



CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE RAMPAS LATERALES A PARTIR DE  
MODELOS ANÁLOGOS (CAJA DE ARENA)

MIGUEL ANGEL ORJUELA PEÑALOZA

Trabajo de investigación para optar por el título de Geólogo.

Director

Giovanny Jiménez Díaz

Geólogo PhD.

Codirector

Dilan Arturo Martínez Sánchez

Geólogo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA

2018



## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	16
1 Planteamiento del problema.....	17
2 Objetivos.....	19
2.1 Objetivo general .....	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
3 Justificación. ....	19
4 Antecedentes.....	20
4.1 Rampas laterales.....	20
4.2 Modelos análogos.....	20
5 Marco teórico.....	22
5.1 Geología estructural .....	22
5.1.1 Esfuerzo .....	22
5.1.2 Deformación .....	23
5.1.3 Reología .....	26
5.1.4 Deformación frágil.....	27
5.1.5 Estilos estructurales .....	28
5.2 Ambiente compresivo .....	29
5.2.1 Cinturón de cabalgamiento .....	29
5.2.2 Zonas transversales .....	32
5.2.3 Rampa lateral .....	34
5.2.4 Otras estructuras compresivas.....	37
5.3 Modelamiento análogo.....	40
5.3.1 Limitaciones.....	40



5.3.2	Teoría de escalado.....	41
5.3.3	Materiales.....	43
5.3.4	Deformación frágil.....	45
6	Metodología.....	48
6.1	Fase 1: Revisión bibliográfica.....	49
6.2	Fase 2: Laboratorio.....	49
6.2.1	Selección del material granular.....	50
6.2.2	Montaje experimental.....	53
6.2.3	Ejecución del modelo.....	57
6.3	Fase 3: Análisis de resultados.....	58
7	Resultados.....	59
7.1	Rampa Lateral: 30°.....	62
7.1.1	Deformación progresiva en planta.....	62
7.1.2	Estado final.....	65
7.2	Rampa Lateral: 45°.....	69
7.2.1	Deformación progresiva en planta.....	70
7.2.2	Estado final.....	71
7.3	Rampa Lateral: 60°.....	73
7.3.1	Deformación progresiva en planta.....	73
7.3.2	Estado final.....	74
8	Análisis de los resultados.....	76
8.1	Síntesis estructural del modelo de rampa lateral.....	76
8.1.1	Deformación final en planta.....	77
8.1.2	Cortes transversales.....	78
8.1.3	Cortes longitudinales.....	79



8.2	Comparación entre los modelos (30°, 45° y 60°).....	80
9	Discusión.....	82
10	Conclusiones.....	89
11	Recomendaciones.....	90
	Referencias bibliográficas.....	91



## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Configuración de una rampa lateral paralela a la dirección de transporte tectónico conectando dos rampas frontales. RFD: Rampa Frontal Delantera, RFT: Rampa Frontal Trasera RL: Rampa Lateral. Adaptado de Fossen (2010).....	18
<i>Figura 2.</i> Primer montaje experimental realizado por Hall, 1815 para modelar plegamientos. Adaptado de Hall (1815).....	21
<i>Figura 3.</i> Vector de esfuerzo conformado por el esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) y el esfuerzo de cizalla ( $\tau$ ). Adaptado de Burg (2017).....	23
<i>Figura 4.</i> Componentes básicos de la deformación, traslación y rotación aplica para cuerpos rígidos, mientras distorsión y dilatación para cuerpos no rígidos. Distorsión, que implica cambio en el tamaño y/o forma se divide en cizalla simple y pura. Adaptado de Fossen (2010) y Davis (2012).....	24
<i>Figura 5.</i> Tipos de deformación interna. La deformación discontinua es propia de estructuras frágiles, mientras la deformación continua, tanto heterogénea como homogénea, de estructuras dúctiles. Adaptado de Rosello (2001).....	25
<i>Figura 6.</i> Grafica tiempo Vs deformación para comportamiento elástico (a), viscoso (b) y plástico (c). Adaptado de Fossen (2010).....	27
<i>Figura 7.</i> Clasificación de estilos estructurales. Escama gruesa escama delgada. Adaptado de Burg (2017).....	28
<i>Figura 8.</i> Conjunto de esfuerzos para una falla inversa, ambiente compresivo. Adaptado de Burg (2017).....	29
<i>Figura 9.</i> Estructura de un cabalgamiento con geometría en escalera compuesta de rampas y flats. Adaptado de Butler (1982).....	30



Figura 10. Clasificación de las rampas según la orientación respecto a la dirección de transporte del cabalgamiento. Adaptado de McClay (1992). ..... 31

Figura 11. Zonas Transversales definida por terminaciones de estructuras (fallas y pliegues), cabeceo (plunge) de pliegues y cambio en el estilo estructural. Adaptado de Jiménez et al. (2012). ..... 33

Figura 12. Bloque diagrama de una rampa lateral, conectando dos rampas frontales, mostrando el cabeceo de sus pliegues asociados. Adaptado de Bayona (2003)..... 35

Figura 13. Falla de desgarre o transferencia. Adaptado de McClay (1992) ..... 36

Figura 14. Evolución de pliegue por flexura de falla. Adaptado de Fossen (2010). ..... 38

Figura 15. Estructura pop-up. Adaptada de McClay (1992)..... 39

Figura 16. Zona triangular. Adaptada de McClay (1992)..... 39

*Figura 17.* Grafica esfuerzo Vs Profundidad que describe el comportamiento mecánico de la roca en la corteza superior e inferior. Adaptado de Fossen (2010). ..... 44

Figura 18. Graficas de esfuerzo Vs deformación. a) Para las rocas naturales de la corteza superior. b) Para materiales granulares. Se ve claramente su similitud en el comportamiento de los dos. Adaptado de Graveleau et al., (2012). ..... 48

Figura 19. Fotografía arenisca cuarzosa de grano fino a medio de la Fm Los Santos tomada con 0.8X de aumento, en lupa Nikon NI-150 high intensity illuminator. A. Se puede ver la buena selección de la arenisca cuarzosa seleccionada B. En verde se destaca la forma de las partículas esféricas subredondeadas a esféricas redondeadas. .... 51

Figura 20. a) Método del embudo usado para medir ángulo de reposos del material. Adaptado de Solaque y Lizcano (2008). b) Angulo de reposo de la arenisca cuarzosa a trabajar..... 53



Figura 21. Esquema ilustrativo de la mesa de modelado caja de arena utilizada para el desarrollo de los modelos análogos. Adaptado de Anaya (2016). ..... 55

Figura 22. Esquema de los dominios de la mesa de modelado. Adaptada de Malevielle (1984). 56

Figura 23. a) Técnica utilizada para la depositación uniforme de los niveles de material granular. b) Uso del nivelador para horizontalizar las capas. .... 57

Figura 24. a) Uso del atomizador para humedecer y solidificar el modelo final. b) Cortes transversales y longitudinales realizados al modelo final. .... 58

Figura 25. a) Montaje de la cámara Canon EOS REBEL T5 ISO-3200 para registrar la deformación en planta. b) Montaje para registrar cortes verticales (transversales y longitudinales). .... 59

Figura 26. Configuración inicial de los modelos realizados. Rectángulo negro en planta indica la región analizada en cada uno de los modelos. (RFD: Rampa frontal delantera, RFT: Rampa frontal trasera)..... 60

Figura 27. Fotografías y mapeo estructural del modelo, rampa lateral 30°, en planta en diferentes momentos de la evolución deformativa. a) Estado inicial del modelo. b) c) d) y e) Configuración estructural durante diferentes momentos (5, 10, 15 y 20 cm de acortamiento) de la deformación compresiva. F) Estado final del modelo (25 cm acortamiento, 33% de la longitud inicial). Experimento RL\_30\_05..... 64

Figura 28. Cortes transversales del estado final del modelo rampa lateral 30°. a) C14, C16. Cortes trasnversales en la rampa frontal delantera. b) Imagen en planta del estado final del modelo RL\_30\_05. Los trazos negros son los cortes realizados. El trazo blanco de la imagen en planta corresponde a la ubicación de las rampas. c) C8 – C12. Cortes transversales en la zona de la rampa lateral. d) C4, C6. Cortes trasnversales en la rampa frontal trasera. Experimento RL\_30\_05. En los cortes se destacan con trazos de color rojo los cabalgamientos y retrocabalgamientos. .... 66



Figura 29. Bloque diagrama en tres dimensiones, representando las estructuras descritas en los cortes transversales. En café el bloque rígido, rojo oscuro los cabalgamientos y en rojo los retrocabalgamientos. .... 67

Figura 30. Cortes longitudinales al estado final del modelo rampa lateral 30°. a) Imagen en planta del estado final del modelo RL\_30\_04. L los trazos negros son los cortes realizados, en negrita los destacados en la imagen. El trazo blanco corresponde a la ubicación de las rampas. b) Cortes longitudinales realizados a la estructura. En rojo se trazaron unas fallas inversas descubiertas en esta vista. Experimento RL\_30\_04. C16 ..... 68

Figura 31. Bloque diagrama en tres dimensiones, representando la estructuras descritas en los cortes longitudinales. En café el bloque rígido y en rojo las fallas inversas de medio-alto angulo en sentido opuesto a la pendiente de la rampa lateral. .... 69

Figura 32. Fotografías y mapeo estructural del modelo en planta. a) Estado inicial. b) c) d) y e) Diferentes momentos de la deformación compresiva (6, 12, 18 y 24 cm de acortamiento). f) Estado final (30 cm acortamiento). Experimento RL\_45\_05. .... 71

Figura 33. Cortes transversales del estado final del modelo. a) C12, C14. Cortes trasnversales en la rampa frontal delantera. b) Imagen en planta del estado final del modelo. c) C6 – C10. Cortes transversales en la rampa lateral. d) C2, C3. Cortes trasnversales en la rampa frontal trasera. Experimento RL\_45\_05. .... 72

Figura 34. Cortes longitudinales del estado final. a) Imagen en planta del estado final del modelo RL\_30\_04 b) Cortes longitudinales realizados. Experimento RL\_45\_04. .... 73

Figura 35. Fotografías y mapeo estructural del modelo en planta. a) Estado inicial. b) c) d) y e) Diferentes momentos de la deformación compresiva (5, 10, 15 y 20 cm de acortamiento). F) Estado final (25 cm acortamiento). Experimento RL\_60\_03. .... 74



Figura 36. Cortes transversales del estado final del modelo. a) C14, C16. Cortes transversales en la rampa frontal delantera. b) Imagen en planta del estado final del modelo. c) C8 – C12. Cortes transversales en la zona de la rampa lateral. d) C4, C6. Cortes transversales en la rampa frontal trasera. Experimento RL\_60\_03. .... 75

Figura 37. Cortes longitudinales al estado final del modelo. a) Imagen en planta del estado final del modelo. b) Cortes longitudinales realizados a la estructura. Experimento RL\_60\_02. Falla normal. .... 76

Figura 38. Mapeo de los principales rasgos y estructuras en superficie del modelo. Experimento RL\_45\_05. .... 77

Figura 39. Cortes trasversales de la rampa frontal delantera (a) y rampa frontal trasera (b). Cortes C4 y C18 digital (Experimento RL\_30\_05). .... 78

Figura 40. Cortes trasversales en la zona de la rampa lateral, parte inferior (b) y parte media (a). Cortes C8 y C10 digital (Experimento RL\_30\_05). .... 79

Figura 41. Cortes longitudinales del modelo final, rampa frontal delantera (a) y rampa frontal trasera (b). En azul fallamiento normal. Cortes C9 y C17 digital (Experimento RL\_60\_03). .... 80

Figura 42. Propagación lateral de la rampa lateral en forma de cuña, en azul la distancia que abarca en cada modelo. a) Modelo RL\_30\_05. b) Modelo RL\_45\_05. c) Modelo RL\_60\_03. .... 81

Figura 43. a) C13 - Modelo rampa lateral 30°. b) C9 - Modelo rampa lateral 45°. c) C9 - Modelo rampa lateral 60°. En blanco se señala la base del anticlinal donde se acumula el material por los “derrumbes”. Trazos azules fallas normales. .... 82

Figura 44. a) Modelo MO31, rampa lateral (22°) b) Modelo MO28, falla de desgarre. En rojo se destaca la forma de la terminación de las rampas frontales. Adaptada de Dixon y Spratt (2004). .... 84



Figura 45. Vista en planta de modelo ideal de rampa lateral. Cortes longitudinales idealizados. Cortes C8 y C14, experimento RL\_45\_05. Adaptada de Thomas (1990). ..... 85

Figura 46. Ubicación y mapa de Foothills Alberta. Corte transversal a las estructuras, evidencia zona triangular. Adaptada de Dixon y Spratt (2004). ..... 86

Figura 47. Cortes longitudinales al modelo de rampa lateral 22°. Corte 21, involucra la rampa frontal delantera. Mo30-III. Adaptada de Dixon y Spratt (2004). ..... 87

Figura 48. Bloque diagrama de la zona trabajada por Araque y otero (2016). Sobresale la terminación de los sinclinales al llegar a la zona transversal regional, rampa lateral local. Adaptado de Araque y Otero (2016). ..... 88

Figura 49. Cambio en la dirección NNE-SSO del trazo de la Falla del Suárez (FS) por NE-SO, debido a la influencia de la Falla Los Santos (FLS), paralelo a la dirección de transporte. Adaptada de Araque y Otero (2016). ..... 88



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de la longitud inicial y final para calcular el estiramiento ( $s$ ) y la elongación ( $e$ ) de cada uno de los modelos .....	61
---	----



## RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE RAMPAS LATERALES A PARTIR DE MODELOS ANÁLOGOS (CAJA DE ARENA) \*

AUTOR: MIGUEL ANGEL ORJUELA PEÑALOZA \*\*

PALABRAS CLAVES: Cinturón de cabalgamiento, modelos análogos, rampa tectónica.

DESCRIPCIÓN: Los conectores laterales (rampas laterales, fallas trasversales y zonas de transferencia) enmarcados en zonas trasversales, son estructuras muy comunes en los cinturones de cabalgamiento, ya que son los encargados de transferir el desplazamiento y la deformación entre rampas frontales a lo largo del rumbo. Estas estructuras presentan varias características en superficie que permiten su identificación y su génesis está relacionada con anisotropías en el basamento (fallas), variaciones estratigráficas y disminución del desplazamiento a lo largo del rumbo. Muchas de las características superficiales pueden estar subyacidas por rampas laterales, las cuales están ubicadas paralelas a la dirección de transporte del cabalgamiento. En geología los modelos análogos son utilizados para representar los procesos geológicos a escala de laboratorio, con el propósito de un mejor entendimiento y con base en sus resultados determinar semejanzas y diferencias con prototipos naturales. Al utilizar los modelos análogos para representar rampas laterales se analizaron las estructuras generadas no solo en superficie, también a profundidad vistas desde las secciones transversales y longitudinales. Al final se obtuvieron como resultados más destacados la formación de dos anticlinales interrumpidos, con cabeceo y flexión (en direcciones opuestas) en la zona de la rampa lateral; la presencia de fallas inversas de medio-alto ángulo con vergencia opuesta al buzamiento de la rampa lateral, observadas en los cortes longitudinales, y el desarrollo de estructuras como zonas triangulares, *pop up* y fallas ciegas, observadas en los cortes transversales. Además de encontrar que la configuración estructural de las rampas laterales es la misma independientemente del ángulo de buzamiento que tenga la estructura (30°, 45° o 60°).

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Giovanni Jiménez Díaz. Codirector: Dilan Arturo Martínez Sánchez.



## ABSTRACT

**TITLE: STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF LATERAL RAMPS BASED ON  
ANALOGUE MODELS (SANDBOX) \***

**AUTHOR: MIGUEL ANGEL ORJUELA PEÑALOZA\*\***

**KEYWORDS:** Thrust belt, analogue models, tectonic ramp.

**DESCRIPTION:** Lateral connectors (lateral ramps, transversal faults and transfer zones) encompassed on transversal zones, are structures very common in thrusts belts, because it transfers the displacement and deformation between frontal ramps along the strike. These structures have some surface characteristics which allow their identification and their genesis are linked with anisotropies in the basement (faults), stratigraphic variations and reduction of displacement along the strike. Many of those surface characteristics can be underlie by lateral ramps, which are located parallel to strike tectonic transport. Analogue models in geology are used to represent geologic process in the laboratory scale, with the purpose of getting a better understanding and based on the results get to find similarities and differences with natural prototypes. Using analogue models to represent lateral ramps was analyzed the structures generated not only in the surface, also in depth, show in transverse and longitudinal sections. As a final result can be highlighted the generation of two interrupted anticlines with plunge and deviation (in opposite directions) in the lateral ramp zone; the presence of inverse faults with medium-high angle with opposite vergence to the dip of the lateral ramp, show in longitudinal sections, and the development of structures as triangle zones, pop up and blind thrusts, show in transversal sections. Besides finding that structural configuration of lateral ramps is the same independently of the angle of dip structure (30°, 45° or 60°).

---

\*Bachelor Thesis

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Director: Giovanni Jiménez Díaz. Codirector: Dilan Arturo Martínez Sánchez.



## Introducción

La Tierra es un cuerpo dinámico sometido a cantidad y variedad de procesos geológicos a diferentes escalas, los cuales actúan y han actuado moldeando la configuración del planeta; en ese aspecto los procesos tectónicos son claves, estos se presentan en los diferentes niveles corticales, pero con diferentes implicaciones deformativas debido al comportamiento mecánico diferencial ante los esfuerzos que presentan las rocas en cada capa terrestre (Stuwe, 2007).

El modelamiento análogo permite reproducir estos procesos geológicos que tienen lugar en la corteza terrestre, de los cuales sólo se conoce su estado final, a una escala de laboratorio. Su propósito radica en un mejor entendimiento de dichos procesos, sus causas, evolución y efectos, gracias a la oportunidad de visualizar en 3D y “en directo” su desarrollo progresivo (Crespo-Blanc y Pérez-Ramos, 2002; Yagupsky, 2009). A partir de los resultados se pueden confirmar los modelos puramente teóricos ó, por otro lado, generar interrogantes de la validez de estas hipótesis.

Los procesos geológicos son representados en los modelos análogos por diferentes materiales según la capa de la corteza y el comportamiento mecánico ante la deformación que allí tome lugar; para representar las rocas de la corteza superior terrestre los materiales granulares secos (arena cuarzosa y/o microesferulas de vidrio) son los ideales, ya que se comportan de manera frágil y propiedades como baja cohesión y el ángulo de fricción interna coinciden.

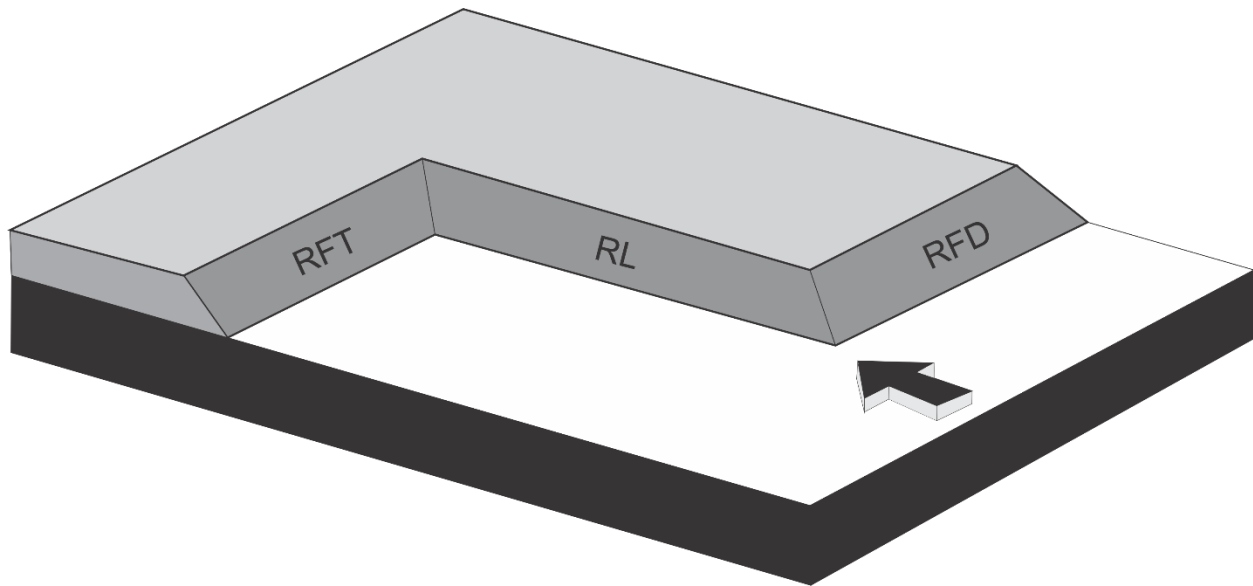
En la corteza superior se desarrollan los diferentes regímenes estructurales según los esfuerzos aplicados (compresión, extensión y rumbo) y los fenómenos deformativos presentan un comportamiento de tipo frágil, caracterizado por el fracturamiento y fallamiento de las rocas (Fossen, 2010). Bajo regímenes compresivos se desarrollan los cinturones de cabalgamiento; allí se encuentran las zonas transversales, las cuales transfieren el desplazamiento a lo largo del rumbo a través de los conectores laterales, uno de estos conectores corresponde las rampas laterales.



Estos modelos son lo más próximo posibles a sus equivalentes naturales en repartición de fuerzas y reología (Liesa *et al.*, 1997) y poseen un papel importante en la construcción de conocimiento; a pesar de los avances en la técnica y los materiales utilizados, cabe resaltar que es imposible construir un modelo análogo perfectamente escalado en todos sus aspectos; ya que existen varias limitaciones propias de la técnica.

## **1 Planteamiento del problema.**

Las zonas transversales son áreas que comprenden diferentes estructuras encargadas de la transferencia de desplazamiento y deformación a lo largo del rumbo, y se ubican transversalmente respecto al cinturón de cabalgamiento al cual pertenecen (Thomas, 1990; Jiménez *et al.*, 2012). Estas estructuras corresponden a los conectores laterales, los cuales incluyen rampas laterales, fallas transversales y zonas de transferencia (Thomas, 1990). Las rampas laterales son rampas tectónicas que se ubican paralelas a la dirección de transporte del cabalgamiento (Butler, 1982) y generalmente se encuentran conectando dos rampas frontales (Ver figura 1).



*Figura 1.* Configuración de una rampa lateral paralela a la dirección de transporte tectónico conectando dos rampas frontales. RFD: Rampa Frontal Delantera, RFT: Rampa Frontal Trasera RL: Rampa Lateral. Adaptado de Fossen (2010).

Las rampas laterales presentan rasgos en superficie compartidos con los otros conectores laterales y otros propios como son: cierres o interrupciones de estructuras como fallas y pliegues a lo largo del rumbo, cabeceo de pliegues en direcciones opuestas, cambios abruptos en la longitud de onda de los pliegues, discontinuidades geomorfológicas, entre otros (Thomas, 1990; Pohn, 2000; Dixon y Spratt, 2004).

Pero, qué características presentan las rampas laterales a profundidad y como es su relación con los rasgos exhibidos en superficie? Es necesario un análisis estructural preciso de estas estructuras para llegar a una respuesta, y aquí es donde la técnica del modelamiento análogo juega un papel de gran utilidad.



## **2 Objetivos.**

### 2.1 Objetivo general

Realizar un análisis estructural de las rampas laterales, sus estructuras asociadas y sus implicaciones en la deformación en una secuencia sedimentaria a partir de modelos análogos de cajas de arena.

### 2.2 Objetivos específicos

- Realizar el modelo análogo a escala que represente la configuración y evolución de las rampas laterales y sus estructuras asociadas.
- Identificar los diferentes rasgos estructurales en planta y sección transversal asociados a la presencia de rampas laterales.
- Contrastar los resultados obtenidos a partir de los modelos análogos con las características estructurales asociadas a rampas laterales en prototipos naturales.

## **3 Justificación.**

El uso de los modelos analógicos para representar procesos geológicos terrestres consiste en un método práctico, didáctico y aplicable al momento de intentar resolver inquietudes científicas. El presente trabajo se realiza con el propósito de reconocer los principales rasgos y características de las rampas laterales, tanto en planta como en sección transversal y longitudinal, y de esta manera entender cómo se comporta la deformación en una secuencia sedimentaria con presencia de estas estructuras; esto a partir de la técnica del modelamiento análogo. Al contrastar los resultados de los modelos análogos con algunos prototipos naturales de rampas laterales, se pretende mirar la validez de los mismos experimentos realizados, y el aporte de la técnica al conocimiento geológico,



en este caso de las rampas laterales, y en una mayor escala, de los cinturones de cabalgamiento, los cuales son de gran importancia en la industria petrolera.

## 4 Antecedentes.

### 4.1 Rampas laterales

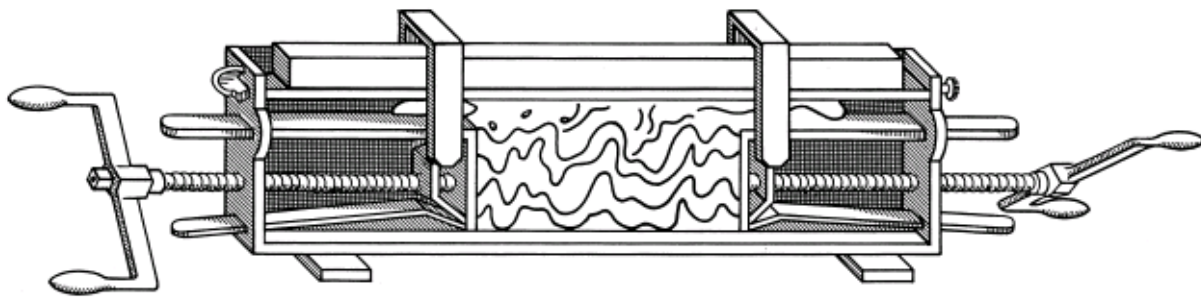
El concepto de rampas laterales surgió del estudio de cinturones de cabalgamiento donde se encontró que además de las rampas frontales, existen las rampas laterales y oblicuas (Boyer y Elliot, 1982). Inicialmente el concepto de rampa fue propuesto por Rich (1934) como un segmento del cabalgamiento que corta la sección estratigráfica a través de un plano escalonado entre dos *flats* (McClay, 1981); Douglas, 1950 las denominó “*steeps*”, aunque este término ya no se usa.

El termino rampa lateral fue introducido por Boyer and Elliot (1982), Butler (1982) y Hossack (1983) para describir una rampa tectónica paralela a la dirección de transporte del cabalgamiento. Aunque ya previamente habían sido dadas a conocer por otros autores como *sidewall ramps* (Hossack 1981). Las rampas laterales más conocidas a nivel mundial se ubican en importantes cadenas montañosas como las Montañas Rocosas Canadienses, los Montes Apalaches y Montes Escandinavos (Hossack, 1983; Pohn, 2000; Dixon y Spratt, 2004).

### 4.2 Modelos análogos

Los inicios del modelamiento análogo se remontan a comienzos de siglo XIX donde Hall (1815) modeló por primera vez estructuras geológicas en un laboratorio, obteniendo muy buenos resultados sobre la naturaleza de los plegamientos a causa de los esfuerzos horizontales compresivos (Ver figura 2) (Ranalli, 2001); posteriormente Lyell (1871) obtuvo los mismos

resultados. A partir de estos avances otros autores como Favre (1878), Daubre (1878,1879), Forchheimer (1883), Schardt (1884) y Reade (1886) realizaron modelos enfocados en el desarrollo de estructuras como fracturas, pliegues y cabalgamientos a partir de esfuerzos compresivos. Cadell (1888) fue el primero en hablar sobre el escalado experimental, y junto con Willis (1893) incorporaron los materiales frágiles y viscosos para entender la influencia de la reología del material al ser sometido a deformación (Yagupsky, 2009; Graveleau, 2012).



*Figura 2.* Primer montaje experimental realizado por Hall, 1815 para modelar pliegamientos. Adaptado de Hall (1815).

Durante el siglo XX, gracias al interés de la industria petrolera en la técnica, gran cantidad de autores ampliaron la variedad de procesos simulados, aunque usando los mismos conceptos y técnicas que sus antecesores. Se destaca el aporte de Hubbert (1937) quien planteó la teoría de escalado, lo que revolucionó el modelamiento análogo, pues la técnica pasó de meramente descriptiva y cualitativa, a ser un método cuantitativo aplicable a procesos geológicos a diferentes escalas. Faugere y Brun (1984) y Davy y Cobbold (1988, 1991) combinaron materiales de diferente reología (frágil – dúctil) extendiendo el margen de procesos geológicos a modelar de la corteza hasta el manto terrestre; por su parte Rossetti *et al.*, (1999) incorporaron materiales con reología dependiente de la temperatura, simulando la influencia de la profundidad (gradiente geotérmico) en la naturaleza de la roca (Ranalli, 2001).



Posteriormente sobresale el uso de otras técnicas como los modelos centrífugos, que incorporan el papel de la gravedad en los procesos geológicos. Y más recientemente han aparecido los modelos numéricos, los cuales complementan el modelamiento análogo, ya que además de simular procesos tectónicos poseen un control sobre los resultados, lo que permite unas mejores conclusiones.

## 5 Marco teórico.

### 5.1 Geología estructural

La geología estructural se puede definir como la rama de la geología que se ocupa del estudio de la deformación, a diferentes escalas, de las rocas de la corteza terrestre. La deformación es la consecuencia de los esfuerzos a los cuales estuvieron sometidos los cuerpos en el pasado, y que generaron como evidencia estructuras deformativas en las rocas terrestres. El análisis de estas estructuras es lo que permite medir y cuantificar la deformación, e inferir otros aspectos como el tipo de deformación (frágil, dúctil), la reología (elástico, plástico, viscoso) y el ambiente deformativo (compresivo, extensivo, rumbo).

#### 5.1.1 Esfuerzo

El esfuerzo ( $\sigma$ ) se define como la fuerza por unidad de área que se aplica sobre un plano cualquiera de un cuerpo ( $\sigma = F/A$ ), por lo tanto, la deformación dependerá de cómo se distribuye dicha fuerza según el tamaño del área en la que se aplica (Martínez, 2003).

El esfuerzo es un vector que actúa de manera oblicua sobre el plano, sin embargo, este puede dividirse en dos componentes; el esfuerzo perpendicular al plano, encargado de comprimir o separar, denominado esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ), y el esfuerzo paralelo o tangencial al plano, que tiende a desplazar el cuerpo, denominado esfuerzo cizalla ( $\tau$ ) (Ver figura 3).

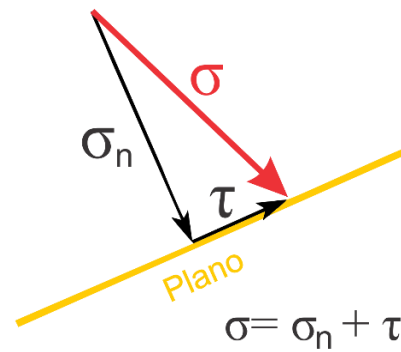


Figura 3. Vector de esfuerzo conformado por el esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ) y el esfuerzo de cizalla ( $\tau$ ). Adaptado de Burg (2017).

### 5.1.2 Deformación

De manera amplia la deformación se puede definir como cualquier cambio en la posición (traslación), orientación (rotación), forma (distorsión) y volumen (dilatación) de la geometría final de un cuerpo de roca respecto a su geometría inicial, cuando esté es sometido a un campo de esfuerzos durante un evento deformativo (Ver figura 4) (Fossen, 2010). Traslación y rotación aplica para cuerpos rígidos, mientras distorsión y dilatación para cuerpos no rígidos. Por otro lado, deformación interna (*strain*), de manera estricta, corresponde a la distorsión del cuerpo de roca, y solo involucra cambio de tamaño y/o forma. (Rosello, 2001).

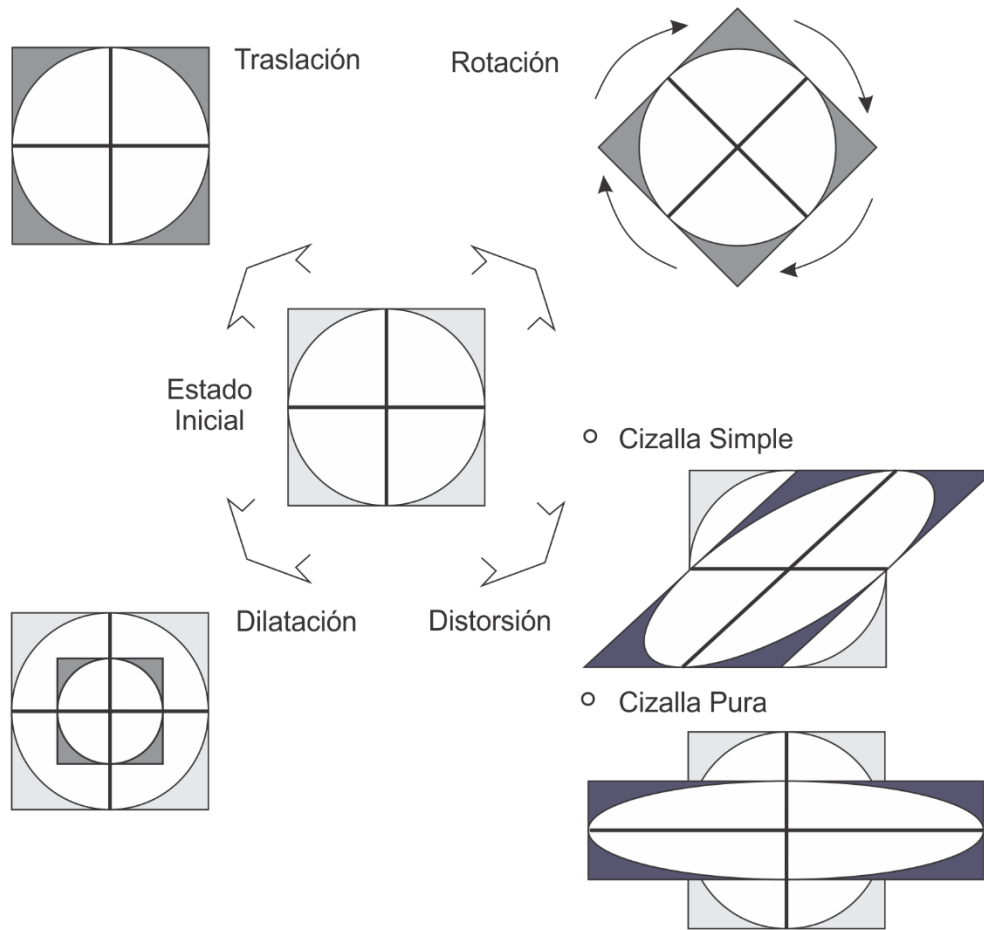
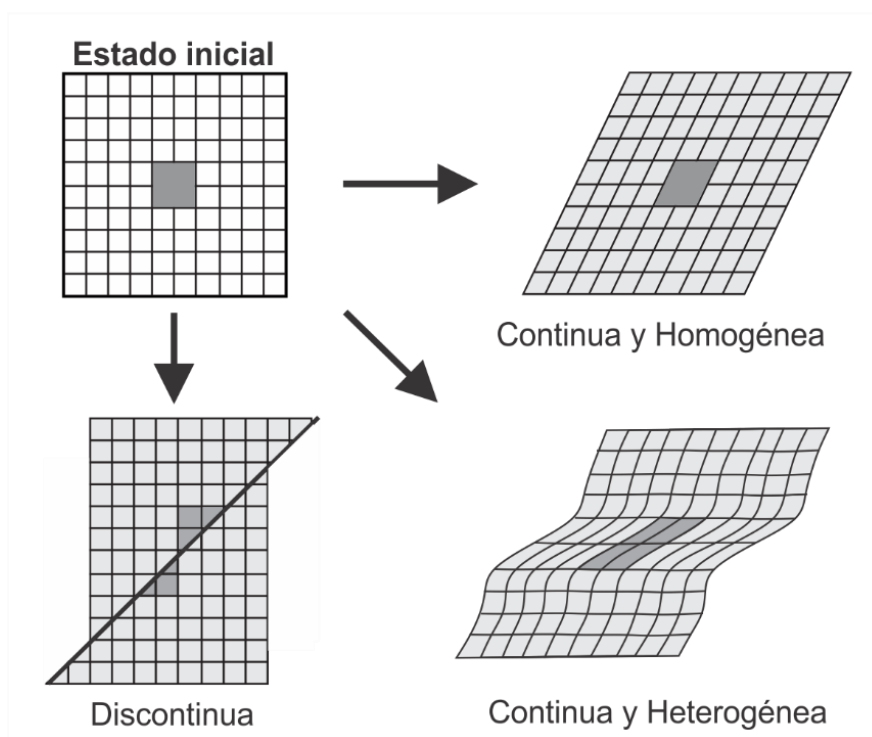


Figura 4. Componentes básicos de la deformación, traslación y rotación aplica para cuerpos rígidos, mientras distorsión y dilatación para cuerpos no rígidos. Distorsión, que implica cambio en el tamaño y/o forma se divide en cizalla simple y pura. Adaptado de Fossen (2010) y Davis (2012).

La deformación interna se clasifica según distintos criterios: según la geometría del resultado se clasifica en homogénea y heterogénea; la deformación es homogénea cuando los cambios son proporcionalmente iguales para cada pequeña parte del cuerpo, entonces las líneas rectas permanecen rectas y tanto líneas como planos originalmente paralelos permanecen paralelos; por otro lado, es heterogénea, cuando los cambios son proporcionalmente diferentes y las líneas rectas se curvan y se pierde el paralelismo de líneas y planos (Ver Figura 5) (Rosello, 2001). En general

la deformación de las rocas en la corteza terrestre es heterogénea, sin embargo, si se analiza a una escala menor la deformación puede ser homogénea.

La deformación también puede ser continua o discontinua, según la continuidad entre porciones finitas adyacentes del mismo cuerpo, es continua si no se separa ningún par de puntos materiales que estuvieran juntos antes de la deformación, es decir, si no hay ruptura, de lo contrario se clasifica como discontinua (Ver figura 5) (Rosello, 2001; Martínez, 2003).



*Figura 5.* Tipos de deformación interna. La deformación discontinua es propia de estructuras frágiles, mientras la deformación continua, tanto heterogénea como homogénea, de estructuras dúctiles. Adaptado de Rosello (2001).

La deformación puede ser coaxial o no coaxial; si los ejes cambian de longitud, pero no rotan de su posición inicial, es cizalla pura o coaxial, no hay cambio de volumen/área, ya que el acortamiento en una dirección es perfectamente compensado con estiramiento en otra dirección,



entonces un cuadrado se convierte en un rectángulo y un círculo en una elipse. Es cizalla simple o no coaxial cuando los ejes rotan y el eje vertical cambia de longitud, en este caso un cuadrado se convierte en un paralelogramo (Ver Figura 4) (Fossen, 2010; Davis, 2012). También existe la cizalla subsimple ó general, considerada como una combinación de los dos tipos de cizalla mencionadas anteriormente.

#### 5.1.2.1 Medición de la deformación

Para medir la deformación total en una dimensión, teniendo en cuenta los datos de longitud inicial ( $L_0$ ) y final ( $L_f$ ), existen dos parámetros: el estiramiento ( $s$ ) (*stretch*) para determinar si sufrió acortamiento ( $s < 1$ ) ó extensión ( $s > 1$ ), y la elongación ( $e$ ) para conocer el acortamiento ( $e < 0$ ) o extensión ( $e > 0$ ) asociado a la deformación aplicada, el valor de elongación multiplicado por 100, representa el % de elongación (Fossen, 2010)

$$\text{Elongación } (e) = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$$

$$\text{Estiramiento } (stretch) (s) = \frac{L_f}{L_0}$$

#### 5.1.3 Reología

La reología es el estudio del comportamiento mecánico de los materiales, las rocas en este contexto, ante un campo de esfuerzos (Burg, 2017). De manera ideal la respuesta de los materiales es principalmente de tres maneras: elástica, plástica y viscosa (Newtoniano) (Fossen, 2010).

##### 5.1.3.1 Elástica

Deformación temporal producida por la aplicación de un esfuerzo que al ser retirado el cuerpo recupera su estado inicial (Ver figura 6a). Es importante considerar que la deformación elástica es independiente del tiempo. Conserva de manera ideal la ley de Hooke una respuesta lineal proporcional entre el esfuerzo ( $\sigma$ ) y la deformación ( $e$ ).

### 5.1.3.2 Viscosa

La deformación ocurre mientras el esfuerzo se mantiene, al retirar los esfuerzos la deformación cesa, pero queda permanente, y el cuerpo mantiene su estado deformado final (Ver figura 6b). El material idealmente viscoso se deforma o fluye como un fluido.

### 5.1.3.3 Plástica

El material no sufre deformación hasta que alcanza un nivel de esfuerzo crítico o límite de resistencia (límite de elasticidad), entonces se deforma de manera permanente hasta que el esfuerzo es retirado y no recupera su estado inicial (Ver figura 6c).

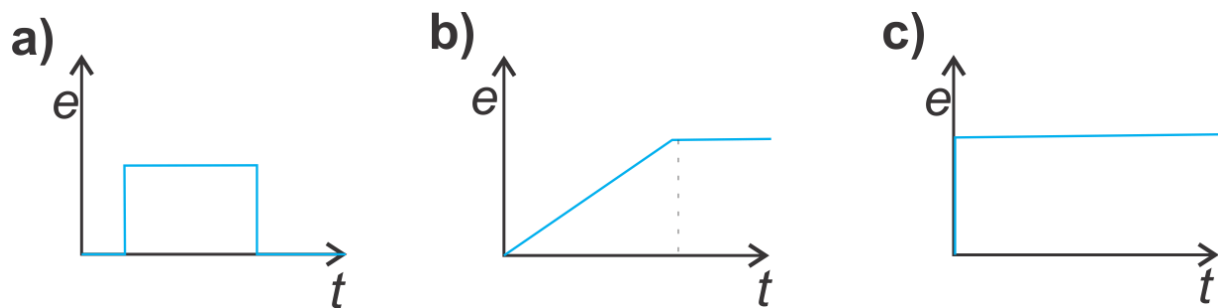


Figura 6. Grafica tiempo Vs deformación para comportamiento elástico (a), viscoso (b) y plástico (c). Adaptado de Fossen (2010).

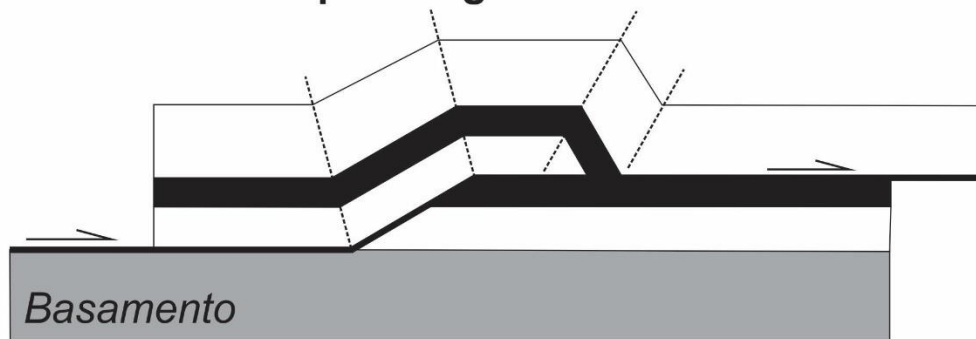
### 5.1.4 Deformación frágil

La deformación frágil ante un evento deformativo se caracteriza por la generación de planos de discontinuidad (diaclasas, fracturas y fallas) cuando se excede el límite de elasticidad de la roca. Este tipo de deformación es propia de las rocas de la corteza superior terrestre, aunque también se ha encontrado en el manto litosférico. En el régimen frágil las condiciones físicas promueven mecanismos de deformación quebradizos tales como deslizamiento friccional, rotación y fractura de los granos (Fossen, 2010).

### 5.1.5 Estilos estructurales

El estilo estructural describe la geometría estructural predominante de una región, y por lo general es común en otras regiones con deformación similar, depende del tipo de litología, la profundidad de la roca y el tiempo de deformación. La participación del basamento en la deformación determina la clasificación de los estilos estructurales (Harding y Lowell, 1979); si la deformación afecta al basamento se denomina escamación de piel gruesa (*thick skinned*) (Ver figura 7b), de lo contrario si solo afecta la cobertura sedimentaria y no afecta al basamento es escamación de piel delgada (*thin skinned*) (Ver figura 7a) (Lowell, 1985).

#### a) Escamación de piel delgada



#### b) Escamación de piel gruesa

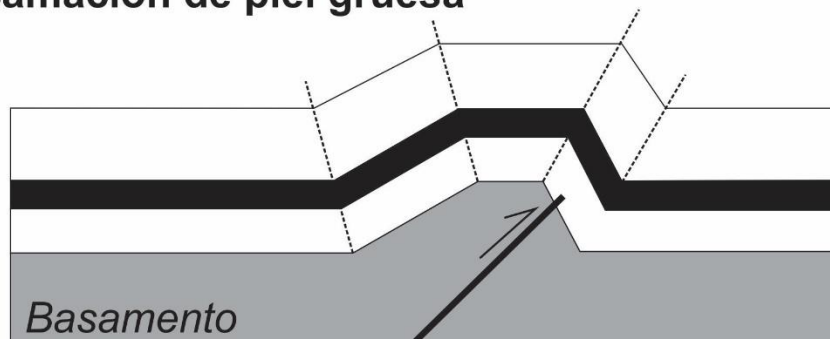


Figura 7. Clasificación de estilos estructurales. Escama gruesa escama delgada. Adaptado de Burg (2017).

## 5.2 Ambiente compresivo

Se origina en límites convergentes de placas tectónicas, donde el esfuerzo mayor ( $\sigma_1$ ) es horizontal y el esfuerzo menor ( $\sigma_3$ ) es vertical, generando principalmente fallas de contracción (inversas y de cabalgamiento), las cuales ponen rocas más antiguas sobre rocas más jóvenes (Ver figura 8). Se denomina cabalgamiento cuando el buzamiento del plano es menor a  $30^\circ$  y falla inversa cuando el buzamiento es entre  $30^\circ$ - $45^\circ$  (Fossen, 2010).

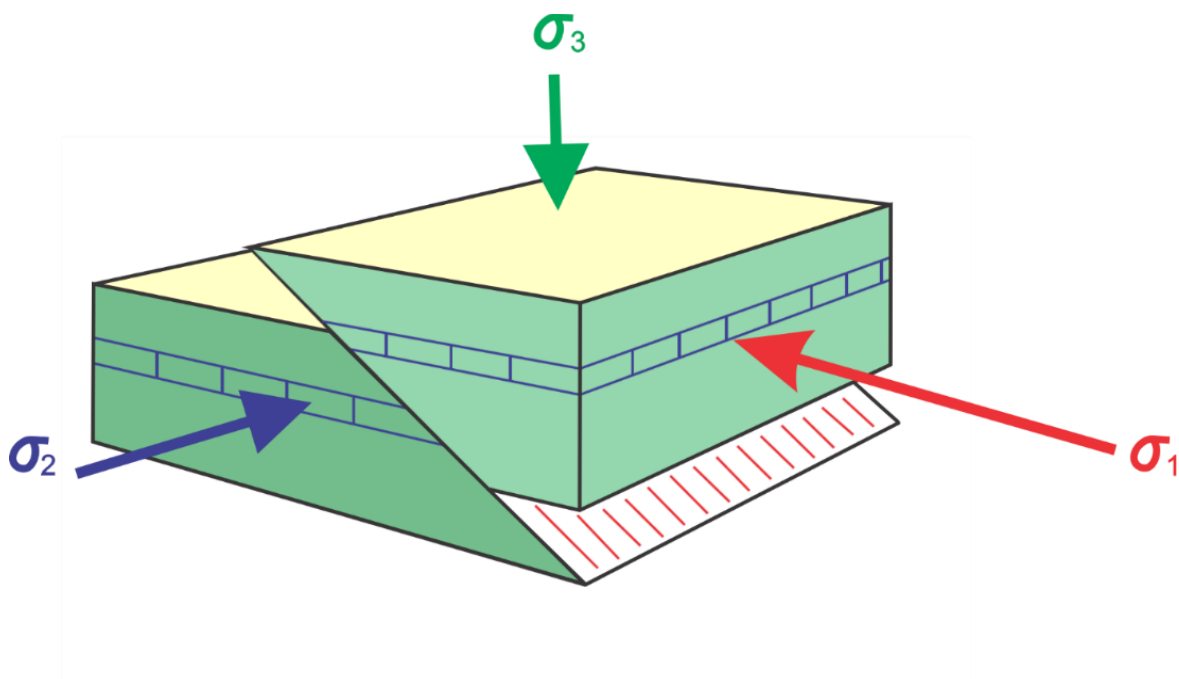
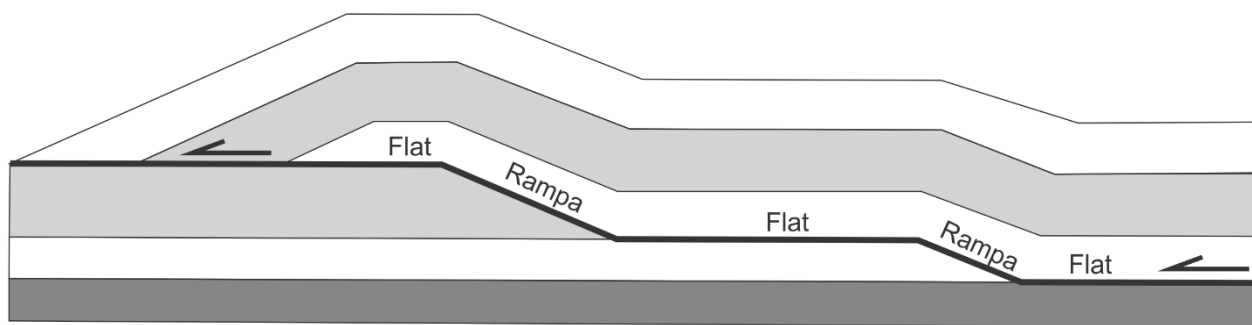


Figura 8. Conjunto de esfuerzos para una falla inversa, ambiente compresivo. Adaptado de Burg (2017)

### 5.2.1 Cinturón de cabalgamiento

Un cinturón de cabalgamiento se define como una plataforma de sedimentos deformados por varios cabalgamientos interconectados a través de un sistema tridimensional compuesto por despegues (*flats*), rampas y conectores laterales (Rich 1934, Boyer y Elliott 1982, Butler 1982).

Como cabalgamiento se describe a una falla tipo inversa de bajo ángulo, menor de  $30^\circ$  (Fossen, 2010) que acorta arbitrariamente el datúm de la superficie, como una estratificación (Norris, 1958 en McClay, 1981). Estas fallas pocas veces presentan una trayectoria suave y lisa, generalmente desarrollan una geometría tipo escalera, caracterizada por bajo ángulo y conformada por rampas y *flats*; las rampas son los segmentos que se encuentran cortando la estratificación y los *flats* los segmentos paralelos a esta (McClay, 1992) (Ver figura 9).



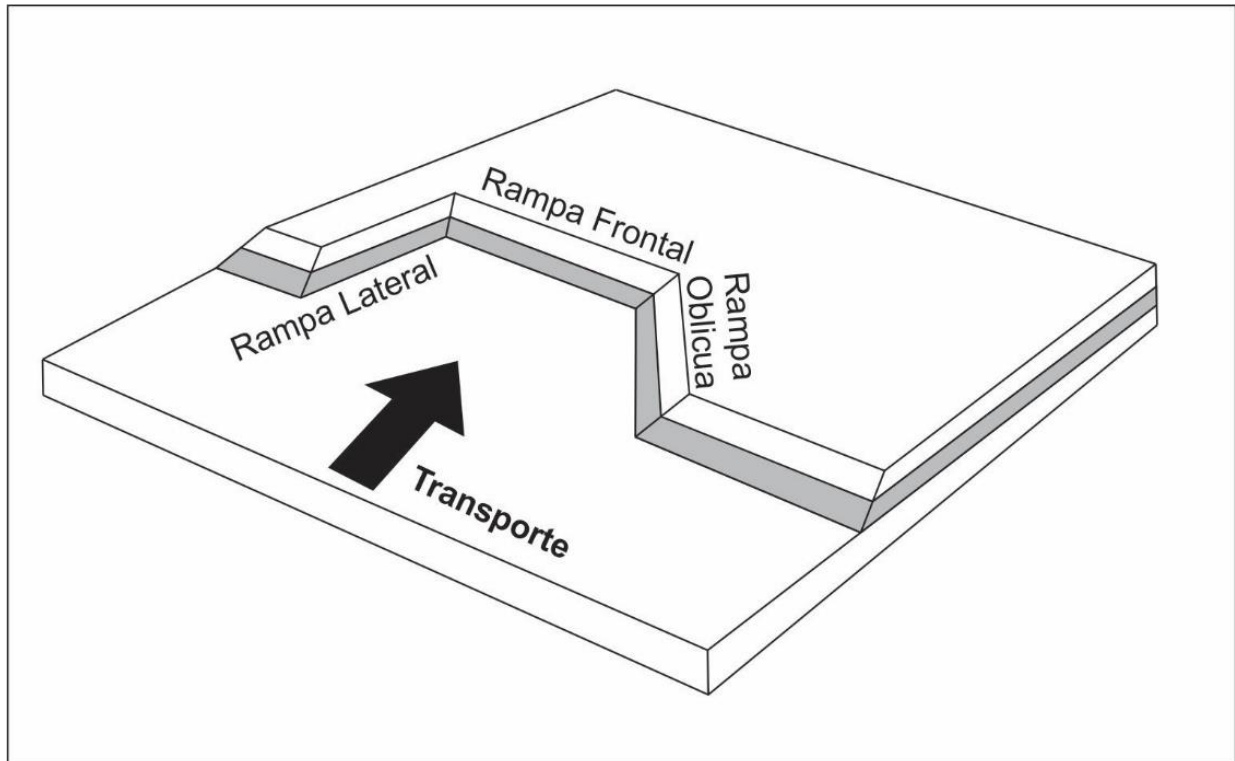
*Figura 9.* Estructura de un cabalgamiento con geometría en escalera compuesta de rampas y flats. Adaptado de Butler (1982).

Las rampas tectónicas se forman debido al apilamiento de las capas en contra de bloques fallados, como respuesta a esfuerzos compresivos que actúan sobre los planos de estratificación (*flats*) forzándolos a escalar cortando el nivel estratigráfico (Jacobeen y Kanes, 1975).

Uno de los criterios para clasificar las rampas tectónicas es respecto a cuál bloque se encuentra cortando la estratificación, según esto se clasifican en rampas del bloque yacente y rampas del bloque colgante; ya que una rampa puede estar cortando la estratificación de un bloque y a la vez ser paralela respecto a la estratificación del otro bloque involucrado.

La orientación de la rampa respecto a la dirección de transporte tectónico del cabalgamiento es el otro criterio de clasificación; si la rampa se ubica de forma perpendicular se llama rampa frontal, si se ubica paralela se llama rampa lateral y si se ubica oblicua se denomina rampa oblicua; estas

estructuras se caracterizan por presentar desplazamiento inverso, desplazamiento en rumbo y desplazamiento en ambos componentes, respectivamente (Butler, 1982). Los tres tipos de rampas desarrollan un ángulo con respecto a la estratificación o datúm de superficie entre  $10^{\circ}$  –  $30^{\circ}$ , con una frecuencia máxima de  $20^{\circ}$  (McClay, 1992) (Ver figura 10).



*Figura 10.* Clasificación de las rampas según la orientación respecto a la dirección de transporte del cabalgamiento. Adaptado de McClay (1992).

Las rampas frontales persisten a lo largo del rumbo y luego finalizan generalmente de manera abrupta, en lugar de gradualmente, allí son conectadas a través del rumbo con otras rampas frontales por medio de conectores laterales (Thomas, 1990).

Los conectores laterales son transversales al cinturón de cabalgamiento (paralelos a la dirección de transporte) y transfieren la deformación y el desplazamiento a través del rumbo, son equivalentes laterales de las rampas frontales y comprenden fallas transversales, rampas laterales



y zonas transferencia de desplazamiento (Thomas, 1990). Las fallas transversales son aquellas ubicadas transversal u oblicuas a la dirección de las principales estructuras del cinturón de cabalgamiento y las zonas de transferencia son zonas discretas de fallamiento en rumbo y oblicuo, generalmente paralelas a la dirección de extensión, que facilitan la transferencia de deformación y desplazamiento de una falla a otra entre dominios de extensión (Fauld y Varga, 1998; Dahlstrom, 1970).

### 5.2.2 Zonas transversales

Una zona transversal se presenta cuando los conectores laterales se encuentran alineados sistemáticamente de manera transversal u oblicua a las rampas frontales, estructuras regionales y cinturón de cabalgamiento (Thomas, 1990). Además de los conectores laterales, las zonas transversales comprenden otras estructuras como rampas oblicuas y zonas de acomodación.

Las zonas transversales, así como los conectores laterales, se expresan en superficie y pueden ser definidas por terminaciones abruptas y/o cambios en la dirección de estructuras como fallas y pliegues, cabeceo de pliegues y cambios en la vergencia de fallas, además de cambios en el estilo estructural respecto a las áreas adyacentes (Ver Figura 11) (Thomas, 1990; Jiménez *et al.*, 2012). En los mapas, las zonas transversales son representadas por bandas gruesas que enmarcan los diferentes conectores laterales (Thomas, 1990).

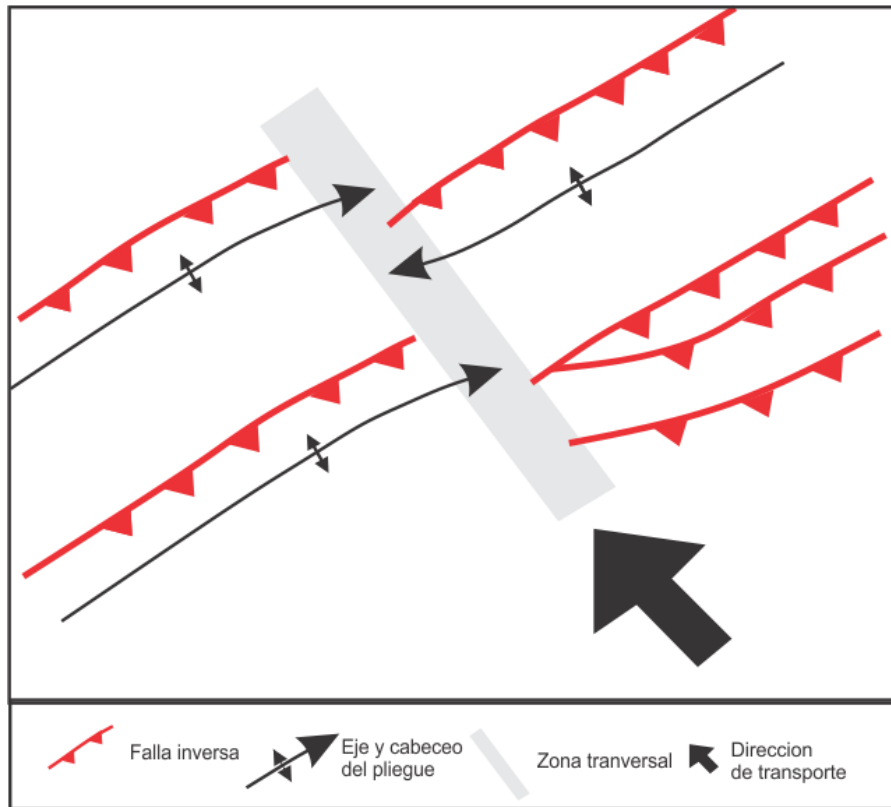


Figura 11. Zonas Transversales definida por terminaciones de estructuras (fallas y pliegues), cabeceo (*plunge*) de pliegues y cambio en el estilo estructural. Adaptado de Jiménez *et al.* (2012).

La ubicación de estas zonas transversales está controlada principalmente por la presencia de anisotropías preexistentes en el basamento, como fallas pre-cabalgamiento y/o synsedimentarias, también por variaciones estratigráficas a lo largo del rumbo en las rocas pre-cabalgamiento, como adelgazamientos, pinchamientos y cambios de facies, o posiblemente por una combinación de estos dos factores (Thomas, 1990; García y Jiménez, 2016).

Muchas de las características superficiales de las zonas transversales pueden estar subyacidas por rampas laterales, ubicadas transversalmente a las principales estructuras del cinturón plegado (Jiménez *et al.*, 2012). Tanto las zonas transversales como las rampas laterales son estructuras sincinematicas respecto al cinturón del cabalgamiento (Thomas, 1990).



### 5.2.3 Rampa lateral

Una rampa lateral se define como una rampa tectónica paralela o ligeramente oblicua a la dirección de transporte del cabalgamiento (Ver figura 12) (Butler, 1982; Boyer y Elliot, 1982; Hossack, 1983), generalmente se encuentra conectando dos rampas frontales. Según McClay (1992) presenta un ángulo de buzamiento entre  $10^{\circ}$ - $30^{\circ}$  y desplazamiento en rumbo, Burg (2017) le asigna un ángulo entre  $30^{\circ}$  a  $45^{\circ}$  y Dixon y Spratt (2004) indican que puede tener cualquier ángulo hasta  $90^{\circ}$ . Al presentarse, combinado con el gradiente de desplazamiento, producen cabeceo de pliegues en direcciones opuestas, variaciones en la cantidad de acortamiento de los cabalgamientos y rotación de bloques (Bayona *et al.*, 2002)

Se dan, al igual que los otros conectores laterales, a causa de fallas en el basamento, variaciones mecánicas y estratigráficas a lo largo de rumbo, disminución y/o transferencia en rumbo del desplazamiento entre estructuras en un cinturón de cabalgamiento; como resultado de una continua activación de sistemas de fracturas antiguos y también a un control estratigráfico y litológico, ya que una característica de las rampas laterales es el contraste de litologías entre las rocas superiores e inferiores al despegue (Thomas 1990; Pohn, 2000; Dixon y Spratt, 2004).

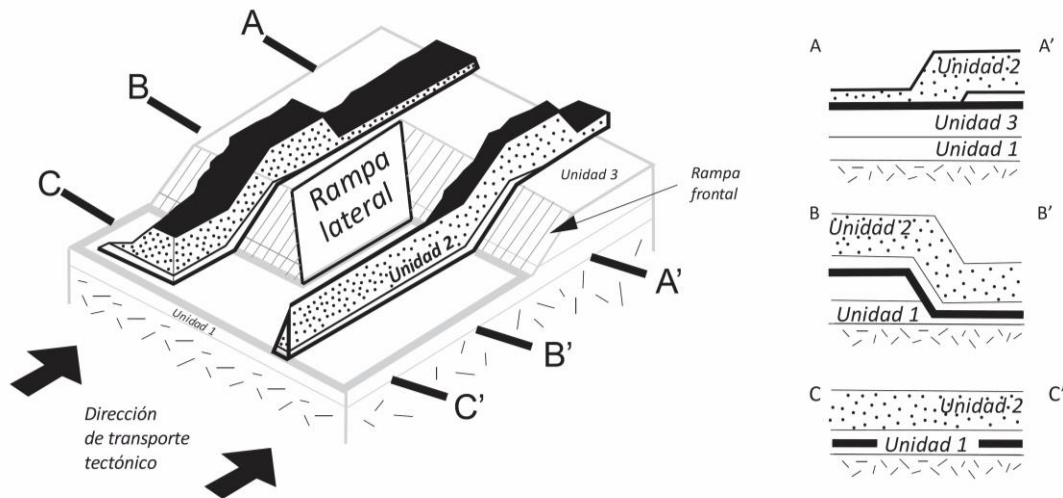


Figura 12. Bloque diagrama de una rampa lateral, conectando dos rampas frontales, mostrando el cabeceo de sus pliegues asociados. Adaptado de Bayona (2003).

Las rampas laterales son poco comunes en superficie, la mayoría de los casos encontrados tienden a estar a profundidad, sin embargo, gracias a herramientas como la sísmica de reflexión se puede determinar su presencia.

Presentan varios rasgos geológicos en superficie, la mayoría compartidos con los otros conectores laterales y otros propios, que permiten su identificación como: cierres o interrupciones de estructuras como fallas y pliegues a lo largo del rumbo, cabeceo de estos pliegues en direcciones opuestas, cambios abruptos en la longitud de onda de los pliegues, cambios en la frecuencia de fallas mapeadas, interrupciones en las cuencas por fallas de rumbo, grandes discontinuidades geomorfológicas y actividad sísmica, además se relacionan con la presencia de ventanas tectónicas (Thomas, 1990; Pohn, 2000; Dixon y Spratt, 2004).

Para definir estructuras transversales con estas características se han planteado varios términos, además de rampas laterales, como fallas de desgarre (*tear fault*), fallas de transferencia, lineamientos tipo Gwinn, discontinuidades estructurales a través de rumbo (CSD's) y despegues

transversales (Pohn, 2000). CSD's (*cross-strike structural discontinuities*) son amplias zonas transversales de lineamientos que interrumpen los patrones estructurales del cinturón de cabalgamiento, y otras características geomorfológicas, geofísicas, sedimentológicas, entre otros; representan límites a lo largo del rumbo de bloques sometidos a diferente transporte (Wheeler, 1980). Según Scott (1891) varias CSD's han sido atribuidas como la expresión superficial de rampas laterales y Thomas (1990) dice que pueden ser consideradas como una representación en vista de mapa de la geometría 3D de una zona transversal.

Si la rampa lateral presenta un alto ángulo o es vertical, se considera como un tipo de falla en rumbo con movimiento lateral, que conecta dos rampas frontales y limita dos unidades con diferente desplazamiento; estas son las denominadas fallas de desgarre (*tear fault*) o fallas de transferencia (Ver figura 13) (Dixon y Spratt, 2004). Se forman por una ruptura del cabalgamiento en dos segmentos con diferente desplazamiento a causa de la imposibilidad de mover un gran volumen de roca como una sola unidad (Twiss y Moores, 1992; Davis *et al*, 2012).

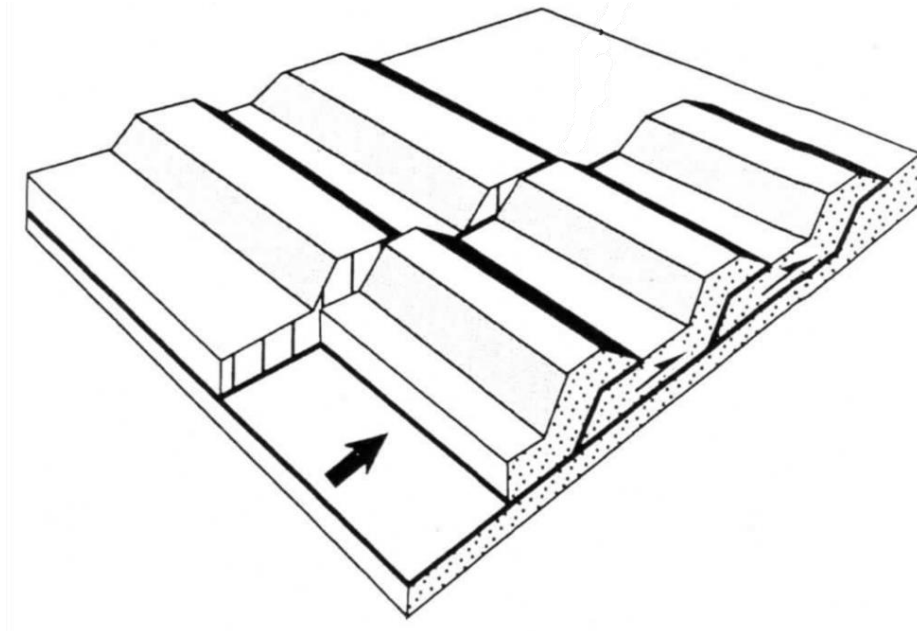


Figura 13. Falla de desgarre o transferencia. Adaptado de McClay (1992)



Phon (2000) asume que las rampas laterales son estructuras independientes de la escala y que los cabalgamientos que escalan por las rampas frontales son contemporáneas o preexistentes a sus pliegues asociados, ya que usualmente se observa un cambio considerable en la longitud de onda de estos pliegues entre los bloques colgantes y yacentes.

A partir de modelos análogos Dixon y Spratt, (2004) determinaron que son estructuras inestables, que se propagan lateralmente ocasionando que roten ligeramente en el sentido de la dirección de transporte del cabalgamiento, esto genera pliegues por propagación de fallas, los cuales son propicios para generar trampas de hidrocarburos.

#### 5.2.4 Otras estructuras compresivas

##### 5.2.4.1 Pliegues asociados a fallas (*fault bend fold*).

Los pliegues y las fallas son dos estructuras estrechamente relacionadas, tanto espacial como temporalmente. Esta relación puede ser de dos maneras; las fallas se forman como respuesta al plegamiento; o viceversa, los pliegues son el resultado del desplazamiento a lo largo de fallas, estos pliegues se conocen como pliegues asociados a fallas y son de tres tipos: pliegues por flexión de falla, pliegues por propagación de falla, y pliegues por despegue. A continuación, se describe únicamente el primero.

##### 5.2.4.2 Pliegue por flexura de falla (*fault bend fold*).

Se forman como resultado del movimiento de un bloque a lo largo de una rampa, causando la flexión del bloque y la formación del pliegue (Poblet, 2004). Por esto, se puede predecir la geometría de la rampa a partir de la forma del pliegue y viceversa (Fossen, 2010); según Suppe (1983) el buzamiento inicial de la rampa no puede ser mayor a 30°.

Se forman inicialmente como un par de bandas tipo *kink*, resultado de la flexión de las rocas del bloque colgante adaptándose a la geometría de la rampa; con el avance del desplazamiento la cresta se va reduciendo progresivamente hasta que el eje del pliegue alcanza la intersección entre la

rampa y el *flat*, cuando el eje queda fijo; a partir de ese momento la cresta del pliegue empieza a ensancharse de nuevo debido a que el flanco frontal avanza en el mismo sentido del transporte tectónico (Ver figura 14). el buzamiento de los flancos permanece constante durante toda la evolución.

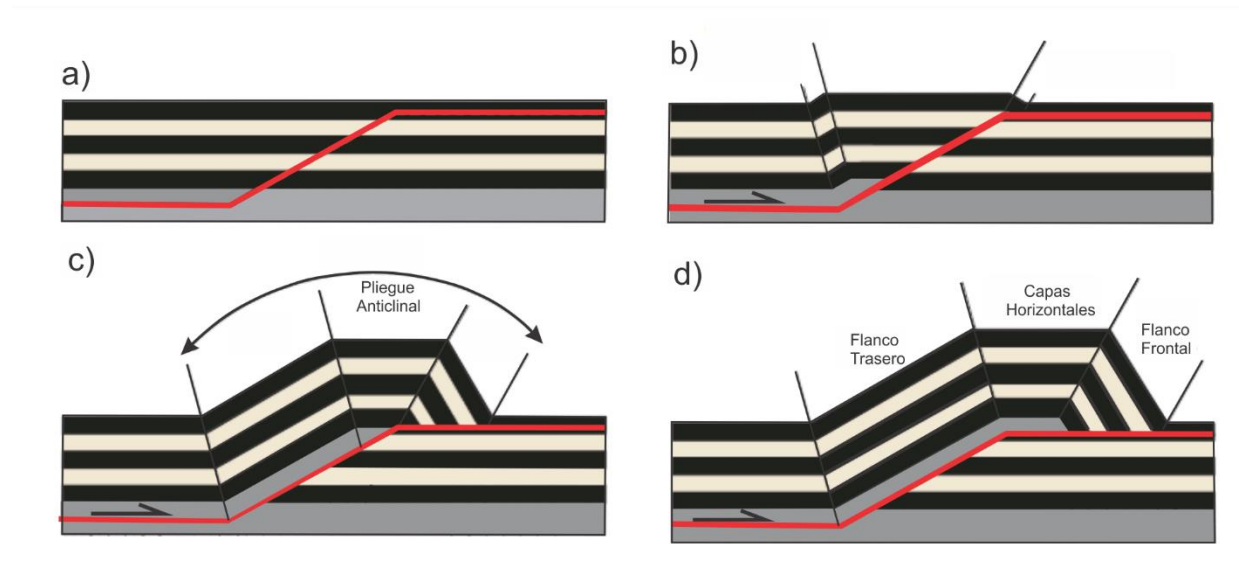


Figura 14. Evolución de pliegue por flexura de falla. Adaptado de Fossen (2010).

#### 5.2.4.3 Retrocabalgamientos

Son los cabalgamientos que tienen vergencia opuesta al cabalgamiento principal, del cual surgen para ayudar a compensar la deformación; generalmente tienen vergencia hacia el *hinterland* (McClay 1992).

#### 5.2.4.4 Pop up

La estructura generada en el bloque colgante levantada entre un cabalgamiento, vergencia hacia el antepaís (*foreland*) y un retrocabalgamiento, vergencia *hinterland* (Ver figura 15) (Burg, 2017).

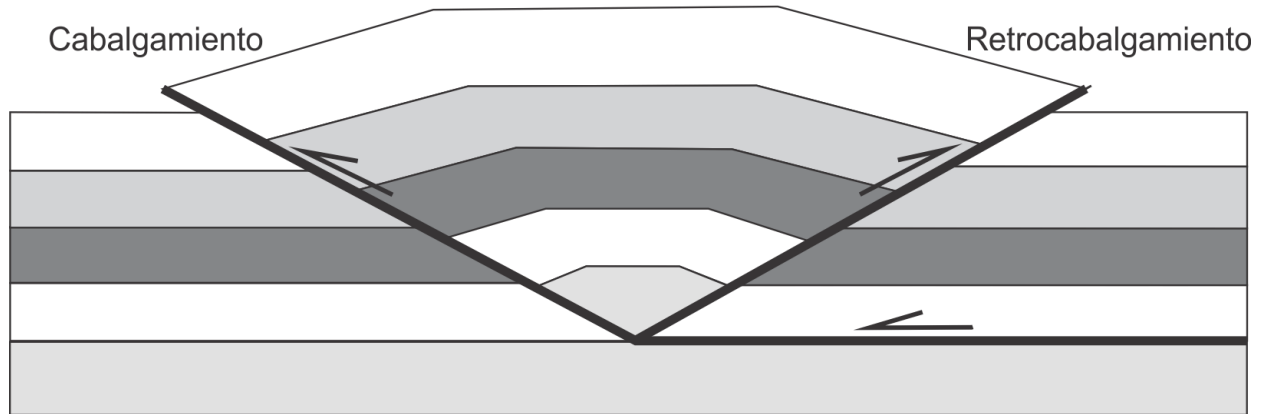


Figura 15. Estructura *pop-up*. Adaptada de McClay (1992).

#### 5.2.4.5 Fallas ciegas

Son las fallas que no alcanzan la superficie, su desplazamiento es compensado por plegamiento en los niveles superiores (McClay 1992).

#### 5.2.4.6 Zonas triangulares

Una zona triangular se define como la combinación de dos cabalgamientos con vergencia opuesta que comparten el mismo despegue basal, formando una geometría triangular. Generalmente, uno de los cabalgamientos trunca el avance del otro (Ver figura 16) (Burg, 2017)

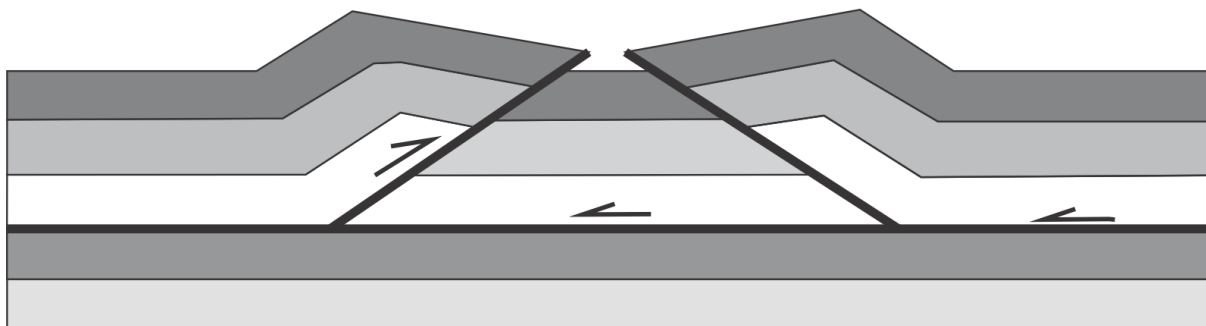


Figura 16. Zona triangular. Adaptada de McClay (1992).



### 5.3 Modelamiento análogo

El modelamiento análogo es una técnica usada para reproducir una situación real a escala de laboratorio; en geología es utilizada para representar los procesos geológicos (tectónicos) que tienen lugar en la corteza terrestre, de los cuales sólo se conoce su estado final ya que se producen a una escala espacial y temporal tan amplia que hacen imposible su observación directa (Ramberg, 1967). Se realiza con el propósito de un mejor entendimiento de dichos procesos a partir de la capacidad que brinda la técnica para precisar sus causas, evolución y efectos; esto gracias a la oportunidad de visualizar en 3D y “en directo” el desarrollo progresivo de estructuras (Cresp-Blanc y Perez-Ramos, 2002; Yagupsky, 2009). Además, el modelado análogo ofrece la posibilidad de que el investigador defina condiciones de contorno que desee imponer al sistema.

Después de estudiar los procesos geológicos en campo, pasan a ser modelados en el laboratorio, así, se contrastan las hipótesis planteadas anteriormente y se buscan explicaciones; incluso se intenta predecir su futura evolución (Álvarez y García de la Torre, 1996). Adicionalmente, permiten la adquisición de parámetros asociados a los procesos tectónicos como lo son la geometría tridimensional, mecanismos, velocidades y tiempos, los cuales son de difícil deducción a partir de datos de campo o sísmica. Estas características le confieren al modelamiento análogo un papel importante en la construcción de conocimiento, además de ser una herramienta de enseñanza didáctica y novedosa que motiva hacia el estudio científico (Deus *et al.*, 2015).

#### 5.3.1 Limitaciones

Estos modelos son lo más próximo posibles a sus equivalentes naturales desde el punto de vista de la repartición de fuerzas, reología y condiciones de desplazamiento en los límites del modelo (Liesa *et al.*, 1997).



A pesar de los grandes avances en la técnica y en los materiales utilizados, es imposible construir un modelo análogo perfectamente escalado en todos sus aspectos; ya que existen varias limitaciones propias del modelamiento análogo. Lo primero es destacar que este método representa una simplificación de los procesos, debido a las extremas condiciones que hacen difícil, cuando no imposible, reproducirlos en un laboratorio (Álvarez y García de la Torre, 1996), por lo cual, no modela en su totalidad la complejidad del modelo (Yagupsky, 2009).

Otros factores como la configuración inicial y la topografía, teniendo en cuenta su influencia en la vergencia tectónica (Rosello, 2008), condicionan la evolución del modelo. Además de las denominadas condiciones de borde al acotar el modelo, que distorsionan la situación real y la necesidad de reunir un gran volumen de información tanto experimental como de campo para evitar hipótesis irreales y reforzar las analogías (Yagupsky, 2009, Graveleau *et al.*, 2012).

### 5.3.2 Teoría de escalado

Las propiedades físicas de los materiales no se comportan proporcionalmente ante un cambio en sus dimensiones, por lo tanto, cuando se da un aumento en el tamaño de un cuerpo estas propiedades aumentan de manera diferencial; el área aumenta al cuadrado, el volumen, la masa y el peso aumentan al cubo y la presión se mantiene lineal, por su parte la gravedad y la densidad se mantienen constantes. Por este motivo es necesario entender el comportamiento de los parámetros ante los cambios, para poder escalar el modelo análogo de manera correcta a través de una teoría de Similaridad, la cual relaciona estos parámetros entre el modelo análogo y el prototipo natural (Hubbert, 1937).

La teoría de escalado introducida por Hubbert (1937) es fundamental para la técnica del modelamiento análogo, pues la convierte en un método cuantitativo eficaz para estudiar procesos a cualquier escala. Esta teoría plantea la relación que existe entre dos cuerpos con la misma forma



y densidad, pero con dimensiones diferentes a partir de una constante de proporcionalidad ( $\lambda$ ), ver ecuación:

$$\lambda = \frac{p_m}{P_p}$$

*Los subíndices  $m$  y  $p$  hacen referencia al modelo y al prototipo natural*

*$P$  aplica para la propiedad a escalar.*

Según Hubbert (1937) el modelo análogo obtiene funcionalidad y representa efectivamente el comportamiento mecánico real si se cumple con 3 grados de similitud con respecto al prototipo natural que se intenta reproducir: similitud geométrica, similitud cinemática y similitud dinámica. Estos grados están relacionados con tres factores entre ambos: factor de escala espacial ( $L$ ), factor de escala temporal ( $T$ ) y el factor de escala de masas ( $M$ ), respectivamente.

- Similitud geométrica: Se cumple si todas las dimensiones del modelo son  $L$  veces las dimensiones del prototipo, y los ángulos de los dos cuerpos son iguales, ver ecuación.

$$L = \frac{l_m}{l_p};$$

El modelo análogo puede ser tanto a escala menor como mayor respecto el prototipo natural, si es una reducción entonces  $L < 1$ , por otro lado, si es un aumento  $L > 1$ .

- Similitud cinemática: Se cumple si el tiempo en el cual el modelo desarrolla un cambio de tamaño, forma o posición es  $T$  veces el tiempo en el que se produce este mismo cambio en el prototipo, ver ecuación.

$$T = \frac{t_m}{t_p}$$



Si se cumple la Similaridad cinemática entonces la velocidad ( $V$ ) y la aceleración ( $A$ ) de los dos cuerpos también es proporcional, ver ecuación.

$$V = \frac{v_m}{v_p}; A = \frac{a_m}{a_p}$$

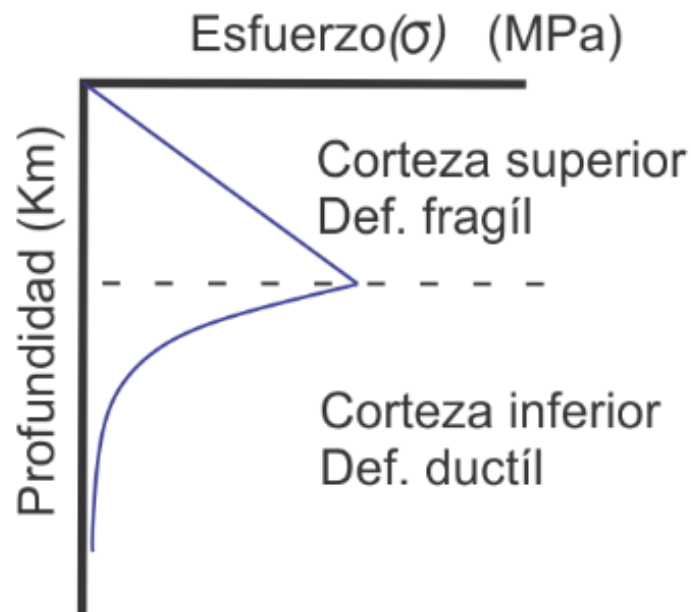
- Similaridad dinámica: Se cumple si todas las fuerzas que afectan a los dos cuerpos tienen magnitudes proporcionales y la misma dirección, ver ecuación. Partiendo de que la distribución de la masa en el modelo es proporcional a la del prototipo original ( $M$ ), ver ecuación.

$$F = \frac{f_m}{f_p}$$

$$M = \frac{m_m}{m_p}$$

### 5.3.3 Materiales

Dependiendo del proceso geológico que se quiera representar y la capa de la corteza terrestre donde este ocurre se utilizan determinados materiales para el modelamiento análogo; ya que el comportamiento mecánico de las rocas ante los esfuerzos es diferente en cada capa de la corteza terrestre: en la corteza superior presentan un comportamiento frágil y en la corteza inferior comportamiento dúctil (Ver figura 17).



*Figura 17.* Grafica esfuerzo Vs Profundidad que describe el comportamiento mecánico de la roca en la corteza superior e inferior. Adaptado de Fossen (2010).

#### 5.3.3.1 Frágiles

Los materiales granulares secos (arena cuarzosa y microesferulas de vidrio) son los utilizados para representar las rocas en la corteza superior, en especial la arena cuarzosa debido a su comportamiento frágil, poca-nula cohesión y poseer una rápida propagación de la deformación, desarrolla pocas fallas, pero de gran desplazamiento y poco plegamiento; además de su bajo costo y fácil acceso (Dooley y Schreurs, 2012).

#### 5.3.3.2 Dúctiles

La arcilla húmeda presenta un comportamiento dúctil, por lo tanto, se utiliza para modelar las rocas de la corteza inferior y/ó capas dúctiles presentes en la corteza superior, su alta cohesión permite un mejor detalle de las estructuras y la propagación lenta de la deformación desarrolla



plegamientos y muchas fallas de corto desplazamiento; es un material de bajo costo pero la poca información sobre sus propiedades limita su uso (Dooley y Schreurs, 2012).

#### 5.3.3.3 Viscosos

Los materiales viscosos como la silicona, yeso, gelatina, parafina, miel, cera y gel también son usados para modelar rocas de la corteza inferior debido a su ductilidad; además, han sido usados para diapiros, fallas de rumbo y procesos ígneos, e incluso para representar rocas del manto terrestre.

#### 5.3.4 Deformación frágil

Cuando se modelan procesos que ocurren en la corteza superior, donde la deformación frágil toma lugar, se utilizan materiales granulares secos que presentan un comportamiento Coulombiano, estos materiales no son sensitivos a la tasa de deformación y la velocidad de deformación no influye en el resultado (Davis *et al.*, 1983). Por esta razón, la escala temporal ( $T$ ) no influye en el escalamiento del modelo (Yagupsky, 2009).

Según Hubbert, (1937) los modelos de deformación frágil se condicionan por la ecuación de escalamiento dinámico ( $\Sigma$ ):

$$\Sigma = P * L * g$$

Donde  $P$ : densidad,  $L$ : longitud y  $g$ : gravedad

Los materiales granulares secos presentan una densidad ( $P$ ) similar a las rocas de la corteza superior y en los modelos se trabaja con gravedad normal ( $g$ ), a menos que sea un modelo centrifugo; por lo tanto, solo es necesario definir la relación de escala espacial ( $L$ ) para el escalado dinámico del modelo análogo y generar una correcta analogía para deformación frágil, así.

$$\Sigma = L$$



La reología de los materiales granulares secos es similar a la de las rocas deformadas en la corteza superior, frágil, de acuerdo con Dooley y Schreurs (2012) varios estudios realizados recientemente determinaron que el comportamiento mecánico de estos materiales está gobernado por la ley de fractura de Mohr-Coulomb:

$$\sigma_c = C_o + \mu_f \sigma_n$$

$\sigma_c =$  Esfuerzo de cizalla

$\sigma_n =$  Esfuerzo normal

$\mu_f =$  Coeficiente de fricción interna

$C_o =$  Cohesión

Schellart (2000) sugiere que este criterio no aplica para esfuerzos normales  $\sigma_n$  bajos ( $\sigma_n < 30$  Pa).

El coeficiente de fricción interna ( $\mu_f$ ) es una variable adimensional que corresponde a la oposición al deslizamiento que ofrece la superficie de 2 cuerpos en contacto; para las rocas corticales varía entre  $0,6 < \mu_f < 0,85$  según Byerlee, 1978 y Brace y Kohlstedt, 1980, aunque otros autores amplían el rango entre  $0,5 < \mu_f < 1$ ; está definido por el ángulo de fricción interno o ángulo de reposo del material, así:  $\mu_f: \tan(\varphi)$ .

Según Hubbert (1937) para obtener un modelo apropiadamente escalado se deben satisfacer dos condiciones:

- El ángulo de fricción interna ( $\varphi$ ) del material debe ser similar al de las rocas de la corteza superior.

Las rocas de la corteza superior tienen un ( $\varphi$ ) entre  $27^\circ - 45^\circ$  (Handin, 1996), muy similar a los obtenidos para los materiales granulares secos ( $25^\circ - 45^\circ$ ) (Graveleua *et al.*, 2012); este ángulo se mantiene constante en los procesos deformativos.



- $C_r = \rho_r * L_r * g_r$

*Relación modelo: prototipo natural de  $C_r$ : cohesión,  $\rho_r$ : densidad,  $g_r$ : gravedad y  $L_r$ : longitud*

Nota: Esta expresión es para hallar la relación de la cohesión ( $C_r$ ) la cual debe ser despreciable, ya que la cohesión se expresa en dimensiones de esfuerzo (MPa), esta ecuación corresponde a la misma del escalado dinámico ( $\Sigma$ ).

Como se planteó antes a gravedad normal el valor de  $g_r \cong 1$ , para la relación de la densidad se toma  $2.5 g/cm^3$  como densidad promedio de la corteza superior y entre  $1,4 g/cm^3 - 1,7 g/cm^3$  la de los materiales (Klinkmüller, 2011), entonces  $0.56 < \rho_r < 0.68$  quedando la ecuación:

$$0.56 * L_r * (1) < C_r < 0.68 * L_r * (1)$$

Los rangos de  $L_r$  utilizados van de  $10^{-6}$  a  $10^{-4}$ , Dooley and Schreurs, 2012 plantean que el mejor valor es de  $10^{-5}$ , es decir, 1cm en el modelo equivale a 1 Km en la naturaleza; por lo tanto, para que se cumpla esta condición se requiere que:

$$0.56 * 10^{-5} < C_r < 0.68 * 10^{-5}$$

Según la anterior ecuación la cohesión del material debe ser mínima o casi nula; lo que concuerda con varios autores que dicen que la cohesión de las rocas de la corteza superior es casi cero (Byerlee, 1978), alrededor de 20 MPa (Handin, 1966) o que no supera los 60 MPa. Entonces, las arenas y otros materiales granulares secos son los ideales para simular los procesos de deformación frágil ( $C0 \leq 100 Pa$  y  $0,5 < \mu f < 1$ ) (Yagupsky, 2009).

Adicionalmente, los materiales granulares presentan una curva de esfuerzo-deformación que indica un comportamiento mecánico elástico/plástico friccional con una fuerte deformación transitoria antes del pico de fractura seguido de una deformación suave hasta la estabilización del desplazamiento; como se muestra en la figura 18, este comportamiento es muy similar al

experimentado por las rocas de deformadas en la corteza superior (Graveleau *et al.*, 2012; Dooley y Schreurs, 2012).

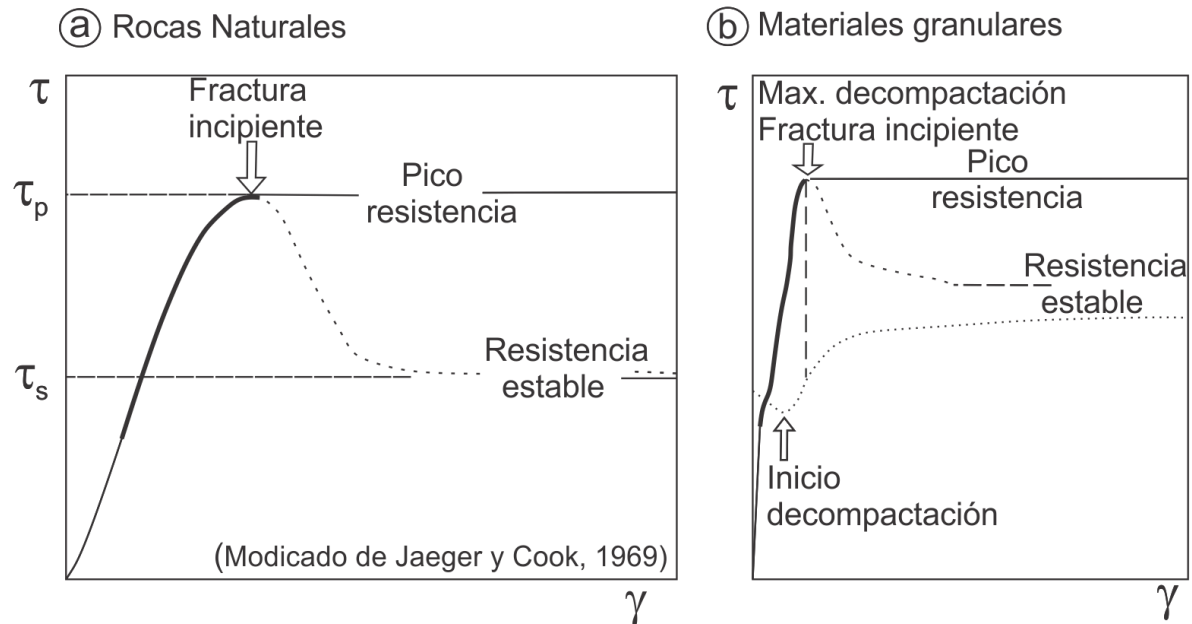


Figura 18. Graficas de esfuerzo Vs deformación. a) Para las rocas naturales de la corteza superior.

b) Para materiales granulares. Se ve claramente su similitud en el comportamiento de los dos.

Adaptado de Graveleau *et al.*, (2012).

## 6 Metodología.

El presente trabajo se basó en la utilización de modelos análogos de cajas de arena para representar la presencia de rampas laterales en una secuencia sedimentaria; la experimentación fue el insumo primario para la obtención de los resultados, y su posterior análisis permitió llegar a las respectivas conclusiones. Para llevar a cabo los objetivos propuestos el proyecto se dividió en 3 fases descritas a continuación:



### 6.1 Fase 1: Revisión bibliográfica

La etapa inicial del proyecto consistió en la consulta de la bibliografía relacionada con el concepto de rampas laterales y el modelamiento análogo de procesos geológicos en la corteza terrestre, con énfasis en la teoría de escalado; además de los antecedentes de autores expertos en el tema, a partir de sus experiencias y recomendaciones realizar una buena aplicación de la técnica y obtener resultados válidos.

### 6.2 Fase 2: Laboratorio

En la naturaleza, los procesos geológicos están determinados por cantidad de variables que intervienen de manera directa e indirecta; en ese orden, el éxito del modelamiento análogo dependerá en gran medida de lograr escalar la mayor cantidad posible de dichas variables, ya que algunas son humanamente imposibles.

Los factores más importantes a escalar, para procesos deformativos frágiles, son las propiedades mecánicas del material granular, la fricción basal, la mesa de modelado (*sandbox*) y el bloque rígido (*backstop*) (Graveleau *et al.*, 2012).

Otros factores como condiciones de almacenamiento en el laboratorio (humedad y temperatura), la preparación del material granular, el uso de tintes industriales y la fricción con las paredes laterales parecen irrelevantes, pero pueden llegar a alterar propiedades mecánicas del material granular (Dooley y Schreurs 2012). Por consiguiente, es importante tener en cuenta todos estos factores para lograr la reproducibilidad y repetibilidad de un modelo análogo, representada en la fiabilidad de sus resultados.



### 6.2.1 Selección del material granular.

El material utilizado para representar las rocas de la corteza terrestre es la variable más importante a escalar, Schreurs *et al.* (2006, 2016) demostró que diferencias en los materiales inducen variaciones en la geometría y evolución de las estructuras representadas (Klinkmuller, 2000).

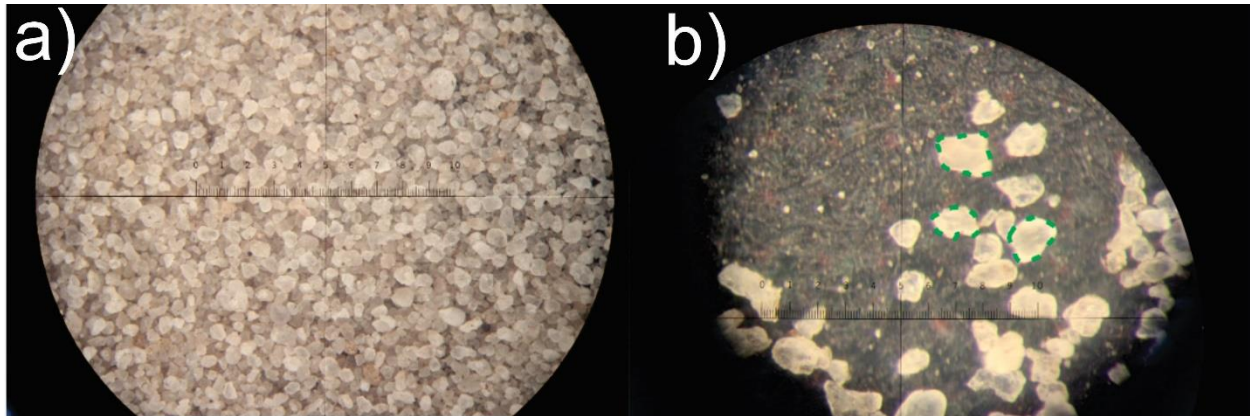
Los materiales granulares secos (arena cuarzosa y/o microesferulas de vidrio) son los ideales para representar el comportamiento frágil de la corteza superior (Dooley y Schreurs, 2012), nivel cortical donde se encuentran las rampas laterales, estructuras a modelar en este trabajo.

Para esta investigación se seleccionó la arena cuarzosa debido a su bajo costo y fácil acceso, según Byerlee (1978) desarrollan un comportamiento coulombiano, ideal para la deformación frágil, tienen el ángulo de fricción interno apropiado ( $25^\circ - 45^\circ$ ) y baja cohesión ( $C \leq 100$  Pa).

Las propiedades intrínsecas del material granular como forma y tamaño de grano, selección o calibrado y su composición son los criterios para tener en cuenta para su selección; areniscas homogéneas, redondeadas, bien seleccionadas y de grano fino a medio son las mejores para el modelamiento, ya que estos criterios influyen directamente en el ángulo de fricción interno del material ( $\varphi_f$ ) (Dooley y Schreurs, 2012).

#### 6.2.1.1 Descripción textural

Se trabajó con una arenisca silíceas de color blanco de la Formación Los Santos, recolectada en los alrededores de la vereda Mesitas de San Javier del municipio de Los Santos, Santander; clasificada según Folk, 1974 texturalmente como arenisca de grano fino a medio y composicionalmente arenisca cuarzosa ( $\text{SiO}_2 > 95\%$ ), bien - muy bien calibrada (Ver figura 19a) y partículas con forma esféricas subredondeadas con variaciones a redondeadas (Ver figura 19b).



*Figura 19.* Fotografía arenisca cuarzosa de grano fino a medio de la Fm Los Santos tomada con 0.8X de aumento, en lupa Nikon NI-150 high intensity illuminator. A. Se puede ver la buena selección de la arenisca cuarzosa seleccionada B. En verde se destaca la forma de las partículas esféricas subredondeadas a esféricas redondeadas.

### 6.2.1.2 Preparación del material granular

#### 6.2.1.2.1 Secado

Inicialmente el material granular es sometido a un proceso de secado, ya que la presencia de agua puede alterar su comportamiento mecánico; la arena cuarzosa seleccionada fue secada durante un tiempo mínimo de 8 horas continuas en un horno industrial, a una temperatura promedio de 80°C-120°C.

#### 6.2.1.2.2 Tamizado

Además del calibrado bueno a muy bueno de la arenisca cuarzosa escogida, es necesaria una segunda selección del tamaño de grano en el laboratorio para eliminar heterogeneidades. Según Dooley y Scheurs (2012) el tamaño de grano generalmente por diversos autores varía entre muy fino a medio (125  $\mu\text{m}$  – 500  $\mu\text{m}$ ); para el presente trabajo se decidió trabajar con tamaño de grano



fino ( $250 \mu\text{m} - 125 \mu\text{m}$ ), para lo cual se utilizó el tamiz No 60 U.S., con apertura de malla de  $250 \mu\text{m}$ .

#### 6.2.1.2.3 Tinturado

Para distinguir las capas del modelo y llevar un mejor seguimiento de la deformación, el material granular es coloreado con tintes industriales, color blanco y negro en este caso. Este proceso puede alterar ciertas propiedades físicas del material (ángulo de fricción interno, fricción basal, cohesión); sin embargo, esta variación se da de una manera no sistemática por lo cual es difícil de evaluar (Klinkmuller 2011).

#### 6.2.1.3 Determinación del ángulo de fricción interna.

El ángulo de fricción interno ( $\varphi_f$ ) es una propiedad única del material que se mantiene constante durante los procesos deformativos o de carga, su valor determinará el coeficiente de fricción interno ( $\mu_f = \tan \varphi$ ), una de las variables que interviene en la ecuación de fractura de Mohr – Coulomb, de ahí su importancia. Su valor depende de la forma y el tamaño de los granos, proporcional al primero e inverso al segundo (Ver ecuación); para materiales granulares redondeados varía entre  $25^\circ - 30^\circ$ , mientras que para materiales angulares entre  $35^\circ - 40^\circ$  (Klinkmuller, *et al.*, 2016).

$$\varphi_{rep} \propto \frac{\text{tamaño de grano}}{\text{redondez}}$$

Medir el  $\varphi_f$  no es fácil, ya que requiere de ensayos complejos y maquinas avanzadas (ej: aparato de Hubbert), por lo tanto, en su lugar se toma el valor del ángulo de reposo ( $\varphi_{rep}$ ), teniendo en cuenta que  $\varphi_f = \varphi_{rep}$  para materiales granulares según Solaque y Lizcano (2008). El ángulo de reposo ( $\varphi_{rep}$ ) se define como el máximo ángulo de inclinación de un montículo de material granular en condiciones estables (Rodas y Rousé, 2010).

### 6.2.1.3.1 Método del embudo

Para calcular el  $\varphi_{rep}$ , se utilizó el método del embudo, el cual consiste en verter el material granular seco en un embudo con diámetro mayor o igual a 5 veces el tamaño grano ( $D_{embudo} \geq 5D_{particula}$ ), apoyado sobre una superficie horizontal levantar lentamente para ir construyendo un montículo de material por pluviación, manteniendo siempre en contacto el embudo con la cima de la pila (Ver figura 20a) (Solaque y Lizcano, 2008). El ángulo se calcula digitalmente al tomar fotos al montículo generado, la cámara debe estar a la misma altura del montículo a una distancia menor a 1 metro.

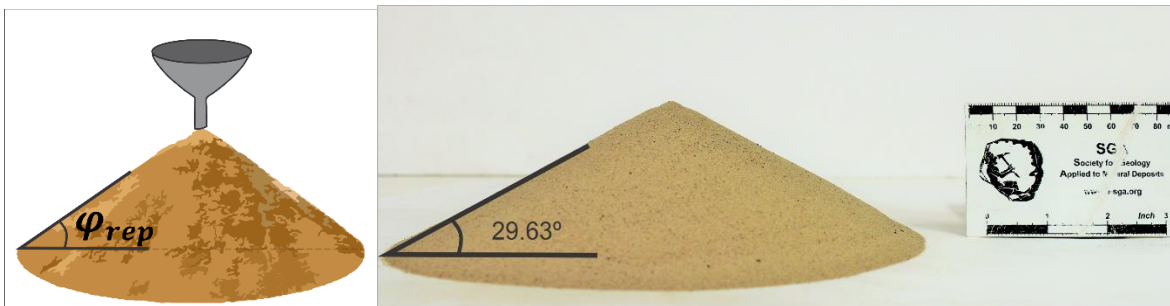


Figura 20. a) Método del embudo usado para medir ángulo de reposos del material. Adaptado de Solaque y Lizcano (2008). b) Angulo de reposo de la arenisca cuarzosa a trabajar.

Para validar estadísticamente los datos se realizaron 10 pruebas con la misma cantidad de material (1000 g), con un embudo de diámetro 2 cm ( $20\text{ mm} > 5(0.25\text{mm})$ ); se tomó el valor promedio de los ángulos obtenidos y el resultado fue  $\varphi_{rep} = 29,63^\circ$  (Ver Figura 20b).

### 6.2.2 Montaje experimental.

El montaje experimental utilizado se compone de la mesa de modelado tipo caja de arena (*sandbox*), el papel que sirve como banda transportadora del material granular y un bloque rígido que representa la estructura rampa lateral, no deformable.

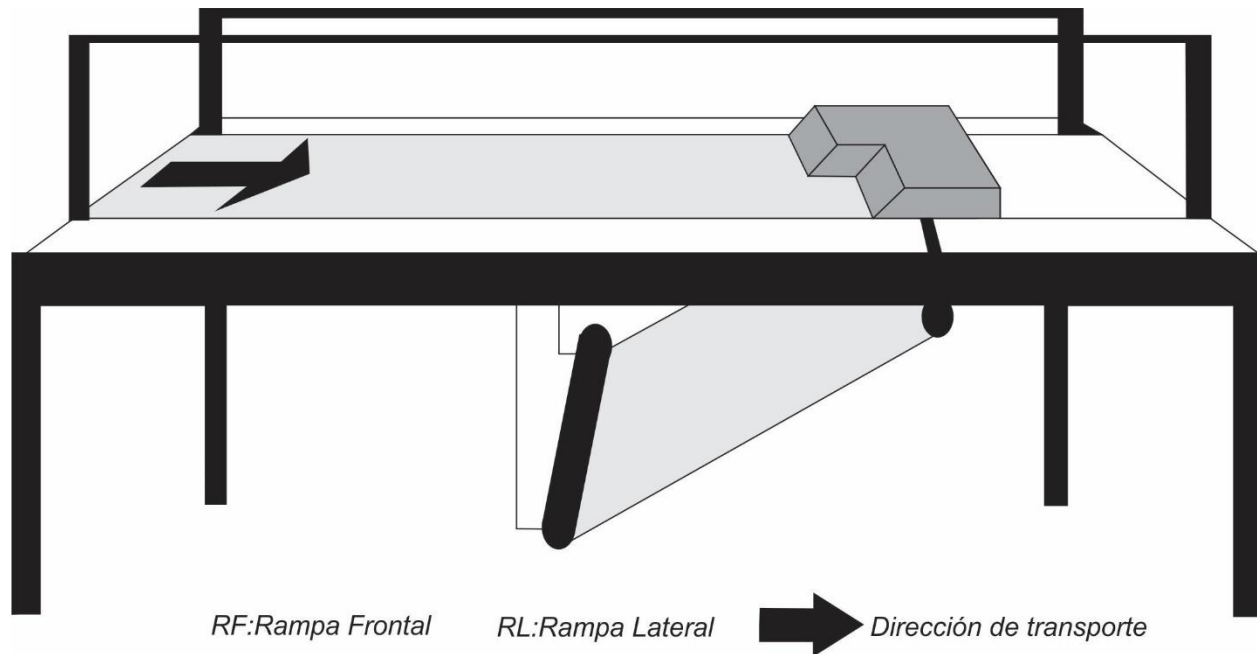


### 6.2.2.1 Mesa de modelado

Existen dos modelos de mesa de modelado tipo caja de arena (*sandbox*): subducción e “indentación”; su diferencia radica en que parte del montaje realiza el movimiento para generar la deformación, respectivamente puede realizarlo el material granular ubicado sobre película basal o una pared móvil.

Para esta investigación se utilizó la caja de arena modelo subducción, en esta configuración se tira una película basal, sobre la cual se deposita el material granular, contra un bloque rígido inmóvil, generando compresión, acortamiento y deformación de la secuencia sedimentaria representada por el material granular (Graveleau *et al.*, 2012).

Se tomó la caja de arena tipo subducción adaptada por (Anaya, 2016), la cual consta de una mesa de madera horizontal (62 cm x 135cm), dividida en dos partes, revestida en una franja interior de 44 cm con una lámina de formica que reduce la fricción entre la superficie y el papel que sirve como banda transportadora y/o despegue basal del material granular seco en dirección del bloque rígido, simulando el movimiento del basamento en compresión. El papel es impulsado por un par de rodillos, ubicados entre las dos partes de la superficie horizontal y en la zona inferior de la mesa, donde el papel es enrollado manualmente, por medio de una manivela para generar el movimiento y la deformación; la mesa se encuentra limitada lateralmente por dos paredes de vidrio (Ver figura 21).



*Figura 21.* Esquema ilustrativo de la mesa de modelado caja de arena utilizada para el desarrollo de los modelos análogos. Adaptado de Anaya (2016).

La mesa se divide en tres dominios: el dominio móvil el cual se desplaza hacia el dominio fijo, el bloque rígido en este caso, generando en el medio la zona de convergencia (Mallavieille, 1984); allí se encuentra el V.D. (discontinuidad velocidad), un punto fijo donde se origina la deformación debido al cambio abrupto de velocidades horizontales de los otros dominios. Entonces la deformación se va a propagar desde el V.D. en la zona de convergencia hacia la zona móvil (Ver figura 22).

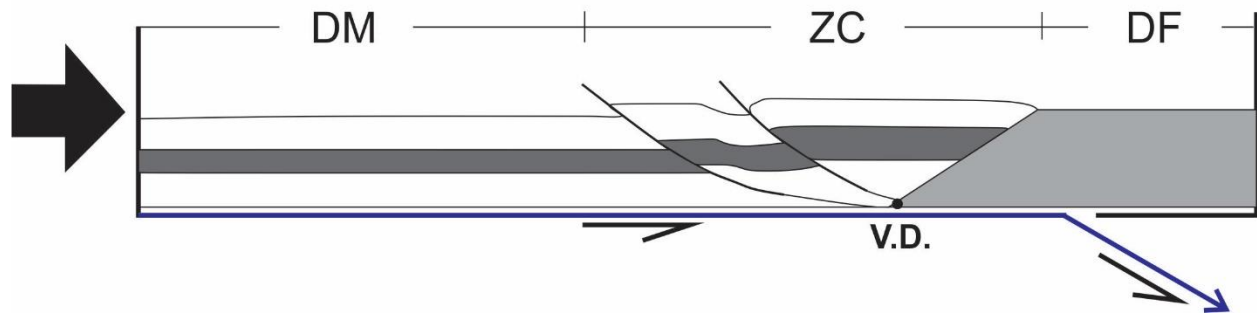


Figura 22. Esquema de los dominios de la mesa de modelado. Adaptada de Malevielle (1984)

#### 6.2.2.2 Bloque rígido

Para representar la rampa lateral conectando dos rampas frontales se tomó un bloque rígido hecho en madera, no deformable; asumiendo que el bloque yacente no sufre deformación y que el bloque colgante es el encargado de asumir la deformación, como ocurre en la naturaleza de los cinturones de cabalgamiento (Fossen, 2010). Los primeros kilómetros de la corteza continental terrestre asumen la deformación de manera frágil, por tal razón el bloque rígido tiene un espesor de 3cm, que según el factor de escala  $10^{-5}$ , corresponden a los 3 primeros km de profundidad de la corteza. Se realizaron tres bloques rígidos para modelar las rampas laterales con diferente ángulo ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ ). El bloque rígido está conformado por dos rampas frontales de  $30^\circ$  de buzamiento, interconectadas con una rampa lateral.

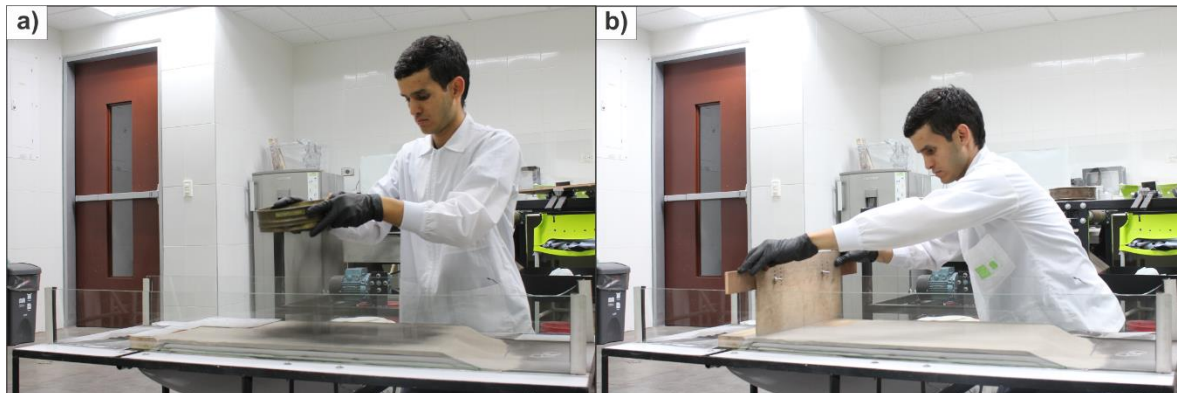
#### 6.2.2.3 Papel

Por manejabilidad y economía el papel utilizado como banda transportadora del material granular fue el papel bond, de manera análoga a (Davis *et al.*, 1984) se determinó experimentalmente el ángulo de fricción interno ( $\varphi$ ) entre el papel y el material granular, el valor de  $\varphi$  fue de  $23.1^\circ$ , para un coeficiente de fricción ( $\mu_f$ ) de 0.43. Según Gravelleau *et al.*, (2012), los valores menores de  $\mu_f$  : 0.46 corresponden a una baja fricción basal y son recomendables para modelamiento análogo.

### 6.2.3 Ejecución del modelo.

Una vez todo está establecido, se procede a disponer los niveles del material granular y deformar el modelo análogo, para obtener los cortes transversales y longitudinales es necesario solidificar el modelo y después seccionar.

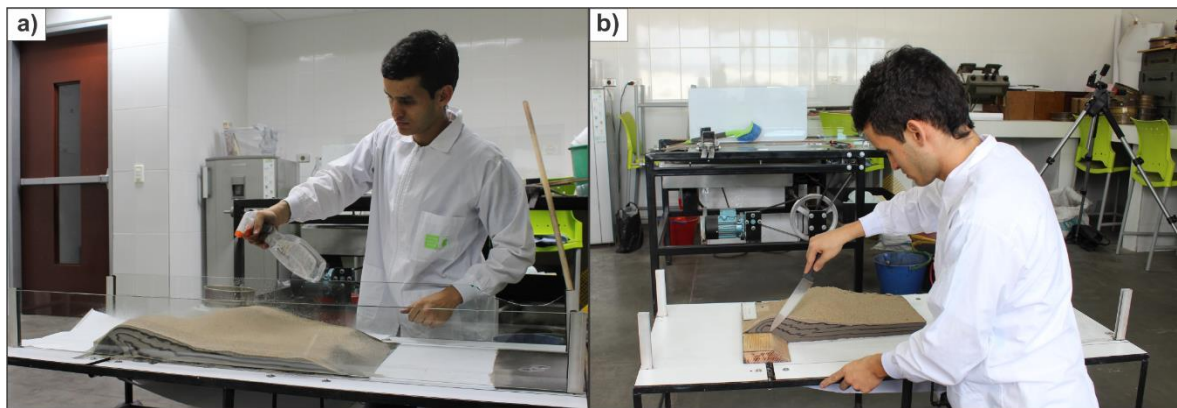
Se depositó un espesor total de 3 cm de arenisca cuarzosa (misma altura que el bloque rígido), conformado por una intercalación de 3 capas claras (1cm aprox. cada una) y 3 capas negras (1mm aprox. cada una). La depositación se realizó utilizando un tamiz de tamaño de grano un poco mayor a la arena utilizada, para dar uniformidad a la superficie (Ver figura 23a), y para lograr la horizontalidad de las capas, se utilizó una llana o nivelador (Ver figura 23b). En algunos experimentos se utilizaron marcadores superficiales para observar mejor la deformación.



*Figura 23.* a) Técnica utilizada para la depositación uniforme de los niveles de material granular.  
b) Uso del nivelador para horizontalizar las capas.

Posteriormente se procedía a deformar el modelo mediante la compresión de los niveles sedimentarios dispuestos encima del papel contra el bloque rígido inmóvil; enrollando el papel manualmente usando la manivela. La deformación se detiene solo cuando el aporte de material se haya detenido, imposibilitando el avance en sentido opuesto al del transporte tectónico. Se llevaba un seguimiento en planta a medida que avanzaba la deformación.

Una vez deformado el modelo, es necesario humedecerlo con agua para solidificarlo y posteriormente poder realizar los cortes transversales y/o longitudinales; primero se adiciona arena de mayor tamaño de grano (arena media:  $500 \mu\text{m}$ ) encima del modelo, que funciona como un filtro y protege las estructuras generadas durante la deformación, lo siguiente es rociar con agua todo el volumen del modelo con un atomizador manual hasta consolidar (Ver figura 24a) y dejar al menos 8 horas para eliminar el exceso de agua, finalmente se realizaban los cortes verticales con un cuchillo (12'') (Ver figura 24b).



*Figura 24.* a) Uso del atomizador para humedecer y solidificar el modelo final. b) Cortes transversales y longitudinales realizados al modelo final.

### 6.3 Fase 3: Análisis de resultados

Como producto final se obtuvo el registro fotográfico de los cortes (transversales y longitudinales) y del seguimiento de la deformación en planta (Ver figura 25a); a partir de esta información, se generaron modelos digitales en tres dimensiones de cada configuración ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ ) con el fin de visualizar mejor la configuración final obtenida. Se analizaron estos resultados obtenidos y se contrastaron entre sí, para conseguir la caracterización de las rampas laterales, y se realizó la comparación con prototipos naturales documentados para obtener analogías válidas.

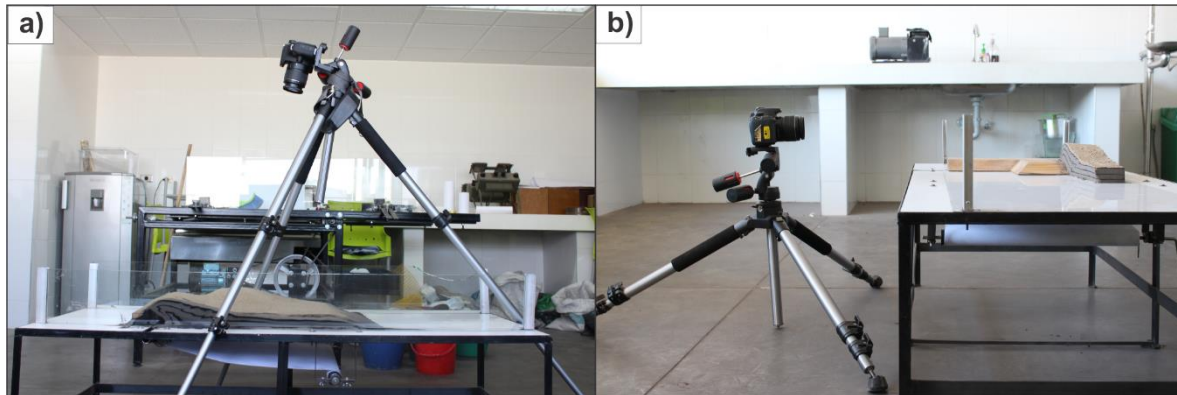


Figura 25. a) Montaje de la cámara Canon EOS REBEL T5 ISO-3200 para registrar la deformación en planta. b) Montaje para registrar cortes verticales (transversales y longitudinales).

## 7 Resultados.

Se modeló a partir de cajas de arena (*sandbox*) la deformación que ocurre en las rampas laterales para una secuencia sedimentaria de la corteza superior. Se realizaron tres tipos de experimentos variando únicamente el ángulo de la estructura rampa lateral ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ ) representada por un bloque rígido no deformable de madera.

La configuración de los modelos fue de 3 cm de espesor, la misma altura que el bloque rígido, conformados por 3 niveles de 1 cm de color blanco intercalados con niveles de aproximadamente 2mm de color negro, para resaltar la deformación. La longitud inicial entre 70-80cm y el ancho de 40 cm, ancho del bloque rígido. Se ubicaba el bloque rígido de tal manera que las dos rampas frontales quedaban perpendiculares y la rampa lateral paralela a la dirección de avance (Ver figura 26). La compresión se llevó a cabo de forma manual.

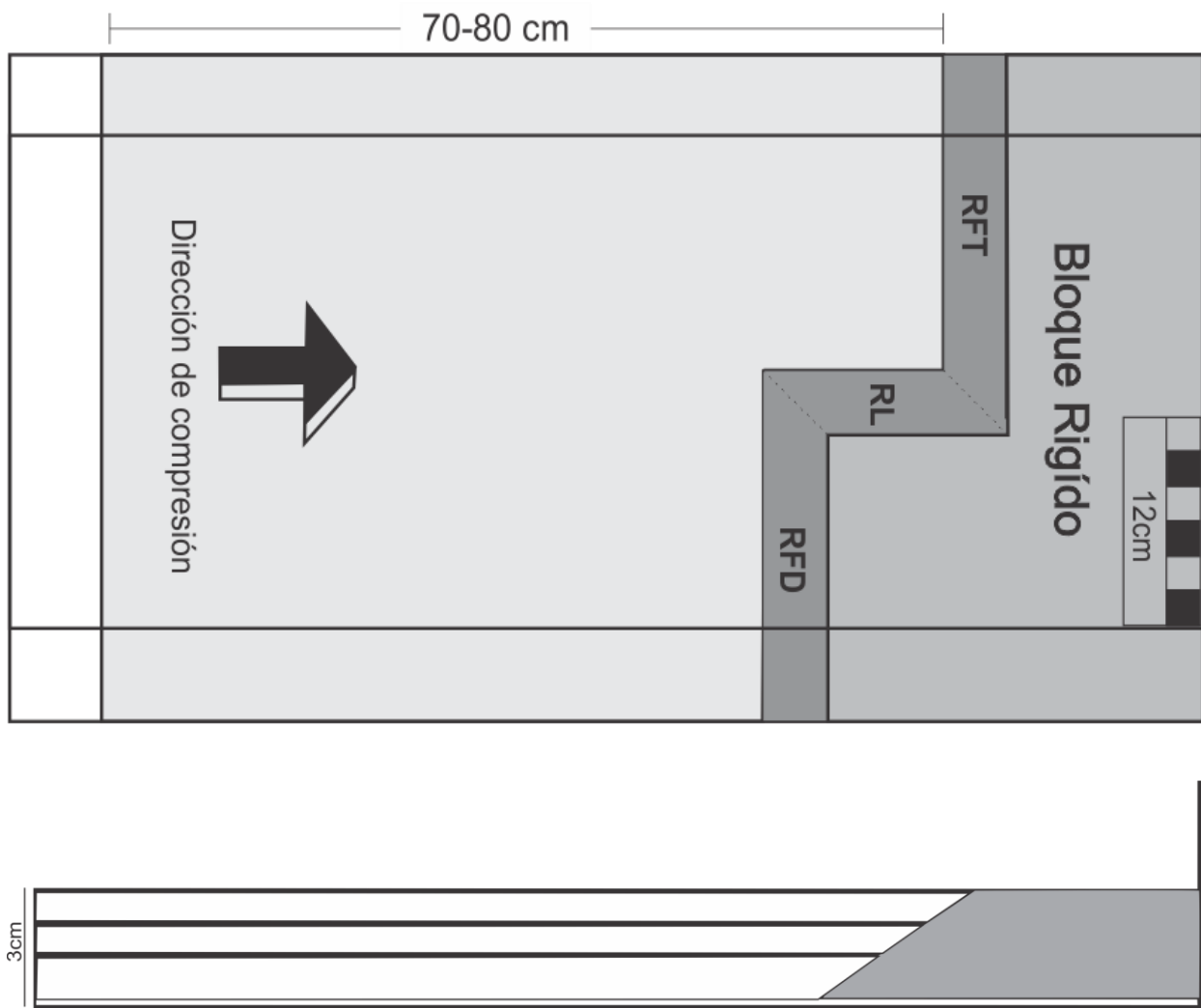


Figura 26. Configuración inicial en planta y en corte de los modelos realizados. Rectángulo negro en planta indica la región analizada en cada uno de los modelos. (RFD: Rampa frontal delantera, RFT: Rampa frontal trasera).

Debido a que la fricción lateral generada por los vidrios no puede ser controlada totalmente, las fallas desarrollan una curvatura pronunciada hacia adentro en la vista en planta; según Cubas *et al.*, (2010) este efecto se considera despreciable para modelos friccionales, como este caso, mientras el análisis de la deformación se realice en el centro de la configuración (Graveleau *et al.*, 2012). Por tal razón, para el análisis de la deformación en planta no se tuvieron en cuenta los 5 cm más externos a cada lado, equivalente a 5 km en la naturaleza. (Ver figura 26).



Para lograr fiabilidad de los resultados obtenidos se realizaron un total de 36 experimentos, los últimos 18 con registro fotográfico, 6 para cada ángulo de la rampa lateral, se seccionaron 3 con cortes transversales y 3 con cortes longitudinales; además se llevaba un seguimiento fotográfico en planta a medida que avanzaba la deformación.

Para medir la deformación total sufrida por cada uno de los modelos se tomaron en cuenta las ecuaciones de estiramiento ( $s$ ) (*stretch*) y elongación ( $e$ ) (Ver sección 5.1.2.1). El dato de longitud inicial y final se tomó teniendo en cuenta solo la parte deformable del modelo, desde la rampa frontal trasera; es decir, sin contar la longitud del bloque rígido ya que este no sufre deformación. Como lo muestran los resultados de la tabla 1 todos los experimentos sufrieron acortamiento ( $s < 1$ ), generalmente entre 25-30 cm, equivalente a un 35-40 % de acortamiento de su longitud inicial.

Tabla 1

*Datos de la longitud inicial y final para calcular el estiramiento ( $s$ ) y la elongación ( $e$ ) de cada uno de los modelos.*

Experimento	$L_f(cm)$	$L_o(cm)$	$\Delta L(cm)$	$s$	$e(\%)$
RL_30_01	75	45	- 30	0.60	- 40.00
RL_30_02	80	50	- 30	0.62	- 37.50
RL_30_03	80	50	- 30	0.62	- 37.50
RL_30_04	80	55	- 25	0.68	- 31.25
RL_30_05	75	50	- 25	0.66	- 33.33
RL_30_06	80	50	- 30	0.62	- 37.50
RL_45_01	70	45	- 25	0.64	- 35.71
RL_45_02	80	55	- 25	0.68	- 31.25
RL_45_03	80	55	- 25	0.68	- 31.25
RL_45_04	80	55	- 25	0.68	- 31.25
RL_45_05	80	50	- 30	0.62	- 37.50
RL_45_06	80	50	- 30	0.62	- 37.50
RL_60_01	75	50	- 25	0.66	- 33.33
RL_60_02	65	40	- 25	0.61	-38.46
RL_60_03	80	50	- 30	0.62	- 37.50
RL_60_04	80	45	- 35	0.56	- 43.75
RL_60_05	85	65	- 20	0.76	- 23.52
RL_60_06	70	45	- 25	0.64	- 35.71



*Nota:* \* La nomenclatura para cada experimento corresponde con el modelo de rampa lateral (RL), el ángulo de la rampa lateral (30°, 45°, 60°) y el número del experimento (1-6).

Para analizar la deformación de cada modelo, se realizó un análisis de las estructuras en planta, sección transversal y sección longitudinal; además con el fin de tener una mejor visualización y entendimiento de la configuración estructural final del modelo se realizaron unos bloques diagramas en tres dimensiones de las estructuras descritas en los cortes transversales y en los cortes longitudinales.

*Nota:* Los resultados (en planta, sección transversal y longitudinal) de los modelos de rampa lateral con ángulo de 30°, 45° y 60° fueron muy similares. Por lo tanto, se describen los resultados de rampa lateral 30° y los resultados de los modelos 45° y 60° se presenta tan solo una breve descripción; más adelante se muestran las ligeras diferencias encontradas entre ellos.

## 7.1 Rampa Lateral: 30°

Según diversos autores como Butler (1982) y McClay (1992) las rampas laterales tienen un ángulo de 10°-30° respecto a la horizontal, ya que estos son los ángulos relacionados para las rampas frontales y oblicuas (Fermor, 1999); partiendo de lo anterior, esta configuración de rampa lateral con ángulo de 30° corresponde a la más aceptada de las tres configuraciones modeladas.

Para analizar la deformación en planta y en sección transversal se tomó el modelo RL\_30\_05, para ver lo que ocurre longitudinalmente el modelo seleccionado fue RL\_30\_04.

### 7.1.1 Deformación progresiva en planta

Después de los primeros 5 cm de acortamiento (Figura 27b) se generaron de manera simultánea en la rampa frontal delantera un cabalgamiento y tres retrocabalgamientos, y en la rampa frontal



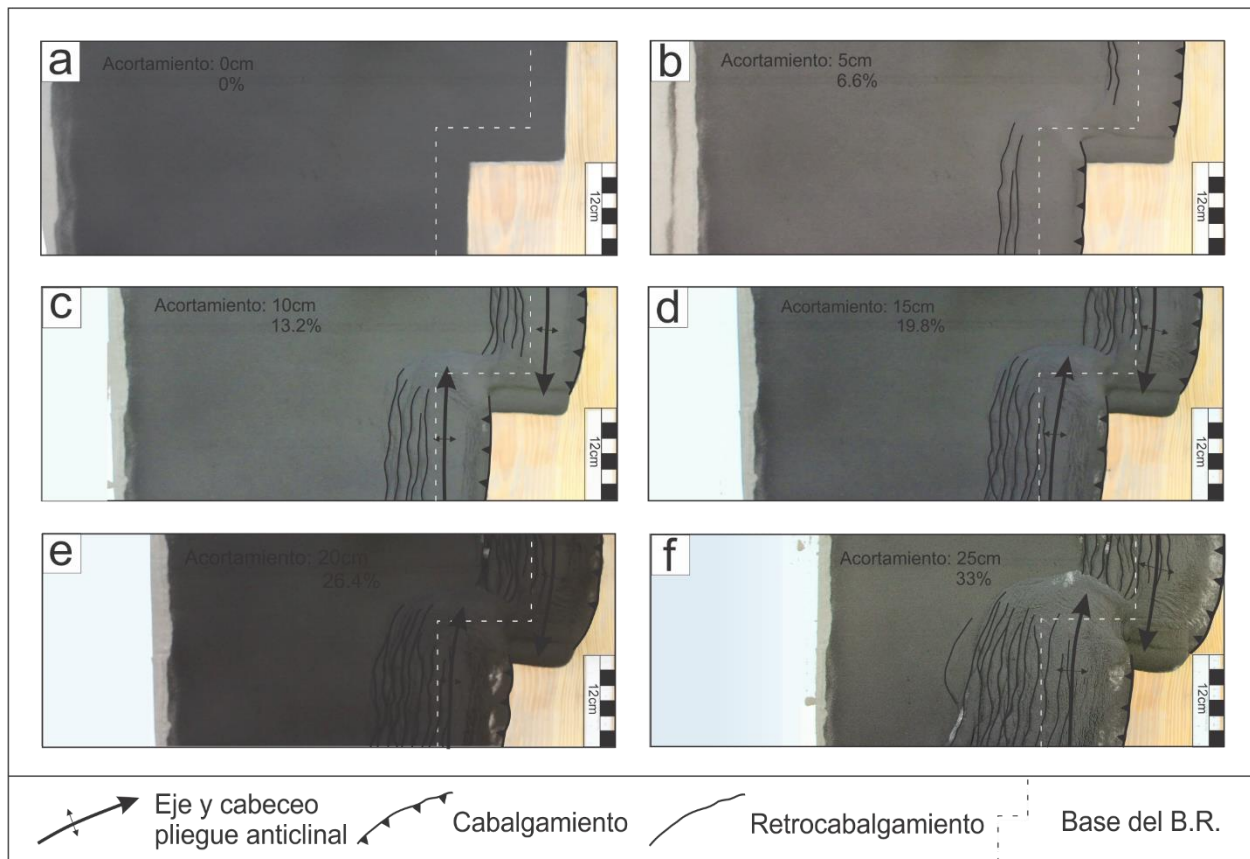
trasera un cabalgamiento y dos retrocabalgamientos, generando dos estructuras tipo *pop-up* expresadas en superficie como dos crestas lineales interrumpidas en la zona de la rampa lateral. Los cabalgamientos y los retrocabalgamientos se ubican paralelos respecto a las rampas frontales, y entre ellos mismos.

En la figura 27c, después de 10 cm de acortamiento, se evidencia la formación de un par de nuevos retrocabalgamientos en cada rampa frontal, siguiendo la secuencia de los desarrollados anteriormente y con geometría similar, generando un aumento en la anchura de las crestas y la formación de un pliegue tipo anticlinal relacionado a cada una de las rampas frontales. El eje de los pliegues anticlinales son paralelos a la rampa frontal y sus charnelas son horizontales hasta la zona de la rampa lateral donde terminan abruptamente y desarrollan cabeceo en direcciones opuestas.

A medida que avanza la deformación (figuras 27d y 27e) se puede ver como los anticlinales avanzan en cada vez más en la zona de la rampa lateral, como resultado de la propagación lateral de la estructura; además los ejes de los pliegues anticlinal desarrollan flexión o curvatura hacia la zona de la rampa lateral, se generan nuevos retrocabalgamientos con la misma secuencia de sus antecesores, aunque exhibiendo un trazo menos recto, más irregular; a medida que se van formando estos nuevos retrocabalgamientos, los más antiguos van avanzando en su ubicación en la misma dirección del transporte tectónico. También se observa como los cabalgamientos principales desarrollan una geometría convexa hacia la parte trasera (zona de *foreland* o antepaís) más marcado para el cabalgamiento relacionado a la rampa frontal trasera.

La figura 27f muestra el estado final del modelo después de 25 cm de acortamiento, equivalente a un 33% de su longitud inicial; se puede observar la configuración general del modelo conformada

por dos rampas frontales y una rampa lateral, cada rampa frontal desarrolla un cabalgamiento de geometría convexa respecto a la zona del antepaís con una secuencia de retrocabalgamientos dispuestos uno tras otro, este arreglo se expresa en la superficie como dos crestas con terminaciones con forma curva, allí se generan dos anticlinales interrumpidos abruptamente y con cabeceo y flexión de su eje en direcciones opuestas en la zona de la rampa lateral.



*Figura 27.* Fotografías y mapeo estructural del modelo, rampa lateral 30°, en planta en diferentes momentos de la evolución deformativa. a) Estado inicial del modelo. b) c) d) y e) Configuración estructural durante diferentes momentos (5, 10, 15 y 20 cm de acortamiento) de la deformación compresiva. F) Estado final del modelo (25 cm acortamiento, 33% de la longitud inicial). Experimento RL\_30\_05.



## 7.1.2 Estado final

### 7.1.2.1 Secciones transversales

Los cortes que atraviesan la rampa frontal delantera (figura 28a) y la rampa frontal trasera (figura 28d) exhiben una configuración estructural muy similar, la deformación es asumida por un cabalgamiento principal, que genera plegamiento por flexura de falla de las capas en una estructura anticlinal, del cual surgen múltiples retrocabalgamientos dispuestos uno detrás del otro. Los primeros retrocabalgamientos se formaron hacia la base de la rampa, en la zona V.D, pero la continua deformación generó que escalaran a lo largo de la rampa y se verticalizaran, ubicándose en la parte superior de la rampa y con un alto ángulo. En la rampa frontal trasera (Figura 28d, C4 y C4) se desarrollaron 10 retrocabalgamientos, mientras en la rampa frontal delantera (Figura 28a, C14 y C16) 13 retrocabalgamientos.

Los cortes que atraviesan la rampa lateral (figura 28c) desarrollan una configuración estructural compleja, ya que involucra las dos rampas frontales. La rampa frontal delantera es la primera en asumir el acortamiento, por lo cual es sometida a una mayor deformación que la rampa frontal trasera, por tal razón en esta zona la rampa frontal delantera desarrolla hasta 3 cabalgamientos. A medida que se avanza en la rampa lateral (figura 28c, C8 hasta C12) en la rampa frontal trasera va disminuyendo la deformación, los retrocabalgamientos más jóvenes se comportan como fallas ciegas (figura 28c, C8), disminuyen los retrocabalgamientos hasta no evidenciarse y la deformación se acomoda por plegamiento tipo por flexura de falla (C9-C11, figura 28c).

En un modelo ideal el corte C8 solo debería exhibir deformación en una de las rampas frontales (rampa frontal trasera), ya que estrictamente no atraviesa la rampa lateral donde si intervienen ambas estructuras; contrario a lo anterior, se puede ver que el corte C8 intersecta una parte de la rampa frontal delantera, lo que está indicando la propagación lateral que desarrollan las rampas

frontales en sus culminaciones debido al cabeceo de los anticlinales, esto genera como consecuencia la desviación de la estructura lateral en sentido de dicha propagación lateral, sentido horario en este caso.

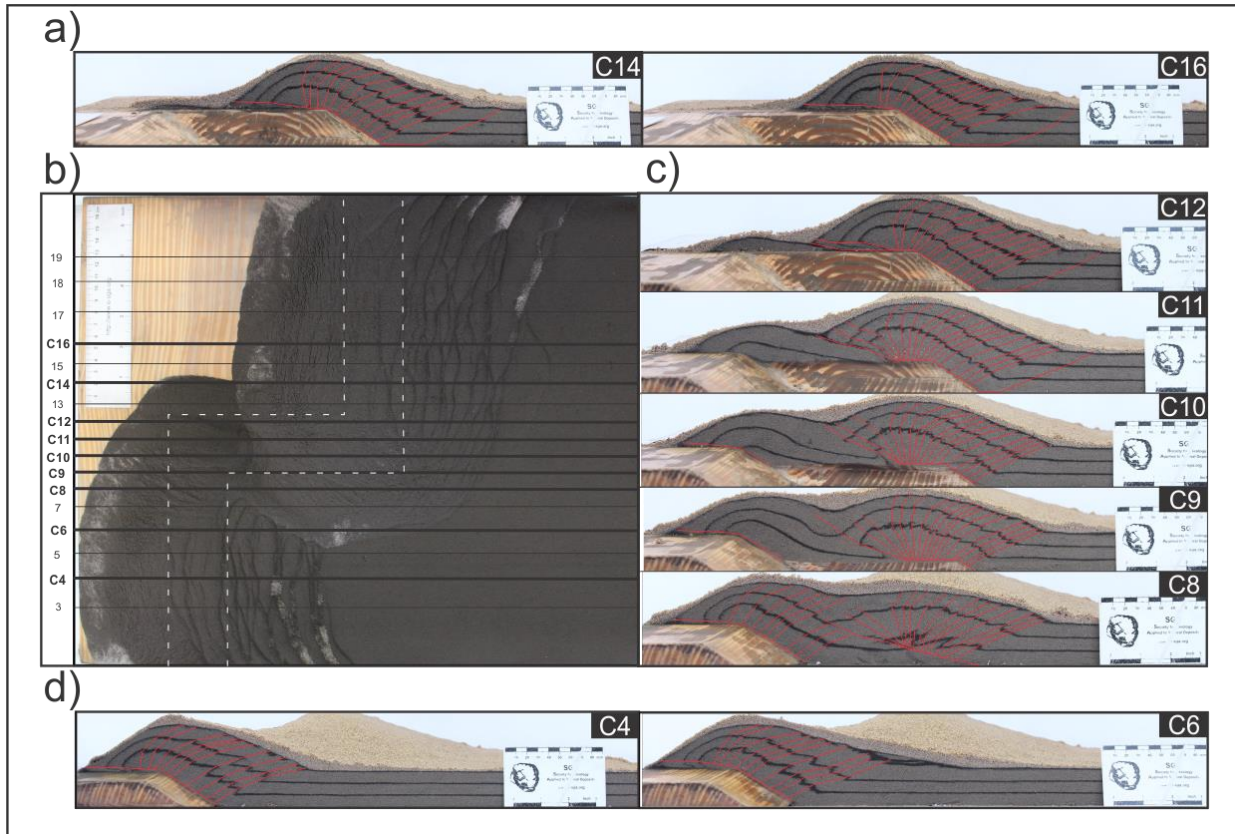
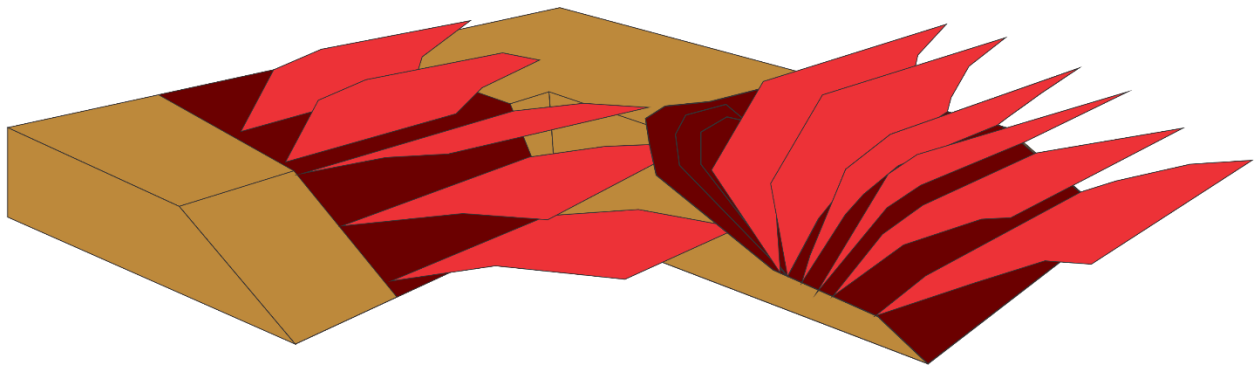


Figura 28. Cortes transversales del estado final del modelo rampa lateral 30°. a) C14, C16. Cortes transversales en la rampa frontal delantera. b) Imagen en planta del estado final del modelo RL\_30\_05. Los trazos negros son los cortes realizados. El trazo blanco de la imagen en planta corresponde a la ubicación de las rampas. c) C8 – C12. Cortes transversales en la zona de la rampa lateral. d) C4, C6. Cortes transversales en la rampa frontal trasera. Experimento RL\_30\_05. En los cortes se destacan con trazos de color rojo los cabalgamientos y retrocabalgamientos.

En la figura 29 se observa un bloque diagrama en tres dimensiones de la estructura final generada, se observa claramente la secuencia de retrocabalgamientos uno detrás del otro, generados encima

de las dos rampas frontales, los mas verticales corresponden a los mas antiguos y se ubican en la parte superior de la rampa frontal, los mas juvenes se van formando hacia la base.

El modelo permite destacar que la interseccion de la rampa frontal delantera con la rampa lateral asume una mayor deformacion, mientras la zona de la rampa frontal trasera con la rampa lateral no presenta fallamiento, por los cortes transversales se pudo observar que alli se acomoda la deformacion por plegamiento.

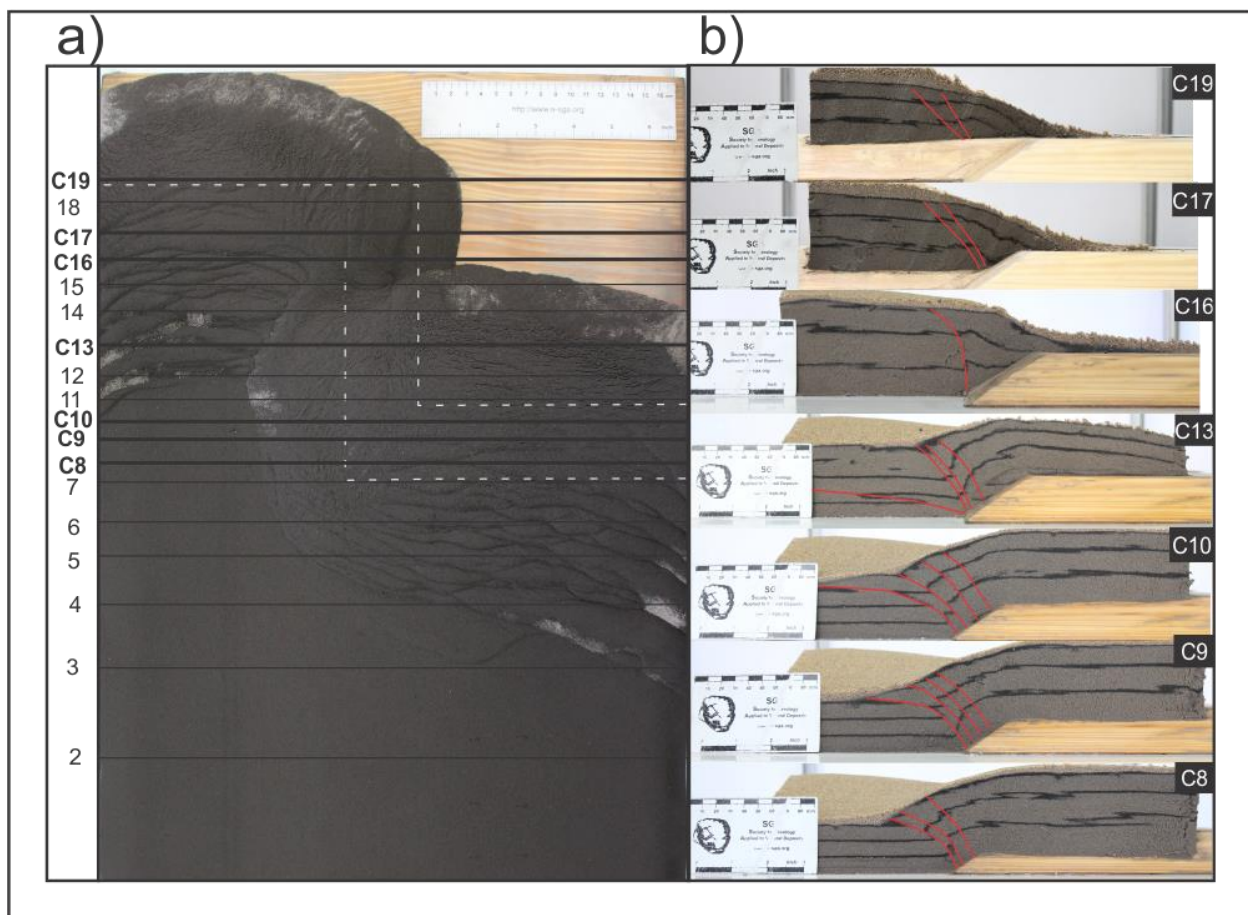


*Figura 29.* Bloque diagrama en tres dimensiones, representando las estructuras descritas en los cortes transversales. En café el bloque rígido, en rojo oscuro los cabalgamientos y en rojo los retrocabalgamientos.

#### 7.1.2.2 Secciones longitudinales

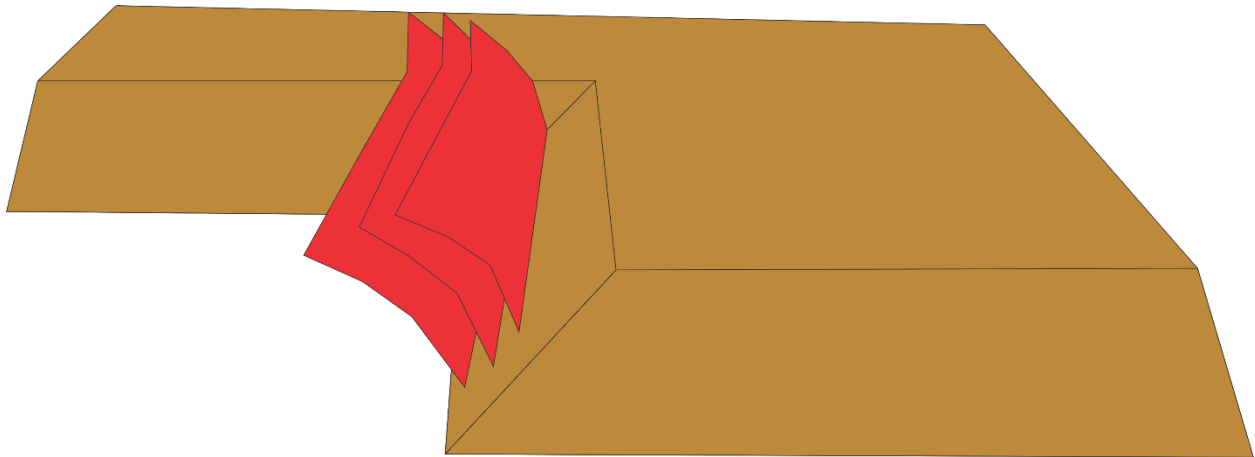
Una de las características encontradas en los cortes longitudinales a las estructuras es que los niveles de color negro, que sirven como referencia, presentan un trazo irregular encima de las rampas frontales, tanto la rampa frontal trasera (figura 30, C16, C17 zona izquierda) y como la delantera (figura 30, C8, C9, C10 zona derecha); esto ocurre debido a que en esta zona se ubican la serie de retrocabalgamientos y el trazo de estas estructuras no es del todo rectilíneo, como se puede ver en las fotografías en planta (Ver figura 30a), presentan una forma irregular respecto a la horizontal. Además, que la vista es longitudinal a la estructura, diferente a cuando el corte se realiza perpendicular a está.

Como rasgo principal encontrado a partir de los cortes longitudinales a la estructura, se destaca la presencia de fallas inversas de medio-alto ángulo con sentido opuesto a la pendiente de la rampa lateral (Ver figura 30b, trazos de color rojo). Para una mejor visualización de estas estructuras se generó un bloque diagrama en tres dimensiones de los cortes longitudinales (Ver figura 31), se puede observar que estas fallas se localizan solo en la zona de la rampa lateral, no se extienden más allá, y que son paralelas a la rampa lateral, transversales a las estructuras principales.



*Figura 30.* Cortes longitudinales al estado final del modelo rampa lateral 30°. a) Imagen en planta del estado final del modelo RL\_30\_04. Los trazos negros son los cortes realizados, en negrita los destacados en la imagen. El trazo blanco corresponde a la ubicación de las rampas. b) Cortes longitudinales realizados a la estructura. En rojo se trazaron unas fallas inversas descubiertas en esta vista. Experimento RL\_30\_04. C16

Otro rasgo son los monoclinales encontrados en las terminaciones laterales de las rampas frontales y el cabeceo del anticlinal generado encima; en los cortes C8, C9 y C10 se puede ver un monoclinal buzando en la misma dirección de la rampa lateral relacionado a la rampa frontal delantera; de igual manera, se puede ver un monoclinal en los cortes C16, C17 y C19 relacionado a la rampa frontal trasera, buzando en dirección opuesta a la rampa lateral. Estos monoclinales se originan debido al cabeceo de los anticlinales relacionados a las rampas frontales.



*Figura 31.* Bloque diagrama en tres dimensiones, representando la estructuras descritas en los cortes longitudinales. En café el bloque rígido y en rojo las fallas inversas de medio-alto angulo en sentido opuesto a la pendiente de la rampa lateral.

## 7.2 Rampa Lateral: 45°

Según Burg, (2018) las rampas en general presentan ángulos de 30°-45°, este modelo se realizó para cubrir esta configuración. Para analizar la deformación en planta y en sección transversal se tomó el modelo RL\_45\_05, para ver lo que ocurre longitudinalmente el modelo seleccionado fue RL\_45\_04.



### 7.2.1 Deformación progresiva en planta

La deformación progresiva en planta de este modelo durante su acortamiento (Ver figura 32) es bastante similar a la descrita para el modelo anterior (figura 27), se generan las mismas estructuras, en el mismo tiempo y con la misma orientación.

Inicialmente se generaron un cabalgamiento y un par de retrocabalgamientos relacionados a las rampas frontales, describiendo dos estructuras *pop-up* (Figura 32b). Con el posterior avance de la deformación (figura 32c y 32d) se formaron más retrocabalgamientos en secuencia con los anteriores, uno detrás del otro, y se formaron un anticlinal encima de cada rampa frontal, con cabeceo en la zona de la rampa lateral. Todas las estructuras generadas (cabalgamientos, retrocabalgamientos y el anticlinal) son paralelos entre sí y respecto a la rampa frontal.

Posteriormente (figura 32e) el eje de los anticlinales desarrolla una flexión en la zona de la rampa lateral y los cabalgamientos una geometría convexa hacia el antepaís. Igualmente, los retrocabalgamientos de la rampa frontal delantera que se empiezan a curvar y exhibir un trazo menos regular.

En la figura 32f se muestra el estado final deformado del modelo, como rasgos principales además del cabeceo y flexión en direcciones opuestas de los anticlinales en la zona de la rampa lateral, encontrados en el modelo anterior, se destaca la curvatura que también toman los retrocabalgamientos relacionados a la rampa frontal delantera en la zona de la rampa lateral; esta flexión va en el mismo sentido que el eje del anticlinal. Por otro lado, sobresale la formación de un retrocabalgamiento en la rampa frontal trasera en el mismo sentido y paralelo a sus anteriores, pero distante de los otros retrocabalgamientos previos.

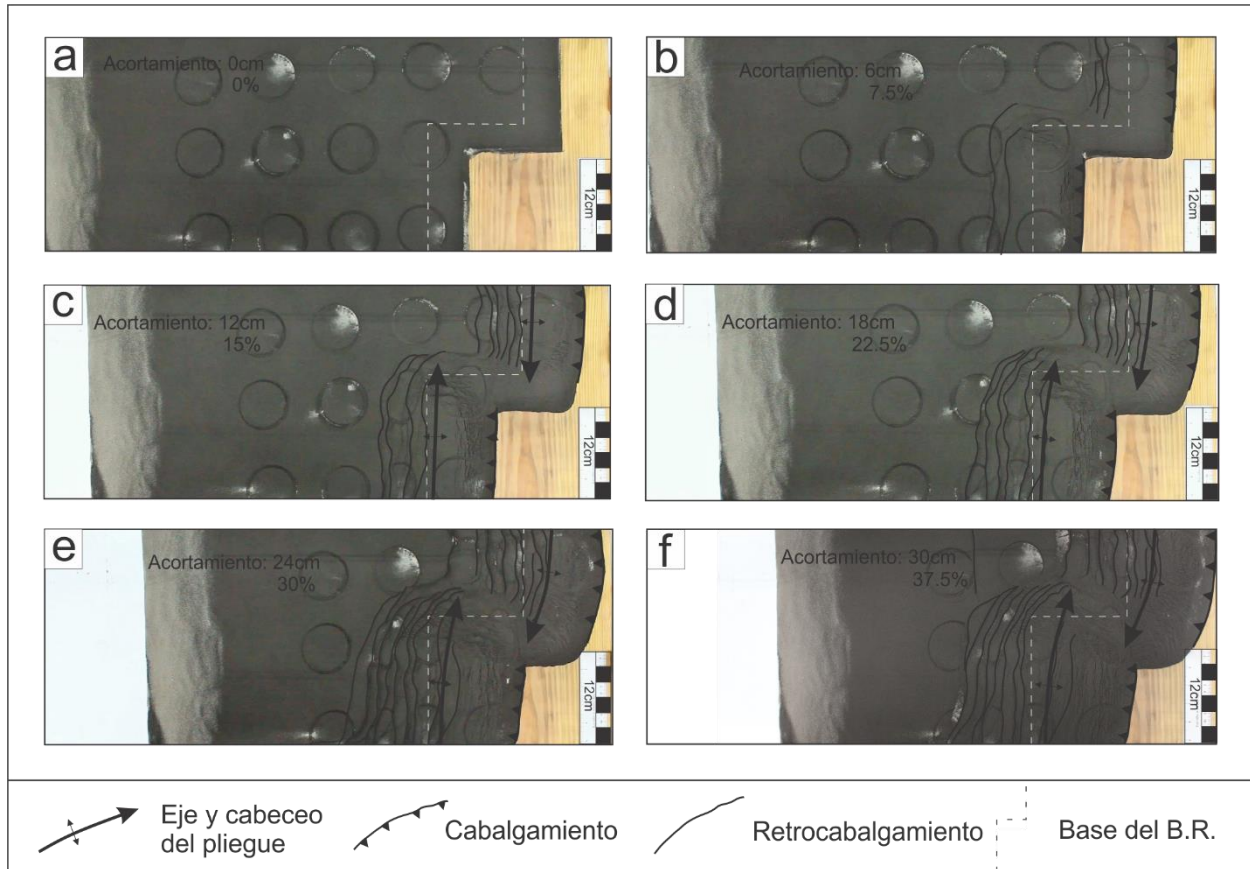


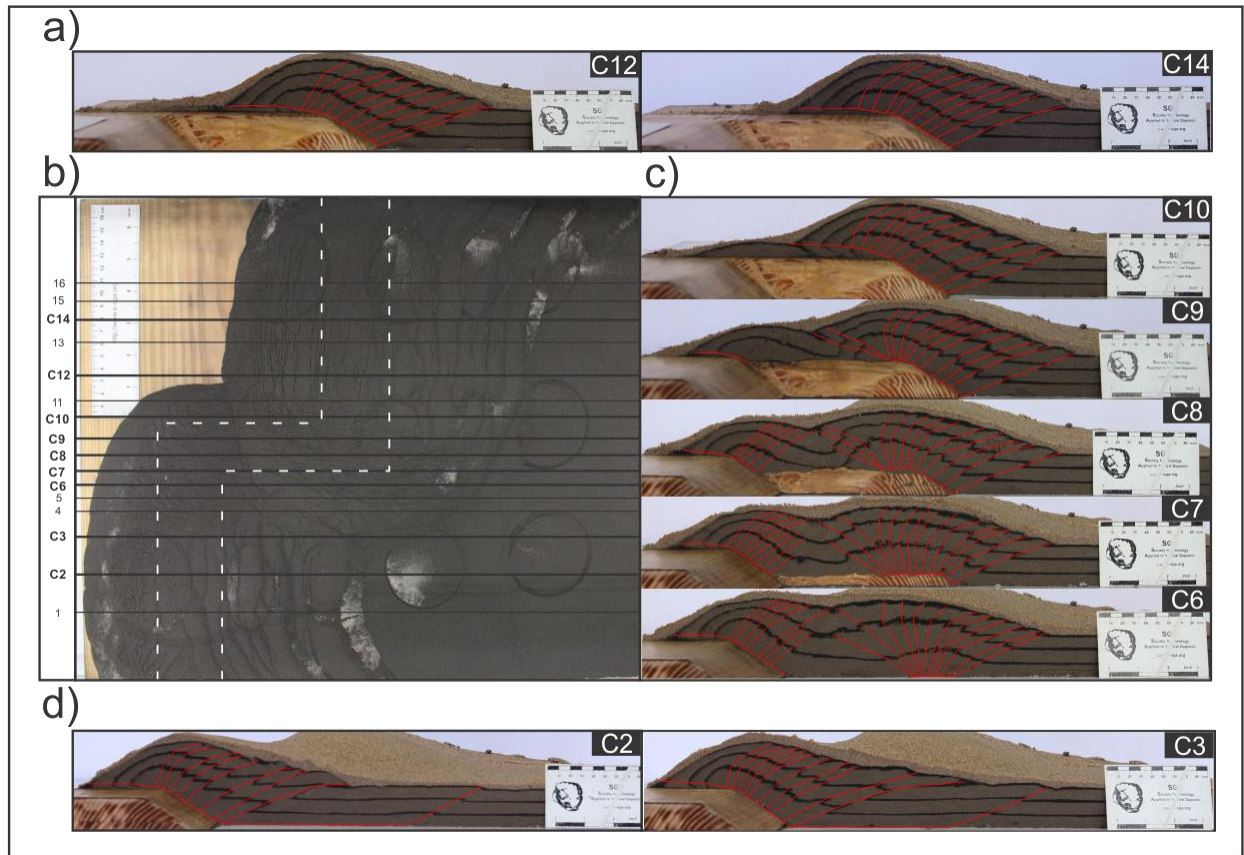
Figura 32. Fotografías y mapeo estructural del modelo en planta. a) Estado inicial. b) c) d) y e) Diferentes momentos de la deformación compresiva (6, 12, 18 y 24 cm de acortamiento). f) Estado final (30 cm acortamiento). Experimento RL\_45\_05.

## 7.2.2 Estado final

### 7.2.2.1 Secciones transversales

De la rampa frontal delantera surgen 10 retrocabalgamientos (Figura 33a), mientras en la rampa frontal trasera se desarrollaron 9 retrocabalgamientos, incluyendo el retrocabalgamiento que se encuentra un poco distante de los otros (figura 33d). En la rampa frontal trasera los retrocabalgamientos se comportan como fallas ciegas en los cortes C6, C7, C8 (figura 33c), se genera una zona triangular y desaparecen en la parte superior de la rampa lateral reemplazados por plegamiento tipo flexura de falla (C9 y C10, figura 33c). Los cortes C6 y C10 interceptan una parte

de la rampa frontal delantera y una parte de la rampa frontal trasera, respectivamente, evidenciando la propagación lateral de las rampas frontales y generando desviación de la rampa lateral en sentido horario.



*Figura 33.* Cortes transversales del estado final del modelo. a) C12, C14. Cortes trasnversales en la rampa frontal delantera. b) Imagen en planta del estado final del modelo. c) C6 – C10. Cortes transversales en la rampa lateral. d) C2, C3. Cortes trasnversales en la rampa frontal trasera. Experimento RL\_45\_05.

#### 7.2.2.2 Secciones longitudinales

Los cortes longitudinales evidencian las mismas estructuras que las encontradas en los cortes longitudinales del modelo anterior (Ver figura 34).

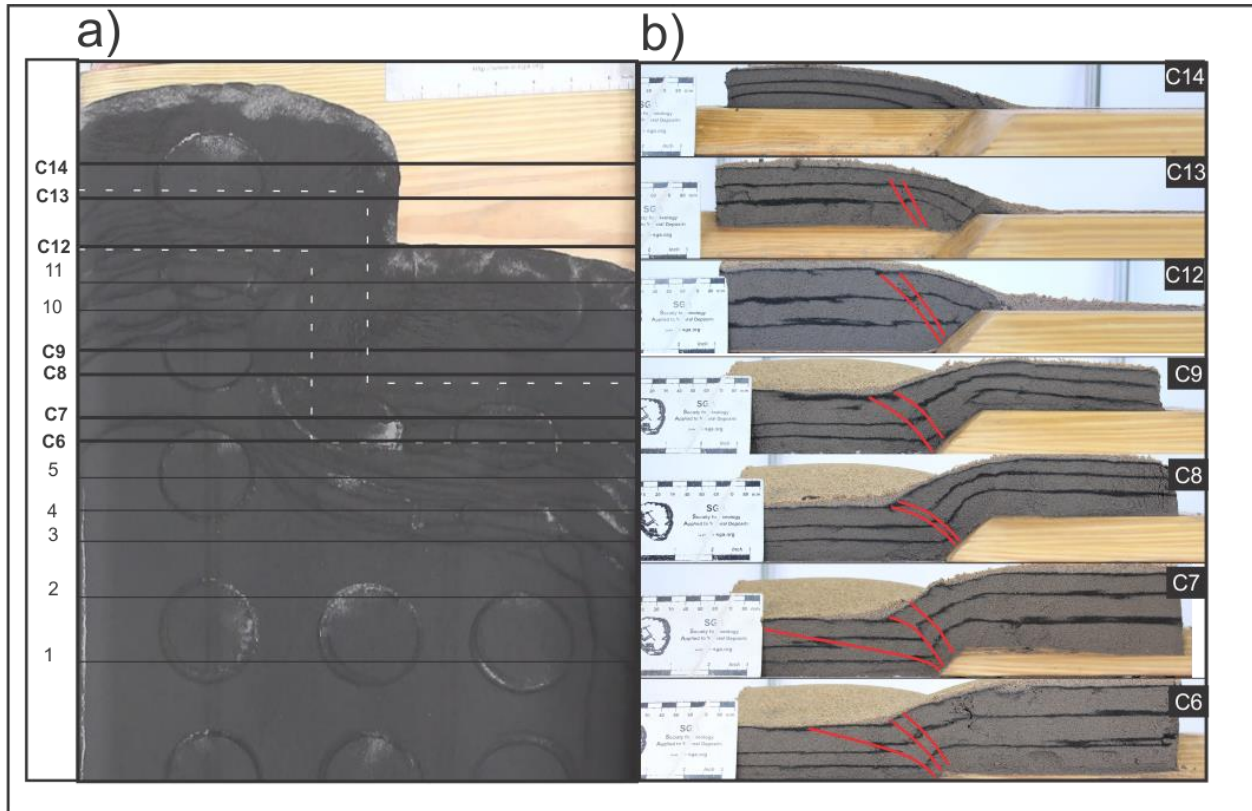


Figura 34. Cortes longitudinales del estado final. a) Imagen en planta del estado final del modelo RL\_30\_04 b) Cortes longitudinales realizados. Experimento RL\_45\_04.

### 7.3 Rampa Lateral: 60°

#### 7.3.1 Deformación progresiva en planta

La deformación progresiva en planta de este modelo durante su acortamiento es bastante similar a la descrita para los modelos anteriores (Ver figura 35), se generan las mismas estructuras, en el mismo orden y con la misma orientación.

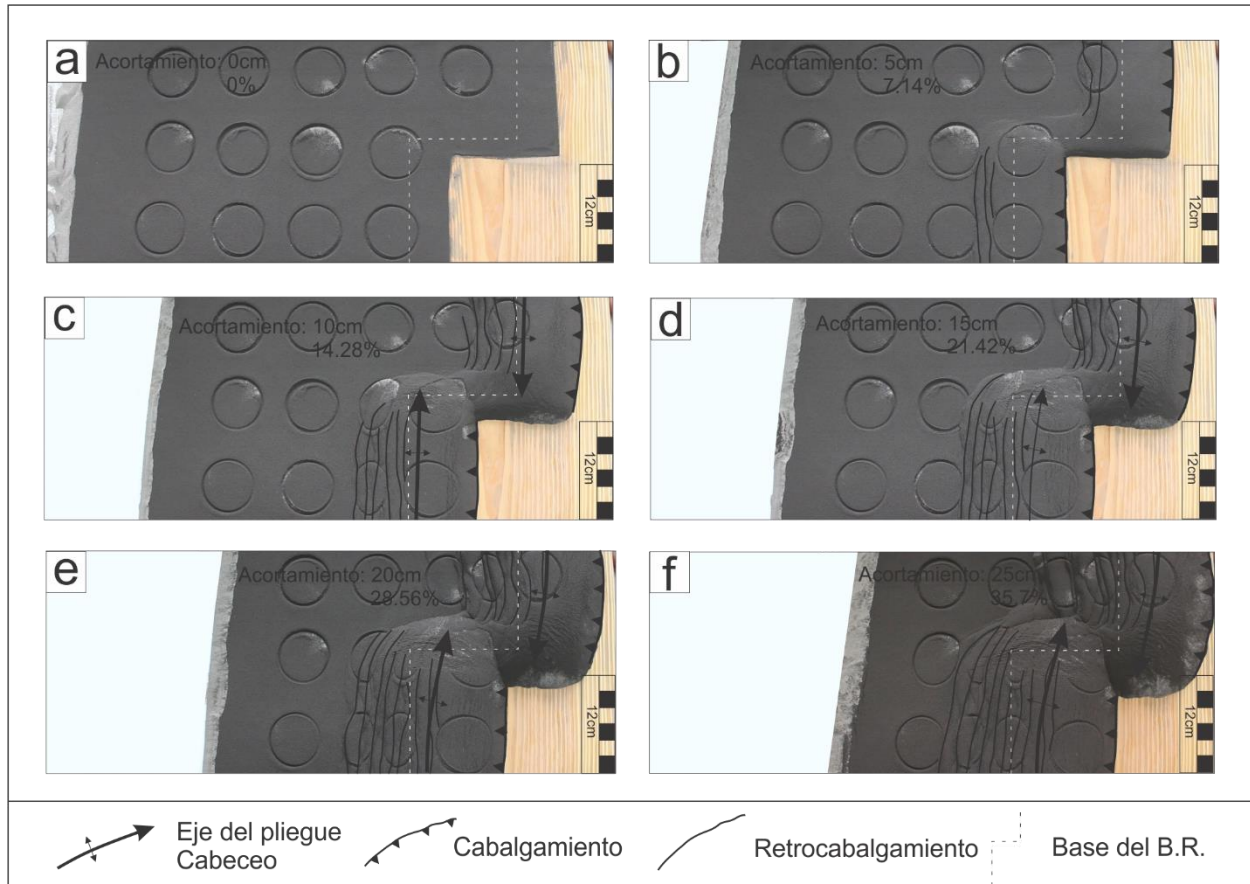


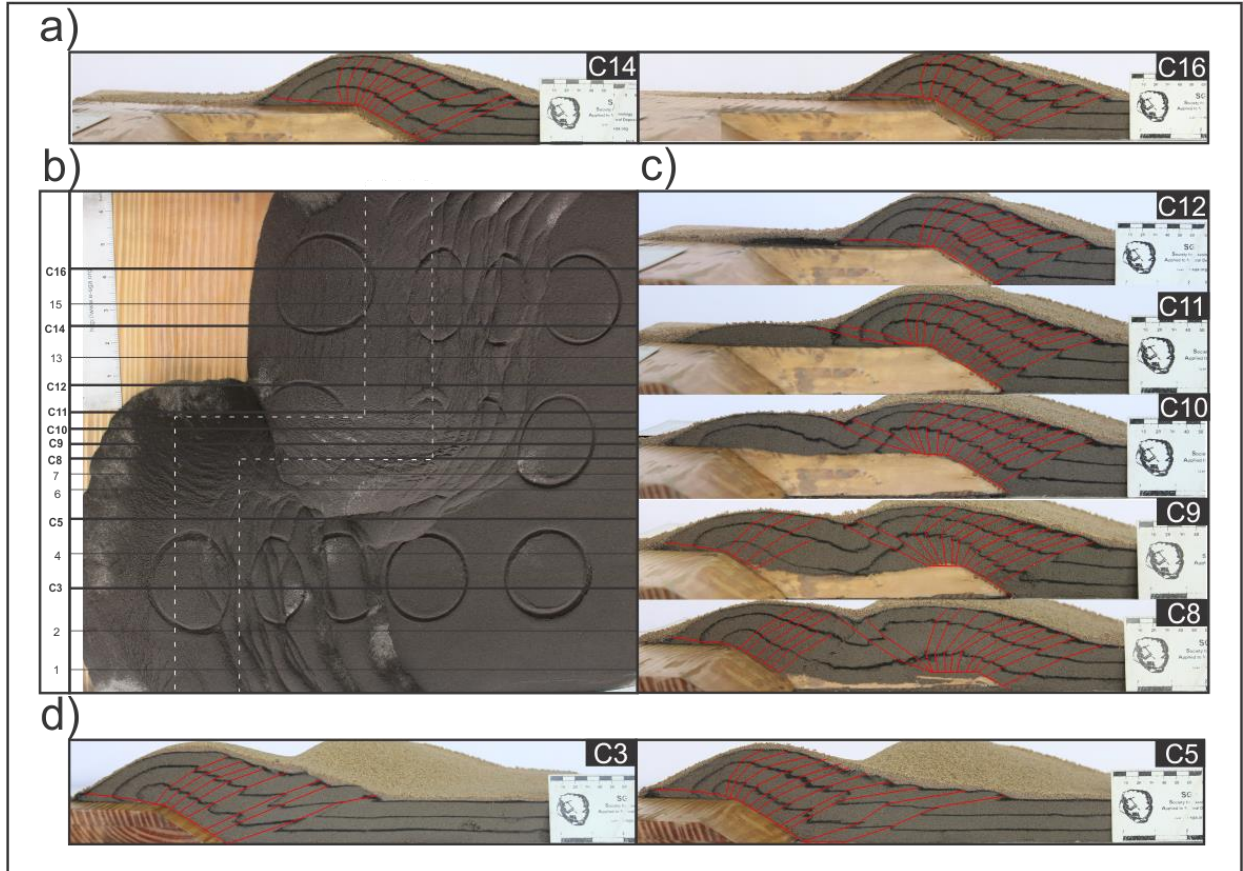
Figura 35. Fotografías y mapeo estructural del modelo en planta. a) Estado inicial. b) c) d) y e) Diferentes momentos de la deformación compresiva (5, 10, 15 y 20 cm de acortamiento). F) Estado final (25 cm acortamiento). Experimento RL\_60\_03.

### 7.3.2 Estado final

#### 7.3.2.1 Secciones transversales

De la rampa frontal delantera surgen hasta 13 retrocabalgamientos (Figura 36a), por su parte en la rampa frontal trasera se desarrollaron 8 retrocabalgamientos (Figura 36d). En la rampa frontal trasera los retrocabalgamientos se comportan como fallas ciegas en los cortes C6, C7, C8 (figura 36c), se genera una zona triangular y desaparecen en la parte superior de la rampa lateral reemplazados por plegamiento tipo flexura de falla (C9 y C10, figura 36c). Los cortes C6 y C10 interceptan una parte de la rampa frontal delantera y una parte de la rampa frontal trasera,

respectivamente, evidenciando la propagación lateral de las rampas frontales y generando rotación de la rampa lateral en sentido horario.

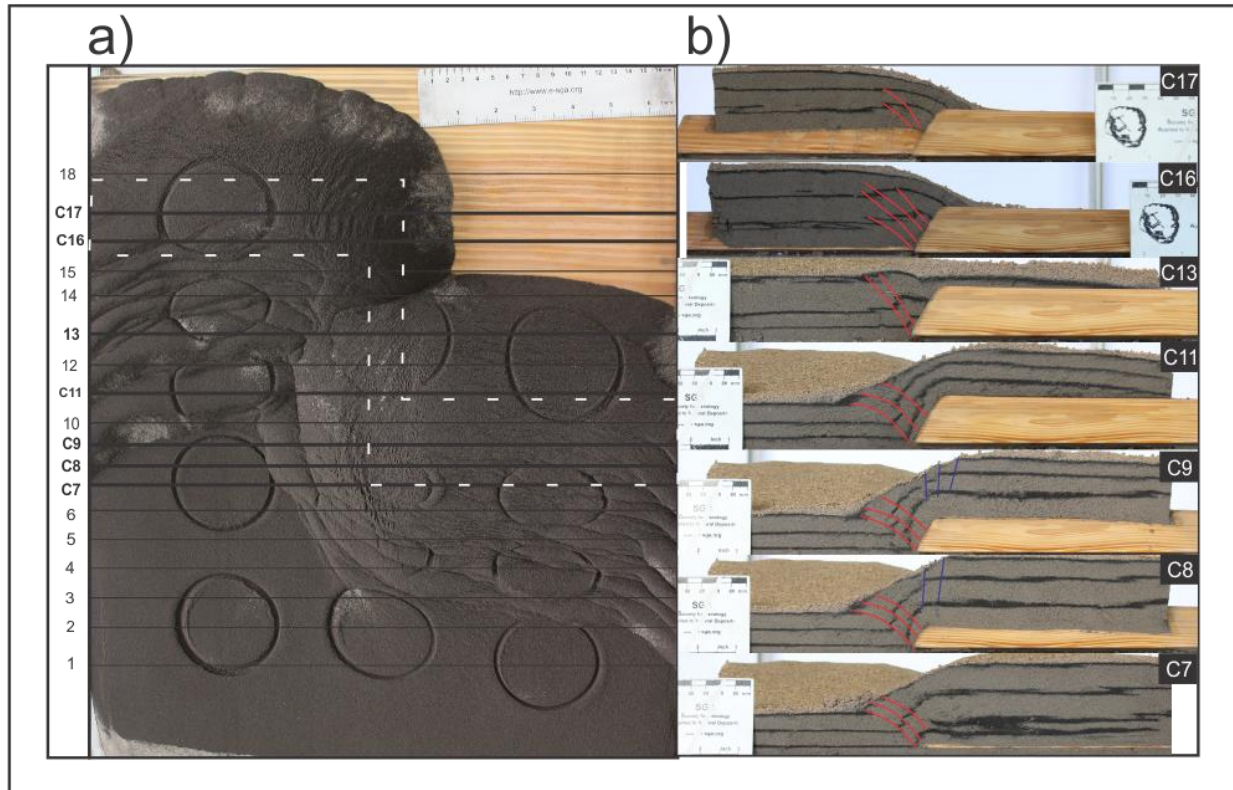


*Figura 36.* Cortes transversales del estado final del modelo. a) C14, C16. Cortes transversales en la rampa frontal delantera. b) Imagen en planta del estado final del modelo. c) C8 – C12. Cortes transversales en la zona de la rampa lateral. d) C4, C6. Cortes transversales en la rampa frontal trasera. Experimento RL\_60\_03.

#### 7.3.2.2 Secciones longitudinales

Se destaca una característica no encontrada en los modelos anteriores, tiene que ver con los lineamientos vistos en planta en la zona del cabeceo del anticlinal, los cuales corresponden a pequeños derrumbes, se puede ver como el nivel negro se adelgaza y/o desaparece en la parte superior del monoclinal y es acumulado en la parte inferior, el corte C9 permite observar claramente la formación de pequeñas fallas normales con alto ángulo.

Adicionalmente en este modelo no se presenta la falla de bajo ángulo encontrada en los modelos anteriores (Ver figura 37).



*Figura 37.* Cortes longitudinales al estado final del modelo. a) Imagen en planta del estado final del modelo. b) Cortes longitudinales realizados a la estructura. Experimento RL\_60\_02. Falla normal.

## 8 Análisis de los resultados.

### 8.1 Síntesis estructural del modelo de rampa lateral.

Debido a los resultados expuestos anteriormente, que mostraron una gran similitud entre los tres modelos, se presenta la configuración general del modelo de rampa lateral, conectando dos rampas frontales, destacando sus principales rasgos en superficie, sección transversal y longitudinal, independientemente del ángulo de la rampa lateral.

### 8.1.1 Deformación final en planta.

La figura 38 muestra los principales rasgos en planta que presenta el modelo conformado por dos rampas frontales y una rampa lateral; cada rampa frontal desarrolla un cabalgamiento, con geometría convexa hacia el antepaís (más marcado para el cabalgamiento relacionado a la rampa frontal trasera), y una secuencia de retrocabalgamientos dispuestos uno tras otro; de igual manera encima de cada rampa frontal se generan dos anticlinales interrumpidos abruptamente, con cabeceo y flexión de sus ejes (direcciones opuestas entre sí) en la zona de la rampa lateral. Los retrocabalgamientos de la rampa frontal delantera también toman la curvatura o flexión en la zona de la rampa lateral; en el mismo sentido que el eje del anticlinal. Es importante resaltar que todas las estructuras generadas (cabalgamientos, retrocabalgamientos y el anticlinal) inicialmente eran paralelas entre sí y respecto a la rampa frontal. Además, se destacan unos lineamientos en la zona que los anticlinales presentan cabeceo (Ver cortes longitudinales).

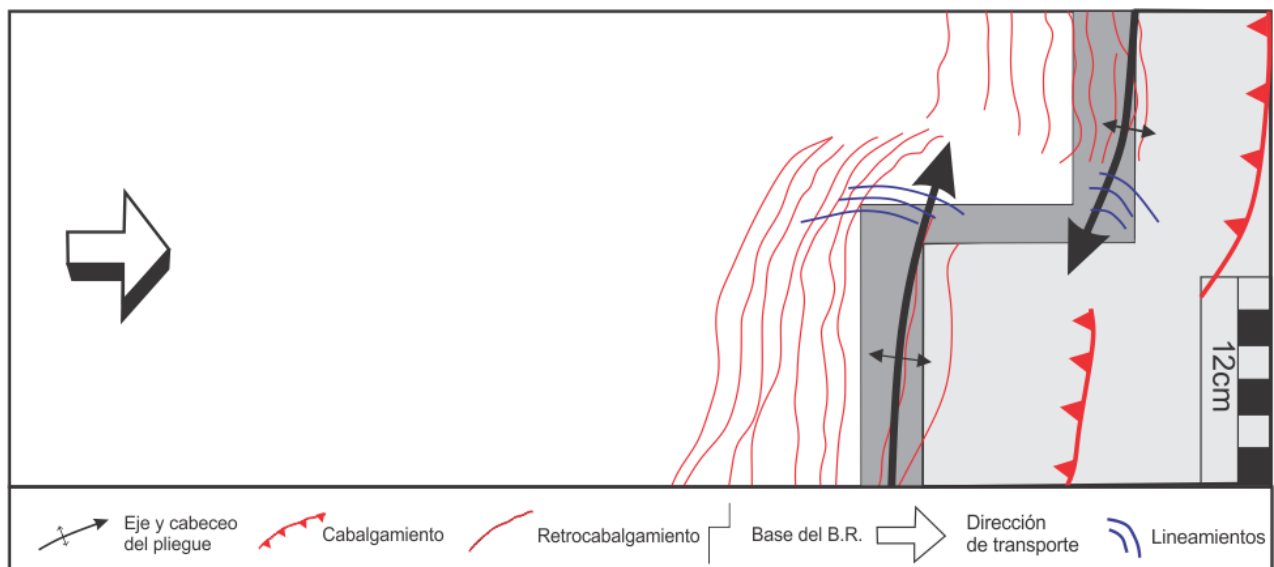
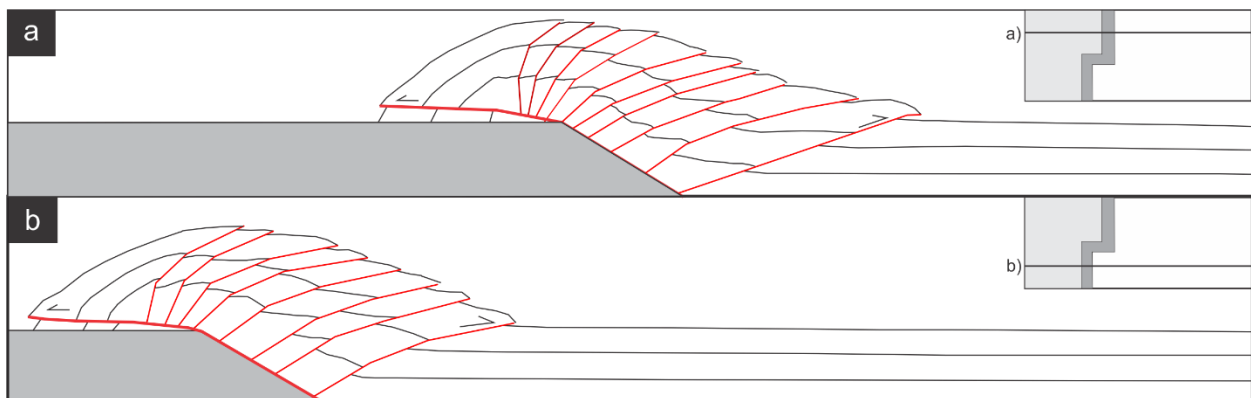


Figura 38. Mapeo de los principales rasgos y estructuras en superficie del modelo. Experimento RL\_45\_05.

### 8.1.2 Cortes transversales

Los cortes transversales que atraviesan las rampas frontales presentan una configuración estructural muy similar, un cabalgamiento principal del cual surgen una secuencia de retrocabalgamientos (Ver figura 39), esta configuración presenta una doble vergencia, ya que cabalgamiento avanza hacia antepaís mientras los retrocabalgamientos hacia el retropaís. De manera general la rampa frontal delantera tiende a desarrollar un mayor número de retrocabalgamientos que la rampa frontal trasera. Otra característica es la verticalización de los retrocabalgamientos, los primeros se formaron en la base de la rampa, en la zona V.D, pero la continua deformación generó que escalaran a lo largo de la rampa y terminaran en la parte superior de la rampa y con un alto ángulo.



*Figura 39.* Cortes transversales de la rampa frontal delantera (a) y rampa frontal trasera (b). Cortes C4 y C18 digital (Experimento RL\_30\_05).

La configuración estructural de los cortes transversales en la rampa lateral involucra las estructuras de las dos rampas frontales; en la rampa lateral sobresale la presencia de hasta 3 cabalgamientos en la rampa frontal delantera, además de presentar mayor número de retrocabalgamientos, evidencia de una mayor cantidad de deformación respecto a la rampa frontal trasera.

La figura 40b permite observar dos características: la formación de una zona triangular en la parte inferior de la rampa lateral, conformada por el cabalgamiento de la rampa frontal delantera y el retrocabalgamiento más basal de la rampa frontal trasera, los cuales tienen vergencia opuesta, y la presencia de algunas fallas ciegas, en este caso retrocabalgamientos, en la rampa frontal trasera.

La figura 40a permite observar como la deformación en la rampa frontal trasera disminuye en la parte media y superior de la rampa lateral, entonces los retrocabalgamientos desaparecen y la deformación es acomodada por plegamiento tipo flexura de falla.

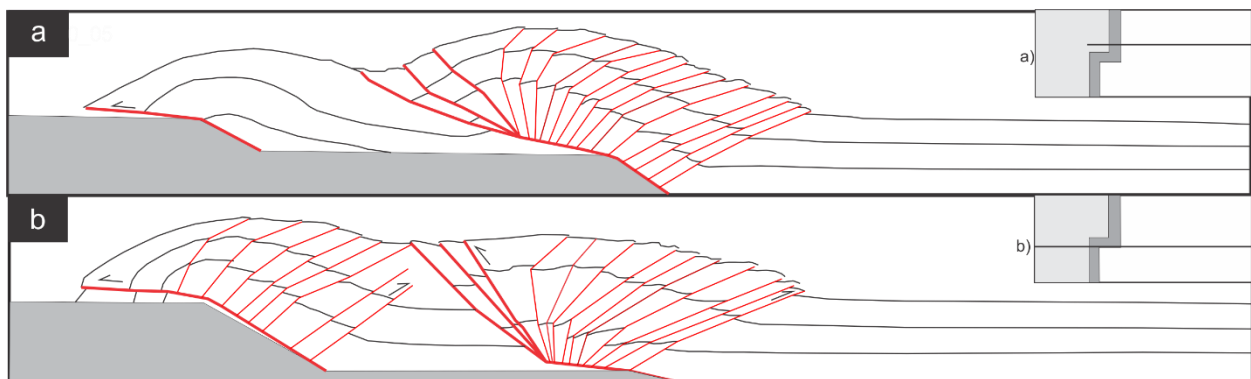


Figura 40. Cortes trasversales en la zona de la rampa lateral, parte inferior (b) y parte media (a). Cortes C8 y C10 digital (Experimento RL\_30\_05).

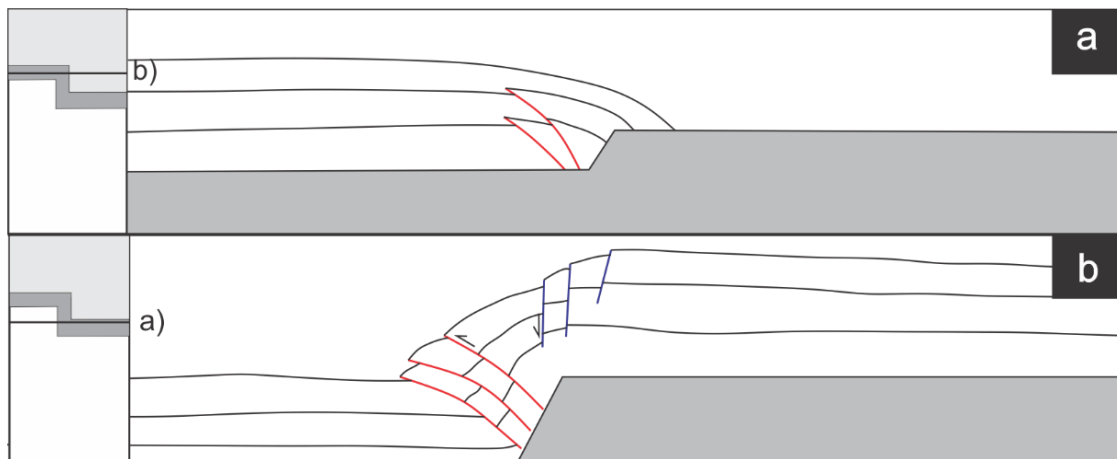
### 8.1.3 Cortes longitudinales

El principal rasgo encontrado a partir de los cortes longitudinales corresponde con la formación de fallas inversas de medio-alto ángulo con sentido opuesto a la pendiente de la rampa lateral (Ver figura 41). Localizadas únicamente en la zona de la rampa lateral, no se extienden más allá.

Otra característica son los monoclinales que se forman encima de la rampa lateral, relacionado con las terminaciones laterales de las rampas frontales y el cabeceo de los anticlinales; el monoclinal relacionado a la rampa frontal delantera buza en la misma dirección de la rampa lateral

(Ver figura 41a), por el contrario, el monoclinal de la rampa frontal trasera buza en dirección opuesta (Ver figura 41b).

Otro rasgo encontrado fue la extensión gravitacional generada por el cabeceo del anticlinal de la rampa frontal delantera, corresponde con los lineamientos detectados en planta previamente, y en corte se expresa como pequeños “derrumbes” en los modelos de rampa lateral 30° y 45°, y como pequeñas fallas normales en el modelo 60°, ubicadas en la parte superior del monoclinal de la rampa frontal delantera (Ver figura 41a)



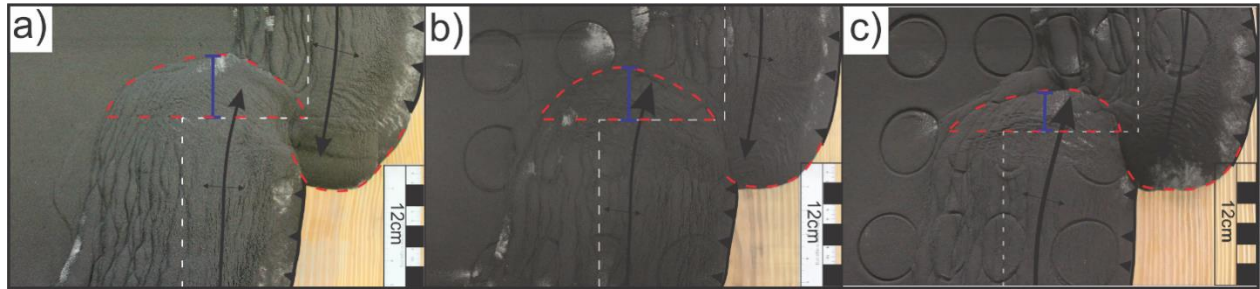
*Figura 41.* Cortes longitudinales del modelo final, rampa frontal delantera (a) y rampa frontal trasera (b). En azul fallamiento normal. Cortes C9 y C17 digital (Experimento RL\_60\_03).

## 8.2 Comparación entre los modelos (30°, 45° y 60°)

Como ya se mencionó anteriormente los tres modelos desarrollados exhiben una muy alta similitud en las estructuras generadas, algunas pequeñas diferencias fueron encontradas y se presentan a continuación:

Las vistas en planta de la deformación permiten observar la forma de cuña que desarrollan las terminaciones laterales de las rampas frontales (figura 42), la ligera diferencia radica en el tamaño

de dicha cuña, el modelo de rampa lateral de  $30^\circ$  es en el cual esta cuña abarca una mayor área, por su parte, el modelo rampa lateral  $60^\circ$  es el de menor área, lo que indica que para una menor pendiente de la rampa lateral, la propagación lateral de la rampa frontal tendrá un mayor alcance.



*Figura 42.* Propagación lateral de la rampa lateral en forma de cuña, en azul la distancia que abarca en cada modelo. a) Modelo RL\_30\_05. b) Modelo RL\_45\_05. c) Modelo RL\_60\_03.

Como se explicó anteriormente (Ver síntesis del modelo, cortes longitudinales) los lineamientos encontrados en planta corresponden con la manifestación de la extensión gravitacional generada por el cabeceo de los anticlinales en la zona de la rampa lateral, según el ángulo de la rampa lateral este fenómeno puede generar pequeños “derrumbes” o fallamiento normal en el monoclinal delantero. Para los modelos de rampa lateral  $30^\circ$  y  $45^\circ$  se generaron pequeños “derrumbes” (Ver figura 43<sup>a</sup> y 43<sup>b</sup>), evidenciado por la acumulación de material hacia la base del monoclinal, mientras que en el modelo rampa lateral  $60^\circ$  se desarrollaron pequeñas fallas normales (ver figura 43<sup>c</sup>), debido a la pendiente mayor que presenta este modelo.

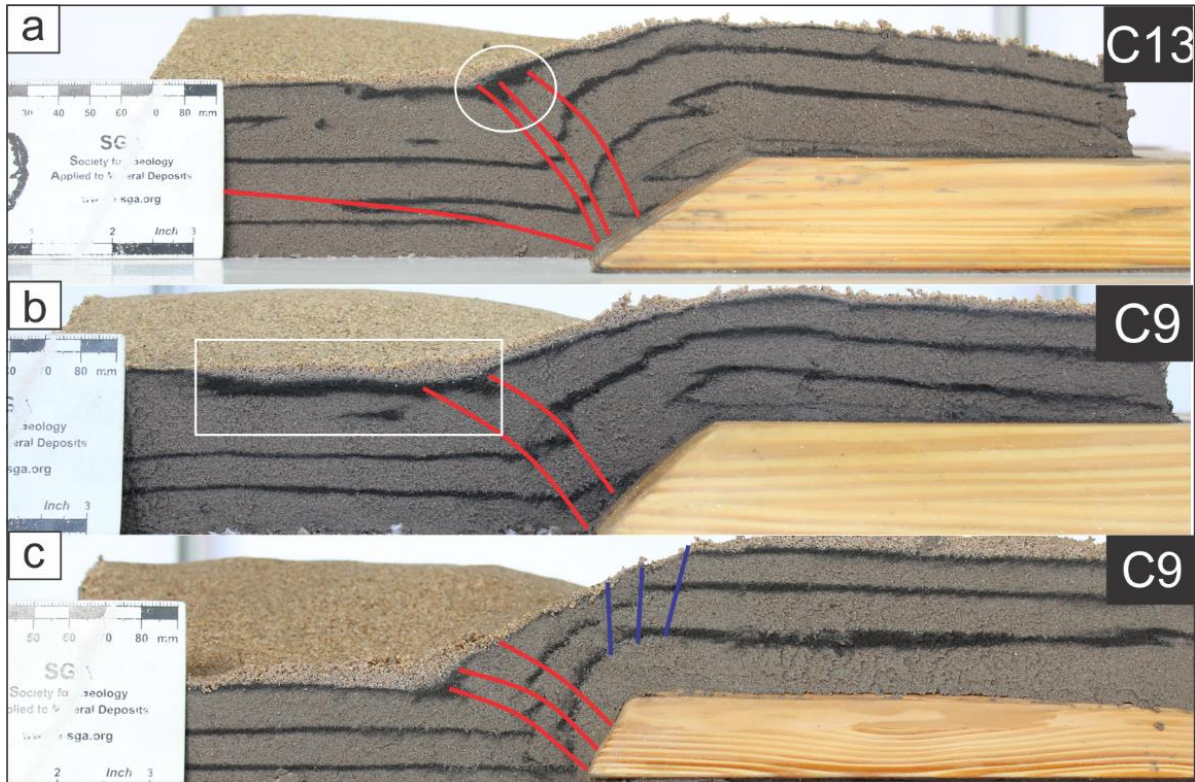


Figura 43. a) C13 - Modelo rampa lateral 30°. b) C9 - Modelo rampa lateral 45°. c) C9 - Modelo rampa lateral 60°. En blanco se señala la base del anticlinal donde se acumula el material por los “derrumbes”. Trazos azules fallas normales.

## 9 Discusión.

Según McClay (1991) las rampas laterales presentan un buzamiento entre 10°-30°, tomando como referencia los ángulos establecidos de las rampas frontales (relacionadas a cabalgamientos); con el mismo criterio, Burg (2017) les asigna un entre 30°-45° (relacionadas a fallas inversas). Por su parte, Dixon y Spratt (2004) plantean que las rampas laterales pueden tener cualquier ángulo hasta 90° de buzamiento, teniendo en cuenta que la génesis de las rampas laterales no es bien conocida y que su origen puede estar ligado tanto a estructuras en compresión (cabalgamientos y fallas inversas) como estructuras de extensión.



Teniendo lo anterior en cuenta, se realizaron los modelos de rampas laterales de 30°, 45° y 60°; buscando abarcar todas las rampas laterales, independientemente de su génesis. Como se muestra en el capítulo de resultados, la configuración estructural final de los tres modelos es la misma, tanto en planta (figura 27, 32 y 35), cortes transversales (figura 28,33 y 36) y cortes longitudinales (figura 30, 34 y 37), como se pudo ver claramente en los modelos digitales en tres dimensiones generados (figura 30 y 31).

Estos resultados coinciden con los encontrados por Dixon y Spratt (2004), quienes al modelar la misma configuración para una rampa lateral con 22° de buzamiento y una falla de desgarre (rampa lateral vertical) conectando dos rampas frontales, encontraron que de manera general las dos configuraciones desarrollaban las mismas estructuras en planta y en corte.

La única diferencia enunciada por Dixon y spratt (2004) corresponde a la forma de las terminaciones de las rampas frontales, para la rampa lateral desarrolla una forma de cuña (ver figura 45a) mientras que para la falla de desgarre la forma es cuadrada (Ver figura 44b). Como se explicó anteriormente (Ver sección8.2, figura 42) los tres modelos realizados también arrojaron geometría de cuña en las terminaciones de las rampas frontales, variando únicamente el tamaño de dicha cuña. Según estos resultados se complementa lo encontrado Dixon y Spratt (2004) que independientemente del ángulo las rampas laterales desarrollan forma de cuña, únicamente las fallas de desgarre son la que presenta geometría cuadrada en las terminaciones de las rampas frontales.

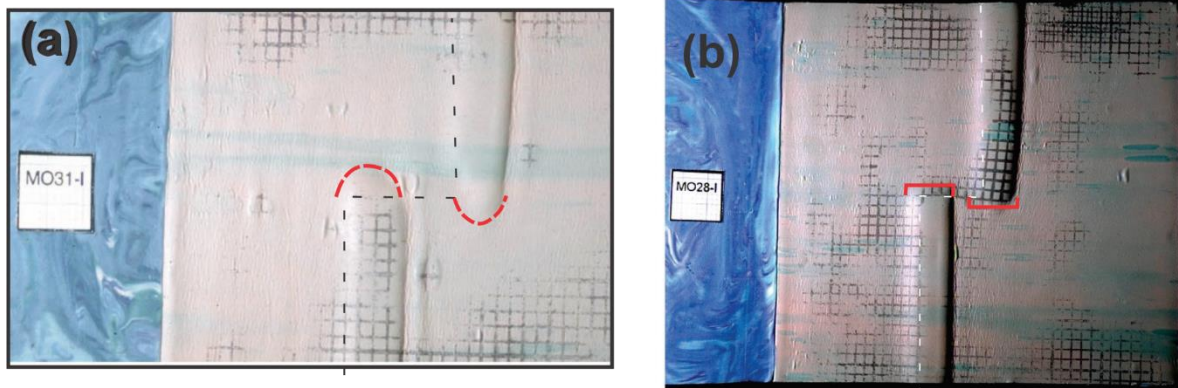


Figura 44. a) Modelo MO31, rampa lateral ( $22^\circ$ ) b) Modelo MO28, falla de desgarre. En rojo se destaca la forma de la terminación de las rampas frontales. Adaptada de Dixon y Spratt (2004).

Pohn (2000) define las rampas laterales como zonas de contraste estructural (fallamiento, plegamiento e intenso fracturamiento) donde el despegue cambia el nivel estratigráfico a lo largo del rumbo estructural; plantea que la mayoría de estas estructuras se encuentran en el subsuelo y su identificación se debe realizar con base en 5 criterios superficiales: 1) cambios abruptos en la longitud de onda o terminación de pliegues a lo largo del rumbo; 2) Un cambio en la frecuencia de fallas cartografiadas; 3) drenajes con de tendencias rectas; 4) Zonas de actividad sísmica; 5) Grandes discontinuidades geomorfológicas (Pohn, 2000).

Algunos de estos criterios no son posibles evaluarlos con el montaje experimental realizado, como la actividad sísmica o la tendencia recta de los drenajes en la superficie; sin embargo, los resultados del análisis de la deformación en planta permiten contrastar los otros criterios expuestos por Phon (2000). La figura 38, del análisis de la síntesis estructural del modelo en planta, permite observar la interrupción abrupta de los anticlinales en la zona de la rampa lateral y la diferencia de fallas (retrocabalgamientos) mapeados entre bloque colgante con el bloque yacente (asumiendo este último como no deformado); coincidiendo con los criterios superficiales 1 y 2 respectivamente.

Thomas (1990) enuncia que existen dos tipos de rampas laterales, según la dirección del cabeceo de los de los pliegues respecto a la rampa lateral. En la rampa lateral del bloque yacente el cabeceo y la rampa lateral van en la misma dirección (Corte A, figura 45), por otro lado, cuando no comparten dirección se denominan rampas laterales del bloque colgante (Corte B, figura 45). Los cortes longitudinales C8 Y C14 (figura 45) realizados a los modelos realizados muestran los monoclinales formados en las terminaciones de los anticlinales de las rampas frontales, se puede ver la analogía con lo planteado por (Thomas, 1990).

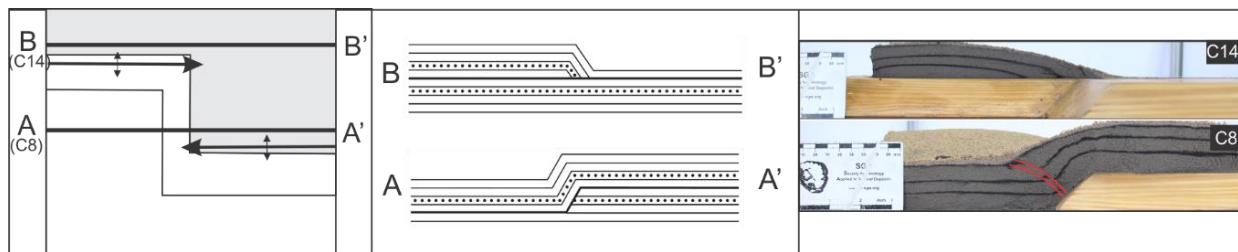


Figura 45. Vista en planta de modelo ideal de rampa lateral. Cortes longitudinales idealizados. Cortes C8 y C14, experimento RL\_45\_05. Adaptada de Thomas (1990).

Dixon y Spratt (2004) en su modelamiento de rampas laterales y fallas de desgarre, contrastaron sus resultados con cortes del *Brazeau thrust*, ubicado en las montañas rocosas canadienses. En la figura 46 se observa el mapa y el corte JR-101, en planta se puede ver que dicho corte atraviesa la terminación de una falla inversa y el corte exhibe un cabalgamiento principal, y un retrocabalgamiento truncado por otro cabalgamiento, posiblemente compartiendo el mismo despegue, generando una zona triangular; esta configuración indica la presencia de una rampa lateral, ya que es muy similar a la configuración observada en los cortes transversales que cruzaban las rampas laterales (figura 28, C8; figura 33, C6, C7 y C8; figura 36, C8 y C9 y figura 41b) que también exhiben la presencia de una zona triangular.

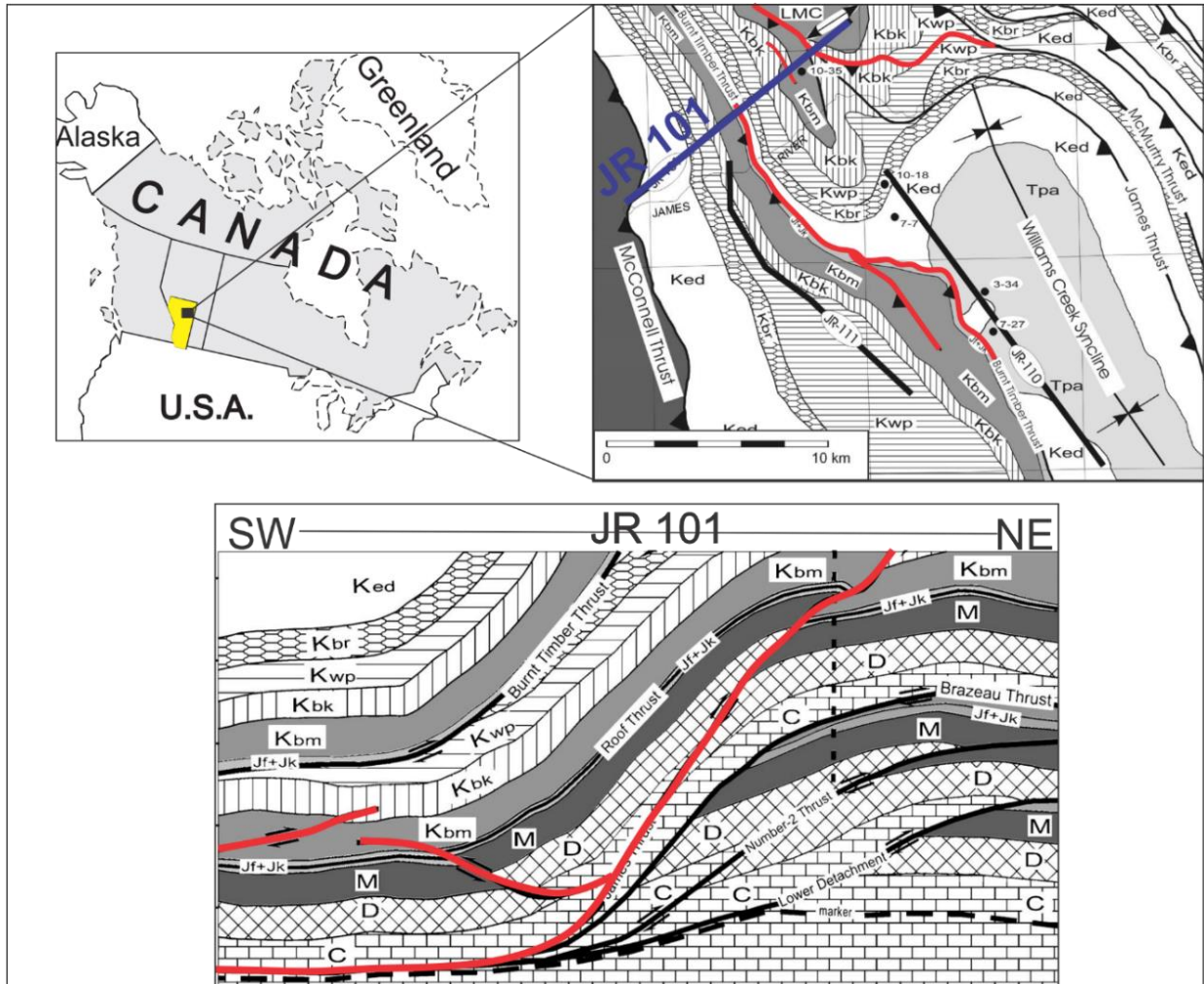
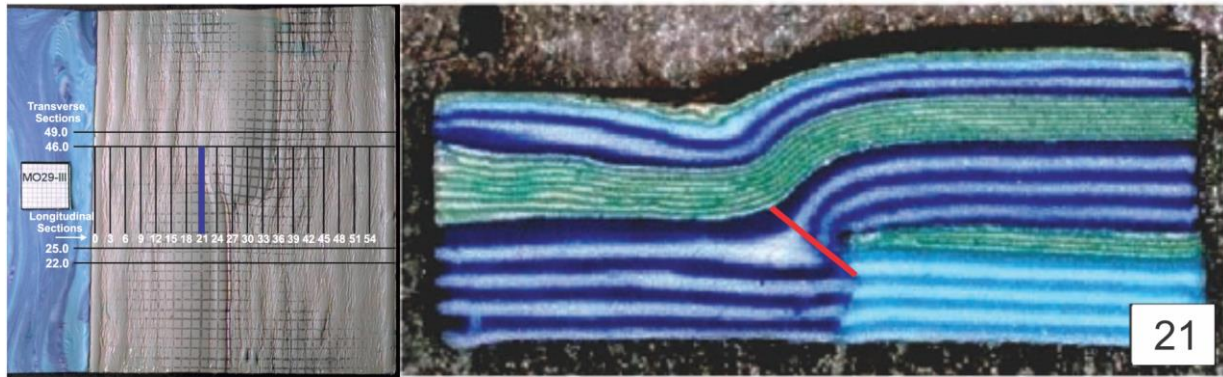


Figura 46. Ubicación y mapa de Foothills Alberta. Corte transversal a las estructuras, evidencia zona triangular. Adaptada de Dixon y Spratt (2004).

Dixon y Spratt (2004) realizó cortes longitudinales a las estructuras principales y encontró en sus resultados la presencia de fallas inversas con buzamiento opuesto al de la rampa lateral (Ver figura 47, C21). Estas fallas coinciden fallas encontradas en los cortes longitudinales (Ver figuras 30, 34 y 37), que se extienden en la rampa lateral. Es importante aclarar que Dixon y Spratt (2004) encontraron estas estructuras en su modelo para fallas de desgarre, es decir una rampa lateral de  $90^\circ$  de buzamiento, y en este proyecto se encontraron en las rampas laterales de los 3 ángulos ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $60^\circ$ ).



*Figura 47.* Cortes longitudinales al modelo de rampa lateral 22°. Corte 21, involucra la rampa frontal delantera. Mo30-III. Adaptada de Dixon y Spratt (2004).

Araque y Otero (2016) plantean la presencia de una rampa lateral (enmarcada en una zona transversal) generada por la Falla Los Santos, en cercanías del municipio de Zapatoca, Santander sobre la Quebrada Los Montes; a partir de la presencia de uno de los criterios definidos por Pohn (2000) y Dixon y Spratt (2004) como lo son el cabeceo e interrupción de dos sinclinales en direcciones opuestas (Ver figura 48), además del cambio en la dirección NNE-SSO del trazo de la Falla del Suárez por NE-SO en ese sector (Ver figura 49), paralelo a la dirección de transporte del cabalgamiento.

A partir de la vista en planta de la deformación y las estructuras generadas, se encuentra la similitud con este planteamiento tomando como referencia el criterio 2 planteado por Phon (2000), acerca de las interrupciones de los pliegues. En los modelos realizados se encontraron dos anticlinales interrumpidos con cabeceo y flexión en direcciones opuestas en la zona de la rampa lateral; por su parte Araque y Otero (2016) describen el mismo fenómeno, pero para dos sinclinales (Ver figura 48), lo que permite corroborar la presencia de esta rampa lateral en campo planteada por estas autoras.

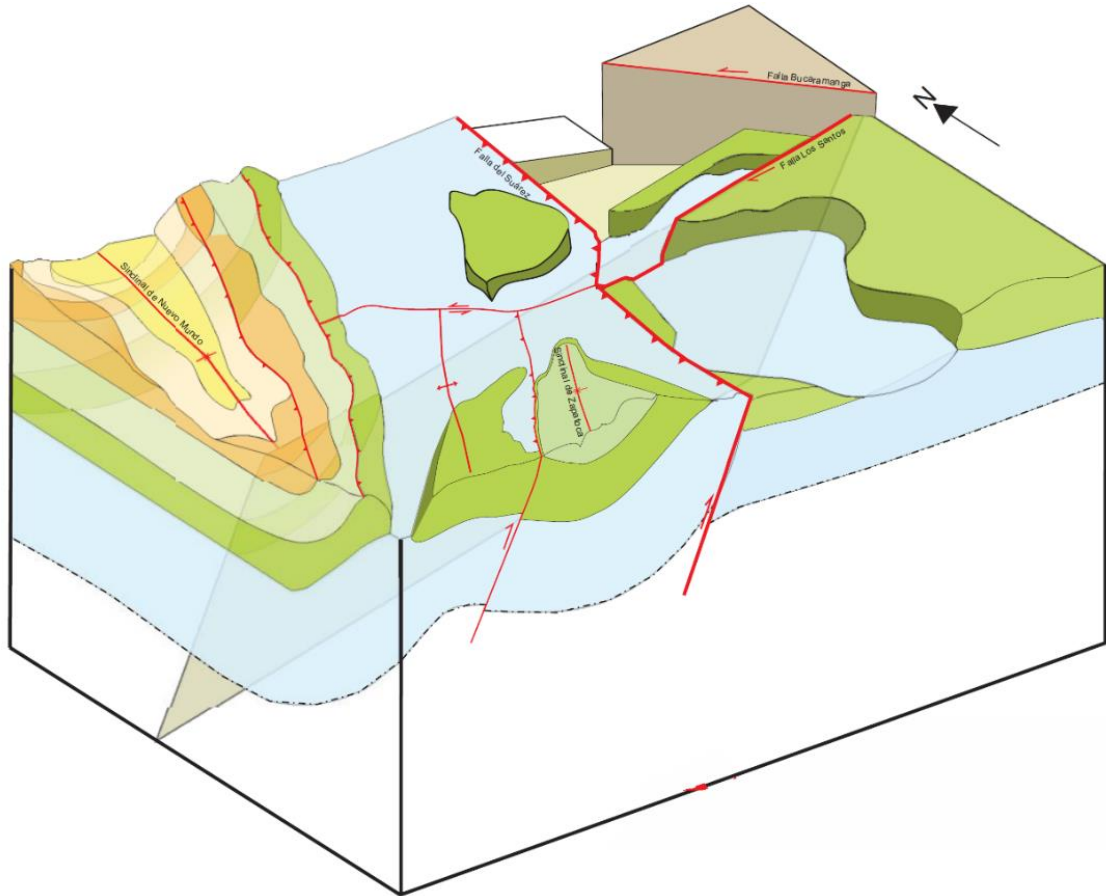


Figura 48. Bloque diagrama de la zona trabajada por Araque y otero (2016). Sobresale la terminación de los sinclinales al llegar a la zona transversal regional, rampa lateral local. Adaptado de Araque y Otero (2016).

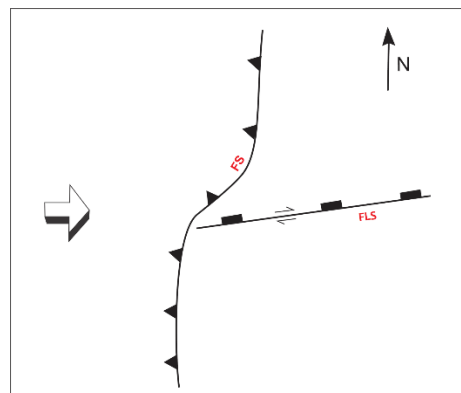


Figura 49. Cambio en la dirección NNE-SSO del trazo de la Falla del Suárez (FS) por NE-SO, debido a la influencia de la Falla Los Santos (FLS), paralelo a la dirección de transporte. Adaptada de Araque y Otero (2016).



## 10 Conclusiones.

- La configuración estructural general del modelo (superficie, sección transversal y longitudinal) es independiente del ángulo de la rampa lateral; ya que para los tres modelos representados (30°, 45° y 60°) se obtuvieron los mismos resultados.
- La formación de un mayor número de retrocabalgamientos y el desarrollo hasta tres cabalgamientos en la rampa frontal delantera indica que esta es sometida a una mayor deformación que la rampa frontal trasera.
- Del desarrollo de estructuras vistas desde la superficie se destaca la formación de dos anticlinales interrumpidos abruptamente, con cabeceo y flexión de sus ejes en direcciones opuestas entre sí, en la zona de la rampa lateral.
- Los cortes longitudinales permitieron detectar la formación de fallas inversas de medio-alto-ángulo con buzamiento opuesto a la pendiente de la rampa lateral, se ubican paralelas al transporte del cabalgamiento.
- Contrastar los resultados obtenidos por el modelamiento análogo con características de propias de prototipos naturales de rampas laterales, y coincidir en varios rasgos tanto en planta como sección vertical le confiere cierta validez al modelo análogo realizado.



## **11 Recomendaciones.**

Se recomienda realizar otros modelos análogos con materiales dúctiles para determinar las estructuras en rumbo propias de las rampas laterales.



### Referencias bibliográficas.

- Álvarez, R. M., García de la Torre E., 1996. Los modelos analógicos en geología: implicaciones didácticas. ejemplos relacionados con el origen de materiales terrestres, Enseñanza de la ciencia de la tierra, (4.2), 133-139
- Anaya, C. 2016. Análisis de estilos estructurales a partir de modelos análogos (Ambientes compresivos). Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. 82 p.
- Araque, N., y Otero, J. 2016. Zonas transversales y su relación con estructuras regionales, flanco O- Cordillera Oriental. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, 113 p.
- Brace, W.F. y Kohlstedt, D.L., 1980. Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments. Journal of Geophysical Research 85: 6248-6252.
- Boyer, S.E. and Elliott, D. 1982. Thrust systems: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 66, no. 9, p. 1196–1230.
- Burg, J., 2017. The causes: mechanical aspects of deformation. Consultado el 20 de octubre del 2017 en: <https://goo.gl/EXpR42>
- Burg, J., 2017. Thrusts systems. Consultado el 20 de agosto del 2017 en: <https://goo.gl/o1U7FU>
- Butler, R.W.H. 1982. The terminology of structures in thrust belts: Journal of Structural Geology, v. 4, no. 3, p. 239–245.



Byerlee, J.D., 1978. Friction of rocks. *Pure Applied Geophysics* 116, 615–626.

Cadell, H.M. 1888. Experimental researches in mountain building. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1: 339-343.

Crespo-Blanco, A. and Pérez-Ramos, I. 2002. La modelización analógica como recurso didáctico en la geología estructural. *Geogaceta*. Dpto de Geodinámica. Universidad de Granada. Pag 179-181.

Dahlstrom, C. D. A. 1970. Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6, p. 743-757

Daubrée, G.A. 1878. Expériences tendant à imiter des formes diverses de ploiements, ontournements et ruptures que présente l'écorce terrestre. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences* 86 (12), 733–739 864–869 and 928–931.

Daubrée, G.A. 1879. *Etudes synthétiques de Géologie Expérimentale*. Dunot, Paris. Part 1, 478 pp., Part 472, 350 pp.

Davis G.H, Reynolds S.J, Kluth C.F. 2012. *Structural Geology of Rocks and Regions*. 3rd Edition. John Wiley & Son, Inc, 861 p.

Davy, P. and Cobbold, P.R. 1988. Indentation tectonics in nature and experiment: 1. Experiments scaled for gravity. *Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala*, New Series 14: 129–141.

Davy, P. and Cobbold, P.R. 1991. Experiments on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere. *Tectonophysics* 188: 1-25.



- Deus, H. M.; Bolacha, E.; Vasconcelos, C.; Fonseca, P. E. (2011). Analogue Modelling to Understand Geological Phenomena. Proceedings of the GeoSciEd VI. Joahnesburg: University of Witwatersrand.
- Dixon, J. M. and Spratt, D. A. 2004. Deformation at lateral ramps and tear faults—centrifuge models and examples from the Canadian Rocky Mountain Foothills, in K. R. McClay, ed., Thrust tectonics and hydrocarbon systems: AAPG Memoir 82, p. 239– 258.
- Dooley, T.P. and Schreurs, G. 2012. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: a review and new experimental results *Tectonophysics*, 574–575, pp. 1–71.
- Douglas, R. J. W. 1950. CaUum Creek, Langford Creek and Gap map - areas, Alberta. *Mere. geol. Surv. Brch Can.* 225, 1-124.
- Faulds, J., and Varga, R. 1998. The role of accommodation zones and transfer zones in the regional segmentation of extended terranes. *Geological Society of America Special Papers*, 323: 1-45.
- Folk, R. L. 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphills, Austin, Texas. Horowitz, H. S. y Potter, P. E. (1971). *Introductory Petrographlo- f Fossils*, Springer, Berlin.
- Forchheimer, P. 1883. *Über sanddruck und Bewegungerscheinungen im inneren trockenen sandes*. Tübingen, Aachen. 53 pp.
- Fossen, H. 2010. *Structural geology*. University of Bergen, Norway. Cambridge University Press, New York.
- Faugere, E. y Brun, J.P. 1984. *Modelisation experimentale de la distention continentale; Experimental models of a stretched continental crust*, *Comptes-Rendus des Seances de*



- l'Academie des Sciences, Serie 2: Mecanique-Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre, 299: 365-370.
- Favre, A. 1878. Expériences sur les effets des refoulements ou écrasements latéraux en géologie. Archives des sciences physiques et naturelles, n°246.
- García, H y Jiménez, G. 2016. Transverse zones controlling the structural evolution of the Zipaquirá Anticline (Eastern Cordillera, Colombia): Regional implications. Journal of South American Earth Sciences 69 (2016) 243e258
- Graveleau, F., Malavieille, J. and Dominguez, S. 2012. Experimental modelling of orogenic wedges: A review. Tectonophysics 538-540 (2012) 1–66.
- Hall, J. 1815. On the vertical position and convolutions of certain strata and their relationship with granite. Transactions of the Royal Society of Edinburgh 7: 79-108.
- Handin, J., 1966. Strength and ductility. In: Clark Jr., S.P. (Ed.), Handbook of Physical Constants. Geological Society of America Memoirs 97, 223–289.
- Harding T. y Lowell J. 1979. Structural Styles, their plate-tectonic habitats, and hydrocarbon traps in petroleum provinces. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 63(7), p.1016- 1058.
- Hossack, J. R. 1981. Sequence of hangingwall imbrication in the ValdresThrust, Djuptjernskampen, Norway. (Abstract). *J. Struct. Geol.* 3, 188.
- Hossack, J.R. 1983. A cross-section through the Scandinavian Caledonides constructed with the aid of branchline maps: Journal of Structural Geology, v. 5, no. 2, p. 103–111.



- Hubbert, M. K. 1937. Theory of scale models as applied to the study of geological structures. Bull. Geol. Soc. Am. 48, pp. 1459-1520.
- Jacobeen, Frank, Jr., and Kanes, W.H., 1974, Structure of Broadtop synclinerium and its implications for Appalachian structural style: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 58, no. 3, p. 362–375.
- Jiménez, G., Rico, J., Bayona, G., Montes, C., Rosero, A., and Sierra, D. 2012. Analysis of curved folds and fault/fold terminations in the southern Upper Magdalena Valley of Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 39: 184 – 201.
- Klinkmüller, M., 2011. Properties of analogue materials, experimental reproducibility and 2D/3-D deformation quantification techniques in analogue modelling of crustal-scale processes. Ph.D. thesis, University of Bern.
- Liesa, C.L., Román, T., Arlegui, L.E., Cortés, A.L., Gil, A. 1997. El Uso De Modelos Experimentales En La Enseñanza De Geología Estructural (II) Aplicación A La Deformación Discontinua. 1997.
- Lowell J. 1985. Structural Styles in Petroleum Exploration. OGCI Publications, Oil & Gas Consultants International Inc. Tulsa.
- Lyell, C. 1871. The Student's Elements of Geology. John Murray, London. 640 pp. Macedo, J., Marshak, S., 1999. Controls on the geometry of fold-thrust belt salients. Geological Society of America Bulletin 111 (12), 1808–1822.
- Malavielle, J., 1984. Modélisation expérimentale des chevauchements imbriqués: application aux chaînes de montagnes. Bulletin de la Societe Geologique de France 7 (1), 129–138.



- Martínez, J. R. 2003. Geología estructural y dinámica global. Universidad de Salamanca, Departamento de geología.
- McClay, K.R. 1981. What is a thrust? What is a nappe? In: McClay, K.R. & Price, N.J. (eds). Thrust and Nappe Tectonics, Geological Society of London Special Publication, 9, 7-12.
- McClay, K.R. 1992. Glossary of thrust tectonics terms. Department of Geology, Royal Holloway and Bedford New College, University of London.
- Poblet, J. 2004. Geometría y cinemática de pliegues relacionados con cabalgamientos. Universidad de Oviedo, 24, p. 127-146.
- Pohn, H. A. 2000. Lateral ramps in the folded Appalachians and in overthrust belts worldwide: a fundamental element of thrust-belt architecture. USGS Bulletin 2163. United States Department of the Interior. United States Geological Survey.
- Ramberg, H., 1967. Model experimentation of the effects of gravity on tectonics processes. The Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society 14: 307-329.
- Ranalli, G. 2001. Experimental tectonics: from Sir James Hall to the present: Journal of Geodynamics. Vol. 32 (1-2). Pg. 65-76.
- Reade, T.M. 1886. The Origin of Mountain Ranges Considered Experimentally, Structurally, Dynamically, and in Relation to Their Geological History. Taylor & Francis, London. 359 pp.
- Rich, J. L. 1934. Mechanics of low-angle overthrust faulting as illustrated by Cumberland thrust block, Virginia, Kentucky and Tennessee. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol. 18, 1584-96.



- Rodas R. y Rousé P., 2010. Analisis comparativo para la medición del angulo de reposos de suelos granulares. Revista de la Construcción, Volumen 9, N° 1.
- Rosello E.A. 2001. Sistemas tectónicos transcurrentes: una síntesis de sus condiciones mecánicas y aplicaciones geoeconómicas. Asociación Geológica Argentina, Serie D: Publicación especial, n° 5, pp 19-43.
- Rosello, E.A. 2008. Influencia de la topografía sobre la vergencia tectónica. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63. (2):196-203.
- Scott, C. 1891. Cross-Strike Structural Discontinuities and Lineaments of the Central Appalachians. U.S. geological survey. Department of the interior.
- Schardt, H. 1884. Geological Studies in the Pays-D'Enhant Vaudois, Bull. de le Soc. Vaudois des Sci. Nat. xx: 143-146.
- Schreurs, G., Buiter, S.J.H., Boutelier, D., Corti, G., Costa, E., Cruden, A., Daniel, J.-M., Hoth, S., Koyi, H., Kukowski, N., Lohrmann, J., Ravaglia, A., Schlische, R.W., Withjack, M.O., Yamada, Y., Cavozi, C., Del Ventisette, C., Elder Brady, J., Hoffmann-Rothe, A., Mengus, J.-M., Montanari, D., Nilforoushan, F., 2006. Analogue benchmarks of shortening and extension experiments. En Buiter, S.J.H. y Schreurs, G. (Eds.): Analogue and Numerical Modelling of Crustal-Scale Processes. Geological Society of London, Special Publications 253: 1-27.
- Schreurs, G., Buiter, S. J., Boutelier, J., Burberry, C., Callot, J. P., Cavozi, C & Cruz, L. 2016. Benchmarking analogue models of brittle thrust wedges. Journal of structural geology, 92, 116-139.



- Shellart W.P. 2000. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling. *Tectonophysics*.
- Solaque D. P y Lizcano A. 2008. Ángulo de fricción y ángulo de reposo de la arena del guamo, *Revista Épsilon* N° 11, 7-20.
- Stüwe, K., 2007. *Geodynamics of the lithosphere, quantitative description of geological problems*. Springer-Verlag, 33-37p.
- Thomas, A. 1990. Controls on locations of transverse zones in thrust belts. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 83 (3): 727-744.
- Twiss, R. y Moores, E. 1992. *Structural geology*. University of California at Davis. W.H. Freeman and Chapman company. New York.
- Wheeler, R.L., 1980, Cross-strike structural discontinuities: Possible exploration tool for natural gas in appalachian overthrus\* belt: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 64, no. 12, p. 2166-2178.
- Willis, B. 1893. *The mechanics of Appalachian structure*. United States Geological Survey Annual Report 13 (Part 2): 211-281.
- Yagupsky, D.L. 2009. *Metodología para el estudio de sistemas compresivos y sus controles estructurales*. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Tesis doctoral.