

## 7. Deformación dúctil: Estructuras no penetrativas

07/05/2018

Zagros (Irán)

Henri Masquelin

### 1. Introducción

- **Deformación dúctil**
  - Espacialmente continua
  - Estructuras que acortan o extienden las rocas sin pérdida de cohesión
- **Extensión**
  - Estructuras de estiramiento (*boudins*)
- **Acortamiento**
  - Pliegues (no penetrativos)
  - Foliación (penetrativa)

07/05/2018

## Pliegues = Acortamiento

- **Relacionados con deformación...**
  - Generalmente **compresiva** y/o **cizallante**
  - Pero también por **gravedad**
- **Pliegues:**
  - Todas las escalas
  - Requieren superficie previa (e. g. estratificación)
  - Acortamiento y espesamiento
  - Reología dúctil (elastoplástica, elastoviscosa...)
- **Asociados con fallas y zonas de cizalla**
- **Diversos mecanismos de plegamiento**

07/05/2018

## Reconocimiento en foto aérea

- **Superficies curvilineales.**
- Desarrollan terminaciones de mayor curvatura: **Periclinales** (charnelas).
- Trenes de pliegues: **Anticlinorios**
- **Asociados con grandes fallas** (inflexión de capas por movimiento de una falla).
- Fallas inversas y cabalgamientos: **Pliegues de flexión de falla** o **pliegues de reptación.**

07/05/2018

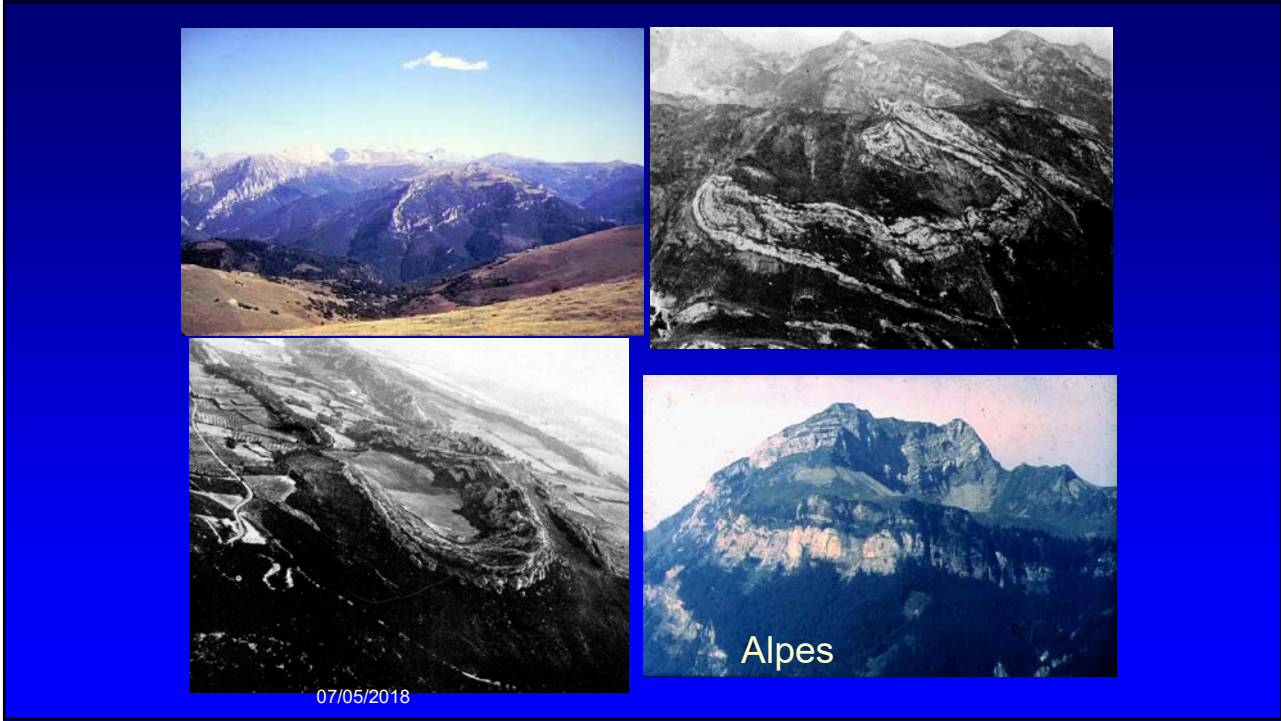
King Oscar Fjord (Noruega)



Namibia











Pliegues en chevrón (Creta)



Anticlinal-Pembrokeshire (Gales)



Cerro La Plata (Minas)



Cerro La Plata (Minas)

07/05/2018



Segelskapets-Fiordo Rey Oscar (Noruega)

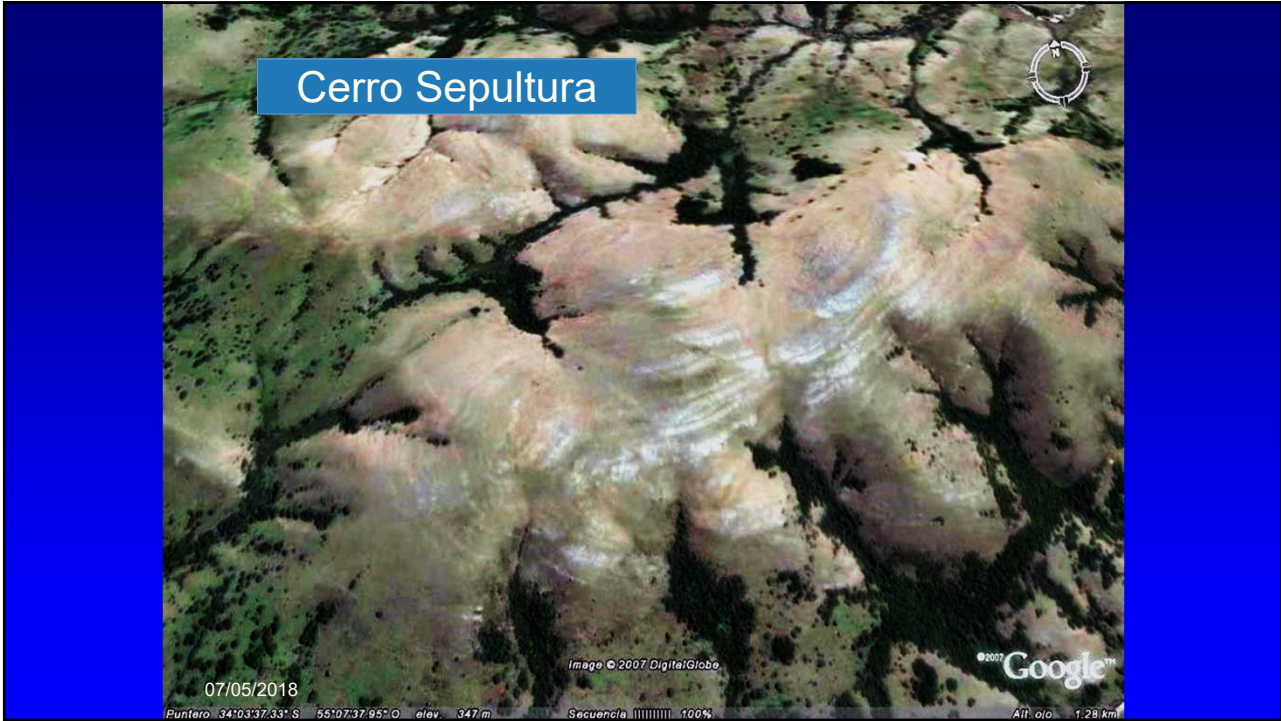


Butt of Lewis-Outer Hebrides (Escocia)



Serra da Miaba (Sergipe)





## ¿Dónde se encuentran los pliegues?

- Límites de placa convergentes.
- Cinturones Orogénicos.
- ¿En qué partes?:
  - Son más notorios cuando las cuencas marginales son acortadas durante las orogénesis por colisión:
    - Fajas plegadas y corridas de antepaís
    - Cinturón de esquistos (mayor acortamiento y cizalla)
    - Núcleo orogénico cristalino (+metamorfismo, pliegues pasivos)
- Zonas intracontinentales de alta deformación (i.e. zonas de cizalla)
- Detachments extensionales pueden generar pliegues por gravedad.

07/05/2018

## Información dada por pliegues

- **Histórica:** edad relativa de la deformación y magmatismo (p. ej.)
- **Mecánica:** comportamiento físico de las rocas.
- **Cinemática:** información cuantitativa sobre deformación y desplazamiento.



07/05/2018

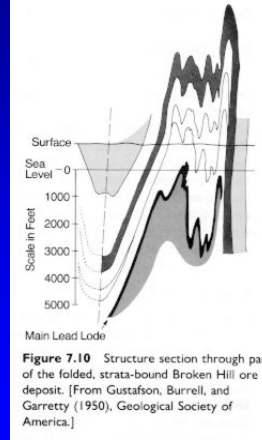


## Pliegues como guías exploratorias y mineras



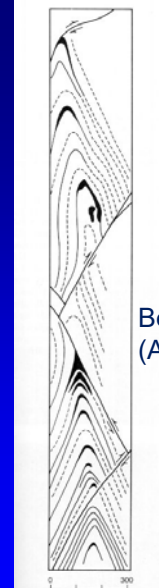
California (EUA)

07/05/2018



**Figure 7.10** Structure section through part of the folded, strata-bound Broken Hill ore deposit. [From Gustafson, Burrell, and Garretty (1950), Geological Society of America.]

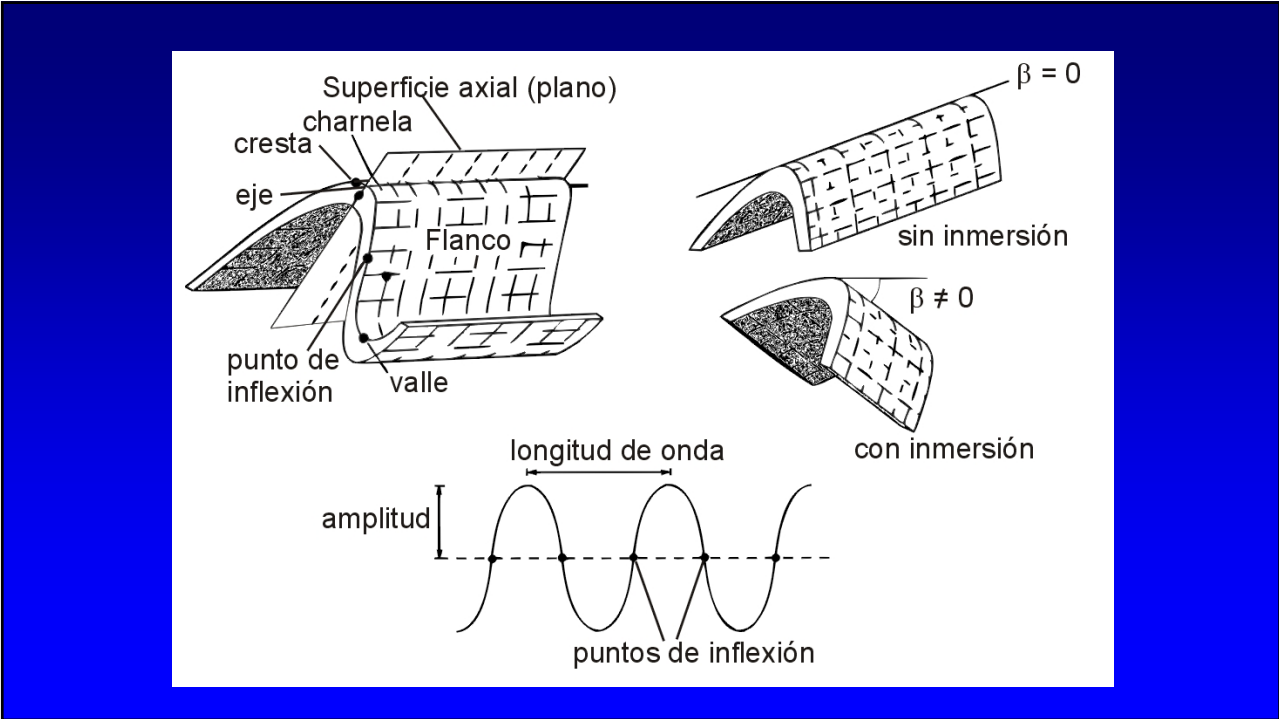
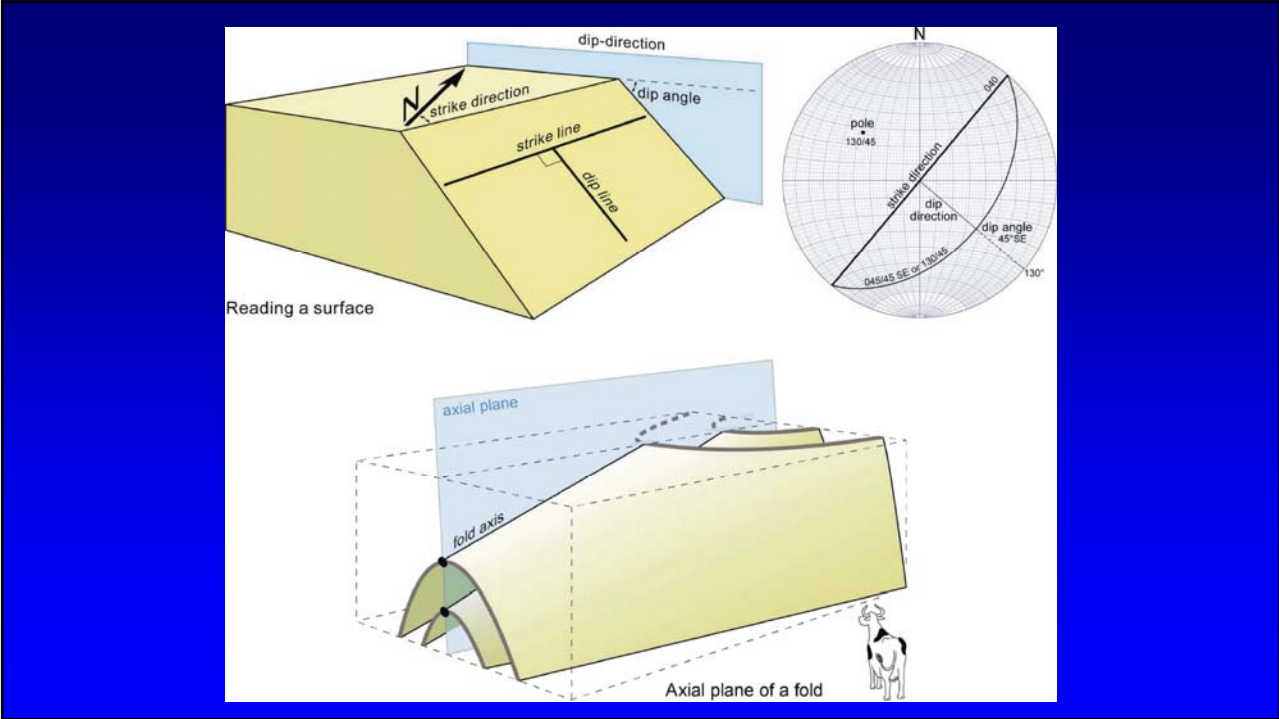
Broken-Hill (Australia)



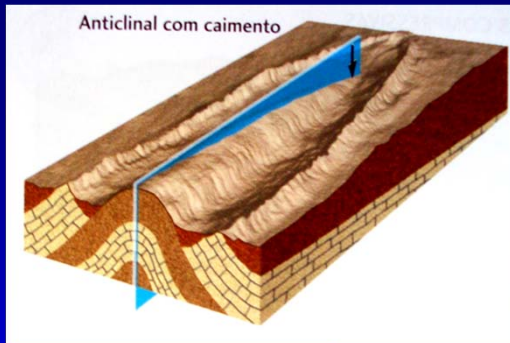
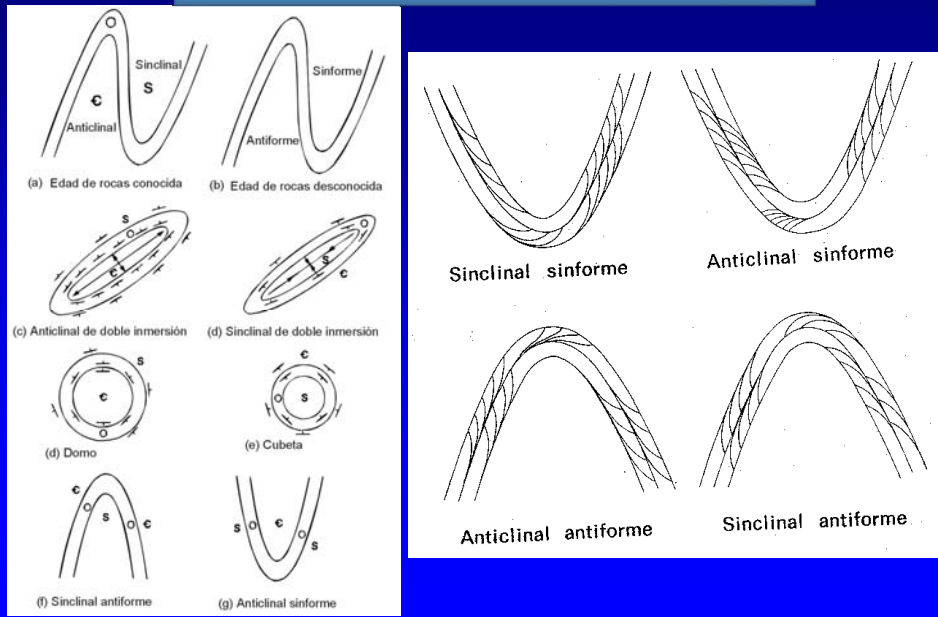
**Figure 7.9** Saddle reef deposit in the Bendigo goldfield, Bendigo, Victoria, Australia. Scale in feet. (From Mining Geology by H. E. McKimery. Published with permission of Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, copyright © 1961.)

Bendigo  
(Australia)

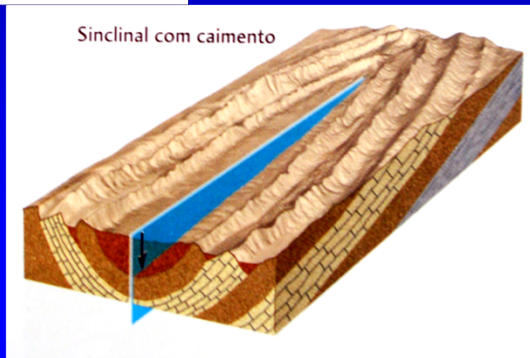
Descripción  
geométrica de  
pliegues



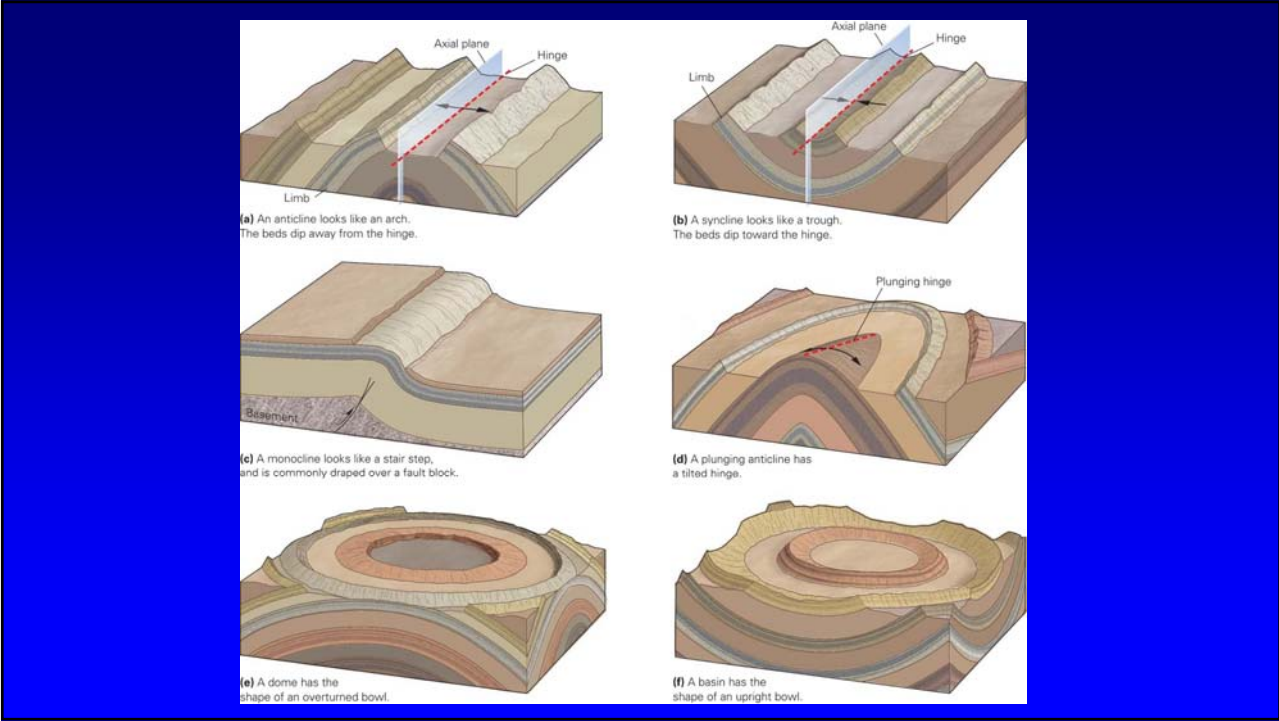
# Anticlinal y sinclinal



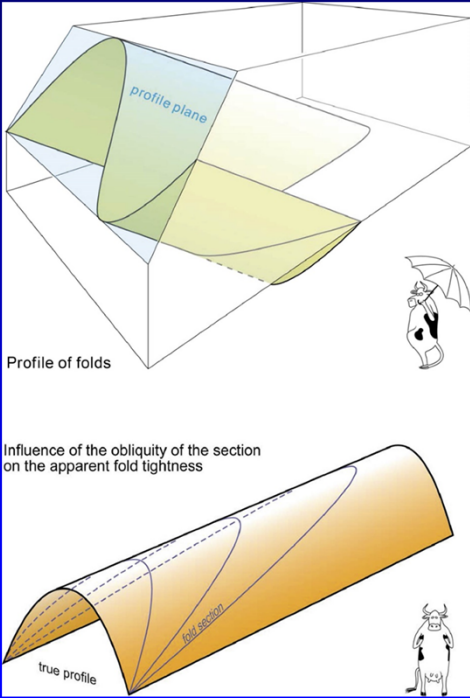
## Terminaciones periclinales



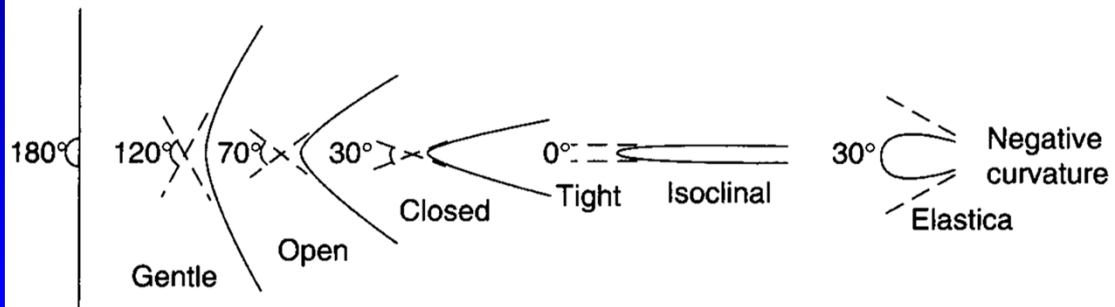




Oblicuidad de la sección de relieve:  
Muestra **ángulo de apertura aparente**

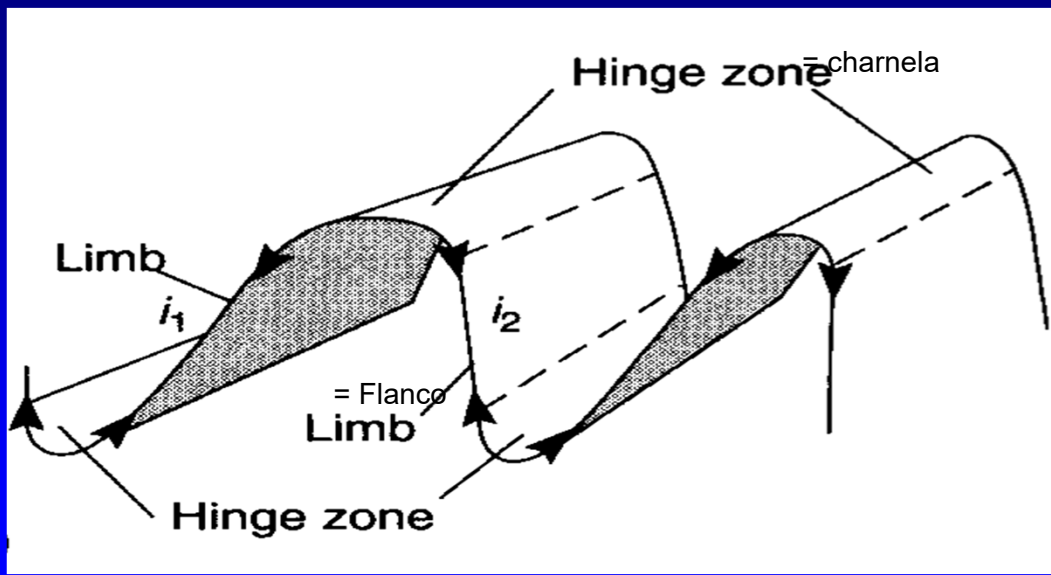


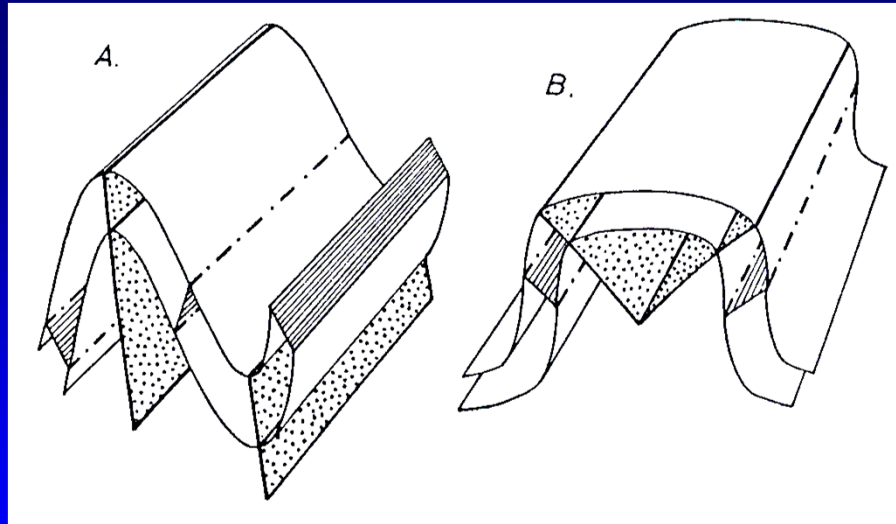
## Clasificación de pliegues por ángulo de apertura



07/05/2018

## Variaciones en la zona de charnela





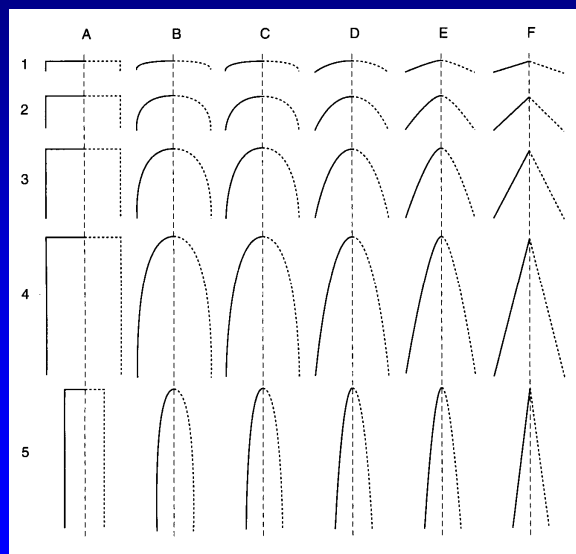
Superficies axiales (puntos) y superficies de inflexión (rayadas)  
En pliegue de una charnela (A) o dos charnelas (B).

## Relación amplitud vs. longitud de onda

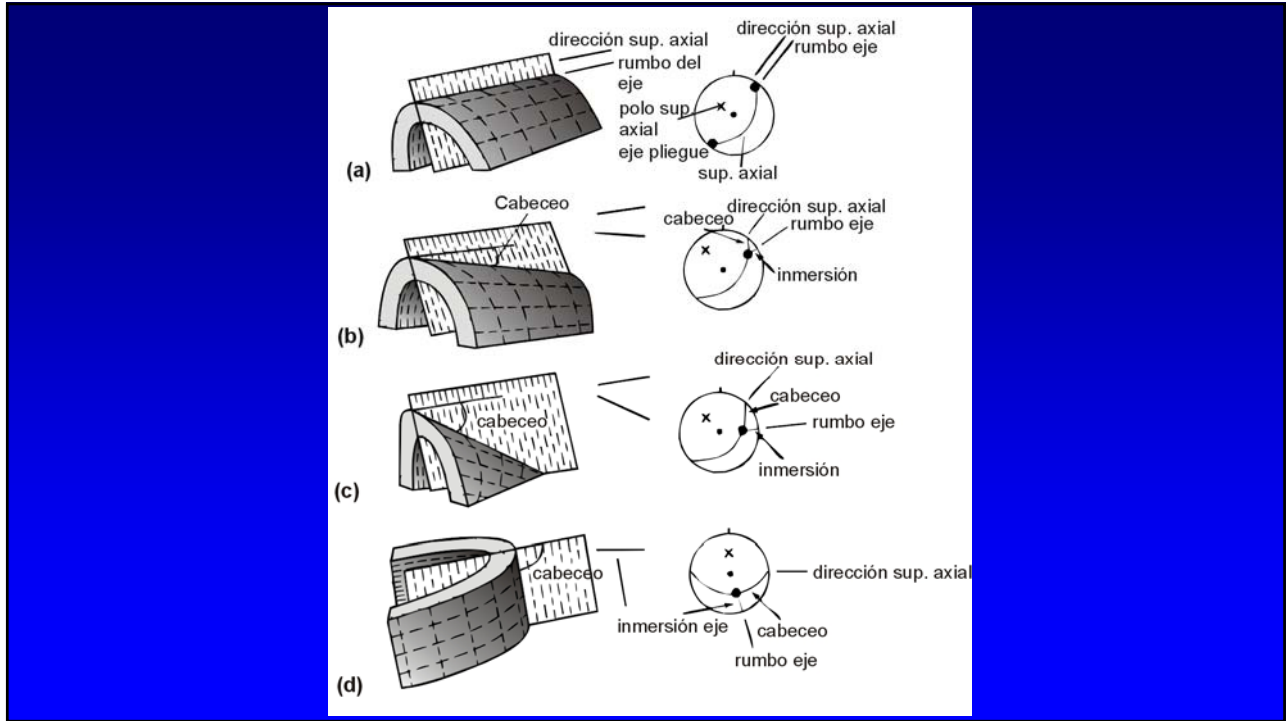
### Tabla de Hudleston:

A-F: Variación de longitud de onda.

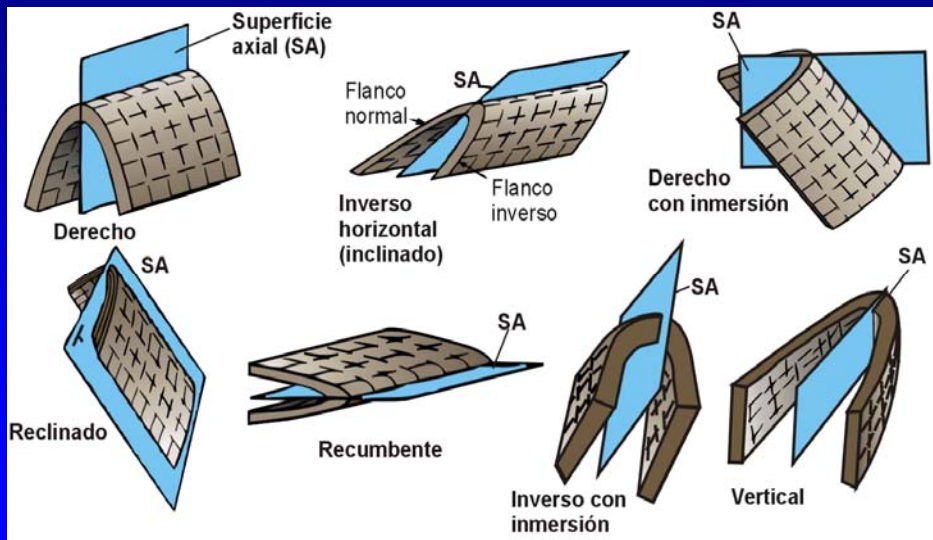
1-5: Variación de amplitud.

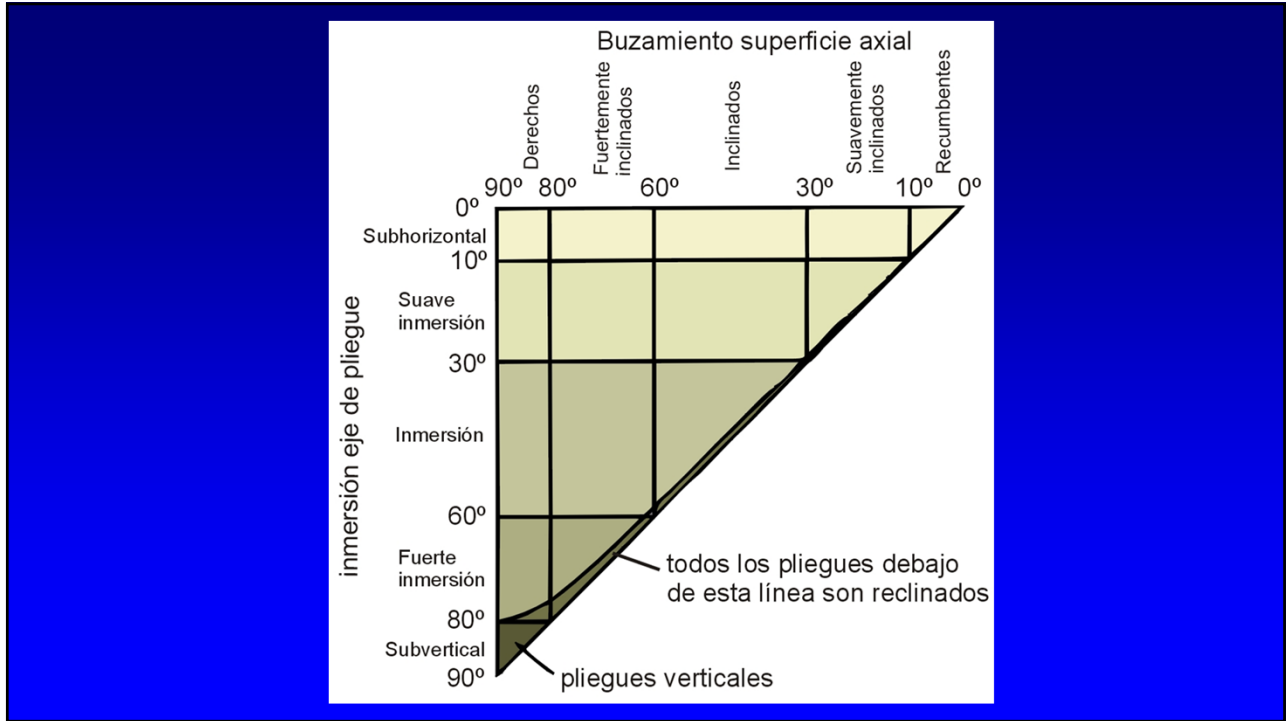




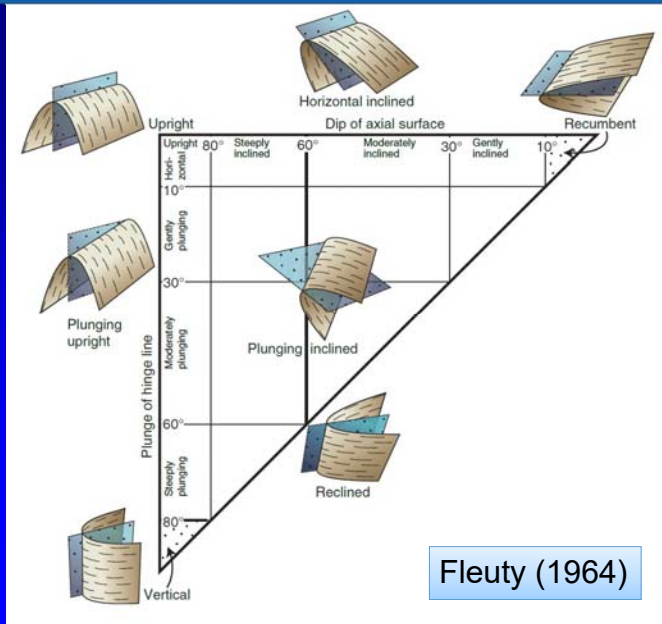


## Clasificación por orientación charnela y superficie axial

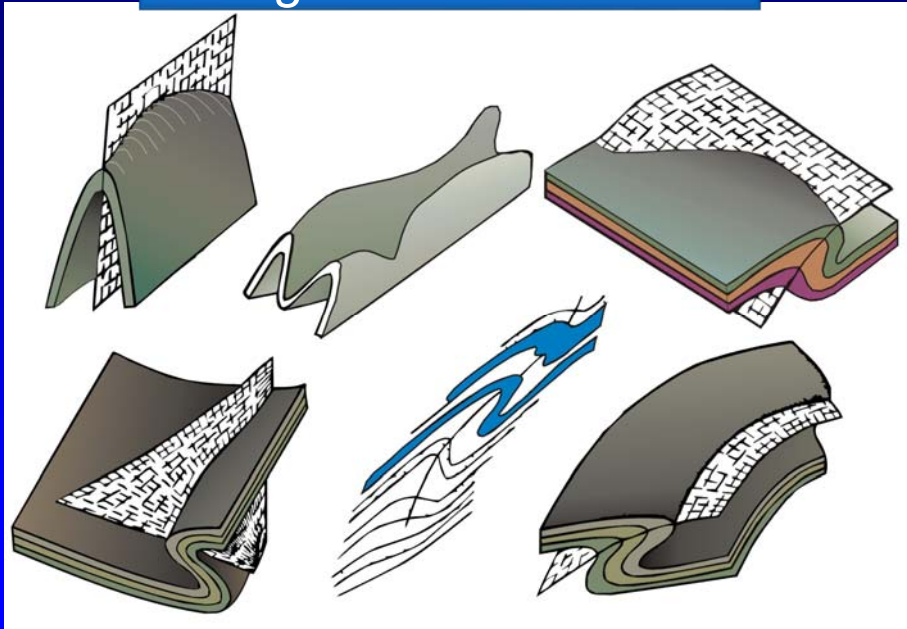




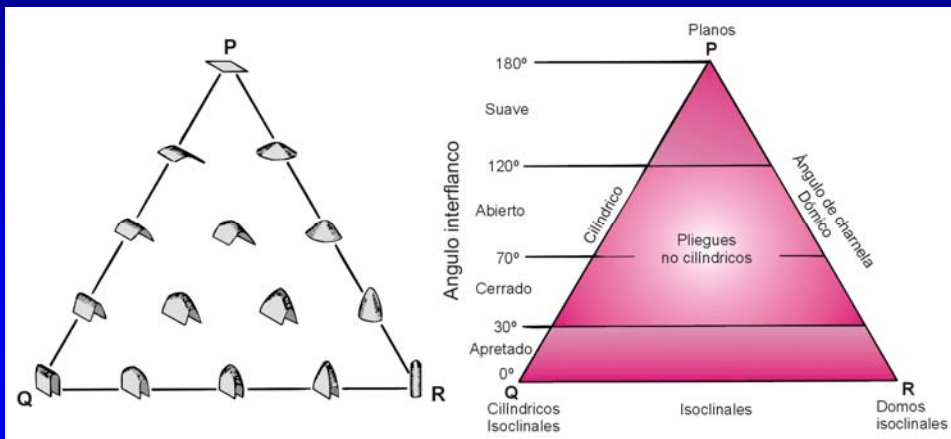
## Clasificación por orientación geométrica



## Pliegues no cilíndricos



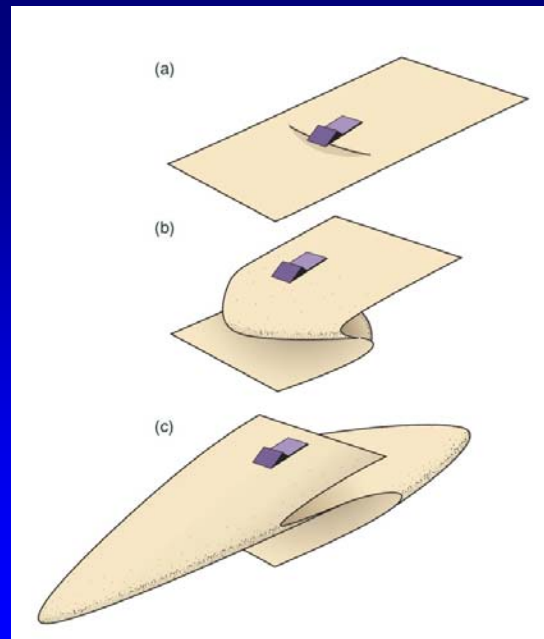
## Clasificación Cilíndrico-Dómico-isoclinal



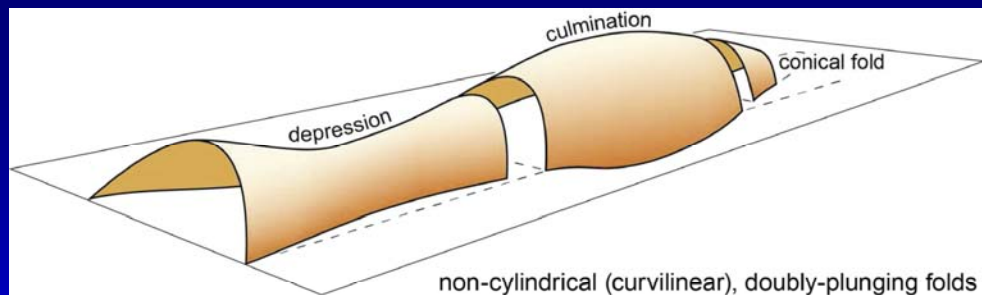


## Desarrollo progresivo de pliegue en vaina

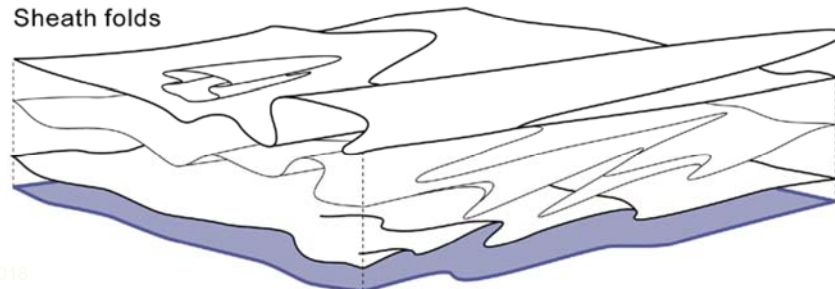
- Pliegues en vaina = pliegues altamente **no cilíndricos**, por **amplificación** de una irregularidad preexistente.
- Nótese que se necesitan **altas deformaciones** por cizalla para formar pliegues en vaina por cizalla simple.
- Incremento de deformación por cizalla de (a) a (c).



07/05/2018

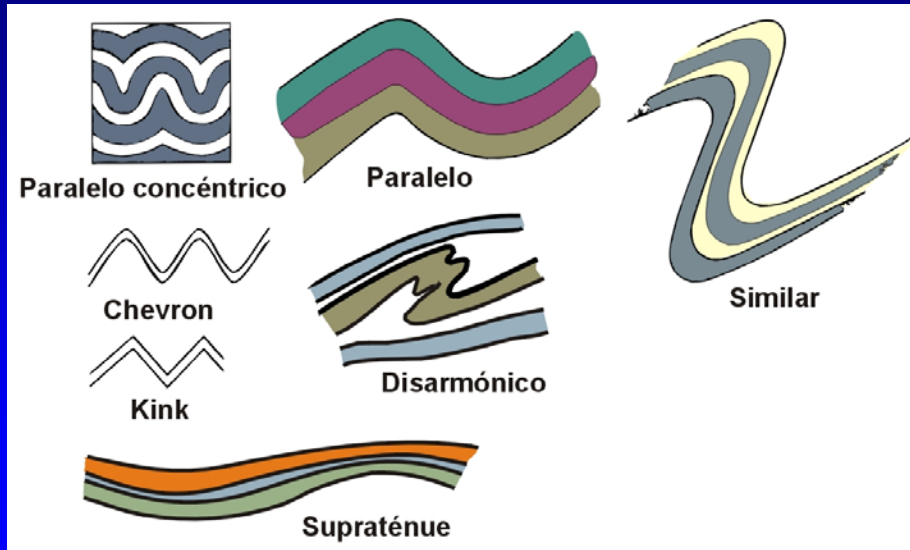


Sheath folds

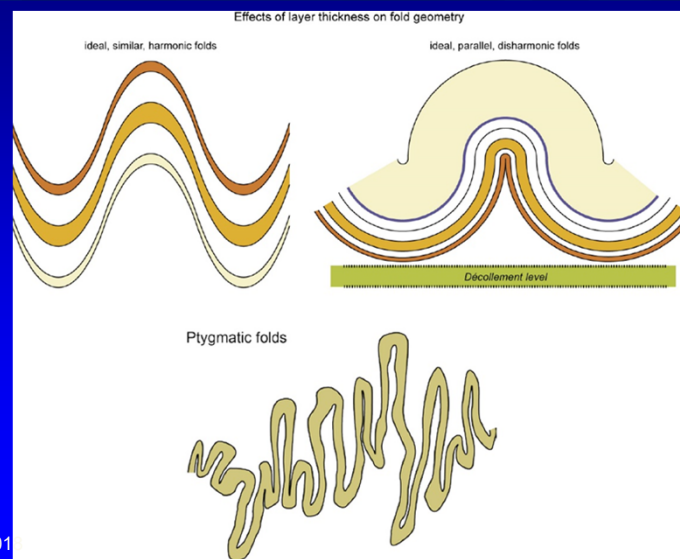


07/05/2018

## Paralelismo multicapa



## Efecto del espesor de los estratos en la geometría del pliegue



07/05/201

## Pliegues armónicos vs. disarmónicos



07/05/2018

## Armonía / desarmonía depende de la competencia relativa entre capas

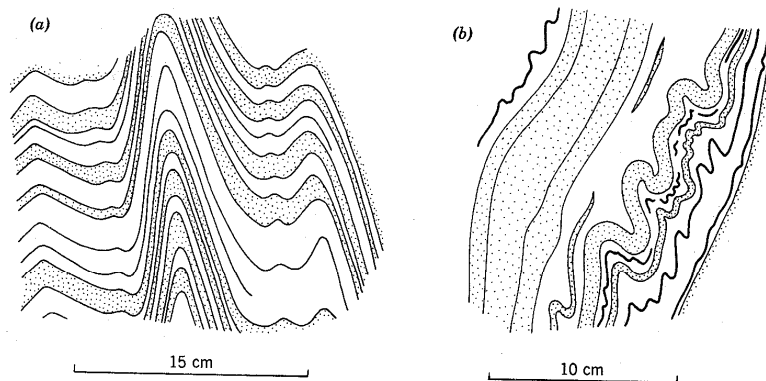
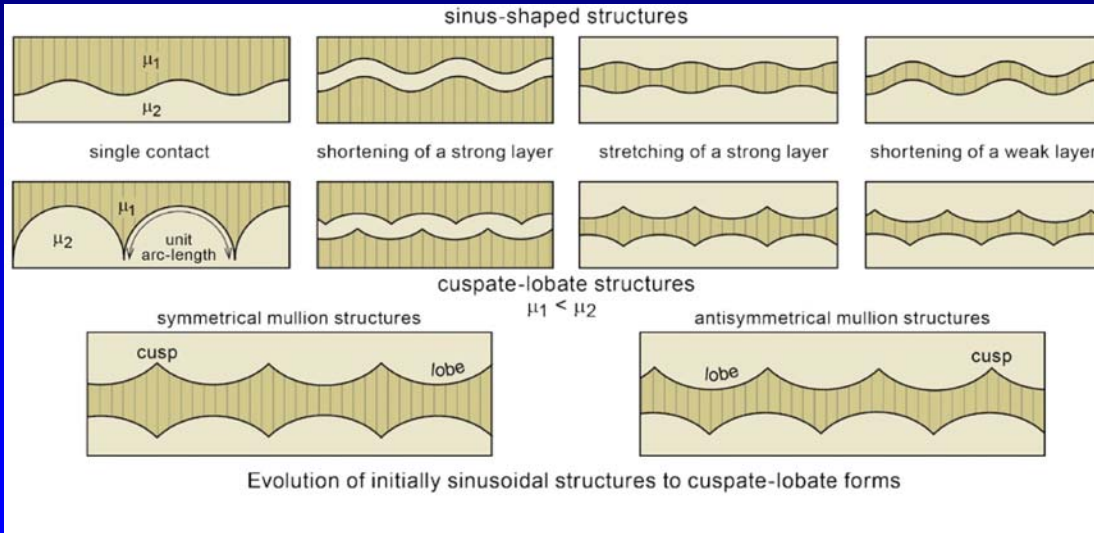


FIG. 4.20

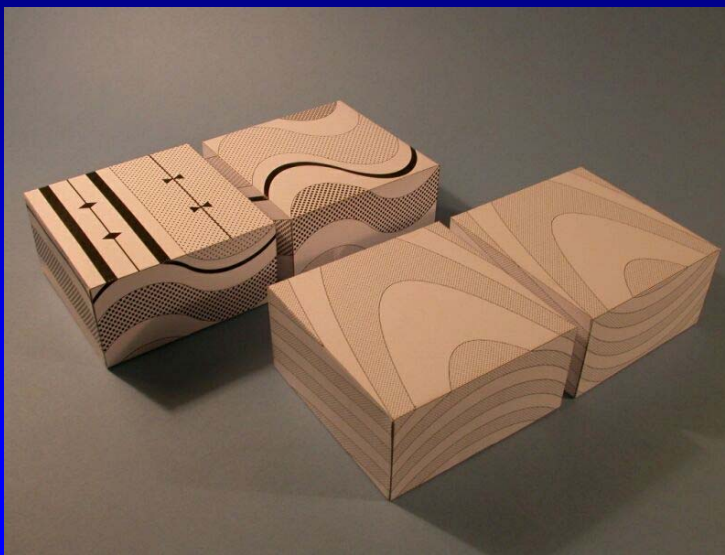
(a) Pliegues armónicos en cuarcita micácea, Plattjen, Alpes Suizos. Esquema dibujado a partir de una fotografía tomada por C. J. L. Wilson. (b) Pliegues disharmónicos en una «mena de plomo», Monte Isa, Australia. Las capas de pizarra están representadas por líneas negras gruesas y las capas restantes, punteadas, están constituidas principalmente de galena.

# Pliegues cuspados vs. lobados



07/05/2018

# Simbología usual para la cartografía de pliegues



07/05/2018



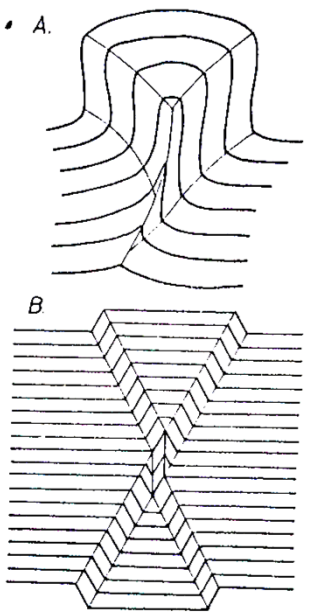
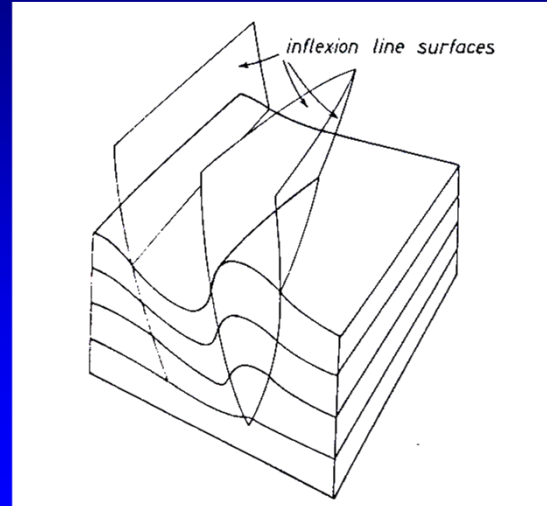


Figure 15.18. Conjugate folds of box fold type (A) and kink fold type (B).

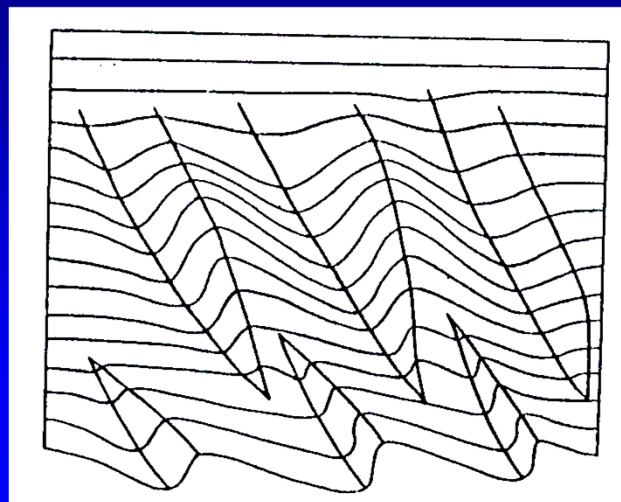
## Superficies de inflexión de un pliegue atenuado

- Superficies de inflexión definiendo dominios de un pliegue en 3D.
- Cuando dos superficies de inflexión se encuentran, el antifirme desaparece como una entidad geométrica.



## Patrones de superficies axiales

- Tipos de patrones de superficies axiales en pliegues multi-capa.



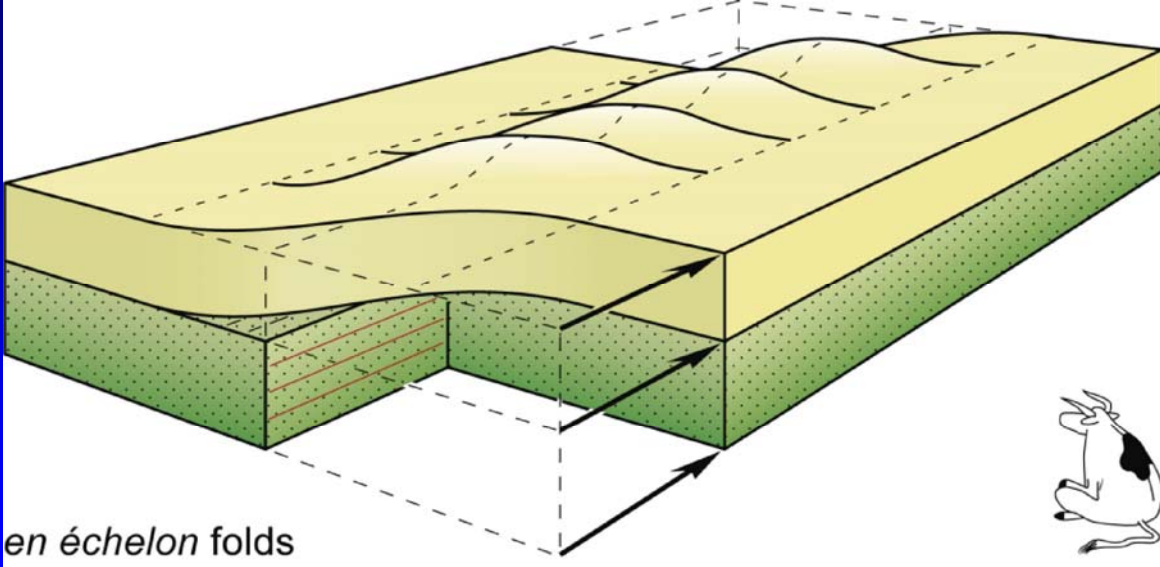
## Kink y chevron



07/05/2018

## Pliegues asociados a fallas

07/05/2018



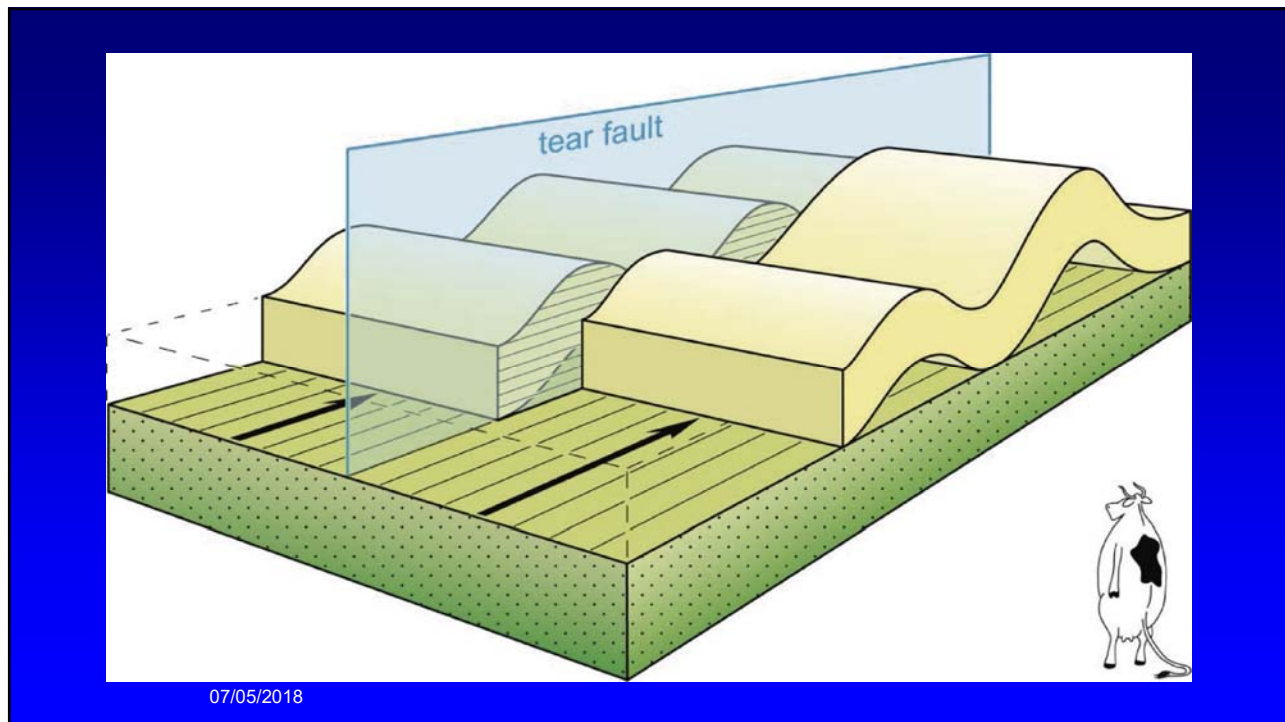
en échelon folds

07/05/2018



07/05/2018



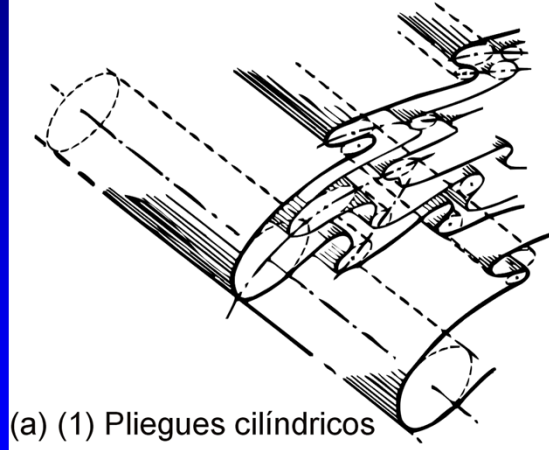


## Geometría interna de capa plegada

07/05/2018

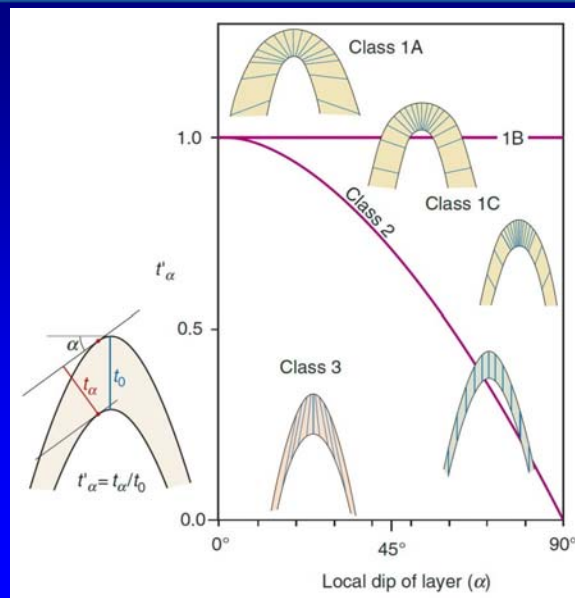
## Simetría de pliegues

- **Pliegues cilíndricos**
  - Diagrama Beta – diagrama Pi
  - Pliegues paralelos (clase 1B)
    - Concéntricos
    - Kinks
  - Pliegues Similares
- **Pliegues no cilíndricos**
  - Pliegues cónicos
  - Pliegues en vaina (*sheath-folds*)



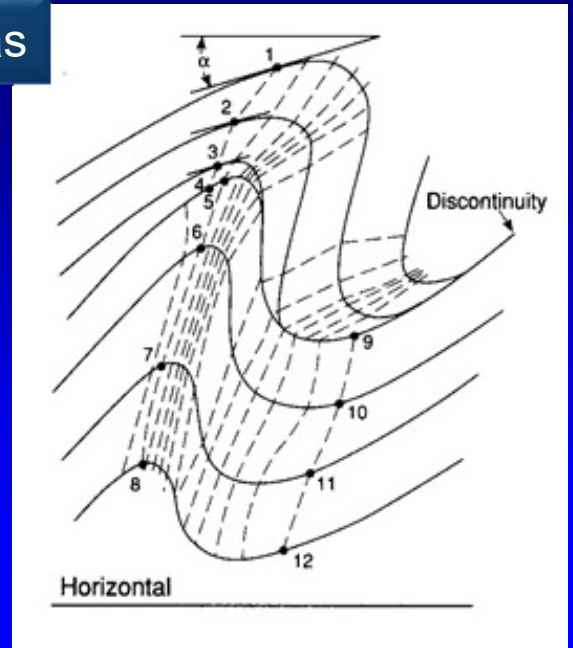
(a) (1) Pliegues cilíndricos

## Clasificación isogonal (Ramsay, 1967)



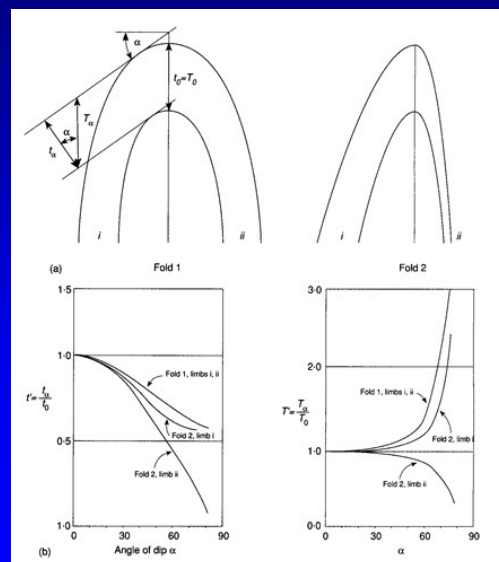
## Construcción de las isógonas

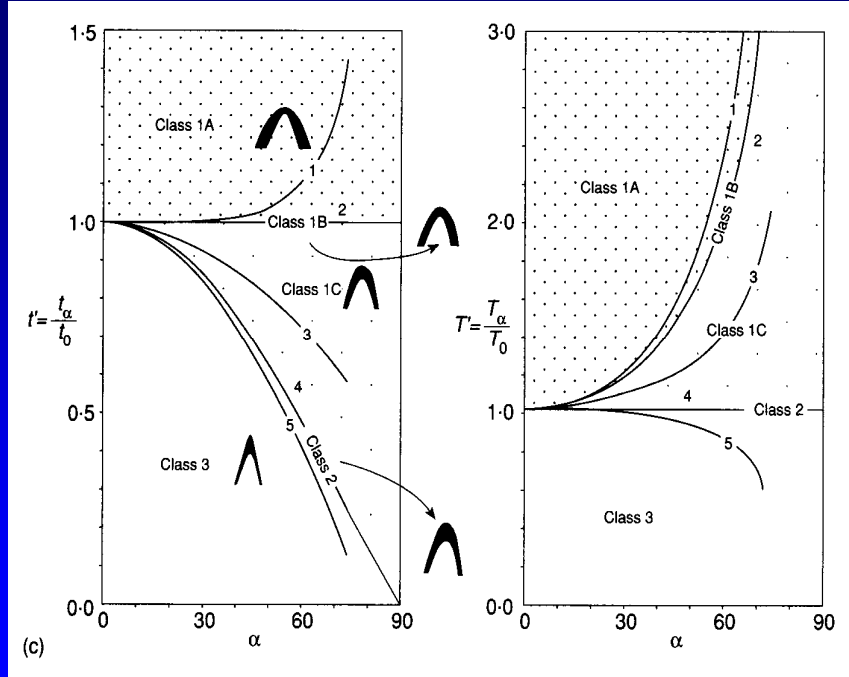
- Con escuadra de lado paralelo a una línea de referencia (horizontal) trazamos las tangentes a cada una de las capas.
- Unimos los puntos de igual ángulo de tangencia ( $\alpha$ ) en los dos bordes de la capa.
- Trazamos la isógona en ese punto para ese valor de  $\alpha$ .
- Repetimos la operación para otros ángulos (cada  $10^\circ$  p.ej.).



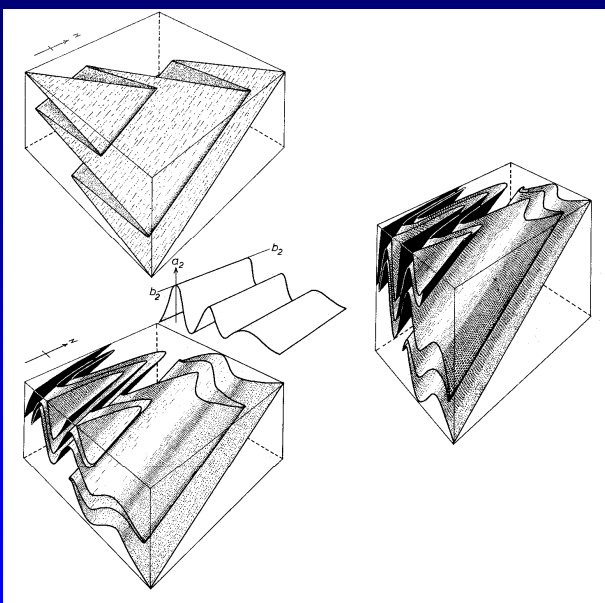
## Significado de la tangencia

- a) Pliegues 1 y 2, mostrando la derivación de  $t'_\alpha$  y  $T'_\alpha$ :
- $t'_\alpha$  es el espesor medido normal a la capa.
  - $T'_\alpha$  es el espesor medido paralelo a la superficie axial.
  - Ambos espesores son idénticos únicamente en la charnela.
  - $\alpha$  es el buzamiento de la capa en cada punto de tangencia.
- b) Ploteo de  $t'_\alpha$  y  $T'_\alpha$  para cada pliegue: muestra **5 curvas de comportamiento**, a partir de las cuales se definen **CLASES**.





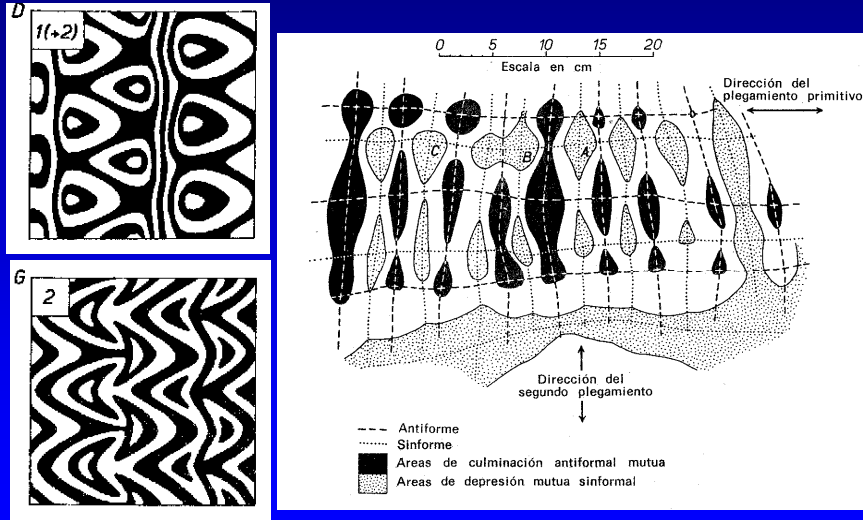
Modelo de interferencia tipo 3



Modelo de interferencia tipo 3. A, forma original de los pliegues primitivos; B, modelo de interferencia producido por la superposición de un flujo heterogéneo de cizalla simple sobre A; C, modificación de B por la aplicación de una deformación homogénea finita.



## Pliegues “superpuestos”



## Clasificación mecánica de pliegues

## Mecanismos de deformación

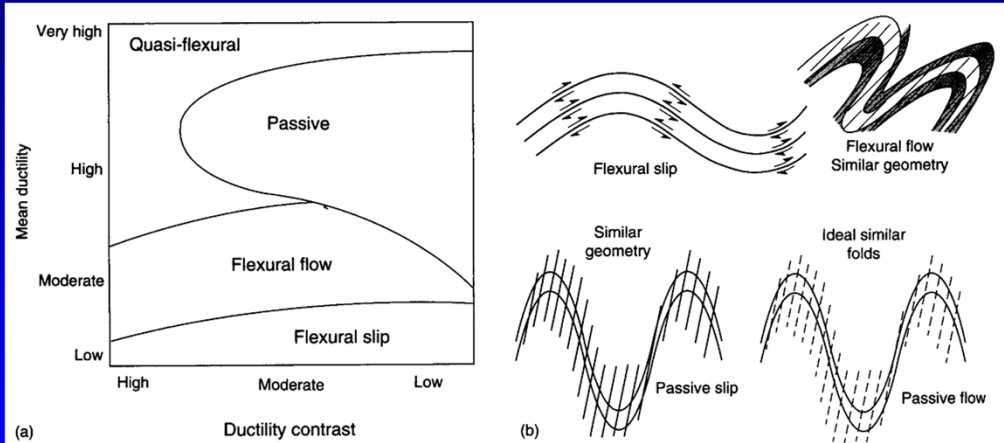


FIGURE 14-27

(a) Basis of Donath and Parker classification. (From F. A. Donath and R. B. Parker, 1964, Geological Society of America *Bulletin*.) (b) Types and mechanisms of Donath and Parker fold types. In flexural-slip folds, layer thicknesses remain constant, and folding is accomplished by slip along layers. In flexural flow, strong layers change thickness little or not at all, weak layers undergo appreciable thickness changes, and cleavage is strong in weak layers, but poorly developed in strong layers. Passive slip folds are ideally developed by movement parallel to a strong cleavage, a mechanism that may not exist in nature. Passive-flow folds develop by ductile flow with limbs thinned (or relatively thickened) equally in all rock types.

## Deslizamiento flexural y flexión

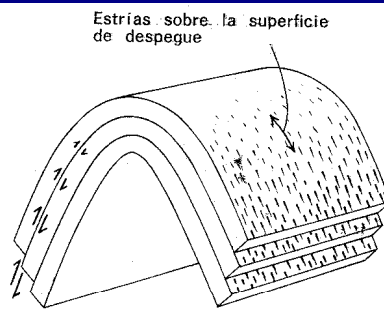


Figura 7-55

Desarrollo de fallas inversas en un pliegue del tipo «flexural slip».

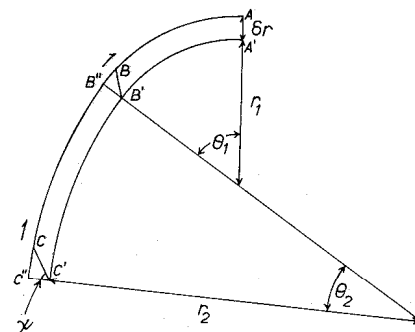
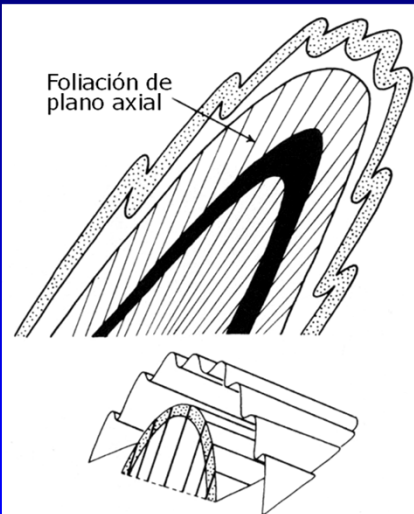


Figura 7-56

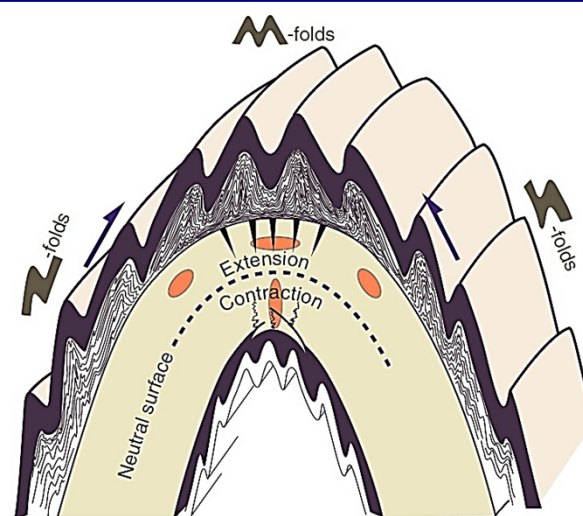
Cizalla total producida en una capa de espesor  $\delta r$  situada en un pliegue flexural constituido por dos arcos circulares (radios internos  $r_1$  y  $r_2$ ).  $CC'$  representa el deslizamiento total para un ángulo de buzamiento  $\theta_1 + \theta_2$  y  $\psi$  representa la deformación angular por cizalla total.

## Clivaje de plano axial

- **Superficie inicial** separando diferentes tipos de rocas es posiblemente la **estratificación ( $S_0$ )**.
- Superficie asociada con el pliegue (*i.e.* 'de plano axial): **FOLIACION o CLIVAJE ( $S_1$ )**.

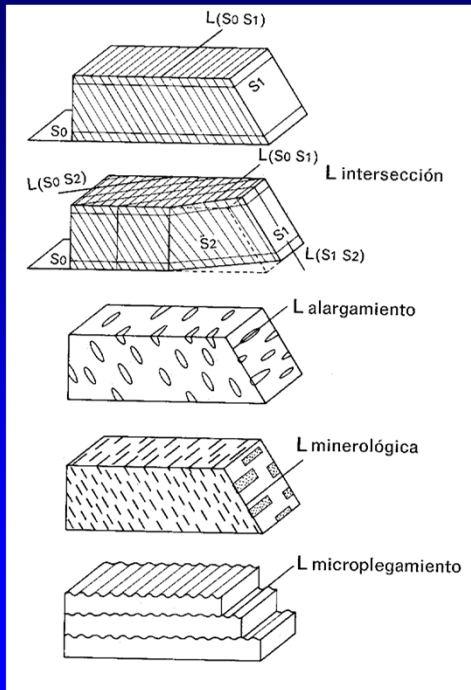


**Fig. 7.3** The arrangement of small-scale folding and axial plane foliation (such as cleavage) in a larger-scale fold.



**Figure 11.12** Z-, M- and S-folds may be related to lower-order folds, in which case they provide information about the geometry of the large-scale fold.

Foliación y lineación (elementos de trama)



Modelo de cinturón plegado esquistoso

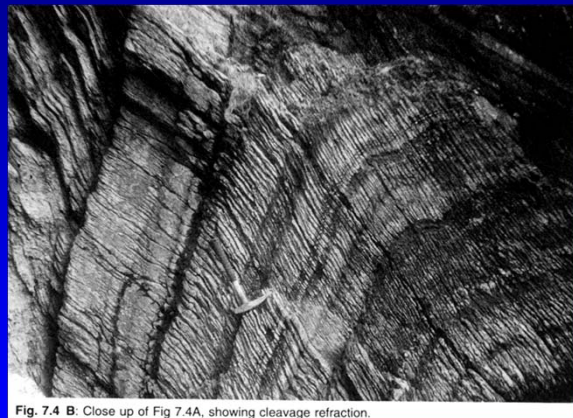
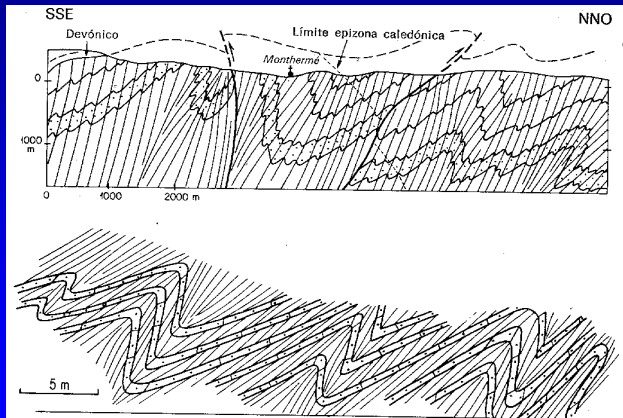


Fig. 7.4 B. Close up of Fig 7.4A, showing cleavage refraction.



## Sucesión de calcopelitas y calizas marmóreas



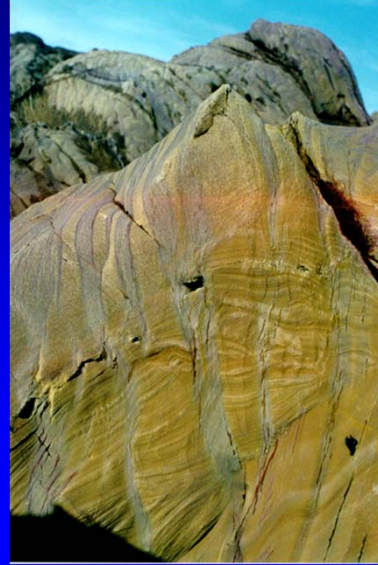
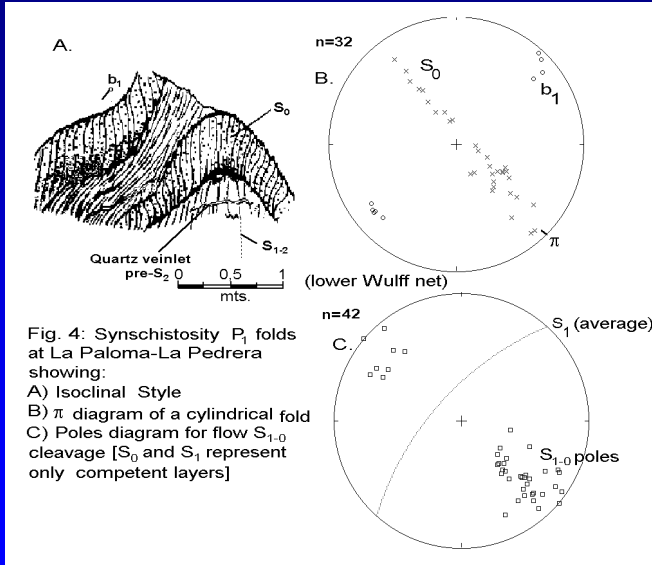
07/05/2018

## Metapelitas con exfoliación pizarreña

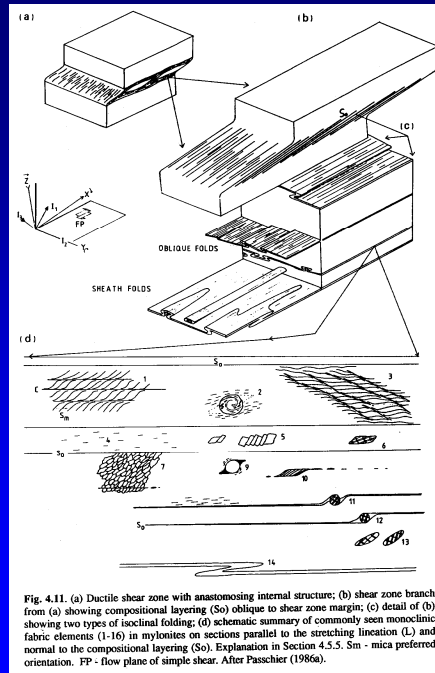
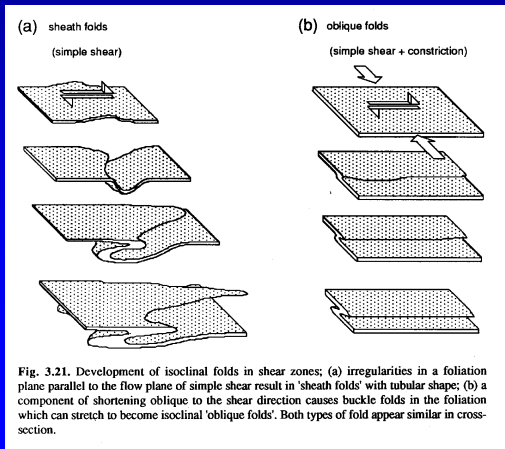


07/05/2018

# Cinturón esquistoso: Rocha



# Pliegues en zonas de alta deformación dúctil



## Pliegue pasivo: Deslizamiento por cizalla simple



- Montevideo (Paleoproterozoico)

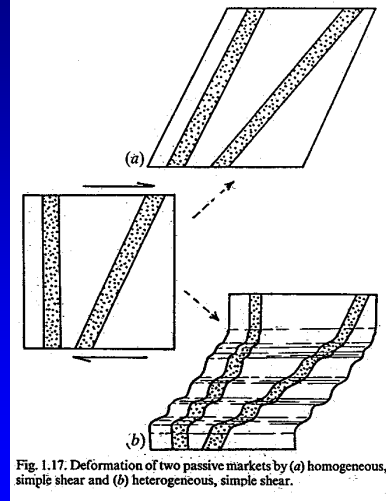


Fig. 1.17. Deformation of two passive markers by (a) homogeneous, simple shear and (b) heterogeneous, simple shear.

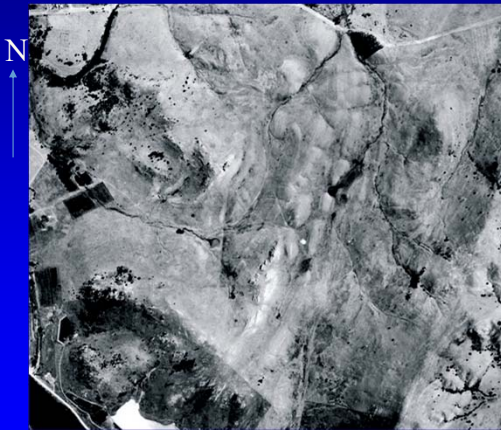
Análisis estructural  
de fajas plegadas



## Etapas del análisis estructural

- Fotointerpretación satélite
- Fotointerpretación de semi-detalle
- Reconocimiento geomorfológico
- Antecedentes
- Descripción de afloramientos
- Análisis geométrico

### Fotointerpretación de semi-detalle



Minas (Neoproterozoico)





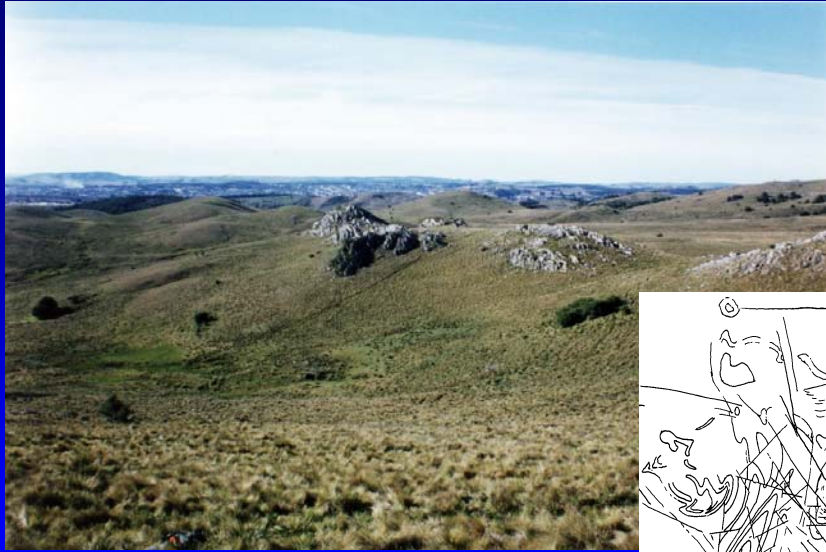
## Reconocimiento geomorfológico



## Pliegue apretado en interferencia lazo: Cerro La Plata (Minas)

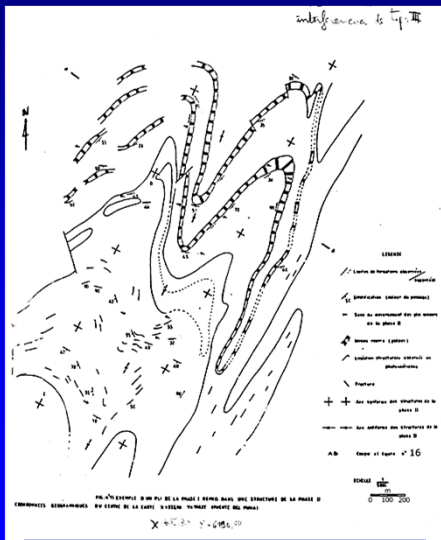


07/05/2018

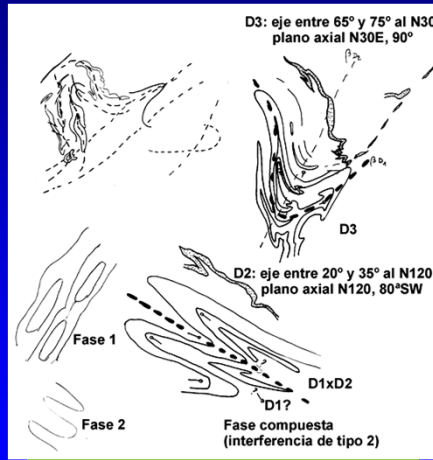


- Cerrillada = Núcleo esquistoso de pliegue apretado

## Antecedentes locales



Fuente del Puma (Uruguay)



Zanja del Tigre (Uruguay)





## Pliegues superpuestos: Cerro La Plata



- Calizas y calcopelitas con alternancia de bandas composicionales.
- Pliegues en estructuras de interferencia.
- Interferencia: ¿Eventos de deformación superpuestos?

# Análisis geométrico estadístico

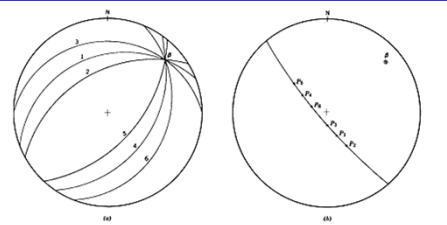
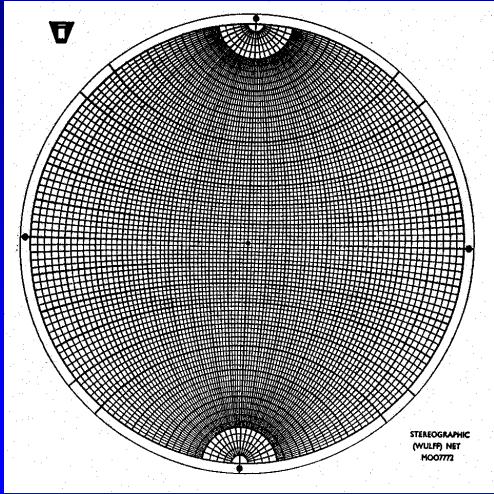


Figura 13.6 Proyecciones estereográficas de orientación en un plegue cilíndrico: (a) diagrama de polos, (b) diagrama de polos.

superficie de charada plana, que también es paralela al plano axial. Como el eje del plegue es paralelo al plano axial, el eje es realmente un basamento aparente de cara plana. Por lo tanto, el círculo máximo que pasa por la intersección beta y cuya dirección es la de la superficie de charada da el basamento del plano axial.

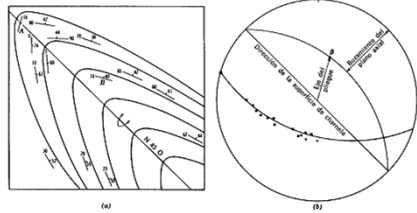


Figura 13.2 Orientación del eje y del plano axial deducida del mapa. (a) Mapa de un plegue torcido con isoclinal. (b) Estereograma del eje y del plano axial.

## Desarrollo de diagramas de polos durante plegamiento cilíndrico

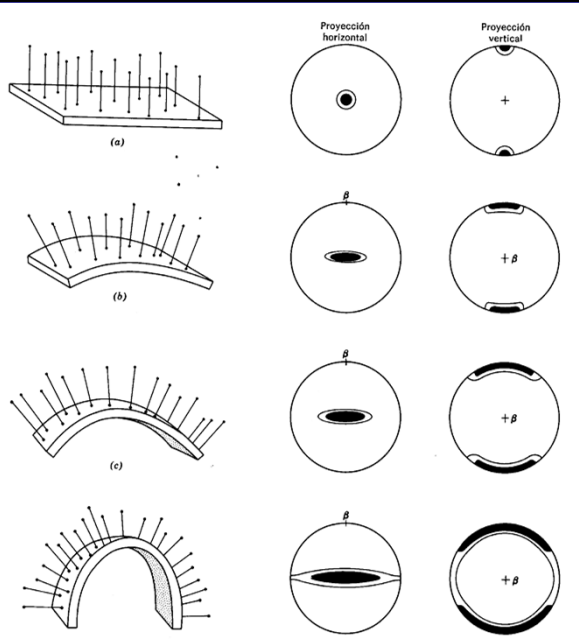
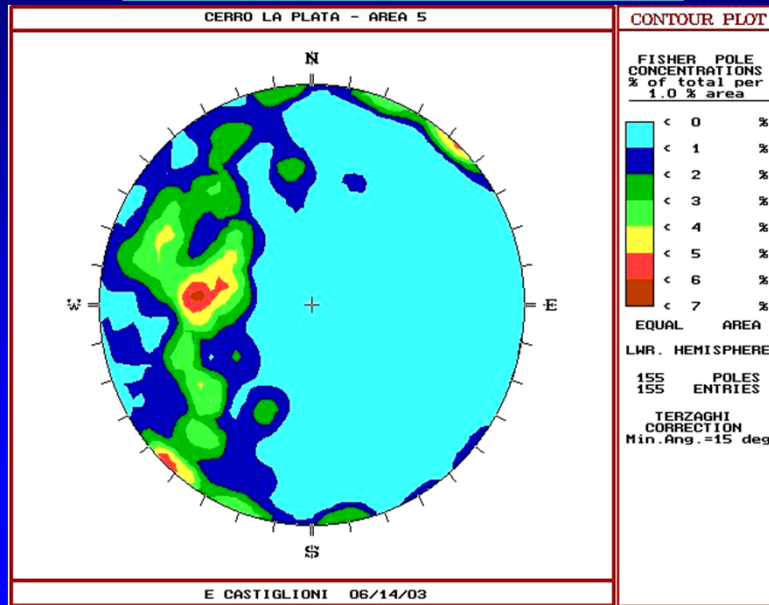


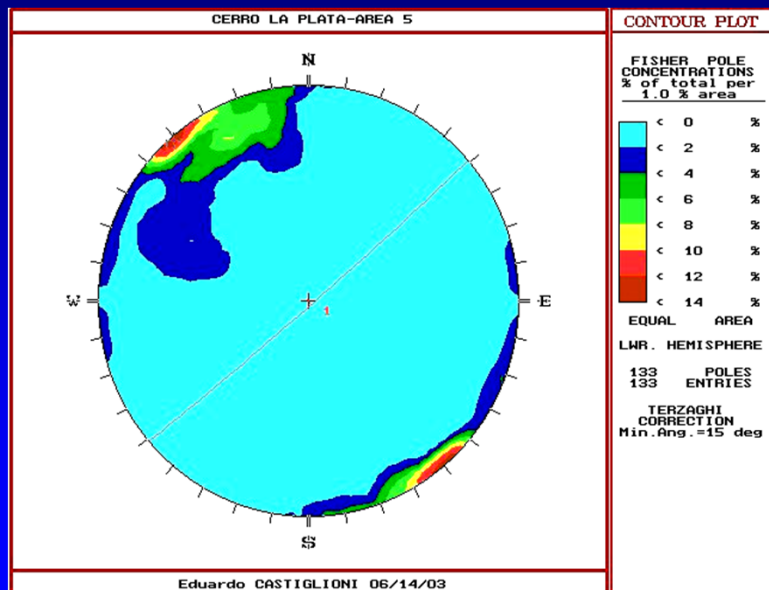
Figura 13.7 Desarrollo del diagrama de polos durante el plegamiento. Obsérvese que resulta el mismo diagrama de polos para antiformal que para sinformas: (a) capa horizontal estadísticamente plana, (b) capa curvada 45°, (c) capa curvada 90°, (d) capa curvada 180°.



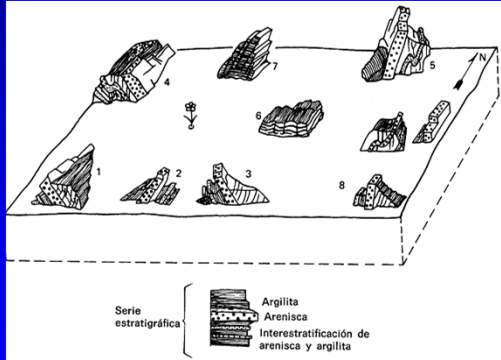
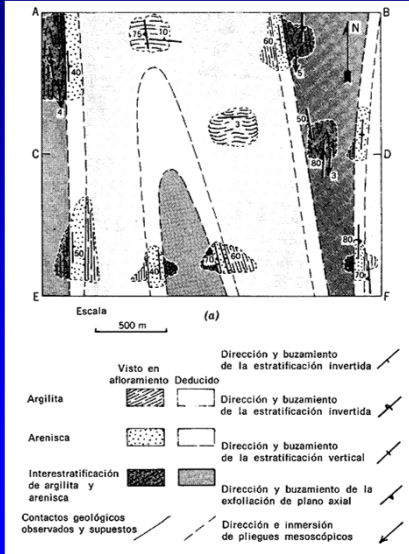
## Superficies $S_0 + S_1$



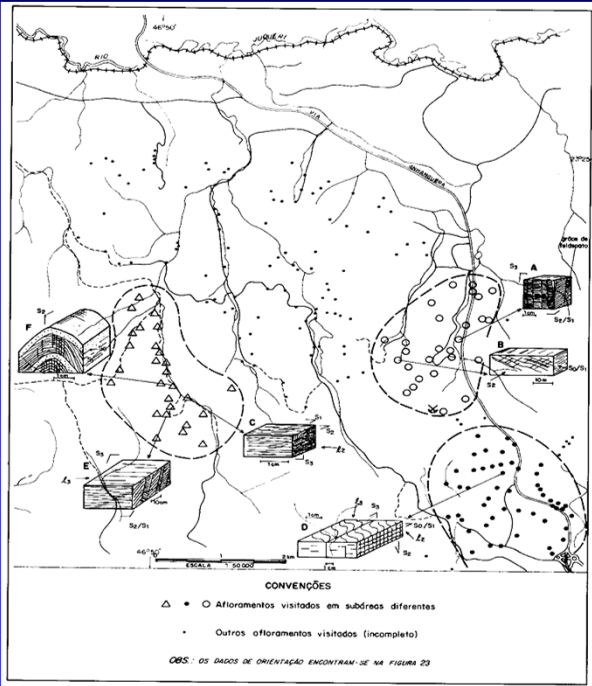
## Superficie $S_2$



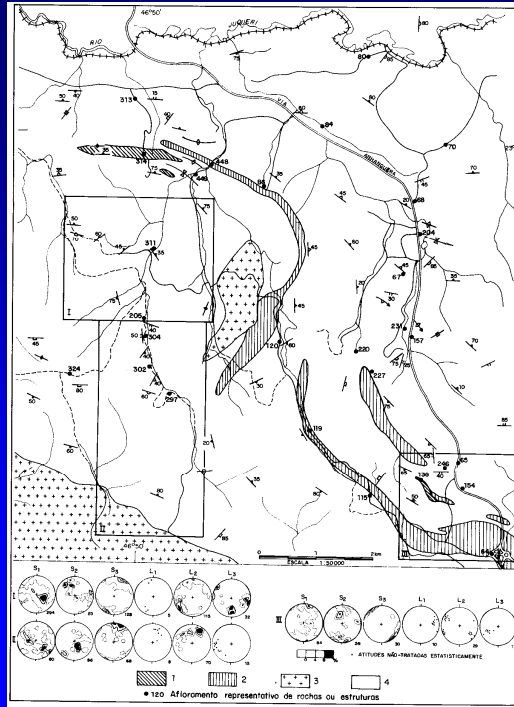
# Reconstrucción geométrica



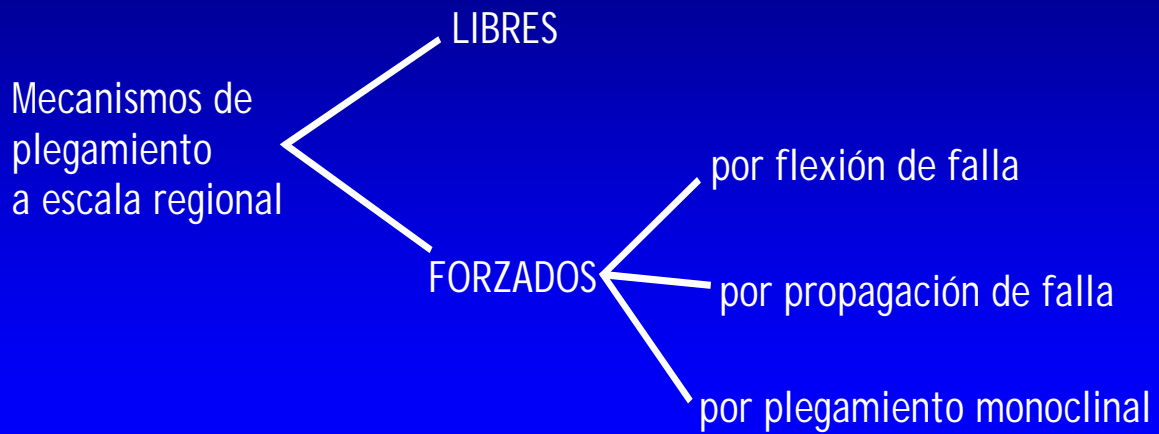
# Presentación mapa estructural



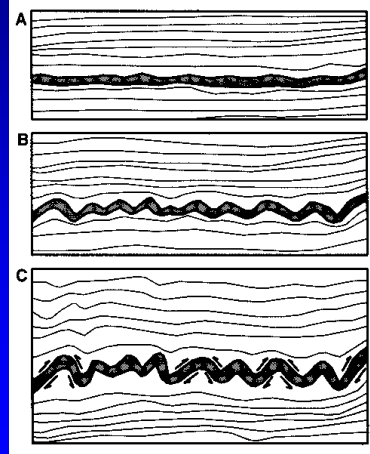
## Simbología



## Mecanismos de plegamiento a escala regional



## Pliegues libres



## Pliegues asociados a fallas

### 2 tipos

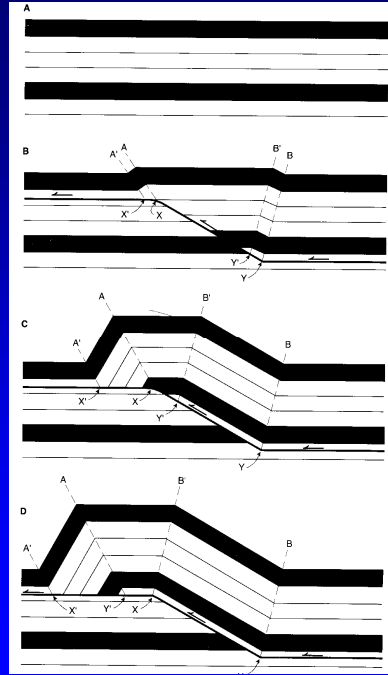
- Pliegue por “flexión” de falla.
- Pliegues de propagación de falla.



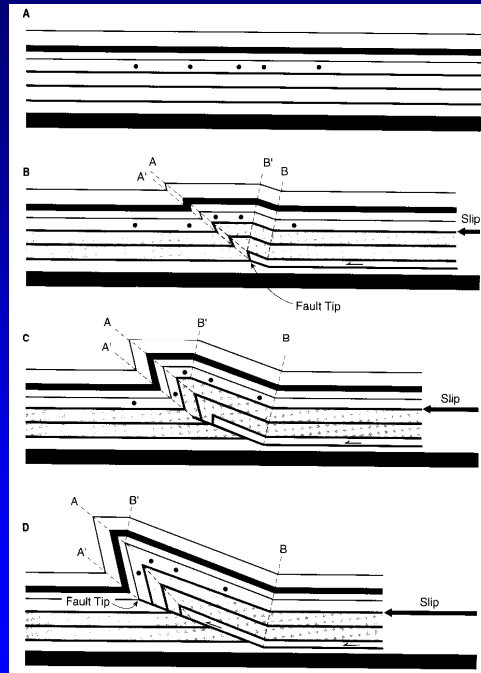


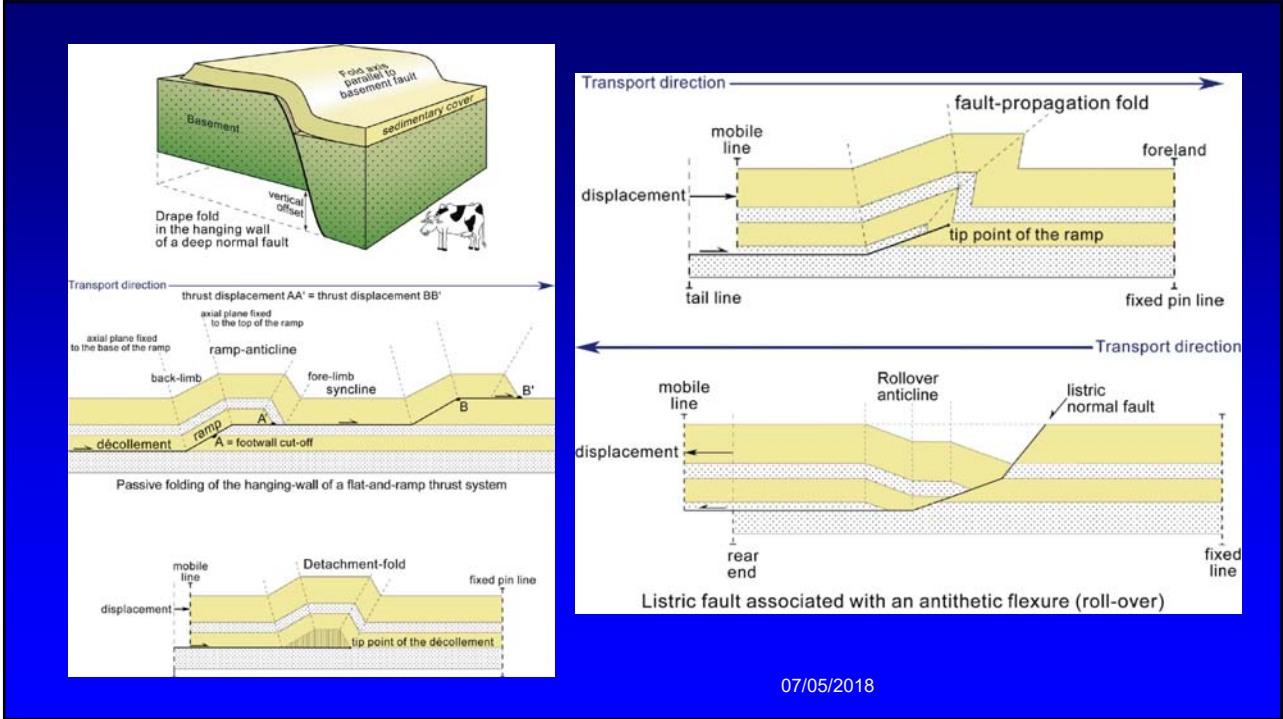
## Pliegues por flexión de falla

cf. Suppe 1985

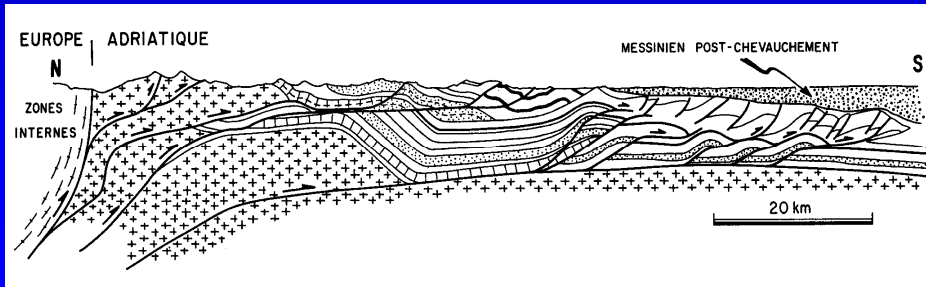
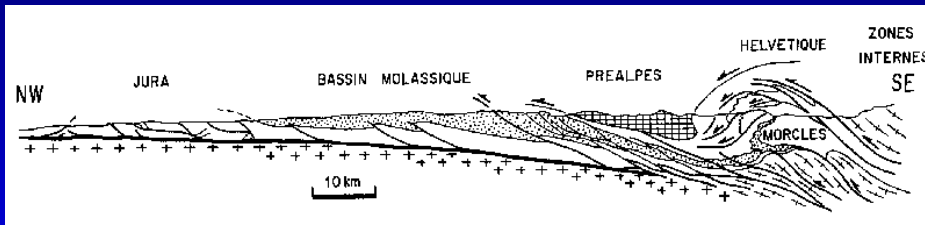


## Pliegue por propagación de falla

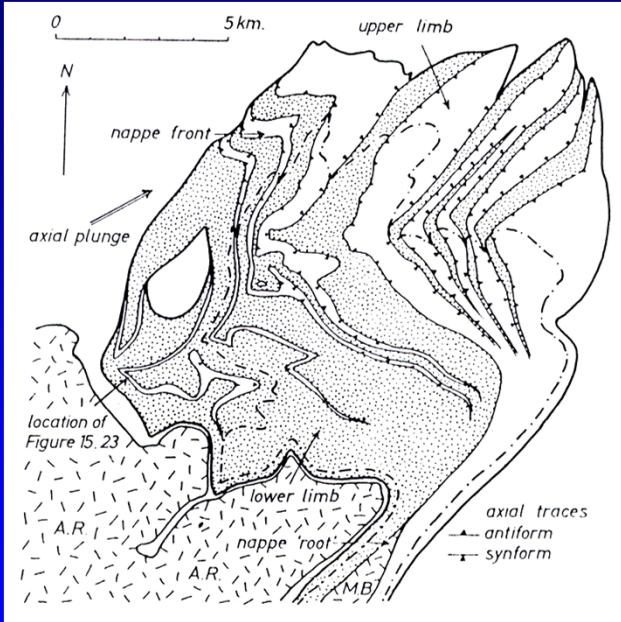




# Ejemplo 1: Alpes



# Mapa de la "Nappe de Morcles"



# Nappe de Morcles – Alpes Helvéticas



## Pliegues asociados con extrusión (Alpes)

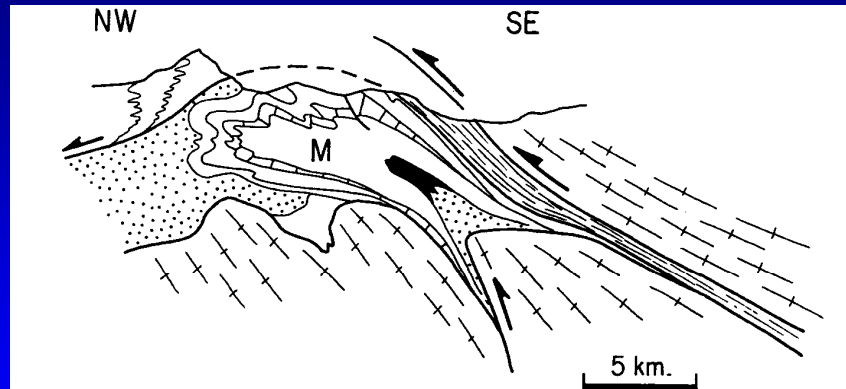


Fig. 52 - La nappe de Morcles (M) résulte de l'extrusion-étalement de matériel sédimentaire pendant le raccourcissement du socle sous-jacent (croix) (d'après Jeanbourquin et Goy-Eggenberger 1991, modifié).

## Ejemplo 2: Jura

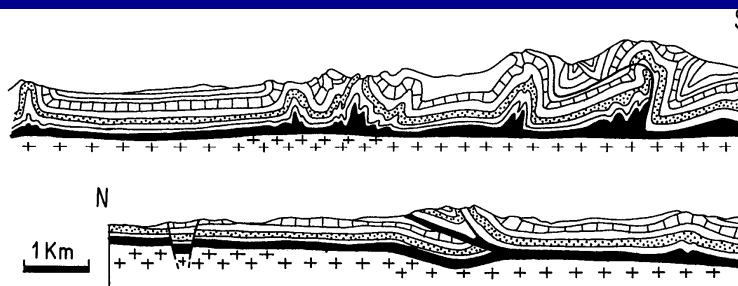


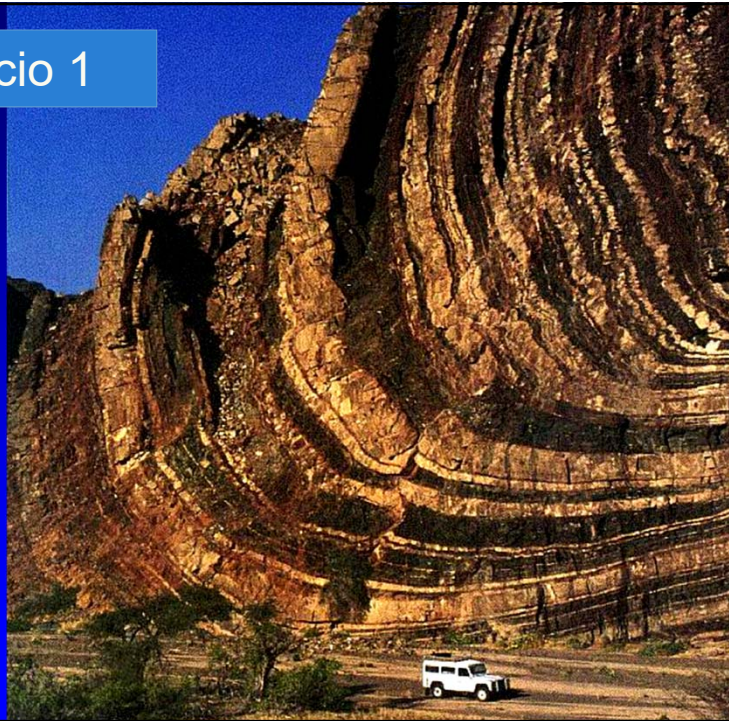
Fig. 68 - Coupe du Jura montrant le décollement des séries sédimentaires sur le socle non-déformé (croix) grâce au Trias salifère ductile (noir). Style des plis et des chevauchements (d'après Buxtorf 1916, modifié).

- Capa basal evaporítica de cohesión muy débil.



## Ejercicio 1

1. ¿Cómo clasificamos este pliegue según la orientación de su línea de charnela y superficie axial?
2. ¿Se observan estructuras menores?
3. ¿Cuál es su vergencia?



## Ejercicio 2



- ¿Es un pliegue pasivo o activo?
- ¿Qué estructura de interferencia de pliegue representa?

### Ejercicio 3

- ¿Por qué fue necesario revisar el diseño del primer perfil (a) y corregirlo en (b)?

