



## TÍTULO

ESTABILIDAD DE TALUDES DEL MACIZO ROCOSO UBICADO  
EN EL ENTORNO DE LA CARRETERA HU-6400, EL GRANADO,  
HUELVA

## AUTORA

María Astrid Moreno Suárez

Esta edición electrónica ha sido realizada en 2021

Tutora	Dña. Encarnación García Navarro
Instituciones	Universidad Internacional de Andalucía ; Universidad de Huelva
Curso	<i>Máster en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales(2019/20)</i>
©	María Astrid Moreno Suárez
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha documento	2020



**Atribución-NoComercial-SinDerivadas  
4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)**

Para más información:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.en>



**MASTER EN GEOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL DE RECURSOS MINERALES**

**ESTABILIDAD DE TALUDES DEL MACIZO ROCOSO UBICADO EN  
EL ENTORNO DE LA CARRETERA HU-6400, EL GRANADO,  
HUELVA**

**Tutor académico:** Encarnación García Navarro

**Presentado por:** Moreno Suarez María Astrid

**Huelva, 2020**

**Moreno Suarez María Astrid**

**ESTABILIDAD DE TALUDES DEL MACIZO ROCOSO UBICADO EN EL ENTORNO DE LA  
CARRETERA HU-6400, EL GRANADO, HUELVA**

**Tutor académico: Encarnación Navarro García. Trabajo Fin de Máster. Huelva,  
Universidad de Huelva. Universidad Internacional de Andalucía. Año 2019. 87p**

**Palabras claves:** Anticlinal de La Puebla de Guzmán, cartografía geológica, clasificación  
geomecánica, estabilidad de taludes

**Resumen:** La finalidad de este trabajo de fin de máster es el estudio geológico y la caracterización geomecánica de los macizos rocosos ubicados en el entorno de la carretera HU-6400, El Granado (Huelva), zona que se caracteriza geológicamente por encontrarse en el Anticlinal de La Puebla de Guzmán. Para tal fin, se recurrió en principio a la obtención y procesamiento de datos de campo relacionados con la geología de la zona y la caracterización de macizos rocosos.

Para cumplir con el objetivo de este trabajo se elaboró una cartografía geológica de detalle, representando las estructuras geológicas encontradas, así como, las litologías presentes, las cuales corresponden a la Unidad de sedimentos sinorogénicos de facies Culm y al Complejo Volcánico – Sedimentario. Así mismo, se encontraron evidencias estructurales y estratigráficas que demuestran que estas rocas se encuentran en posición invertida formando parte del flanco inverso de la estructura citada a escala regional (Anticlinal de La Puebla de Guzmán).

Se estudiaron las características geomecánicas de los macizos rocosos que afloran en la zona, y se concluyó que se trata de macizos rocosos de calidad buena (clase II de Bieniawski, 1989). Los tipos de rotura más frecuentes son los de tipo cuña y en las zonas con pliegues de orden menor, éstos condicionan el tipo de rotura.

## Índice de contenido

Resumen.....	ii
Índice de contenido .....	iii
Índice de figuras .....	v
Índice de tablas.....	x
1. Introducción .....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Situación geográfica .....	2
2. Contexto geológico .....	3
2.1. Geología regional.....	3
2.1.1. Estratigrafía de la Faja Pirítica Ibérica.....	4
2.1.2. Estructuras tectónicas de la Zona Surportuguesa .....	5
2.1.3. Anticlinal de La Puebla de Guzmán.....	6
3. Metodología de trabajo y marco teórico empleado.....	8
3.1. Metodología de trabajo.....	8
3.1.1. Trabajo de campo. Cartografía geológica. Análisis de datos.....	8
3.1.1.1. Trabajo de campo.....	8
3.1.1.2. Cartografía geológica .....	9
3.1.1.3. Análisis de datos.....	10
3.2. Marco teórico empleado .....	12
3.2.1. Estaciones geomecánicas, clasificación geomecánica del macizo rocoso y estabilidad de taludes en rocas .....	12
3.2.1.1. Estaciones geomecánicas.....	12
3.2.1.2. Clasificación de Bieniawski 1989 (RMR).....	16
3.2.1.3. Clasificación de Romana 1985 (SMR).....	23
3.2.1.4. Estabilidad de taludes en roca .....	25
3.2.1.5. Análisis de estabilidad de talud.....	29
4. Resultados .....	31

4.1. Cartografía geológica y geología de la zona de estudio .....	31
4.1.1. Cartografía geológica en el Flanco sur del Anticlinal de Pomarão .....	31
4.1.1.1. Unidad de facies Culm .....	35
4.1.1.2. Rocas del CVS .....	36
4.1.1.3. Contacto entre el CVS y la Unidad de facies Culm.....	38
4.1.1.4. Estructuras de deformación en las pizarras con nódulos de Mn .....	41
4.1.1.5. Fallas de desgarre .....	44
4.1.1.6. Flanco norte del Anticlinal de Pomarão .....	45
4.2. Estaciones geomecánicas e identificación de las familias de discontinuidades .....	47
4.2.1. Descripción de las estaciones de trabajo (Anexo I) .....	51
4.2.1.1. Taludes estudiados.....	51
4.2.1.2. Características Geomecánicas de los taludes estudiados.....	52
4.2.1.3. Estabilidad geométrica.....	60
4.2.1.4. Estabilidad mecánica.....	61
4.3. Clasificación de Bieniawski de parámetro RMR (Rock Mass Rating) .....	66
4.5. Clasificación geomecánica SMR.....	70
4.6. Discusión de los datos geotécnicos .....	71
4.7. Conclusiones.....	72
Referencias bibliográficas.....	75
ANEXO I.....	77

## Índice de figuras

<b>Figura 1.1.</b> Ubicación de la zona de estudio cerca de la frontera con Portugal. Las estaciones medidas en campo se representan con el círculo rojo y se indican con los números desde el 1 al 10.....	3
<b>Figura 2.1.</b> Esquema geológico simplificado de la Zona Surportuguesa basado en el Mapa Geológico 1:1.000.000 del IGME. La línea discontinua de color amarillo representa el trayecto del perfil sísmico IBERSEIS. El Anticlinal de La Puebla de Guzmán se sitúa en el cuadro azul (Fuente: Donaire et al., 2008) .....	4
<b>Figura 2.2.</b> Mapa geológico del Anticlinal de La Puebla de Guzmán, la línea roja corresponde al corte geológico I-II. La zona de estudio del flanco norte (normal) se localiza en el cuadro azul, mientras que el flanco sur (inverso) en el cuadro rojo (tomado de Alonso-Chaves et al., 2016) .....	6
<b>Figura 2.3.</b> Corte geológico (sección I-II) transversal al Anticlinal de Puebla de Guzmán (ver localización en la figura 2.2.) (tomado de Alonso-Chaves et al., 2016).....	7
<b>Figura 3.1.</b> Mapa con la ubicación de las estaciones de medida (puntos del 1 al 10).....	9
<b>Figura 3.2.</b> Interfaz del programa Stereo32, utilizado para representar las proyecciones estereográficas mostradas en este trabajo.....	10
<b>Figura 3.3.</b> Ejemplo de representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) del diagrama de densidades de los polos.....	11
<b>Figura 3.4.</b> Ejemplo de análisis estadístico, cálculo de los autovalores y autovectores	11
<b>Figura 3.5.</b> Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades (tomado de González de Vallejo, 2002) .....	13
<b>Figura 3.6.</b> Modelos de continuidad de varias familias de discontinuidades (tomado de González de Vallejo, 2002) .....	14
<b>Figura 3.7.</b> Perfiles de rugosidad y los valores correspondientes de JRC (tomado de González de Vallejo, 2002) .....	15
<b>Figura 3.8.</b> Estimación de la resistencia a la compresión de pared conjunta de dureza Schmidt (tomado y Modificado de Maguiña Javier) .....	18
<b>Figura 3.9.</b> Cálculo del índice RQD .....	19

<b>Figura 3.10.</b> Tipos de roturas para macizos rocosos y representación estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud (tomado de González de Vallejo, 2002) .....	27
<b>Figura 3.11.</b> Condiciones para la rotura plana y para la rotura en cuña (tomado de González de Vallejo, 2002) .....	28
<b>Figura 3.12.</b> Representación estereográfica de cuñas. Las cuñas A y B no tienen posibilidad de deslizar por no cumplirse la condición $\psi > \alpha$ ; a: las cuñas C y D presentan condiciones de deslizamiento (tomado de González de Vallejo, 2002) .....	28
<b>Figura 3.13.</b> Esquemas de taludes con estructura favorable al vuelco de estratos (tomado de González de Vallejo, 2002) .....	29
<b>Figura 3.14.</b> Introducción de datos en el programa SWedge (Rocscience, 2004) .....	30
<b>Figura 3.15.</b> Cálculo del factor de seguridad incluyendo las fuerzas externas aplicadas en el talud. SWedge (Rocscience, 2004) .....	30
<b>Figura 4.1.</b> Mapa geológico de la zona de estudio, delimitada por el cuadro rojo (tomado del Visor cartográfico del IGME).....	32
<b>Figura 4.2.</b> Mapa geológico de la zona de estudio.....	33
<b>Figura 4.3.</b> Mapa de datos estructurales S0-S1.....	34
<b>Figura 4.4.</b> Afloramiento de facies Culm estación punto 1. Se observa en la proyección estereográfica (equiangular hemisferio inferior) como los planos de foliación buzanan menos que los planos de estratificación .....	35
<b>Figura 4.5.</b> Estructuras de paleocorrientes observadas en los estratos de grauvaca (punto 1).....	36
<b>Figura 4.6.</b> Pizarras con nódulos de Mn (punto 2) .....	37
<b>Figura 4.7.</b> Nivel de pizarras moradas (punto 5).....	38
<b>Figura 4.8.</b> Silexitas observadas en las proximidades de las pizarras moradas (punto 10) .....	38
<b>Figura 4.9.</b> Zona de roca de falla observada en el punto 6.....	39
<b>Figura 4.10.</b> Mapa de los datos estructurales (fallas y pliegues) .....	40
<b>Figura 4.11.</b> Plegamiento asimétrico dentro de las pizarras con nódulos de Mn CVS (punto 2).....	41
<b>Figura 4.12.</b> Pliegues de escala local observados en la estación punto 8.....	41
<b>Figura 4.13.</b> Plegamiento de la S0 (punto 3).....	42

<b>Figura 4.14.</b> Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos de S0, observándose la formación de la guirnalda por los polos de este plano	42
<b>Figura 4.15.</b> Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los ejes de los pliegues medidos en los puntos 2 y 3.	43
<b>Figura 4.16.</b> Cabalgamiento en las pizarras y metaarenitas con nódulos de Mn (línea roja)	44
<b>Figura 4.17.</b> Falla de desgarre con movimiento sinistral punto 9 (señalada con la flecha roja)	44
<b>Figura 4.18.</b> Medición de los planos de S0 en la parada 1	45
<b>Figura 4.19.</b> Ubicación de los puntos estudiados en el flanco normal (ver figura 2.2). Los datos estructurales tomados son representados en proyección estereográfica equiareal hemisferio inferior. El color rojo corresponde a la S0, mientras que el turquesa a la S1 y el azul son diaclasas de la familia J1	46
<b>Figura 4.20.</b> Líneas de intersección entre la S0 y S1 (línea roja) observándose la diaclasa J1	46
<b>Figura 4.21.</b> Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de las líneas de intersección entre la S0 y S1 medidas en campo	47
<b>Figura 4.22.</b> Mapa de las familias de discontinuidades encontradas en la zona de estudio.	48
<b>Figura 4.23.</b> Mapa de las familias de discontinuidades (dirección media)	50
<b>Figura 4.24.</b> Talud 1 NE facies Culm estación punto 1	51
<b>Figura 4.25.</b> Talud 2. Al SE en la parte inferior observamos las silexitas y las rocas volcánicas, en la parte superior las pizarras moradas. Al NO las pizarras con nódulos de Mn. La flecha roja nos indica el arrastre de la foliación por la falla. La zona de falla se representa con las líneas moradas (tomado de: Google Earth, 2018)	52
<b>Figura 4.26.</b> Afloramiento de Unidad facies Culm estación punto 1	53
<b>Figura 4.27.</b> Familia de discontinuidades encontradas en el punto 1 (S0, J1, J2, y J3)	54
<b>Figura 4.28.</b> Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos de discontinuidad medidos en el punto 1 y del diagrama de densidad	54
<b>Figura 4.29.</b> Las capas de grauvacas muestran una rugosidad plana (figura izquierda), mientras que las estructuras de paleocorrientes tienen rugosidad ondulada	55

<b>Figura 4.30.</b> Pizarras moradas localizadas en la parte superior del talud 2. Al pie del macizo rocoso se observan bloques de diferentes tamaños .....	55
<b>Figura 4.31.</b> Silexitas observadas en la parte inferior del talud 2.....	56
<b>Figura 4.32.</b> Pizarras con nódulos de Mn, se distinguen los planos de foliación.....	56
<b>Figura 4.33.</b> Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos de discontinuidad medidos en el talud 2, con sus respectivos diagramas de densidades.....	57
<b>Figura 4.34.</b> Sinformes presentes en el talud 3 por los que han ocurrido deslizamientos .....	58
<b>Figura 4.35.</b> Esquema del cabalgamiento situado en el punto 3. Se observa que corta a un sinforme que ante su inestabilidad ha tenido que ser reforzado con anclajes. Se representa la proyección estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos encontrados en el talud: $S_0$ de color rojo, $S_1$ turquesa, $J_1$ azul.....	59
<b>Figura 4.36.</b> Talud en trinchera 3 ubicado al frente del talud reforzado, se observa la $S_0$ replegada. En la foto de la derecha se muestran las inestabilidades presentes en el talud.....	59
<b>Figura 4.37.</b> Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de las familias de discontinuidades del talud 1 NE y SO (amarillo), del punto 1 (facies Culm). Las flechas rojas muestran las cuñas formadas .....	60
<b>Figura 4.38.</b> Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos de discontinuidad medidos en: punto 5 (pizarras moradas), punto 10 (silexitas) y punto 9 (pizarras con nódulos de Mn). La flecha roja muestra la cuña formada .....	61
<b>Figura 4.39.</b> Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de las familias de discontinuidades del talud 1 NE y SO (amarillo), del punto 1 (facies Culm). Las flechas rojas muestran las cuñas formadas. El círculo rojo corresponde a la proyección del radio del ángulo de fricción .....	62
<b>Figura 4.40.</b> Cálculo del factor de seguridad para la rotura por cuña talud 1 NE Swedge (Rocscience, 2004).....	62
<b>Figura 4.41.</b> Vista de la rotura por cuña talud 1 NE Swedge (Rocscience, 2004) .....	63
<b>Figura 4.42.</b> Resultados analíticos de la cuña analizada con el programa Swedge (Rocscience, 2004).....	63

<b>Figura 4.43.</b> Factor de seguridad 1, rotura por cuña talud 1 NE Swedge (Rocscience, 2004).....	64
<b>Figura 4.44.</b> Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos de discontinuidad medidos en: punto 5 (pizarras moradas). El círculo rojo corresponde a la proyección del radio del ángulo de fricción. La flecha roja muestra la cuña formada.....	64
<b>Figura 4.45.</b> Cálculo del factor de seguridad para la rotura por cuña talud 2 punto 9. Swedge (Rocscience, 2004) .....	65
<b>Figura 4.46.</b> Vista de la rotura por cuña talud 2 punto 9 Swedge (Rocscience, 2004) ..	65
<b>Figura 4.47.</b> Resultados analíticos de la cuña analizada con el programa Swedge (Rocscience, 2004).....	66
<b>Figura 4.48.</b> Factor de seguridad 1, rotura por cuña talud 2 punto 9. Swedge (Rocscience, 2004).....	66
<b>Figura 4.49.</b> Estimación de la resistencia a la compresión de pared conjunta de dureza Schmidt (tomado y modificado de González de Vallejo, 2002) .....	68

## Índice de tablas

<b>Tabla 3.1.</b> Descripción des espaciado .....	13
<b>Tabla 3.2.</b> Descripción de la continuidad .....	14
<b>Tabla 3.3.</b> Descripción de la abertura .....	15
<b>Tabla 3.4.</b> Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso .....	16
<b>Tabla 3.5.</b> Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989).....	22
<b>Tabla 3.6.</b> Parámetros de corrección F1, F2, F3 y F4 de la clasificación SMR (modificado de Romana (1985) en Anbalagan et al., (1992)).....	24
<b>Tabla 3.7.</b> Parámetros mecánicos utilizados para el análisis de estabilidad de talud ...	31
<b>Tabla 4.1.</b> Análisis estadístico, cálculo de los autovalores y autovectores de los polos de los planos de las distintas familias de discontinuidades .....	35
<b>Tabla 4.2.</b> Orientación media de la charnela de los pliegues .....	43
<b>Tabla 4.3.</b> Orientación media de los ejes de los pliegues .....	43
<b>Tabla 4.4.</b> Planos medios de todas las familias de discontinuidades estudiadas .....	49
<b>Tabla 4.5.</b> Valores de los rebotes obtenidos en campo .....	67
<b>Tabla 4.6.</b> Valores medios de los rebotes .....	67
<b>Tabla 4.7.</b> Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989) de la zona de estudio ..	69
<b>Tabla 4.8.</b> Resultados del RMR (Rock Mass Rating) .....	70

## 1. Introducción

### 1.1. Planteamiento del problema

Cualquier obra construida en el terreno, está soportada por suelo o roca y su estabilidad depende de la caracterización y propiedades geomecánicas del mismo.

El estudio geotécnico previo a la construcción de la obra, garantiza la información básica y veraz del sitio para ser utilizada en el proyecto que se desee desarrollar.

El presente trabajo corresponde a un trabajo de fin de máster, específicamente al Máster de Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales, cuyo objetivo principal es estudiar un área, en la cual, afloran macizos rocosos formados por rocas pertenecientes a la Zona Surportuguesa. En dicho estudio se elaborará una cartografía geológica y el estudio geomecánico de una serie de taludes que se encuentran en la carretera HU-6400 en El Granado (Huelva).

Una de las principales dificultades que se presentó fue el poco tiempo disponible para realizar las salidas de campo, debido a la incompatibilidad entre estas salidas y el horario de dedicación al máster. Además, al no poder obtener datos de ensayos geotécnicos propios, algunos datos referentes a las propiedades mecánicas de las rocas estudiadas se obtendrán a partir de la bibliografía.

Las rocas que afloran en la zona seleccionada (Zona Surportuguesa) son rocas similares a las que se encuentran en áreas mineras explotadas en la provincia de Huelva, entre ellas: las canteras de Gibraleón en las que se explota las grauvacas de la Unidad de Facies Culm, o las rocas pertenecientes al Complejo Volcánico - Sedimentario en el que se excavan minas como la de Rotinto y la de Tharsis. En todos estos casos se realizan taludes cuyo estudio geotécnico sería equivalente al realizado en este trabajo, aunque habría que considerar algunas diferencias, como, por ejemplo, respecto al factor de seguridad, que es menor en el caso de taludes mineros.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

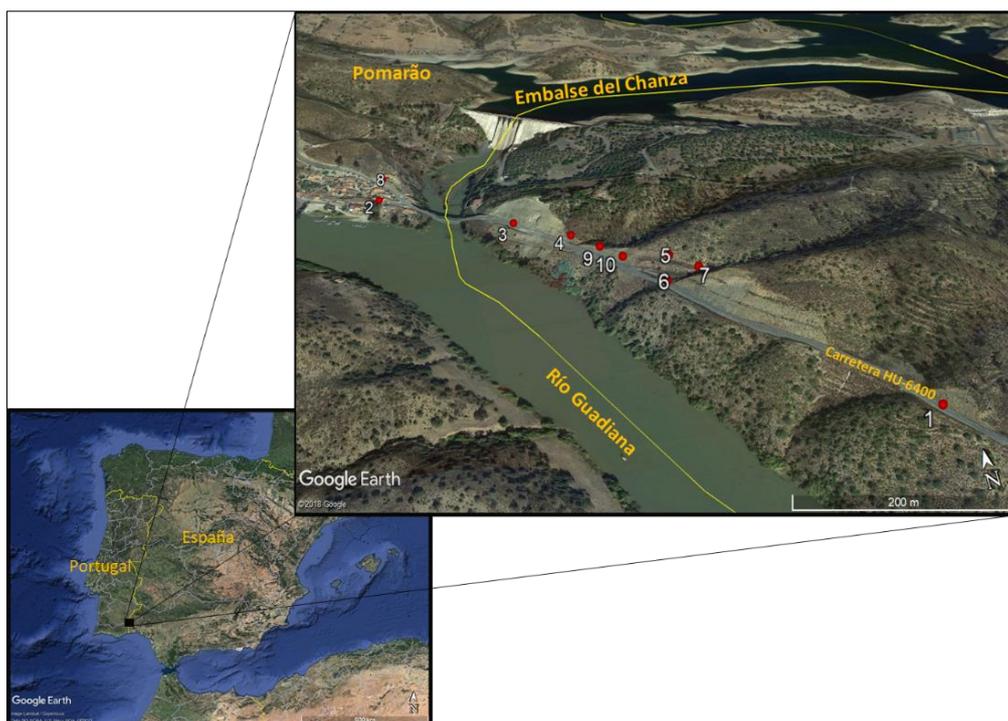
Realizar el estudio geológico y la caracterización de los parámetros geomecánicos de los macizos rocosos ubicados en el entorno de la carretera HU-6400, en El Granado (Huelva).

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Describir y caracterizar geológicamente las litologías presentes en la zona de estudio, corroborando y completando la información geológica
- Describir y caracterizar, con criterios geotécnicos, los macizos rocosos encontrados en la zona de estudio, a través de las clasificaciones geomecánicas de Bieniawski RMR (1989) y de Romana SMR (1985)
- Realizar la cartografía geológica con los datos obtenidos en el campo
- Determinar y analizar los diferentes tipos de rotura que puedan presentar los taludes y analizar su estabilidad

## **1.3. Situación geográfica**

La zona de estudio se encuentra ubicada en el entorno de la carretera HU-6400, entre la población de El Granado en Huelva (España) y la población Pomarão en Portugal. Aproximadamente a 1 km de la frontera entre ambos países, siguiendo una dirección aproximada del curso del río Guadiana, y cerca del embalse del Chanza (figura 1.1).



**Figura 1.1.** Ubicación de la zona de estudio cerca de la frontera con Portugal. Las estaciones medidas en campo se representan con el círculo rojo y se indican con los números desde el 1 al 10

## 2. Contexto geológico

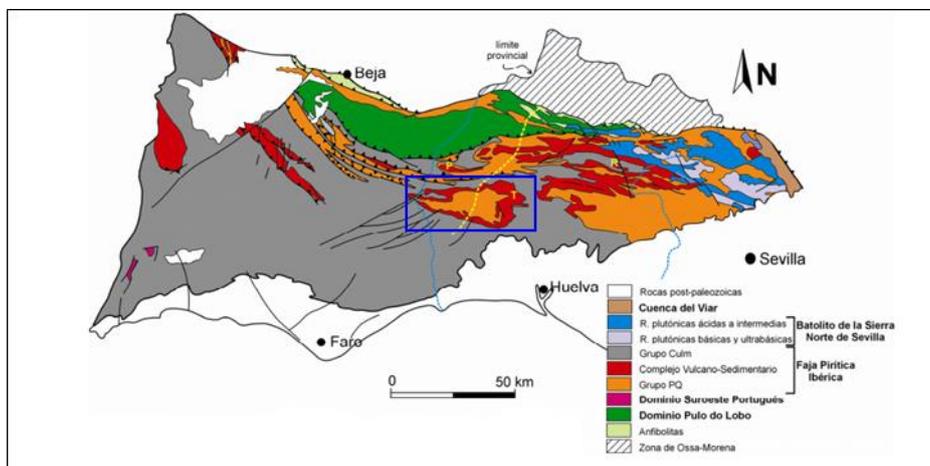
### 2.1. Geología regional

La zona de trabajo se encuentra enmarcada dentro de la banda central de la Zona Surportuguesa (ZSP), que es conocida como la Faja Pirítica Ibérica, y más concretamente en el flanco sur de una de las estructuras cartográficas de mayor entidad que es conocida como el Anticlinal de La Puebla de Guzmán. La Faja Pirítica Ibérica constituye una provincia metalogenética con importantes yacimientos de sulfuros masivos polimetálicos (Sáez *et al.*, 1996; Almodóvar *et al.*, 1998).

Siguiendo la descripción hecha por Donaire *et al.*, (2008), la ZSP es la parte más meridional del Macizo Ibérico. Se extiende desde el suroeste de Portugal hasta la Sierra Norte de Sevilla (figura 2.1). Limita al norte con la Zona de Ossa-Morena mediante un contacto tectónico complejo y al sur, limita con los materiales más modernos de la Cuenca del Guadalquivir.

La ZSP está constituida por rocas del Paleozoico (desde el Devónico medio al Pérmico). Tradicionalmente se distinguen en ella cinco dominios geológicos con características

litológicas, estructurales y paleogeográficas diferentes que, de norte a sur, son (Donaire *et al.*, 2008): 1) Dominio de Pulo do Lobo, 2) Faja Pirítica Ibérica, 3) Dominio del Suroeste Portugués, 4) el batolito de la Sierra Norte de Sevilla y 5) la Cuenca Pérmica del Viar.



**Figura 2.1.** Esquema geológico simplificado de la Zona Surportuguesa basado en el Mapa Geológico 1:1.000.000 del IGME. La línea discontinua de color amarillo representa el trayecto del perfil sísmico IBERSEIS. El Anticlinal de La Puebla de Guzmán se sitúa en el cuadro azul (Fuente: Donaire *et al.*, 2008)

### 2.1.1. Estratigrafía de la Faja Pirítica Ibérica

La estratigrafía regional de la Faja Pirítica está, en general, bien establecida, aceptándose la columna-tipo propuesta por Schermerhörn (1971), con tres unidades estratigráficas principales que, de muro a techo, son: a) *Grupo de Pizarras y Cuarcitas* (P-Q); b) *Complejo Volcánico Sedimentario* (CVS); c) *Grupo Culm*.

**El grupo basal (P-Q)** consiste en una potente y monótona formación de pizarras con niveles y cantos de cuarcitas impuras. Hacia el techo contiene lentejones de rocas carbonatadas que han sido datadas por conodontos como Fameniense Superior (Van den Boogaard y Schermerhörn, 1975).

**El Complejo Volcánico - Sedimentario** se dispone sobre el Grupo PQ y está constituido por un entramado complejo de rocas magmáticas y sedimentarias de edad Fameniense tardío a Viseense medio-superior. Las rocas magmáticas son fundamentalmente de origen volcánico y subvolcánico.

Presenta variaciones litológicas y de potencia (0-1300 m) muy significativas de unas zonas a otras que han sido interpretadas como consecuencia de la compartimentación de la zona en numerosas cuencas a finales del Devónico. El techo de esta unidad está

marcado por niveles discontinuos de jaspes, que a veces incluyen mineralizaciones de Mn, y por un nivel muy continuo de “pizarras moradas” que tiene valor como nivel guía en cartografía, ya que se extiende en toda la Faja Pirítica. Los depósitos del techo (niveles pizarrosos y rocas vulcanoclásticas) pasan de manera gradual a formar parte de la secuencia pizarrosa de la base del grupo Culm (Donaire *et al.*, 2008).

**El Grupo Culm** comprende principalmente rocas sedimentarias del Carbonífero depositadas con posterioridad al magmatismo de la Faja Pirítica Ibérica. Está constituido fundamentalmente por una formación turbidítica de facies Culm s.s., de varios miles de metros de potencia, precedida en numerosos sectores por una unidad estratigráfica, de 45 a 50 metros de potencia media, denominada Serie Pizarrosa Basal.

La formación turbidítica de facies Culm es la más característica de este Grupo y una de las de mayor superficie de afloramiento en la provincia de Huelva, desde San Silvestre de Guzmán hasta Riotinto. Representa el flysch varisco en la ZSP. Se trata de una secuencia formada fundamentalmente por pizarras y areniscas, aunque también se han descrito algunos conglomerados. Son depósitos originados por corrientes de turbidez (que son corrientes cargadas de sedimentos). Estas corrientes llegaron hasta el fondo marino, se depositaron y originaron los estratos que actualmente se observan (Donaire *et al.*, 2008). En este trabajo nos referiremos a estas rocas como Unidad de facies Culm.

### **2.1.2. Estructuras tectónicas de la Zona Surportuguesa**

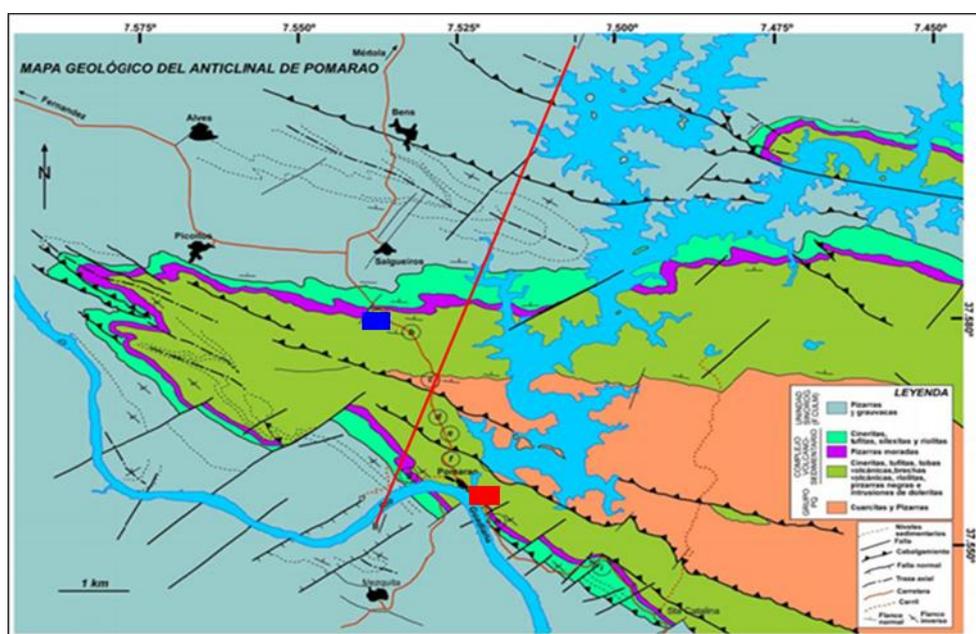
La deformación que se observa en las rocas de la ZSP se produjo durante la Orogenia Varisca (Donaire *et al.*, 2008). El estilo tectónico de la ZSP es del tipo “*thin-skinned*”, o tectónica de piel fina. En términos de estructuras geológicas, la ZSP es un cinturón de pliegues y cabalgamientos que se enraízan en un nivel de despegue situado a 12 km de profundidad, aproximadamente. Importantes cabalgamientos regionales superponen rocas del Grupo PQ (Devónico Superior) sobre rocas del CVS (la mayor parte de él es Carbonífero), así como las rocas del denominado Pulo do Lobo también se superponen a las rocas de la Faja Pirítica Ibérica.

Las directrices estructurales de los cabalgamientos son ONO – ESE y muestran una vergencia hacia el S y SO. Asociados a la propagación de los cabalgamientos se forman también las grandes estructuras de plegamiento (Anticlinal de La Puebla de Guzmán,

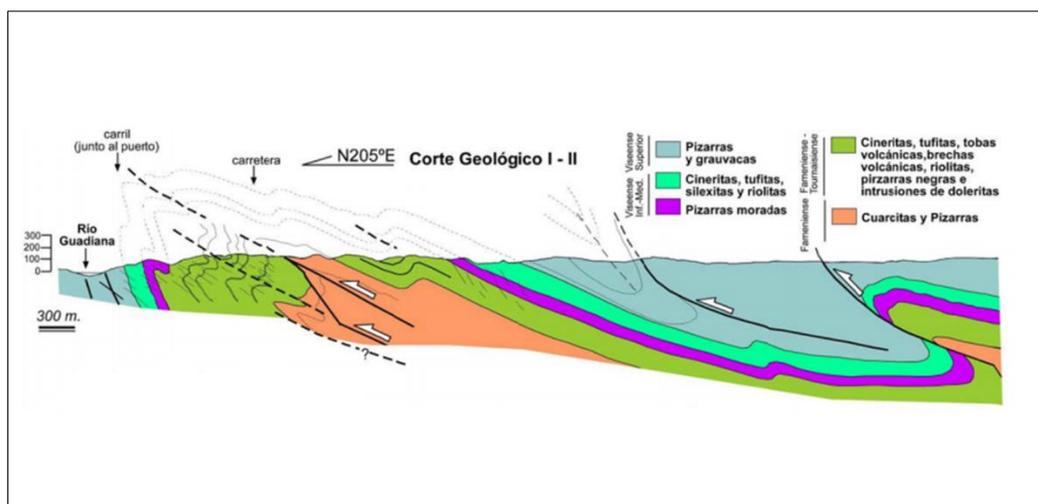
Anticlinal de Valverde del Camino, entre otros). En general, en toda la zona se produce el desarrollo de una o dos foliaciones que suelen ser paralelas al plano axial de los pliegues. La mayor parte de la deformación tuvo lugar durante el Carbonífero, migrando de norte a sur, en relación con la convergencia entre dos fragmentos corticales, por una parte, la ZSP y por otra la Zona de Ossa-Morena (Donaire *et al.*, 2008).

### 2.1.3. Anticlinal de La Puebla de Guzmán

El Anticlinal de La Puebla de Guzmán es una de las estructuras cartográficas más grandes de la Faja Pirítica Ibérica, se trata de un pliegue con una sección en planta en forma de delta y una geometría cómica con varios cierres periclinales, tanto hacia el Oeste como hacia el Este (Alonso-Chaves *et al.*, 2016). Dicho anticlinal está formado en relación con un abanico imbricado de cabalgamientos de vergencia suroeste desarrollados durante la segunda fase de deformación regional (D2). El sentido de transporte tectónico para las láminas cabalgantes es hacia el SO (figura 2.2) En la figura 2.3 se muestra un corte geológico transversal al Anticlinal de La Puebla de Guzmán, donde se aprecia la estructura general del mismo (Alonso-Chaves *et al.*, 2016).



**Figura 2.2.** Mapa geológico del Anticlinal de La Puebla de Guzmán, la línea roja corresponde al corte geológico I-II. La zona de estudio del flanco norte (normal) se localiza en el cuadro azul, mientras que el flanco sur (inverso) en el cuadro rojo (tomado de Alonso-Chaves *et al.*, 2016)



**Figura 2.3.** Corte geológico (sección I-II) transversal al Anticlinal de Puebla de Guzmán (ver localización en la figura 2.2.) (tomado de Alonso-Chaves et al., 2016)

El corte geológico que se propone (figura 2.3) está cerca del cierre periclinal del Anticlinal de La Puebla de Guzmán (Región de los Pliegues de Propagación Mayores de la Faja Pirítica Ibérica, cf. Mantero et al. 2007). La terminación lateral de un sistema de cabalgamientos regional de dirección ONO-ESE en el flanco sur del Anticlinal de La Puebla de Guzmán (segunda fase de deformación) se resuelve con la formación de un cierre periclinal relativamente agudo hacia el Oeste (Anticlinal de Pomarão). Los flancos del pliegue de primer orden tienen una curvatura baja. La orientación de las superficies envolventes de los pliegues menores en el flanco norte se dispone con un suave buzamiento hacia el NE. En el flanco sur tales superficies están fuertemente inclinadas hacia el NE y se observa una inversión generalizada de la serie estratigráfica con buzamientos muy altos de la estratificación hacia el NE. Las grandes estructuras cartográficas se atribuyen a la segunda fase de deformación regional en el Dominio Central de la ZSP. Las trazas axiales de los pliegues de primer orden tienen una continuidad cartográfica de decenas de kilómetros, resultando ser paralelas a la dirección de los sistemas de cabalgamiento (Alonso-Chaves *et al.*, 2016).

La geometría tridimensional de los pliegues es en silla de montar, y en general se trata de pliegues cerrados con vergencia hacia el S o SO. Los ejes tienen inmersión tanto al NO como al SE, aunque estadísticamente están mejor representados los primeros. El valor de la inmersión suele ser inferior a  $20^\circ$ . La superficie envolvente de los flancos largos tiene un buzamiento suave hacia el norte, inferior a  $15^\circ$  -  $20^\circ$ , mientras que la superficie envolvente de los flancos cortos están subvertical o inclinada hacia el norte,

alcanzando valores próximos a  $70^\circ$  (quedando en tal caso la secuencia invertida). Los flancos normales tienen un buzamiento inferior a  $30^\circ$  y los flancos inversos buzando entre  $60^\circ$  y  $80^\circ$ . Ambos flancos están buzando hacia el norte. En relación con estos pliegues se produce una foliación ( $S_1$ ), que en ocasiones es transecta en la zona de charnela y no siempre es paralela al plano axial de los pliegues (Alonso-Chaves *et al.*, 1999).

### **3. Metodología de trabajo y marco teórico empleado**

#### **3.1. Metodología de trabajo**

La metodología empleada para el cumplimiento de los objetivos expuestos anteriormente y por ende el desarrollo de este trabajo, consta de un estudio geológico – geotécnico. Seguidamente se realizarán los análisis y estudios pertinentes, con el fin de caracterizar geomecánicamente la zona

##### **3.1.1. Trabajo de campo. Cartografía geológica. Análisis de datos**

###### **3.1.1.1. Trabajo de campo**

Consistió de tres salidas al campo, con el objetivo de identificar los distintos materiales rocosos y su estructura geológica, así como las características geomecánicas y el estudio de las discontinuidades presentes en los macizos rocosos. Durante estos tres días se elaboró una cartografía geológica y se tomaron medidas de los datos estructurales y geomecánicos de la zona estudiada.

- **Materiales empleados**

Se utilizó la siguiente instrumentación: martillo geológico o piqueta, brújula, cinta métrica, lápices y marcadores, cámara fotográfica, base cartográfica, GPS (equipo de Sistema de Posicionamiento Global), esclerómetro, estadillos para realizar las estaciones geomecánicas.

- **Recolección de datos**

Se estudiaron diez afloramientos (figura 3.1), seleccionando aquellos que proporcionaban mayor información tanto geológica como geotécnica. En cada uno de estos afloramientos, se obtuvieron datos de litología y datos estructurales, como orientación de la estratificación, foliación, fallas, diaclasas y pliegues. Además, se

recolectó la información necesaria para la realización de cuatro estaciones geomecánicas.

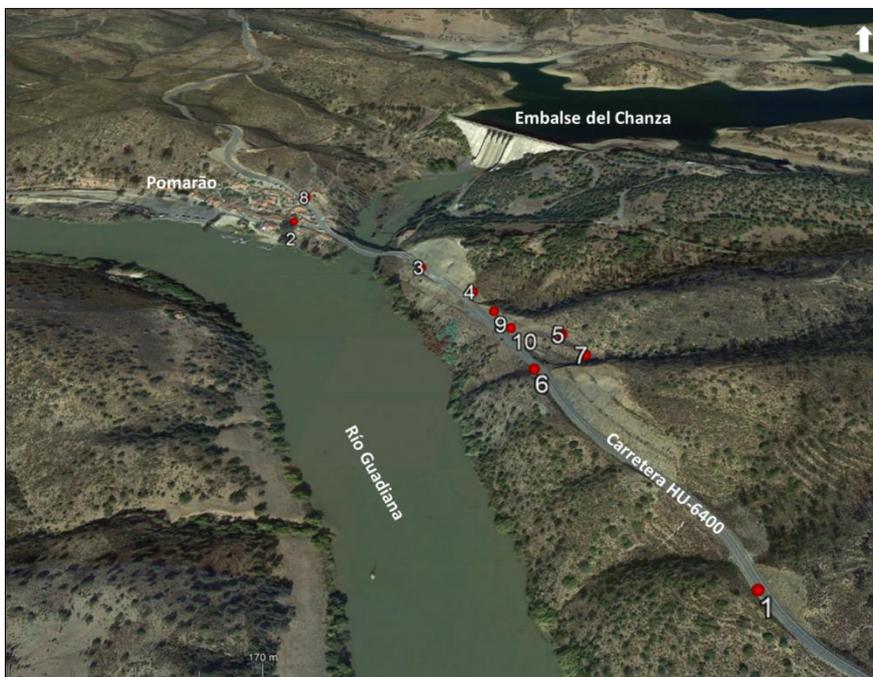


Figura 3.1. Mapa con la ubicación de las estaciones de medida (puntos del 1 al 10)

La denominación de las familias de discontinuidades en el registro es la siguiente:

Diaclasas:  $J_1$ ,  $J_2$  y  $J_3$  correspondiendo cada una a una familia de diaclasas

Estratificación:  $S_0$

Foliación:  $S_1$

### 3.1.1.2. Cartografía geológica

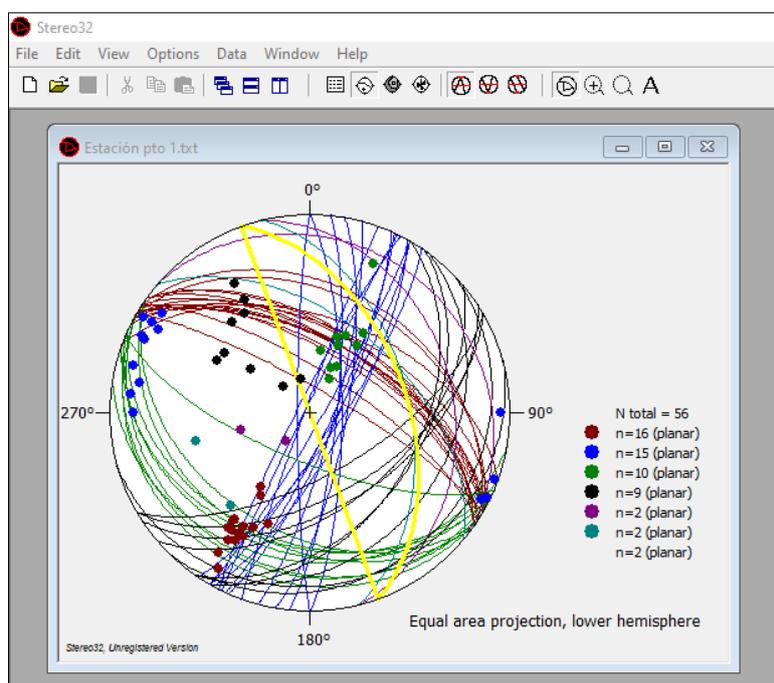
Se realizó una cartografía geológica de detalle de la zona a escala 1:6.500, utilizando como base la cartografía del IGME (Instituto Geológico y Minero de España) de escala 1:50.000. En este mapa se representó la información geológica, los datos estructurales y geotécnicos obtenidos en el campo. Para ello se utilizó el software ArcGis 10.6.

Se elaboraron cinco mapas de la zona de estudio, los cuales son: mapa geológico, mapa de las familias de discontinuidades, mapa de las familias de discontinuidades (dirección media), mapa de datos estructurales ( $S_0/S_1$ ) y mapa de datos estructurales (ejes de pliegues y fallas).

### 3.1.1.3. Análisis de datos

Las proyecciones hemisféricas o estereográficas son un método muy eficaz para la representación gráfica de estructuras planas y tridimensionales, a partir de su orientación geográfica y disposición angular

Los datos estructurales y de los planos de discontinuidad se representaron en proyección estereográfica equiareal (hemisferio inferior) utilizando el software Stereo32 de distribución gratuita (figura 3.2). Este programa permite el análisis estadístico de conjuntos de datos planares o lineales por diversos métodos.



**Figura 3.2.** Interfaz del programa Stereo32, utilizado para representar las proyecciones estereográficas mostradas en este trabajo.

Para el análisis de estabilidad de taludes y determinación de los tipos de rotura presentes, una vez realizadas las proyecciones estereográficas de los datos de las familias de discontinuidades de cada estación de trabajo, se procederá a efectuar el análisis estadístico de cada una de estas familias, con el fin de calcular el plano medio representativo.

Para el análisis estadístico de conjuntos de datos se han utilizado los diagramas de densidad de polos (figura 3.3) y el cálculo de autovalores y autovectores (figura 3.4) del tensor orientación de las familias de datos. De esta forma se han obtenido el polo estadísticamente representativo de cada familia de discontinuidades, así como los

valores de  $R/n$  el cual es el vector resultante normalizado de la distribución estadística y  $K$  que es el parámetro que hace referencia al tipo de distribución de los polos. Un valor de  $K > 1$  indica distribución en "cluster", mientras que un valor de  $K < 1$  indica una distribución en "girle".

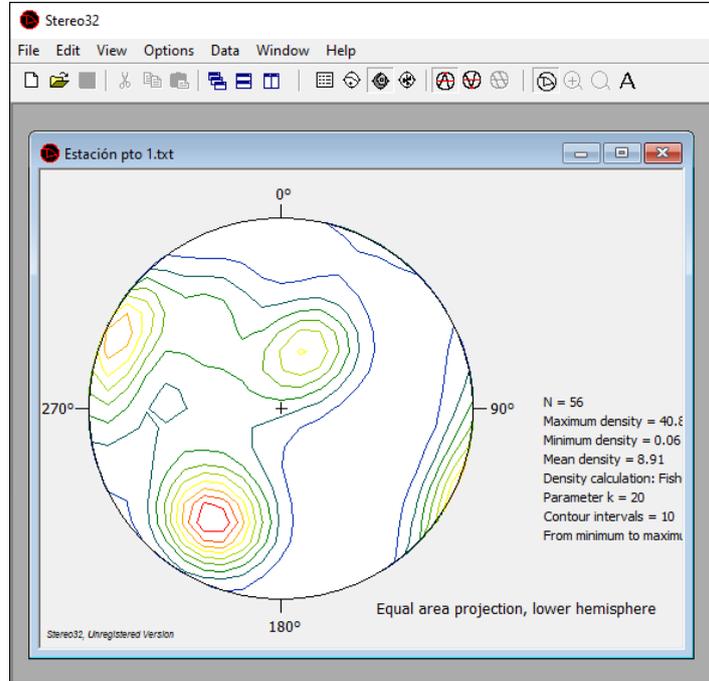


Figura 3.3. Ejemplo de representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) del diagrama de densidades de los polos

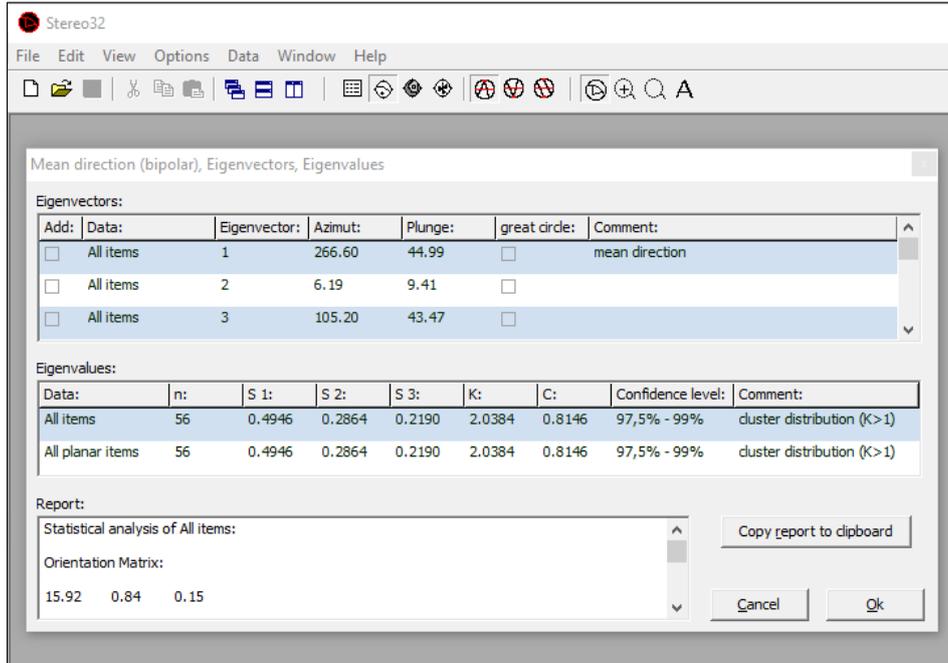


Figura 3.4. Ejemplo de análisis estadístico, cálculo de los autovalores y autovectores

## **3.2. Marco teórico empleado**

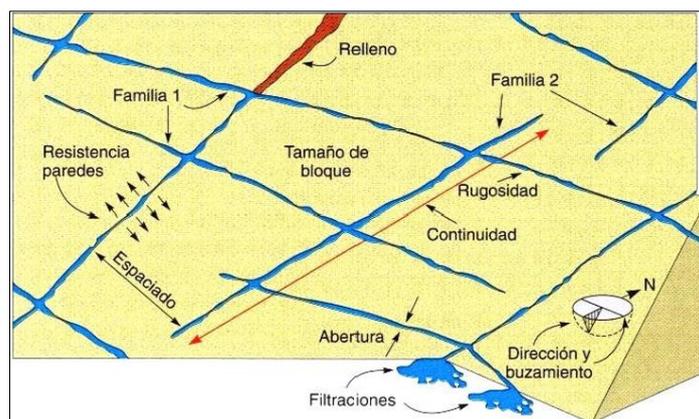
### **3.2.1. Estaciones geomecánicas, clasificación geomecánica del macizo rocoso y estabilidad de taludes en rocas**

#### **3.2.1.1. Estaciones geomecánicas**

Se han realizado cuatro estaciones geomecánicas con el objetivo de clasificar el macizo rocoso, para analizar las características de las familias de discontinuidades y evaluar la estabilidad del mismo. Para ello, se establecieron diversos macizos en función de la litología y se zonificaron según el diferente comportamiento mecánico (Anexo I).

En las estaciones geomecánicas se tomaron datos para caracterizar la matriz rocosa e identificar las familias de discontinuidades y sus características. Las características geomecánicas estudiadas para cada discontinuidad son:

- Orientación
  - Espaciado
  - Continuidad o persistencia (longitud de las discontinuidades)
  - Abertura
  - Rugosidad
  - Relleno
  - Alteración
  - Filtraciones de agua
- La orientación de cada discontinuidad está determinada por su dirección de buzamiento y por su buzamiento, la medición de los mismos se efectúa mediante el uso de la brújula (figura 3.5).



**Figura 3.5.** Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades (tomado de González de Vallejo, 2002)

-Espaciado. El espaciado o espaciamiento se define de forma genérica como la distancia existente entre dos discontinuidades contiguas (Jordá et al., 2016).

Para este estudio se determinó esta medida aplicando el espaciado normal de familia, el cual corresponde al espaciado de familia, medido perpendicularmente a los planos de discontinuidad de la misma (tabla 3.1).

El espaciado medio total ( $\bar{X}$ ) se expresa como:

$$\bar{X} = \frac{L}{N}$$

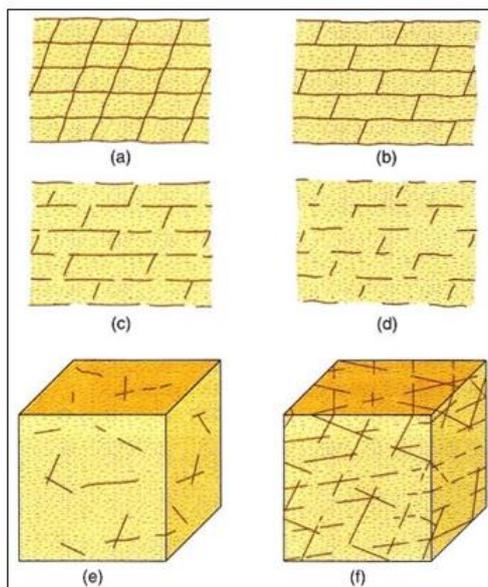
donde N es el número de discontinuidades observadas a lo largo de una longitud L.

**Tabla 3.1.** Descripción des espaciado

Descripción	Espaciado
Muy Junto	< 6 cm
Junto	6 cm - 20 cm
Moderadamente Junto	20 cm - 60 cm
Separado	60 cm - 2 m
Muy Separado	>2 m

(tomado y modificado de González de Vallejo, 2002)

-La continuidad de una discontinuidad se refiere a su extensión superficial, representada por la longitud de la misma a lo largo de la traza en la superficie expuesta (figura 3.6)



**Figura 3.6.** Modelos de continuidad de varias familias de discontinuidades (tomado de González de Vallejo, 2002)

La medición de dicho parámetro se efectúa para cada familia de discontinuidades, mediante el uso de una cinta métrica. La continuidad correspondería al valor medio de todas estas mediciones, y es el empleado para la descripción según la tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Descripción de la continuidad (tomado y modificado de González de Vallejo, 2002)

Continuidad	Longitud
Muy baja continuidad	< 1 m
Baja continuidad	1 - 3 m
Continuidad media	3 - 10 m
Alta continuidad	10 - 20 m
Muy alta continuidad	> 20 m

-La abertura representa la distancia medida sobre la perpendicular común entre las paredes de la discontinuidad y su medida se realiza directamente con una regla graduada en milímetros. El dato tomado para la clasificación corresponde al valor medio, calculado para cada familia de discontinuidades (tabla 3.3).

**Tabla 3.3.** Descripción de la abertura

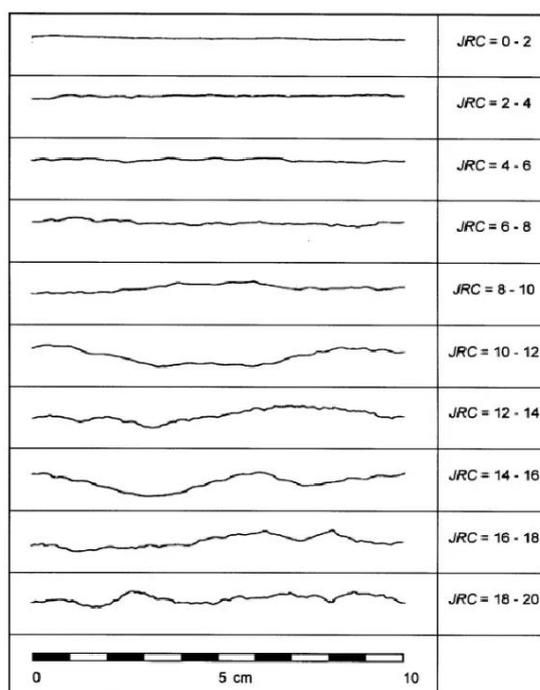
Abertura	Descripción
0	Muy cerrada
< 0,1 mm	Cerrada
0,1 - 1,0 mm	Parcialmente abierta
1,0 - 5,0 mm	Abierta
> 5 mm	Muy abierta

(tomado y modificado de González de Vallejo, 2002)

-La rugosidad corresponde a las irregularidades observadas a lo largo de las superficies de discontinuidad. Su descripción se realiza de acuerdo a dos escalas: métrica y milimétrica, según la primera las superficies pueden ser: planas, onduladas o escalonadas y por la segunda pueden ser: pulidas, lisas o rugosas.

El coeficiente de rugosidad conjunto JRC es un número que puede ser estimado mediante la comparación del aspecto de una superficie de discontinuidad con perfiles estándar publicado por Barton y otros. Uno de los más útiles del perfil de estos conjuntos fue publicado por Barton y Choubey (1977) y se reproduce en la figura 3.7.

La apariencia de la superficie de discontinuidad se compara visualmente con los perfiles que se muestra y el valor JRC correspondiente al perfil que más se parezca a la superficie de discontinuidad elegida.



**Figura 3.7.** Perfiles de rugosidad y los valores correspondientes de JRC (tomado de González de Vallejo, 2002)

-El relleno corresponde al material de naturaleza distinta a la roca de las paredes encontrado entre las discontinuidades. Dicho parámetro es descrito en campo según su composición, espesor y resistencia. La composición se refiere al tipo de material encontrado, tal como: arena, arcilla, grava, brecha, milonita, entre otros. El espesor es medido directamente con una regla graduada en milímetros. La resistencia se describe de forma sencilla, discriminando entre materiales blandos y duros.

-Alteración. El grado de meteorización de la roca es una observación importante en cuanto que condiciona de forma definitiva sus propiedades mecánicas. Según avanza el proceso de meteorización aumenta la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso, al tiempo que disminuye su resistencia.

La identificación del grado de meteorización se observa en el campo y se clasifica en: inalterada, ligeramente alterada, moderadamente alterada, muy alterada y descompuesta (tabla 3.4)

**Tabla 3.4.** Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso

Tipo/ Grado de meteorización	Descripción
Inalterada (I)	No aparecen signos de meteorización
Ligeramente alterada (II)	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
Moderadamente alterada (III)	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
Muy alterada (IV)	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados
Descompuesta (V)	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso

(tomado y modificado de González de Vallejo, 2002)

### 3.2.1.2. Clasificación de Bieniawski 1989 (RMR)

Para determinar la calidad de los macizos rocosos se utilizó la clasificación geomecánica desarrollada por Bieniawski en 1973, actualizada en 1979 y luego en 1989. Éste es un sistema de clasificación de macizos rocosos que toma en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos (González de Vallejo, 2002):

- Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.

- Grado de fracturación en términos del RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrogeológicas.
  
- **Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa**

Para el cálculo de este parámetro se ha utilizado el martillo de Schmidt o esclerómetro, el cual permite estimar de forma aproximada la resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa mediante una sencilla correlación. Su uso está muy extendido dada la facilidad y rapidez de su utilización. El esclerómetro consiste en un pequeño aparato metálico de geometría cilíndrica que dispone de un muelle en su interior y de una punta retráctil, la cual, al ser presionada contra la roca hace que el muelle se dispare (González de Vallejo, 2002).

En función de la dureza o resistencia de la roca, el muelle sufre mayor o menor rebote, valor que queda reflejado en una escala situada al costado del aparato. Deben realizarse en cada punto de medida 10 percusiones con el martillo, eliminando los 5 valores más bajos y tomando el valor promedio de los restantes (González de Vallejo, 2002).

Los valores de rebote obtenidos en el campo se correlacionan mediante un ábaco con la resistencia a compresión simple (figura 3.8), en función de la densidad de la roca y de la inclinación del martillo y del plano ensayado (González de Vallejo, 2002).

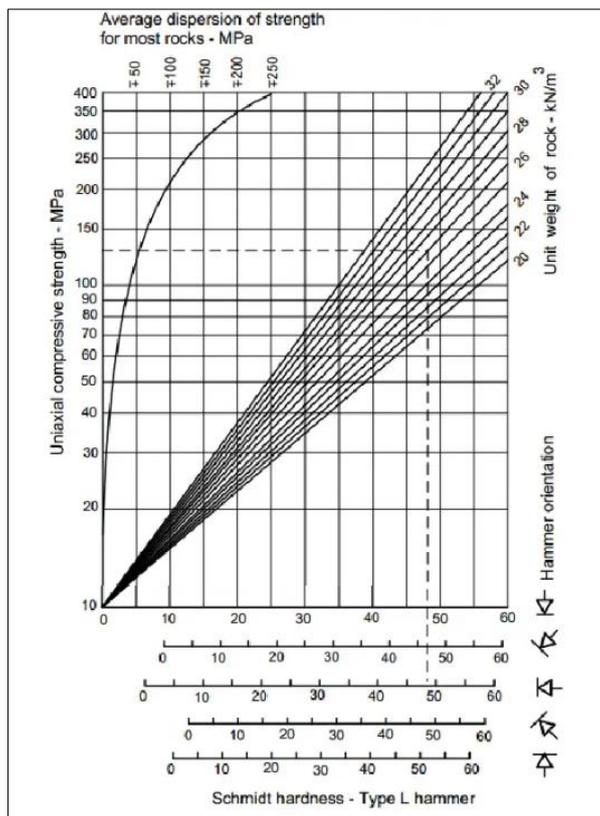


Figura 3.8. Estimación de la resistencia a la compresión de pared conjunta de dureza Schmidt (tomado y Modificado de Maguiña Javier)

El peso específico de las rocas se ha tomado de la página <https://ingemecanica.com/tutoriales/pesos.html#inicio> siendo  $26 \text{ kN/m}^3$  la densidad para las grauvacas de las facies Culm y  $27 \text{ kN/m}^3$  para la pizarras y las silexitas

Clasificación en base a la resistencia de la roca Resistencia a Compresión Simple (MPa):

- 1-5 (MPa) Muy blanda
- 5-25 (MPa) Blanda
- 25-50 (MPa) Moderadamente dura
- 50-100 (MPa) Dura
- 100-250 (MPa) Muy dura
- >250 (MPa) Extremadamente dura

- **RQD (Rock Quality Designation)**

El índice **RQD** (Rock Quality Designation) se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (sin tener en cuenta las roturas del proceso de perforación) respecto de la longitud total del sondeo. En la figura 3.9 se muestra un ejemplo del cálculo del RQD.

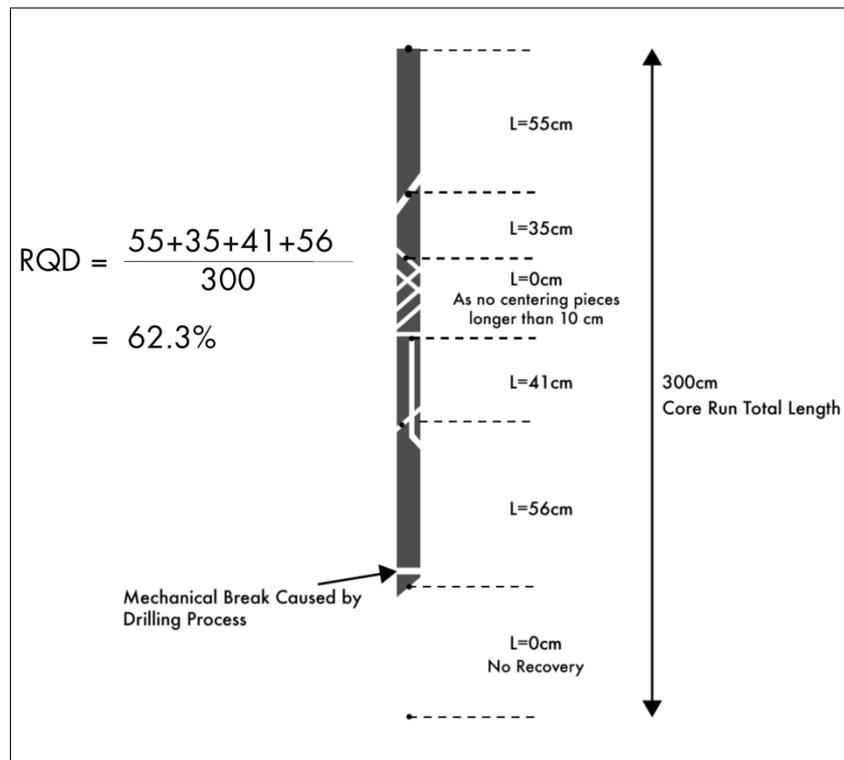


Figura 3.9. Cálculo del índice RQD

Como no siempre es posible disponer de testigos de sondeos, como es nuestro caso, el índice RQD puede estimarse en afloramientos a partir de correlaciones empíricas a partir del parámetro  $J_v$  o a partir del parámetro  $\lambda$ .

El parámetro  $J_v$  representa el número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen ( $1 \text{ m}^3$ ) del macizo rocoso. Ante la dificultad de observar tridimensionalmente un afloramiento, el valor de  $J_v$  se suele determinar contando las discontinuidades de cada familia que interceptan una longitud determinada, midiendo perpendicularmente a la dirección de cada una de las familias (o en su defecto realizando la corrección necesaria con respecto a la dirección aparente de medida) (González de Vallejo, 2002):

$$J_v = \sum \frac{\text{n.º de discontinuidades}}{\text{longitud de medida}}$$

Por ejemplo, para un macizo con tres familias de discontinuidades ( $J_1$ ,  $J_2$  y  $J_3$ ):

$$J_v = (n.º J_1/L_1) + (n.º J_2/L_2) + (n.º J_3/L_3)$$

El RQD puede calcularse a partir del  $J_v$  con las fórmulas:

- RQD:  $115 - 3.3 * J_v$  para  $J_v > 4.5$
- RQD: 100 para  $J_v < 4.5$

De forma más rápida, aunque menos exacta, también puede estimarse el RQD a partir de la frecuencia de discontinuidades  $\lambda$ , contando el número total de discontinuidades que interceptan una longitud  $L$  en cualquier dirección de interés (cortando al mayor número posible de planos), mediante la siguiente expresión

$$\text{RQD} \approx 100 \exp^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$$

donde  $\lambda$  es:

$$\lambda = \frac{\text{número de discontinuidades}}{L \text{ (m)}}$$

Para este trabajo se utilizaron estas dos últimas fórmulas, empleando el cálculo de  $\lambda$  para la obtención del RQD.

- **Separación o espaciado de las discontinuidades**

El espaciado o espaciamiento se obtuvo tal como se definió en el apartado 3.2.1.1.

- **Condiciones de las discontinuidades**

Las discontinuidades condicionan de una forma definitiva las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de los macizos rocosos. La resistencia al corte de las discontinuidades es el aspecto más importante en la determinación de la resistencia de los macizos rocosos duros fracturados, y para su

estimación es necesario definir las características y propiedades de los planos de discontinuidad.

La descripción y medida de estos parámetros para cada familia debe ser realizada en campo en diferentes estaciones geomecánicas tal como se ha explicado con anterioridad en el apartado 3.2.1.1.

- **Condiciones hidrogeológicas**

El agua en el interior de un macizo rocoso procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria), aunque en ciertas rocas permeables las filtraciones a través de la matriz rocosa (permeabilidad primaria) pueden ser también importantes. Las observaciones respecto a las filtraciones en discontinuidades, tanto si se presentan rellenas como si aparecen limpias, se han seguido atendiendo a las propiedades enumeradas en el estadillo para Estaciones Geomecánicas (Anexos).

**Cálculo del RMR:**

La influencia de dichos parámetros en el comportamiento geomecánico del macizo rocoso se expresa usando el RMR (*Rock Mass Rating*), valor que viene dado por la suma de las puntuaciones resultantes al aplicar los cinco parámetros de clasificación. El RMR es un índice que varía del 0 al 100 y esto distingue cinco clases de macizos, a cada una de las cuales se le asigna una calidad y sus respectivas características geotécnicas (tabla 3.5).

Esta clasificación es la que toma en cuenta la mayor cantidad de parámetros, los cuales son de fácil obtención, incluyendo inclusive las condiciones hidrogeológicas que otras clasificaciones excluyen; además de ofrecer mayor facilidad en cuanto a cálculos se refiere (González de Vallejo, 2002).

Tabla 3.5. Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989)

Estación		Puntuación	
Resistencia de la matriz rocosa	Compresión simple (Mpa)	>250	15
		250-100	12
		100-50	7
		50-25	4
RQD (%)	90%-100%	20	
	75%-90%	17	
	50%-75%	13	
	25%-50%	6	
	<25%	3	
Separación entre diaclasas (m)	>2	20	
	0,6-2	15	
	0,2-0,6	10	
	0,06-0,2	8	
	<0,06	5	
Estado de las discontinuidades	Longitud de las discontinuidades (m)	<1	6
		1-3	4
		3-10	2
		10-20	1
		>20	0
	Abertura (mm)	Nada	6
		<0,1	5
		0,1-1	3
		1-5	1
		>5	0
	Rugosidad	Muy rugosa	6
		Rugosa	5
		Ligeramente rugosa	3
		Ondulada	1
		Suave	0
	Relleno (mm)	Nada	6
		Duro <5	4
		Duro >5	2
		Blando <5	2
		Blando >5	0
Alteración	Inalterada	6	
	Ligeramente	5	
	Moderadamente	3	
	Muy	1	
	Descompuesta	0	
Agua Freática	Estado general	Seco	15
		Ligeramente Húmedo	10
		Húmedo	7
		Goteo	4
		Agua fluyendo	0

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación Punto	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

### 3.2.1.3. Clasificación de Romana 1985 (SMR)

Al valor de RMR obtenido como se acaba de describir, se le aplica una corrección según el tipo de obra a realizar (taludes, cimentaciones, túneles). Para el caso que nos ocupa, que son taludes, aplicaremos la corrección propuesta por Romana (1985), conocida como SMR (tabla 3.6).

La clasificación geotécnica *Slope Mass Rating (SMR)* propuesta por Romana (1985) para taludes en roca se obtiene por la adición al RMR básico de una serie de factores de ajuste dependientes de la relación geométrica existente entre la discontinuidad y el talud, así como de la suma de un factor dado por el método de excavación, atendiendo a la expresión siguiente (Tomás et al., 2006):

$$SMR = RMR_{\text{básico}} + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4$$

Donde:

- El RMR básico se calcula de acuerdo con la clasificación de Bieniawski (1989)
- $F_1$  depende del paralelismo entre las direcciones de las discontinuidades (o de la línea de intersección de los planos de rotura, en el caso cuñas) y del talud.
- $F_2$  se refiere al buzamiento de la discontinuidad ( $\beta_j$ ) en roturas planas y de la inmersión (o plunge) de la línea de intersección ( $\beta_i$ ) en roturas por cuña. Para la rotura por vuelco,  $F_2$  toma siempre el valor 1.0.
- $F_3$  se refiere a la relación entre el buzamiento del talud y el buzamiento de la discontinuidad (rotura plana o por vuelco) o la inmersión de la línea de intersección (rotura en cuña).
- $F_4$  es un factor de ajuste por el método de excavación empleado

**Tabla 3.6.** Parámetros de corrección  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  y  $F_4$  de la clasificación SMR (modificado de Romana (1985) en Anbalagan et al., (1992))

TIPO DE ROTURA		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE	
P	A	$ \alpha_1 - \alpha_6 $	$>30^\circ$	30-20°	20-10°	10-5°	
T							
W							
P/T/W	$F_1$		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P/W	B	$ \beta_1 $ ó $ \beta_2 $	$<20^\circ$	20-30°	30-35°	35-45°	$>45^\circ$
P/W			$F_2$		0.15	0.40	0.70
T	1.00						
P	C	$\beta_7 - \beta_8$	$>10^\circ$	10-0°	0°	0-(-10°)	$<(-10^\circ)$
W							
T							
P/T/W	$F_3$		0	-6	-25	-50	-60
<b>MÉTODO DE EXCAVACIÓN (<math>F_4</math>)</b>							
Talud natural			+15	Voladura normal o excavación mecánica		0	
Precorte			+10	Voladura deficiente		-8	
Voladura suave			+8				

P: rotura plana; T: rotura por vuelco; W: rotura en cuña.

Clase N°	V	IV	III	II	I
SMR	0 – 20	21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100
Descripción	Muy Mala	Mala	Normal	Buena	Muy Buena
Estabilidad	Totalmente Inestable	Inestable	Parcialmente Estable	Estable	Totalmente Estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas Juntas o muchas Cuñas	Algunos Bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Según sea el valor del índice SMR se obtienen 5 clases de estabilidad (tabla 3.6). Por otro lado, las medidas de sostenimiento a aplicar a los taludes se agrupan en 6 clases diferentes (González de Vallejo, 2002):

- SMR > 65: sin sostenimiento (saneo)
- 70 > SMR > 45: protección (zanjas de pie; vallas de pie o de talud; redes sobre la superficie del talud)
- 75 > SMR > 30: refuerzo (bulones; anclajes)
- 60 > SMR > 20: hormigón (gunita, hormigón de relleno, contrafuertes y/o vigas, muros de pie)
- 40 > SMR > 10: drenaje (superficial; profundo)
- 30 > SMR > 10: reexcavación (tendido, muros de contención)

#### 3.2.1.4. Estabilidad de taludes en roca

La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos (que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos o relacionados con el comportamiento mecánico del terreno (resistencia y deformabilidad). La combinación de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies. Los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos se consideran factores condicionantes, y son intrínsecos a los materiales naturales.

Junto a los factores condicionantes de la estabilidad de los taludes (también denominados «pasivos»), los factores desencadenantes o «activos» provocan la rotura una vez que se cumplen una serie de condiciones.

El conocimiento de todos ellos permitirá un correcto análisis del talud, la evaluación del estado de estabilidad del mismo y, en su caso, el diseño de las medidas que deberán ser adoptadas para evitar o estabilizar los movimientos (González de Vallejo, 2002).

Factores que influyen en la estabilidad del macizo:

- Litología

La naturaleza del material que forma un talud está íntimamente relacionada con el tipo de inestabilidad que éste puede sufrir, presentando las diferentes litologías distinto grado de susceptibilidad potencial ante la ocurrencia de deslizamientos o roturas. Las propiedades físicas y resistentes de cada tipo de material, junto con la presencia de agua, gobiernan su comportamiento tenso-deformacional y, por tanto, su estabilidad (González de Vallejo, 2002).

- Orientación y distribución de las discontinuidades

La presencia de discontinuidades implica un comportamiento anisótropo del macizo y unos planos preferenciales de rotura; por ejemplo, un determinado sistema de fracturas condicionará tanto la dirección de movimiento como el tamaño de los bloques a deslizar, o la presencia de una falla buzando hacia el talud limitará la zona inestable y condicionará el mecanismo de rotura. Los cambios y singularidades estructurales en un

macizo rocoso, como zonas tectonizadas o de cizalla, cambios bruscos en el buzamiento de los estratos, etc., suponen heterogeneidades que puede condicionar las zonas de rotura (González de Vallejo, 2002).

- Condiciones hidrogeológicas

La mayor parte de las roturas se producen por los efectos del agua en el terreno, como la generación de presiones intersticiales, o los arrastres y erosión, superficial o interna, de los materiales que forman el talud. En general, puede decirse que el agua es el mayor enemigo de la estabilidad de los taludes (además de las acciones antrópicas, cuando se realizan excavaciones inadecuadas sin criterios geotécnicos). La presencia de agua en un talud reduce su estabilidad al disminuir la resistencia del terreno y aumentar las fuerzas tendentes a la inestabilidad (González de Vallejo, 2002).

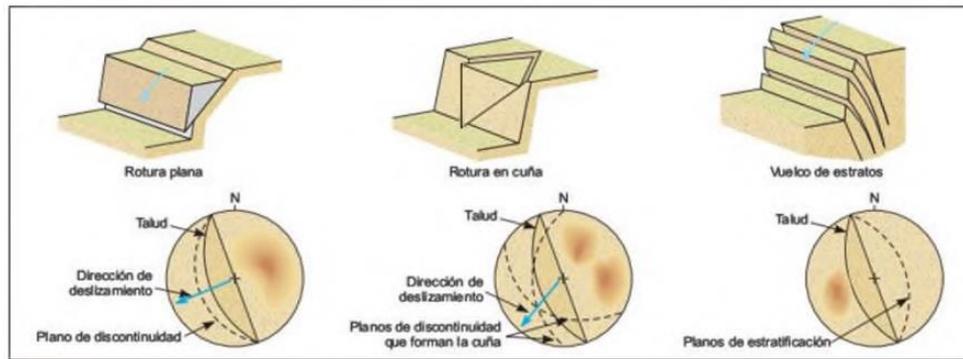
Tipos de rotura en rocas:

Los diferentes tipos de roturas están condicionados por el grado de fracturación del macizo rocoso y por la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto al talud, quedando la estabilidad definida por los parámetros resistentes de las discontinuidades y de la matriz rocosa.

Los modelos de rotura más frecuentes son: rotura plana, en cuña y por vuelco (González de Vallejo, 2002).

- **Rotura plana**

Se produce a favor de una superficie preexistente, que puede ser la estratificación, una junta tectónica, una falla, etc. La condición básica es la presencia de discontinuidades buzando a favor del talud y con su misma dirección, cumpliéndose la condición de que la discontinuidad debe estar descalzada por el talud: El buzamiento del talud ( $\psi$ ) debe ser mayor que el buzamiento del plano de discontinuidad ( $\alpha$ ) y además el buzamiento de la discontinuidad debe ser mayor que su ángulo de rozamiento interno ( $\alpha > \phi$ ). Ver figura 3.10.



**Figura 3.10.** Tipos de roturas para macizos rocosos y representación estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud (tomado de González de Vallejo, 2002)

Los diferentes tipos de roturas planas dependen de la distribución y características de las discontinuidades en el talud. Las más frecuentes son:

1. Rotura por un plano que aflora en la cara o en el pie del talud, con o sin grieta de tracción.
2. Rotura por un plano paralelo a la cara del talud, por erosión o pérdida de resistencia del pie

- **Rotura en cuña**

Corresponde al deslizamiento de un bloque en forma de cuña, formado por dos planos de discontinuidad, a favor de su línea de intersección. Para que se produzca este tipo de rotura, los dos planos deben aflorar en la superficie del talud, y se deben cumplir iguales condiciones que para la rotura plana:  $\psi > \alpha > \phi$ , siendo  $\alpha$  en este caso el buzamiento de la línea de intersección (figuras 3.11 y 3.12).

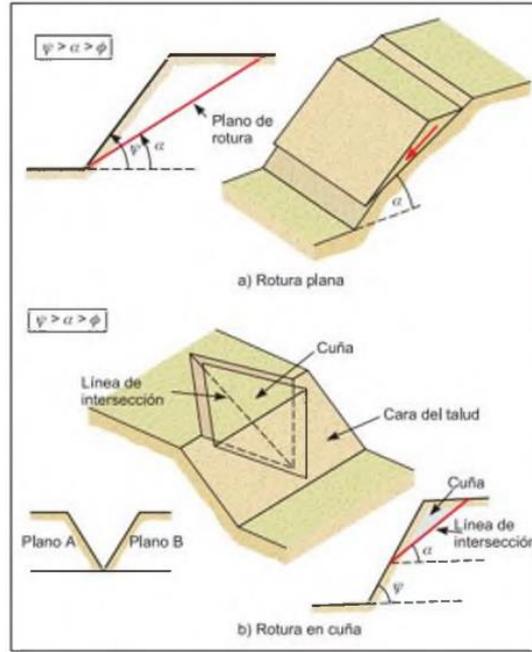


Figura 3.11. Condiciones para la rotura plana y para la rotura en cuña (tomado de González de Vallejo, 2002)

Este tipo de rotura suele presentarse en macizos con varias familias de discontinuidades, cuya orientación, espaciado y continuidad determina la forma y el volumen de la cuña.

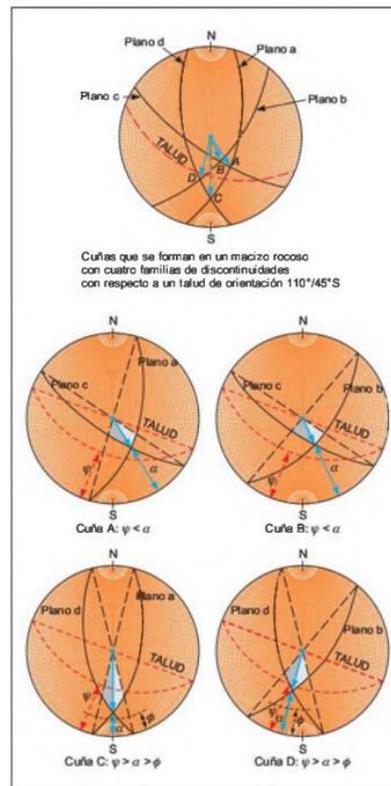
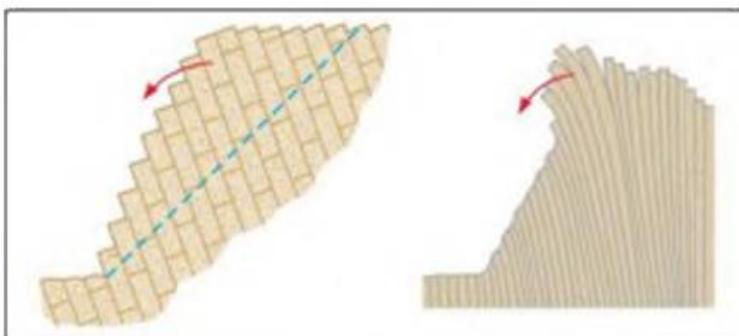


Figura 3.12. Representación estereográfica de cuñas. Las cuñas A y B no tienen posibilidad de deslizarse por no cumplirse la condición  $\psi > \alpha$ ; a: las cuñas C y D presentan condiciones de deslizamiento (tomado de González de Vallejo, 2002)

- **Rotura por Vuelco**

Se produce en taludes de macizos rocosos donde los estratos presentan buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o subparalela al mismo. En general, los estratos aparecen fracturados en bloques a favor de sistemas de discontinuidades ortogonales entre sí. Este tipo de rotura implica un movimiento de rotación de los bloques, y la estabilidad de los mismos no está únicamente condicionada por su resistencia al deslizamiento (figura 3.13).



**Figura 3.13.** Esquemas de taludes con estructura favorable al vuelco de estratos (tomado de González de Vallejo, 2002)

### 3.2.1.5. Análisis de estabilidad de talud

Una vez determinados los tipos de roturas se procedió al cálculo del factor de seguridad. Utilizándose el programa [SWedge V4.080](#) de Rocscience (2004) para el cálculo del factor de seguridad, considerándose que la rotura observada en campo es de tipo cuña

Este software permite simular distintos escenarios para el caso de rotura por cuña, calculando el factor de seguridad, con el fin de obtener la solución óptima a un problema de estabilidad de talud.

- **Rotura por cuña**

Ingresando en el programa SWedge la geometría del talud y de las discontinuidades (datos adquiridos en las salidas de campo), así como los valores de cohesión, ángulo de fricción tomados de tablas (González de Vallejo, 2002), y peso específico, se calculó el factor de seguridad en seco (figura 3.14).

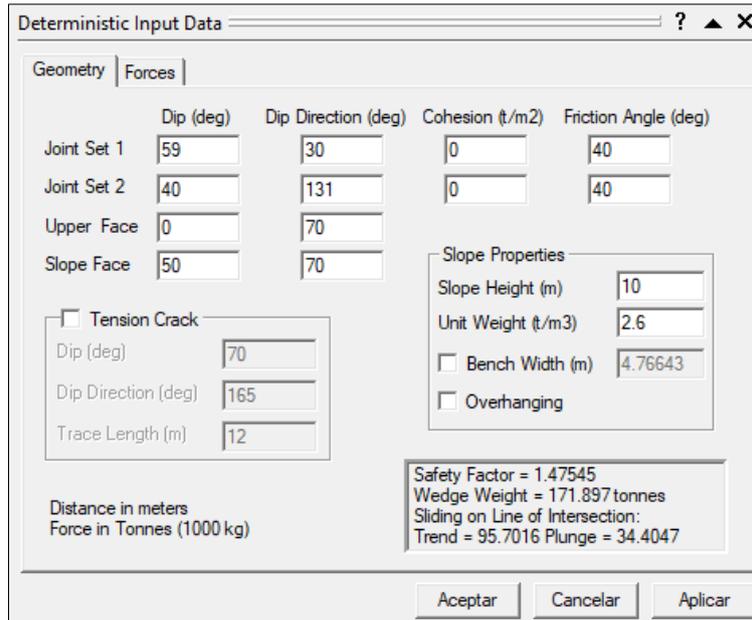


Figura 3.14. Introducción de datos en el programa SWedge (Rocscience, 2004)

Para las fuerzas externas el valor de la presión de fluidos se calculó de manera tal que el factor de seguridad se aproxime a 1, contando con el factor sísmico obtenido de la Agencia Estatal, BOE núm. 244, viernes 11 octubre 2002 (35949), que para la zona estudiada es 0.12 ( $a_b/g = 0.12$  en la zona de El Granado).

Este valor de presión de fluidos es el máximo que podría admitir el talud para ser estable ante un terremoto y con lluvia (figura 3.15).

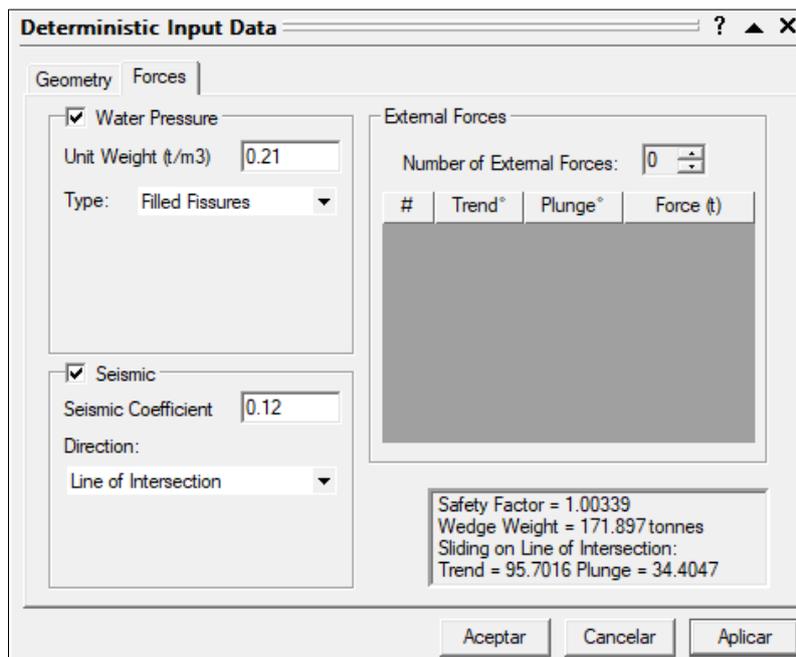


Figura 3.15. Cálculo del factor de seguridad incluyendo las fuerzas externas aplicadas en el talud. SWedge (Rocscience, 2004)

A continuación, se presenta una tabla resumen con los parámetros mecánicos utilizados en este trabajo (tabla 3.7):

**Tabla 3.7.** Parámetros mecánicos utilizados para el análisis de estabilidad de talud

Litología	Densidad	Cohesión	Ángulo de rozamiento interno	$a_b/g$
Grauvacas (Unidad de Facies Culm)	26 kN/m <sup>3</sup>	0	40°	0.12
Silexitas(CVS)	27 kN/m <sup>3</sup>	0	40°	0.12
Pizarras moradas (CVS)	27 kN/m <sup>3</sup>	0	40°	0.12
Pizarras con nódulos de Mn (CVS)	27 kN/m <sup>3</sup>	0	40°	0.12
		0	40°	0.12

El dato referente al valor de la cohesión se ha determinado a partir de la visualización en campo de las discontinuidades, tomándose cero como valor conservador. Los valores de densidad y ángulo de rozamiento se obtuvieron a partir de tablas, como se explicó al inicio del apartado

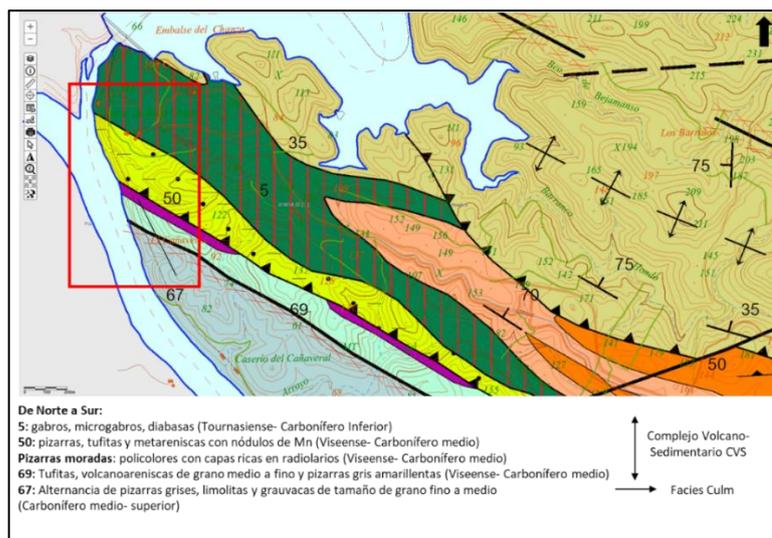
## 4. Resultados

### 4.1. Cartografía geológica y geología de la zona de estudio

En la zona de estudio se han reconocido rocas pertenecientes a dos de las unidades litoestratigráficas de las que componen la Faja Pirítica Ibérica. Estas son Unidad de facies Culm (Grupo Culm) y el CVS. Desde el punto de vista de la geología regional nos encontramos en el flanco sur del Anticlinal de La Puebla de Guzmán, que como se ha mencionado (apartado 2.1.3), más localmente, y cerca de su terminación periclinal, se conoce como Anticlinal de Pomarão.

#### 4.1.1. Cartografía geológica en el Flanco sur del Anticlinal de Pomarão

Lo primero que se realizó en este trabajo fue una cartografía geológica de detalle de la zona estudiada. Para ello se consultaron trabajos previos en esta zona como la cartografía geológica del IGME y el trabajo de Alonso Chaves et al (2016). En la figura 4.1 puede verse la cartografía de la zona según el visor cartográfico del IGME. Ver también apartado 2.1 y figuras 2.1 y 2.2.



**Figura 4.1.** Mapa geológico de la zona de estudio, delimitada por el cuadro rojo (tomado del Visor cartográfico del IGME)

La cartografía geológica realizada se muestra en la figura 4.2. En ella puede observarse la distribución de las rocas pertenecientes a Unidad de facies Culm y las pertenecientes al CVS. La estratificación mantiene una orientación para toda el área de estudio, entre  $N120^{\circ}$  a  $N161^{\circ}E$  con un buzamiento medio de unos  $60^{\circ}$  hacia el NE. En lo que respecta a la foliación, se presenta como una familia de orientación entre  $N123^{\circ}$  a  $N148^{\circ}E$ , con un buzamiento de medio de  $50^{\circ}$  hacia el NE.

Los datos de orientación de  $S_0$  y de  $S_1$  se muestran en la figura 4.3, representados en proyecciones estereográficas equiareal (hemisferio inferior). Puede observarse que la foliación  $S_1$  tiene mayor buzamiento en la parte NO del mapa, coincidiendo con el bloque de techo del cabalgamiento que se reconoce en los puntos 3, 4 y 9.

A parte de la foliación y estratificación, se reconocen varias familias de diaclasas. En la tabla 4.1 se presentan los datos estadísticamente representativos de los polos de las distintas familias de datos en los puntos 1, 5, 9 y 10.

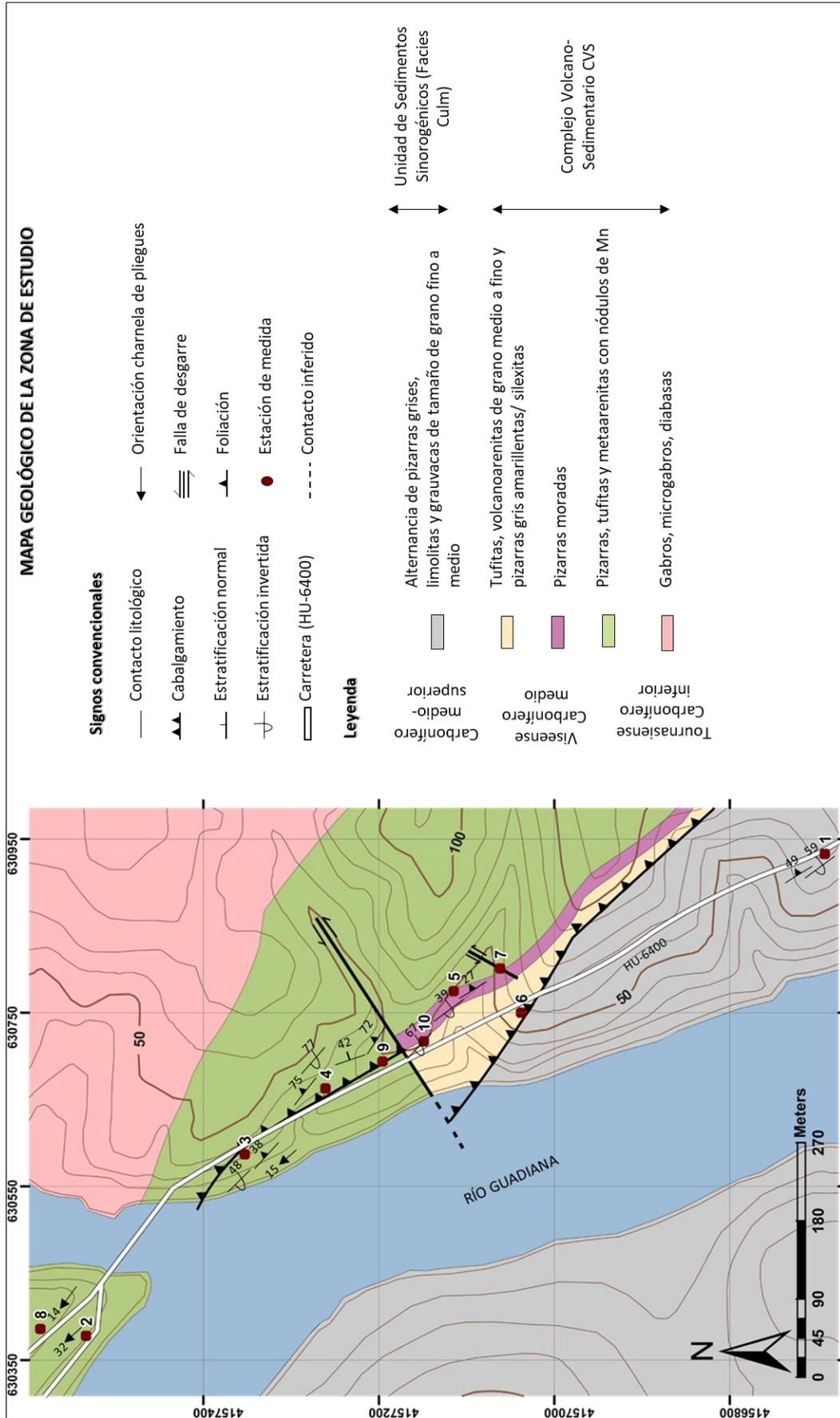


Figura 4.2. Mapa geológico de la zona de estudio

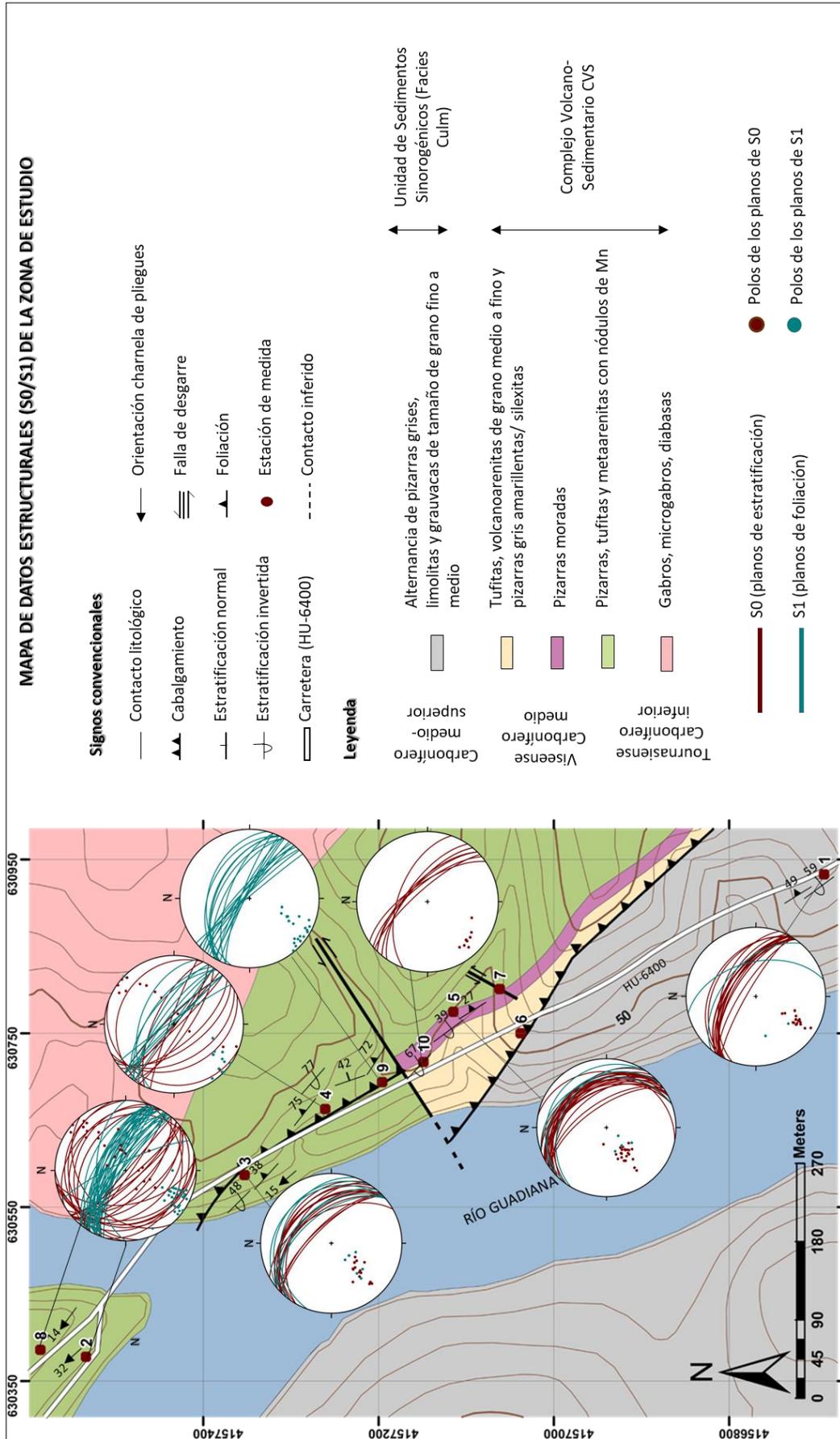


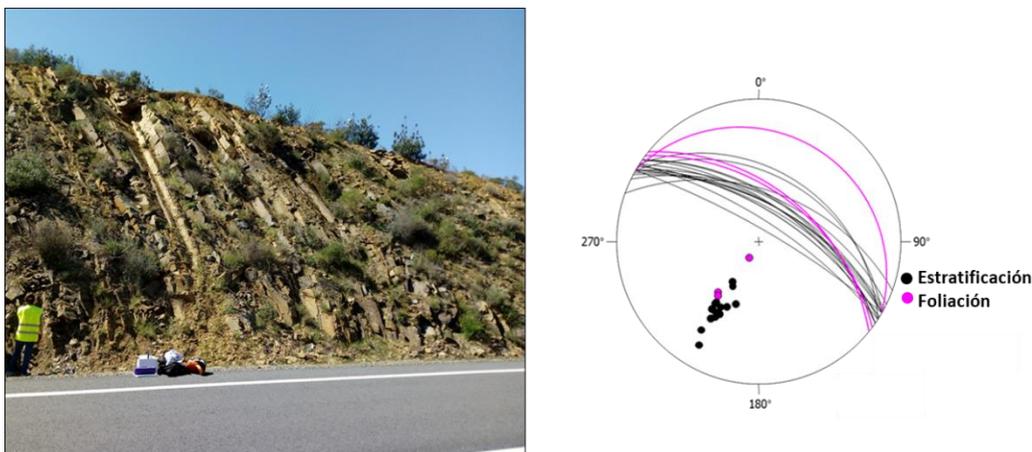
Figura 4.3. Mapa de datos estructurales S<sub>0</sub>-S<sub>1</sub>

**Tabla 4.1.** Análisis estadístico, cálculo de los autovalores y autovectores de los polos de los planos de las distintas familias de discontinuidades

Familia	Vector medio			Autovalores			Autovectores			k	
	Dirección	Plunge	R/n	S1	S2	S3	V1	V2	V3		
							Dirección/plunge	Dirección/plunge	Dirección/plunge		
S0	210	31SO	0.9677	0.9677	0.0298	0.0025	210/31	36/58	302/2	1,4004	
Punto 1	S1	238	41SO	0.9437	0.9437	0.0563	0	238/41	331/3	64/49	0,0000
	J1	291	7NO	0.951	0.951	0.0348	0.0142	291/7	21/1	120/83	3,6834
	J2	26	59NE	0.9398	0.9398	0.0564	0.0038	26/59	205/31	295/1	1,0383
	J3	319	50NO	0.9036	0.9036	0.0794	0.017	319/50	151/40	56/6	1,5773
Punto 5	S0	235	51SO	0.9608	0.9608	0.0298	0.0095	235/51	44/38	138/5	3,0285
	S1	227	63SO	0.9714	0.9714	0.0171	0.0115	227/63	327/5	59/26	10,2113
	J1	139	13SE	0.8719	0.8719	0.0889	0.0393	139/13	243/47	38/40	2,7968
	J2	64	35NE	0.9301	0.9301	0.0409	0.029	64/35	273/51	164/15	9,0992
Punto 9	J1	116	6SE	0.8828	0.8828	0.0869	0.0303	116/6	239/79	25/9	2,2010
	S1	213	18	0.9096	0.9096	0.0799	0.0133	213/18	82/64	309/19	1,3540
	J2	71	48	0.9466	0.9466	0.0457	0.0077	71/48	235/41	332/8	1,6989
Punto 10	S0	223	23SO	0.9710	0.9710	0.0265	0.0024	223/23	120/27	347/53	1,5036
	J1	123	4SE	0.8822	0.8822	0.0688	0.0489	123/4	25/63	215/27	7,4740

#### 4.1.1.1. Unidad de facies Culm

Esta unidad en la zona estudiada está constituida por una secuencia de grauvacas con intercalaciones de delgadas capas de pizarras. Los estratos de grauvacas son mucho más abundantes que los de pizarra, presentan color marrón claro con tonalidades ocasionalmente rojizas y gris claro-oscuro. Las capas pizarrosas son de color marrón oscuro y muestran menor potencia que las grauvacas. En estas últimas puede reconocerse el desarrollo de la foliación que buza menos que la estratificación lo que evidencia una posición estructural de flanco inverso (figura 4.4). La edad atribuida según IGME es Carbonífero medio superior.



**Figura 4.4.** Afloramiento de facies Culm estación punto 1. Se observa en la proyección estereográfica (equiangular hemisferio inferior) como los planos de foliación buzan menos que los planos de estratificación

Desde el punto de vista estratigráfico, las grauvacas presentan evidencias de numerosas estructuras sedimentarias. Son frecuentes las estructuras de paleocorrientes (figura 4.5) y de granuloclasificación, ambas están relacionadas con una posición invertida de la estratificación, lo que es coherente con los datos estructurales de flanco inverso.



**Figura 4.5.** Estructuras de paleocorrientes observadas en los estratos de grauvaca (punto 1)

Los estratos de esta unidad no se observan plegados. Aparecen con orientación constante. Se interpretan como parte de un gran flanco inverso, de dirección aproximada N120°E/59°NE.

#### **4.1.1.2. Rocas del CVS**

En la parte más septentrional se reconocieron un conjunto de rocas básicas pertenecientes al CVS (gabros, microgabros y diabasas) que no han sido estudiadas en este trabajo ya que no afloran en los taludes de la carretera HU-6400.

En el resto de la zona se han diferenciado tres unidades litológicas pertenecientes al CVS que se encuentran distribuidas cartográficamente de suroeste a noreste como sigue (ver figura 4.2 del apartado 4.1.1):

- nivel de silexitas y rocas volcánicas (tufitas, volcanoarenitas de grano medio a fino y pizarras gris amarillento)
- nivel de pizarras moradas
- nivel de pizarras y metaarenitas con nódulos de Mn (pizarras, tufitas y metaarenitas con nódulos de Mn)

Sin embargo, teniendo en cuenta criterios estructurales (relación estratificación/foliación), la secuencia descrita está en posición de flanco inverso por lo que la misma se encuentra invertida. La edad de estos materiales según la cartografía del IGME (<http://www.igme.es/>) es Viseense-Carbonífero medio. Según lo expuesto, la secuencia estratigráfica estaría constituida por el nivel de pizarras y metaarenitas con nódulos de Mn a muro, seguido por el nivel de pizarras moradas, y por último el nivel de silexitas y rocas volcánicas, a techo, siendo la orientación de la estratificación entre N133° a N145°E con buzamientos al NE

Las pizarras con nódulos de Mn, color marrón claro-oscuro con tonalidades grises, presentan finos niveles de metaarenitas intercalados, que a veces resaltan mucho en el afloramiento por ser de color marrón oscuro (figura 4.6). Estos niveles más competentes se encuentran formando pliegues de varios órdenes con los ejes inclinados hacia el NO, que se describen más adelante.

La orientación media de la foliación es de N123°E/72°NE



**Figura 4.6.** Pizarras con nódulos de Mn (punto 2)

Las pizarras moradas se muestran muy diaclasadas (figura 4.7). La orientación media de la  $S_0$  es N145°E/39°NE y la de la  $S_1$  es N137°E/27°NE.



Figura 4.7. Nivel de pizarras moradas (punto 5)

Los niveles de silixitas y rocas volcánicas muestran colores marrones a verdosos (figura 4.8). La orientación media de la  $S_0$  es  $N133^{\circ}E/67^{\circ}NE$ .

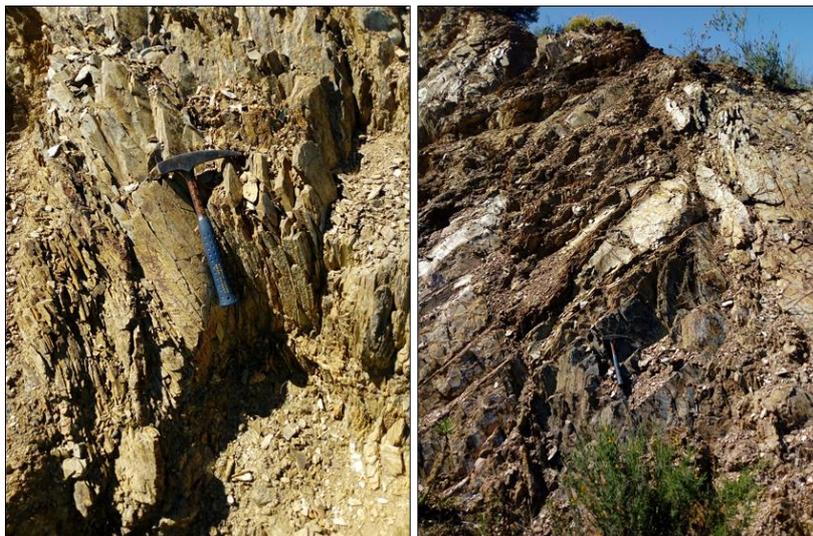


Figura 4.8. Silixitas observadas en las proximidades de las pizarras moradas (punto 10)

#### 4.1.1.3. Contacto entre el CVS y la Unidad de facies Culm

El contacto entre ambas unidades litoestratigráficas es un cabalgamiento (figura 4.10) que superpone las rocas del CVS sobre las rocas de la Unidad de facies Culm.

Este cabalgamiento tiene una orientación aproximada de  $N130^{\circ}E$  y buza unos  $50^{\circ}NE$ . Desarrolla una gran zona de roca de falla, dando como resultado la trituración de la roca, en nuestro caso de las pizarras, que por ser rocas blandas el material se observa muy machacado (figura 4.9).



**Figura 4.9.** Zona de roca de falla observada en el punto 6

Este contacto se encuentra rejugado como falla de desgarre y muestra estrías de bajo cabeceo (ver diagrama de la figura 4.10).

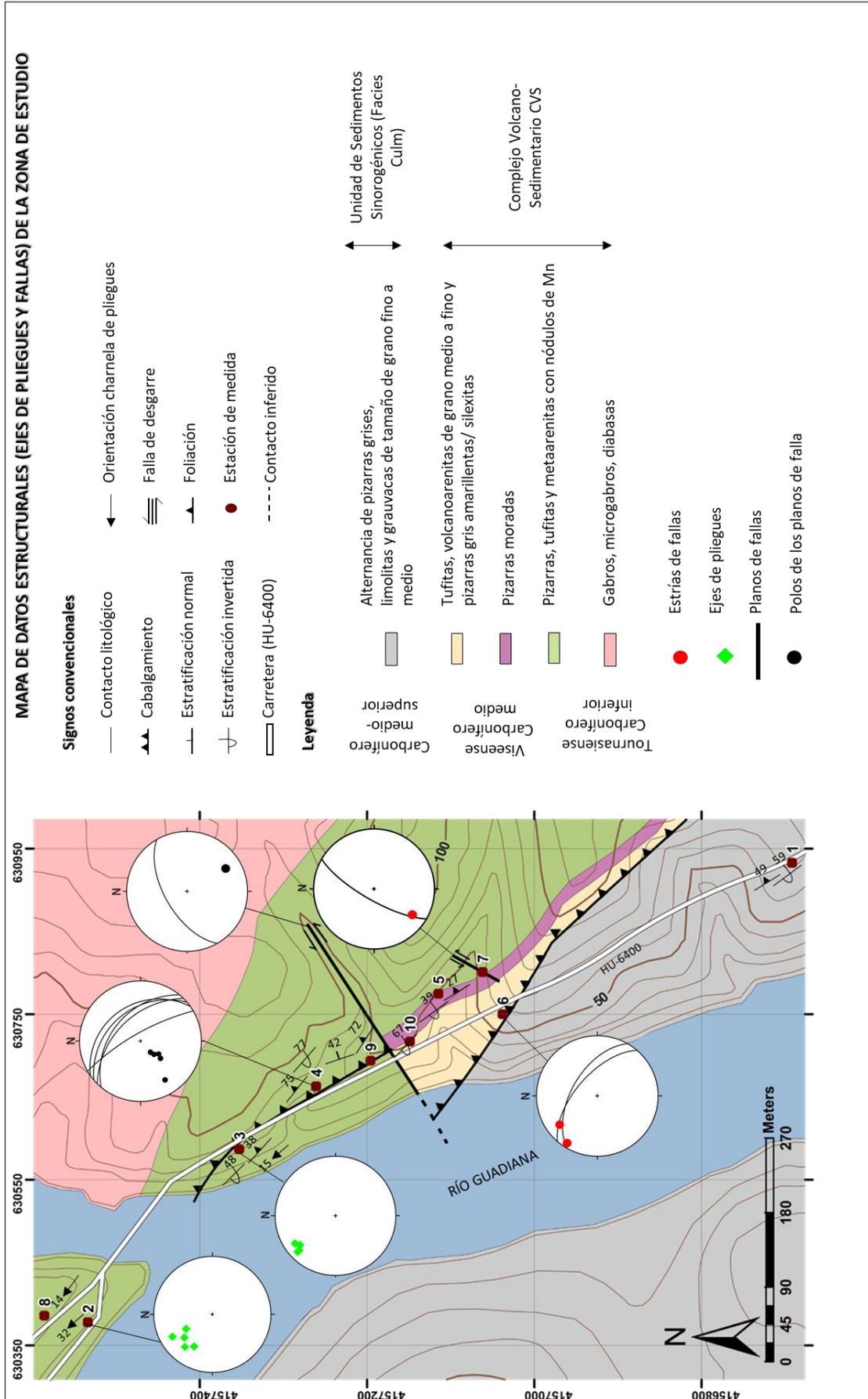


Figura 4.10. Mapa de los datos estructurales (fallas y pliegues)

#### 4.1.1.4. Estructuras de deformación en las pizarras con nódulos de Mn

- Pliegues

Para el análisis de las estructuras de deformación se estudiaron los puntos 2, 3, 4 y 8, siendo los taludes que presentan mayor plegamiento, cuya litología son las pizarras con nódulos de Mn.

En estas pizarras es frecuente encontrar pliegues definidos por las capas más competentes. Estos pliegues son de diferentes longitudes de ondas y de diferentes órdenes, que en general, son asimétricos y de geometría cónica (figuras 4.11, 4.12 y 4.13).



Figura 4.11. Plegamiento asimétrico dentro de las pizarras con nódulos de Mn CVS (punto 2)



Figura 4.12. Pliegues de escala local observados en la estación punto 8



Figura 4.13. Plegamiento de la  $S_0$  (punto 3)

En las proyecciones estereográficas de la  $S_0$  (figura 4.14), se puede apreciar la distribución en guirnalda de los polos de la misma. Estas distribuciones definen el plano de perfil del pliegue, y a partir de él, se ha calculado el eje estadístico de los pliegues. Igualmente, la orientación de los ejes de pliegues medidos en los puntos 2 y 3 se representan en la figura 4.15

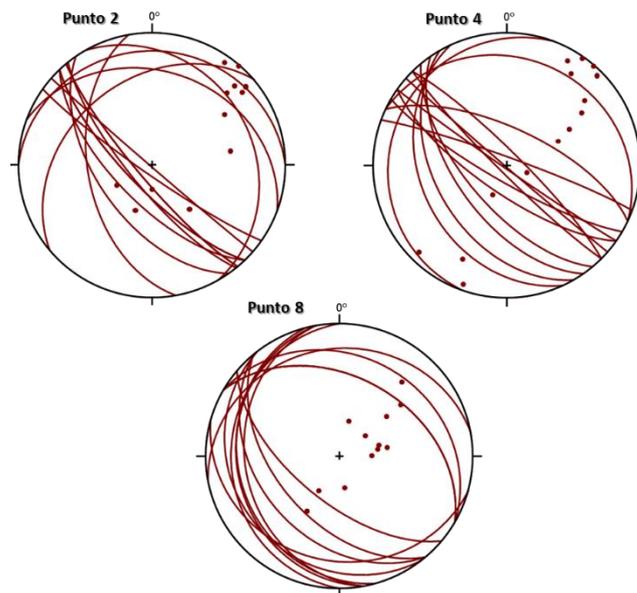
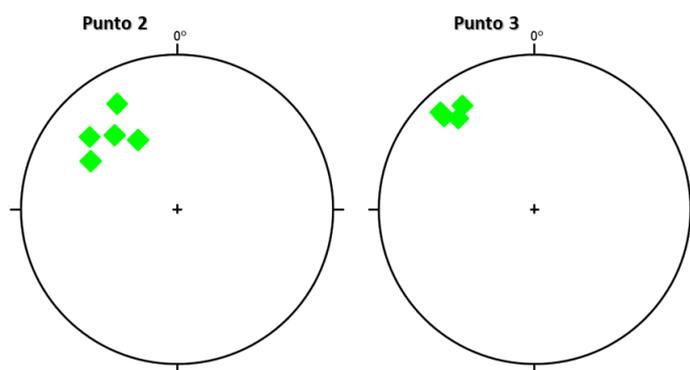


Figura 4.14. Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos de  $S_0$ , observándose la formación de la guirnalda por los polos de este plano



**Figura 4.15.** Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los ejes de los pliegues medidos en los puntos 2 y 3.

En las siguientes tablas se muestra la orientación media de la charnela de los pliegues calculada a partir de los autovalores y autovectores de los polos de la  $S_0$  (tabla 4.2), así como la orientación media de los ejes de los pliegues de la figura 4.15 (tabla 4.3)

**Tabla 4.2.** Orientación media de la charnela de los pliegues

Puntos de estudio	Polo de la guirnalda de $S_0$	
	Dirección	Plunge
Punto 2	306	23
Punto 3	322	8
Punto 4	307	15
Punto 8	310	10

**Tabla 4.3.** Orientación media de los ejes de los pliegues

Puntos de estudio	Orientación estadística de los ejes de pliegues	
	Dirección	Plunge
Punto 2	318	32
Punto 3	319	15

Todos los pliegues están inclinados entre  $306^\circ$  y  $322^\circ$  hacia el NO (entre  $8^\circ$  y  $32^\circ$ ), lo que es coherente con la orientación de la charnela de los pliegues cartográficos de orden mayor (cierre periclinal del antiforme).

- **Cabalgamientos**

Dentro del CVS se ha reconocido un cabalgamiento que afecta a las pizarras y metaarenitas con nódulos de Mn (figura 4.16). Dicho cabalgamiento presenta una orientación aproximada de  $N140^\circ$  buzando  $35^\circ N$  y desaparece al noroeste bajo el río Guadiana y al sureste al ser cortado por una falla de desgarre de cinemática sinistral.

En las pizarras con nódulos de Mn se observa como corta a los pliegues previos y tiene vergencia al SO. A lo largo de su trazado hay zonas donde se reconocen abundantes venas de cuarzo.



Figura 4.16. Cabalgamiento en las pizarras y metaarenitas con nódulos de Mn (línea roja)

#### 4.1.1.5. Fallas de desgarre

Se identificaron fallas de desgarre con movimiento sinistral y de orientación NE-SO (figura 4.17). Son estructuras que cortan a todas las estructuras anteriores



Figura 4.17. Falla de desgarre con movimiento sinistral punto 9 (señalada con la flecha roja)

La falla de mayor dimensión que aparece en la cartografía entre los puntos 9 y 10 desarrolla una importante banda de roca de falla. Su orientación es de  $N60^{\circ} 60^{\circ}NO$ , con una potencia de 6,6 m y desaparece bajo el río Guadiana hacia el suroeste. Se observa un arrastre en la foliación (ver figura 4.25 en el apartado 4.2.1.1)

#### 4.1.1.6. Flanco norte del Anticlinal de Pomarão

Con el objetivo de reconocer la geología regional en la que se encuentra la zona de trabajo, un día de campo se utilizó en observar las litologías y características estructurales del flanco normal del Anticlinal de Pomarão

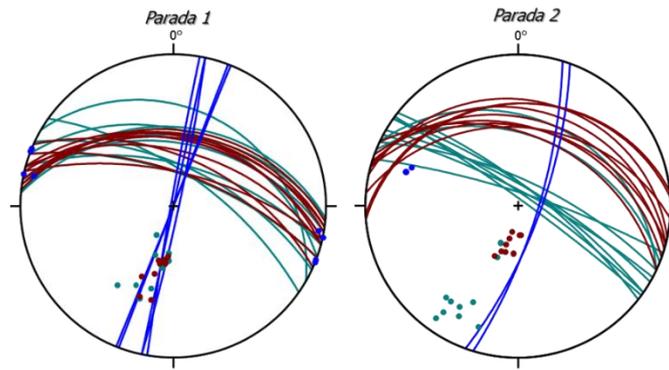
La secuencia estratigráfica está constituida de muro a techo por rocas volcanoclásticas, equivalentes a pizarras y metaarenitas con nódulos de Mn, pizarras moradas con un mayor desarrollo de la foliación, silixitas y rocas volcánicas.

La orientación de la estratificación en general es de  $N100^{\circ}E$  con buzamientos hacia el N de  $40^{\circ}$  (figura 4.18), por su parte la foliación muestra una orientación preferencial de  $N115^{\circ}E$  y tiene buzamientos de  $60^{\circ}$  hacia el N



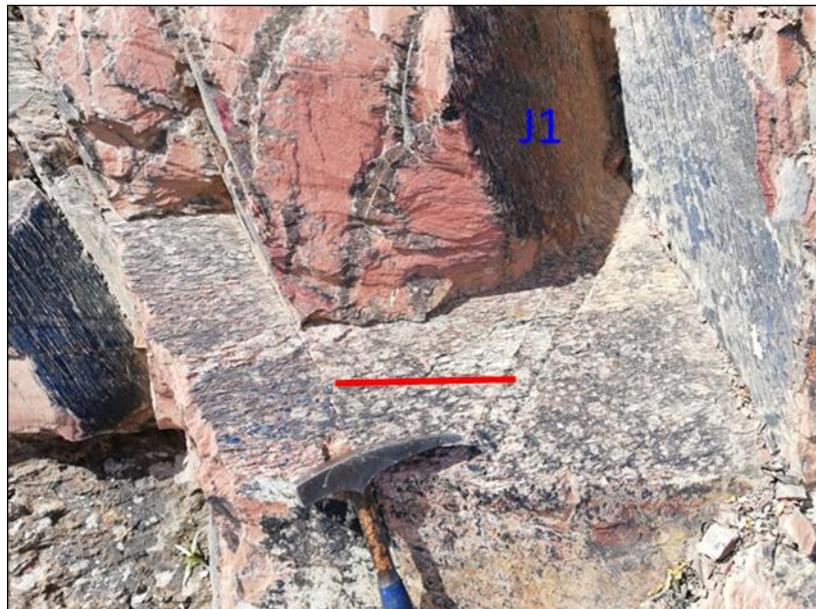
Figura 4.18. Medición de los planos de  $S_0$  en la parada 1

Los planos de foliación muestran mayor buzamiento que los planos de estratificación, verificándose que la zona pertenece al flanco normal (figura 4.19)



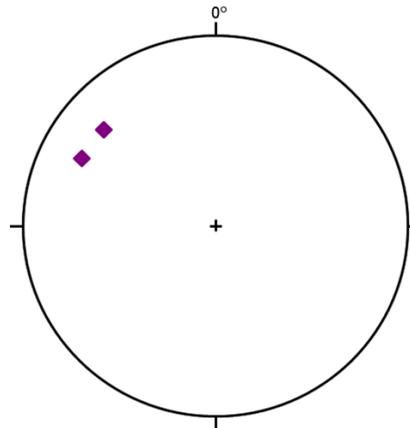
**Figura 4.19.** Ubicación de los puntos estudiados en el flanco normal (ver figura 2.2). Los datos estructurales tomados son representados en proyección estereográfica equiareal hemisferio inferior. El color rojo corresponde a la  $S_0$ , mientras que el turquesa a la  $S_1$  y el azul son diaclasas de la familia  $J_1$

Se observaron líneas de intersección entre la estratificación y la foliación, las cuales son paralelas al eje del pliegue (figura 4.20)



**Figura 4.20.** Líneas de intersección entre la  $S_0$  y  $S_1$  (línea roja) observándose la diaclasa  $J_1$

Las líneas de intersección entre la  $S_0$  y  $S_1$  presentan una orientación de  $N 300^\circ$  con una inmersión hacia el NO de  $23^\circ$  (figura 4.21)



**Figura 4.21.** Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de las líneas de intersección entre la  $S_0$  y  $S_1$  medidas en campo

Los datos medidos en el flanco sur presentan orientaciones entre  $N130^\circ$  y  $N140^\circ$  mientras que los del flanco norte entre  $N110^\circ$  y  $N120^\circ$ , siendo coherente con la geología regional y con los trabajos realizados en esta zona.

#### **4.2. Estaciones geomecánicas e identificación de las familias de discontinuidades**

Se han realizado cuatro estaciones geomecánicas (puntos 1, 5, 9 y 10) (Anexo I), para luego, clasificar el macizo rocoso con las clasificaciones geomecánicas RMR (Bieniawski) y SMR (Romana).

Las familias de discontinuidades que se han establecido son las siguientes (figura 4.22):

- $S_0$  planos de estratificación
- $S_1$  planos de foliación
- $J_1$  diaclasas subverticales con dirección NE - SO, con buzamientos altos
- $J_2$  diaclasas NO-SE, con buzamientos al SO
- $J_3$  diaclasas con dirección NE-SO y buzamiento al SE

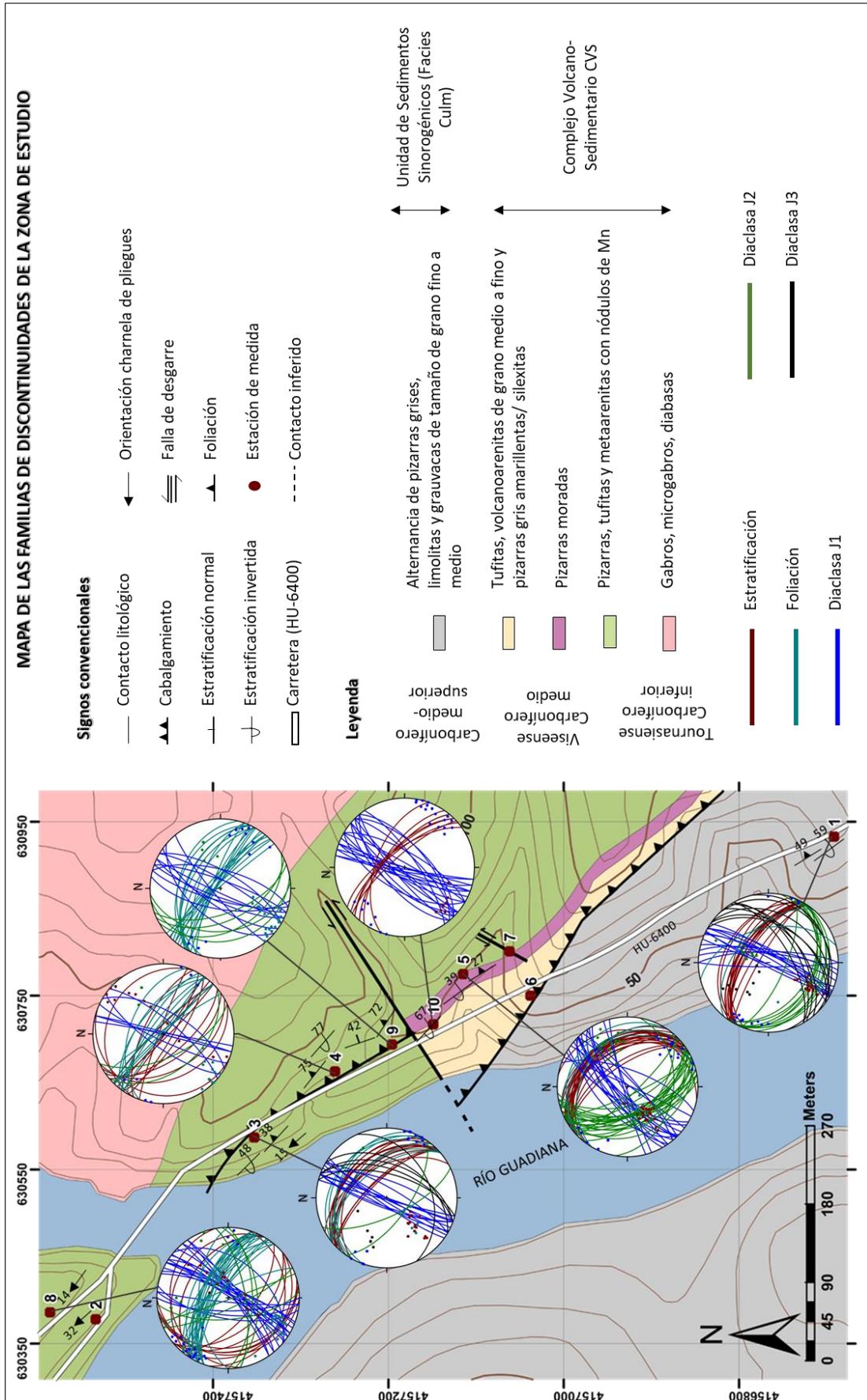
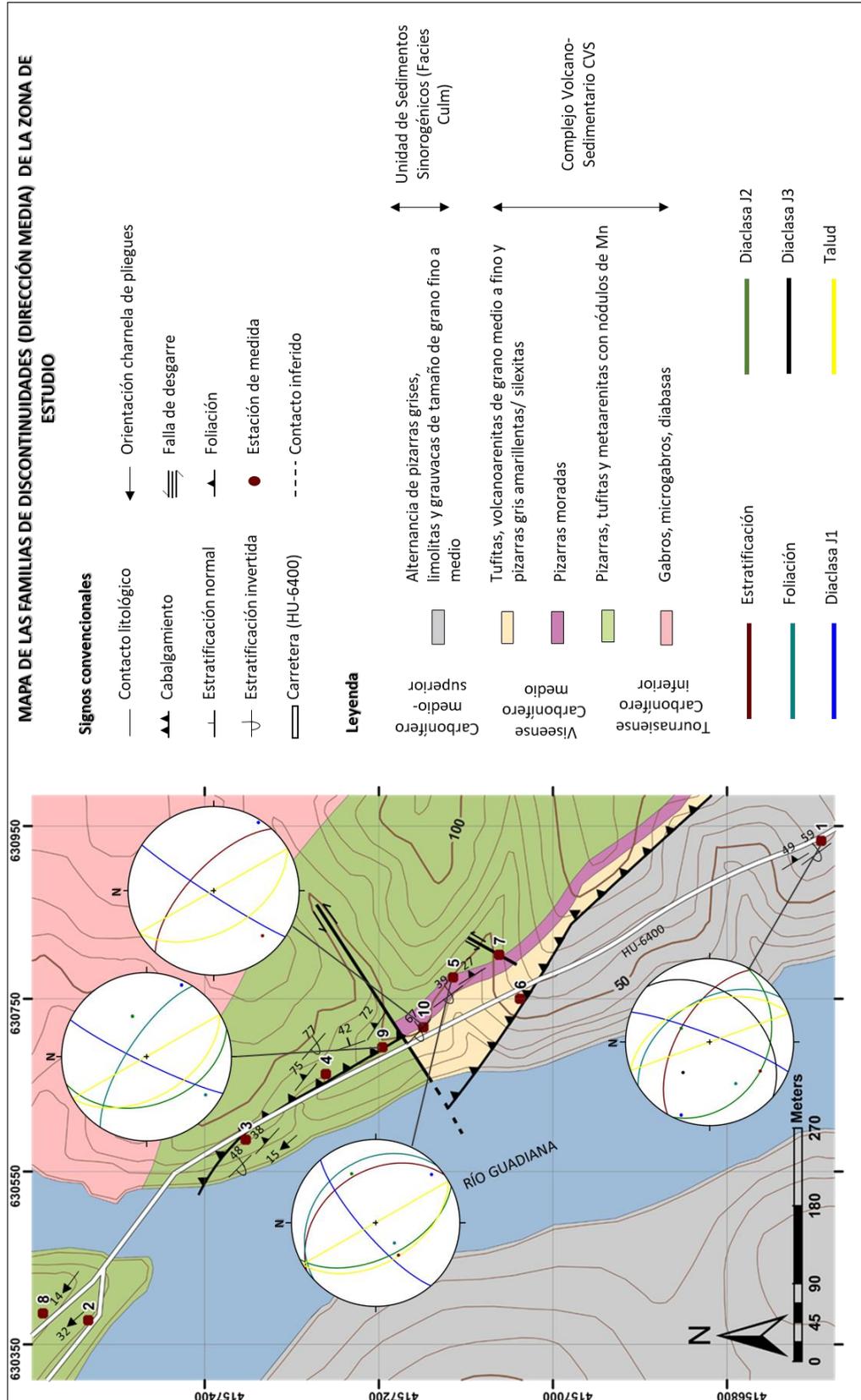


Figura 4.22. Mapa de las familias de discontinuidades encontradas en la zona de estudio.

Con el cálculo de los autovalores y autovectores (ver tabla 4.1) se realizó el estudio estadístico de las discontinuidades, obteniéndose la dirección media de las familias de discontinuidades (figura 4.23) ver tabla 4.4

**Tabla 4.4.** Planos medios de todas las familias de discontinuidades estudiadas

Puntos de trabajo	Familia	Dirección y buzamiento medio
<b>Punto 1</b>	S <sub>0</sub>	N120° 59°NE
	S <sub>1</sub>	N148° 49°NE
	J <sub>1</sub>	N21° 83°SE
	J <sub>2</sub>	N116° 31°SO
	J <sub>3</sub>	N41° 40°SE
<b>Punto 5</b>	S <sub>0</sub>	N145° 39°NE
	S <sub>1</sub>	N137° 27°NE
	J <sub>1</sub>	N49° 77°NO
	J <sub>2</sub>	N154° 55°SO
<b>Punto 9</b>	J <sub>1</sub>	N26° 84°NO
	J <sub>2</sub>	N161° 42°SO
	S <sub>1</sub>	N123° 72°NE
<b>Punto 10</b>	S <sub>0</sub>	N133° 67°NE
	J <sub>1</sub>	N33° 86°NO



#### 4.2.1. Descripción de las estaciones de trabajo (Anexo I)

##### 4.2.1.1. Taludes estudiados

En este trabajo se van a estudiar los siguientes taludes: Talud 1, Talud 2 y Talud 3

La altura de los taludes se ha calculado con la página IBERPIX (<https://www.ign.es/iberpix2/visor/>) que permite obtener datos de España y de Portugal

**Talud 1:** Taludes en trinchera que afloran en el punto 1 de la carretera

Las características de la trinchera son:

- Talud 1 con buzamiento al NE:  $N160^{\circ}/50^{\circ}NE$  (figura 4.24). Altura  $65-56=9$  m



Figura 4.24. Talud 1 NE facies Culm estación punto 1

- Talud 1 con buzamiento al SO:  $N160^{\circ}/50^{\circ}SO$ . Altura  $70-56=14$  m

**Talud 2:** Talud que aflora entre los puntos 9 y 10 de la cartografía.

La parte inferior del talud (hacia el SE) está constituida por silexitas y rocas volcánicas, mientras que la parte superior por pizarras moradas.

Al NO del talud se observan pizarras con nódulos de Mn

Se reconoce una zona de falla en el punto 9 de unos 6,6 m de potencia, (figura 4.25).



**Figura 4.25.** Talud 2. Al SE en la parte inferior observamos las silexitas y las rocas volcánicas, en la parte superior las pizarras moradas. Al NO las pizarras con nódulos de Mn. La flecha roja nos indica el arrastre de la foliación por la falla. La zona de falla se representa con las líneas moradas (tomado de: Google Earth, 2018)

- Talud 2: orientación  $N150^{\circ}/40^{\circ}SO$

Altura máxima: 10m

**Talud 3:** Talud en trinchera que aflora en las proximidades del punto 3 de la zona de estudio. Está desarrollado en pizarras con nódulos de Mn y está estabilizado en la actualidad.

Orientación  $N150^{\circ}E/45^{\circ}SO$

#### 4.2.1.2. Características Geomecánicas de los taludes estudiados

A continuación, se describe la calidad del macizo rocoso de cada uno de estos taludes. Las orientaciones medias de las discontinuidades de cada zona se pueden ver en la tabla 4.4 del capítulo 4.2.

**Talud 1:** Taludes en trinchera que afloran en el punto 1 de la carretera

- Características de la matriz rocosa

En este afloramiento (figura 4.26) la matriz rocosa son grauvacas de la Unidad de sedimentos de facies Culm. La resistencia a la compresión simple estimada con el esclerómetro es 100-250 MPa y se muestra ligeramente alterado

El peso específico de esta roca se ha estimado en 26 kN/m<sup>3</sup> según <https://ingemecanica.com/tutoriales/pesos.html#inicio>



**Figura 4.26.** Afloramiento de Unidad facies Culm estación punto 1

- Características de las discontinuidades

Se reconocen 5 tipos de discontinuidades:  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $J_1$ ,  $J_2$ , y  $J_3$  (figura 4.27). Observándose muy pocos planos de  $S_1$

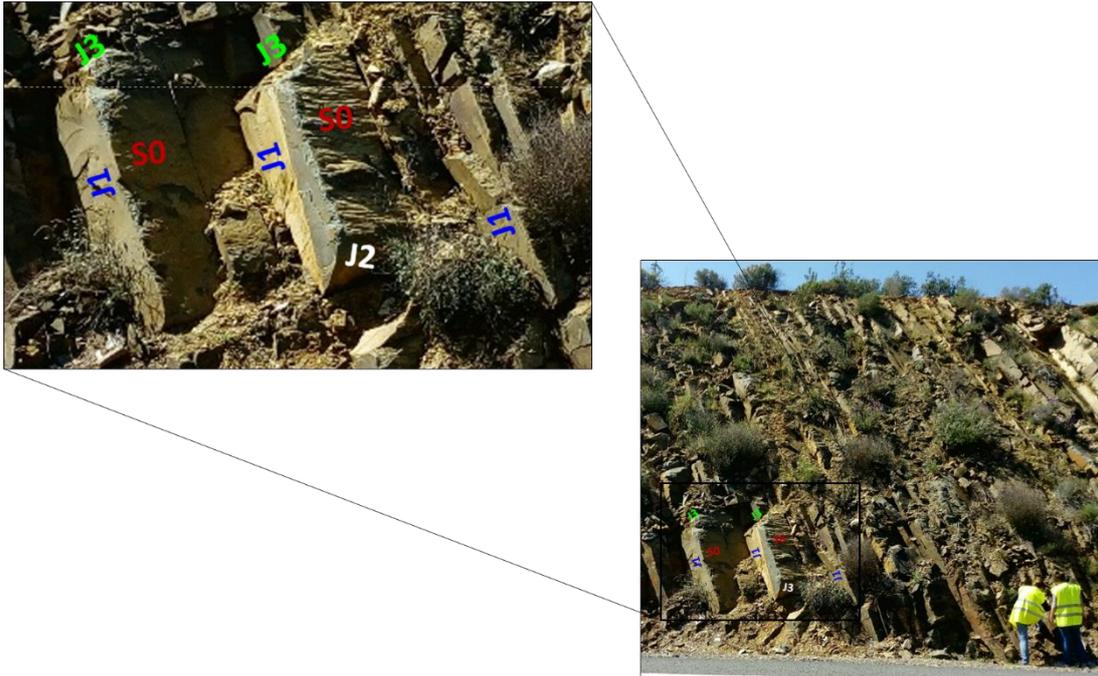


Figura 4.27. Familia de discontinuidades encontradas en el punto 1 ( $S_0$ ,  $J_1$ ,  $J_2$ , y  $J_3$ )

En la figura 4.28 se representan en proyección estereográfica estos planos, siendo:  $S_0$  de color rojo,  $S_1$  turquesa,  $J_1$  azul,  $J_2$  verde y  $J_3$  negro

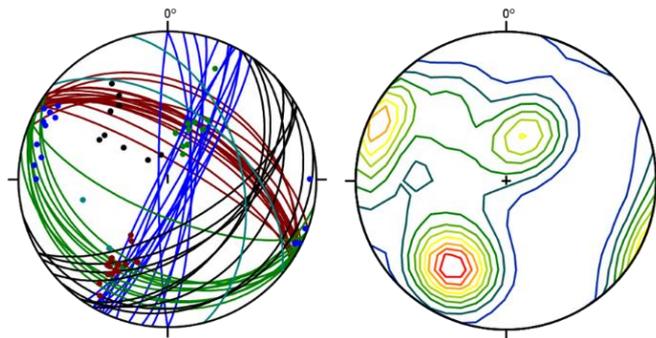


Figura 4.28. Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos de discontinuidad medidos en el punto 1, con su respectivo diagrama de densidad

Los planos de  $S_1$  no llegan a formar ningún tipo de familia, omitiéndose en el análisis de estabilidad por no ser representativos ya que prácticamente no existen pizarras en esta zona, predominando los estratos de grauvaca.

Las características de las discontinuidades pueden consultarse en Anexo I de la estación geomecánica.

Los planos de estratificación poseen rugosidad plana, excepto cuando presentan estructuras de paleocorriente, en donde la rugosidad es ondulada (figura 4.29). Como

en la mayoría de las ocasiones está presente la rugosidad plana, utilizaremos esta característica como la más conservadora para el cálculo del RMR.



**Figura 4.29.** Las capas de grauvacas muestran una rugosidad plana (figura izquierda), mientras que las estructuras de paleocorrientes presentan rugosidad ondulada

**Talud 2:** Talud que aflora entre los puntos 9 y 10 de la cartografía

- Características de la matriz rocosa

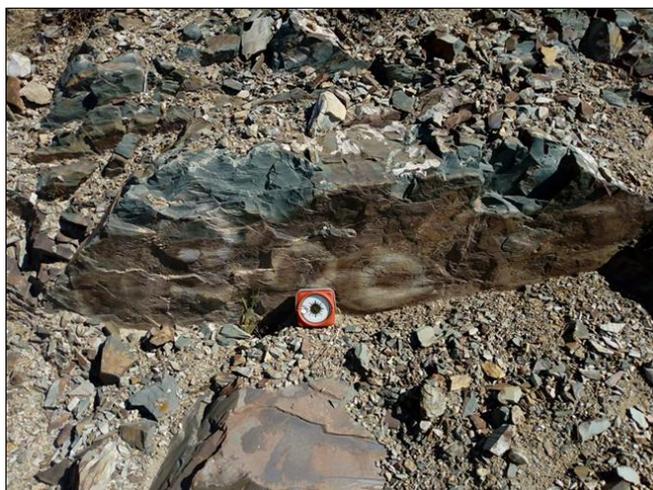
Las pizarras moradas tienen una resistencia a la compresión simple entre 100 a 250 Mpa y se encuentran ligeramente alteradas. Presentan rugosidad suave (figura 4.30)

A estas pizarras se les atribuye un peso específico de  $27 \text{ kN/m}^3$



**Figura 4.30.** Pizarras moradas localizadas en la parte superior del talud 2. Al pie del macizo rocoso se observan bloques de diferentes tamaños

Las silexitas y rocas volcánicas poseen una resistencia a la compresión simple entre 100 y 250 Mpa y, al igual que las pizarras moradas, presentan una rugosidad suave. Se observan ligeramente alteradas (figura 4.31), y se les atribuye un peso específico de  $27 \text{ kN/m}^3$



**Figura 4.31.** Silexitas observadas en la parte inferior del talud 2

Las pizarras con nódulos de Mn y metaareniscas (figura 4.32), tienen una resistencia a la compresión simple entre 100 a 250 Mpa, y se les atribuye un peso específico de  $27 \text{ kN/m}^3$



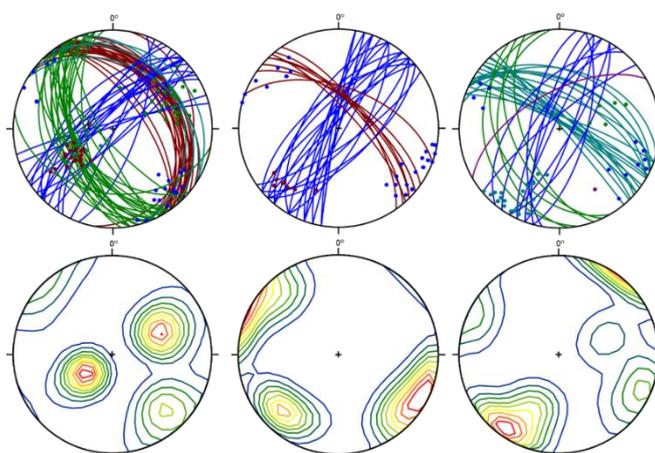
**Figura 4.32.** Pizarras con nódulos de Mn, se distinguen los planos de foliación

Dominan las pizarras y raramente se reconoce la estratificación en este punto. Cuando aparece es subparalela a la foliación

- Características de las discontinuidades

Las familias de discontinuidades  $J_1$  se distinguen en todas las litologías presentes en la zona de estudio, con orientaciones similares. En las pizarras moradas y pizarras con nódulos de Mn se reconocen también la familia  $J_2$ . Las características de las discontinuidades pueden consultarse en el Anexo I

En la figura 4.33 se representan las familias de discontinuidades, siendo:  $S_0$  de color rojo,  $S_1$  turquesa,  $J_1$  azul y  $J_2$  verde. Plano de falla color morado (punto 9)



**Figura 4.33.** Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos de discontinuidad medidos en el talud 2, con sus respectivos diagramas de densidades

**Talud 3:** Talud en trinchera que aflora en las proximidades del punto 3 de la zona de estudio

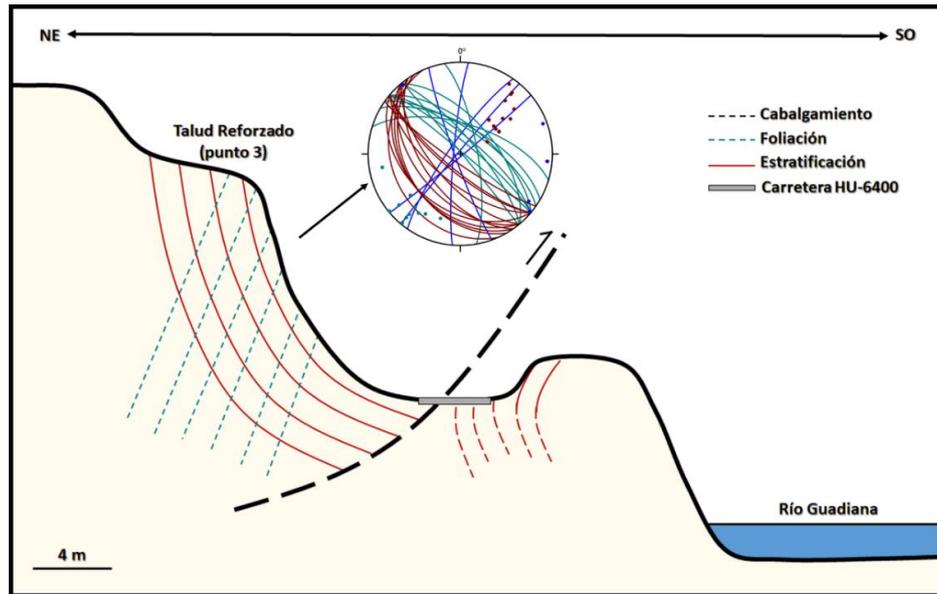
Corresponde al bloque de techo del cabalgamiento que se reconoce en el punto 3. Las pizarras no son homogéneas como en el caso anterior, sino que se encuentran alternadas con numerosos estratos más competentes de areniscas de pequeños centímetros de espesor. Así es posible reconocer en estas pizarras diversos pliegues de varios órdenes de magnitud, con charnelas que se inclinan algunos grados hacia el NO. Pueden observarse pliegues de dimensiones métricas con numerosos pliegues menores asociados. Se ha observado que, en las estructuras sinformales, se producen los deslizamientos a favor de los flancos hacia la charnela, cuando estos buzan en el

mismo sentido que el talud, de forma que el plano de rotura no tiene morfología de una rotura plana típica, sino que muestra una forma curva en la parte inferior (figura 4.34). En diciembre de 2016 ocurrió un deslizamiento de este tipo en este talud, por lo que se rebajó la pendiente del mismo de  $60^\circ$  a  $45^\circ$  y se aplicaron medidas de estabilización. La familia de planos de discontinuidad que delimita los bloques deslizados es la familia  $J_1$  que es aproximadamente perpendicular al talud y a los ejes de los pliegues.



**Figura 4.34.** Sinformes presentes en el talud 3 por los que han ocurrido deslizamientos

Estos pliegues se encuentran cortados por el cabalgamiento descrito que aflora en el pie del talud y quedaría bajo la carretera (figura 4.35). Por esta falla es frecuente observar agua.



**Figura 4.35.** Esquema del cabalgamiento situado en el punto 3. Se observa que corta a un sinforme, que ante su inestabilidad ha tenido que ser reforzado con anclajes. Se representa la proyección estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos encontrados en el talud:  $S_0$  de color rojo,  $S_1$  turquesa,  $J_1$  azul

Así pues, los tipos de rotura de este talud son complejos y están determinados por las estructuras de plegamiento que presenta. Por otro lado, desde el punto de vista mecánico el comportamiento de los planos de estratificación ante el deslizamiento es complejo, debido a la existencia de pliegues de orden menor de longitudes de onda centimétricas que le confieren unas características especiales de rugosidad

El talud que buza hacia el NE presenta inestabilidad por rotura plana a favor de la  $S_0$  quedando los bloques delimitados por planos de la familia  $J_1$  (figura 4.36). Pueden observarse numerosos bloques caídos, pero dado que no presenta gran altura no presenta un riesgo potencial de un gran deslizamiento.



**Figura 4.36.** Talud en trinchera 3 ubicado al frente del talud reforzado, se observa la  $S_0$  replegada. En la foto de la derecha se muestran las inestabilidades presentes en el talud

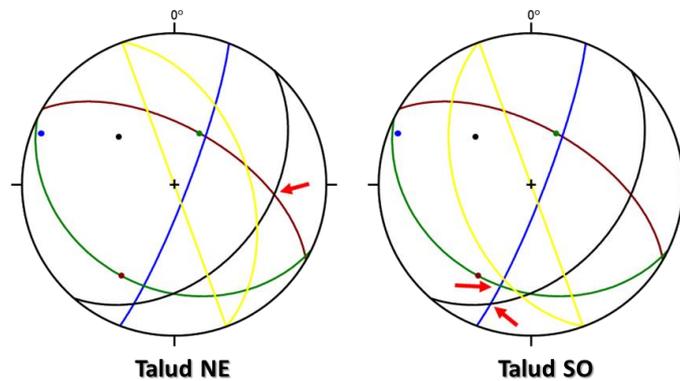
#### 4.2.1.3. Estabilidad geométrica

A continuación, se describen los tipos de inestabilidades que pueden reconocerse en función de la orientación de las discontinuidades

**Talud 1:** N160°/50°NE

N160°/50°SO

Familias de discontinuidades en figura 4.37: S<sub>0</sub> rojo, S<sub>1</sub> turquesa, J<sub>1</sub> azul, J<sub>2</sub> verde y J<sub>3</sub> negro



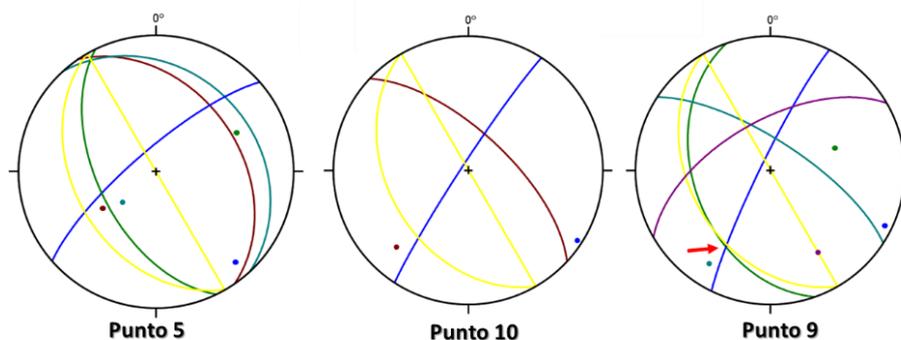
**Figura 4.37.** Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de las familias de discontinuidades del talud 1 NE y SO (amarillo), del punto 1 (facies Culm). Las flechas rojas muestran las cuñas formadas

Geoméricamente se forma una cuña inestable en el talud 1 NE, dado que la línea de intersección entre los planos de S<sub>0</sub> y J<sub>3</sub> presenta menor buzamiento que el talud.

Se forman también cuñas en el talud 1 SO pero estas se encuentran alejadas de la dirección de buzamiento del talud, siendo estables

**Talud 2:** N150°/40°SO

Familias de discontinuidades en la figura 4.38: S<sub>0</sub> rojo, S<sub>1</sub> turquesa, J<sub>1</sub> azul, J<sub>2</sub> verde. Plano de falla color morado (punto 9)



**Figura 4.38.** Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos de discontinuidad medidos en: punto 5 (pizarras moradas), punto 10 (silixitas) y punto 9 (pizarras con nódulos de Mn). La flecha roja muestra la cuña formada

Desde el punto de vista geométrico, en el punto 5, dado el buzamiento del talud, la familia  $J_2$  no llega a dar rotura plana, ni se formaría cuña entre las diaclasas  $J_2$  y  $J_1$ . En el punto 9 no se formaría rotura plana porque el talud buza  $40^\circ$  y la discontinuidad  $J_2$  buza  $42^\circ$ , se formaría una cuña entre  $J_2$  y  $J_1$  (flecha roja)

En el punto 10 habría estabilidad de todos los planos de discontinuidad.

La falla que aparece en el talud (punto 9) es muy oblicua al mismo, por lo que no presenta problemas de deslizamiento

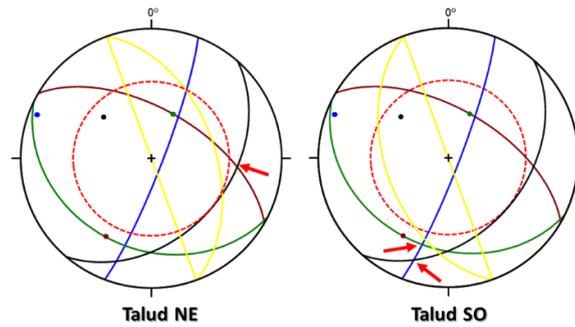
#### 4.2.1.4. Estabilidad mecánica

Una vez establecidas las condiciones geométricas que pueden producir algún tipo de falla, se procede a analizar las condiciones mecánicas, teniendo en cuenta el ángulo de fricción y tomando la cohesión igual a cero.

**Talud 1:** N160°/50°NE

N160°/50°SO

En la figura 4.39 se representa en proyección estereográfica el ángulo de fricción, con un valor de  $40^\circ$  para las grauvacas de la Unidad de facies Culm (figura 4.39). Familias de discontinuidades:  $S_0$  rojo,  $S_1$  turquesa,  $J_1$  azul,  $J_2$  verde y  $J_3$  negro



**Figura 4.39.** Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de las familias de discontinuidades del talud 1 NE y SO (amarillo), del punto 1 (facies Culm). Las flechas rojas muestran las cuñas formadas. El círculo rojo corresponde a la proyección del radio del ángulo de fricción

Ambos taludes son mecánicamente estables, puesto que el buzamiento de las líneas de intersección de las cuñas es menor que el ángulo de rozamiento interno de las discontinuidades. Sin embargo, aquí no se ha tenido en cuenta factores como la presión de fluidos o la sismicidad.

- **Factor de seguridad talud 1 NE**

Al calcular en el programa SWedge el factor de seguridad para la cuña formada entre  $S_0$  y  $J_3$ , arrojo un valor de **1.475** en condiciones secas (figuras 4.40 y 4.41). Este valor es muy próximo al valor 1.5 que se estima que debe de tener un talud de ingeniería civil, si bien el cálculo ha salido algo menor debido a las condiciones de partida que han sido conservadoras.

Figura 4.40 is a screenshot of the 'Deterministic Input Data' window in SWedge. It contains the following data:

Geometry	Dip (deg)	Dip Direction (deg)	Cohesion (t/m2)	Friction Angle (deg)
Joint Set 1	59	30	0	40
Joint Set 2	40	131	0	40
Upper Face	0	70		
Slope Face	50	70		

Tension Crack

Dip (deg)	70
Dip Direction (deg)	165
Trace Length (m)	0

**Slope Properties**

Slope Height (m)	9
Unit Weight (t/m3)	2.6
<input type="checkbox"/> Bench Width (m)	4.28979
<input type="checkbox"/> Overhanging	

**Results:**

- Safety Factor = 1.47545
- Wedge Weight = 125.313 tonnes
- Sliding on Line of Intersection: Trend = 95.7016 Plunge = 34.4047

Buttons: Aceptar, Cancelar, Aplicar

**Figura 4.40.** Cálculo del factor de seguridad para la rotura por cuña talud 1 NE Swedge (Rocscience, 2004)

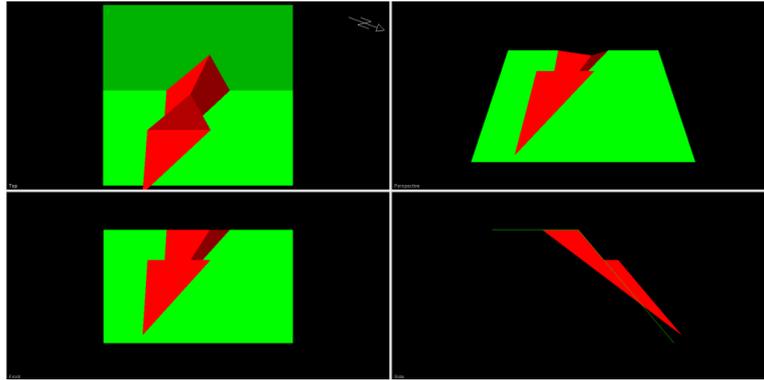


Figura 4.41. Vista de la rotura por cuña talud 1 NE Swedge (Rocscience, 2004)

También se obtuvieron los resultados analíticos que se muestran en la figura 4.42

Análisis de la Información de Swedge
<b>Nombre del documento:</b> Swedge cuña talud 1 NE.swd
<b>Título del Trabajo:</b> SWEDGE - Surface Wedge Stability Analysis
<b>Análisis de los resultados:</b>  Tipo de análisis: determinista Factor de seguridad: <b>1.47545</b> Altura de la cuña: 9 m Anchura de la cuña: 4.28979 m Volumen de la cuña: 48.1973 m <sup>3</sup> Peso de la cuña: 125.313 tonnes

Figura 4.42. Resultados analíticos de la cuña analizada con el programa Swedge (Rocscience, 2004)

Si tenemos en cuenta las fuerzas externas como factor sísmico (0.12) y presión de agua, el valor de la presión de fluidos en la cuña para que haya deslizamiento será cuando alcance un valor del 59% de relleno de agua en las fisuras (figura 4.43)

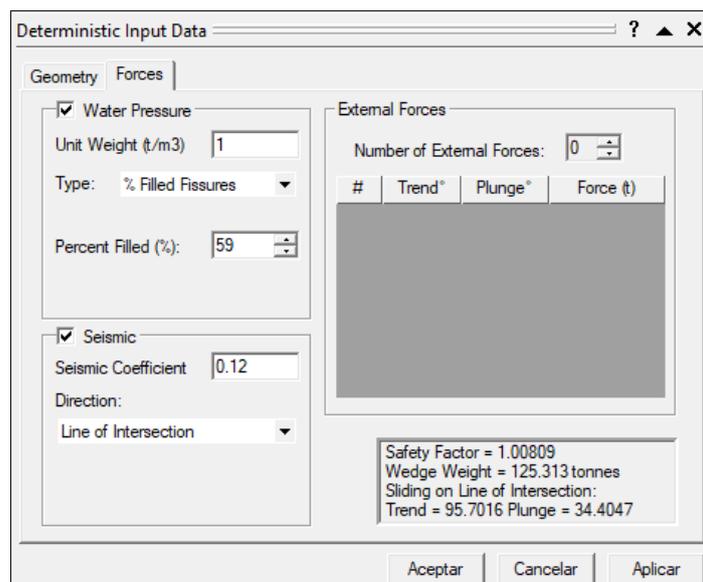


Figura 4.43. Factor de seguridad 1, rotura por cuña talud 1 NE Swedge (Rocscience, 2004)

### **Talud 2:** N150°/40°SO

En la figura 4.44 se representa en proyección estereográfica el ángulo de fricción, con un valor de 40° para toda la litología presente en el talud 2. Familias de discontinuidades: S<sub>0</sub> rojo, S<sub>1</sub> turquesa, J<sub>1</sub> azul, J<sub>2</sub> verde y J<sub>3</sub> negro. Plano de falla color morado

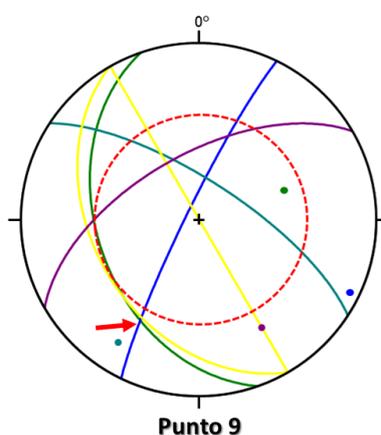


Figura 4.44. Representación estereográfica (equiareal, hemisferio inferior) de los planos de discontinuidad medidos en: punto 5 (pizarras moradas). El círculo rojo corresponde a la proyección del radio del ángulo de fricción. La flecha roja muestra la cuña formada

Los puntos 5 y 10 son estables, ya que lo eran geoméricamente. En el punto 9 la cuña formada por las diaclasas J<sub>1</sub> y J<sub>2</sub> caería fuera de la zona de inestabilidad considerando el círculo de fricción

- **Factor de seguridad talud 2 punto 9**

Al calcular en el programa SWedge el factor de seguridad para la cuña formada entre las diaclasas  $J_1$  y  $J_2$ , arrojo un valor de **2.1** en condiciones secas (figuras 4.45 y 4.46). Siendo superior al valor que se estima que debe de tener un talud de ingeniería civil

Figura 4.45. Cálculo del factor de seguridad para la rotura por cuña talud 2 punto 9. Swedge (Rocscience, 2004)

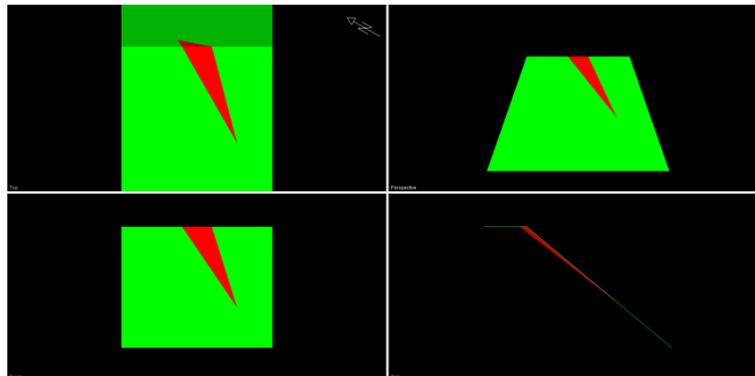


Figura 4.46. Vista de la rotura por cuña talud 2 punto 9 Swedge (Rocscience, 2004)

También se obtuvieron los resultados analíticos que se muestran en la figura 4.47

Análisis de la Información de Swedge	
<b>Nombre del documento:</b>	Swedge cuña talud 9 J1-J2.swd
<b>Título del Trabajo:</b>	SWEDGE - Surface Wedge Stability Analysis
<b>Análisis de los resultados:</b>	
Tipo de análisis:	determinista
Factor de seguridad:	<b>2.10817</b>
Altura de la cuña (en el talud):	10 m
Anchura de la cuña:	0.820069 m
Volumen de la cuña:	5.01027 m <sup>3</sup>
Peso de la cuña:	13.5277 tonnes

Figura 4.47. Resultados analíticos de la cuña analizada con el programa Swedge (Rocscience, 2004)

Si tenemos en cuenta las fuerzas externas como factor sísmico (0.12) y presión de agua, el valor de la presión de fluidos en la cuña para que haya deslizamiento será cuando alcance un valor del 50% de relleno de agua en las fisuras (figura 4.48)

Figura 4.48. Factor de seguridad 1, rotura por cuña talud 2 punto 9. Swedge (Rocscience, 2004)

### 4.3. Clasificación de Bieniawski de parámetro RMR (Rock Mass Rating)

A partir de los datos obtenidos en campo de los puntos 1, 5, 9 y 10 se clasificó la roca mediante la clasificación de Bieniawski

Los valores de rebote obtenidos en el campo se muestran en la tabla 4.5, los cuales, una vez corregidos, se calcularon los valores promedio (tabla 4.6). Estos se correlacionan mediante un ábaco con la resistencia a compresión simple, en función

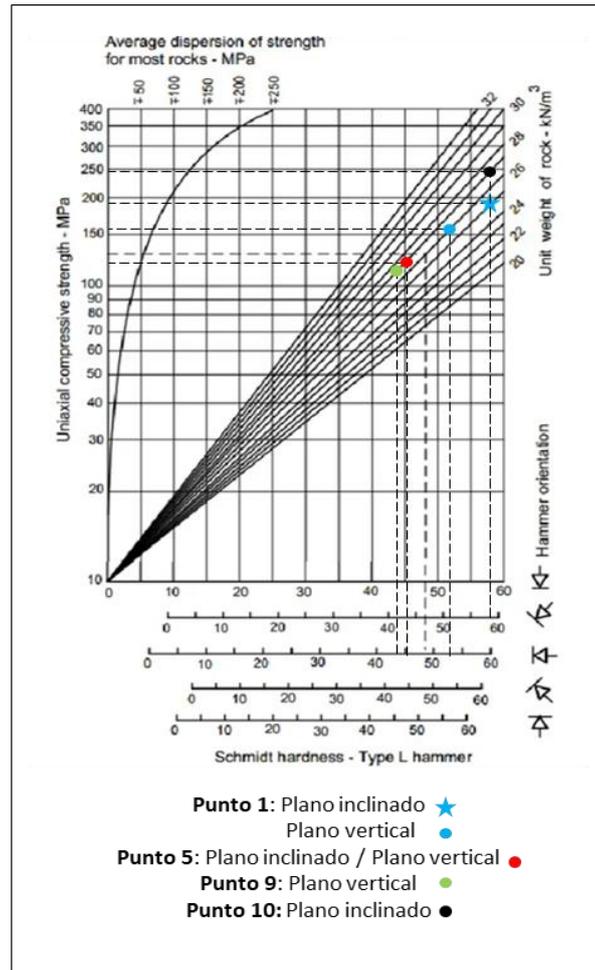
de la densidad de la roca y de la inclinación del martillo y del plano ensayado (figura 4.49).

**Tabla 4.5.** Valores de los rebotes obtenidos en campo

Punto 1		Punto 5		Punto 9		Punto 10
Rebote		Rebote		Rebote		Rebote
						
Plano inclinado	Plano vertical	Plano inclinado	Plano vertical	Plano inclinado	Plano vertical	Plano inclinado
54	52	48	32	26	28	54
44	44	34	50	42	50	54
57	56	22	46	40	44	72
40	48	34	42	28	42	70
58	46	42	48		40	34
58	38	34	50		40	36
62	54	40	46		34	56
38		32			42	50
50		42			40	52
58		32			38	54
50		38				54
		20				
		48				
		50				
		36				

**Tabla 4.6.** Valores medios de los rebotes

Puntos	Valor medio del rebote	Densidad de la roca (Kn/m3)	Plano
1	53	26	Vertical
	58	26	Inclinado
5	45	27	Vertical
	44	27	Inclinado
9	44	27	Vertical
10	60	27	Inclinado



**Figura 4.49.** Estimación de la resistencia a la compresión de pared conjunta de dureza Schmidt (tomado y modificado de González de Vallejo, 2002)

- Punto 1: 100-250 kN/m<sup>3</sup>
- Punto 5: 100-250 kN/m<sup>3</sup>
- Punto 9: 100-250 kN/m<sup>3</sup>
- Punto 10: 200-250 kN/m<sup>3</sup>

A continuación, se muestra en la tabla 4.7, las diversas valuaciones para los parámetros que permiten clasificar la roca según este sistema.

Tabla 4.7. Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski, 1989) de los taludes estudiados

Estaciones		1	5	9	10	Puntuación
Resistencia de la matriz rocosa	Compresión simple (Mpa)	>250	>250	>250	>250	15
		250-100	250-100	250-100	250-100	12
RQD (%)	100-50	100-50	100-50	100-50	100-50	7
	50-25	50-25	50-25	50-25	50-25	4
	90%-100%	90%-100%	90%-100%	90%-100%	90%-100%	20
	75%-90%	75%-90%	75%-90%	75%-90%	75%-90%	17
	50%-75%	50%-75%	50%-75%	50%-75%	50%-75%	13
	25%-50%	25%-50%	25%-50%	25%-50%	25%-50%	6
	<25%	<25%	<25%	<25%	<25%	3
	>2	>2	>2	>2	>2	20
	0,6-2	0,6-2	0,6-2	0,6-2	0,6-2	15
	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	0,2-0,6	10
Separación entre diaclasas (m)	0,06-0,2	0,06-0,2	0,06-0,2	0,06-0,2	0,06-0,2	8
	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	<0,06	5
	<1	<1	<1	<1	<1	6
	1-3	1-3	1-3	1-3	1-3	4
	3-10	3-10	3-10	3-10	3-10	2
	10-20	10-20	10-20	10-20	10-20	1
	>20	>20	>20	>20	>20	0
	Nada	Nada	Nada	Nada	Nada	6
	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	5
	0,1-1	0,1-1	0,1-1	0,1-1	0,1-1	3
Estado de las discontinuidades	1-5	1-5	1-5	1-5	1-5	1
	>5	>5	>5	>5	>5	0
	Muy rugosa	Muy rugosa	Muy rugosa	Muy rugosa	Muy rugosa	6
	Rugosa	Rugosa	Rugosa	Rugosa	Rugosa	5
	Ligeramente rugosa	Ligeramente rugosa	Ligeramente rugosa	Ligeramente rugosa	Ligeramente rugosa	3
	Ondulada	Ondulada	Ondulada	Ondulada	Ondulada	1
	Suave	Suave	Suave	Suave	Suave	0
	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	6
	Duro <5	Duro <5	Duro <5	Duro <5	Duro <5	4
	Duro >5	Duro >5	Duro >5	Duro >5	Duro >5	2
Relleno (mm)	Blando <5	Blando <5	Blando <5	Blando <5	Blando <5	2
	Blando >5	Blando >5	Blando >5	Blando >5	Blando >5	0
	Inalterada	No	No	No	No	6
	Ligeramente	Ligeramente	Ligeramente	Ligeramente	Ligeramente	5
Alteración	Moderadamente	Moderadamente	Moderadamente	Moderadamente	Moderadamente	3
	Muy	Muy	Muy	Muy	Muy	1
	Descompuesta	Descompuesta	Descompuesta	Descompuesta	Descompuesta	0
	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	15
Agua Freática	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	10
	Húmedo	Húmedo	Húmedo	Húmedo	Húmedo	7
	Goteo	Goteo	Goteo	Goteo	Goteo	4
	Agua fluyendo	Agua fluyendo	Agua fluyendo	Agua fluyendo	Agua fluyendo	0
Estado general	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	10
	Húmedo	Húmedo	Húmedo	Húmedo	Húmedo	7
	Goteo	Goteo	Goteo	Goteo	Goteo	4
	Agua fluyendo	Agua fluyendo	Agua fluyendo	Agua fluyendo	Agua fluyendo	0
Estado general	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	Ligeramente Húmedo	10
	Húmedo	Húmedo	Húmedo	Húmedo	Húmedo	7
	Goteo	Goteo	Goteo	Goteo	Goteo	4
	Agua fluyendo	Agua fluyendo	Agua fluyendo	Agua fluyendo	Agua fluyendo	0

El RMR se obtiene como suma de unas puntuaciones que corresponden a los valores de cada uno de los 5 parámetros (explicados en el apartado 3.2.1.2) y oscila entre 0 y 100, y que es mayor cuanto mejor es la calidad de la roca.

Los macizos rocosos de los puntos nombrados anteriormente se clasifican como macizos de clase II, calidad buena (tabla 4.8)

**Tabla 4.8.** Resultados del RMR (Rock Mass Rating)

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación Punto 1	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación Punto 5	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación Punto 8	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala
Puntuación Punto 9	100-81	80-61	60-41	40-21	<20

#### 4.5. Clasificación geomecánica SMR

El SMR calculado para la rotura por cuña del talud 1 NE, queda como sigue:

- Talud 1 NE:  $N160^{\circ}50^{\circ}NE$
- Línea de intersección de la cuña:  $N95^{\circ}34^{\circ}NE$

$\alpha_s$  dirección del talud:  $160^{\circ}$

$\alpha_i$  dirección de la línea de intersección de la cuña:  $95^{\circ}$

$\beta_s$  buzamiento del talud:  $50^{\circ}$

$\beta_i$  buzamiento de la línea de intersección de la cuña:  $34^{\circ}$

**F1:** 0.15      **F2:** 0.70      **F3:** -60      **F4:** 0

SMR de **66.7** siendo de clase II de calidad buena, con una estabilidad: estable, indicando que las roturas se pueden producir en algunos bloques (ver apartado 3.2.1.3)

SMR > 65: sin sostenimiento (saneo)

El SMR calculado para la rotura por cuña del talud 2 punto 9, queda como sigue:

- Talud 2 punto 9: **N150° 40°SO**
- Línea de intersección de la cuña: **N210° 34°SO**

**$\alpha_s$**  dirección del talud: 150°

**$\alpha_i$**  dirección de la línea de intersección de la cuña: 210°

**$\beta_s$**  buzamiento del talud: 40°

**$\beta_i$**  buzamiento de la línea de intersección de la cuña: 34°

**F1:** 0.15      **F2:** 0.70      **F3:** -50      **F4:** 0

SMR de **72.75** siendo de calidad buena, con una estabilidad: estable, indicando que las roturas se pueden producir en algunos bloques

SMR > 65: sin sostenimiento (saneo)

## **4.6. Discusión de los datos geotécnicos**

Con el presente trabajo se ha logrado cumplir con los objetivos propuestos para este estudio, caracterizándose los macizos rocosos con la ayuda de las proyecciones estereográficas, identificándose los modos de rotura más recurrentes en el talud, para finalmente determinar el factor de seguridad.

Los macizos rocosos estudiados se clasifican, según el RMR, como clase II con calidad buena, lo cual se corrobora con el análisis de estabilidad, en donde se observa que estos en general son estables, como cabe esperar, formándose rotura por cuña, que en épocas de lluvia podría hacer caer algunos bloques como se deduce del cálculo del factor de seguridad y del SMR.

El factor de seguridad a adoptar, según González de Vallejo (2002) para un talud permanente debe ser igual o superior a 1.5, e incluso 2.0. Estos son los valores que se han obtenido en condiciones secas para los taludes estudiados, pero hay que tener en cuenta que la presión de fluidos y la acción sísmica puede hacer disminuir este factor. En este trabajo se ha calculado la presión de fluidos que haría disminuir el factor de seguridad hasta valores próximos al equilibrio límite ( $F \cong 1$ ), teniendo en cuenta también el factor sísmico.

Para una máxima veracidad, y a su vez, para la corroboración de los datos, sería conveniente realizar los ensayos respectivos a fines de obtener aquellos parámetros físicos necesarios que contribuyan a la caracterización de los macizos rocosos, tales como (ángulo de fricción Interna, cohesión, valor resistencia a la compresión, RQD, entre otros). Estos taludes son estables dado el buen buzamiento que presentan, siendo el principal factor desencadenante de posibles deslizamientos de bloques pequeños, la presión del agua, por lo que habría que conocer muy bien las características hidrogeológicas de la zona.

## **4.7. Conclusiones**

### **Desde el punto de vista geológico:**

La zona de estudio se encuentra en la ZSP, concretamente, en el flanco sur del Anticlinal de La Puebla de Guzmán, (o del Antiforme de Pomarão). En ella se distinguieron dos de las tres unidades litoestratigráficas que componen la Faja Pirítica Ibérica: la Unidad de facies Culm y El Complejo Volcánico – Sedimentario (CVS). La Unidad de Facies Culm está formada en esta zona principalmente por grauvacas y en el CVS se han diferenciado tres unidades litológicas de techo a muro, que son: silixitas y rocas volcánicas, pizarras moradas y pizarras y metaarenitas con nódulos de Mn

La orientación general de la estratificación es N120°-145°E con buzamientos en general mayores de 40° al NE. La foliación tiene una dirección similar y buzamientos menores a los de la estratificación

A partir de las estructuras sedimentarias encontradas en las grauvacas de la Unidad de facies Culm y de las relaciones entre la foliación y la estratificación (buzas menos la foliación que la estratificación) se concluye que la secuencia estratigráfica está invertida y que la zona estudiada forma parte de un flanco inverso de una estructura de orden mayor.

El contacto entre el CVS y la Unidad Facies Culm es un cabalgamiento de vergencia al SO de dirección aproximada N130° y buzamiento al NE. El bloque de techo lo constituyen rocas del CVS y el bloque de muro está constituido por grauvacas y pizarras de la Unidad de facies Culm.

En las pizarras y metaarenitas con nódulos de Mn es frecuente encontrar pliegues de orden menor, definidos por las capas más competentes. Estos pliegues son de diferentes longitudes de ondas y de diferentes órdenes, en general son asimétricos y de geometría cónica. Las charnelas de estos pliegues están inclinadas entre 8° y 32° hacia N306°-322°E.

Se identificaron fallas de desgarre con movimiento sinistral y de orientación NE-SO, que pueden llegar a desarrollar zonas de roca de falla de varios metros de potencia. Estas fallas son posteriores a las estructuras descritas

#### **Desde el punto de vista geotécnico:**

Los macizos rocosos estudiados se clasifican, según el RMR, como clase II de calidad buena.

En ellos se reconocen 5 familias de discontinuidades, 3 conjuntos de diaclasas ( $J_1$  diaclasas subverticales con dirección NE - SO, con buzamientos altos;  $J_2$  diaclasas NO-SE, con buzamientos al SO y  $J_3$  diaclasas con dirección NE-SO y buzamiento al SE) más la estratificación ( $S_0$ ) y la Foliación ( $S_1$ )

Según el SMR los taludes que presentan rotura en cuña (talud 1 NE y talud 2 punto 9), se clasifican como clase II de calidad buena, con una estabilidad: estable, indicando que las roturas se pueden producir en algunos bloques

Las características geológicas de la zona condicionan en gran medida los tipos de roturas presentes en los taludes estudiados.

El factor desencadenante de tales roturas será la presencia de agua en el talud.

Dada la orientación de los taludes estudiados con respecto a las estructuras geológicas presentes en la zona, se puede concluir, que los tipos de rotura potenciales que pueden producirse son roturas en cuña en zonas no plegadas, y roturas a favor de flancos de pliegues sinformes que buzcan en el mismo sentido que el talud en zonas con presencia de pliegues.

## Referencias bibliográficas

Alonso Chaves F.M., García-Navarro E. y Camacho M. (1998). Deformación progresiva de la Zona Surportuguesa: Plegamiento y cizallamiento de secuencias multicapa.

Alonso Chaves F.M, García Navarro E., Fernández C. y Camacho M. (2016). *De Avalonia al Suroeste de Iberia: anatomía de una cuña orogénica varisca, el "rifting" proto-Atlántico y tectónica reciente. XXVIII Reunión de la comisión de Tectónica de la sociedad Geológica de España.*

Almodóvar, G.R., Sáez, R., Pons, J.M., Maestre, A., Toscano, M., Pascual, E. (1998): Geology and genesis of the Aznalcollar massive sulphide deposits, Iberian Pyrite Belt, Spain. *Mineralium Deposita*, 33, 111-136.

Donaire Romero, T., Alonso Chaves, F.M., García Navarro, E., González Barrionuevo, F., González Roldán, M.J., Mantero Romero, E.M., Moreno Garrido, M.C., Pascual Martínez, E., Ruiz de Almodóvar Sel, G., Sáez Ramos, R., Sierra del Pino, S., Toscano Macías, M., Valenzuela Aznar, A. (2008) En: Olías Álvarez, M., et al.: "Geología de Huelva: lugares de interés geológico". 2ª ed. Huelva: Universidad de Huelva. págs. 14-19

González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica. Ed. Prentice hall. Pearson Education. Madrid*

Jordá, L. y López Jimeno C. (2016). *Manual de estaciones geomecánicas. Descripción de macizos rocosos en afloramientos.* Madrid.

Mantero E. M., García Navarro, E, Alonso Chaves F. M., Martín Parra, L.M., y azor a. (2007). La zona sudportuguesa: propuesta para la subdivisión de un bloque continental en dominios. *Geogaceta*, vol., 43, 27-30.

Sáez, R., Almodovar, G.R., Pascual, E. (1996): Geological constraints on massive sulphide genesis in the Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, 11, 429-451.

Schermerhorn L.J.G. (1975) An outline stratigraphy of the Iberian Pyrite Belt. *Boletín Geológico y minero de España*, 82 (238-268).

Tomas R. (2006). Nuevas funciones continuas para el cálculo del Slope Mass Rating (SMR): aplicación mediante un sistema de información geográfica a los taludes rocosos de una cantera. Revista de la sociedad geológica de España, 19 (1-2)

Visor del IGME (Instituto Geológico Minero de España)

# ANEXO I