

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE DIAPIRISMO DE LODO:
“RELACIÓN ENTRE LA MATERIA ORGÁNICA PRESENTE EN EL
LODO Y LA ALTURA DE LOS DOMOS DIAPÍRICOS”**

**OLIVIA GONZÁLEZ MORALES
ALFONSO LUIS RODRÍGUEZ MADRID**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2005**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE DIAPIRISMO DE LODO:
“RELACIÓN ENTRE LA MATERIA ORGÁNICA PRESENTE EN EL
LODO Y LA ALTURA DE LOS DOMOS DIAPÍRICOS”**

**OLIVIA GONZÁLEZ MORALES
ALFONSO LUIS RODRÍGUEZ MADRID**

TESIS DE GRADO PARA OPTAR EL TITULO DE GEÓLOGO

GERMÁN YURY OJEDA

PH. D. IN GEOPHYSICS

DIRECTOR-ICP

CARLOS ALBERTO RÍOS REYES

M Sc. IN PETROLOGY

DIRECTOR-UIS

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

2005

DEDICATORIA

A mi papá Adolfo

Por todo el cariño, la comprensión, educación y dedicación durante toda mi vida.

A mi tía Lucy

Por todas las enseñanzas, ejemplo, cariño y por haber asumido ese rol de mamá

A mis Nonitos Débora y David, Tito y Rosario

Por todo el amor, el gran ejemplo y por crear la familia tan bonita, única y especial de la cual tengo el privilegio de formar parte.

A mi mamá Gladys

Quien aunque no estuvo en cuerpo conmigo, si lo hizo en alma, iluminándome, protegiéndome y brindándome la energía y fortaleza que me llevaron a convertirme en la mujer que soy actualmente.

A todos mis demás familiares y amigos

Con los que ha sido muy grato contar en los momentos fáciles y difíciles de mi vida.

Olivia

DEDICATORIA

A mis padres Alfonso Rodríguez y Judith Madrid
Por todo el amor, el cariño, la educación, la paciencia, la comprensión, el ejemplo y todas las demás enseñanzas que han forjado lo bueno que hay en mí como persona

A mi hermana Jeimy K., por su comprensión y todo su cariño y en especial por ser siempre quien es ella

A mis abuelos Luis, Melitina y Teresa por todo el cariño, la preocupación y por inculcarme la importancia del estudiar y prepararse

A todos mis demás familiares quienes siempre se preocuparon por mí, por mi aprendizaje y bienestar, en especial a mis padrinos Norton y Carmen Madrid

A mis amistades, las cuales han ayudado a enriquecer mi ser y con quienes he compartido grandes e importantes momentos en mi vida universitaria

Y por su puesto a mi bella Universidad Industrial de Santander UIS donde he terminado de criarme convirtiéndome en lo que soy como persona y profesional; donde he aprendido que la evolución, el cambio y la ciencia son inacabados

Alfonso Luis

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- A Nuestros directores:

Germán Yury Ojeda del ICP mentor y guía incansable de este proyecto;

Y

Carlos Alberto Ríos Reyes por sus consejos, su colaboración, interés y paciencia.

- A la **Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander** y su director **Marco Álvarez**, por toda la colaboración y por el préstamo y adecuación del sitio para realizar la fase experimental final de este proyecto.

- A la **Corporación ARES**, por el financiamiento y las sugerencias para este proyecto.

- Al **ICP** y sus funcionarios, en especial a **Carlos Jaramillo** y **Luis Miguel Bernardo**, por los consejos y ayudar en la gestión de las medidas de TOC.

- Al **Doctor Hermann Duque-Caro**, por la bibliografía suministrada y por mostrarnos y compartirnos la importancia del fenómeno del diapirismo de lodo.

- A **Eduardo López** por la bibliografía suministrada y los consejos para abordar más fácilmente la parte experimental de este proyecto.

- Al Profesor **Mario García** por todos los consejos y sugerencias, y porque además, junto al Profesor **Luis Carlos Mantilla**, proporcionaron un sitio adecuado para realizar la fase experimental inicial de este proyecto.

- Al Profesor **Juan Diego Colegial** por el interés mostrado hacia el proyecto, sus consejos y colaboración.

- Al Profesor **Nestor Quiñonez** por su asesoría en la parte del procesamiento estadístico de los datos.

- Al Doctor **Jaime Meneses** director de LOTS y a la física **Lenny Alexandra Romero**, por todo el interés y ayuda brindada desarrollando el sistema óptico de reconstrucción tridimensional para la evaluación de su uso el modelamiento análogo y su monitoreo.

- Al **Laboratorio de Difracción de Rayos X**, y en especial a **Miguel Angel, Angélica** y el **Doctor José Antonio Henao**, por el interés mostrado a este proyecto ayudando en la determinación de la composición de los.
- A **Adolfito, Augustico** y **Lucita** por todos los trasteos, paciencia, colaboración y cariño.
- A **Monika** por la ayuda con la gelatina, la regla, los lonches, el cariño y la paciencia.
- A **Nuestras Familias, González González** y **Rodríguez Madrid**, por toda la colaboración, comprensión, paciencia, apoyo y cariño.
- Al personal técnico y de laboratorios UIS: **Lucho** (Geología), **Alejandro N.** (Química), **Guillermo** (Ing. Química), **Alex** (Ing. Petróleos), **Ambrosio, Daniel** y **Mario** (Ing. Metalúrgica).
- A **INVEMAR** por la bibliografía suministrada.
- A los cuerpos de Celaduría, Planta Física y Jardinería de la UIS y de su sede en Guatiguará.
- A miembros de las comunidades de Arjona, Lomita Arena, Galerazamba, Turbaco y Cartagena.
- A todos nuestros amigos y compañeros, que pusieron un granito de arena en la realización de este proyecto, entre ellos: Andrés, Valdomiro, Vilma, Jorge, Jenny, Oswaldo, G. Mateo, Beatriz y Marina, Aldemar, Zayra, Carolina, John, Diego, Sandra G., Sandra C., Nana, Carlos, Fabiany, Mevis, Chiqui, Vargas, Laura, Deisy, Sonia, Anita y a todos aquellos que olvidamos mencionar y esperamos nos perdonen por ello.

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE DIAPIRISMO DE LODO: "RELACIÓN ENTRE LA MATERIA ORGÁNICA PRESENTE EN EL LODO Y LA ALTURA DE LOS DOMOS DIAPÍRICOS" *

AUTORES:

OLIVIA GONZÁLEZ MORALES

ALFONSO LUIS RODRÍGUEZ MADRID **

PALABRAS CLAVE: Diapirismo de Lodo, Vulcanismo de lodo, Modelos análogos físicos, Materia Orgánica, TOC, Cinturón del Sinú.

DESCRIPCIÓN:

Los diapiros y volcanes de lodo son estructuras aproximadamente verticales formadas por el ascenso de lodo a través de una columna de roca. Modelos análogos físicos de diapiros de lodo lograron demostrar que la generación de gases provenientes de la descomposición de la materia orgánica presente en el lodo diapírico experimental juega un papel determinante como mecanismo generador y propulsor para los diapiros de lodo obtenidos en el modelamiento.

El estudio realizado se centró en establecer las relaciones entre el contenido de materia orgánica total (%TOC) en el lodo diapírico y las alturas máximas alcanzadas por las estructuras obtenidas, basándose en la inferencia de que a mayor contenido de materia orgánica mayor generación de gases. Los estudios demuestran una relación lineal entre el TOC del lodo y las alturas máximas que alcanzan las estructuras. Igualmente se halló una relación inversa entre el tiempo que tardan los domos diapíricos experimentales en alcanzar su altura máxima, con respecto al TOC del lodo en descomposición. Además se establecieron siete estadios evolutivos diferentes, con características morfológicas comparables con patrones geomorfológicos descritos en zonas donde se observa el fenómeno. Una aplicación de los resultados de este estudio es la interpretación de la geomorfología del Cinturón del Sinú en el NW de Colombia. Esta geomorfología permite proponer un mapa de diferencias relativas de TOC en profundidad con base en las diferencias de altura del Cinturón.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Geología.

Ph D. in Geophysics Germán Yury Ojeda.

M Sc. in Petrology Carlos Alberto Ríos Reyes.

ABSTRACT

TITLE:

EXPERIMENTAL STUDY ABOUT MUD DIAPIRISM: RELATIONSHIP BETWEEN ORGANIC MATTER CONTAIN IN MUD AND MAXIUM HEIGHT GAINED BY THE DIAPIRIC DOMES*

AUTHORS:

OLIVIA GONZÁLEZ MORALES.
ALFONSO LUIS RODRIGUEZ MADRID**

KEYWORDS: Mud Diapirism, Mud Volcanism, Analogue Modelling, Organic Matter, TOC, Sinú Belt.

DESCRIPTION:

Mud diapirs and mud volcanoes are approximately vertical structures. They are formed when underlying muds travel through a rock column. Mud diapirs physical analogue models show that gas generation from decomposing of the mud organic matter plays and determining role as a generating and triggering mechanism for the mud diapirs obtained in the modeling.

The main objective of this Study was to state relationships between the diapirs mud total organic matter content (%TOC) and the highest elevations reached by the structures. The hypothesis was based on the inference that the higher is the organic matter content of the mud, the more gas is generated. This Study shows a linear relationship between the %TOC in the mud and the maximum heights reached by the structures. Likewise, an inverse relation between the time that these domes take to get to their maximum height and the decomposing mud TOC. Furthermore, seven different evolving States have been established. These States have characteristics similar to geomorphologic models described in zones where the phenomenon has been reported. The results of this study can be applied to the interpretation of the geomorphology of the Sinu Belt in the NW Colombian. This geomorphology allows proposing a map of relative differences in TOC in the subsurface basing on the height differences in the Sinu Belt.

* Degree Work

** Physics and Chemistry Engineering College, Geology.
Ph D. in Geophysics Germán Yury Ojeda.
M Sc. in Petrology Carlos Alberto Ríos Reyes.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. GENERALIDADES.....	4
1.1. OBJETIVOS.....	4
1.1.1 GENERAL.....	4
1.1.2 ESPECIFICOS.....	4
1.2 MARCO TEÓRICO.....	5
1.2.1 DIAPIRISMO DE LODO.....	5
-Diapirismo de Lodo en Colombia.....	8
-Variables y Mecanismos Generadores de Diapiros.....	12
1.2.2 MATERIA ORGÁNICA Y TOC.....	14
1.2.3 MODELOS ANÁLOGOS FÍSICOS.....	15
-Escalamiento.....	16
-Materiales.....	16
1.2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	18
2. MATERIALES Y METODOLOGIA.....	20
2.1 EXPERIMENTOS.....	20
2.1.1 PRIMERA ETAPA: INVENTARIO DE VARIABLES FISICAS.....	21
2.1.2 SEGUNDA ETAPA: SELECCIÓN DE LA VARIABLE A MODELAR Y POSTULACIÓN DE HIPÓTESIS.....	27
2.1.3 TERCERA ETAPA: DEFINICION DE LA CONFIGURACION EXPERIMENTAL.....	37
2.1.4 CUARTA ETAPA: MONTAJES FINALES.....	50
3. RESULTADOS.....	55
3.1 RELACIÓN TOC – ALTURA MÁXIMA ALCANZADA POR LOS DOMOS DIAPÍRICOS.....	67

3.2 RELACIÓN TOC – TIEMPO TOMADO POR LOS DOMOS DIAPÍRICOS EN ALCANZAR LA ALTURA MÁXIMA.....	69
4. DISCUSION.....	72
4.1 EFECTO DEL TOC EN LA ALTURA MÁXIMA DE LOS DIAPIROS.....	72
4.2 RELACIÓN ENTRE EL TOC DEL LODO Y LA GENERACIÓN DE GAS.....	75
4.3. EFECTO DEL TOC EN EL TIEMPO DE LEVANTAMIENTO Y COLAPSO DE DIAPIROS.....	77
4.4. ESTADIOS DE EVOLUCIÓN.....	79
4.5. APLICACIÓN AL CARIBE COLOMBIANO.....	85
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	90
5.1 CONCLUSIONES.....	90
5.2 RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
BIBLIOGRAFIA	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principales localidades mundiales donde se ha reportado el fenómeno de diapirismo y vulcanismo de lodo (Adaptado y Modificado de Kopf, 2003).....	6
Figura 2. Localización del fenómeno de diapirismo y vulcanismo de lodo en el NW de Colombia (adaptada y modificada de Vernet, 1985).....	7
Figura 3. Esquematación de los fenómenos diapíricos (Jackson & Galloway (1984) en Vernet, 1985).....	9
Figura 4. A y B. Manifestaciones de vulcanismo de lodo.....	10
Figura 5. Evolución Experimento 2.....	11
Figura 6. Evolución Experimento 6.....	24
Figura 7. Evolución Experimento G2.1.....	25
Figura 8. Evolución Experimento G4.2.....	32
Figura 8. Evolución Experimento G4.2.....	33
Figura 9. Interpretación Experimento G4.2.....	34
Figura 10. Viscosímetro.....	40
Figura 11. Preparación de los materiales.....	41
Figura 12. Medidas de altura.....	45
Figura 13. Evolución Experimento 6U11.....	55
Figura 14. Evolución Experimento 4U12.....	56
Figura 15. Evolución Experimento 4U11.....	56
Figura 16. Evolución Experimento 3U3.....	57
Figura 17. Evolución Experimento 3U4.....	57
Figura 18. Evolución Experimento 4U2.....	58
Figura 19. Evolución Experimento 6U7.....	59
Figura 20. Evolución Experimento 4U5.....	60

Figura 21. Evolución Experimento 5U3.....	61
Figura 22. Evolución Experimento 3U7.....	62
Figura 23. Evolución Experimento 4U7.....	63
Figura 24. Evolución Experimento 6U9.....	64
Figura 25. Interpretación e las estructuras vistas para 6U9 n t = 0 h, t = 20 h, y t = 38 h.....	65
Figura 26. Interpretación e las estructuras vistas para 6U9 t = 50 h, t = 53 h, y t = 110 h.....	66
Figura 27. Gráficas TOC vs. Altura máxima alcanzada por los domos diapíricos.....	68
Figura 28. Gráfica TOC vs. Tiempos en alcanzar las alturas máximas....	70
Figura 29: Evolución temporal de los experimentos con 9 contenidos diferentes de TOC.....	71
Figura 30. Generación de gases, burbujas en el lodo y en la interfaz lodo-gelatina.....	75
Figura 31. Estadio 0: Estado inicial del montaje.....	79
Figura 32. Estadio 1: Abombamiento inicial.....	80
Figura 33. Estadio 2: Formación de estrías.....	80
Figura 34. Estadio 3: Formación de Domillo Central.....	81
Figura 35. Estadio 4: Explosión del domo.....	82
Figura 36. Estadio 5: Formación de Cráter.....	82
Figura 37. Estadio 6: Colapso de la estructura.....	83
Figura 38. Estadio 7: Hundimiento Final.....	83
Figura 39. Estilo estructural del Cinturón del Sinú con base en información fotogeológica y de radar (Tomado de Duque-Caro, 1984).....	86

Figura 40. Comparación de patrones observados en los experimentos con los descritos por Hermann Duque-Caro en 1984 para el Cinturón del Sinú en el Caribe Colombiano.....87

Figura 41. Posibles depocentros de mayores contenidos de materia orgánica en el pasado geológico en el Cinturón Sinú, Litoral caribe Colombiano.....89

LISTA DE TABLAS

Tabla1. Configuración y observaciones de los experimentos de la Primera Etapa.....	22
Tabla 2. Configuración y observaciones de los experimentos de la Segunda Etapa.....	28
Tabla 3. Propiedades de los materiales utilizados a partir de la Tercera Etapa.....	40
Tabla 4. Seguimiento de la evolución de experimentos.....	42
Tabla 5. Configuración y observaciones de los experimentos de la Tercera Etapa.....	46
Tabla 6. Configuración y observaciones de los experimentos de la Cuarta Etapa.....	51
Tabla 7. Alturas máximas alcanzadas por los domos diapíricos a diferentes concentraciones de TOC.....	67
Tabla 8. Tiempo tomado por los domos diapíricos en alcanzar las alturas máximas a diferentes concentraciones de TOC.....	70

INTRODUCCIÓN

Los diapiros y volcanes de lodo son estructuras aproximadamente verticales formadas por el ascenso de lodo a través de una columna de roca (O'Brien, 1968). Su distribución mundial es amplia y variada, y está asociada a diversos ambientes geológicos, presentándose tanto en tierra como costa afuera. Entre las principales localidades con diapiros de lodo se encuentran: Trinidad, Venezuela, Ecuador, México, Italia, Rumania, Rusia, Irán, Burma, Timor, Java, Sumatra y Borneo, Nueva Guinea, Taiwán, Nueva Zelanda, Barbados, Texas, Delta del Mississipi, Delta del Magdalena en Colombia y Australia (Higgins & Saunders, 1974).

Los diapiros de lodo son importantes en tectónica, geología estructural, geología regional, geología del petróleo y geología ambiental, entre otros. Su presencia puede indicar tectónica compresional activa, como es el caso del Mediterráneo (Robertson y Kopft, 1998) y Azerbaijan (Jahubov et al., 1971). Igualmente, durante su ascenso, a lo largo de zonas de debilidad pre-existentes, los diapiros pueden usar estos conductos para la intrusión vertical de lodo, y a su paso, pueden deformar los estratos de la roca huésped (Shipley et al., 1990). Los diapiros frecuentemente son evidencias de fenómenos regionales, como en el Cinturón del Sinú en el litoral Caribe colombiano, donde la región penetrada por diapiros se evidencia muy bien y en menor proporción en el Cinturón de San Jacinto (Duque-Caro, 1984). En geología del petróleo, los diapiros de lodo pueden generar trampas estructurales y/o estratigráficas, o en otros casos, pueden destruir acumulaciones pre-existentes (Ojeda et al., 2004). La sobre-presión, producto de la sub-compactación, es también un fenómeno típicamente asociado al diapirismo de lodo (Hedberg, 1974), la cual presenta amenazas durante la perforación exploratoria. Muchos diapiros, por ser vías de escape de gas metano hacia la atmósfera, pueden ser responsables por contribuir al efecto invernadero (Beauchamp, 2002; Kopft, 2003). Tienen además implicaciones

biológicas y sociales, ya que son frecuentemente considerados fenómenos exóticos de atractivo científico y turístico, y eventualmente pueden representar una amenaza de riesgo geotécnico por la inestabilidad del terreno debida a las emanaciones episódicas (las cuales pueden ser explosivas) de lodo y gas.

Los diapiros de lodo están directamente relacionados con los volcanes de lodo. Estos últimos son una expresión en superficie de los diapiros de lodo. Es conveniente aclarar que todos los volcanes de lodo están asociados con diapiros de lodo, pero no viceversa (Milkov, 2000).

Los mecanismos propuestos para el origen del diapirismo de lodo son pobremente entendidos. Entre los mecanismos a los que hasta ahora se ha atribuido este fenómeno se encuentran: ascenso gravitacional por diferencia de densidades entre las capas suprayacentes y el lodo infrayacentes (Morgan et al., 1965); la presión litostática (Duque-Caro, 1984); la compresión tectónica (Higgins & Saunders, 1974; Jackson y Galloway, 1984 en Vernet, 1985); la acumulación de gases y sobrepresurización del sistema (Hedberg, 1974; Robertson y Kopf, 1998; Milkov, 2000).

Una forma de abordar el estudio de la formación de las estructuras diapíricas es mediante modelos análogos físicos. Los modelos análogos físicos permiten aislar variables que influyen en un sistema para evaluar su contribución relativa al fenómeno (Schellart, 2003). Los modelos análogos físicos son modelos de laboratorio que permiten obtener réplicas simplificadas de sistemas naturales a escala de laboratorio, y ofrecen la oportunidad de investigar la influencia individual de diferentes parámetros de manera controlada (Michon & Merle, 2003)

En este trabajo se usaron modelos análogos físicos para evaluar el efecto que ejerce la concentración de materia orgánica contenida en el lodo

diapírico sobre la génesis y evolución de los diapiros. La hipótesis de trabajo establecida para este estudio fue: Las estructuras diapíricas de lodo y las alturas de los domos relacionados con estas dependen del contenido de materia orgánica en el lodo que las origina, de manera que es de esperarse que a mayor sea el contenido de materia orgánica en el lodo, mayor será la altura de los domos.

1. GENERALIDADES

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 GENERAL

Documentar el efecto del contenido de materia orgánica del lodo diapírico en la génesis y evolución de los domos diapíricos.

1.1.2 ESPECIFICOS

- Determinar la importancia de los gases provenientes de la descomposición de la materia orgánica contenida en el lodo como factor determinante en la formación y transformación de diapiros de lodo.
- Cuantificar el efecto de la concentración de materia orgánica del lodo en la altura máxima de los domos resultantes.
- Cuantificar el efecto de la concentración de materia orgánica del lodo en el tiempo requerido para que los domos resultantes alcancen su altura máxima.
- Documentar los estadios de evolución de los domos formados por diapirismo durante su levantamiento y colapso.

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 DIAPIRISMO DE LODO

El término diapiro proviene del griego *diapirein* que significa taladrar, penetrar, agujerear. Se aplica a estructuras que se originaron o parecen haberse originado como resultado de movimientos de materiales caracterizados por poseer baja viscosidad y baja densidad, desde niveles profundos a través de materiales de niveles menos profundos. Son materiales diapíricos comunes las evaporitas (halita, silvita, yeso anhidrita) y los shales no compactados o lodos bajo condiciones de alta presión (O'Brien, 1968) Estos últimos forman diapiros de lodo, los cuales en algunos casos se expresan en superficie formando domos y volcanes de lodo (Milkov, 2000).

El diapirismo y vulcanismo de lodo es un fenómeno global que ocurre en una amplia variedad de contextos geodinámicos tanto en ambientes marinos como en ambientes continentales. Los diapiros y volcanes de lodo están comúnmente asociados a prismas acrecionarios marinos como se observa en Barbados (Brown, 1990, Langseth et al., 1988; Langseth y Moore, 1990, Godon et al., 2004), Cascadia (Sample, 1990), Costa Rica (Shiple et al., 1990), Panamá (Reed et al., 1990), la fosa del Japón (Morgan y Karig, 1995), el Mar Mediterráneo (Robertson & Kopf, 1998; Cita et al., 1996), el Mar Egeo (Kopf, 2003). En contextos continentales se han reportado ocurrencias en Indonesia (Barber et al., 1986), Australia, Isla de Sakalin en Rusia (Kopf, 2003), Japón (Agar, 1990), Taiwán (Shih, 1967), Azerbaijan (Jahubov et al., 1971), Columbia Británica, Lago Michigan, Texas, y Louisiana (Kopf, 2003), Mississippi, (Morgan et al. 1965), Venezuela (Duerto & McKlay, 2003), Trinidad y Tobago (Higgins & Saunders, 1974; Beeby-Thomson, 1910) al igual que relacionados con procesos de extensión o en un contexto no acrecionario como se dan en

el Mar Negro (Limonov et al., 1994), el Mar de Alborán (Comas et al., 2003), el Golfo de México (Connor, 1990), y los mares Caspio y Salton (Higgins & Saunders, 1974). Ejemplos adicionales son encontrados, en las costas de California, Armenia, Islas de Nicobar, los Kuriles, Kamchatka, Islas Aleutianas (Higgins y Saunders, 1974; Yassir et al., 1994), el Golfo de Cádiz (Murton & Biggs, 2001), Groenlandia, Países Bajos, Norte de Italia, Marruecos, Egipto, Tanzania (Kopf, 2003). En algunos estudios se ha demostrado la asociación de volcanes de lodo con fumarolas de gas, emanaciones de crudo, y con la presencia subsuperficial de hidratos de gas. Ejemplos de estas asociaciones son el margen sur-occidental de África (Ben-Avraham et al., 2002) y los volcanes de lodo de Azerbaijan (Asia sur-occidental), que están relacionados además con campos de hidrocarburos formados en la cuenca de back-arc del Mar Caspio (Beauchamp, 2002; Lowrie et al., 2002; Planke et al., 2003; Milkov, 2000) (Figura 1).

Figura 1. Principales localidades mundiales donde se ha reportado el fenómeno de diapirismo y vulcanismo de lodo (Adaptado y Modificado de Kopf, 2003).

- | | | |
|-----------------------------------|--|---------------------------|
| (1) Colombia. | (15) Países Bajos. | (29) Delta Río Orange. |
| (2) Costa Rica y Panamá. | (16) Alpes Occidentales, Apeninos, Italia. | (30) Azerbaijan. |
| (3) Ecuador. | (17) Mar de Alborán. | (31) Mar Caspio. |
| (4) Venezuela y Trinidad. | (18) Golfo de Cádiz, España. | (32) Irán. |
| (5) Barbados. | (19) Marruecos, Norte de África. | (33) Pakistán. |
| (6) Golfo de México. | (20) Sicilia. | (34) India. |
| (7) Texas, Mississipi y Lousiana. | (21) Mar Mediterráneo. | (35) Burma. |
| (8) Lago Michigan. | (22) Grecia. | (36) Sumatra y Java. |
| (9) California. | (23) Mar Egeo. | (37) Borneo. |
| (10) Cascadia. | (24) Rumania. | (38) Timor. |
| (11) Columbia Británica, Canadá. | (25) Mar Negro. | (39) Australia. |
| (12) Trinchera Aleautiana. | (26) Egipto, Desierto de Libia. | (40) Nueva Zelanda. |
| (13) Groenlandia. | (27) Tanzania. | (41) Papua, Nueva Guinea. |
| (14) Mar del Norte. | (28) Golfo de Guinea. | (42) Taiwan. |
| | | (43) Islas Marianas. |
| | | (44) Trinchera de Japón. |
| | | (45) Isla Sakalin. |



-Diapirismo de Lodo en Colombia

En el margen continental colombiano se ha documentado la presencia de diapirismo arcilloso, siendo este fenómeno particularmente evidente en el Cinturón del Sinú y, en menor proporción, en el Cinturón de San Jacinto (Duque-Caro, 1979-84; Vernet, 1986-89; González y Londoño, 2001, Reyes et al., 2001) (Figura 2). Duque-Caro interpretó el diapirismo como “el factor deformante más importante” en el Cinturón del Sinú (Duque-Caro, 1979 y Vernet, 1985-89) atribuyendo el fenómeno a tres causas: a) la inversión de densidad y compresión vertical, b) la tendencia del lodo a migrar hacia los pliegues anticlinales, y c) la tendencia que tiene el lodo de viajar a través de planos de falla (Jackson & Galloway, 1984 en Vernet, 1985-89; Figura 3).

El diapirismo de lodo se presenta tanto en zonas emergidas como en áreas costa afuera en el Mar Caribe colombiano, con expresiones geomorfológicas características, como domos, colinas, islas de arrecifes de coral y volcanes de lodo (Duque-Caro, 1979-84; Vernet, 1986-89; González y Londoño, 2001, Reyes et al., 2001) Entre estas manifestaciones se encuentran las ubicadas en los alrededores de Cartagena, como los volcanes de lodo de Turbaco, Ternera, Mamonal, Cañaveral, Bayunca, Lomita Arena y El Totumo, los cuáles se encuentran hacia el Norte de la ciudad en zonas emergidas (Reyes et al., 2001) (Figura 4). Hacia los Departamentos de Antioquia y Córdoba, algunos de los ejemplos mejor conocidos son los volcanes de lodo de San Antero (Córdoba), Arboletes (Antioquia), Alto de Mulato (Antioquia) y el volcán de lodo de Cacahual (Antioquia) (González y Londoño, 2001; Vernet, 2003). Igualmente se han encontrado manifestaciones diapíricas submarinas como en la isla frente a Damaquiel (Antioquia) y las islas de arrecifes de coral del Rosario, Tierrabomba y Barú (Bolívar) (Vernet, 1985-89 y 2003).

Figura 2. Localización del fenómeno de diapirismo y vulcanismo de lodo en el NW de Colombia (adaptada y modificada de Vernet, 1985).

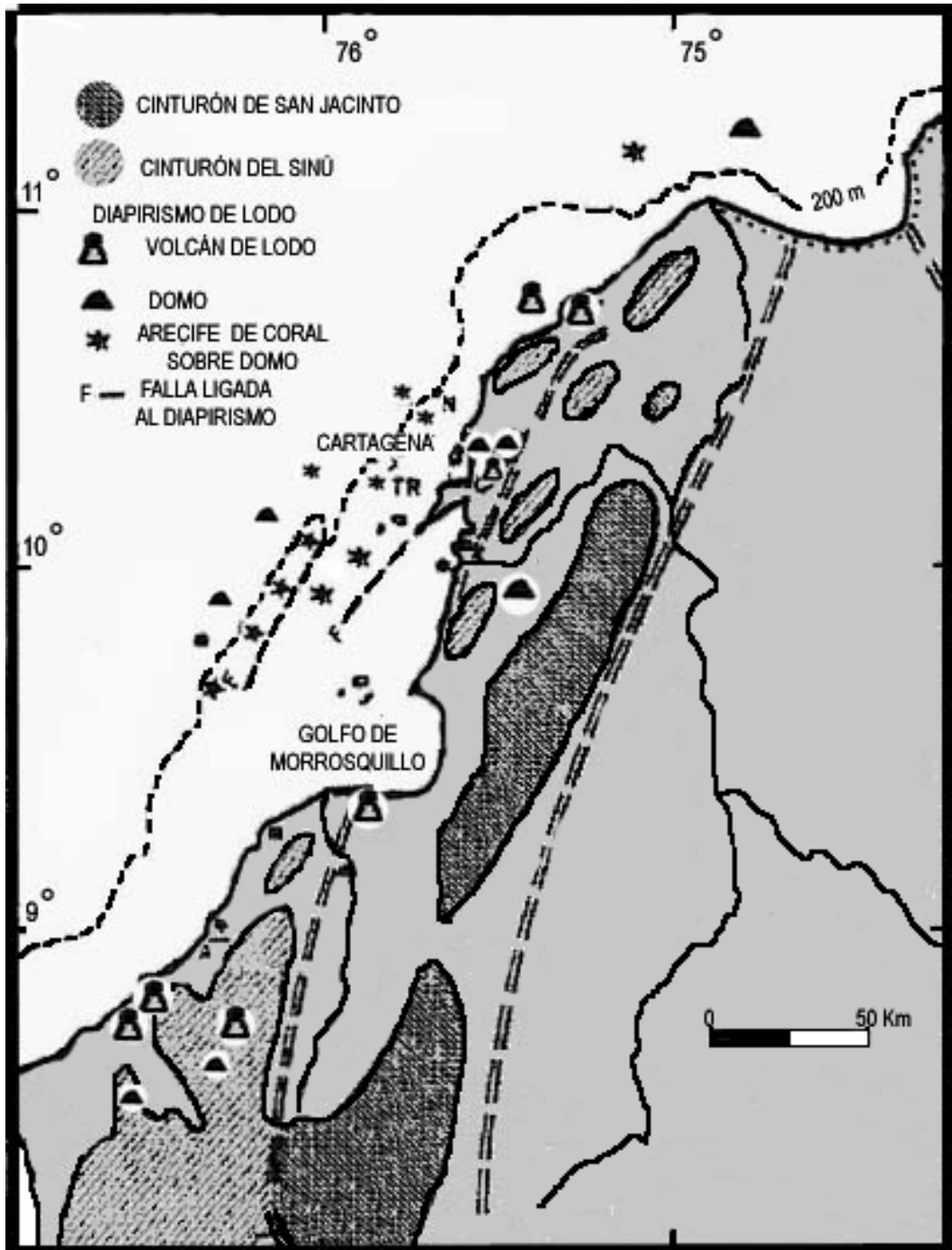


Figura 3. Esquematación de los fenómenos diapíricos. Las flechas a trazos indican la dirección de la compresión. Las flechas azules indican la dirección del movimiento del lodo. P = presión. a) Inversión de densidad y compresión vertical. b) Migración de lodo a estructuras de plegamiento (anticlinales). c) Movimiento del lodo a lo largo de planos de falla (Jackson & Galloway (1984) en Vernet, 1985).

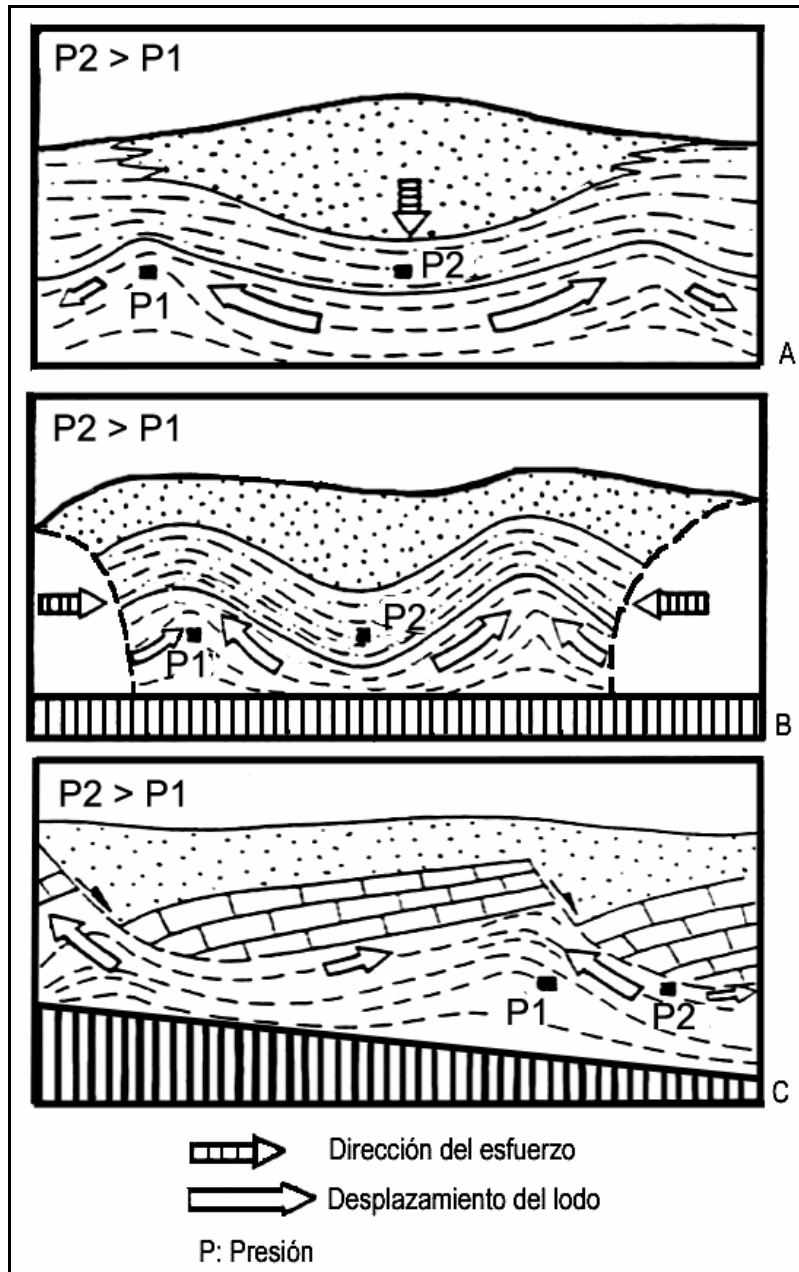


Figura 4. A y B. Manifestaciones de vulcanismo de lodo en Loma Volcán-Turbaco (Cercanías de Cartagena). A. Densidad de cráteres. Cada persona está ubicada sobre un cráter diferente (Más de 60 en esta zona). B. Cráteres Gemelos (El diámetro de cada cráter es de aproximadamente 40cm.) C y D; Arjona, Departamento de Bolívar. C. Zona estéril en vegetación en la cual se encuentran cuatro cráteres en total. Última erupción violenta: 1999. (Escala: Guía de 1,60 m de estatura). D. Dimensiones del cráter (Escala: Moneda de 2,3 cm de diámetro). E y F. Lomita Arena cerca de Pueblo Nuevo. Una hora al norte de Cartagena, vía Barranquilla. E. 2001 (Vernette, 2003) F. Enero 2005. G y H; Volcán de lodo del Totumo, Galerazamba; a una hora y media de Cartagena en la vía Cartagena-Barranquilla. G. 1979 (Vernette, 2003); H. Enero 2005).



-Variables y Mecanismos Generadores de Diapiros

En el estado del entendimiento actual del diapirismo de lodo, no hay consenso en cuanto a los mecanismos que generan diapiros, ni en cuanto a la contribución relativa de las distintas variables que inciden en su génesis y formación. Las variables más comúnmente citadas para explicar el diapirismo son:

(1) Esfuerzos Compresivos. Kugler (1968) atribuyó el fenómeno de vulcanismo a esfuerzos compresivos laterales (compresión orogénica) (Kugler, 1968; en Duque-Caro, 1979; Milkov, 2000).

(2) Esfuerzos Distensivos. Yory et al. (1980) explicaron el origen del vulcanismo de lodo diapírico como respuesta a fallas normales casi verticales (Yory et al., 1980; en González y Londoño, 2001).

(3) Diferencia de Densidades. Duque-Caro (1984) explicó el diapirismo en el Caribe colombiano como debido al peso gravitacional de sedimentos turbidíticos sobre sedimentos pelágicos y hemipelágicos de menor densidad (Duque-Caro 1984).

(4) Permeabilidad. Vernette (1986) sugirió que el fenómeno del diapirismo de lodo es debido al movimiento de lodo saturado en agua, desde formaciones profundas atravesando los estratos suprayacentes localmente deformados, a lo largo de conductos permeables como fallas (Vernette, 1986).

(5) Tasa de Sedimentación. Milkov, (2000) propuso que en márgenes continentales pasivas y zonas abisales de mares mediterráneos, los diapiros son el resultado de la alta proporción de acumulación de sedimentos.

(6) Descomposición de Hidratos de Gas. Robertson & Kopf (1998) y Beauchamp (2002) coincidieron en atribuir la formación de diapiros de lodo a la descomposición de los hidratos de gas presentes en sedimentos de algunas márgenes continentales. Estos hidratos, al descomponerse bajo un sello impermeable, aumentan la presión de poro, cambian la densidad de los sedimentos, proporcionan una fuerza de flotabilidad adicional, y sirven como un mecanismo propulsor en la movilización del lodo. Como consecuencia, este lodo movilizado desde abajo, genera intrusiones de lodo a través de los estratos suprayacentes (Robertson & Kopf, 1998; Beauchamp, 2002).

(7) Contenido de Materia Orgánica. Hedberg, (1974) sugirió que el lodo diapírico comúnmente contiene materia orgánica diseminada, la cual es atacada por bacterias aerobias y anaerobias, según la profundidad de enterramiento. Estas bacterias obtienen la energía requerida para su metabolismo de la oxidación anaerobia de compuestos orgánicos o inorgánicos simples, la cual conlleva a la reducción de CO₂ a metano. El metano al producirse, (a) incrementa la presión de poro, (b) aumenta la porosidad, (c) reduce la densidad, (d) produce déficit de masa los cuales se traducen en anomalías negativas de gravedad, y (e) aumenta la temperatura y flujo termal por encima de valores normales. Estas variaciones generan entonces un desequilibrio entre el lodo cargado en metano y el material circundante, lo que convierte al lodo en un material plástico de baja viscosidad que tenderá a fluir con respecto a la roca huésped, así causando intrusiones de lodo y diapiros. (Hedberg, 1974).

Cada una de las anteriores variables propuestas tiene bases físicamente plausibles, y se requiere entonces estudiar más a fondo cada una de ellas para entender su efecto relativo en la generación y evolución de los diapiros de lodo. Este estudio se concentró exclusivamente en evaluar el efecto de la variable contenido de materia orgánica arriba descrita. En particular, este estudio fue diseñado para entender la posible relación

entre la concentración de materia orgánica en el lodo y la altura máxima alcanzada por los domos diapíricos, así como la relación entre el contenido de materia orgánica y la tasa de ascenso de los domos. Para tal efecto, este estudio se apoyó enteramente en la construcción de modelos análogos físicos, descritos en el apartado 1.2.3.

1.2.2 MATERIA ORGANICA Y TOC

La materia orgánica de los sedimentos se deriva de restos animales y vegetales. Todos estos restos, provenientes de seres vivos, están compuestos fundamentalmente por un conjunto de cuatro elementos: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N). Combinados en diferentes proporciones, estructuras y elementos, constituyen moléculas más grandes como: carbohidratos (glúcidos o azúcares), lípidos (grasas y aceites), proteínas y ácidos nucleicos. Los ácidos nucleicos y la mayoría de las proteínas, por ser estas las moléculas menos resistentes, son degradadas más rápidamente por bacterias (Logan & Longmore, 2004).

La cantidad de materia orgánica encontrada en los sedimentos es una función del aporte hecho por diferentes fuentes que se depositan en determinada superficie y las proporciones a las cuales diferentes tipos de materia orgánica son degradadas por procesos microbiológicos. El Carbono Orgánico Total (TOC) se refiere a la cantidad de materia orgánica preservada dentro de los sedimentos. Si el carbono orgánico total (TOC) de una muestra de sedimentos es aproximadamente 1%, significa que hay un gramo de materia orgánica por cada 100 gramos de sedimento. El analizador de TOC puede medir carbono total (TC), carbono orgánico total (TOC), carbono inorgánico (IC), y en algunos casos, carbono orgánico purgable (POC) y carbono orgánico no purgable (NPOC).

El TOC puede medirse tanto en sustancias líquidas como sólidas. En Geología del Petróleo, las mediciones de TOC son importantes para evaluar el potencial generador de una roca fuente de hidrocarburos. Generalmente, las medidas de TOC involucran: (1) oxidación de carbono orgánico en la muestra. (2) detección y cuantificación del producto oxidado (CO₂); (3) presentación de los resultados en unidades de masa de carbón por volumen de muestra (líquidos) o por masa de sólidos (sólidos). El carbón en la muestra es convertido primero a CO₂ por la combustión de TOC. Luego se conduce el CO₂ derivado a través de un detector infrarrojo no dispersivo (NDIR) sensitivo a la frecuencia de absorción del CO₂. El NDIR genera una señal no lineal que es proporcional a la concentración instantánea de CO₂ en el conductor de gas. Esta señal entonces se lineariza y se integra sobre el análisis de tiempo de la muestra. El área resultante se compara con los datos de calibración almacenados y se calcula la concentración de la muestra (Logan & Longmore, 2004).

1.2.3 MODELOS ANÁLOGOS FÍSICOS

Los modelos análogos físicos son réplicas simplificadas de sistemas naturales en el laboratorio (Schellart, 2003). Estos modelos han sido aplicados extensamente desde principios del siglo XIX para estudiar procesos geológicos, ayudando a comprender cualitativa y cuantitativamente fenómenos naturales específicos, ofreciendo la oportunidad de investigar la influencia individual de diferentes parámetros en los procesos geológicos. Adicionalmente, las condiciones límite pueden fijarse de acuerdo con las necesidades del experimentador, el cual tiene control total sobre la variable en estudio. También, los modelos análogos físicos permiten estudiar la evolución estructural tridimensional de un modelo geológico específico, brindando una imagen cinemática coherente que ayuda a interpretar prototipos naturales (Schellart, 2003).

Escalamiento

Un modelo análogo es un buen representante de un prototipo natural, si sigue los tres aspectos de similaridad: geometría, cinemática y dinámica, además deben ser escalados apropiadamente y los materiales usados deben mostrar un comportamiento reológico similar a los prototipos naturales (Hubbert 1937; en Schellart, 2003).

Para la similaridad cinemática, el modelo y el prototipo tienen que tener cambios similares en forma y posición, donde el tiempo requerido para cualquier cambio en el modelo, es proporcional al tiempo correspondiente en el prototipo (Ramberg, 1967; en Schellart, 2003),

Para las similaridades dinámica y geométrica entre el modelo y su prototipo, los dos cuerpos deben tener radios y distribuciones de diferentes clases de fuerzas importantes similares, como fuerzas gravitacionales y fuerzas resistivas (como la fricción y la viscosidad) actuando en las diferentes partículas del cuerpo. Teniendo en cuenta el rango de la escala espacio-temporal entre el prototipo natural y el modelo, solamente ciertos materiales son apropiados para usar en modelos análogos simulando procesos geológicos (Schellart, 2003).

Materiales

Una amplia variedad de materiales cohesivos y no cohesivos han sido usados en el modelamiento análogo de procesos geológicos, con el fin de escalar apropiadamente la variedad de propiedades reológicas en rocas con comportamiento frágil, viscoso y plástico (Schellart, 2003).

Materiales Frágiles. Al usar materiales frágiles o granulares (tales como arena) en los experimentos, no hay dependencia entre la razón de las fuerzas, y el tiempo no es un parámetro importante para determinar el

resultado del experimento (Davy & Cobbold, 1991; Cobbold & Jackson, 1992; Schellart, 2003).

Los materiales granulares tienen un coeficiente de fricción comparable con el coeficiente de fricción de las rocas y se asume que tiene una cohesión insignificante, lo que hace que la analogía entre el prototipo natural y el modelo sea adecuada especialmente cuando se usa en experimentos con un radio de escala pequeño (pequeño radio de esfuerzos). Son útiles para simular deformación frágil de rocas en el modelamiento análogo de procesos tectónicos (Gubert, 1951; Horsfield, 1977; Davy y Cobbold, 1988, 1991; Ratschbacher et al, 1991; Brun et al, 1994; Faccena et al, 1996, 1999; Hatzfeld et al, 1997; sep, 2000; Martinod et al, 2000; Schellart et al, 2002; Buró et al, 2002; en Schellart, 2003; Bonini, 2003), ya que permiten un comportamiento del tipo Mohr-Coulomb. En el comportamiento de tipo Mohr-Coulomb, las fuerzas aumentan con el incremento de la presión de confinación, localizando la deformación en zonas de cizalla o falla relativamente estrechas. Por esto, la deformación en materiales granulares experimentales es comparable con la deformación producida en rocas frágiles; aunque en la formación de fallas se presenta un descenso en las fuerzas debido a la pérdida de cohesión del material. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el inicio del fallamiento en los materiales granulares ocurre después de mayores fuerzas que en las rocas (Krantz, 1991 en Schellart, 2003). El ancho de las zonas de cizalla en los modelos es relativamente mayor al ancho de cizalla de los prototipos naturales, ya que el ancho aumenta con el tamaño de grano, siendo preferible utilizar materiales finos (~50-200 μm). Sin embargo, al disminuir el tamaño de grano se incrementan los "enlaces de van der Waals" (una fuerza electrostática) entre partículas individuales, lo cual aumenta la cohesión general del material (Schellart, 2003).

Materiales Viscosos. Al usar materiales viscosos en los experimentos el tiempo debe ser apropiadamente escalado. La viscosidad de un material usado en un modelo análogo físico debe ser menor que la viscosidad real (Davy & Cobbold, 1991; Cobbold & Jackson, 1992; en Schellart, 2003).

En el modelamiento análogo de procesos tectónicos a gran escala se han usado básicamente dos tipos de materiales los cuales, tanto el uno como el otro, tienen una viscosidad aproximadamente Newtoniana: una masilla de silicona o aceite de silicón, de viscosidad relativamente alta, y cualquier tipo de solución azucarada (miel, almíbar de glucosa, almíbar de maíz, almíbar dorado, solución de azúcar, solución de sacarosa), de viscosidad relativamente baja (Schellart, 2003).

1.2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL.

El diseño de experimentos es el paso inicial en cualquier investigación que requiera pruebas y toma de datos, con el fin de focalizar y optimizar el trabajo y de este modo saber que información se deberá coleccionar y con qué fin. Se inicia con la realización de un borrador que incluya objetivos, los procedimientos experimentales y aspectos tales como materiales a utilizar y total de pruebas a realizar. Se debe constantemente hacer una reevaluación y replanteamiento del diseño de acuerdo con los datos que se obtienen a medida que se avanza, evitando al máximo desenfocarse u olvidar los objetivos iniciales planteados para la investigación llevada a cabo (Cochran, 1950).

Los objetivos planteados dentro del diseño de experimentos pueden ser en forma de preguntas a contestar, hipótesis a probar, y efectos a estimar. Esto se hace con el fin de llegar a hacer una frase clara y específica que condense la hipótesis a probar, al igual que las generalizaciones que puedan hacerse y la población sobre la cual se desean hacer inferencias. Las fallas más comunes en este aspecto, son las frases vagas o la no clara definición del o los objetivos; así como la excesiva ambición dentro

de un proyecto. De este modo, es conveniente clasificar los objetivos en mayores y menores, según la posibilidad de llevarlos a cabo al igual que la necesidad o el orden jerárquico de dichos objetivos planteados por el o los investigadores (Cochran, 1950).

Entre los procedimientos experimentales se deben tener en cuenta aquellas pruebas que arrojen resultados prácticos, es decir, que arrojen información sobre el objetivo a resolver; fijar las condiciones bajo las cuales serán llevados a cabo los experimentos. Se debe además establecer un control, es decir, saber qué variable o conjunto de variables se van a observar y bajo qué parámetros; realizar combinaciones de variables y pruebas bajo condiciones inertes, esto es, bajo condiciones en las cuales los resultados esperados son nulos. Se debe tener muy claro que no se pueden hacer inferencias con base en solo un experimento; por ende es necesario acordar desde un principio un número de réplicas que lleven a resultados significativos (Cochran, 1950).

Otros aspectos a tener en cuenta son los materiales a utilizar, los cuales se deben conocer desde el principio y el método con el cual se realizarán las medidas, así como las escalas en las cuales se trabaja (Cochran, 1950).

2. MATERIALES Y METODOLOGIA

Este estudio comenzó con una revisión bibliográfica exhaustiva. Esta revisión incluyó trabajos que documentaran las distintas variables involucradas en la generación de diapiros. Igualmente, se investigaron las metodologías para la construcción de modelos análogos físicos. Se le dio especial énfasis a las características reológicas de los materiales. Una vez se tuvieron claros estos conceptos, se procedió con el diseño de los experimentos, pieza central en la ejecución de este trabajo.

2.1 EXPERIMENTOS

La experimentación contó con 4 etapas. La Primera consistió en generar un inventario de las variables físicas que podían ser modeladas en el laboratorio. La Segunda Etapa inició con la observación de que el mecanismo propulsor del diampirismo podía ser debido a la presencia de gases generados y/o contenidos en el lodo. La Segunda Etapa finalizó con la selección de la variable contenido de materia orgánica como parámetro a ser modelado en el laboratorio, y con la postulación de la hipótesis de trabajo. La Tercera Etapa sirvió para definir la configuración experimental de manera que se asegurara total control sobre la variable contenido de materia orgánica. La Cuarta Etapa consistió en el montaje de los experimentos finales, tomando datos que llevaran a aceptar o rechazar la hipótesis propuesta.

2.1.1 PRIMERA ETAPA: INVENTARIO DE VARIABLES FISICAS

Después de revisar las diferentes hipótesis sobre los posibles procesos de generación del diapirismo o vulcanismo de lodo, se prosiguió con la compilación de las diferentes variables que podrían ser modeladas en el laboratorio. La evaluación de dichas variables dependió en primer lugar de su papel aparente en la generación de diapiros, y en segundo lugar de la viabilidad de implementarlas partiendo de lo más sencillo a lo más complejo.

Las variables fueron: (1) Diferencia de densidades entre el lodo infrayacente y la arena suprayacente, en combinación con la carga litostática; (2) generación de gases retenidos por una capa impermeable intermedia en combinación con la carga litostática; (3) generación de gases bajo una capa impermeable intermedia y geometría del 'basamento' (capa base). Para variar la presión litostática se varió el espesor de la capa de arena suprayacente. Para simular la generación de gas, se añadió guarapo al lodo y así se desencadenó un proceso de fermentación y degasificación. Para variar la geometría del basamento, se confinó lateralmente la capa base de lodo entre dos bloques de icopor (Figura 6).

En esta etapa se realizaron 6 experimentos los cuales se explicaran en la tabla 1.

Tabla1. Configuración y observaciones de los experimentos de la Primera Etapa.

VARIABLES A EVALUAR	DIMENSIONES DE LA CAJA	MATERIALES	CONFIGURACIÓN	OBSERVACIONES
Experimento 1: Alta carga litostática y diferencia de densidades. Objetivo: ver efecto de diferencia de densidades y una elevada carga litostática.	Base: 40cm × 30 cm. Altura: 50 cm.	-Arena media gruesa seca con mal calibrado. -Lodo rico en materia orgánica. -	-Capa base: arena (5 cm.). -Capa media: lodo (7.5 cm). -Capa tope: arena (15 cm).	Compactación del lodo por liberación de fluidos. Fuga de fluidos en la caja.
Experimento 2: Alta carga litostática y diferencia de densidades. Objetivo: ver efecto de diferencia de densidades una elevada carga litostática.	Base : 20cm × 20 cm. Altura: 40 cm.	-Lodo rico en Materia Orgánica -Arena media-gruesa humedecida con mal calibrado.	-Capa base: arena (5 cm). -Capa media: lodo (5 cm). -Capa tope: arena (12.5 cm).	Compactación del lodo. Subsidencia gradual de la capa de arena, rápida en un comienzo, luego un poco más lenta hasta su estabilización final. El valor del descenso de la arena era proporcional al espesor de la capa de agua liberada al tope de la arena suprayacente (Figura 5)
Experimento 3: Alta carga litostática, diferencia de densidades e inyección de gases. Objetivo: ver efecto de inyección de gas sumado a diferencia de densidades y una elevada carga litostática.	Base : 20cm × 20 cm. Altura: 40 cm.	-Lodo rico en Materia Orgánica -Arena media-gruesa humedecida con mal calibrado. -Tubo PVC en U. -Compresor para inflar llantas. -Silicona. -Película plástica recubriendo el tope de la caja.	-Capa base: arena (5 cm.). -Capa media: lodo (7.5 cm). -Capa tope: arena (15 cm). Tubo en U ubicado en una esquina de la caja, con una boquilla sobresaliendo 5 cm. de la caja (largo 45 cm) y la segunda boquilla ubicada en la base de la capa de lodo.	Compactación inicial del lodo. Subsidencia gradual de la capa de arena. Al llevar a cabo la inyección únicamente se observó la vibración de todo el sistema, la generación de zonas de debilidad por donde ascendía el aire produciendo burbujeo en el agua del tope y una mezcla entre el lodo y la arena no muy bien definida en algunas zonas.
Experimento 4: Alta carga litostática, diferencia de densidades, generación de	Base : 20 cm × 20 cm. Altura:	-Lodo rico en materia orgánica. -Gelatina sin sabor.	-Capa base: lodo mezclado con guarapo (7.5 cm). -Capa impermeable	Subsidencia, retrasada en este caso por una impermeabilización temporal que proporcionó la capa de gelatina, pero que con el tiempo cedió a la carga

VARIABLES A EVALUAR	DIMENSIONES DE LA CAJA	MATERIALES	CONFIGURACIÓN	OBSERVACIONES
gases en el lodo y capa impermeable Objetivo: Ver efecto de una capa impermeable reteniendo gases generados en el lodo sumado a diferencia de densidades y una elevada carga litostática.	40 cm.	-Arena media – gruesa mal calibrada, -Ferromineral. -Guarapo.	(gelatina) (0,5 cm) -Capa tope: arena (22,5 cm) intercalación de 9 capas de arena coloreada con ferromineral rojo y arena sin colorear (cada capa 2,5 cm).	litostática. Luego, la gelatina se deshizo en el lodo, dejando escapar el agua y gases del lodo hacia el tope. Esto derivó esto en la compactación de la capa de lodo. Debido a esto se creyó que la carga litostática, para estos modelos estaba jugando un papel negativo, que podría inhibir la formación de estructuras, o en el caso de que se formasen, no se podría ver debido al gran espesor de los sedimentos, impidiendo manifestar el fenómeno en superficie.
Experimento 5: Alta carga litostática, diferencia de densidades, generación de gases en el lodo y capa impermeable. Objetivo: Ver efecto de una capa impermeable reteniendo gases generados en el lodo.	Base : 20 cm × 20 cm. Altura: 40 cm.	-Lodo rico en materia orgánica. -Yeso (estuco) -Arena media – gruesa mal calibrada, -Ferromineral. -Guarapo.	-Capa base: lodo mezclado con guarapo (7.5 cm). -Capa impermeabilizante (estuco) (0,5 cm)	Abortado. La capa de yeso-estuco no sirvió como capa impermeabilizante ya que después de poco tiempo dejó filtrar fluidos provenientes del lodo hacia la superficie. De esto se dedujo que el yeso-estuco no era un material apropiado para las simulaciones que se pretendía llevar a cabo dado su largo tiempo de secado antes de servir como capa impermeabilizante.
Experimento 6: geometría capa base, capa impermeabilizante, generación de gases, diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivo: Ver efecto de zonas de debilidad creadas por una geometría de la capa base junto con la generación de gases en el lodo	Base : 20 cm × 20 cm. Altura: 40 cm.	-Lodo rico en materia orgánica. -Gelatina sin sabor. -Arena media – gruesa mal calibrada, -Ferromineral. -Guarapo mezclado con zumo de piña. -Icopor.	-Capa base: lodo mezclado con guarapo y zumo de piña (5,3 cm) limitado por dos bloques de icopor ubicados en los extremos (2,5 cm de ancho c/u) -Capa impermeabilizante (gelatina coloreada con ferromineral rojo) (0,7 cm) -Capa tope: arena (3 cm).	Formación de un domo h = 20 mm y un posterior agrietamiento (largo = 9cm, ancho = 5cm) del mismo donde se podía observar lodo y gelatina 15 horas después de la puesta en marcha del experimento. Debido a que los datos no fueron tomados con suficiente rigurosidad, y las variables anexadas fueron demasiadas, se decidió llevar a cabo nuevos experimentos eliminando variables y repitiendo este mismo (Figura 6).

Figura 5. Evolución experimento 2. a. Configuración inicial: Capa base de arena (5cm.), capa media de lodo (7.5cm). Capa tope de arena (15cm). b. Configuración final. c. Evolución del modelo. Curva que muestra la subsidencia de la arena y compactación del lodo con respecto al tiempo. Después de aproximadamente 30 horas la curva tiende a estabilizarse haciéndose paralela a la horizontal.

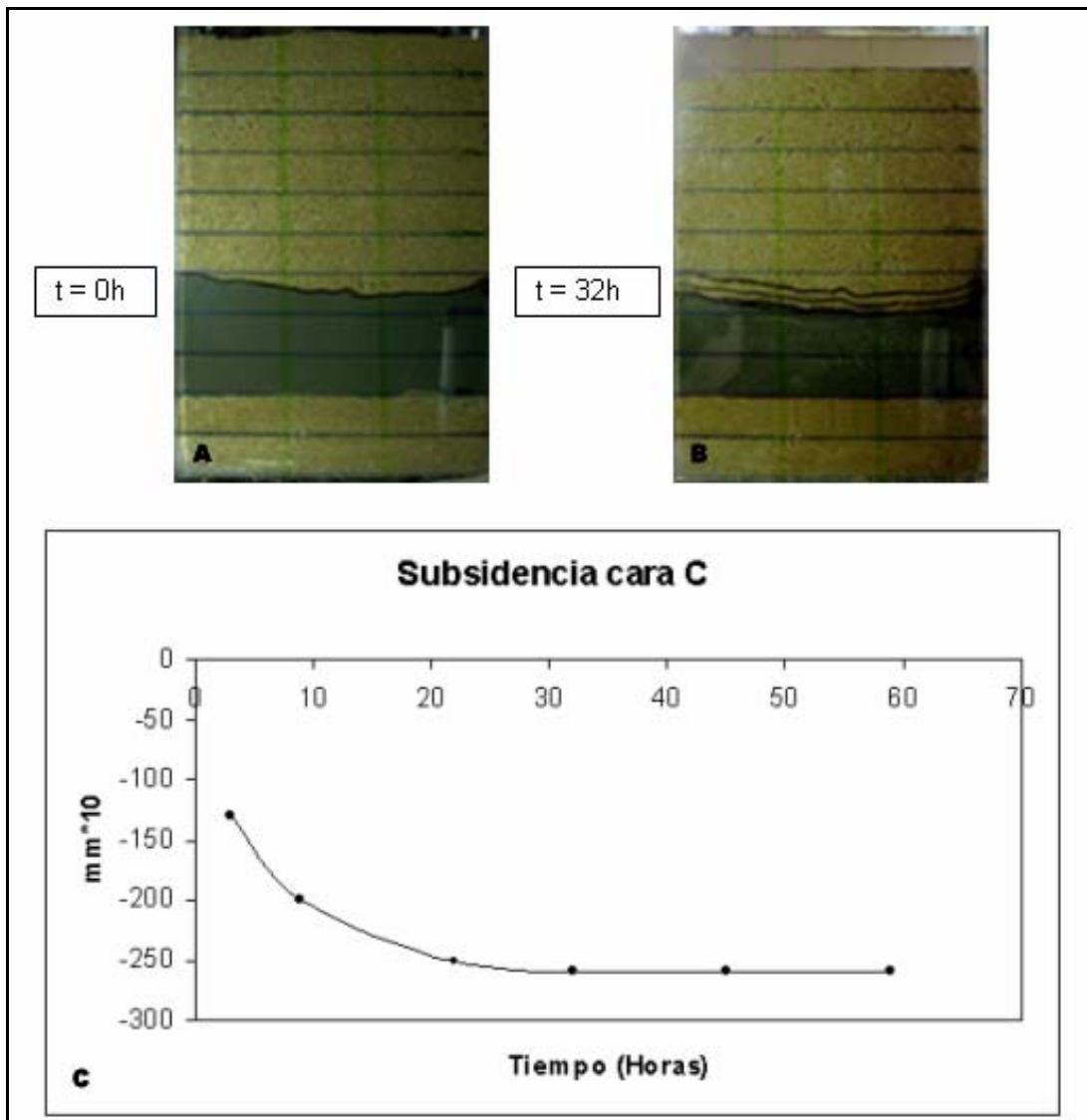
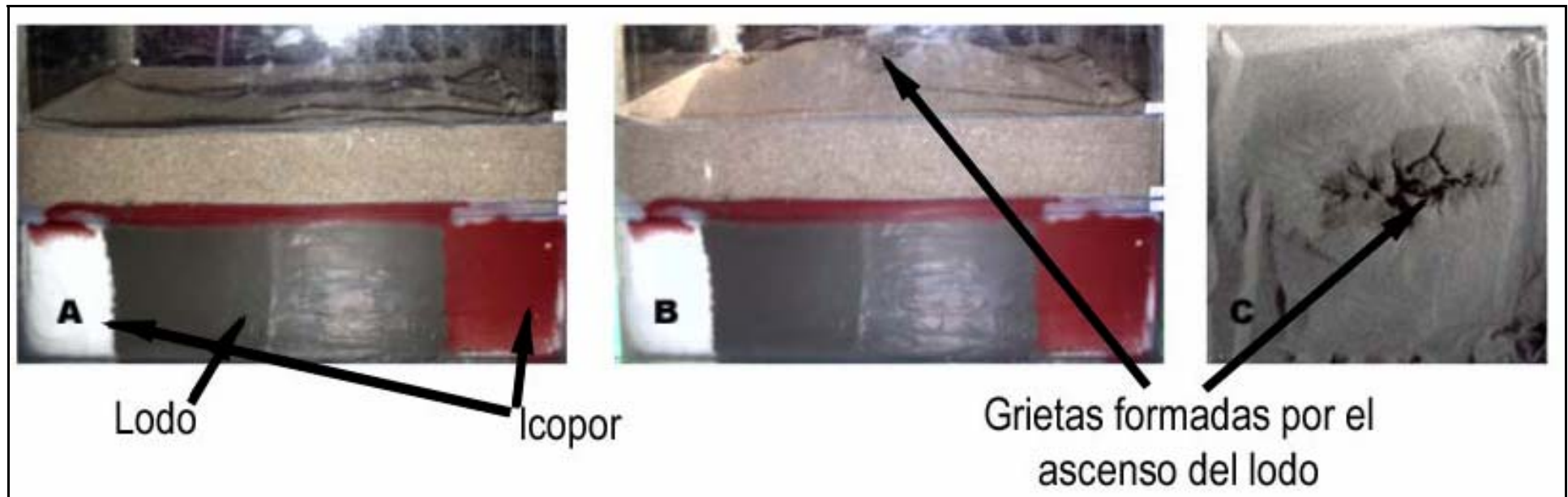


Figura 6. Evolución experimento 6. Efecto de la geometría de la capa base, para simular relieve del basamento. A. Vista lateral. Largo de la caja: 20 cm. Configuración inicial: Capa base de lodo de dos barras de icopor (7 cm) + Capa impermeable de gelatina Coloreada con ferromineral rojo (0,7 cm) + arena (3 cm). Espesor total de las capas: 10,7 cm. La gelatina de color rojo rellenó espacios vacíos, tales como el espacio entre la cara frontal de la caja y el bloque de icopor del lado derecho. B. Configuración final. C. Configuración final: Vista de planta: 20 cm × 20 cm.



De esta Primera Etapa se extractaron las siguientes observaciones:

(1) El tamaño ideal de las cajas para los experimentos fue de 20 × 20 cm de base, con alturas de 20 a 50 cm. Estos tamaños permitieron manipular las cajas en forma fácil, no requirieron cantidades excesivas de material, y permitieron observar, medir y fotografiar el fenómeno en forma práctica.

(2) Una carga litostática relativamente alta en comparación con el espesor de la capa de lodo solamente resultó en compactación de lodo por liberación de agua y subsidencia de la capa de arena suprayacente. Ninguna combinación de cargas resultó en generación de domos observable.

(3) La diferencia de densidades entre el lodo y la arena no tuvo ningún efecto aparente en la generación de domos, contrariamente a lo propuesto por, O'Brien (1968), Duque Caro (1984).

(4) Fue necesario añadir una capa impermeable para inhibir el libre flujo de agua desde el lodo hacia la arena suprayacente. Para simular una capa impermeable es conveniente utilizar gelatina y no yeso (estuco), ya que este último tiene un tiempo de secado muy prolongado y en contacto con el lodo tiende a dejar filtrar fluidos hacia la superficie. La gelatina es más apropiada para los experimentos ya que su tiempo de secado es rápido (aproximadamente 4 horas) y evita que se filtren los fluidos.

(5) Según el Experimento 6, aparentemente el mecanismo propulsor del diapirismo de lodo puede ser la presencia de gases liberados, desde el lodo. Estos gases se acumulan en la base de la capa impermeable aumentando la presión hasta romper dicha capa, generando una estructura cómica que posiblemente fue el producto del ascenso de material (gas, lodo y demás fluidos contenidos en éste) atravesando las capas suprayacentes hasta llegar a expresarse como una amplia grieta en superficie.

2.1.2 SEGUNDA ETAPA: SELECCIÓN DE LA VARIABLE A MODELAR Y POSTULACIÓN FINAL DE HIPÓTESIS

En esta etapa se realizaron 11 nuevos experimentos, teniendo en cuenta las observaciones obtenidas en la Primera Etapa y las conclusiones que de esta se derivaron. Así, se enfocó la experimentación hacia el hecho de que posiblemente los gases presentes en la capa bases podían ser el mecanismo propulsor del diapirismo de lodo.

Las configuraciones de los montajes, sus objetivos y las observaciones realizadas durante esta Etapa se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Configuración, objetivos y observaciones de los experimentos de la Segunda Etapa.

EXPERIMENTO Y VARIABLES A EVALUAR	DIMENSIONES DE LA CAJA	MATERIALES	CONFIGURACIÓN	OBSERVACIONES
<p>G1.1 Geometría capa base, capa impermeable, generación de gases, diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivo: Réplica G.1.2, que este presentó problemas con la capa impermeable.</p>	<p>Base : 20 cm × 20 cm Altura: 30cm.</p>	<p>-Lodo rico en materia orgánica. -Gelatina sin sabor. -Arena media – gruesa mal calibrada, -Ferromineral. -Guarapo mezclado con zumo de piña. -Oasis</p>	<p>-Capa base: Lodo orgánico mezclado con Guarapo (7 cm) entre dos barras de oasis (geometría para crear zonas de debilidad) -Capa impermeable: gelatina (0.5 cm). -Capa tope: arena (3 cm).</p>	<p>Leve estructura cómica que no superó los 3 mm de altura y luego el colapsó.</p>
<p>G1.2 Geometría capa base, capa impermeable, diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivos: Comparación con G1.1 y G1.4. Observar la relevancia de la geometría de capa base en la formación de estructuras diapíricas..</p>	<p>Base : 20 cm × 20 cm Altura: 30cm.</p>	<p>-Lodo rico en materia orgánica. -Gelatina sin sabor. -Arena media – gruesa mal calibrada, -Ferromineral. -Oasis</p>	<p>-Capa base: Lodo orgánico (7 cm) entre dos barras de oasis (geometría para crear zonas de debilidad). -Capa impermeable: gelatina coloreada con ferromineral rojo (0.5 cm). -Capa tope: arena (3 cm).</p>	<p>Abortado. Problemas en la capa impermeable: filtración temprana de fluidos hacia la capa tope de arena con el consecuente humedecimiento de la misma.</p>
<p>G1.3 Capa impermeable, generación de gases, diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivo: Comparación con G1.1 y G1.4. Observar el efecto de la generación de</p>	<p>Base : 20 cm × 20 cm Altura: 40cm.</p>	<p>-Lodo rico en materia orgánica. -Gelatina sin sabor. -Arena media – gruesa mal calibrada, -Ferromineral. -Guarapo mezclado con zumo de piña.</p>	<p>-Capa base: Lodo orgánico mezclado con Guarapo (7 cm). -Capa impermeable: gelatina coloreada con ferromineral rojo (0.5 cm). -Capa tope: arena (3</p>	<p>Domo de 10 mm de altura, con agrietamiento en su parte central. La arena se humedeció por completo y demasiado rápido, lo cual puede evidenciar que la gelatina se degradó demasiado pronto por lo cual los gases escaparon muy temprano.</p>

EXPERIMENTO Y VARIABLES A EVALUAR	DIMENSIONES DE LA CAJA	MATERIALES	CONFIGURACIÓN	OBSERVACIONES
gases en la formación de estructuras sin tenerse una geometría de capa base.			cm).	
G1.4 Capa impermeable, diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivo: Ver efecto de capa impermeable junto con baja carga litostática. Debido a que el lodo no tiene aditivos, no se espera que haya generación de gases que ayuden a producir algún tipo estructura (domo o grietas).	Base : 20 cm × 20 cm Altura: 40 cm.	-Lodo rico en materia orgánica (%TOC = 3,660). -Gelatina sin sabor. -Arena media – gruesa mal calibrada, -Ferromineral.	-Capa base: Lodo orgánico (7 cm). -Capa Impermeable: gelatina coloreada con ferromineral rojo. -Capa tope: arena (3 cm).	Pequeño abombamiento, el cuál no superaba los 10 mm de altura, en cuya cima se observaba una X en vista de planta. La gelatina después de 30 horas de la puesta en marcha del experimento, comenzó a deteriorarse, permitiendo el escape de gases y fluidos presentes en el lodo, los cuáles humedecieron la arena paulatinamente.
G.2.1. Capa impermeable, generación de gases, diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivo: Réplica G.1.3. Efecto de generación de gases en el lodo ayudado por aditivo (guarapo con zumo de piña). Reconocer propiedades del material (arena fina) como material experimental	Base : 20 cm × 20 cm Altura: 40 cm.	-Lodo rico en materia orgánica. -Gelatina sin sabor. -Arena media – fina con buen calibrado. -Ferromineral. -Guarapo mezclado con zumo de piña.	-Capa base: Lodo orgánico mezclado con guarapo (7cm). -Capa impermeable: gelatina (1.1cm) -Capa tope: arena (3cm).	El resultado obtenido fue la formación de un domo amplio de 5 mm de altura y 12 cm con un domillo en su cima de 2.7 mm de altura, con estructura radial alrededor del domillo. Este último colapsó dejando a la vista un cráter. El domo mayor se encontraba hueco. En el centro de este se encontraba el remanente del colapso del domo menor. Posteriormente, después del deterioro de la gelatina y el posterior flujo de fluidos que consigue a esta, la estructura descrita colapsó totalmente (Figura 7).
G.2.2. Capa impermeable, generación de gases,	Base : 20 cm × 20 cm Altura:	-Lodo rico en materia orgánica. -Gelatina sin sabor.	-Capa base: Lodo orgánico mezclado con 500 mL de Coca-Cola	Poco antes de 10 horas después de la puesta en marcha del experimento, se obtuvo una estructura cómica de 4 cm de altura con una

EXPERIMENTO Y VARIABLES A EVALUAR	DIMENSIONES DE LA CAJA	MATERIALES	CONFIGURACIÓN	OBSERVACIONES
diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivo: Observar con mayor rapidez en efecto de los gases en el sistema. Comparar la generación de gases en G1.3 y G2.2 con los gases que incluye la Coca-cola en el sistema.	40 cm.	-Arena media – gruesa mal calibrada, -Ferromineral. -Coca-cola	(7 cm). -Capa impermeable: gelatina (0.9 cm). -Capa tope: arena (3 cm).	grieta en su cima de 8cm de longitud, dentro de la cuál se pudo observar lodo y burbujas de gas, la emanación de gas, continuaba inclusive 72 horas después de haberse producido el agrietamiento con pulsos de expulsión de gas no regulares, posteriores a este. El colapso de la estructura se dio de manera paulatina en menos de 48 horas de la puesta en marcha del experimento.
G.2.3. Capa impermeable, generación de gases nula, diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivo: comprobar si la producción de gas por degradación de la materia orgánica en el lodo no es necesaria para la generación de estructuras diapíricas. Comparación con G.1.4, G1.3 y G2.2. Se espera que, a diferencia de estos, en G2.3 no se formen estructuras.	Base : 20 cm × 20 cm Altura: 40 cm.	-Lodo con bajo contenido de materia orgánica (%TOC = 0,1009). -Gelatina sin sabor. -Arena media – gruesa mal calibrada. -Ferromineral.	-Capa base: Lodo (7 cm) -Capa impermeable: gelatina (0.8 cm). -Capa tope: arena (3 cm).	Después de 150 horas, no se produjo ningún tipo de estructura cómica. Lo único que se observó fue una ligera subsidencia de la arena y un humedecimiento de la misma debido al deterioro de la gelatina.
G.3.1 Capa impermeable, generación de gases, diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivo: Réplica de G.1.3 y	Base : 20 cm×20 cm Altura: 40cm.	-Lodo rico en materia orgánica. -Gelatina sin sabor. -Arena media – fina con buen calibrado. -Ferromineral.	-Capa base: Lodo con guarapo (7 cm) -Capa impermeable: gelatina (1.7 cm) Capa tope: arena fina (3 cm)	Abortado. Filtración temprana de fluidos debido a problemas en el establecimiento de la capa impermeable.

EXPERIMENTO Y VARIABLES A EVALUAR	DIMENSIONES DE LA CAJA	MATERIALES	CONFIGURACIÓN	OBSERVACIONES
G.2.2		-Guarapo mezclado con zumo de piña.		
G.3.2 Capa impermeable, generación de gases, diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivo: Réplica G.3.1	Base : 20 cm×20 cm Altura: 40cm.	-Lodo rico en materia orgánica. -Gelatina sin sabor. -Arena media – fina con buen calibrado. -Ferromineral. -Guarapo mezclado con zumo de piña.	-Capa base: Lodo con guarapo (7 cm) -Capa impermeable: gelatina (1.7 cm) Capa tope: arena fina (3 cm)	Abortado. Filtración temprana de fluidos debido a problemas en el establecimiento de la capa impermeable.
G4.1 Capa impermeable, generación de gases, diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivo: Réplica G.3.1.	Base : 20 cm×20 cm Altura: 40cm.	-Lodo rico en materia orgánica. -Gelatina sin sabor. -Arena media – fina con buen calibrado. -Ferromineral. -Guarapo mezclado con zumo de piña.	-Capa base: Lodo orgánico (7 cm) -Capa impermeable: gelatina (1.1 cm) Capa tope: arena media-fina (3 cm)	El resultado es un abombamiento de 1.8 cm con una depresión en su parte central de 2.5 cm de ancho y 4cm de profundidad con fisuras a lo largo de la misma .
G4.2 Capa impermeable, generación de gases, diferencia de densidades y baja carga litostática. Objetivo: Mejorar las condiciones de Montaje del G.2.2.	Base : 20 cm×20 cm Altura: 40cm.	-Lodo rico en materia orgánica. -Gelatina sin sabor. -Arena media – fina con buen calibrado. -Ferromineral. -Coca-cola	-Capa base: Lodo orgánico con 500 mL de Coca-Cola (7 cm) -Capa impermeable: gelatina (1.1 cm) Capa tope: arena media-fina (3 cm)	Poco después de 9 horas de su puesta en marcha se generó una leve estructura cómica de 2 mm de altura, la cuál aumentó a 5 cm en menos de 4 horas. En la cima del domo, se formó una gran grieta, que en su máxima expresión tuvo dimensiones de 8 cm de largo por 2 cm de ancho y por la cual emanó lodo y burbujas de gas por un período muy prolongado (Figura 8).

Figura 7. Evolución Experimento G2.1. Lodo con guarapo (7 cm) + capa impermeable (1 cm) + arena (3 cm). Izquierda: vistas frontales en la cara A del montaje. Medio: Vistas en planta (20 cm × 20cm). Derecha: Vistas oblicuas donde se percibe mejor la tridimensionalidad del modelo. A, B, y C: Condiciones iniciales. En B se puede observar la retícula trazada sin mayor deformación. D, E y F. t = 50 Horas: Momento de máxima altura: El domo más amplio tiene 27 mm de alto y 12 mm de diálogo; el domillo central sobre este domo mayor de 5 mm de altura y 4 mm de diálogo. En la vista en planta (E), la retícula se ha borrado y se encuentra muy deformada. En D y F se observa un domillo sobre el domo mayor y la arena ligeramente humedecida. G, H e I; t = 106 horas. Colapso del domillo central dejando aparentemente intacto el domo mayor, pero con un espacio bajo éste donde se encuentra el material que conformaba el domillo central sobre el domo mayor.



Figura 8. Evolución Experimento G4.2. Lodo orgánico con 500 mL de Coca-Cola (7 cm) + capa impermeable (gelatina = 1cm) + capa de arena media-fina (3 cm). Izquierda cara frontal (20 cm de largo). Centro: vista de Planta (20 cm x 20 cm). Derecha: vista oblicua.

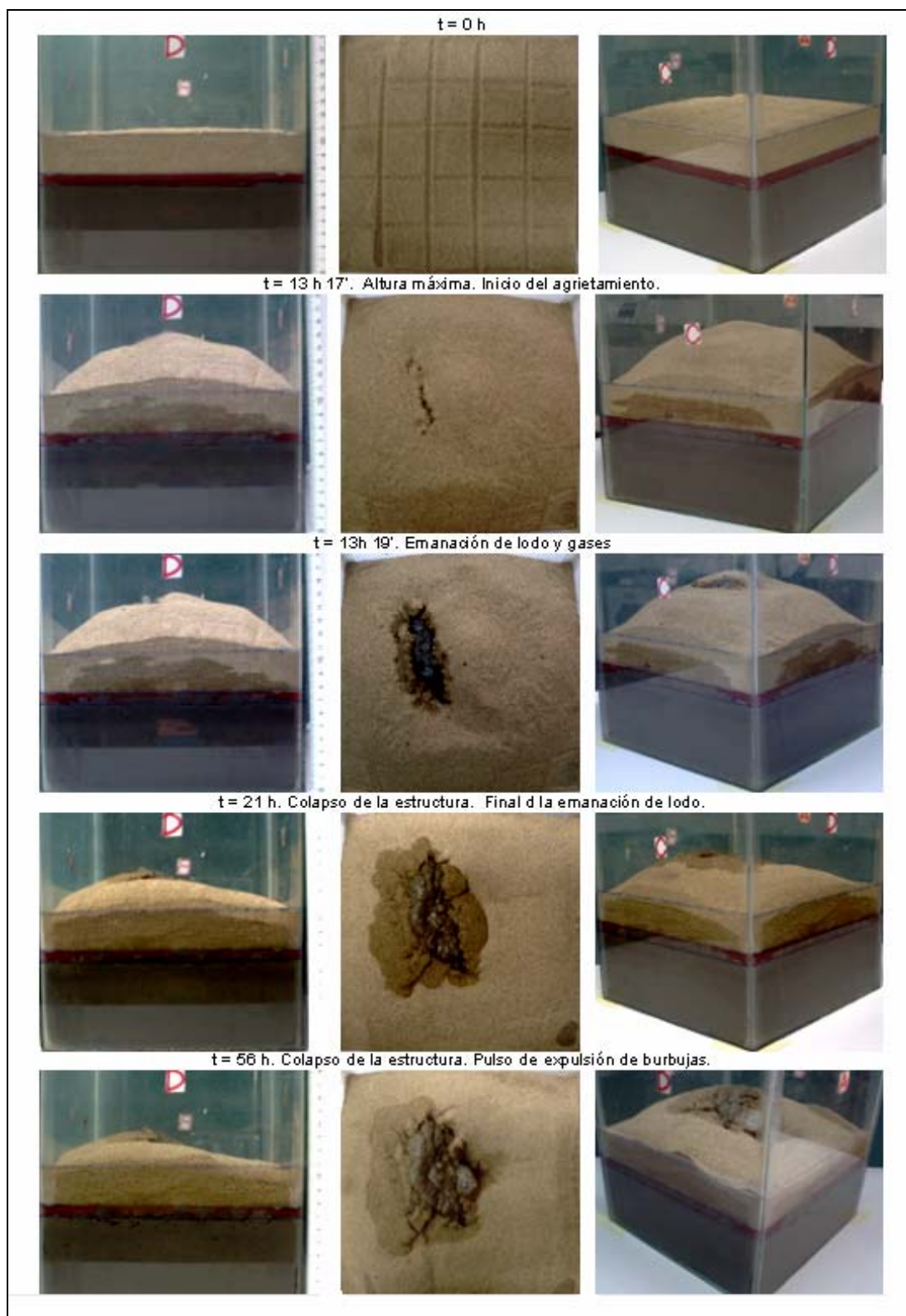
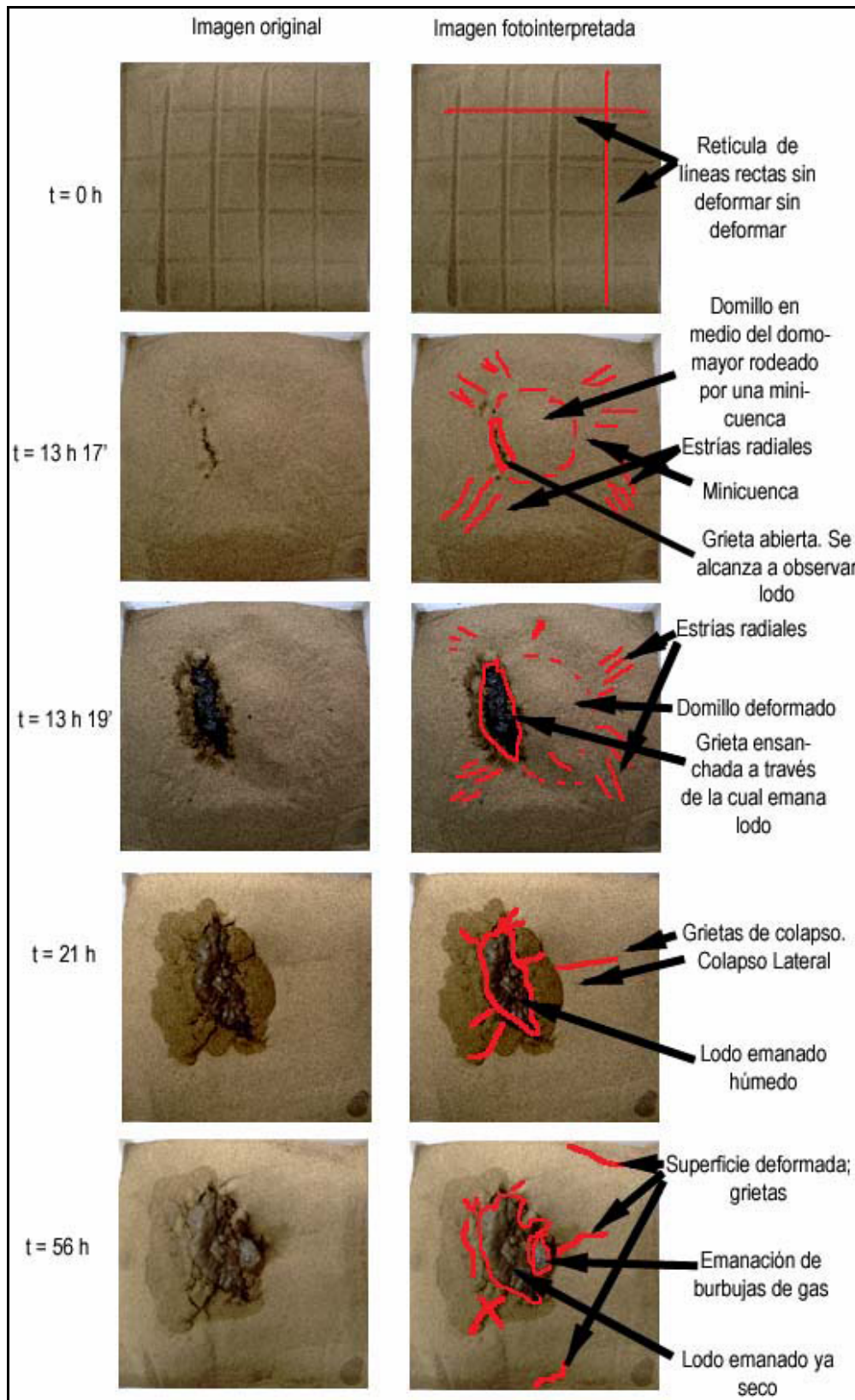


Figura 9. Interpretación Experimento G4.2. Vistas en planta (20 cm × 20 cm) a diferentes tiempos y su interpretación.



Gracias a la experiencia adquirida en la Segunda Etapa y los 11 experimentos desarrollados se obtuvieron varias conclusiones respecto a los montajes y a los materiales utilizados.

(1) Es conveniente que la arena a utilizar tenga buena calibración y que su tamaño de grano esté entre la arena media fina y arena muy fina (entre tamices 50-140). Esta granulometría permite apreciar fácilmente las estructuras de deformación en la superficie.

(2) El oasis, material usado en rellenos de arreglos florales, no es un material adecuado para establecer una geometría de la capa base, ya que tiende a absorber los fluidos presentes en el lodo y cambiar así su viscosidad.

(3) Debido a algunos problemas de filtración que se presentaron con la capa impermeable de gelatina durante algunas pruebas, se buscó un método más conveniente para su establecimiento. Una práctica eficiente fue vaciarla en dos etapas espaciadas dos (2) horas la una de la otra, de manera que la segunda capa sellara posibles conductos dejados por la primera capa.

(3) Aunque el añadir Coca-Cola resultó en una formación de domos mucho más rápida que con cualquier otro ingrediente, los gases incorporados de esta manera no eran generados espontáneamente sino que eran introducidos en solución. Por lo tanto, los experimentos con Coca-Cola no son apropiados para evaluar el efecto de la generación de gases en la formación de diapiros.

(4) Aunque en contraste con la Coca-Cola el guarapo sí permitió observar el efecto de gases generados dentro del sistema, se optó por no usar guarapo ya que es difícil controlar sus ingredientes de manera que se obtuvieran mezclas repetibles.

(5) El experimento G.1.4 arrojó resultados imprevistos. No se esperaba que el lodo utilizado pudiese generar los suficientes gases para producir algún tipo de estructura. Antes de obtener los resultados de este experimento, se pensaba que era necesario aumentar el contenido de materia orgánica en el lodo. Sin embargo, el pequeño domo resultante en este experimento, hizo evidente que el lodo utilizado tenía suficiente materia orgánica para generar gases. Este lodo provino del fondo del Lago El Manantial (Girón, Santander), el cual está dedicado al cultivo de peces y por lo tanto presenta una alta productividad de materia orgánica. En las condiciones confinantes de los experimentos en cajas, el lodo del Lago El Manantial tiene el potencial de generar gases, los cuales al acumularse bajo una capa impermeable aumentan la presión de poro del lodo que los contiene (Hedberg, 1974; Robertson y Kopft, 1998).

De este modo se definió que la variable a estudiar debía ser el contenido de materia orgánica, ya que este representa el potencial del lodo para genera gases. Además este parámetro es fácilmente medible y controlable en el laboratorio. Así se estableció la siguiente hipótesis:

Las estructuras diapíricas de lodo y las alturas de los domos relacionados con estas dependen del contenido de materia orgánica en el lodo que las origina, de manera que es de esperarse que a mayor sea el contenido de materia orgánica en el lodo, mayor será la altura de los domos.

2.1.3 TERCERA ETAPA: DEFINICION DE LA CONFIGURACION EXPERIMENTAL

Teniendo ya definida la variable a evaluar con una hipótesis asociada, se escogieron las mezclas para los experimentos finales. Las mezclas se llevaron a cabo entre dos lodos: uno con un contenido de materia orgánica TOC (de aquí en adelante denominado 'LM') y otro con un bajo contenido de materia orgánica TOC (de aquí en adelante denominado 'LB'), con el fin de generar mezclas de lodo con varios contenidos finales de materia orgánica. Estas determinaciones de TOC fueron realizadas en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto Colombiano del Petróleo en Piedecuesta, Santander. Para obtener mezclas finales con TOCs superiores al de LM, se probaron mezclas entre LM y otras sustancias tales como azúcar refinada, gelatina sin sabor, y goma Xantana.

Preparación de Materiales

Arena: debido a que la arena a la que se tuvo acceso tenía un mal calibrado, fue necesario tamizarla hasta lograr tener un tamaño de grano entre 300 y 105 μm , ya que según la teoría y los experimentos previos, las estructuras formadas en la superficie se evidenciarían mejor en este rango.

Lodos: El lodo orgánico LM fue obtenido del fondo del Lago El Manantial (Girón, Santander), dedicado al cultivo de peces, a una profundidad de 1.80 m. El lodo clástico LB provino de la formación Bucaramanga en el sector de Mal Paso (Bucaramanga, Santander). En su acondicionamiento para los experimentos, este último fue necesario hidratarlo para que adquiriera una viscosidad similar a LM, y además tamizarlo en una malla 50 (300 μm) con el fin de tener un lodo homogéneo.

Gelatina: Para la capa impermeable se disolvieron 16 g de gelatina sin sabor marca Leader Price en 150 ml de agua para cada una de las capas, completando así 32 g de gelatina disueltos en 300 ml de agua, los cuales resultaron en un espesor medio de unos 10 mm de capa impermeable. También se utilizó la gelatina en mezcla con el lodo para aumentar el contenido de materia orgánica del lodo. Los componentes principales de la gelatina son: calorías 30, sodio 3 mg, carbohidratos totales 6 g.

Mezclas lodo - gelatina: Se tomó como peso base 4000 g, de manera que este fuera el peso de la mezcla final. Además, para generar mezclas con distintos contenidos porcentuales se pesaron y usaron fracciones de cada uno en la relación porcentual deseada. Por ejemplo, para el montaje 60% LM + 40% LB se tomaron 2400 g de LM y se mezclaron con 1600 g de LB revolviendo la mezcla durante 15 minutos con un agitador suministrado por el laboratorio de lodos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la UIS. Al finalizar la mezcla se llevó a cabo el cuarteo respectivo con el fin de tomar la muestra en recipientes apropiados para luego hacer pruebas de viscosidad y TOC. En el caso de las mezclas con gelatina se tomaron 4000 g de LM y se les agregó la gelatina, para llevar a cabo la mezcla durante 15 minutos, tiempo estimado en el cual se consideraba que la mezcla ya era homogénea. Las medidas de viscosidad se llevaron a cabo con el viscosímetro programable marca BROOKSFIELD DV-III+Rheometer (aguja 34, programa 6), de la Escuela de Ingeniería Química de la UIS (figura 10). Este viscosímetro mide la torsión que se produce en el eje su aguja cuando gira sumergida en un fluido, a partir de lo cual se deduce el esfuerzo cortante τ que ejerce el fluido sobre la pared del cilindro. La viscosidad absoluta o dinámica μ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$ ó centiPoess-cP) del fluido es directamente proporcional al valor del esfuerzo cortante τ .

Medidas TOC: Se realizaron en el Laboratorio de Geoquímica del Instituto Colombiano del Petróleo en Piedecuesta, Santander. El lodo base LM dio un resultado de 3.8020 % en peso y el LB dio un resultado de 0.1365 %

en peso y la gelatina dio un resultado de 43.2600 % en peso. El porcentaje de los montajes realizados con mezclas entre LM y LB se halló directamente, mientras que los porcentajes de los montajes realizados con mezclas entre LM y gelatina se hallaron mediante la fórmula.

$$\%TOC(mezcla) = \frac{[PLM \times \%TOC(LM)] + [PGel \times \%TOC(Gelatina)]}{100 \times (PLM + PGel)} \quad (1)$$

donde:

PLM, es el peso de lodo LM utilizado para las mezclas (para todas las mezclas con gelatinas el peso de LM fue de 4000 g);

PGel, es el peso de la cantidad de gelatina utilizada en la mezcla (su valor era discreto: 8 g, 16 g, 24 g o 48 g);

%TOC(LM), es el porcentaje de carbono orgánico total o TOC de LM, medido en laboratorio;

%TOC(Gelatina), es el porcentaje de carbono orgánico total o TOC de la gelatina utilizada, medido en laboratorio.

Montajes

Después de llevar a cabo la mezcla, se prosiguió con el montaje del experimento diseñado. Para ello, era necesario tener una caja previamente rotulada que mostrara el espesor de 7 cm de la capa de lodo. Al vaciar el lodo en la caja se continuó con el proceso de homogenización de la superficie del mismo y la limpieza de las paredes de la caja. Acto seguido se vertió la primera capa impermeable de 5 mm (gelatina sin sabor). Luego de dos horas de secado de esta primera capa, se esparció una segunda capa impermeable de 5 mm que aseguró que no hubieran orificios o conductos por los cuales se escaparan los fluidos del lodo y se dejó secar durante aproximadamente 5 horas, tiempo después del cual se añadió la capa tope de 3 cm de arena (Figura 11-I). La temperatura ambiente en el lugar donde se realizaron todos los experimentos oscilaba entre los 26 y los 28 °C.

Tabla 3. Propiedades de los materiales utilizados a partir de la Tercera Etapa.

CAJA (Base: 20 cm x 20 cm. Altura: 16 cm)	ESPESOR [cm]	DENSIDAD[g/cm ³] (Promedio)	PESO Aproximado (Columna litostática)
CAPA TOPE (ARENA).	3	1.25	1450-1550 g
CAPA IMPERMEABILIZANTE	1	0.31	115-135 g
CAPA BASE (LODO Y MEZCLAS DE LODOS)	7	1.1	3125 g

Así, se inició el monitoreo de cada uno de los experimentos, tomando las fotos que mostraban la configuración inicial de los montajes. Después de esto se llevó a cabo el seguimiento de la evolución de cada uno de los experimentos, reportando y fotografiando los cambios en la morfología de la superficie observados a diferentes tiempos, consignando datos, como alturas medidas y deformaciones, en tablas (Tabla 4).

Figura 10. Viscosímetro.



FIGURA 11. Preparación de los materiales: A. .Agitador. B. Mezcla de la capa base. C. Vertimiento del material de la capa base en el recipiente. D. Capa base (7 cm). E. Gelatina sin sabor. F. Impermeabilización de la capa base. G. Capa impermeable (1 cm). H. Arena fina-media. I. Configuración del montaje final. Capa de arena (3 cm), capa de gelatina (1 cm), capa de lodo (7 cm).

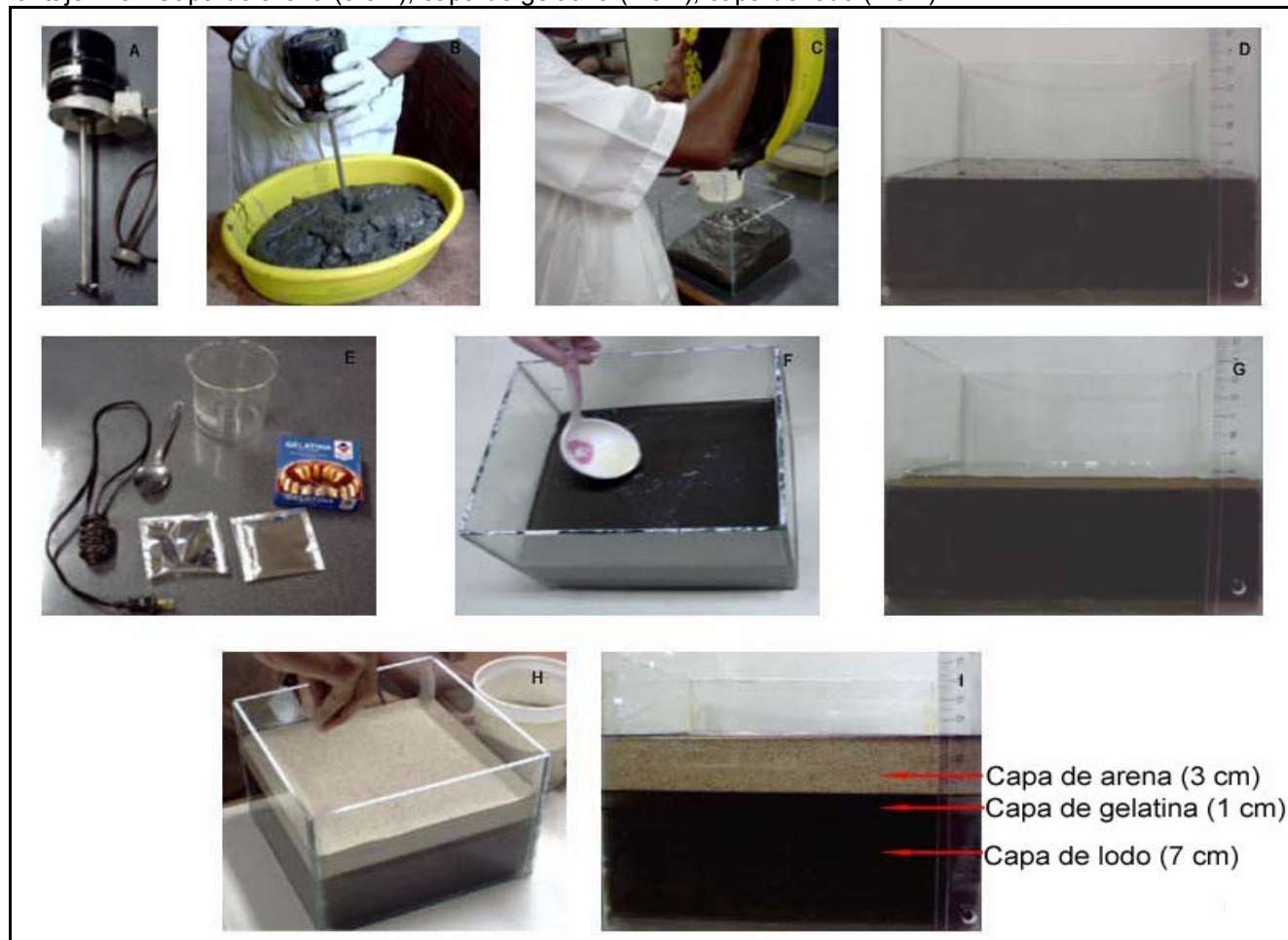


Tabla 4. Seguimiento de la evolución de experimentos, ejemplo: 1U2.100LM + 16 g de Gelatina sin sabor.

Fecha y Hora		Tiempo Total (h = horas)	Foto Oblicua	Fotos Cara A	Fotos Cara B	Fotos Cara C	Fotos Cara D	Planta	Observaciones
29-07-05	12:15								Establecimiento de la capa base.
	12:50								Primera capa de gelatina.
	18:40								Segunda capa de gelatina.
	23:15	0h							Establecimiento de la capa de arena.
28-07-05	06:15	7h	1377				1376	1379	Abombamiento. H = 8 mm.
	11:00	11h 45'	1391	1389-90				1392	Abombamiento mucho más evidente, alcanzando los 10mm.
	15:40	16h 25'				1394			Escape de gases a través de la capa de gelatina, los cuales humedecen la cara C.
	15:50	16h 35'	1397	1395-96				1398	Humedecimiento caras A y C.
	21:08	21h 43'	1417-18	1415-16				1413-14	Continúa el humedecimiento. H = 21 mm. No se espera que la estructura crezca más debido al escape de los gases.
	01:20	25h 55'	1420					1419	H = 30mm. Se presenta en la cima del domo un Punto triple con una depresión hacia el centro
	04:00	28h 35'	1421-22						Fotos.
	05:45	30h 20'	1426	1424-25				1423-27	La cima del domo se ha humedecido en la parte central al igual que todas las caras.
	08:00	32h 35'	1453-55	1458			1460		H = 31mm. Humedecimiento en el centro de la cima. La zona es más amplia. La zona humedecida en la cima se encuentra agrietada. Hacia el borde de la grieta se observa un agujero de más de 2mm de diámetro.
	11:00	35h 35'		1443-					H = 34mm.

				44					
	12:30	37h 5'	1454	1456-57-59	1464-65	1462-63	1461	1452	El agrietamiento en la parte superior se hace mucho más evidente.
	13:00	37h 35'						1466	Pequeña nueva grieta en la pared central de la zona deprimida.
	13:08	37h 43'						1467-68-69	Longitud de la grieta: 50mm atravesando toda la zona húmeda deprimida. H = 39mm.
	14:00	38h 35'						1470-71-72-73	Al parecer continúan saliendo gases los cuales producen nuevos agrietamientos
07-31	09:21	57h 56'		1552-53-54				1550-51	Fotos. H = 31 mm.
	16:20	64h 55'		1585-86				1577	Fotos. La estructura ya ha colapsado y la arena se encuentra completamente humedecida.
	17:00	65h 35'	1640-41		1638	1639		1634-37	Estructura colapsando. Foto.

Medición de las alturas

Para monitorear el levantamiento de los domos, se midieron alturas de los domos de manera que se pudiera identificar no solo su altura máxima alcanzada, sino también tener un registro de la tasa media de levantamiento. Para este propósito se usó una regla transparente graduada en milímetros, la cual se fijó a la cara frontal de cada caja, en forma vertical (Figura 1). En todos los casos, la medida se tomó en el punto del domo cuya altura mostraba la mayor elevación. Este punto se ubicó deslizando la regla graduada horizontalmente. Para tomar la medida de registro, el observador se ubicó al frente de la regla graduada, de manera que la línea imaginaria entre el ojo y el punto de máxima altura fuese horizontal.

Todas las medidas registradas fueron sujetas a un proceso de verificación el cual incluyó dos observadores. Este proceso consistió en que un primer observador tomaba la medida, y la anotaba sin comunicársela al segundo observador. Luego el segundo observador, tomaba su propia medida y se la comunicaba al primer observador. En caso de que hubiere discrepancias mayores a 1 milímetro, la observación era repetida por los dos observadores. Típicamente no fue necesario repetir el proceso más de dos veces. Este proceso de verificación aseguró que las medidas tomadas estuvieran dentro de un rango de precisión de 1 mm.

Figura 12. Medidas de altura. Ejemplo: 4U7 Después de aproximadamente 12 horas de la puesta en marcha del montaje. Lectura en la línea de referencia (en negro): 108 mm. Lectura paralela a la cima del domo: 119 mm. Altura total del domo: 11 mm.

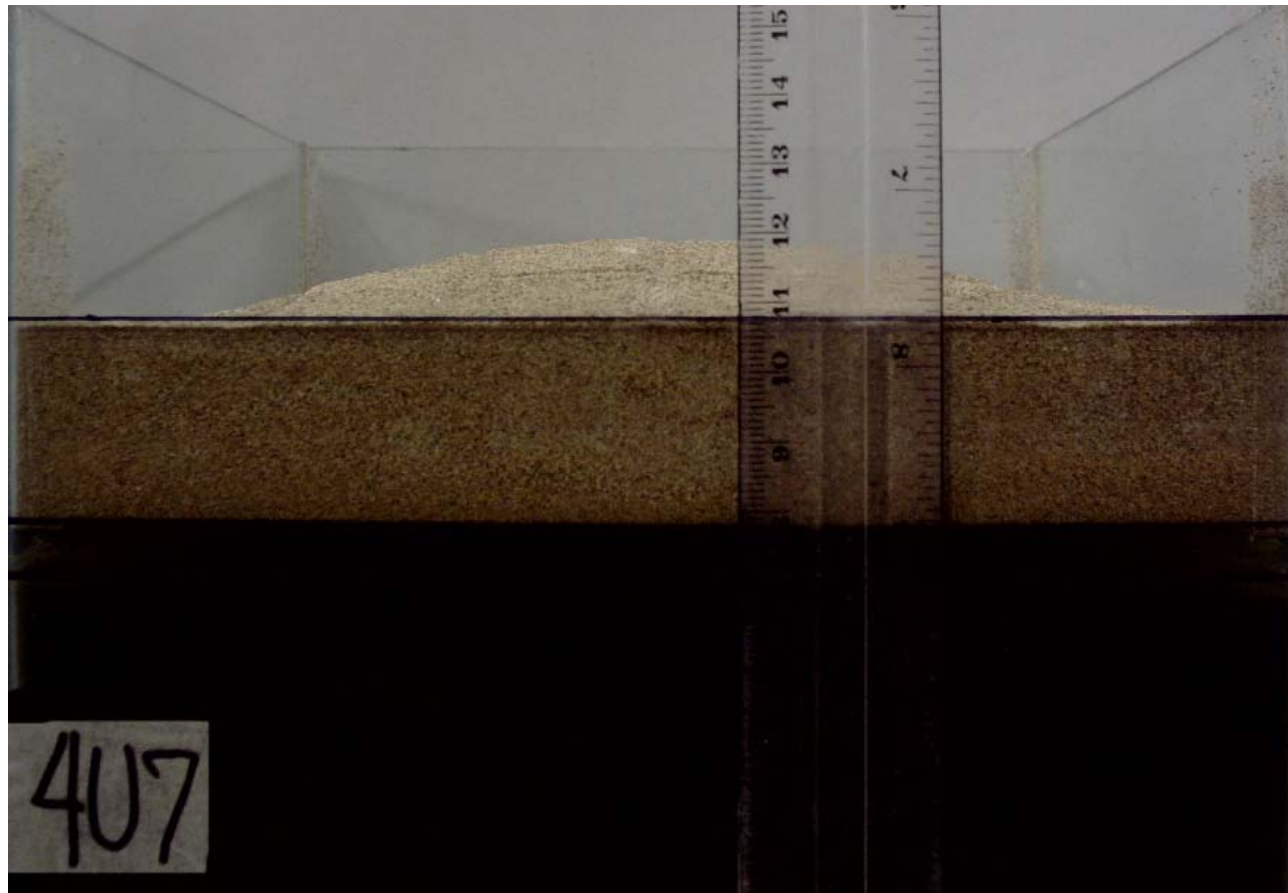


Tabla 5. Configuración y observaciones de los experimentos de la Tercera Etapa

EXPERIMENTO	MATERIALES (Todas las cajas fueron de 20 cm × 20 cm-base y 16 cm-altura)	CONFIGURACIÓN	hmáx (mm)	tmáx (h)	TOC (%)	OBSERVACIONES
A Objetivo: Evaluar variable propuesta en la hipótesis (generación de gases por descomposición de la materia orgánica). Réplica G.1.4	-LM -Gelatina sin sabor. -Arena media-fina.	- Capa base: LM (7 cm). -Capa impermeable: 32g de gelatina son sabor disueltos en 300ml de Agua (1 cm) -Capa tope: Arena (3 cm)	18	113	3,802	En la cima del domo se forma una depresión con fisuras (7 cm de largo × 2.5 cm de ancho).
A1 Objetivo: Mantener la viscosidad del lodo al agregar gelatina al mismo tiempo que aumentar el contenido de materia orgánica en el lodo la cual podría ser degradada por microorganismos que pueda contener el lodo.	-LM -Gelatina sin sabor. -Arena media-fina.	- Capa base: 4000g. LM mezclado con 16g de Gelatina sin sabor. (7 cm). -Capa impermeable: 32g de gelatina son sabor disueltos en 300ml de Agua (1 cm) -Capa tope: Arena (3 cm)	31	31	3,959	Formación de un cráter de 1 cm de diámetro en la cima del domo sobresaliendo 1 o 2 mm por encima de su entorno.
1U1 Viscosidad: 8048cP a 40rpm Objetivo: -Prueba de control de viscosidad. -Aumentar contenido de materia orgánica para su descomposición y generación de gases.	-LM -Gelatina sin sabor. -Arena media-fina.	- Capa base: 4000g. LM mezclado con 8g de Gelatina sin sabor. (7 cm). -Capa impermeable: 32g de gelatina son sabor disueltos en 300ml de Agua (1 cm) -Capa tope: Arena (3 cm)	30	55	3,881	Inicio humedecimiento arena: 15 h. Depresión en la zona central y formación de una grieta.

EXPERIMENTO	MATERIALES (Todas las cajas fueron de 20 cm × 20 cm-base y 16 cm-altura)	CONFIGURACIÓN	hmáx (mm)	tmáx (h)	TOC (%)	OBSERVACIONES
1U2 Viscosidad: 8480cP a 40rpm Objetivo: Mantener viscosidad. -Aumentar contenido de materia orgánica para su descomposición y generación de gases.	-LM -Gelatina sin sabor. -Arena media-fina.-	- Capa base: 4000g. LM mezclado con 16g de Gelatina sin sabor (7 cm). -Capa impermeable: 32g de gelatina son sabor disueltos en 300ml de Agua (1 cm) -Capa tope: Arena (3 cm)	31	32	3,959	Inicio humedecimiento arena:16.5 h Punto triple formado en la cima del domo con depresión hacia el centro del mismo. Agrietamiento en la parte central de la zona deprimida.
1U3 Objetivo: -Prueba de control de viscosidad.	-LM -Gelatina sin sabor. -Arena media-fina. -Goma Xantana.	- Capa base: 4000g. LM mezclado con 3g de Goma Xantana. (7 cm). -Capa impermeable: 32 g de gelatina son sabor disueltos en 300ml de Agua (1 cm) -Capa tope: Arena (3 cm)	18	82	X	Acumulación de gases que deforma la capa de gelatina provocando el ascenso de la arena. Depresión estriada en la mitad del domo.
1U4 Objetivo: -Prueba de control de viscosidad.	- -LM -Gelatina sin sabor. -Arena media-fina. -Goma Xantana.	- Capa base: 4000g. LM mezclado con 16g de Goma Xantana. (7 cm). -Capa impermeable: 32g de gelatina son sabor disueltos en 300ml de Agua (1 cm) -Capa tope: Arena (3 cm)	23	51	X	Deformación estriada hacia las esquinas de la caja en forma de X. Agrietamiento de 2 mm de ancho, en forma de Y o punto triple. Coincide con el centro y la zona estriada.
1U5 Objetivo: -Disminuir el contenido de materia orgánica en el lodo.	-LM -LB -Gelatina sin sabor. -Arena media-fina.	- Capa base: 2000g. LM mezclado con 2000g LB (7 cm). -Capa impermeable: 32g de gelatina son sabor disueltos en 300ml de Agua (1 cm) -Capa tope: Arena (3 cm)	0	---	X	Inicio humedecimiento arena: 53 h. No se produjo abombamiento perceptible.

EXPERIMENTO	MATERIALES (Todas las cajas fueron de 20 cm × 20 cm-base y 16 cm-altura)	CONFIGURACIÓN	hmáx (mm)	tmáx (h)	TOC (%)	OBSERVACIONES
1U6 Objetivo: -Disminuir el contenido de materia orgánica en el lodo. - Corroborar con la gelatina si a pesar de la mezcla, todavía había posibilidades de que se descompusiera o degradara la materia orgánica (posiblemente por microorganismos) la materia orgánica en la mezcla.	-LM -LB -Gelatina sin sabor. -Arena media-fina.	- Capa base: 2000 g. LM mezclado con 2000 g LB y 16g de Gelatina sin sabor. (7 cm). -Capa impermeable: 32g de gelatina son sabor disueltos en 300ml de Agua (1 cm) -Capa tope: Arena (3 cm)	5	82	X	Se observa formación de burbujas en el lodo indicando posible actividad microbiológica productora de gases (que consumía la gelatina) a pesar de bajo contenido de LM.
1U7 Objetivo: Réplica A1 y 1U2.	-LM -Gelatina sin sabor. -Arena media-fina.	- Capa base: 4000g. LM mezclado con 16g de Gelatina sin sabor. (7 cm). -Capa impermeable: 32g de gelatina son sabor disueltos en 300ml de Agua (1 cm) -Capa tope: Arena (3 cm)	36	22	3,959	Humedecimiento de la parte superior. Se observan tres grietas semiconcéntricas en la zona humedecida. Posibles errores en a toma de alturas.
1U8 Objetivo: -Aumentar el contenido de Materia orgánica generando mayor proporción de gases mediante fermentación de azúcar refinada.	-LM -Gelatina sin sabor. -Arena media-fina. -Azúcar.	- Capa base: 4000 g. LM mezclado con 8 g de Gelatina sin sabor y 5 g de azúcar (7 cm). -Capa impermeable: 32 g de gelatina son sabor disueltos en 300 ml de Agua (1 cm) -Capa tope: Arena (3 cm)	43	46	X	Mínima depresión circular con cuatro zonas de estrías radiales que coinciden con las esquinas de la caja en la cima del domo en cuyo se levanta una zona concéntrica al domo mayor. Esta es de aproximadamente 1mm de altura.

EXPERIMENTO	MATERIALES (Todas las cajas fueron de 20 cm × 20 cm-base y 16 cm-altura)	CONFIGURACIÓN	hmáx (mm)	tmáx (h)	TOC (%)	OBSERVACIONES
1U9 Aumentar el contenido de Materia orgánica generando mayor proporción de gases mediante fermentación de azúcar refinada.	-LM -Gelatina sin sabor. -Arena media-fina. Azúcar.	- Capa base: 4000g. LM mezclado con 16g de Gelatina y 10g de azúcar (7 cm). -Capa impermeable: 32 g de gelatina son sabor disueltos en 300ml de Agua (1cm) -Capa tope: Arena (3cm)	45	7	X	Retícula completamente perdida. Humedecimiento en la parte central de la parte elevada presentando un leve agrietamiento en la mitad con una longitud de 5.5cm En la mitad de la grieta se alcanza a observar que el lodo ha ascendido hasta la superficie.

La Tercera Etapa llevó a concluir que el punto de corte para los montajes, es decir, las concentraciones límite de materia orgánica por debajo de las cuales no se esperaba ningún abombamiento, correspondían a la mezcla de 50 % LM (2000 g) mezclado con 50 % LB (2000 g) y que la sustancia más apropiada para aumentar el contenido de materia orgánica en el lodo era la gelatina sin sabor.

2.1.4 CUARTA ETAPA: MONTAJES FINALES

En esta Etapa se desarrollaron los montajes de los experimentos finales, para las cuales se habían ya definido nueve configuraciones de la capa base o mezclas (las cuales proporcionaron la mayor parte de los datos a procesar), además de realizar pruebas de viscosidad que ayudaran a mejorar las técnicas de mezclado. Igualmente, se llevaron a cabo 4 montajes extras para confirmar el punto de corte en las mezclas y la sustancia adecuada para aumentar el TOC. Con el fin de observar la validez del método de medida de alturas de los domos utilizado durante la fase de experimentación,

Es importante aclarar que para efecto de la discusión y conclusiones de este estudio, las observaciones de las primeras tres etapas son consideradas insumos para el perfeccionamiento de la Cuarta Etapa. Los resultados cuantitativos de este estudio se refieren exclusivamente a los obtenidos en la Cuarta Etapa. Por lo tanto el objetivo de todos los montajes de esta Etapa es la obtención de resultados destinados a evaluar la variable y a comprobar o rechazar la hipótesis. Todos los experimentos de esta Cuarta Etapa se realizaron en cajas de 20 cm ×20 cm de base y 16cm de altura, el establecimiento de las diferentes capas conservó la metodología de la Tercera Etapa (Figura 11). La configuración de los montajes y el resumen de las observaciones llevadas a cabo durante el desarrollo de esta etapa se consignan en la Tabla 6.

Tabla 6. Configuración y observaciones de los experimentos de la Cuarta Etapa.

CAPA BASE	Exp.	VISCOSIDAD (Promedio)	%TOC	h máx. (mm)	tmáx. (h)	OBSERVACIONES
Mezcla 2000 g LM con 2000 g LB 5LM:5LB	3U1			0	-	No se obtuvo ninguna altura ni ningún tipo de estructura, por lo que se decidió establecer la configuración 50% LM y 50% LB como punto de corte para los experimentos.
Mezcla 2400 g LM con 1600g LB 6LM:4LB	3U2	3888 centi Poess a 40rpm	1,650	3	118	Liberación de gases y agua del lodo mezclándose y formando una capa en la base de la gelatina, algunas burbujas penetran y permanecen en esta. El inicio del humedecimiento de la arena está alrededor de 90 h después de la puesta en marcha de los experimentos.
	4U14			12	170	
	4U15			0	-	
	6U1			7	158	
	6U11			0	-	
Mezcla 2800 g LM con 1200 g LB 7LM:3LB	2U7	3632 centi Poess a 40rpm	2,044	8	139	Formación de gases y burbujas en el tope del lodo y en la base de la gelatina. El humedecimiento de la capa de arena se inicia alrededor de 100 h después de la puesta en marcha de los experimentos.
	3U8			5	82	
	4U12			12	177	
	4U13			7	104	
	6U12			15	146	
Mezcla 3200 g LM con 800 g LB 8LM:2LB	2U6	5264 centi Poess a 40rpm	2,520	12	137	Formación de gases y burbujas en la base de la gelatina y el tope del lodo, gradación en el color del lodo. El humedecimiento de la capa de arena se inicia entre 87 h y 120 h después de la puesta en marcha de los experimentos.
	3U9			11	95	
	4U10			10	91	
	4U11			10	91	
	6U3			10	95	
Mezcla 3600 g LM con 400 g LB 9LM:10LB	2U5	5184 centi Poess a 40rpm	2,965	17	138	Formación de gases y burbujas en la base de la gelatina y el tope del lodo, gradación en el color del lodo. En algunos (2U5, 4U8) se formó una zona estriada y una pequeña depresión en la cima del domo. En el 2U5 emanó lodo con burbujas de gas. El humedecimiento de la capa de arena se inicia alrededor de 80h después de la puesta en marcha de los experimentos.
	3U3			13	84	
	4U8			24	124	
	4U9			20	124	
	6U4			10	89	

CAPA BASE	Exp.	VISCOSIDAD (Promedio)	%TOC	h máx. (mm)	tmáx. (h)	OBSERVACIONES
LM	3U4	6724 centi Poess a 40rpm	3,802	22	106	Estrías radiales en la parte superior del domo formando una X cuyas extremidades se dirigen hacia las esquinas de la caja y en cuyo centro se forma una leve depresión. El tiempo de inicio de humedecimiento de la arena fue muy variable: 96 h a 168 h.
	4U1			25	122	
	5U6			19	91	
	6U5			19	85	
Mezcla 4000 g LM con 8 g de Gelatina 1LM+8g GEL	2U4	6672 centi Poess a 40rpm	3,881	32	54	Estrías radiales en la parte superior del domo formando una X cuyas extremidades se dirigen hacia las esquinas de la caja y en cuyo centro se forma una leve depresión, en la cual después de haber alcanzado hmáx, se ha formado un pequeño cráter (60 h aprox.) por donde se presentó emanación de gases evidenciados en un fétido olor y en el movimiento y humedecimiento de la arena alrededor del cráter.
	4U2			34	53	
	4U3			27	52	
	5U1			27	45	
	6U6			29	42	
Mezcla 4000 g LM con 16 g de Gelatina 1LM+16 g GEL	2U3	6528 centi Poess a 40rpm	3,959	35	36	Gradación en color del lodo, haciéndose más oscuro hacia el tope, en cuyo límite con la gelatina se observan burbujas de gases. En 2U3 y 5U2 se formó un orificio no centrado en la cima del domo del tamaño de una huella digital, alrededor del cuál luego del colapso de la estructura se formaron grietas concéntricas. El 6U7 formó un domillo central sobre la estructura cómica más amplia y liberó violentamente gas expulsando material (arena) fuera de la caja formando un cráter que se relleno de arena inmediatamente. El colapso de la estructura y la deformación de la superficie es ligeramente mayor y más rápida que en la configuración anterior.
	3U5			30	24	
	5U2			31	45	
	6U7			39	47	
Mezcla 4000 g LM con 24 g de Gelatina 1LM+24 g GEL	2U2	5360 centi Poess a 40rpm	4,037	34	21	Inicialmente se presenta una gradación en el color del lodo, haciéndose más oscuro hacia el tope, en la interfaz lodo-gelatina se crea una capa de gas mezclado con agua. Posteriormente se da la formación un domo amplio con una zona estriada radial en la cima del mismo sobre el cual crece un domillo central. Después de llegar a hmáx se presenta una
	4U4			40	34	
	4U5			47	39	
	5U3			39	38	
	6U8			32	24	

CAPA BASE	Exp.	VISCOSIDAD (Promedio)	%TOC	h máx. (mm)	tmáx. (h)	OBSERVACIONES
				38	31	explosión con expulsión de gases (de fétido olor) y material (arena) por fuera de la caja. Simultáneamente se presenta un descenso abrupto de la estructura (un 30% aprox.). Durante el colapso de la estructura se da la formación de grietas en la zona central concéntricas al cráter. Eventualmente hay expulsión de gases a través del cráter con relleno posterior del mismo debido a la remoción de la arena hacia el centro del mismo. En algunos casos, después de alrededor de 45 h se observa el ascenso de lodo junto con gases viscosos a través del cráter. El colapso de la estructura y la deformación de la superficie es mayor y más rápida que en la configuración anterior.
Mezcla 4000g LM con 32g de Gelatina LM+32 g GEL	3U6			34	25	Se obtuvo un domo con una altura máxima de 34 mm, muy cercana a alturas alcanzadas por experimentos realizados con mezclas de LM con 24 g de gelatina sin sabor, en la cima del domo se formó un cráter por el que durante el colapso de la estructura emanó una pequeña cantidad de lodo.
Mezcla 4000 g LM con 48 g de Gelatina 1LM+48 g GEL	3U7	5360 centi Poess a 40rpm	4,355	43	28	Estos montajes evolucionan de modo que pasan por cada uno de los estados que se observan en los montajes anteriores hasta poco después de su colapso. Inicialmente se observa una gradación en el color del lodo, haciéndose más oscuro hacia el tope, en cuyo límite con la gelatina se observan burbujas de gases. Luego se forma un domo amplio con una zona estriada radial en la cima del mismo sobre el cual posteriormente crece un domillo central. El humedecimiento de la arena en las caras empieza alrededor de 20 h después de finalizado el montaje; con la posterior penetración del lodo en la gelatina. Después de llegar a hmáx se presenta una explosión con expulsión de gases (de fétido olor) y material (arena) por fuera de la caja con la formación de un cráter no centrado. Simultáneamente se presenta un descenso abrupto de la estructura (un 30% aprox.). Durante el colapso de la estructura se da la formación de grietas en la zona central concéntricas al cráter. Después de esto, se observa una pequeña zona estriada concéntrica a la zona
	4U6			44		
	4U7			39		
	5U4			38		
	6U9			34		

CAPA BASE	Exp.	VISCOSIDAD (Promedio)	%TOC	h máx. (mm)	tmáx. (h)	OBSERVACIONES
						estriada inicial, a un lado del cráter. Grietas junto a las paredes donde la estructura esta colapsando. La estructura se encuentra muy deformada y agrietada, la expulsión de gases con burbujas viscosas cesa dejando un cráter con lodo. La deformación de la superficie observada es mucho mayor que en los anteriores montajes.
Mezcla 4000 g LM con 8 g de Agar (disuelto en 150mL H ₂ O)	5U5	6656 centi Poess a 40rpm		27	51	Se obtuvo un domo de 27mm de altura con un cráter en su cima, en el momento de alcanzar la máxima altura se presentó emanación de gases por el cráter, arrastrando consigo un poco de lodo.
Mezcla 4000g LM con 48g de Agar (disuelto en 350mL de H ₂ O)	6U10	5760 centi Poess a 40rpm		24	110	Formación muy lenta de un domo, al principio presentando una depresión un si cima y luego un cráter en su zona central.

3. RESULTADOS.

Los resultados cuantitativos de este estudio se refieren exclusivamente a los datos obtenidos en la Cuarta Etapa. Las 3 primeras Etapas fueron de gran importancia ya que ayudaron a definir la variable a evaluar y a proponer la hipótesis de trabajo. Este trabajo obtuvo resultados en cuanto a la historia de levantamiento de los domos expresada en términos de alturas sucesivas, la tasa de levantamiento expresada secuencialmente en términos de tiempo, y los estadios de evolución de los domos diapíricos.

Las Figuras 13 a 26 son ejemplos de la evolución de los experimentos montados con lodos con diferentes concentraciones de TOC (1.65%, 2.044%, 2.52%, 2.695%, 3.802%, 3.8807%, 3.9592%, 4.0373%, y 4.3553%). En todas las figuras se muestran tres vistas: frontal, de planta y oblicua.

Figura 13. Evolución Experimento 6U11. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 1.65% TOC (7cm), capa impermeable de gelatina (1cm) y capa tope de arena (3cm). Vista de planta Vista de planta: 20 cm × 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo.

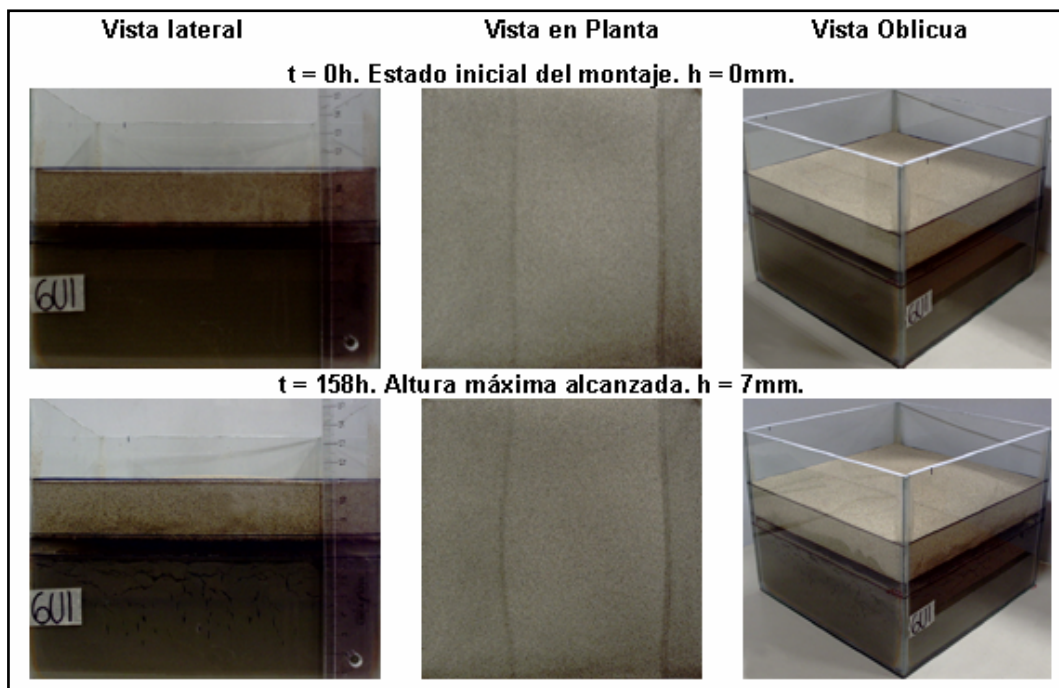


Figura 14. Evolución Experimento 4U12. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 2.044% TOC (7 cm), capa impermeable de gelatina (1 cm) y capa tope de arena (3 cm). Vista de planta: 20 cm × 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo.

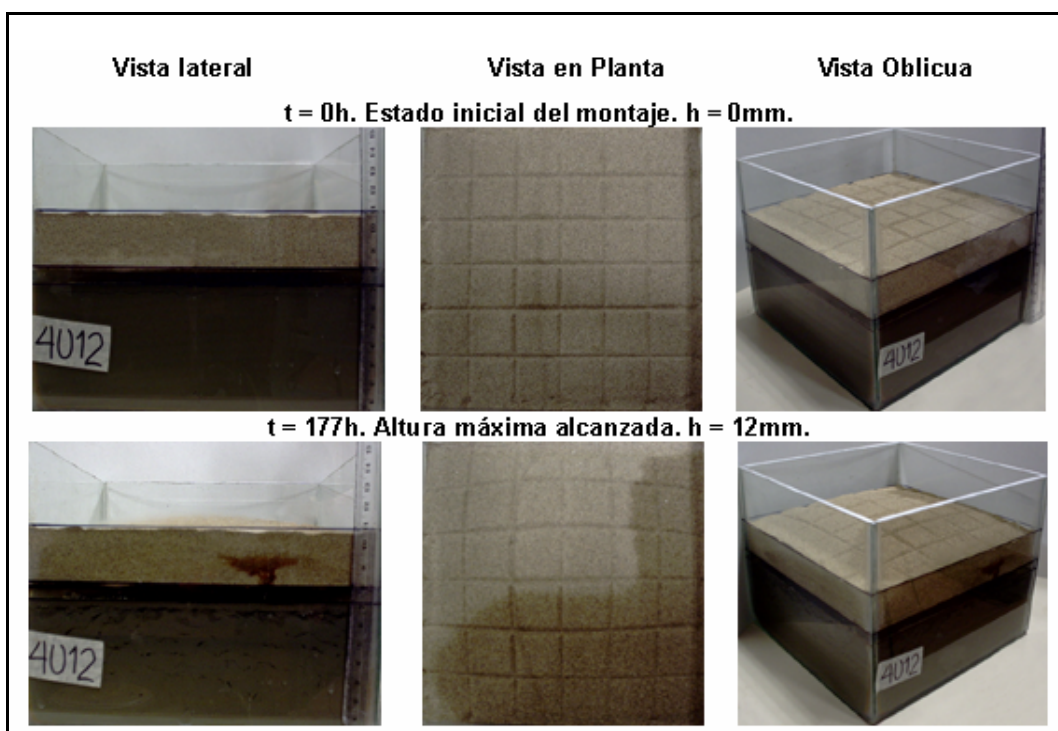


Figura 15. Evolución Experimento 4U11. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 2.52% TOC (7 cm), capa impermeable de gelatina (1 cm) y capa tope de arena (3 cm). Vista de planta: 20 cm × 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo

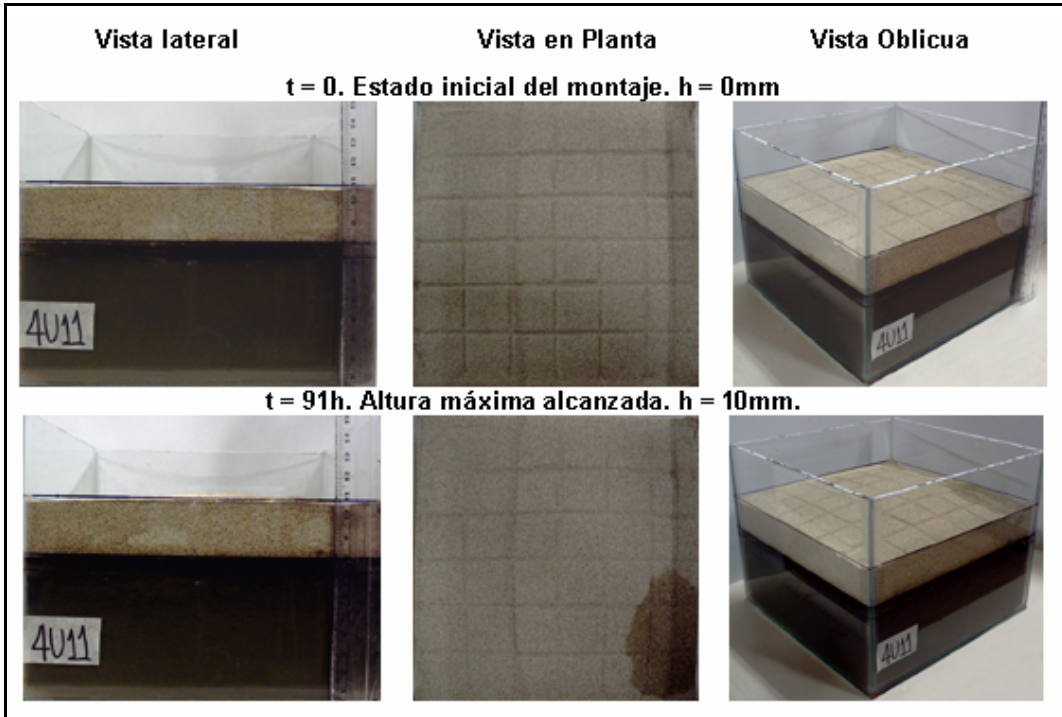


Figura 16. Evolución Experimento 3U3. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 2.965% TOC (7 cm), capa impermeable de gelatina (1 cm) y capa tope de arena (3 cm) Vista de planta: 20 cm x 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo.

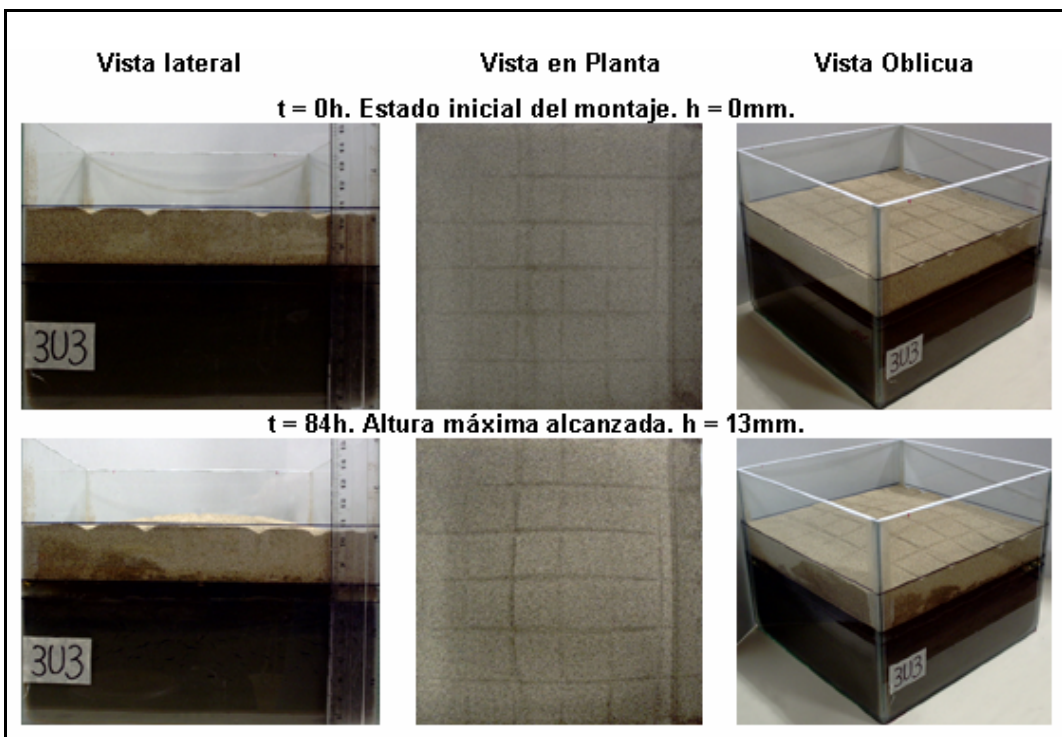


Figura 17. Evolución Experimento 3U4. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 3.802% TOC (7 cm), capa impermeable de gelatina (1 cm) y capa tope de arena (3 cm) . Vista de planta: 20 cm x 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo

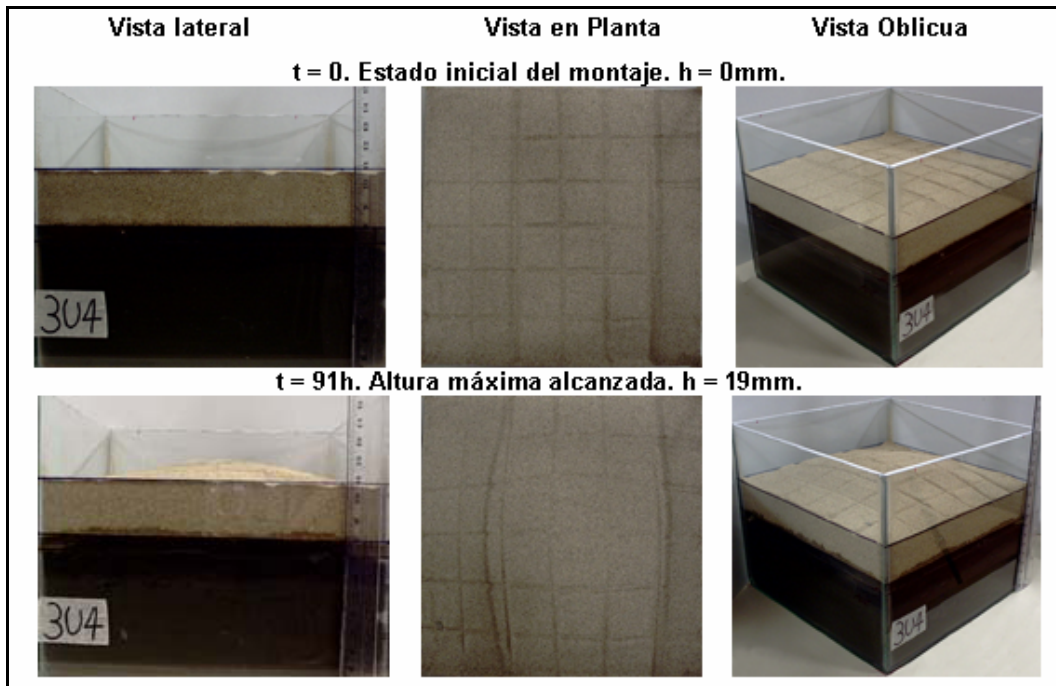


Figura 18. Evolución Experimento 4U2. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 3.881% TOC (7 cm), capa impermeable de gelatina (1 cm) y capa tope de arena (3 cm). Vista de planta: 20 cm × 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo.

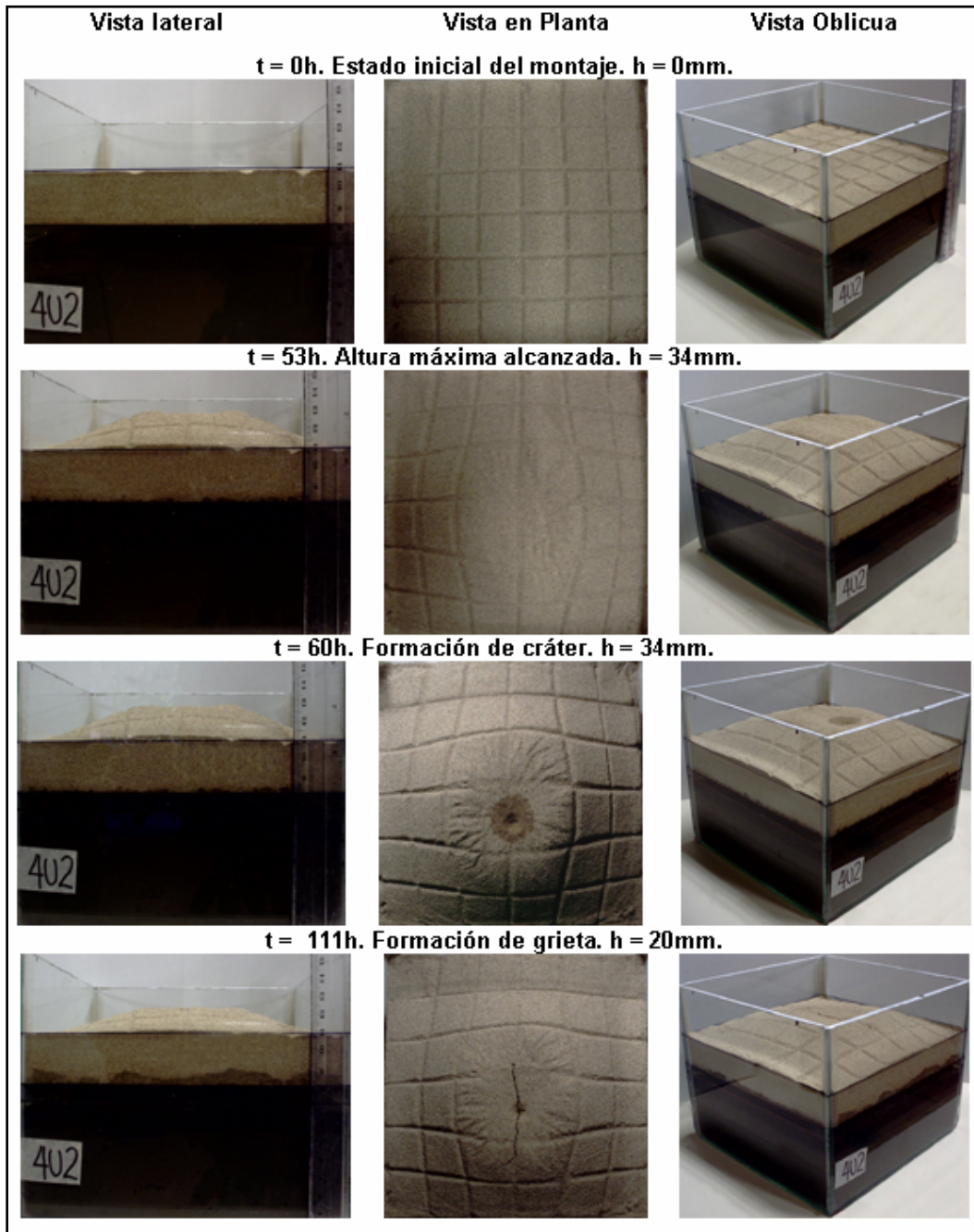


Figura 19. Evolución Experimento 6U7. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 3.959% TOC (7 cm), capa impermeable de gelatina (1 cm) y capa tope de arena (3 cm). Vista de planta: 20 cm × 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo.

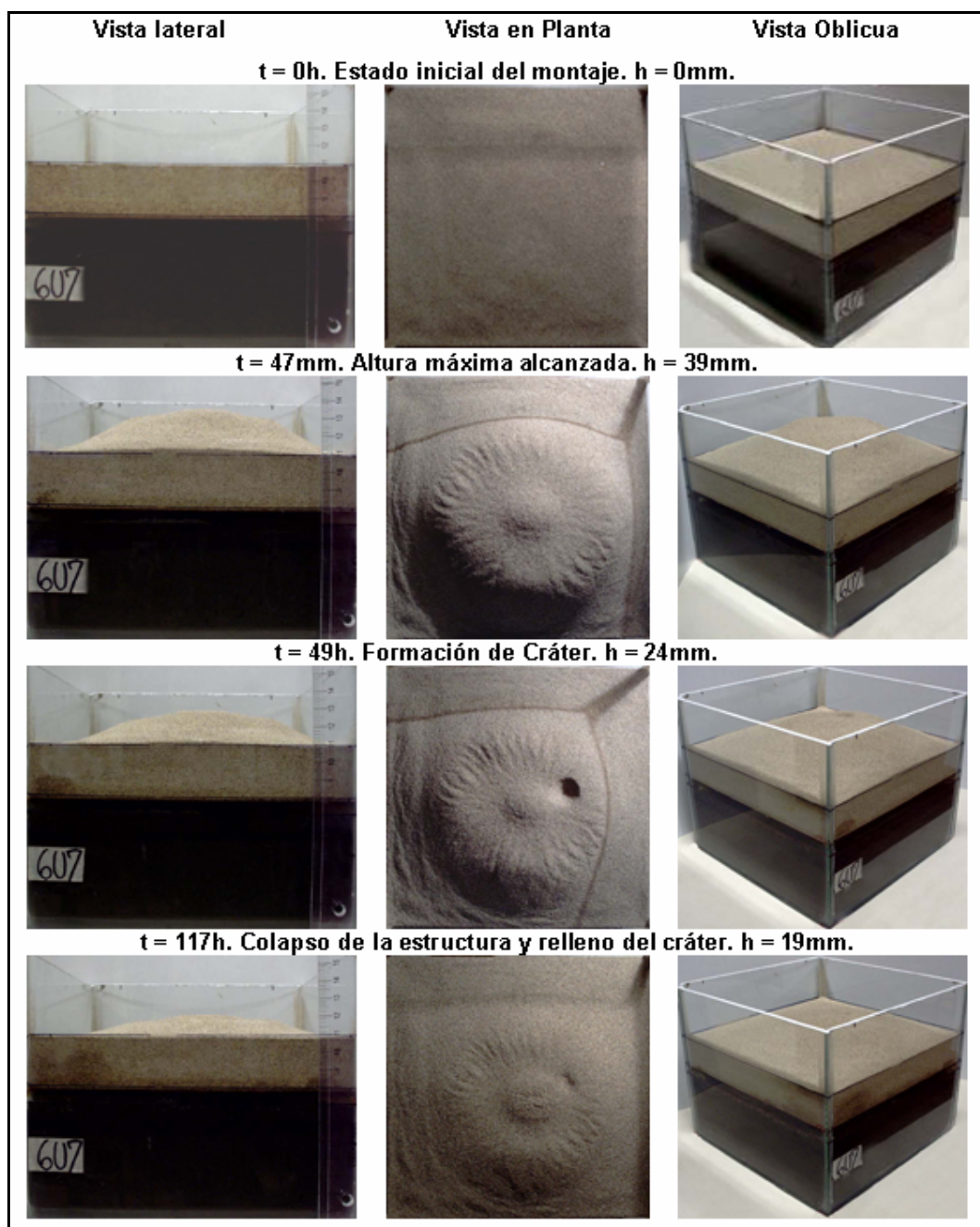


Figura 20. Evolución Experimento 4U5. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 4.037% TOC (7 cm), capa impermeable de gelatina (1 cm) y capa tope de arena (3 cm). Vista de planta: 20 cm × 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo.

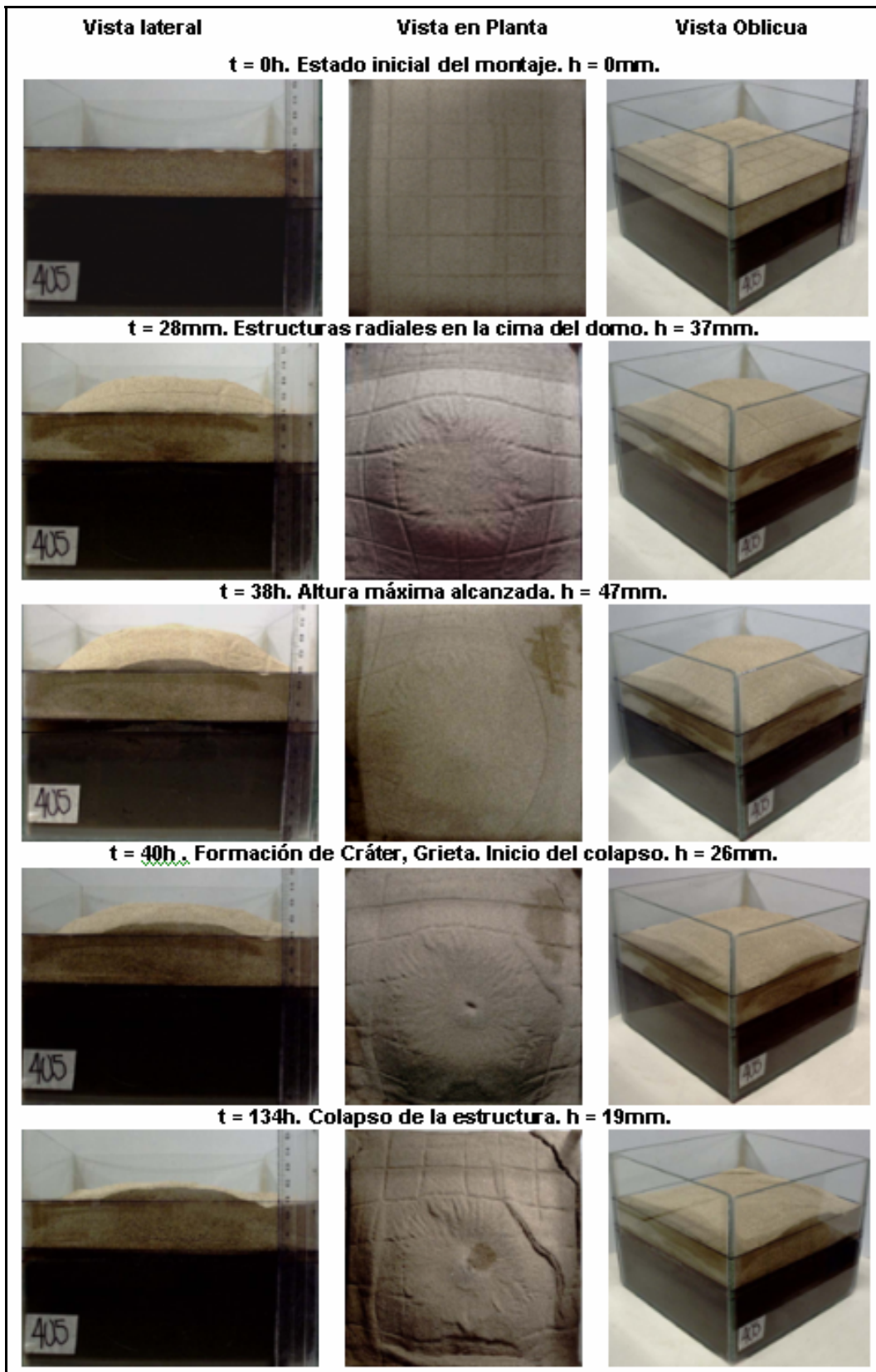


Figura 21. Evolución Experimento 5U3. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 4.037% TOC (7 cm), capa impermeable de gelatina (1 cm) y capa tope de arena (3 cm). Vista de planta: 20 cm × 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo.

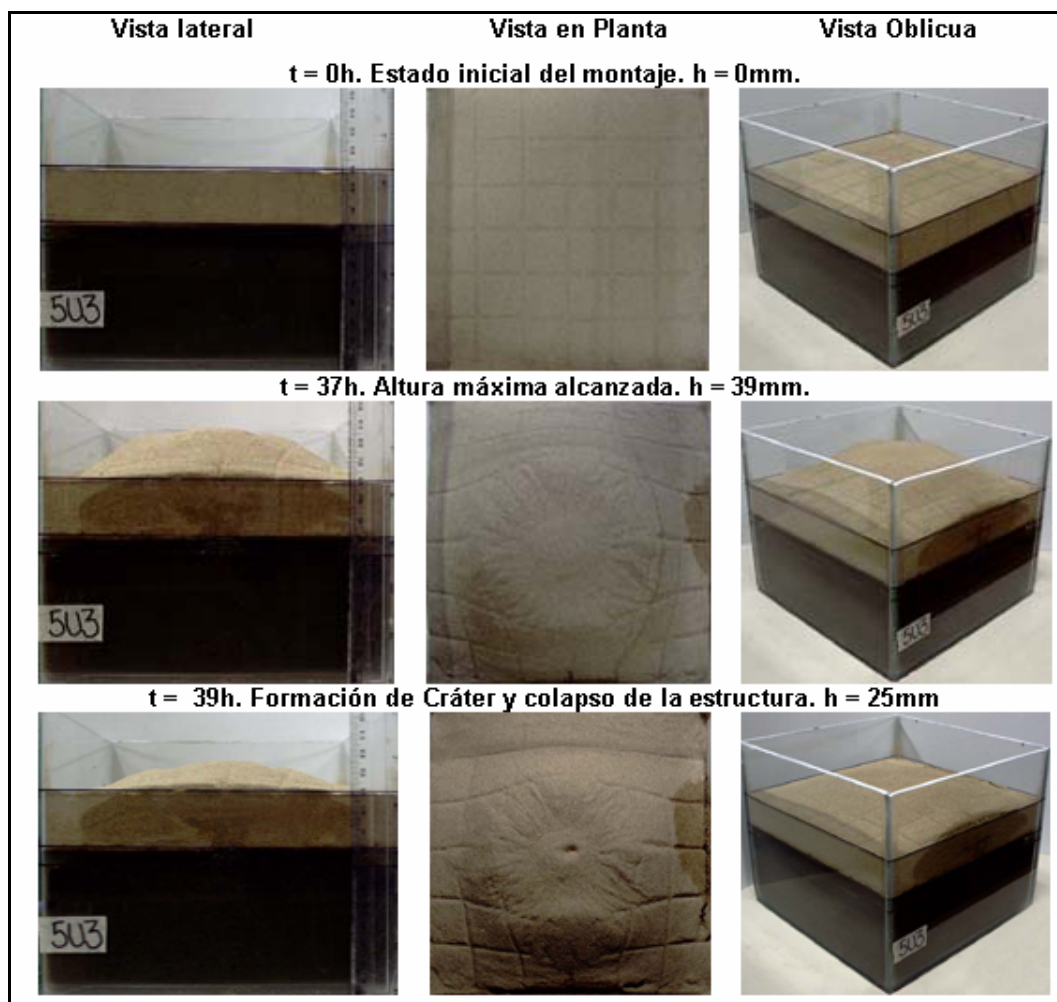


Figura 22. Evolución Experimento 3U7. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 4.3553% TOC (7 cm), capa impermeable de gelatina (1 cm) y capa tope de arena (3 cm). Vista de planta: 20 cm × 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo.

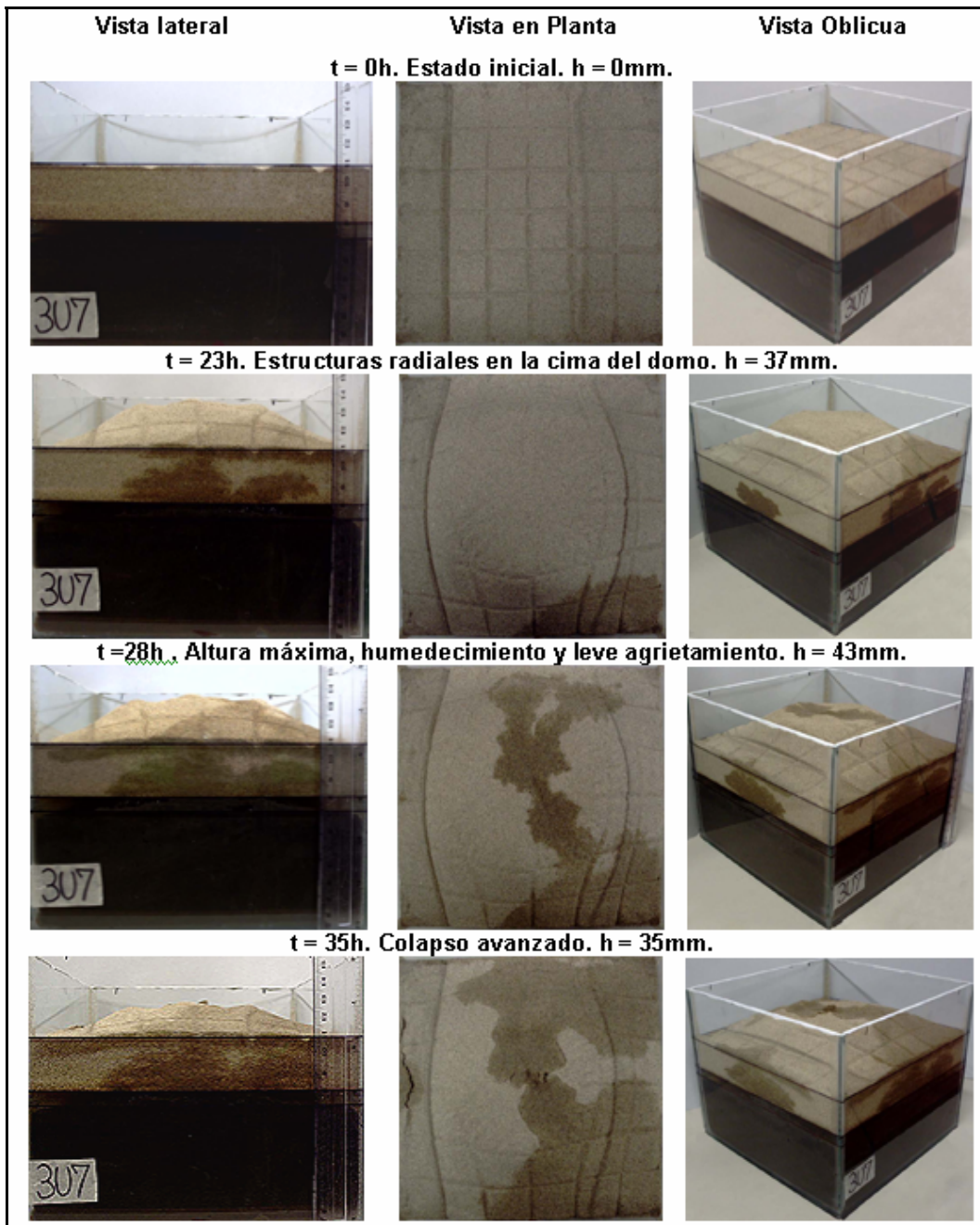


Figura 23. Evolución Experimento 4U7. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 4.35% TOC (7 cm), capa impermeable de gelatina (1 cm) y capa tope de arena (3 cm). Vista de planta: 20 cm × 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo.

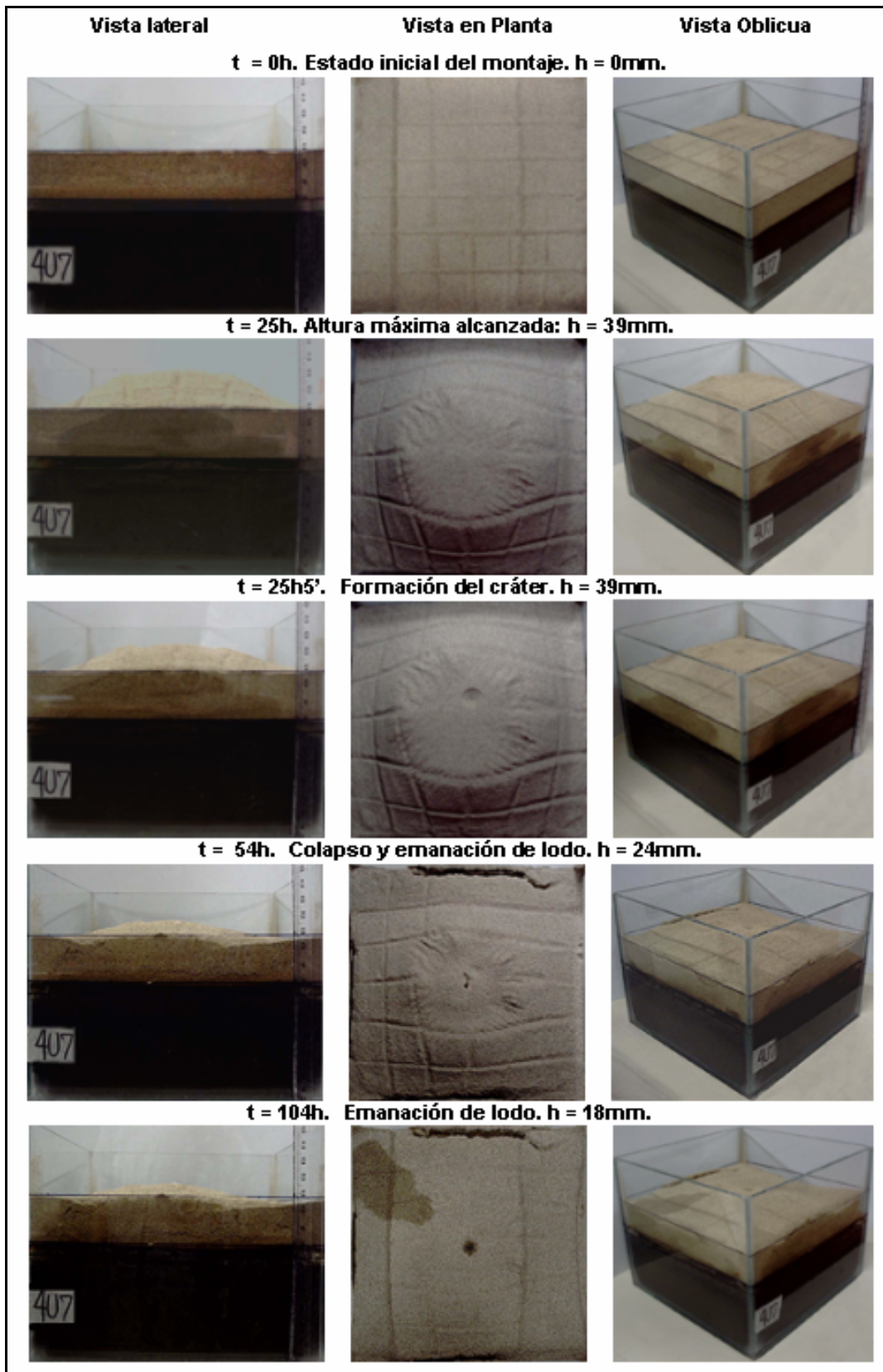


Figura 24. Evolución Experimento 6U9. Configuración del montaje: Capa base de lodo con 4.35% TOC (7 cm), capa impermeable de gelatina (1 cm) y capa tope de arena (3 cm) Vista de planta: 20 cm × 20 cm. Vista lateral: 20 cm de largo.

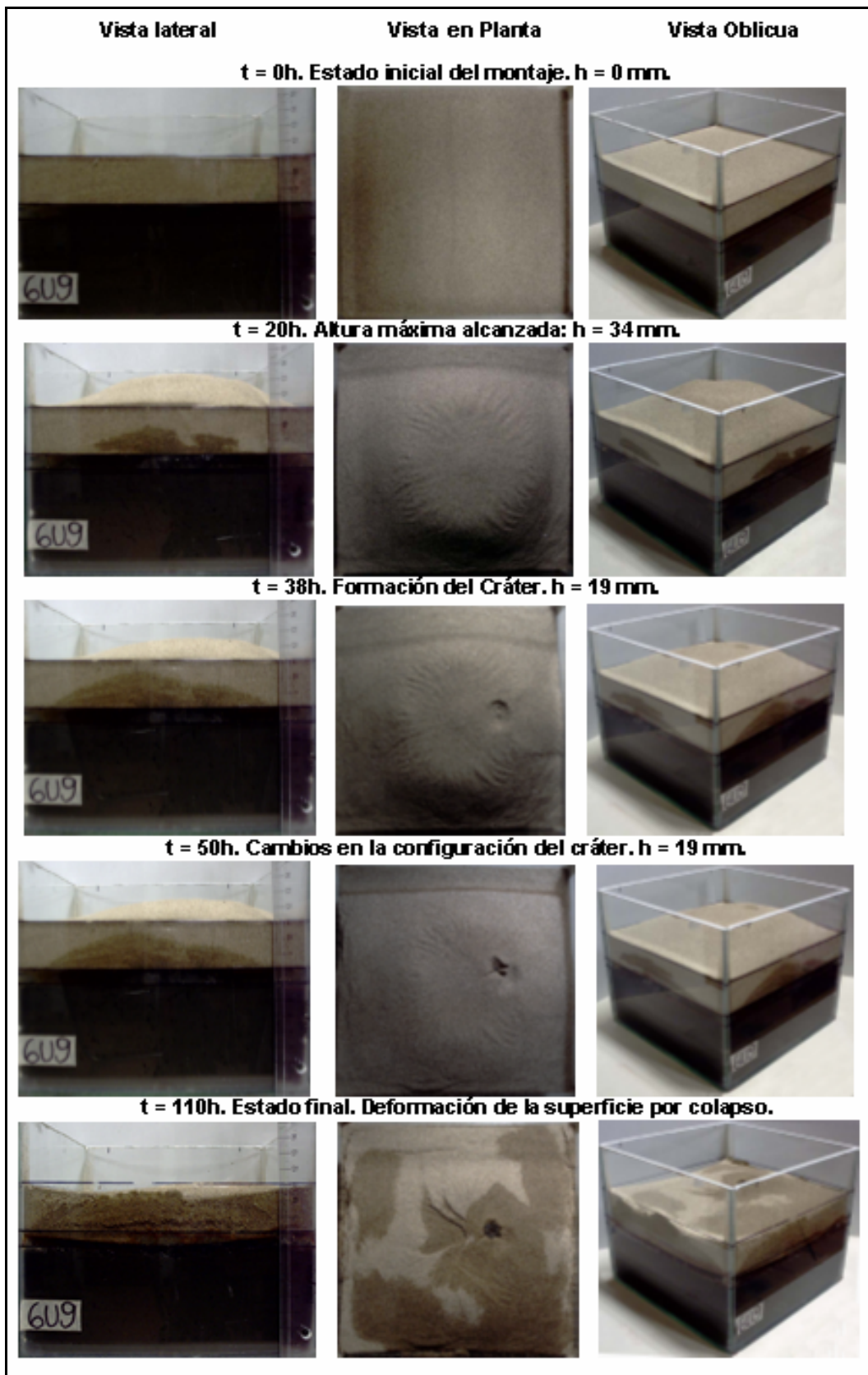


Figura 25. Interpretación e las estructuras vistas para 6U9 en $t = 0$ h, $t = 20$ h, y $t = 38$ h.
Vistas de planta: 20 cm \times 20 cm.

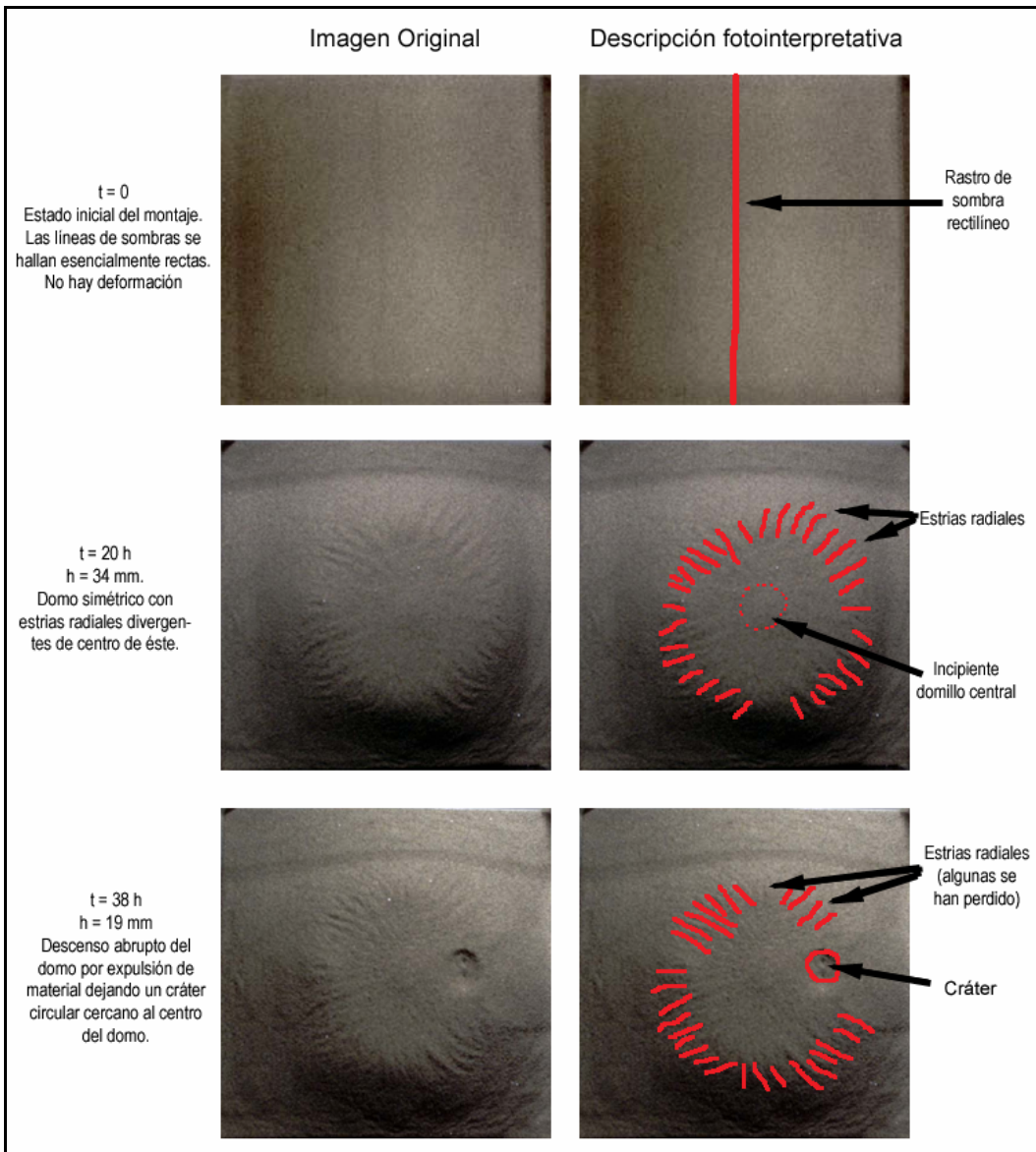
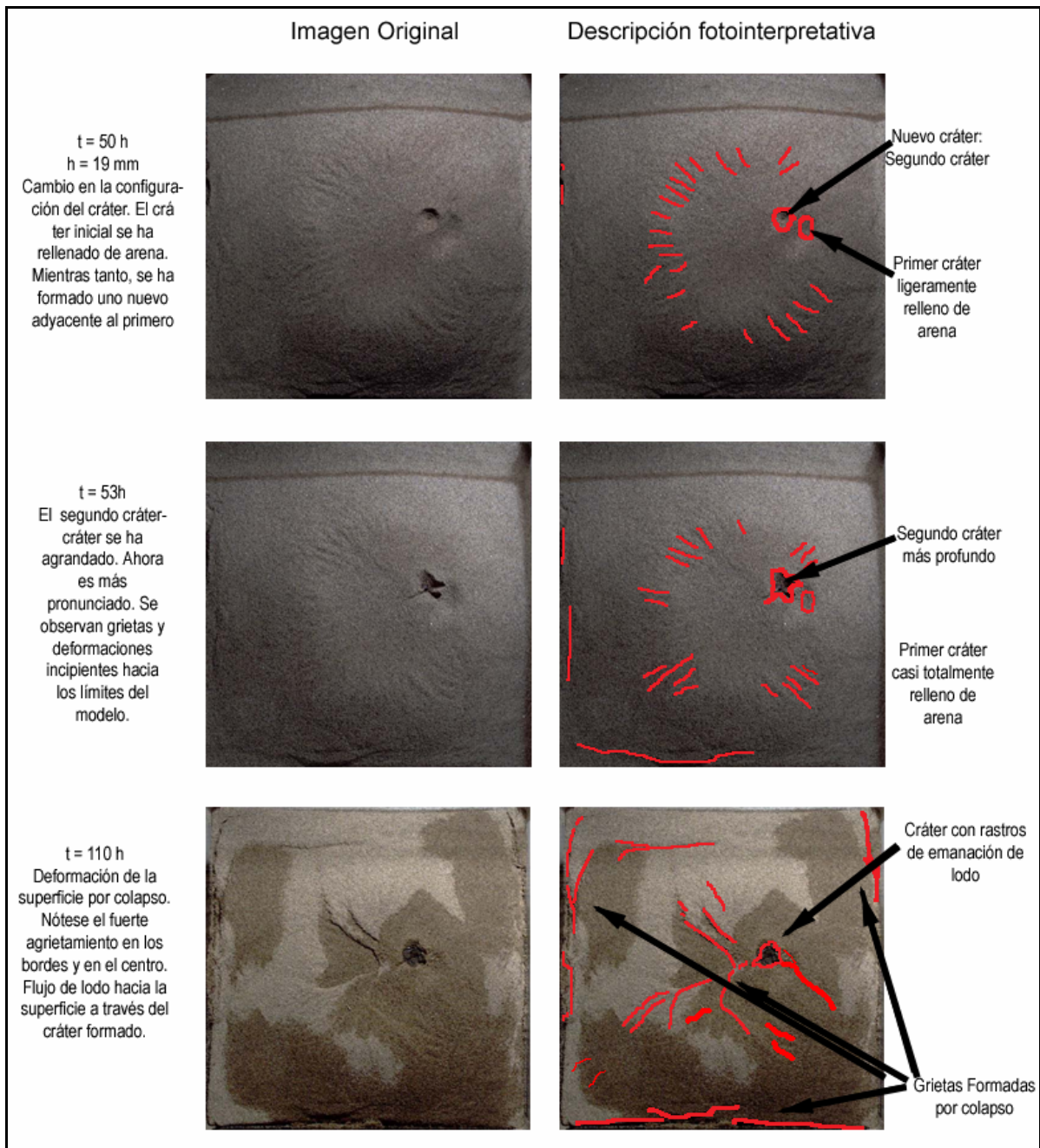


Figura 26. Interpretación e las estructuras vistas para 6U9 t = 50 h, t = 53 h, y t = 110 h. Continuación de la evolución presentada en la figura 23. Vista de planta 20 cm x 20 cm.



3.1 RELACIÓN TOC – ALTURA MÁXIMA ALCANZADA POR LOS DOMOS DIAPÍRICOS.

En la tabla 7 se muestran condensados los resultados cuantitativos obtenidos en las observaciones y que fueron luego tratadas por medio de técnicas estadísticas para obtener regresiones lineales que relacionaran las variables porcentaje de TOC contenido en el lodo y altura máxima de los domos diapíricos. Así, se obtuvieron dos regresiones: la regresión A y la regresión B.

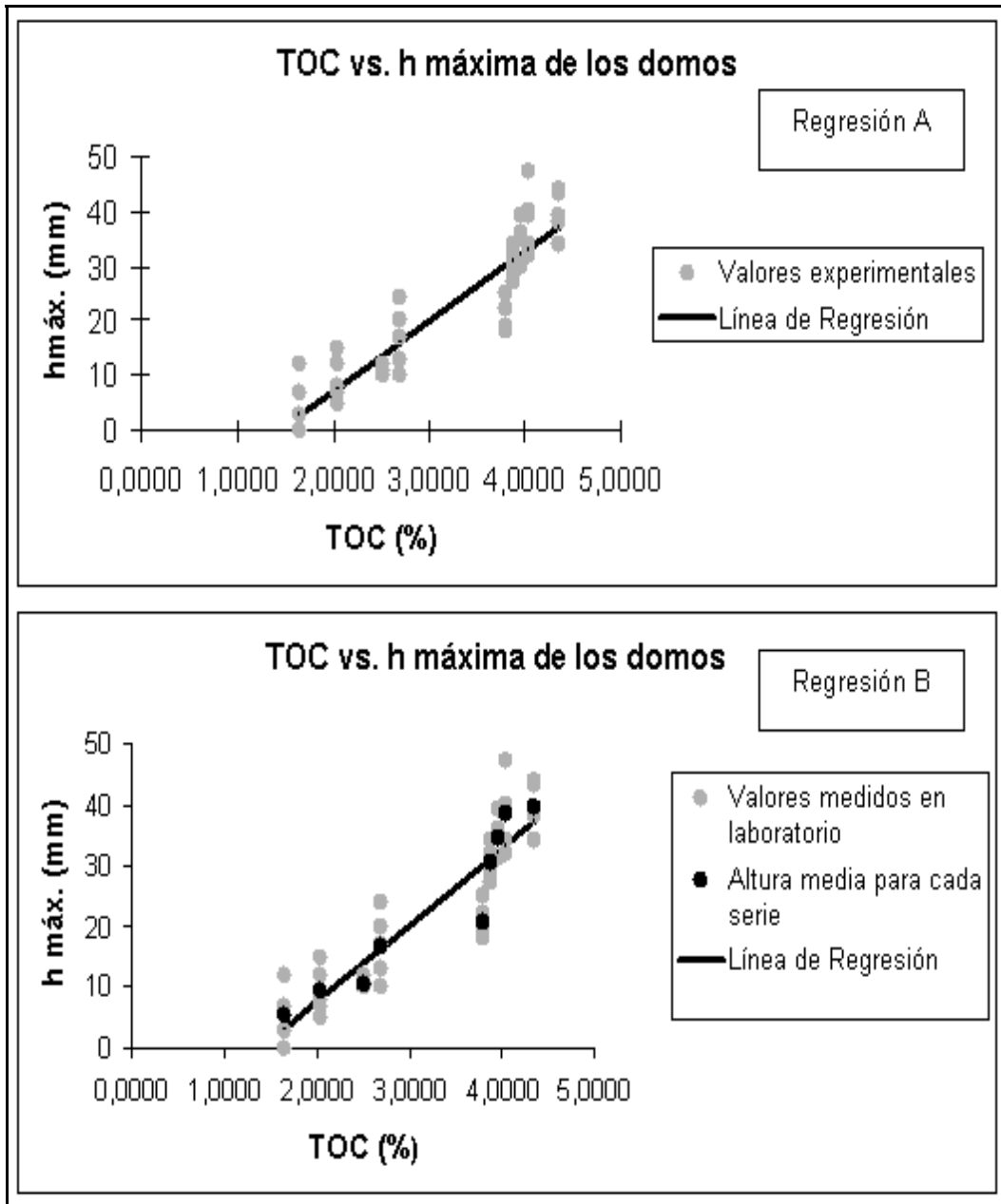
La regresión A se llevó a cabo teniendo en cuenta cada una de las alturas máximas medidas en cada corrida para cada concentración de materia orgánica en el lodo.

En la regresión B las medidas de altura realizadas de las cinco corridas se promediaron. De este modo se obtuvo un dato representativo de altura máxima para cada porcentaje de TOC.

Tabla 7. Alturas máximas alcanzadas por los domos diapíricos a diferentes concentraciones de TOC.

TOC (%)	h máx.	h máx.	h máx.	h máx.	h máx.	PROMEDIO (mm) CORRIDAS 1-5	DESVIACIÓN ESTANDAR
	CORRIDA 1	CORRIDA 2	CORRIDA 3	CORRIDA 4	CORRIDA 5		
1,6500	3	12	0	7	0	4,4	5.1
2,0440	8	5	12	7	15	9,4	4
2,5200	12	11	10	10	10	10,6	0.9
2,6950	17	13	24	20	10	16,8	5.5
3,8020	18	22	25	19	19	20,6	2.9
3,8807	32	34	31	27	29	30,6	2.7
3,9592	31	36	35	31	39	34,4	3.4
4,0373	34	40	47	39	32	38,4	5.9
4,3553	43	44	39	38	34	39,6	4

Figura 27. Gráficas TOC vs. Altura máxima alcanzada por los domos diapíricos. Regresión A: Usando todos los valores de alturas (h máx.) medidos para cada TOC. Regresión B: Usando los valores promedios de las corridas 1 a 5 para cada TOC.



3.2 RELACIÓN TOC – TIEMPO TOMADO POR LOS DOMOS DIAPÍRICOS EN ALCANZAR LA ALTURA MÁXIMA.

Para observar la relación entre el porcentaje de TOC en el lodo y el tiempo tomado hasta alcanzar la altura máxima de los domos en los montajes también se llevó a cabo una regresión lineal. En esta regresión se tomaron en cuenta los promedios de los tiempos obtenidos en las cinco corridas para cada porcentaje de TOC, con el fin de tener valores representativos de tiempo para cada TOC (Tabla 8, Figura 28).

Todos los datos se obtuvieron mediante el seguimiento de cada uno de los experimentos, dichos seguimientos se pueden consultar con mayor detalle en los anexos de este trabajo.

En esta sección se muestra además un diagrama comparativo que ilustra la evolución de los montajes con diferentes contenidos de TOC desde que inician ($t = 0$) hasta su momento de desmonte. Aquí se puede observar el momento en que cada uno alcanza su altura máxima y dicha altura (Figura 29).

Tabla 8. Tiempo tomado por los domos diapíricos en alcanzar las alturas máximas a diferentes concentraciones de TOC.

TOC (%)	t máx.-horas CORRIDA 1	t máx.-horas CORRIDA 2	t máx.-horas CORRIDA 3	t máx.-horas CORRIDA 4	t máx.-horas CORRIDA 5	PROMEDIO horas
1,65	118	170		158		148,666667
2,044	139	82	117	104	146	117,6
2,52	137	95	91	91	95	101,8
2,695	138	84	124	124	89	111,8
3,802	113	106	122	91	85	103,4
3,8807	54	53	52	45	42	49,2
3,9592	31	32	36	45	47	38,2
4,0373	21	34	39	38	24	31,2
4,3553	28	28	27	26	20	25,8

Figura 28. Gráfica TOC vs. Tiempos en alcanzar las alturas máximas.

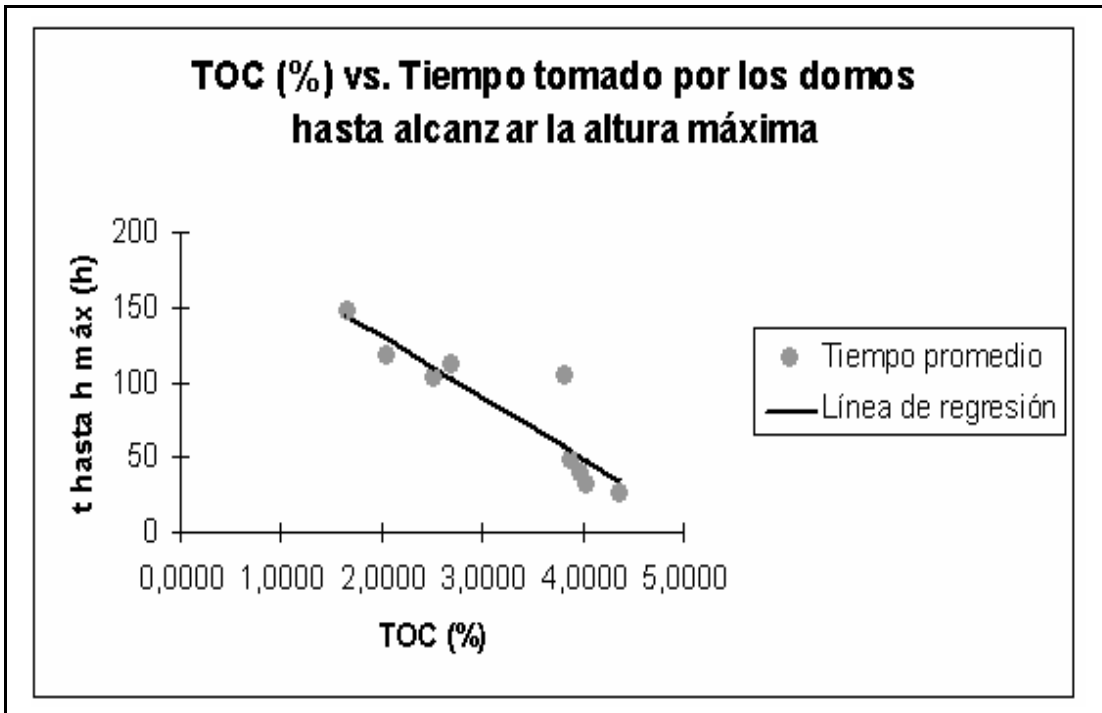
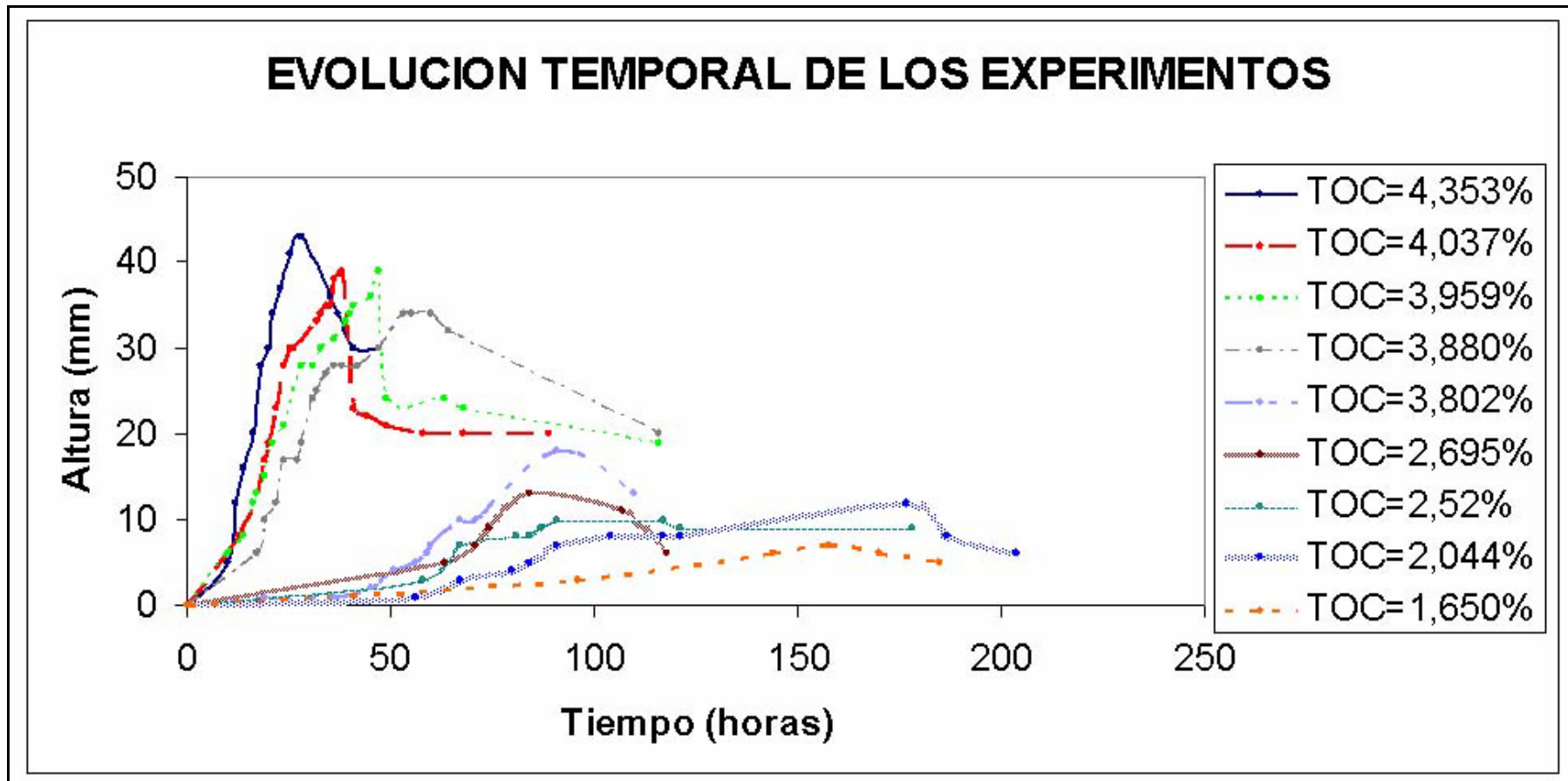


Figura 29: Evolución temporal de los experimentos con 9 contenidos diferentes de TOC. (6U11 = 1.65%, 4U12 = 2.044%, 4U11 = 2.52%, 3U3 = 2.695%, 5U6 = 3.802%, 4U2 = 3.8807%, 6U7 = 3.9592%, 5U3 = 4.0373%, 3U7 = 4.3553%).



4. DISCUSION

Los resultados de los análisis permiten hacer inferencias en cuanto a la relación TOC, altura máxima de los domos, y de la evolución temporal de los diapiros. Igualmente, los experimentos brindaron la oportunidad de observar el papel que juega la acumulación de gases provenientes de la descomposición de la materia orgánica en el lodo bajo un sello impermeable en la formación de los domos diapíricos en el laboratorio. Además, se obtuvo evidencia sobre la relación entre el TOC contenido en el lodo y el tiempo que le toma a la estructura diapírica en levantarse hasta alcanzar su altura máxima. Así, se encontraron diferencias y similitudes en la evolución de los domos creados en los montajes permitiendo establecer diferentes estadios evolutivos en la formación y colapso de los domos. Se halló además una aparente relación entre la rapidez con que evolucionaban los montajes y el contenido de TOC en los lodos.

4.1. EFECTO DEL TOC EN LA ALTURA MÁXIMA DE LOS DIAPIROS.

Los resultados arrojados por los experimentos confirman la hipótesis propuesta. Es decir, las alturas máximas de los domos diapíricos de lodo son directamente proporcionales al contenido de materia orgánica en el lodo. En los experimentos con bajos contenidos de TOC, las alturas máximas alcanzadas fueron mucho menores comparadas con las alturas máximas alcanzadas en los montajes realizados con lodos con altos contenidos de TOC (Tabla 8).

El número de datos obtenidos en total fue de 45, distribuidos en 5 corridas por cada concentración de TOC contenido en lodo. Se debe notar que el número de datos de altura máxima tomados para cada TOC (número de corridas) estuvo limitado por factores tales como el tiempo y disponibilidad

de materiales. Por esta razón, se decidió llevar a cabo cinco corridas para lodo con diferente TOC, y no solo una prueba para cada uno.

Para cuantificar el grado y tipo de correlación entre TOC y altura máxima, se usaron técnicas estadísticas de regresión lineal. El software comercial EXCEL permitió hacer esto de forma fácil y rápida. Así se llevaron a cabo dos regresiones: la regresión A, que tenía en cuenta todos los cuarenta y cinco datos y la regresión B, que tenía en cuenta sólo los promedios de las cinco corridas.

Las siguientes ecuaciones son el producto de las regresiones A y B:

$$h_{\max} = 12,7074(\%TOC) - 18,1585 \quad (2)$$

para la regresión A, con un coeficiente de correlación múltiple de 0,90978183, mostrando la correspondencia entre las variables, lo cual indica una muy buena correlación entre los datos (alturas medidas) y el modelo (línea de regresión).

En el caso de la regresión B se obtuvo:

$$h_{\max} = 12,5297(\%TOC) - 17,4169 \quad (3)$$

hallándose un coeficiente de correlación múltiple de 0,944289211, el cual confirma que el modelo de correlación lineal es apropiado.

En (2) y (3) h_{\max} . significa altura máxima medida en milímetros y %TOC indica el porcentaje de contenido de materia orgánica en el lodo diapírico. Hay que tener en cuenta que un coeficiente de correlación es una medida del grado de correlación entre las dos variables, en un rango entre 0 y 1. Entre más cercano a 1, se dice que hay mayor correlación, y cuando es igual a 1, se dice que la correlación es perfecta (Spiegel, 1998). Se debe

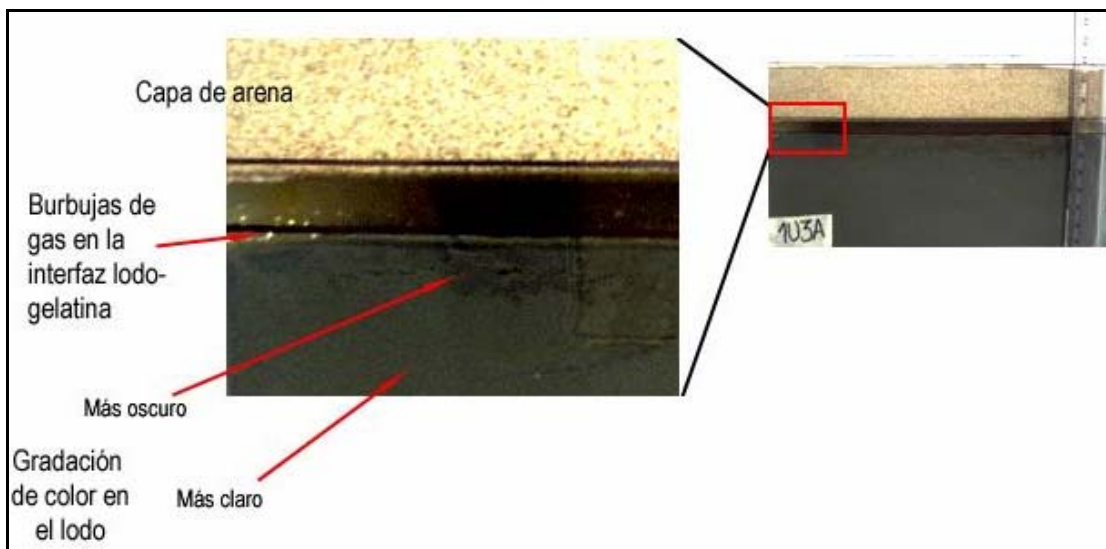
aclarar que las ecuaciones de regresión obtenidas, por estar sujetas a factores experimentales no controlables, pudieron haber inducido errores en las relaciones obtenidas. Por ejemplo, el tiempo transcurrido entre la extracción del lodo del Lago El Manantial y la puesta en marcha de cada montaje era por lo general de unas 24 horas, pero en algunos casos pudo excederse hasta 48 o 72 horas. Esta diferencia en tiempos pudo resultar en una diferencia en el estado de descomposición del lodo y su capacidad de generar gases, cuya importancia se menciona más adelante. Además, no se puede asegurar completamente que la composición del lodo del fondo del lago haya permanecido constante desde el 8 de Agosto hasta el 7 de Septiembre del 2005, mes durante el cual se extrajo lodo semanalmente para llevar a cabo los montajes, ya que los cambios ambientales, pudieron afectar de alguna manera la composición del lodo. Sin embargo, una determinación de TOC efectuada sobre este lago el mes de Enero del 2005 indicó un valor de 3.6600%, el cual comparado con el TOC obtenido en Agosto del 2005 de 3.8020% indica una diferencia de apenas 0.142 %. Finalmente el tiempo transcurrido entre la toma de muestra del lodo de cada montaje, y la toma de medidas de TOC, pudo haber conllevado a subestimaciones en los valores de los mismos, a pesar de que el lodo se mantuvo refrigerado durante su almacenamiento.

La relación encontrada entre %TOC y $h_{m\acute{a}x}$. puede ser una herramienta útil en exploración geológica del subsuelo. Si se comprobara que el %TOC es en realidad el factor que controla la altura máxima de los diapiros en un ambiente de lodo móvil (mobile shale environment), entonces variaciones en la altura de los diapiros de lodo medidas en superficie podrían indicar variaciones en la concentración de materia orgánica del lodo en el subsuelo. Esto puede tener implicaciones en evaluaciones del potencial de rocas generadoras de hidrocarburos en cuencas sedimentarias petrolíferas con presencia de diapirismo en superficie, tal como la cuenca del Sinú en el NW de Colombia.

4.2. RELACIÓN ENTRE EL TOC DEL LODO Y LA GENERACIÓN DE GAS.

Los montajes fueron llevados a cabo partiendo de una mezcla de lodo homogenizado mediante el proceso de agitación, por lo cual es posible asumir que el lodo tenía una concentración de TOC lateral y vertical constante. En algunas corridas, pasado algún tiempo después de su montaje, se observó la formación inicial de burbujas en distintas zonas de la capa base de lodo. Se observó que a mayor concentración de TOC se generaban mayores cantidades de burbujas, la cual se incrementaba a medida que transcurría el tiempo. Igualmente, a medida que se generaban las burbujas se evidenciaba una gradación en la coloración del lodo, de base a tope. Tiempo después, se podían ver claramente burbujas en la interfaz lodo-gelatina en una cantidad que aumentaba con el transcurrir del tiempo.

Figura 30. Generación de gases, burbujas en el lodo y en la interfaz lodo-gelatina. Capa base (7 cm), capa impermeable (1 cm) y capa tope (3 cm). Derecha: Vista lateral de la caja: 20 cm de largo.



En los montajes con porcentaje de TOC menor a 3.080%, estas pequeñas burbujas se quedaban alojadas en la interfaz anteriormente mencionada, mientras que en los montajes con altas concentraciones de TOC, las

burbujas atravesaban la capa de gelatina. Después de que el domo llegaba a su altura máxima, se daba una expulsión de material dejando percibir un olor fétido mientras la estructura descendía y se formaba una pequeña depresión en la superficie del domo. El olor fétido se interpreta como debido a la expulsión de gases generados por descomposición de la materia orgánica en el lodo. En el desmonte de las pruebas, se encontró un lodo extremadamente poroso, no homogéneo, también de olor fétido pero más fuerte que el anteriormente mencionado.

Las observaciones anteriores, permiten especular acerca del origen de los gases en relación con la proveniencia del lodo orgánico. El TOC contenido en los lodos experimentales representa el potencial que estos tienen para generar gases bajo ciertas condiciones. El lodo base para los montajes (LM) usado en todas las mezclas para cada montaje proviene del fondo del Lago El Manantial (Girón, Santander), y está dedicado al cultivo de peces. El color oscuro de LM, los análisis de TOC y la actividad biológica en el lago del cual proviene, sugieren una alta productividad de materia orgánica en su lugar de depósito. En los montajes, este lodo fue sometido a condiciones confinantes posiblemente apropiadas para su descomposición produciendo los gases que se evidenciaban en las burbujas. Análisis de cromatografía de gases, isotópicos de carbono y análisis bacteriológicos del lodo podrían dar indicios acerca del mecanismo generador de gas y del tipo de gas generado en los experimentos.

Según Hedberg (1974), los volcanes de lodo evidencian zonas en las cuales se ha destruido parte de las acumulaciones de gas existente. Igualmente, los diapiros y volcanes de lodo evidencian zonas en las cuales se produjeron o se están produciendo gases (y posiblemente otros hidrocarburos) activamente. Los experimentos llevados a cabo no entran en conflicto con lo sugerido por Hedberg (1974). Poco después de la puesta en marcha de las pruebas, se evidenciaba la formación de gases

que luego serían expulsados gradualmente durante la evolución de los montajes. Estas observaciones permiten concluir que existe una asociación genética entre gas y diapirismo de lodo. Los resultados de este trabajo indican que los gases son una condición necesaria para que se originen diapiros de lodo, pues sin generación de gas, no existe un mecanismo que propulse el lodo para su ascenso.

4.3. EFECTO DEL TOC EN EL TIEMPO DE LEVANTAMIENTO Y COLAPSO DE DIAPIROS.

En los experimentos con mayor porcentaje de TOC, los domos diapíricos obtenidos alcanzaron mucho más rápido sus alturas máximas, mientras que los montajes con porcentajes bajos de TOC se demoraron más en alcanzarlas, es decir, sugieren una relación inversamente proporcional entre TOC y tiempo en alcanzar máx. Esto se evidencia mejor en el diagrama de evolución conjunto (Figura 29), donde se superponen diferentes curvas de levantamiento de diapiros en montajes con lodos de diferente contenido de TOC.

Para entender esta relación, se llevó a cabo una regresión lineal paramétrica por medio del paquete de software EXCEL. Para este propósito sólo se tomaron los valores medios ya que en los casos en los que no hubo ascenso de los domos, no era posible hacer una relación entre la altura y el tiempo. Esta regresión dio como resultado la siguiente ecuación:

$$t = -40,9273878(\%TOC) + 212,472057 \quad (4)$$

donde t indica tiempo expresado en horas, y %TOC es el porcentaje de TOC en escala de 1 a 100. El coeficiente de correlación fue de 0,9041.

De acuerdo con este análisis, los montajes con menores contenidos de materia orgánica tienen una evolución más lenta que la de aquellos con mayores contenidos de materia orgánica. Esta observación está

directamente relacionada con la capacidad que tiene el sistema de generar gases. No es de extrañar que los gases se formen más rápido en lodos con alta concentración de TOC y por ende, que el ascenso se inicie más temprano.

Los parámetros de montaje de los experimentos, establecieron que el tiempo adecuado para añadir la capa de arena fuera después de 4 horas del establecimiento de la segunda capa de gelatina para permitir su óptima gelificación, sin embargo, en algunas ocasiones este lapso de 4 horas se prolongó, por lo cual, la gelatina no estuvo completamente seca y lista en las 4 horas propuestas. De este modo, fue necesario añadir la capa de arena 6 a 7 horas después teniéndose así, una diferencia de 2 horas entre el inicio de la corrida de unos pocos experimentos en comparación con la mayoría. Esto podría indicar que si las condiciones en todos los montajes hubiesen exactamente sido las mismas, habría que restar de 2 a 3 horas en los tiempos de los experimentos donde la gelatina no se secó a tiempo, quizá debido a cambios en la humedad del medio. A pesar de la poca oscilación en las condiciones de temperatura (entre 26 y 28 °C), no se descarta que estos cambios hallan afectado en alguna medida las determinaciones.

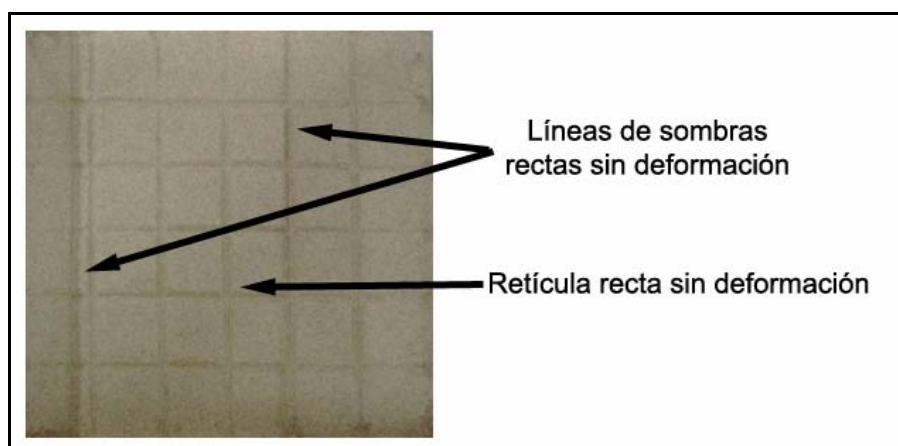
Esta relación encontrada entre tiempo de levantamiento y TOC puede tener aplicación en cartografía geoquímica de subsuelo para entender las variaciones laterales en contenido de materia orgánica en el subsuelo en relación con la historia de formación de diapiros en una región determinada. Por ejemplo, si en un terreno de diapiros y volcanes de lodo es posible datar el tiempo de diapiroismo, entonces el tiempo de formación de los diapiros puede usarse como un proxy para la cantidad de materia orgánica presente en el subsuelo.

4.4. ESTADIOS DE EVOLUCIÓN

Como ya se ha mencionado, los modelos llevados a cabo en el laboratorio experimentan cambios a través del tiempo, y su tiempo de vida, altura máxima y estadios de evolución son claramente definibles. En el laboratorio se identificaron siete estadios de evolución. A continuación se describen estos estadios:

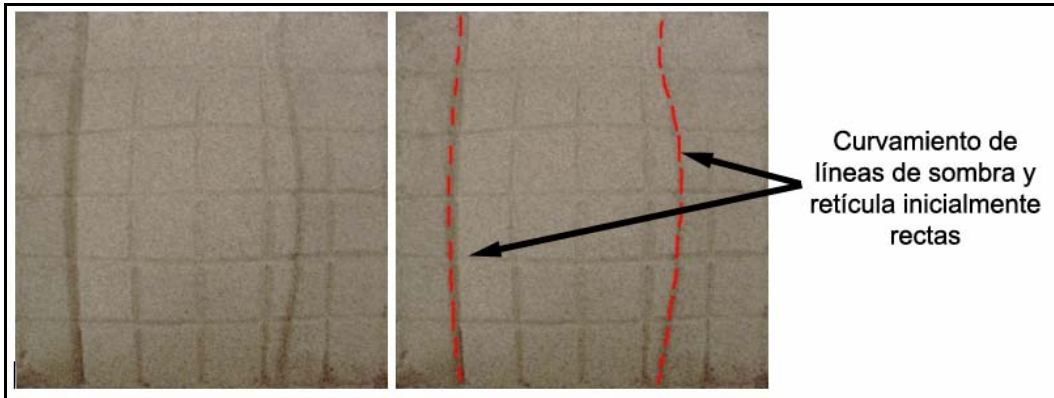
-Estadio 0: Estado inicial del montaje. Este estadio es el punto de partida de todos los experimentos, y comienza inmediatamente después del vertimiento de la capa de arena y del trazo de la retícula. Se presenta una superficie plana sin deformación en la que las líneas de la retícula y las líneas de sombra se encuentran rectas.

Figura 31. Estadio 0: Estado inicial del montaje. Vista de planta 20 cm × 20 cm.



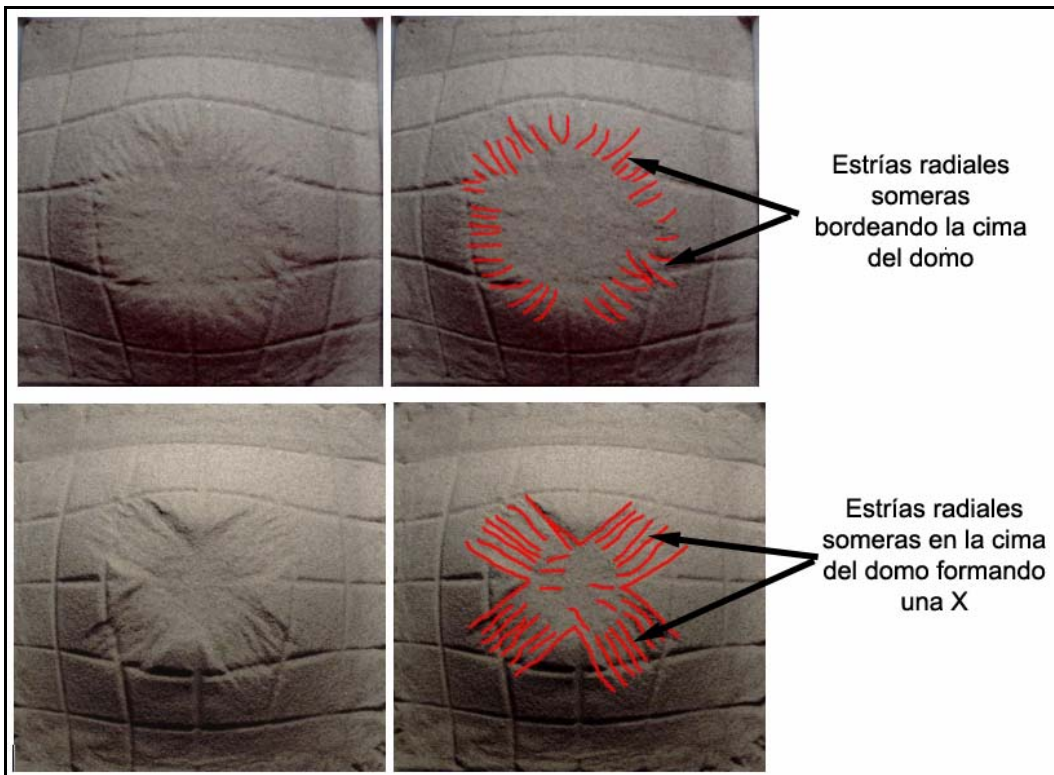
-Estadio 1: Abombamiento Inicial. En este estadio se observa un domo incipiente, por lo regular simétrico. Se evidencia en vista de planta por la curvatura de la retícula trazada en la superficie de la arena o de las líneas de sombras inicialmente rectas en el estadio 0. Los montajes con bajas concentraciones de TOC (1.6500%, 2.0440%, 2.5200% y 2.9650%), alcanzaron sus alturas máximas en este estadio.

Figura 32. Estadio 1: Abombamiento inicial. Vista de planta 20 cm × 20 cm



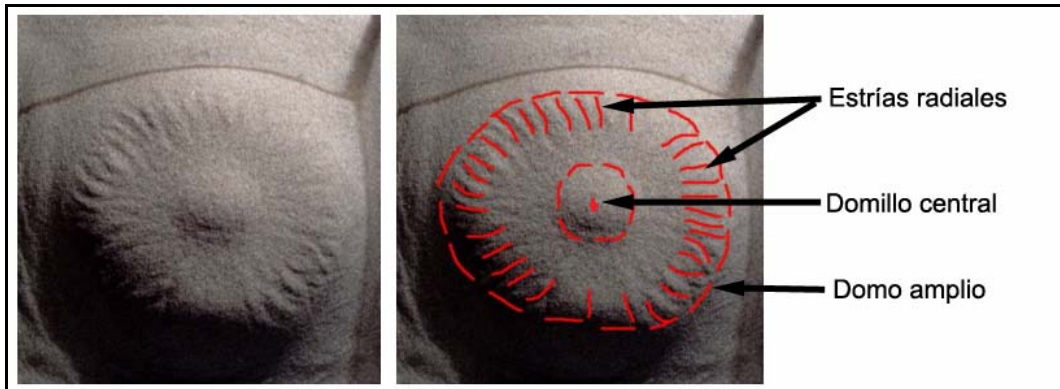
-Estadio 2: Formación de estrías. En este estadio se forman estrías radiales someras en la cima del domo, algunas veces bordeándolo por completo y en otras formando una X. La elevación de la estructura aumenta considerablemente, con respecto al Estadio 1. Coincidió con las máximas elevaciones alcanzadas para montajes con concentraciones de TOC = 3.8020% y 3.8807%.

Figura 33. Estadio 2: Formación de estrías. Vista de planta 20 cm × 20 cm.



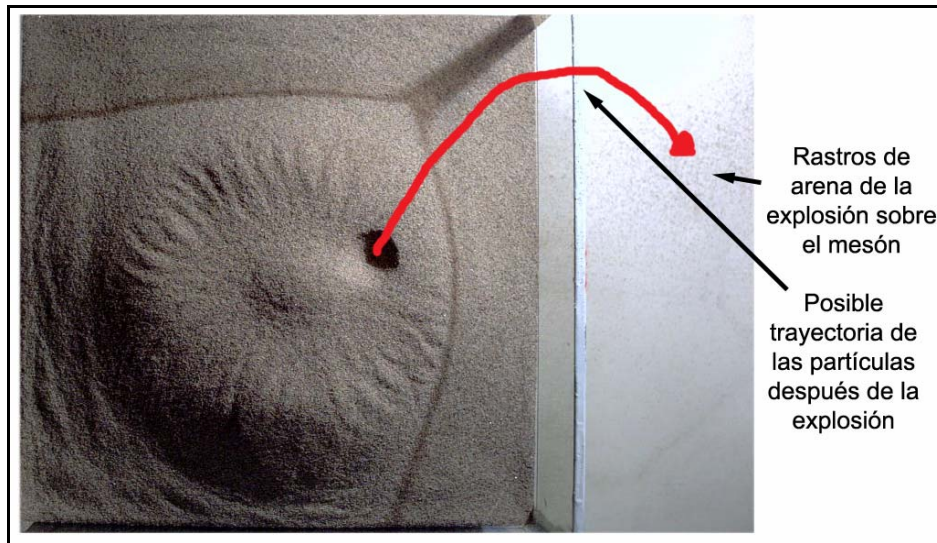
-Estadio 3: Formación del Domillo Central. En este Estadio se presenta un domillo central que sobresale 3 a 4 mm sobre el domo más amplio. Coincide con la máxima altura alcanzada en los montajes con mayores concentraciones de TOC (3.9592%, 4.0373% y 4.3553%).

Figura 34. Estadio 3: Formación de Domillo Central. Vista de planta 20 cm × 20cm



-Estadio 4: Explosión del domo. En este estadio, el cual dura sólo unos pocos segundos, el diapiro emana gases evidenciados en un fétido olor (en montajes con TOC iguales o superiores a 3.8020%), arrojando súbitamente, en algunas ocasiones, material de su superficie. Esto se evidenció en montajes con TOC iguales o superiores a 3.9592% donde la explosión dejó rastros de arena en la mesa donde se llevaron a cabo los montajes. En algunos casos se presentó un descenso abrupto de la estructura.

Figura 35. Estadio 4: Explosión del domo. Vista de planta 20 cm × 20 cm



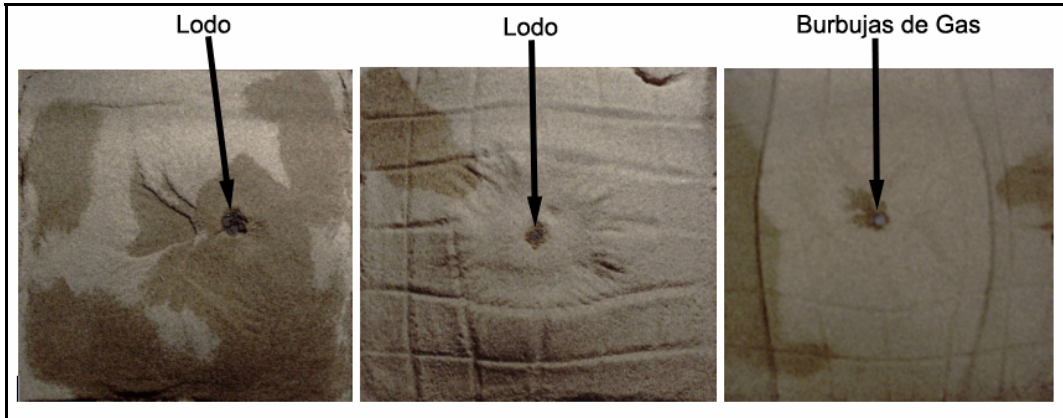
-Estadio 5: Formación de Cráter. Este Estadio se caracteriza por la formación de un cráter en la cima del domo, cercano a su zona central (en montajes con TOC = 3.8020%, 3.8807%, 3.9592%, 4.0373% y 4.3553%). La formación de dicho cráter podía presentarse simultánea o inmediatamente después de la explosión.

Figura 36. Estadio 5: Formación de Cráter. Vista de planta 20 cm × 20 cm



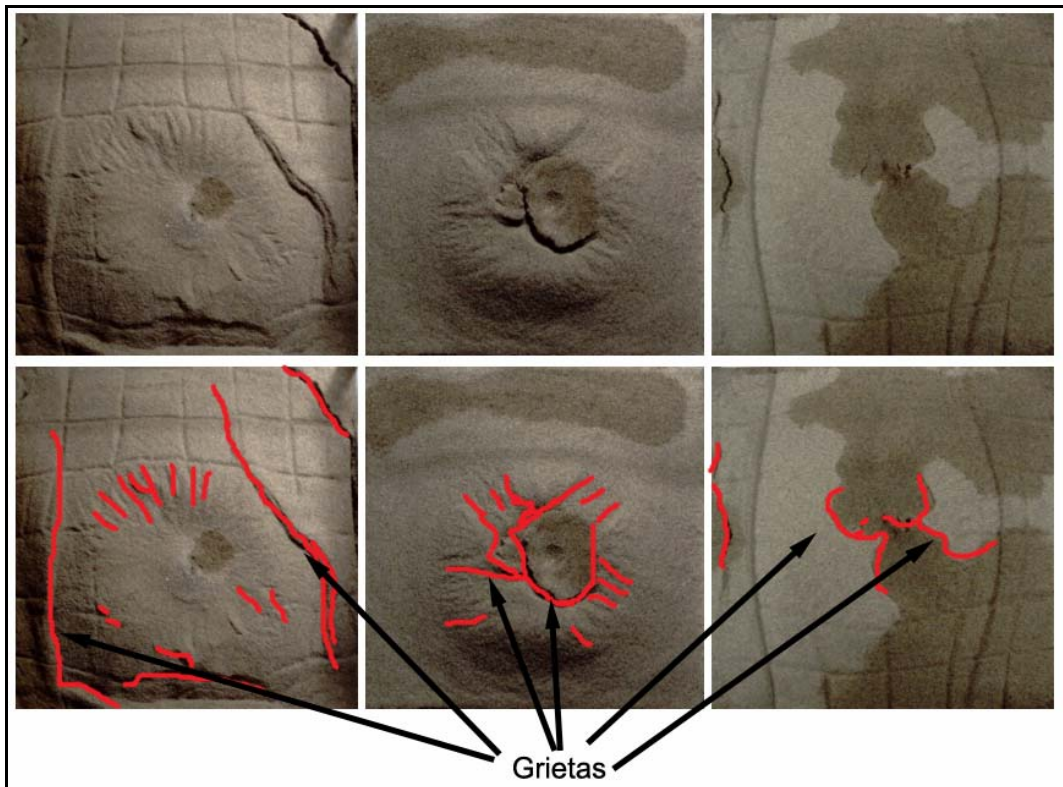
-Estadio 6: Colapso de la estructura. En este Estadio la altura del domo disminuía aproximadamente entre un 15% y un 30% de su máxima elevación. Si había cráteres presentes, el colapso iba acompañado de emanación de lodo o fluidos por el cráter.

Figura 37. Estadio 6: Colapso de la estructura Vista de planta 20 cm × 20cm.



-Estadio 7: Hundimiento Final. En este Estadio final, luego del colapso, los montajes con contenidos de TOC altos (3.9592%, 4.0373% y 4.3553%) mostraban una superficie dramáticamente deformada presentando grandes grietas cerca de las caras de la caja.

Figura 38. Estadio 7: Hundimiento Final, ejemplos. Cada vista de planta: 20cm × 20 cm.



Se debe aclarar que no todos los 7 estadios se presentaron en todos los montajes realizados con las 9 concentraciones diferentes de TOC. Montajes con bajas concentraciones de TOC = 1.6500%, 2.0440%, 2.5200% y 2.9650% experimentaron los Estadios 0, 1, 6 y 7. Todos los Estadios, a excepción del Estadio 3 se presentaron en montajes con TOC = 3.8020% y 3.8807% y montajes con altas concentraciones de TOC = 3.9592%, 4.0373% y 4.3553% experimentaron todos los 7 Estadios.

Aun en experimentos controlados tales como los modelos análogos de este estudio, hay factores que pueden introducir algún error en los resultados. Entre las fuentes de error consideradas se pueden mencionar, por ejemplo, la viscosidad de los lodos que no pudo controlarse para que se mantuviera constante. Esta puede ser la razón por la cual en algunos montajes ascendió lodo y en otros no. Además no se ha determinado cómo pueden afectar el resultado final las diferencias en el espesor de las capas de gelatina o arena.

Estos 7 Estadios de evolución propuestos permiten identificar características generales que pueden extrapolarse a las zonas afectadas por el fenómeno. De este modo, llevando a cabo estudios geomorfológicos y fotogeológicos sería posible definir el estado de evolución en el cual se encuentra el diapirismo en una zona determinada. Por ejemplo los estadios 2 y 3 ofrecen patrones de estrías radiales que pueden ser relacionadas en la naturaleza con patrones de drenaje del mismo tipo y cuya posibilidad de interpretación son estadios de evolución de diapirismo y vulcanismo de lodo. Los estadios 4 y 5, corresponderían a zonas donde el diapirismo se expresa como vulcanismo de lodo debido a la presencia de cráteres y emanación de gases y lodo. En áreas donde se identifiquen volcanes que hayan alcanzado los estadios 5, 6 y 7, y no estén afectadas por otros procesos de deformación, muy posiblemente se presenten procesos de inestabilidad del terreno y una atmósfera influenciada por los gases emanados desde volcanes de lodo aledaños.

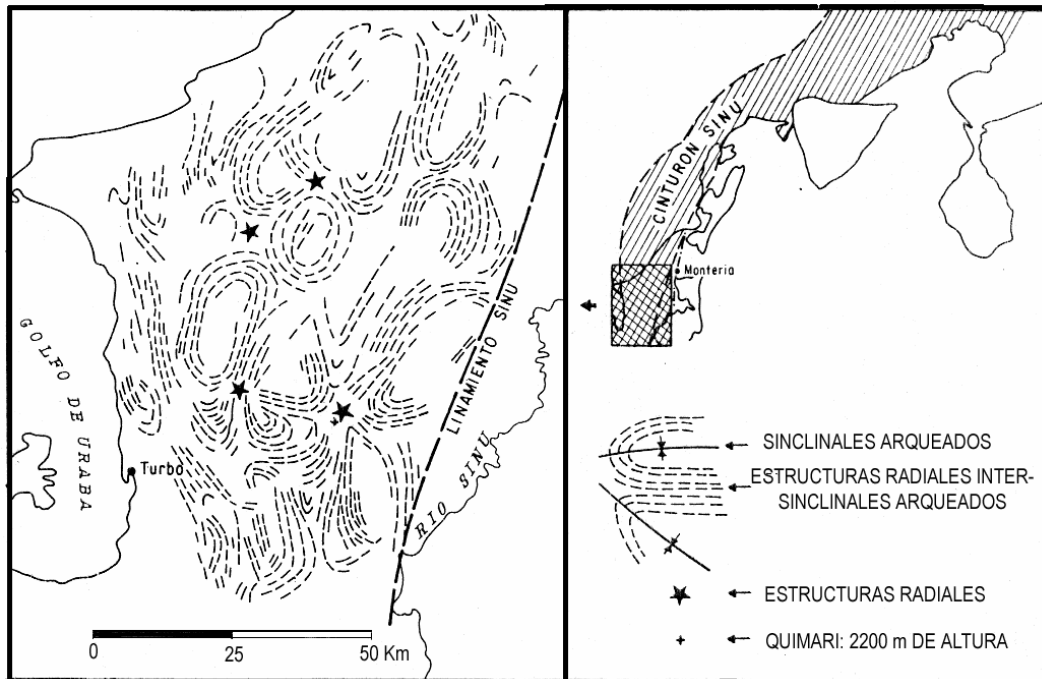
4.5. APLICACIÓN AL CARIBE COLOMBIANO

Estudios llevados a cabo por Duque-Caro (1979, 1984) acerca del Cinturón del Sinú (ubicado en el margen occidental Colombiano adyacente al litoral Caribe) describen diferentes características morfológicas que muestran similitudes con los modelos desarrollados en laboratorio en este estudio.

Según Duque-Caro (1984), el Cinturón del Sinú, de rumbo N25°E, se compone de dos tipos de geoformas: Volcanes de lodo, que emergen aislados siguiendo el rumbo general del cinturón; y colinas grandes y cónicas de estratos deformados que caracterizan los anticlinorios de Abibe-Las Palomas y de Turbaco.

El Anticlinorio de Abibe-Las Palomas se encuentra hacia el sur, donde las colinas grandes y cónicas de estratos deformados tienden a aumentar en altura. La zona axial del anticlinorio de Abibe-Las Palomas exhibe la máxima deformación del cinturón del Sinú, con buzamientos promedios de 45° a 10°. Aquí se hallan dos lomas distintivas en el área del Alto de Quimari que emergen como las más altas y prominentes de la región (2.200 m). Las colinas del Anticlinorio de Abibe-Las Palomas conforman estructuras anticlinales estrechas, pendientes y alargadas que siempre coinciden con las formas topográficas más altas, donde aparecen circundadas por cuatro o más sinclinales amplios y arqueados ("rimmed synclines"). Drenaje radial, divergente de los centros de las estructuras, ha sido claramente documentado por Duque-Caro (1984) en el Alto de Quimari (Antioquia), y por González y Londoño (2003) en los alrededores de Arjona y Cartagena (Bolívar) (Figura 39).

Figura 39. Estilo estructural del Cinturón del Sinú con base en información fotogeológica y de radar (Tomado de Duque-Caro, 1984)



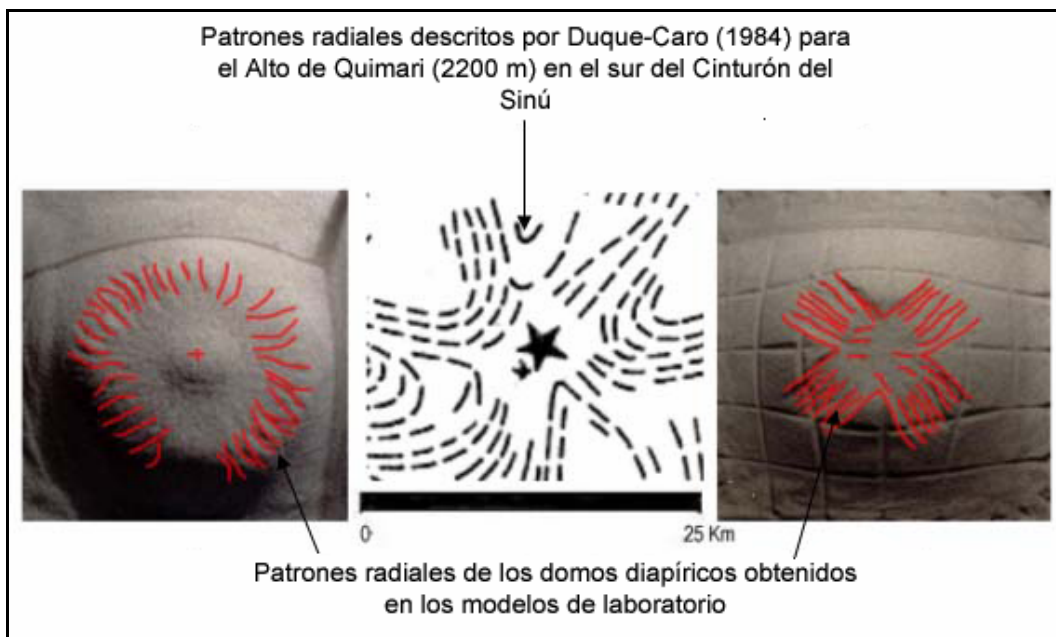
El Anticlinorio de Turbaco se encuentra hacia el norte separado por mar de la zona dominada por el Anticlinorio de Abibe-Las Palomas. Los núcleos de los anticlinales del Anticlinorio de Turbaco tienen estratos menos deformados que los del Anticlinorio de Abibe-Las Palomas, con buzamientos promedios menores a 10° (Duque-Caro, 1984).

Es posible relacionar las inferencias a las cuales se han llegado por medio de los modelos físicos realizados en este trabajo, con rasgos descritos para dos regiones. Así, se establecen las siguientes observaciones:

Los rasgos geomorfológicos descritos por Duque-Caro (1984) para el Anticlinorio de Abibe-Las Palomas coinciden con rasgos observados en los Estadios evolutivos 2 y 3 de los domos diapíricos formados en el laboratorio (Figuras 33). En estos estadios se observan patrones radiales divergentes de la cima de los domos. Estos patrones pueden relacionarse con los modelos de drenaje radiales observados por Duque-Caro (1984) (Figura 39). Por lo tanto, se propone que esta zona está alcanzado su

máximo punto de elevación. Teniendo en cuenta las relaciones altura máxima-TOC y TOC-Estadio de evolución, comprobadas en este estudio y discutidas anteriormente, las altas elevaciones de Abibe-Las Palomas podrían entonces coincidir con depocentros en profundidad de altos contenidos de materia orgánica.

Figura 40. Comparación de patrones observados en los experimentos con los descritos por Hermann Duque-Caro en 1984 para el Cinturón del Sinú en el Caribe Colombiano. A los lados: Modelos de laboratorio (Vista de planta 20 cm × 20 cm). En el centro: Esquema del alto de Quimari (Detalle de la figura 39).



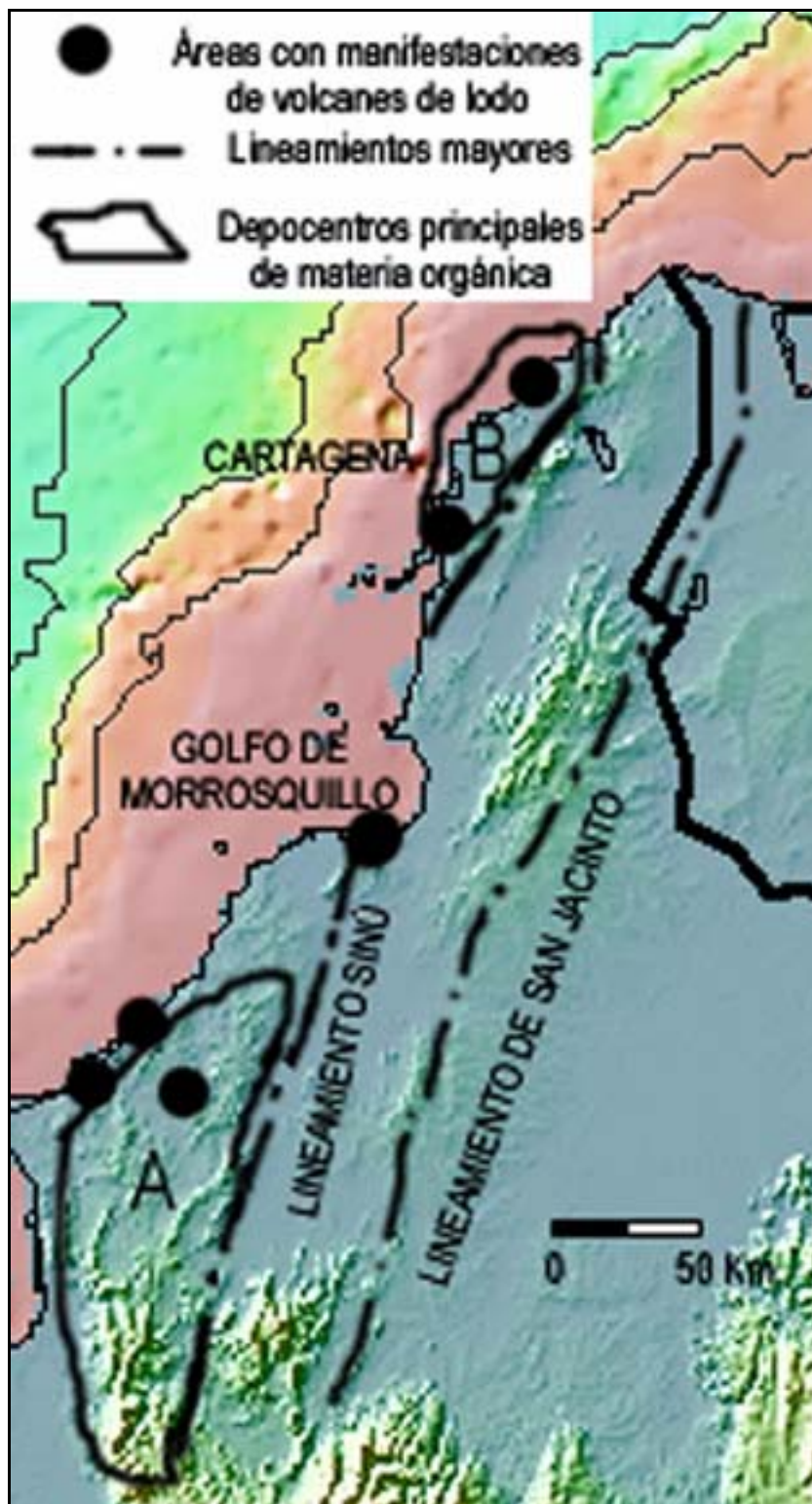
En el Cinturón del Sinú se han podido definir dos regiones con diferencias claras en alturas: La región sur, de mayores alturas que corresponde al Anticlinorio de Abibe-Las Palomas; y la región norte, más estrecha y menos elevada que la primera, correspondiente al Anticlinorio de Turbaco. En ambas se observa la aparición aislada de volcanes de lodo. Se debe tener en cuenta que por medio de los modelos se ha determinado que existe una relación entre las alturas de los domos diapíricos y el porcentaje de TOC del lodo que las origina. Por lo tanto, se considera que la región Anticlinorio de Abibe-Las Palomas podría corresponder a zonas donde los depocentros de lodo en profundidad contienen mayores

contenidos de materia orgánica que los depocentros correspondientes a las estructuras del Anticlinorio de Turbaco.

Comparaciones como la descrita en el párrafo anterior, permiten trazar límites tentativos de provincias geológicas en el subsuelo a partir de observaciones de su morfología y topografía. Así, se han trazado en mapas los posibles depocentros de mayores contenidos de materia orgánica en profundidad (A) diferenciándolos de los menores (B) (Figura 41). Este mapa se presenta como una herramienta la cual, aunque requiere validación de campo, permite predecir la localización de depocentros principales de materia orgánica enterrada.

Estas inferencias se apoyan además en el hecho de que el diapirismo de lodo del Cinturón del Sinú, en el margen Caribe Colombiano, es considerado de carácter orogénico (Duque-Caro, 1984). Es decir, el diapirismo de lodo es posiblemente el factor de deformación más importante en esta zona, y prima sobre posibles esfuerzos tectónicos laterales considerados como un factor menor en su deformación interna (Duque-Caro, 1984).

Figura 41. Depocentros de mayores contenidos de materia orgánica en el pasado geológico en el Cinturón del Sinú, Litoral Caribe Colombiano. Se muestran encerradas la zona A y la zona B. Debido a la gran altitud de los de la zona A, se considera que posiblemente los contenidos de materia orgánica de los depocentros de lodo en profundidad de A, son mayores que los de B.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. El modelamiento análogo físico de diapiros de lodo demuestra que los contenidos de materia orgánica de los lodos que originan estructuras diapíricas tienen efectos directos en la evolución de las estructuras que generan, tanto en la altura máxima que alcanzan, como en el tiempo que tardan en alcanzar dicha altura.
2. Los gases generados por la descomposición de la materia orgánica contenida en los lodos, juegan un papel determinante en la formación de las estructuras diapíricas. Es decir, sirven como mecanismo propulsor del sistema, originando los domos diapíricos a través de los cuales puede ascender lodo y en algunos casos llevar material lodoso hasta la superficie.
3. Las alturas máximas alcanzadas por los domos diapíricos obtenidos en los experimentos son directamente proporcionales al valor de concentración de TOC del lodo experimental.
4. El tiempo requerido por cada uno de los montajes para alcanzar la altura máxima del domo diapírico experimental es inversamente proporcional al valor de concentración de TOC del lodo experimental.
5. Los domos diapíricos presentan unos estadios de evolución claramente discernibles. Esta evolución se puede resumir en siete estadios, partiendo desde su levantamiento hasta su colapso: Estadio 1, Abombamiento Inicial; Estadio 2, Formación estrías o patrones radiales que divergen del centro del domo; Estadio 3, Formación del Domillo Central.; Estadio 4, Explosión del domo; Estadio 5, Formación de Cráter.; Estadio 6, Colapso de la estructura; Estadio 7, Hundimiento Final. Solo los montajes con mayores contenidos de TOC experimentan los 7 Estadios, pero a su vez pasan a través de ellos más rápido y por ende tienen un menor tiempo de vida.
6. Existen similitudes geomorfológicas entre las estructuras obtenidas en los experimentos y las descritas en el litoral Caribe por Duque-Caro

(1984) donde se muestran, por ejemplo, estructuras radiales divergentes de los centro de las estructuras más elevadas.

7. De acuerdo con las diferencias geomorfológicas y estructurales dentro del Cinturón del Sinú, se han definido dos zonas: una al sur (zona A), correspondiente al Anticlinorio de Abibe-Las Palomas, de mayores elevaciones y deformaciones que las de la zona norte (zona B), correspondiente al Anticlinorio de Turbaco con menores elevaciones y menor deformación que la del sur. De este modo se infiere que los depocentros de materia orgánica relacionados con el diapirismo de lodo, levantamiento y deformación, tienen mayores concentraciones de materia orgánica en la zona sur que en la zona norte.

5.2 RECOMENDACIONES.

Como ya se ha mencionado, el estudio realizado relaciona el contenido total de materia orgánica (TOC) del lodo diapírico experimental con la altura máxima que alcanzan los domos diapíricos, el tiempo que toman para levantarse y los estadios evolutivos por los que puede pasar un domo diapírico en su ascenso y colapso (evolución). Estos aspectos están directamente ligados a los gases que se generan en la descomposición de la materia orgánica presente en el lodo, que al ser retenidos por una capa impermeable sobre el tope de la capa de lodo, sirven como mecanismo propulsor del sistema originando los domos diapíricos. Es conveniente que las medidas de TOC, para experimentos de este tipo, sean llevadas a cabo en el menor tiempo posible después del inicio del montaje. Esto, con el fin de que los resultados las medidas de TOC no sean subestimadas. Análisis de cromatografía, de isótopos de gases y microbiológicos de los lodos experimentales pueden cuantificar la dinámica del proceso que ha generado los gases y el tipo de gas asociado.

No se descarta el papel de otros mecanismos y variables que influyan en la génesis y evolución del diapirismo de lodo. Estudios que implementen un método para caracterizar el papel de gradientes de temperatura en la generación y evolución de los diapiros de lodo pueden ofrecer resultados que comprueben o refuten los presentados en este estudio. Igualmente, es necesario llevar a cabo modelos físicos que describan el papel de los esfuerzos compresivos en este proceso. Un estudio preliminar a este respecto fue referenciado por Duerto & McClay (2003).

Para llevar a cabo experimentos que caractericen el papel de cada una de las variables mencionadas, se recomienda tener en cuenta normas básicas del diseño experimental y del modelamiento análogo físico, como son la definición de una hipótesis de partida clara, y la determinación de procedimientos, condiciones y materiales experimentales apropiados. Debido a que no se pueden hacer inferencias con base en solo un experimento, es necesario determinar desde un principio un número de réplicas que lleven a resultados significativos.

Es conveniente el uso de sistemas de medidas que brinden precisión y exactitud. En el modelamiento análogo físico es útil el uso de sistemas ópticos de reconstrucción tridimensional, con los cuales se puede obtener un registro temporal de la topografía en tres dimensiones de los modelos desarrollados (Romero, 2005). Además, estos sistemas permiten extraer parámetros como volumen, alturas y áreas por medio de procedimientos matemáticos, con márgenes de error inclusive de micras.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

(O'Brien, 1968) O'Brien, G. D. "Survey of Diapirs and Diapirism", Diapirism and Diapirs a Symposium, American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Memoir 8, 1-9, 1968.

(Higgins & Saunders, 1974) Higgins, G.E. ; Saunders, J.B. "Mud Volcanoes - Their Nature and Origin: Contributions to Geology and Palaeobiology of Caribbean and Adjacent Areas", Verh. Naturforsch. Ges. Basel, 84, 1974.

(Robertson & Kopft, 1998) Robertson, A. ; Kopft A. "Tectonic Setting and Processes of Mud Volcanism on the Mediterranean, Ridge Accretionary Complex: Evidence from Leg 160" Proceedings of Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 160, 1998.

(Jahubov et al., 1971) Jahubov, A.A.; Ali-zade, A.A.; Zeinalov, M.M. "Mud Volcanoes of the Azerbaijan SSR: Baku". Publ. House Acad. Sci. Azerbaijan SSR, 1971.

(Shiple et al., 1990) Shipley, T.H.; Stoffa, P.L.; Dean, D.F. "Underthrust Sediments, Fluid Migration Paths, And Mud Volcanoes Associated With The Accretionary Wedge Off Costa Rica: Middle America Trench" Journal of Geophysical Research, Vol. 95, 8743-8752, 1990.

(Duque-Caro, 1984) Duque-Caro, H. "Estilo Estructural, diapirismo y Episodios de Acrecimiento del Terreno Sinú - San Jacinto en el Noroccidente de Colombia" Informe No. 1928. Boletín Geológico INGEOMINAS, Vol. 27-No 2, 1-29, 1984.

(Ojeda et al., 2004) OJEDA, G.Y.; HERNANDEZ, R.; OLAYA, I.D. "Mud Volcanoes On The Seafloor Of The Colombian Caribbean Sea:

Undesirable Lumps Or Exploration Tools?”. Boletín Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, 2004.

(Hedberg, 1974) Hedberg, H.D. “Relation of Methane Generation to Undercompacted Shales, Shale Diapirs and Mud Volcanoes”. The American Association of Petroleum Geologist Bulletin V. 58, No 4, 661-673, 1974.

(Beauchamp, 2002) Beauchamp, B. “Natural Gas Hydrates: Myths, Facts and Issues”. Comptes Rendus Geoscience 336, 751–765, 2002.

(Kopft, 2003) Kopf, A. J. “Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the Earths climate” Springer-Verlag,2003.

(Milkov, 2000) Milkov, A.V. “Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates” Marine Geology 167, 29–42, 2000.

(Morgan et al., 1965) Morgan, J.P.; Coleman, J.M.; Gagliano, S.M. “Mudlumps: Diapiris Strucutres in Mississippi Delta Sediments”. Diapirism and Diapirs a Symposium, American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Memoir 8, 145-161, 1965.

(Vernette, 1985) Vernet, G. «La Plate-forme Continentale Caraibe de Colombie (du Debeuche du Magdalena au Golfe de Morrosquillo). Importance du Diapirism Argileux sur la Morphologie et la Sedimentation » Decteur es Sciences Thesis, Universite de Bourdeaux 1, Bordeaux, 387, 1985.

(Schellart, 2003) Schellart, W. P. "Analogue Modelling of Geological Structures". Epsilon Laboratory, 2003.

(Michon & Merle, 2003) Michon, L. ; Merle O. "Mode of lithospheric extension: conceptual models from analogue modeling" *Tectonics*, Vol. 22, No 4, 1028, 2003.

(Brown, 1990) Brown, K "The Nature and Hydrogeologic Significance of Mud Diapirs and Diatremes for Accretionary Systems" *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, NO B6, 8969-8982, 1990.

(Langseth et al., 1988) Langseth, M.G. ; Westbrook G.K. ; Hobart M.A. "Geophysical Survey of A Mud Volcano Seaward of The Barbados Ridge Accretionary Complex" *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, 1049-1061, 1988.

(Langseth & Moore, 1990) Langseth, M.G. & Moore, J.C. "Introduction to special section on the role of fluids in sediment accretion, deformation, diagenesis, and metamorphism in subduction zones" *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, 8737-8741, 1990.

(Godon et al., 2004) Godon, A. ; Jendrzewski, N. ; Castrec-Rouelle, M. ; Dia, A. ; Pineau, F. ; Boulegue, J. ; Javoy, M. "Origin and Evolution of Fluids from Mud Volcanoes in the Barbados Accretionary Complex" *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 68, No. 9, 2153-2165, 2004.

(Sample, 1990) Sample, J. C. "The Effects Of Carbonate Cementation Of Underthrust Sediments On Deformation Styles During Underplating". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, 9111-9121, 1990.

(Reed et al., 1990) Reed, D.L. ; Silver, E.A. ; Tagudin, J.E. ; Shipley, T.H. ; Vrolik, P. "Relations Between Mud Volcanoes, Thrust Deformation, Slope

Sedimentation And Gas Hydrates, Offshore North Panama” Marine Petroleum Geology, Vol. 7, 44-54, 1990.

(Morgan & Karig, 1995) Morgan, J.K.; Karig, D.E. “Décollement Processes At The Nankai Accretionary Margin, Southeast Japan” Journal of Geophysical Research, Vol. 100/B8, 15221-15231, 1995.

(Cita et al., 1996) Cita, M.B. ; Erba, E. ; Lucchi, R. ; Pott, M. ; Van Der Meer, R. ; Nieto, L. “Stratigraphy and Sedimentation in The Mediterranean Ridge Diapiric Belt” Marine Geology, Vol. 132, 131-150, 1996.

(Barber et al., 1986) Barber, A.J. ; Tjokrosapoetro, S. ; Charlton, T.R. “Mud volcanoes, shale diapirs, wrench faults, and melanges in accretionary complexes, Eastern Indonesia” Association of Petroleum Geologist Bulletin, Vol.5870, 1729-1741, 1986.

(Agar, 1990) Agar, S.M. “The interaction of fluid processes and progressive deformation during shallow level accretion: examples from the Shimanto Belt of SW Japan” Journal of Geophysical Research, Vol. 95, 9133-9148, 1990.

(Shih, 1967) Shih, T. “A Survey of Active Mud Volcanoes in Taiwan and a Study of Their Types and The Character of The Mud” Petroleum Geology Taiwan, Vol. 5, 259-311, 1967.

(Duerto & McClay, 2003) Duerto, I. ; McClay, K. “Shale Diapirs in an Oblique Contractual Range: Eastern Venezuelan Basin” American Association of Petroleum Geologist Bulletin Annual Convention, 2003.

(Beeby-Thomson, 1910) Beeby-Thomson, A. “The Oilfields Of Trinidad” West Indian Committee, Pamphlet 12., 1910.

(Limonov et al., 1994) Limonov, A.F. ; Woodside, J.M. ; Ivanov, M.K. "Mud Volcanism In The Mediterranean and Black Seas and Shallow Structure of The Eratosthenes Seamount. Initial Results of the Geological and Geophysical Investigations during The Third "Training-Through-Research" Cruise of The R/V Gelendzhik" UNESCO Rep. Mar. Sci., 64, 1994.

(Comas et al., 2003) Comas, M. C. ; Soto, J. I. ; Talukder. A. R. (2003). Mud Volcanoes in the Alboran Sea: Learning from Occurrences in the Western Mediterranean. Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 12617, 2003.

(Connor, 1990) Connor, CH. B. "Cinder Cone Clustering in the TransMexican Volcanic Belt: Implications for Structural and Petrological Models", Journal of Geophysical Research, Vol. 95, No B12, 19395-19405, 1990.

(Murton & Biggs, 2001) Murton, B. ; Biggs, J. "Numerical Modeling Of Mud Volcanoes and Their Flows using Constraints From The Gulf Of Cadiz" marine Geology, 2001.

(Yassir et al., 1994) Yassir, N.A. ; BELL, J.S. "Relationships Between Pore Pressures, Stresses and Present-Day Geodynamics In The Scotian Shelf, Offshore Eastern Canada". American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Vol. 78, 1863-1880, 1994.

(Ben-Avraham et al., 2002) Ben-Avraham, Z. , Smith, G. ; Reshef, M. ; Jungslager, E. "Gas hydrate and mud volcanoes on the southwest African continental margin off South Africa" Geology; v. 30; no. 10, 927-930, 2002.

(Lowrie et al., 2002) Lowrie, A.; Lutken, C. , Geresi, E.; Bennett, R. H. ; Faas, R. "Natural Gas Hydrates: Permanent Earth Constituents Impacting

Sediment Strength and Continental Margin Evolution” CSEG Recorder, 2002.

(Planke et al., 2003) Planke, H. , Svensen, M. , Hovland, D. , Banks, B. “Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan” Springer – Verlag, 2003.

(Duque-Caro, 1979) Duque-Caro, H. “Geotectónica y Evolución de la Región Noroccidental Colombiana” Informe No. 1750. Boletín Geológico INGEOMINAS, 1979.

(Vernette, 1986) Vernette, G “Le Diapirisme argileux et ses consequences sur les caracteres morphologiques et sedimentaires de la Marge Colombienne des Caraibes” Bull. Inst : Géol. Bassin d’Aquitaine, Bordeaux, No 40, 35-51, 1986.

(Vernette, 1989) Vernette, G. “Impact du Diapirisme Argileux sur les recifes de la Plate-Forme Colombienne des Caraibes” Bull. Inst : Géol. Bassin d’Aquitaine, Bordeaux, No 45, 97-105, 1989.

(González & Londoño, 2001) González, H. ; Londoño, A. “Mapa geológico del departamento de Córdoba. Geología, Recursos Minerales y Amenazas Naturales. Escala 1:250.000” INGEOMINAS, 2001.

(Reyes, 2001) Reyes, G. A. ; Guzmán, G. ; Barbosa, G. ; Zapata, G. “Memoria Explicativa Geología De Las Planchas 23 Cartagena Y 29 - 30 Arjona Escala 1:100.000” INGEOMINAS, 2001.

(Vernette, 2003) Vernette, G. “El Diapirismo De Lodo En El Margen Colombiano Del Caribe” Seminario Taller Internacional de Geología Marina y Costera. INVEMAR, 2003.

(Logan & Longmore, 2004) Logan, G. ; Longmore, A. "Sediment, Organic Matter and Nutrients" and Freshwater Research Institute, Queenscliff, 2004.

(Bonini, 2003) Bonini, M. "Detachment folding, fold amplification, and diapirismo in thrust wedge experiments" Tectonics, Vol. 22, No. 6, 1 – 21, 2003.

(Cochran, 1950) Cochran, W. "Experimental Desings" John Wiley & Sons, 1950.

(Spiegel, 1998) Spiegel, "Estadística" Mc Graw Hill. Segunda Estación, 1998.

BIBLIOGRAFIA

LIBROS

(Cochran, 1950) Cochran, W. "Experimental Designs" John Wiley & Sons, 1950.

O'Brien, G. D. ; Braunstein, J. Diapirism and Diapirs a Symposium, American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Memoir 8, 145-161, 1965.

(Spiegel, 1998) Spiegel, "Estadística" Mc Graw Hill. Segunda Edición, 1998.

(Vernette, 1985) Vernette, G. « La Plate-forme Continentale Caraibe de Colombie (du Debeuche du Magdalena au Golfe de Morrosquillo). Importance du Diapirism Argileux sur la Morphologie et la Sédimentation » Docteur es Sciences Thesis, Université de Bordeaux 1, Bordeaux, 387, 1985.

ARTÍCULOS

(Agar, 1990) Agar, S.M. "The interaction of fluid processes and progressive deformation during shallow level accretion: examples from the Shimanto Belt of SW Japan" Journal of Geophysical Research, Vol. 95, 9133-9148, 1990.

(Barber et al., 1986) Barber, A.J. ; Tjokrosoepetro, S. ; Charlton, T.R. "Mud volcanoes, shale diapirs, wrench faults, and melanges in accretionary complexes, Eastern Indonesia" Association of Petroleum Geologist Bulletin, Vol.5870, 1729-1741, 1986. Disponible en: [-http://www3.rsnz.govt.nz/publish/nzjgg/1997/15.pdf](http://www3.rsnz.govt.nz/publish/nzjgg/1997/15.pdf).

(Beauchamp, 2002) Beauchamp, B. "Natural Gas Hydrates: Myths, Facts and Issues" *Comptes Rendus Geoscience* 336, 751–765, 2002.

(Beeby-Thomson, 1910) Beeby-Thomson, A. "The Oilfields Of Trinidad" West Indian Committee, Pamphlet 12, 1910.

(Ben-Avraham et al., 2002) Ben-Avraham, Z. ; Smith, G. ; Reshef, M. ; Jungslager, E. "Gas hydrate and mud volcanoes on the southwest African continental margin off South Africa" *Geology*; v. 30; no. 10, 927-930, 2002.

(Bonini, 2003) Bonini, M. "Detachment folding, fold amplification, and diapirismo in thrust wedge experiments" *Tectonics*, Vol. 22, No. 6, 1 – 21, 2003.

(Brown,1990) Brown, K "The Nature and Hydrogeologic Significance of Mud Diapirs and Diatremes for Accretionary Systems". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, NO B6, 8969-8982, 1990.

(Brown & Westbrook, 1987) Brown, K.M. ; Westbrook, G.K. "The Tectonic Fabric Of The Barbados Ridge Accretionary Complex". *Marine Petroleum Geology*, Vol. 4, 71-81, 1987.

Calvez, L.; Joël H. ; Vendeville, B. "Physical Modeling of Normal Faults and Graben Relays above Salt: a Qualitative and Quantitative Analysis" *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, Volume 52, 2002

(Cita et al., 1996) Cita, M.B. ; Erba, E. ; Lucchi, R. ; Pott, M. ; Van Der Meer, R. ; Nieto, L. "Stratigraphy and Sedimentation in The Mediterranean Ridge Diapiric Belt" *Marine Geology*, Vol. 132, 131~150, 1996.

(Connor, 1990) Connor, CH. B. "Cinder Cone Clustering in the TransMexican Volcanic Belt: Implications for Structural and Petrological Models", Journal of Geophysical Research, Vol. 95, No B12, 19395-19405, 1990.

Curtis, A. "Field Trip Guide to (A) The Upper Cruse Formation at Anglais Point, Palo Seco (B) The Palo Seco and Anglais Point Mud Volcanoes, The geological society of Trinidad and Tobago, 2002.

Dietl, C. ; Koyi, H. A. "Emplacement of nested diapirs: Results of centrifuge modeling" Analogue modelling of large-scale tectonic processes. Journal of the Virtual Explorer, 6, 81-88, 2002.

(Duerto & McClay, 2003) Duerto, I. ; McClay, K. "Shale Diapirs in an Oblique Contractional Range: Eastern Venezuelan Basin" American Association of Petroleum Geologist Bulletin Annual Convention, 2003.

(Duque-Caro, 1979) Duque-Caro, H. "Geotectónica y Evolución de la Región Noroccidental Colombiana" Informe No. 1750. Boletín Geológico INGEOMINAS, 1979.

(Duque-Caro, 1984) Duque-Caro, H. "Estilo Estructural, diapirismo y Episodios de Acrecimiento del Terreno Sinú - San Jacinto en el Noroccidente de Colombia" Informe No. 1928. Boletín Geológico INGEOMINAS, Vol. 27-No 2, 1-29, 1984.

Grevemeyera, I. ; Kopfb, A. J. ; Feketec, N. ; Kaulb, N. ; Villingerb, H. W. ; Heesemannb, M. ; Wallmanna, K. ; Spießb, V. ; Gennerichb, H. ; Müllerb, M. ; Weinrebea, M. "Fluid flow through active mud dome Mound Culebra offshore

Disponible en:

www.palmod.unibremen.de/FB5/Sensorik/publikationen/2004MarGeol207_145_MoundC.pdf

(Godon et al., 2004) Godon, A. ; Jendrzewski, N. ; Castrec-Rouelle, M. ; Dia, A. ; Pineau, F. ; Boulegue, J. ; Javoy, M. "Origin and Evolution of Fluids from Mud Volcanoes in the Barbados Accretionary Complex" *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 68, No. 9, 2153-2165, 2004.

(González & Londoño, 2001) González, H. ; Londoño, A. "Mapa geológico del departamento de Córdoba. Geología, Recursos Minerales y Amenazas Naturales. Escala 1:250.000" INGEOMINAS, 2001.

(Hedberg, 1974) Hedberg, H.D. "Relation of Methane Generation to Undercompacted Shales, Shale Diapirs and Mud Volcanoes" *The American Association of Petroleum Geologist Bulletin* V. 58, No 4, 661-673, 1974.

(Higgins & Saunders, 1974) Higgins, G.E. ; Saunders, J.B. "Mud Volcanoes - Their Nature and Origin: Contributions to Geology and Palaeobiology of Caribbean and Adjacent Areas", *Verh. Naturforsch. Ges. Basel*, 84, 1974.

Javadov, M. A. "About Interaction Of Mud Volcanism, Seismicity And Oil-Gas-Content Of The Interior Of The Earth (Following The Example Of The South Caspian Depression)" *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, 14317, 2003.

(Kopft, 2003) Kopf, A. J. "Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the Earth's climate" Springer-Verlag, 2003.

(Langseth et al., 1988) Langseth, M.G. ; Westbrook G.K. ; Hobart M.A. "Geophysical Survey of a Mud Volcano Seaward of The Barbados Ridge Accretionary Complex" Journal of Geophysical Research, Vol. 93, 1049-1061, 1988.

(Langseth & Moore, 1990) Langseth, M.G. & Moore, J.C. "Introduction to special section on the role of fluids in sediment accretion, deformation, diagenesis, and metamorphism in subduction zones" Journal of Geophysical Research, Vol. 95, 8737-8741, 1990.

(Limonov et al., 1994) Limonov, A.F. ; Woodside, J.M. ; Ivanov, M.K. "Mud Volcanism In The Mediterranean and Black Seas and Shallow Structure of The Eratosthenes Seamount. Initial Results of the Geological and Geophysical Investigations during The Third "Training-Through-Research" Cruise of The R/V Gelendzhik" UNESCO Rep. Mar. Sci., 64, 1994.

(Logan & Longmore, 2004) Logan, G.; Longmore, A. "Sediment, Organic Matter and Nutrients" and Freshwater Research Institute, Queenscliff, 2004. Disponible en: http://www.ozestuaries.org/indicators/In_sediment_nutrients_f.html

(Lowrie et al., 2002) Lowrie, A. ; Lutken, C. , Geresi, E. ; Bennett, R. H. ; Faas, R. "Natural Gas Hydrates: Permanent Earth Constituents Impacting Sediment Strength and Continental Margin Evolution" CSEG Recorder, 2002.

Matyka, R. J. ; Hawkins, D.B. ; Jeffries, A. ; Poreda, J. "Geochemistry, Isotopic Composition, and the Origin of Fluids Emanating From Mud Volcanoes In The Copper River Basin, Alaska" Alaska Division of Geological and Geophysical Surveys, File 86-34, 1986. Disponible en: <http://www.dggs.dnr.state.ak.us/scan2/pdf86/text/PDF86-34.PDF>

(Michon & Merle, 2003) Michon, L. ; Merle O. "Mode of lithospheric extension: conceptual models from analogue modeling" *Tectonics*. Vol. 22, No 4, 1028, 2003.

(Milkov, 2000) Milkov, A.V. "Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates" *Marine Geology* 167, 29–42, 2000.

(Morgan et al., 1965) Morgan, J.P. ; Coleman, J.M. ; Gagliano, S.M. "Mudlumps : Diapiric Structures in Mississippi Delta Sediments" *Diapirism and Diapirs a Symposium, American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Memoir 8*, 145-161, 1965.

(Morgan & Karig, 1995) Morgan, J.K. ; Karig, D.E. "Décollement Processes At The Nankai Accretionary Margin, Southeast Japan" *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100/B8, 15221–15231, 1995.

Mukhtarov, A. "Geothermal Energy Discharge from Mud Volcano Channel" *American Association of Petroleum Geologist Bulletin Annual Convention*, 2003. Disponible en: bulletin.gia.az/conference/78313.pdf

(Murton & Biggs, 2001) Murton, B. ; Biggs, J. "Numerical Modeling Of Mud Volcanoes and Their Flows using Constraints From The Gulf Of Cadiz" *marine Geology*, 2001.

Muruzábal, J. "Introducción al Diseño Experimental Universidad" *Rey Juan Carlos URJC-PROENBIS*, 2003.

Nieuwland, D. ; Urai, J. ; Knoop, M. "In-situ stress measurements in model experiments of tectonic faulting", 2000.

(O'Brien, 1968) O'Brien, G. D. "Survey of Diapirs and Diapirism", Diapirism and Diapirs a Symposium, American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Memoir 8, 1-9, 1968.

(Ojeda et al., 2004) OJEDA, G. Y. ; HERNANDEZ, R. ; OLAYA, I. D. "Mud Volcanoes On The Seafloor Of The Colombian Caribbean Sea: Undesirable Lumps Or Exploration Tool?". Boletín Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, 2004.

(Planke et al., 2003) Planke, H. ; Svensen, M. ; Hovland, D. ; Banks, B. "Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan" Springer – Verlag, 2003.

Rensbergen, P. ; De Batist, M. , Klerkx, J. ; Hus, R. ; Poort, J. ; Vanneste, M. ; Granin, N. ; Khlystov, O; Krinitsky, P. "Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal" Geology, Vol. 30, no. 7; 631–634, 2002.

Reyes, G. A. ; Guzmán, G. ; Barbosa, G. ; Zapata, G. "Memoria Explicativa Geología De Las Planchas 23 Cartagena Y 29 - 30 Arjona Escala 1:100.000" INGEOMINAS, 2001.

(Robertson & Kopft, 1998) Robertson, A. ;; Kopft A. "Tectonic Setting and Processes of Mud Volcanism on the Mediterranean, Ridge Accretionary Complex: Evidence from Leg 160" Proceedings of Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 160, 1998. Disponible en :

- www-odp.tamu.edu/publications/160_SR/VOLUME/CHAPTERS/CHAP_50.PDF
-<http://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/556>

(Sample, 1990) Sample, J. C. "The Effects of Carbonate Cementation of Underthrust Sediments on Deformation Styles During Underplating" *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, 9111-9121, 1990.

Sautkin, A.R. ; Comas, M. C. ; Soto, J. I. ; Talukder. A. R. "Mud volcanoes in the Alboran Sea: evidence from micropaleontological and geophysical data *Marine Geology*" *Geophysical Research Abstracts*, 2003. Disponible en:

http://www.marinegeo.uni-bremen.de/pub/pdf/PDF-Datein/2003/Sautkin_2003.pdf

Schellart, W. P. "Analogue modelling of large-scale tectonic processes: an introduction" *Analogue modelling of large-scale tectonic processes. Journal of the Virtual Explorer*, 7, 1 – 6, 2002. Disponible en:

- www.virtualexplorer.com.au/2002R/Schellart/Preface/preface.pdf

(Schellart, 2003) Schellart, W. P. "Analogue Modelling of Geological Structures" *Epsilon Laboratory*, 2003. Disponible en: <http://www.mcc.monash.edu/twiki/view/Epsilon/LabGuide?skin=print>.

(Shih, 1967) Shih, T. "A Survey of Active Mud Volcanoes in Taiwan and a Study of Their Types and The Character of The Mud" *Petroleum Geology Taiwan*, Vol. 5, 259-311, 1967.

(Shipley et al., 1990) Shipley, T.H. ; Stoffa, P.L. ; Dean, D.F. "Underthrust Sediments, Fluid Migration Paths, and Mud Volcanoes Associated With The Accretionary Wedge Off Costa Rica: Middle America Trench" *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, 8743-8752, 1990. Disponible en:

odp.pangaea.de/publications/tnotes/tn20-4/tn20-4.pdf

(Reed et al., 1990) Reed, D.L. ; Silver, E.A. ; Tagudin, J.E. ; Shipley, T.H. ; Vrolik, P. "Relations Between Mud Volcanoes, Thrust Deformation, Slope

Sedimentation And Gas Hydrates, Offshore North Panama” Marine Petroleum Geology, Vol. 7, 44-54, 1990.

(Reyes, 2001) Reyes, G. A. ; Guzmán, G. ; Barbosa, G. ; Zapata, G. “Memoria Explicativa Geología De Las Planchas 23 Cartagena Y 29 - 30 Arjona Escala 1:100.000” INGEOMINAS, 2001.

Trevelyan, J. “Statistical Analysis and Experiments in Manual Demining” School of Mechanical Engineering, University of Western Australia, 2003.

Unger, M. “Application of Salt Tectonics to the Understanding of Granite Emplacement” Geol 568 Structural Analysis of Deformed Rocks, 1998.

(Vernette, 1985) Vernette, G. « La Plate-forme Continentale Caraibe de Colombie (du Debeuche du Magdalena au Golfe de Morrosquillo). Importance du Diapirisme Argileux sur la Morphologie et la Sedimentation » Decteur es Sciences Thesis, Universite de Bourdeaux 1, Bordeaux, 387, 1985.

Walmann, T. “Experimental Geology”, 1998. Disponible en: www.uwiseismic.com

(Vernette, 1986) Vernette, G “Le Diapirisme argileux et ses consequences sur les caracteres morphologiques et sedimentaires de la Marge Colombienne des Caraibes” Bull. Inst : Géol. Bassin d’Aquitaine, Bordeaux, No 40, 35-51, 1986.

(Vernette, 1989) Vernette, G. “Impact du Diapirisme Argileux sur les recifes de la Plate-Forme Colombienne des Caraibes” Bull. Inst : Géol. Bassin d’Aquitaine, Bordeaux, No 45, 97-105, 1989.

(Vernette, 2003) Vernette, G. "El Diapirismo De Lodo En El Margen Colombiano Del Caribe" Seminario Taller Internacional de Geología Marina y Costera. INVEMAR, 2003.

(Yassir et al., 1994) Yassir, N.A. ; BELL, J.S. "Relationships Between Pore Pressures, Stresses and Present-Day Geodynamics In The Scotian Shelf, Offshore Eastern Canada". American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Vol. 78, 1863-1880, 1994.

RESUMENES

Akhmanov, G. ; Woodside, J. "Mud Volcanic Samples In The Context Of The Mediterranean Ridge Mud Diapiric Belt Proceedings of the Ocean Drilling Program" Scientific Results, Vol. 160, 597, 1998. Disponible en: http://www-odp.tamu.edu/publications/160_SR/ABSTRACT/46.HTM

(Comas et al., 2003) Comas, M. C. ; Soto, J. I. ; Talukder. A. R. (2003). Mud Volcanoes in the Alboran Sea: Learning from Occurrences in the Western Mediterranean. Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 12617, 2003.

(Jahubov et al., 1971) Jahubov, A.A. ; Ali-zade, A.A. ; Zeinalov, M.M. "Mud Volcanoes of the Azerbaijan SSR: Baku" Publ. House Acad. Sci. Azerbaijan SSR, 1971.

Løseth, L. ; Wensaas, L. ; Arntsen, B. ; Hovland, M. "Fluid Injection Causing Shallow Mud Diapirism in the Hordaland Group, North Sea" American Association of Petroleum Geologist Bulletin Annual Convention, 2003. Disponible en: <http://www.searchanddiscovery.com/documents/abstracts/annual2003/short/79145.PDF>

Moerz, T. ; Brückmann, W. ; Wallmann, K. ; Suess E. "Mound Culebra - an Example for Deep Sourced Mud Diapirism offshore Costa Rica" Research Center for Marine Geosciences, 2002. Disponible en : www.sfb574.geomar.de/downloads/publications/tmoerz_geo2003.pdf

Morita, S. ; Ashi, J. ; Aoike, K. ; Kuramoto, S. "Formation and the origin of the Kumano mud volcanoes" Universidad de Tokio, 2004. Disponible en : [-http://www-jm.eps.s.u-tokyo.ac.jp/2004cd-rom/pdf/j036/j036-013_e.pdf](http://www-jm.eps.s.u-tokyo.ac.jp/2004cd-rom/pdf/j036/j036-013_e.pdf).

Pinheiro, L.M. ; Magalhães, V. ; Somoza, L. ; Diaz del Rio, V. ; Gardner J. ; Ivanov, M. "Gas Hydrates, Mud Volcanoes And Carbonate Chimneys In The Gulf Of Cadiz" Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 13693, 2003. Disponible en:
- www.cosis.net/abstracts/EAE03/13693/EAE03-J-13693.pdf