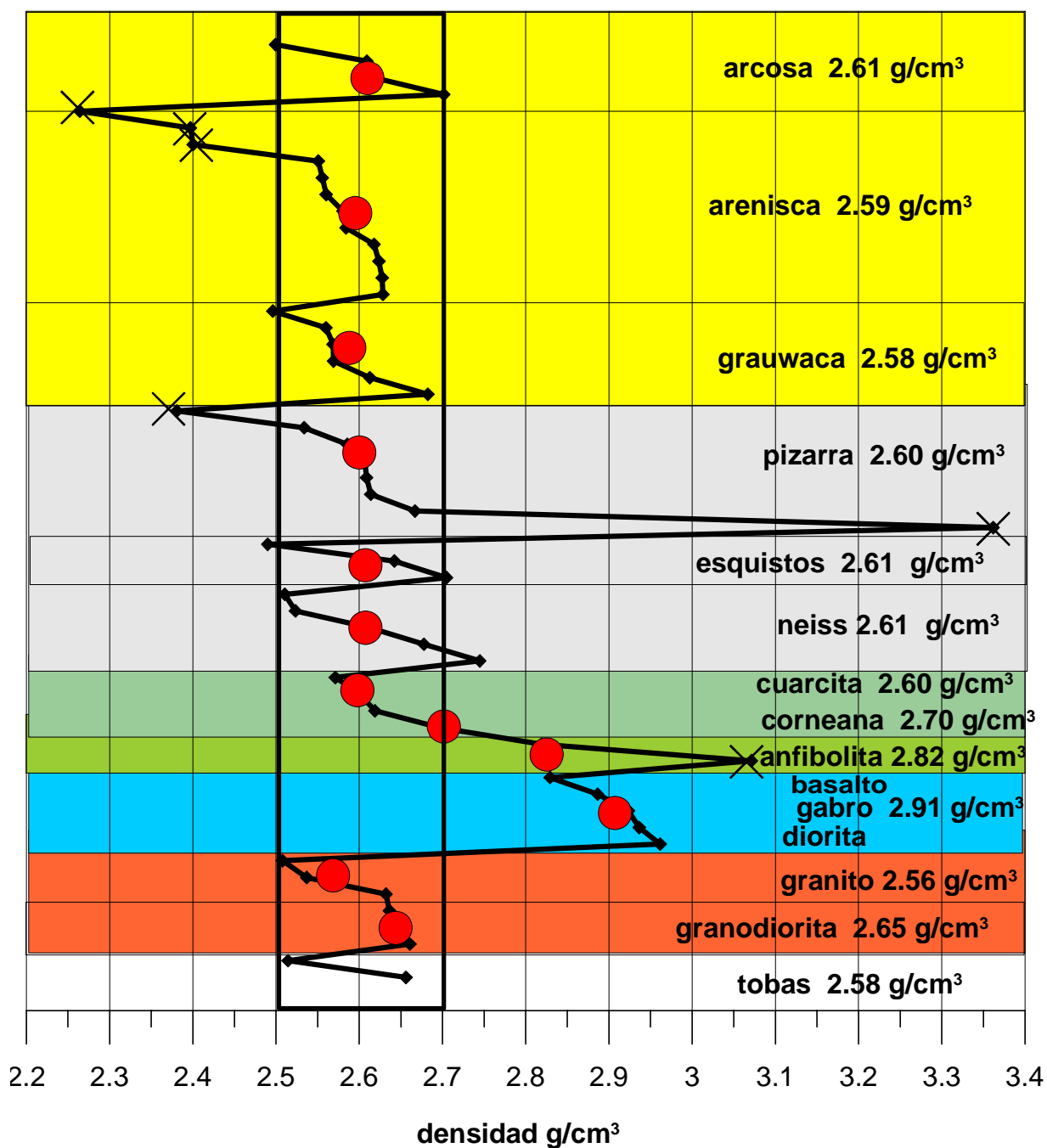


Fig. 3.71 Visión conjunta de la variación y valores medios de densidad de las muestras clasificadas por litología. Se indica la densidad media de cada tipo, sin tener en cuenta los valores extremos (marcados por un aspa).

3.3.5. Clasificación de las muestras por origen estratigráfico

En la Tabla 3.23 se detalla la litología de las muestras tomadas en cada Unidad geológica, de acuerdo con el mapa de la Figura 3.60.

cod und mag	cod piso	piso magna	Nº M	LITOLOGÍA	cod lito
2	2	Cambrico	1	Granito	61
9			1	Granito	61
10	51	Devonico-Pérmico	3	Granodiorita	63
15			1	Gabro	52
17	71	Pérmico	1	Granito	61
33			2	Grauvaca	14
34			5	Neis	23
34			1	Anfibolitas	42
35			2	Esquistos	22
38			2	Pizarra	21
38	1	Proterozoico	1	Esquistos	22
52			2	Arcosa arenisca	12
52			1	Pizarra	21
52			1	Tobas	70
53			1	Arenisca	13
53			1	Pizarra	21
53			3	Cuarcita	30
54			1	Arenisca	13
54			1	Grauvaca	14
54			1	Pizarra	21
56			1	Arenisca	13
56	3	Ordovícico	1	Basalto	51
57	4	Silúrico	1	Arenisca	13
58			6	Arenisca	13
58	5	Devonico	1	Tobas	70
59			1	Arcosa	11
59			1	Arenisca	13
59			2	Grauvaca	14
59			2	Pizarra	21
61			1	Anfibolitas	42
61			1	Basalto	51
63			1	Grauvaca	14
63	6	Carbonífero	1	pizarras	21
98			1	Arcosa arenisca	12
98			1	Arenisca	13
98			1	Corneana	41
98	8	Plioceno	2	Diorita	53

57

Tabla 3.23 Detalle de la litología de las muestras recogidas en cada Unidad geológica. Los colores asignados a la litología no guardan correspondencia con los pisos. Nº M: nº de muestras.

En el **PLIOCENO** se han tomado un total de 5 muestras, cuya situación se indica en la Figura 3.72. Se trata de dos muestras de dioritas, una arcosa, una arenisca y una corneana, cuyas características se muestran en la Tabla 3.24.

M	CodM	cod lito	LITOLOGÍA	DEN g/cm ³	K (SI 10 ⁻⁵)
40	98	12	Arcosa arenisca	2,62	2,00
29	98	13	Arenisca	2,40	13,00
56	98	41	Corneana	2,70	55,00
30	98	53	Diorita	2,96	75,00
31	98	53	Diorita	2,94	100,00

Tabla 24. Muestras del Plioceno. M: n° de muestra. CodM: código Magna.

Cabe destacar que la descripción Magna de la litología 98 de este piso es de calcarenitas, arenas y limos, por lo que la corneana (producto del metamorfismo de contacto con el afloramiento del granitoide 2) no puede considerarse representativa de este piso. Por otra parte, la presencia de dioritas (intrusivas) no está registrada, aunque si la de basaltos alcalinos (volcánica); en cualquier caso, pensamos que la presencia de este tipo de rocas es anecdótica a efectos de modelización gravimétrica a escala regional, aunque por su elevada densidad pueden dar lugar a anomalías de gravedad locales.

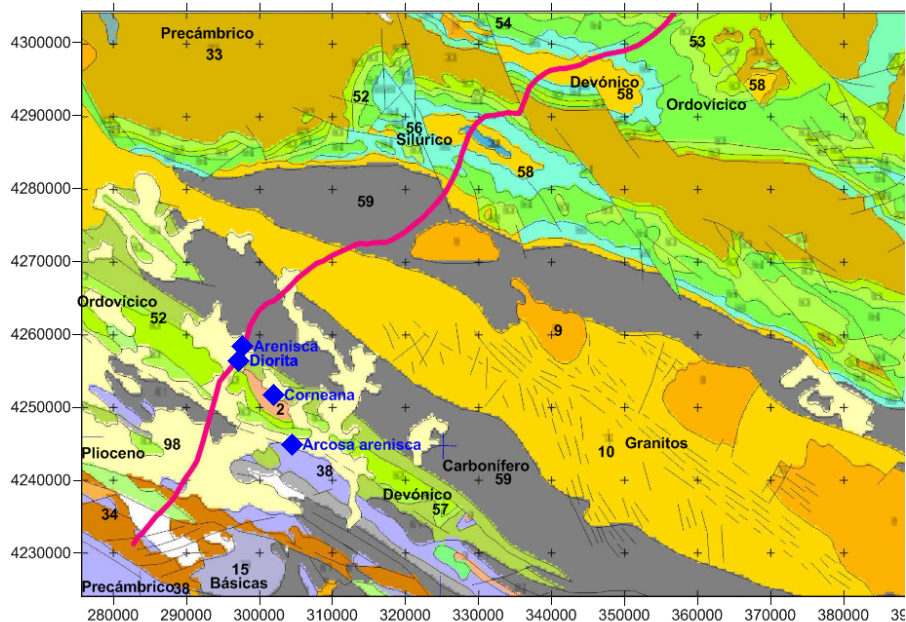


Fig. 3.72 Situación de las muestras tomadas en el Plioceno, con indicación de la liltología de la muestra.

Por lo tanto, la densidad media del conjunto (2.72 g/cm^3) no significa nada. La muestra nº 29 de arenisca ya fue detectada anteriormente (ver Figura 3.62) como de densidad anómala, por lo que sólo cabe adoptar como densidad representativa de este piso la de la arcosa de **2.62 g/cm^3** , aunque pensamos que se trata de un muestreo sesgado, y en cualquier caso insuficiente.

Sobre el **CARBONÍFERO** se sitúan 10 muestras (Figura 3.73): 3 de pizarra, 5 areniscas (1 arenisca, 1 arcosa y 3 grauvacas), 1 basalto y 1 anfíbol, cuyas características se muestran en la Tabla 3.25.

M	CodM	cod lito	LITOLÓGIA	DEN g/cm^3	K (SI 10^{-5})
20	59	11	Arcosa	2,70	34,00
21	59	13	Arenisca	2,56	11,00
22	59	21	Pizarra	2,61	26,00
26	59	14	Grauvaca	2,57	11,00
28	59	14	Grauvaca	2,50	13,00
27	59	21	Pizarra	2,53	7,00
37	61	51	Basalto	2,89	2000,00
43	61	42	Anfibolitas	2,82	724,00
38	63	21	pizarras	3,36	225,00
41	63	14	Grauvaca	2,68	22,00

Tabla 25. Muestras del Carbonífero. M: nº de muestra. CodM: código Magna.

La descripción Magna de la litología para la unidad 59 de este piso es de pizarras, grauvacas, conglomerados y calizas; la unidad 63 se trata de pizarras, areniscas, conglomerados, carbón y calizas, siendo la 61 de vulcanitas, cuya presencia pensamos que no es significativa. La muestra de pizarra, tomada en una escombrera, ya fue también anteriormente detectada como anómala.

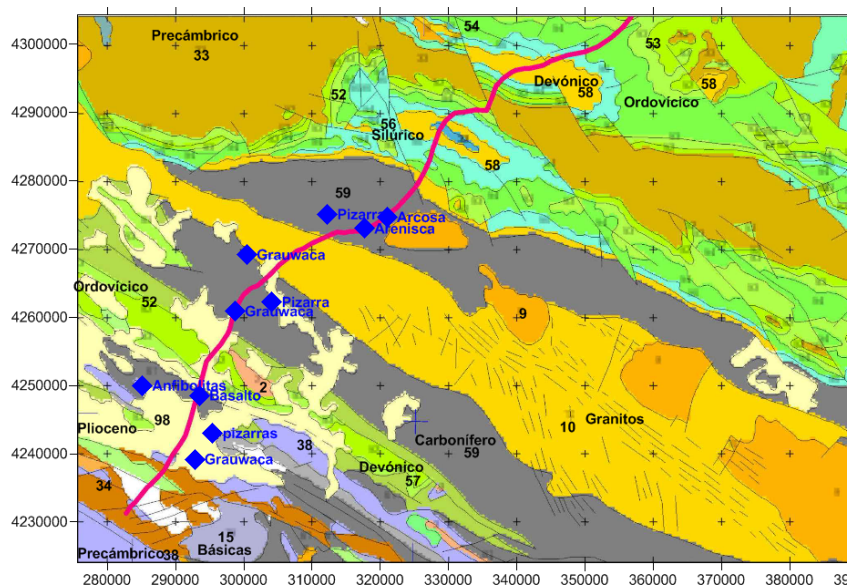


Fig. 73 Situación de las muestras tomadas en el Carbonífero, con indicación de la litología de la muestra.

En consecuencia, la densidad media del grupo (de 2.72 g/cm^3) pensamos que no es representativa, quedando en 2.59 g/cm^3 al no considerar las muestras 37, 38 y 43.

Una muestra de arenisca se ha tomado en el **SILÚRICO** (código 57) y 5 en el **DEVÓNICO** (código 58), donde además se ha recogido una toba. Las características de estas muestras se recogen en la Tabla 3.26 y su posición está representada en la Figura 3.74.

M	CodM	cod lito	LITOLÓGÍA	DEN g/cm^3	K (SI 10^{-5})
32	57	13	Arenisca	2,55	1,00
1	58	13	Arenisca	2,58	3,00
4	58	13	Arenisca	2,63	20,00
5	58	13	Arenisca	2,62	1,00
6	58	70	Tobas	2,66	36,00
13	58	13	Arenisca	2,56	3,00
15	58	13	Arenisca	2,62	7,00
19	58	13	Arenisca	2,63	22,00

Tabla 26. Muestras del Carbonífero. M: nº de muestra. CodM: código Magna.

La descripción de las litologías para estos pisos, según la cartografía magna es de pizarra, esquistos, areniscas, calizas y ampelitas para el Silúrico (57) y de areniscas, pizarras, calizas, cuarcitas y vulcanoclásticas para el Devónico (58). El conjunto tiene una densidad media de 2.61 g/cm^3 (2.60 g/cm^3 sin incluir la muestra de toba).

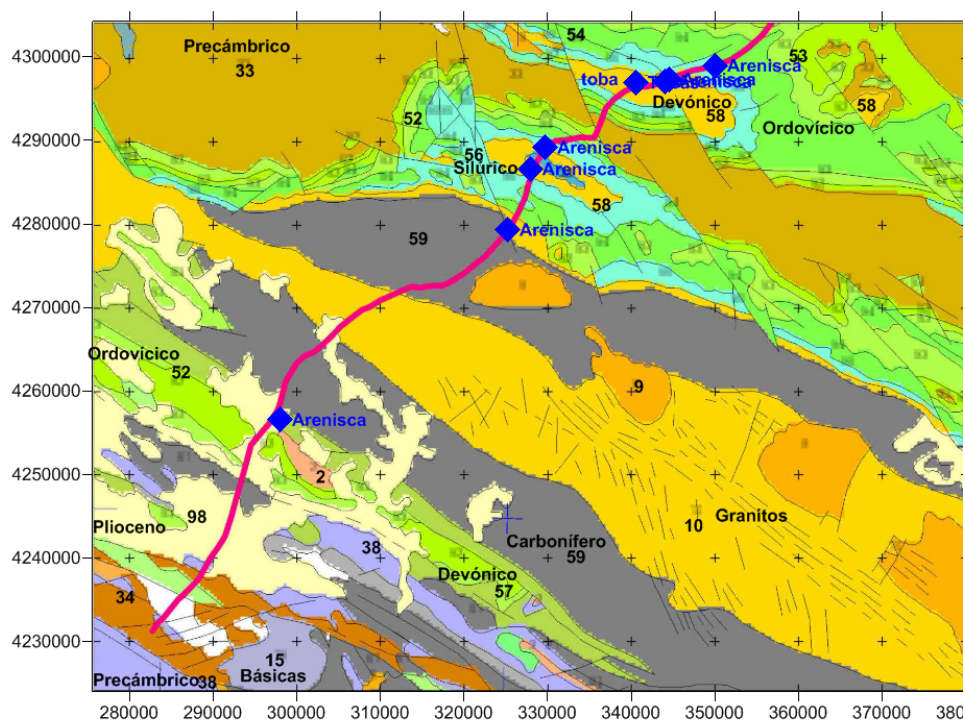


Fig. 3.74 Situación de las muestras tomadas en el Silúrico y Devónico, con indicación de la litología de la muestra.

La posición de las 14 muestras tomadas sobre terrenos **ORDOVÍCICOS** se muestra en la Figura 3.75, y sus características en la Tabla 3.27. Se trata de 3 de pizarra, 6 areniscas (una de ellas arcosa y otra grauvaca), 3 cuarcitas, 1 basalto y una toba.

M	CodM	cod lito	LITOLÓGÍA	DEN g/cm ³	K (SI 10 ⁻⁵)
14	52	21	Pizarra	2,61	33,00
33	52	12	Arcosa arenisca	2,61	5,00
55	52	70	Tobas	2,51	27,00
57	52	12	Arcosa arenisca	2,50	1,00
11	53	30	Cuarcita	2,62	1,00
12	53	13	Arenisca	2,58	5,00
17	53	21	Pizarra	2,38	
35	53	30	Cuarcita	2,60	2,00
42	53	30	Cuarcita	2,57	1,00
7	54	21	Pizarra	2,59	15,00
8	54	14	Grauvaca	2,61	2,38
16	54	13	Arenisca	2,26	8,00
2	56	51	Basalto	2,83	3800,00
3	56	13	Arenisca	2,40	13,00

Tabla 27. Muestras del Ordovícico. M: n° de muestra. CodM: código Magna.

La descripción de litologías magna para estos pisos es de conglomerados, areniscas, cuarcitas y pizarras para el 52, aunque en el muestreo se encuentra un piroclasto; en el piso 53 se encuentran ortocuarcitas, areniscas y pizarras, estando representado fundamentalmente por cuarcitas en el muestreo; pizarras, areniscas, cuarcitas, calizas y vulcanitas en el piso 54, y ampelitas, cuarcitas y vulcanoclásticas para el 56.

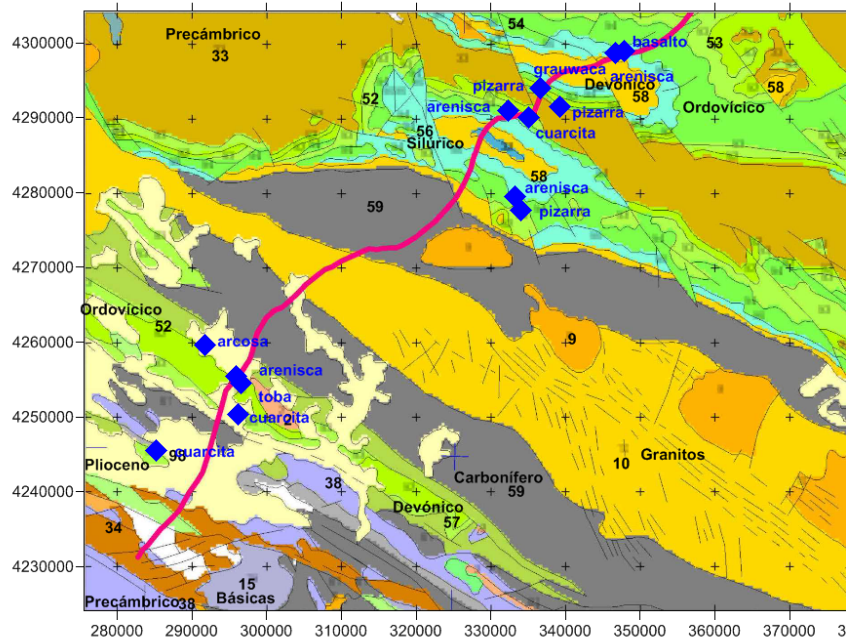


Fig. 75 Situación de las muestras tomadas en el Ordovícico, con indicación de la litología de la muestra.

Las muestras 3, 16 y 17 no deben tenerse en cuenta por sus valores anómalos (ver Figura 3.62), y así mismo la presencia del basalto no pensamos que sea significativa, por lo que para el resto de las muestras se obtiene una densidad media de 2.58 g/cm^3 (2.55 g/cm^3 para el total de estas muestras).

De las 13 muestras tomadas en el **PRECÁMBRICO**, 9 están concentradas en el afloramiento de la esquina sur occidental del mapa (Figura 3.76). Excepto una muestra de anfibolita y 2 de grauvacas, el resto son pizarras, esquitos y neis, con las características indicadas en la Tabla 3.28.

M	CodM	cod lito	LITOLOGÍA	DEN g/cm ³	K (SI 10 ⁻⁵)
9	33	14	Grauvaca	2,56	19,00
10	33	14	Grauvaca	2,57	17,00
44	34	23	Neis	2,61	20,00
45	34	23	Neis	2,68	10,00
49	34	23	Neis	2,51	1,00
50	34	42	Anfibolitas	3,07	70,00
51	34	23	Neis	2,74	40,00
52	34	23	Neis	2,52	4,00
36	35	22	Esquistos	2,49	25,00
46	35	22	Esquistos	2,70	69,00
39	38	21	Pizarra	2,67	5,00
53	38	22	Esquistos	2,64	16,00
54	38	21	Pizarra	2,61	37,00

Tabla 3.28. Muestras del Precámbrico. M: nº de muestra. CodM: código Magna.

Según la descripción litológica del Magna, estas unidades están formadas por pizarras, grauvacas y conglomerados (33); neises y anfibolitas (34); esquistos, pizarras y grauvacas (35), y cuarcitas, neises, esquistos, pizarras y grauvacas (38), no habiendo por lo tanto ninguna anomalía en este muestreo.

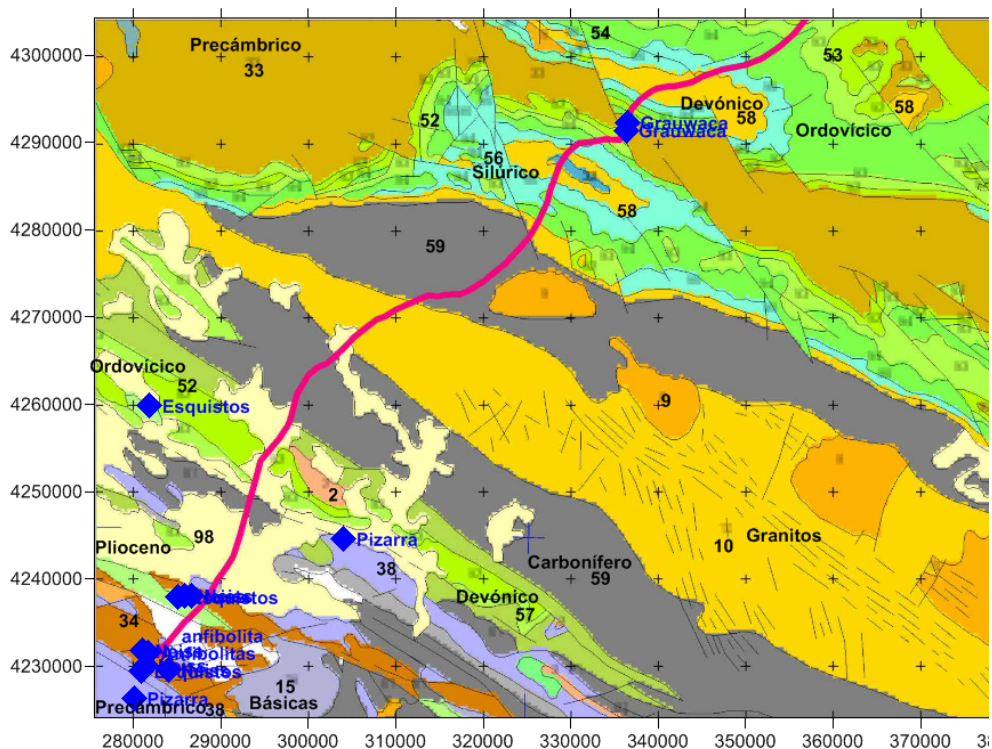


Fig. 3.76 Situación de las muestras tomadas en el Proterozoico, con indicación de la litología de la muestra.

Aunque el conjunto de las muestras tiene una densidad media aritmética de 2.64 g/cm^3 , no debe tenerse en cuenta la anfibolita (muestra 50), quedando para el resto un valor medio de 2.61 g/cm^3 .

Finalmente, en la Figura 3.77 se sitúan las 7 muestras de **GRANITOS** y **ROCAS BÁSICAS**, de las que 4 están recogidas sobre el batolito de los Pedroches (Devónico-Pérmico, unidades 9 y 10), y el resto son afloramientos que se sitúan entre las rocas paleozoicas. En la Tabla 3.29 se recogen sus parámetros.

M	CodM	piso magna	cod lito	LITOLÓGÍA	DEN g/cm^3	K (SI 10^{-5})
34	2	Cambrico	61	Granito	2,63	21,00
18	9	Devonico-Pérmico	61	Granito	2,51	1,00
23	10	Devonico-Pérmico	63	Granodiorita	2,66	14,00
24	10	Devonico-Pérmico	63	Granodiorita	2,64	16,00
25	10	Devonico-Pérmico	63	Granodiorita	2,65	13,00
48	15	Pérmico	52	Gabro	2,92	1076,00
47	17	Pérmico	61	Granito	2,54	2,00

Tabla 29. Muestras del Precámbrico. M: n° de muestra. CodM: código Magna.

Las intrusiones del Cámbrico (2) se trata de granitoides calcoalcalinos, siendo biotíticos (10) y de dos micas (9) las Devónico-Pérmico. La roca básica, gabro del Pérmico, puede considerarse como espacialmente la más puntual, mientras que los granitos alcalinos tienen mayor cobertura en su afloramiento.

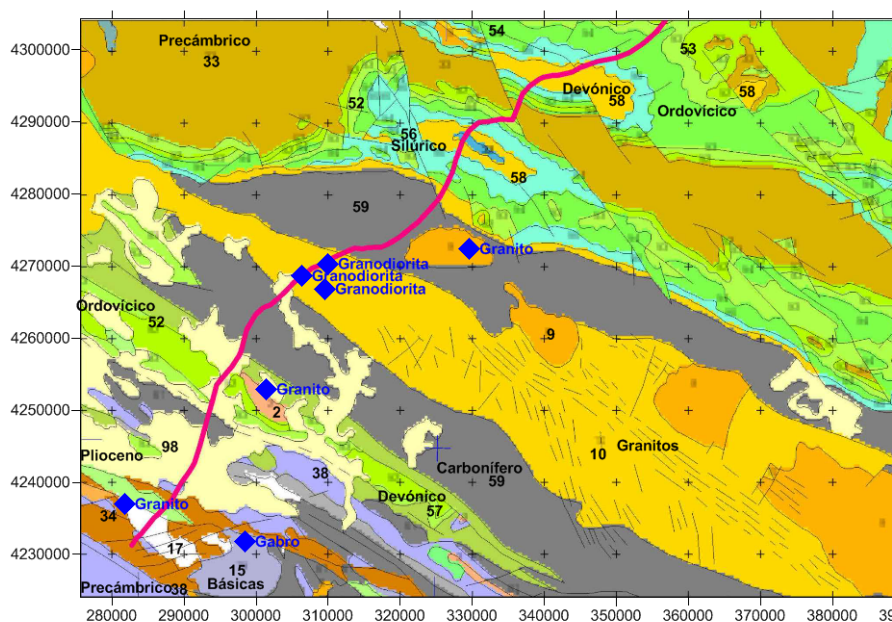


Fig. 3.77 Situación de las muestras de granitos y gabros con indicación de la liltología de la muestra.

Por su distribución geográfica deben considerarse los granitos cámbricos (unidad 2), con densidad de **2.63 g/cm³**, y los granitos pérmicos (unidad 17), con densidad de 2.54 g/cm³, aunque los más importantes para la modelización gravimétrica son los granitos del batolito de los Pedroches (9,10), para el que la densidad media de 2.61 g/cm³ puede no ser representativa, debiendo considerar por separado la unidad 9, con **2.51 g/cm³** de la unidad 10, con **2.65 g/cm³**.

Del análisis anterior puede concluirse que al ser todas las litologías prácticamente de la misma densidad, aunque los diversos pisos estratigráficos existentes son multi-litológicos, pueden considerarse como un sólo conjunto a efectos de modelización gravimétrica. En la Figura 3.78 se pone de manifiesto que no existe un contraste de densidad significativo entre ninguno de los terrenos contemplados, pudiendo estar todos ellos caracterizados por el valor de 2.60 g/cm³, y por lo tanto, salvo situaciones locales en las que aparezcan rocas básicas, de mayor densidad, no se producirían anomalías gravimétricas.

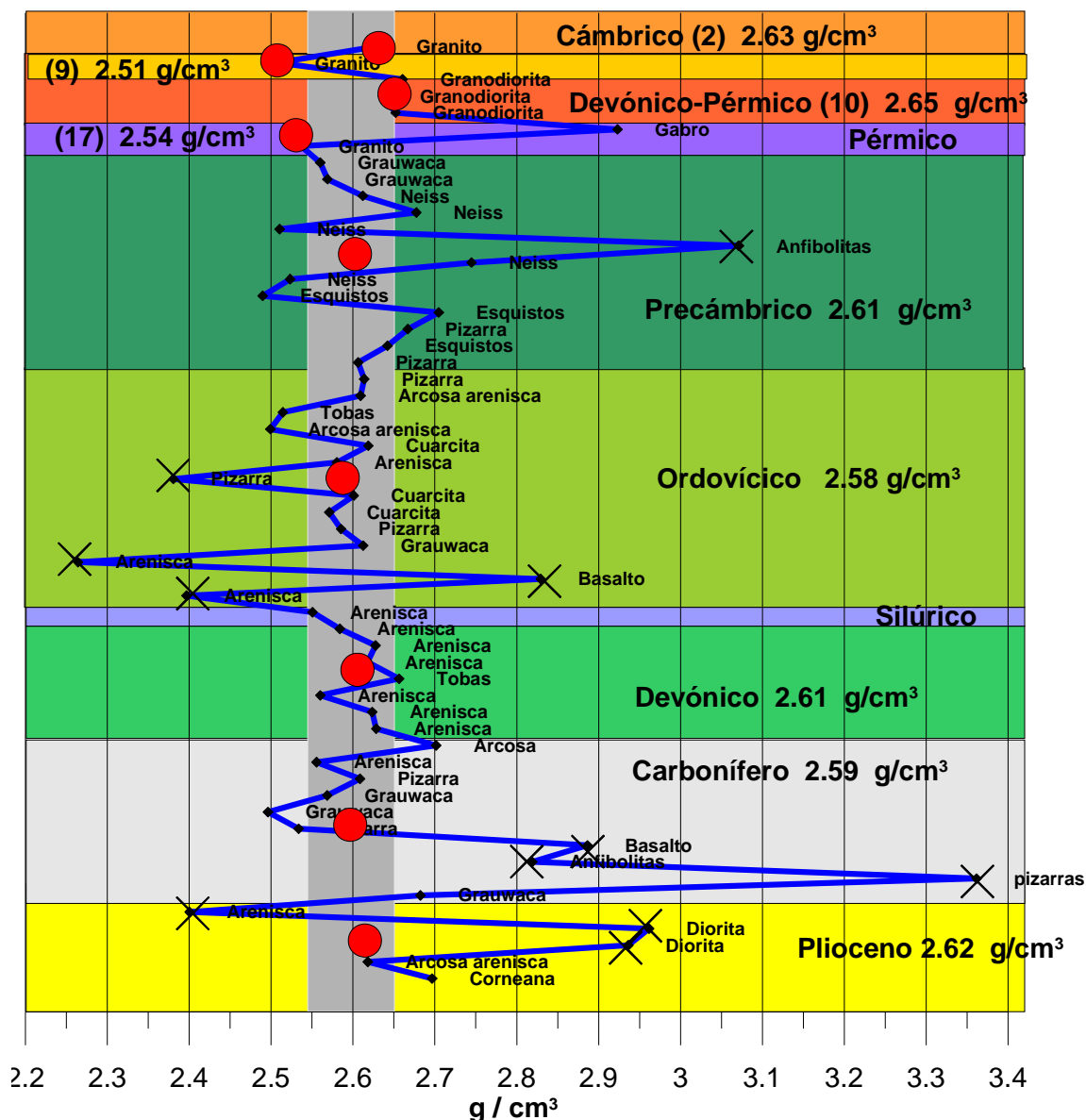


Fig. 3.78 Visión conjunta de la variación y valores medios de densidad de las muestras clasificadas por pisos estratigráficos. Se indica la densidad media de cada tipo, sin tener en cuenta los valores extremos (marcados por un aspa).

Finalmente, en el mapa de la Figura 3.79 se sintetiza el resultado del análisis de densidad de las unidades cartografiadas en esta zona.

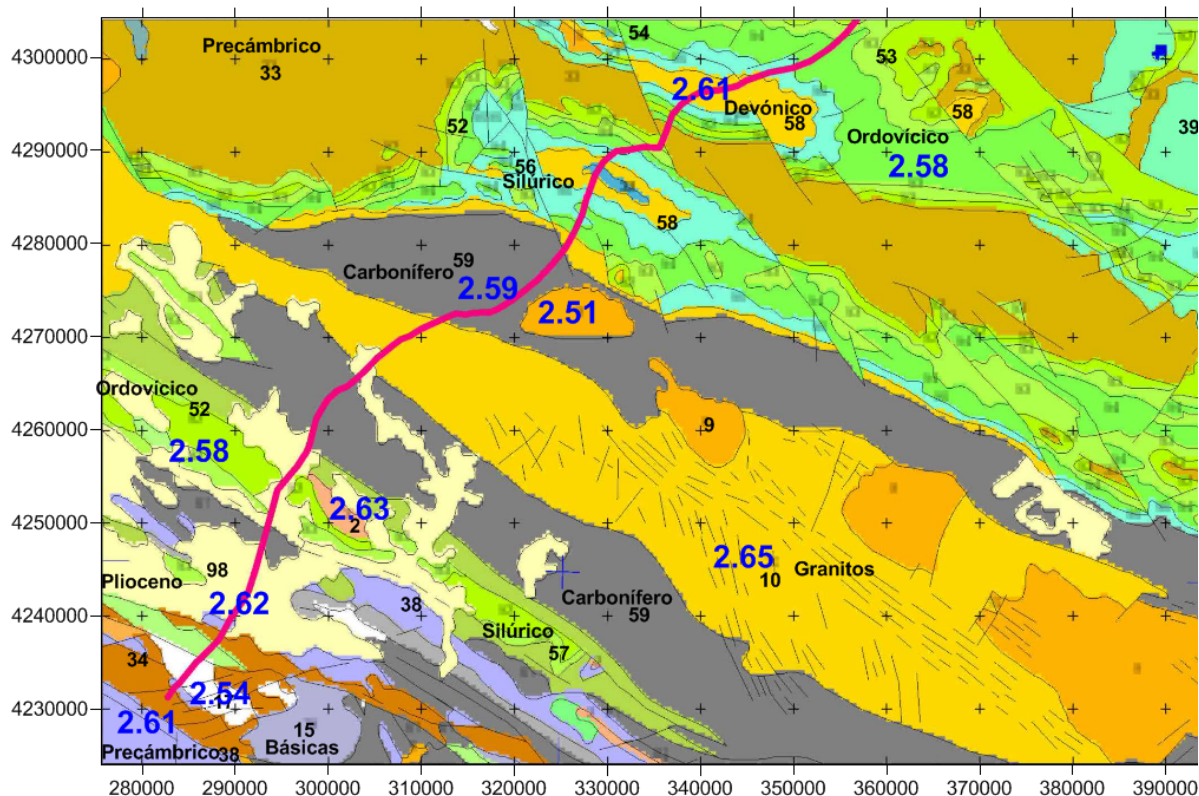


Fig. 3.79 Densidad media (en color azul, en g/cm^3) que puede caracterizar las unidades geológicas cartografiadas en la zona de Los Pedroches.

La densidad de las muestras tomadas en los granitos presenta un gran interrogante: los batolitos graníticos se caracterizan por dar lugar a mínimos en la anomalía de Bouguer, y sin embargo, como resultado de este muestreo, la gran masa representada por la unidad 10 sería más densa que el conjunto de rocas metamórficas que la rodean (contraste de $+0.05 \text{ g/cm}^3$), por lo que se produciría una anomalía positiva. Solamente los granitos muestreados en las unidades 9 y 17, con escasa significación cartográfica en la zona contemplada, darían lugar a anomalías negativas, con un contraste de hasta -0.1 g/cm^3 .

3.3.6. Comparación de valores con otros muestreos

En la Tabla 3.30 se presenta una comparación de los valores medios de densidad obtenidos en la zona de los Alcuía-Los Pedroches (57 muestras en un área de unos 1500 km^2 , 0.4 muestras / 10 km^2), con la obtenida en la zona de El Bierzo (136 muestras en un área de unos 600 km^2). Se ha añadido parte del resultado de un muestreo efectuado por el IGME en 1996 en la Faja Pirítica (Informe nº 40454) con 1246 muestras en unos 5000 km^2 . La zona de los

Pedroches está muestreada por lo tanto con una densidad de muestreo unas 6 veces inferior a las otras dos, que tienen aproximadamente de 2.3-2.5 muestras/ 10 km².

litología	M	Pedroches	M	Bierzo	M	FP
arenas			2	1,93		
arcilla			9	2,07		
arcosa	4	2,61				
arenisca	9	2,59	15	2,51	67	2,58
conglomerados			8	2,54		
grauvaca	6	2,58			55	2,58
pizarra todas	16	2,6	64	2,55	368	2,5
pizarras	7	2,6				
esquistos	3	2,61			10	2,62
neis	4	2,61				
piz Precamb.		2,6				
piz Ordo.		2,6	36	2,55		2,5
piz Carb.		2,57	18	2,53	91	2,43
piz Devp.					96	2,5
piz Silur.			10	2,58		
cuarcitas	3	2,6	27	2,58	37	2,59
corneana	1	2,7			8	2,75
anfíbolita	1	2,82				
basalto	2	2,86			12	2,85
gabro	1	2,92			18	2,91
diorita	2	2,95			20	2,89
granito	3	2,56	6	2,47	27	2,64
granodiorita	3	2,65			4	2,67
toba	2	2,58			89	2,63

Tabla 3.30. Comparación de resultados para la densidad media, por litologías, obtenidos en los muestreos efectuados en la zona del Bierzo y de los Pedroches. Se añade el resultado del muestreo de 1998 en la Faja Pirítica. M: n° de muestras.

Dentro de la precisión o del grado de fiabilidad que puede ofrecer este tipo de muestreos, se puede apreciar que los resultados, aun tratándose de entornos geológicos distintos, no son dispares. Las pizarras de la Faja Pirítica dieron un valor de 0.1 g/cm³ inferior, lo que puede ser debido a un menor grado de metamorfismo. Las areniscas de la zona del Bierzo presentan valores 0.08 g/cm³ inferiores a otras zonas.

En la Tabla 3.31 se ofrece la comparación de resultados por grandes unidades estratigráficas, lo que, como ya se ha comentado anteriormente en este Informe, son valores que normalmente no representan nada, siendo solamente un producto numérico. Es de todas formas singular que el Carbonífero resultara menos denso en la Faja Pirítica (Facies Culm) y

más denso en la zona del Bierzo, donde el Terciario puede ser sin embargo de menor densidad.

Piso	M	Pedroches	M	Bierzo	M	FP
Terciario	1	2,62	14	2,07	13	2,66
Estefaniense	7	2,59	43	2,71		
Culm					194	2,5
Silúrico	1	2,55	11	2,53		
Ordivícico	9	2,58	62	2,56		
Devónico	7	2,61			197	2,56
Precámbrico	12	2,61				

Tabla 3.31 Comparación de resultados en la densidad media, por pisos estratigráficos, de los muestreos efectuados en la zona del Bierzo y de los Pedroches. Se añade el resultado del muestreo de 1998 en la Faja Pirítica. M: nº de muestras.

Estas comparaciones, sobre todo la establecida en función de las litologías, ratifican en cierta forma la validez de los resultados obtenidos. Queda por esclarecer cómo con los contrastes de densidad encontrados puede justificarse la Anomalía de Bouguer medida.

3.3.7. Análisis del Bouguer y la densidad

A pesar del resultado obtenido en el análisis de la densidad, el perfil de Anomalía de Bouguer de zona de Los Pedroches calculado con densidad de reducción 2.6 g/cm^3 (Figura 3.80 y Figura 3.81) muestra claramente la existencia de anomalías de varias decenas de mGal (este perfil está representado en función de la distancia de cada estación a un origen de coordenadas $X=277000$, $Y=4225000$). Por otra parte, resulta evidente su correlación con el relieve topográfico: en ambos extremos del perfil, dicha correlación es inversa, lo que podría indicar el uso de una densidad de reducción demasiado alta, mientras que en el resto del perfil es directa, lo que podría significar que se está utilizando una densidad de reducción inferior a la necesaria.

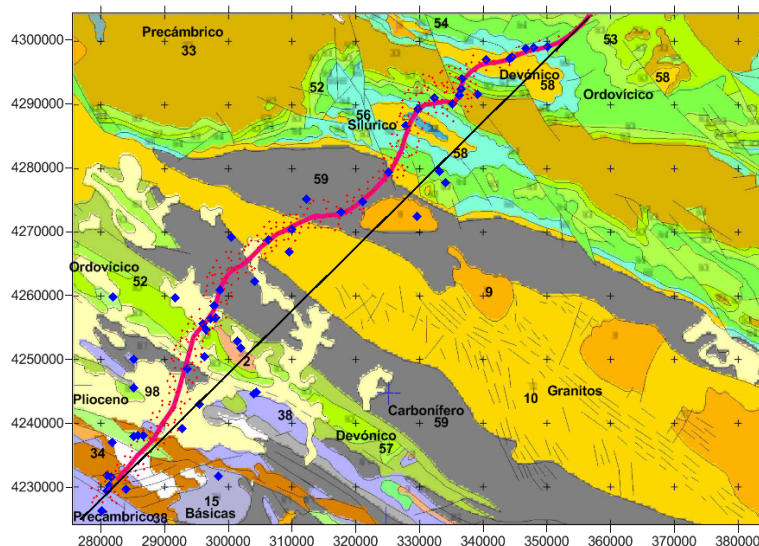


Fig. 3.80 Trazado del perfil gravimétrico, altimétrico y de densidades, proyectando las distancias sobre la línea indicada.

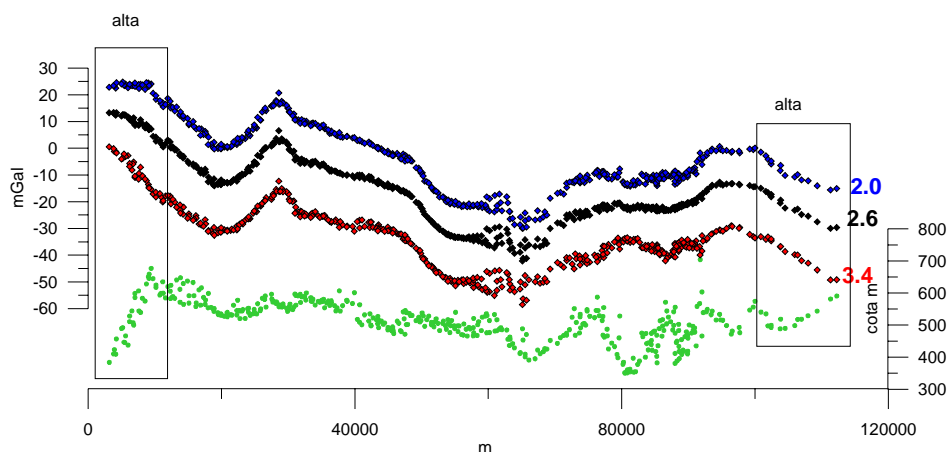


Fig.3.81 Perfil de Anomalia de Bouguer trazado con distintas densidades de reducción.

Para verificar esta posibilidad, se han elegido otras dos densidades de reducción extremas: 2.0 y 3.4 g/cm³. Para 2.0 se aprecia (Figura 3.81) que, efectivamente, se va amortiguando la correlación de los extremos, que se acentúa para 3.4 g/cm³; sin embargo, el resto del perfil mantiene su correlación prácticamente invariable, aunque algo suavizadas en la porción central para 3.4 g/cm³. En consecuencia, y puesto que adoptar densidades tan extremas carece de realidad geológica, es evidente que la topografía está producida-asociada a cambios de densidad de las rocas, que en consecuencia dan lugar a cambios de gravedad.

Finalmente, en la Figura 3.82 se ha superpuesto la variación de densidad al perfil de Bouguer a 2.6 g/cm³, indicando el código litológico asignado a cada muestra según la Tabla 3.32. No se han tenido en cuenta las muestras 3,16,17,29,38 y 50.

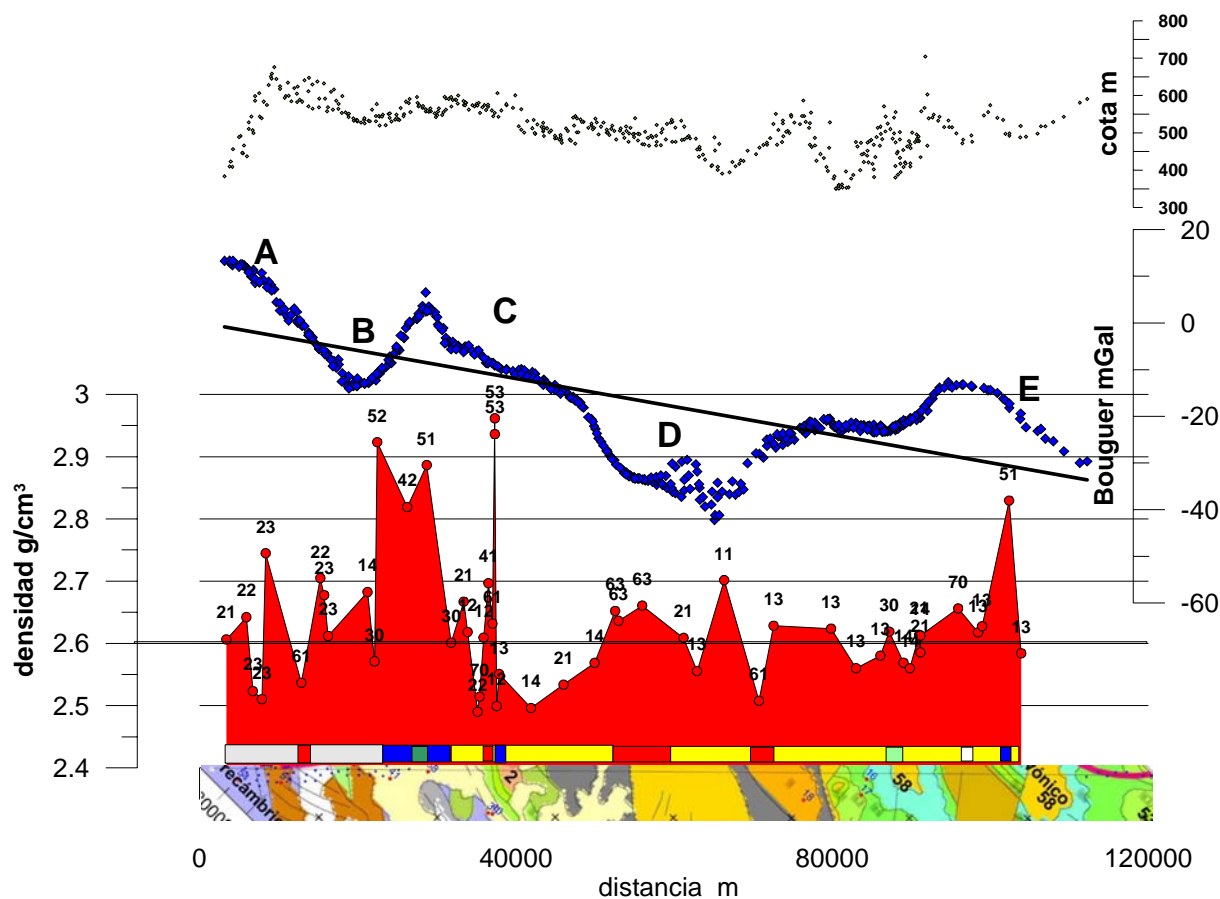


Fig.3.82 Superposición de la variación de densidad y el perfil de anomalía de Bouguer.

Cod lito	LITOLÓGÍA	cod lito	LITOLÓGÍA
11	Arcosa	41	Corneana
12	Arcosa arenisca	42	Anfibolitas
13	Arenisca	51	Basalto
14	Grauvaca	52	Gabro
21	Pizarra	53	Diorita
22	Esquistos	61	Granito
23	Neis	63	Granodiorita
30	Cuarcita	70	Tobas

Tabla 3.32 Códigos de litología empleados en la Figura 3.82

Sobre la tendencia regional de la Anomalía de Bouguer, que como anteriormente se ha hecho notar mantiene una correlación con el relieve topográfico, excepto en ambos extremos, las anomalías residuales permiten deducir:

- en el extremo Sur-Oeste (A), el valor de la anomalía puede estar relacionado con la presencia del Precámbrico, cuya geometría en profundidad pudiera ser la responsable

de la anomalía regional. Las muestras de este tramo presentan densidades por encima de 2.6 g/cm^3 , lo que justifica la anomalía, pero deja sin significado los valores dados para el Precámbrico en las Figuras 3.76 y 3.77, indicando que este piso está posiblemente formado por pizarras (con densidad superior a 2.65 g/cm^3 , ver Figura 3.76) siendo de menor importancia los neises y grauvacas.

- La anomalía B pudiera estar asociada a la presencia de los granitos de la unidad 17, con densidad 2.54 g/cm^3 .
- El máximo C está claramente asociado a la presencia de gabros, basalto y corneanas, muestreados en el Carbonífero, sin que por ello puede aceptarse que este piso debe presentar en general una densidad más elevada que la atribuida por el muestreo, de 2.59 g/cm^3 .
- A partir de la zona C, las litologías predominantes son areniscas. El mínimo gravimétrico D está geográficamente asociado al batolito de los Pedroches, que según el resultado del muestreo tiene densidad superior a 2.6 g/cm^3 , lo que evidentemente no ratifica la gravimetría; por lo tanto, es posible que sean los granitos de dos micas (unidad 9), con densidad de 2.51 g/cm^3 (ver Figura 3.77) los responsables de esta anomalía, en cuyo caso su geometría debe extenderse por debajo de la cartografiada como granito biotítico (unidad 10).
- En el extremo nororiental del perfil se presenta una anomalía positiva, E, que podría explicarse nuevamente por la mayor presencia de vulcanitas y rocas intrusivas básicas, así como a la presencia de nuevos afloramientos del Precámbrico.

En conclusión, si se aceptara como cierto que no existe contraste de densidad entre la mayor masa de granito del batolito de los Pedroches y las rocas encajantes, la morfología de la anomalía gravimétrica habría que justificarla como debida a la geometría de un basamento denso, que pudiera ser el Precámbrico en el supuesto que su litología principal fueran las pizarras de mayor densidad. El resto de las anomalías residuales pueden ser explicadas por la presencia de rocas básicas, que no altera el valor representativo adoptado para los pisos en los que se encuentran.

3.3.8. Caracterización densidad-susceptibilidad

La susceptibilidad magnética de estas muestras presenta valores muy bajos, inferiores a 100 unidades SI 10^{-5} , típicos de rocas paramagnéticas sedimentarias, más que de metamórficas, salvo unas pocas muestras que alcanzan algunos centenares o miles de unidades.

Su distribución por litologías (Figura 3.83) pone no obstante de manifiesto que las areniscas y cuarcitas tienen valores inferiores a las pizarras, correspondiendo los valores superiores a 100 SI 10^{-5} a rocas básicas. Por pisos estratigráficos, solamente el Precámbrico presenta valores superiores a 10 SI 10^{-5} , lo que puede ser debido a la mayor abundancia de pizarras en este piso (ratificando así la hipótesis establecida en el apartado anterior del Análisis de Bouguer y la densidad).

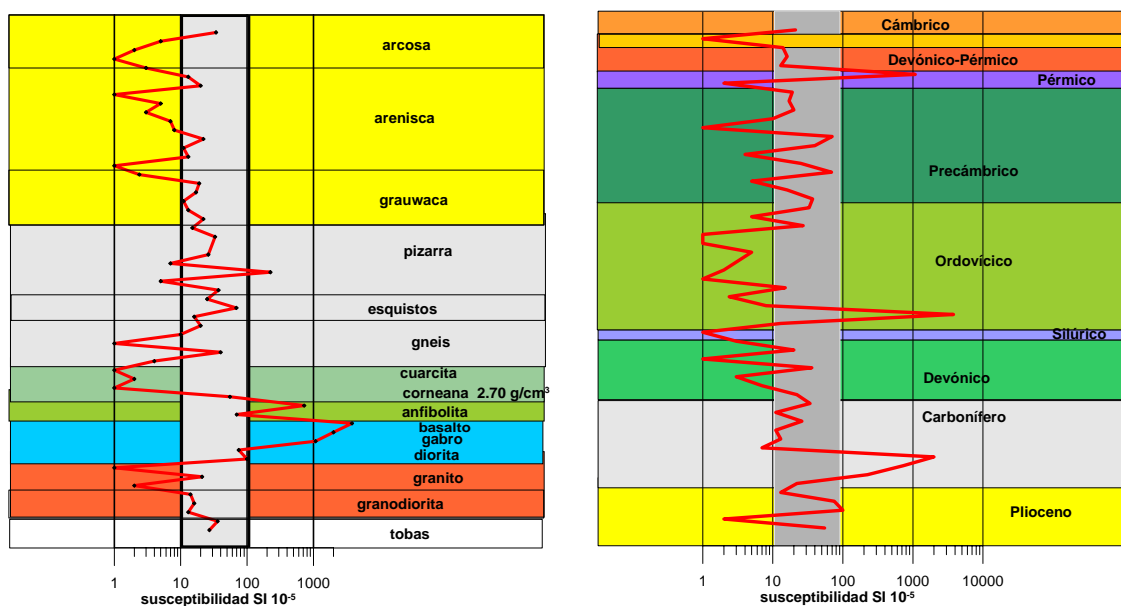


Fig. 3.83 Susceptibilidad de las muestras según su clasificación por litologías (izquierda) y pisos estratigráficos (derecha)

La caracterización de litologías por su relación densidad-susceptibilidad (Figura 3.84) permite una diferenciación entre pizarras y areniscas, aunque existe un importante solape entre ambas familias, sobre las que además se superpone el granito. Las rocas básicas evidentemente siempre se diferencian por su agrupación densidad-susceptibilidad.

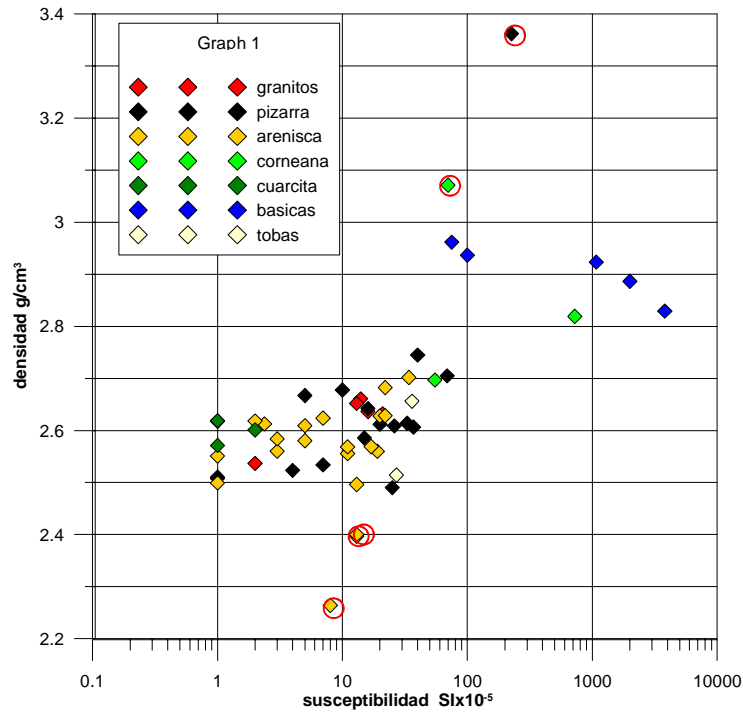


Fig. 3.84 Diagrama Susceptibilidad-densidad por litologías. Se han señalado con un círculo las muestras no consideradas.

La caracterización por pisos estratigráficos (Figura 3.85) no resulta posible, aunque el Precámbrico presenta en general mayores valores de k-d que el Ordovícico y Devónico. Se manifiestan claramente las dos familias de granitos. Las muestras de mayor relación k-d corresponden a rocas básicas.

