



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO DEL USO DE FOTOGRAMETRÍA EN LA DETECCIÓN DE GRIETAS Y
DESPLAZAMIENTOS EN SUELOS FINOS Y ARENAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

NATALIA VALENTINA PIZARRO GRANADA

PROFESOR GUÍA:
CÉSAR PASTÉN PUCHI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ROBERTO GESCHE SCHÜLER
FELIPE OCHOA CORNEJO

SANTIAGO DE CHILE

2017

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniera Civil con mención en
Estructuras, Construcción y Geotecnia.
POR: Natalia Valentina Pizarro Granada
FECHA: 23/05/2017
PROFESOR GUÍA: César Pastén Puchi

ESTUDIO DEL USO DE FOTOGRAMETRÍA EN LA DETECCIÓN DE GRIETAS Y DESPLAZAMIENTOS EN SUELOS FINOS Y ARENAS

Este trabajo estudia la aplicación de técnicas de fotogrametría para detectar deformaciones y desplazamientos en suelos finos y arenas producto de cambios de humedad en laboratorio. Los suelos finos analizados son arcillas caoliníticas y bentoníticas, y la fracción fina de un relave, materiales con variados índices de plasticidad y sensibilidad a cambios de humedad. Las deformaciones que se analizan en este caso son grietas de desecación. Además, se analiza el comportamiento de arenas medias y finas para detectar desplazamientos producto de la pérdida de humedad originada por su secado, cuando se encuentran en una pendiente. Los ensayos consisten en la captura consecutiva de fotografías a las muestras de suelo en distintos estados de deformación mientras son sometidas a ciclos de temperatura. Las muestras se ensayan dentro de un contenedor térmicamente aislado, equipado con sensores de temperatura, termostato, cámara fotográfica, fuente de calor y ventilador. Los métodos de fotogrametría utilizados son correlación digital de imágenes (CDI) y velocimetría de imágenes de partículas (VIP). Ambos métodos detectan desplazamientos y deformaciones en los suelos finos; sin embargo, en el caso de arenas, solo pueden identificar una zona deformada, pero no su magnitud ni los desplazamientos experimentados. Además, se verifica que suelos finos con mayor plasticidad presentan mayores deformaciones. Sin embargo, la caolinita experimenta mayores niveles de deformación superficial que la bentonita durante el periodo de ejecución de los ensayos por su menor capacidad de retención de agua. Las técnicas analizadas pueden ser utilizadas en terreno de manera complementaria, como un indicador del deterioro superficial de taludes, si se consideran factores como variación de textura, generación de sombras, movimientos de cámara y resolución de imágenes.

*A María Tapia Álvarez,
Gracias por todo Abueli.*

Agradecimientos

Gracias a los profesores César, Roberto y Felipe por aceptar ser parte de este trabajo y por tener la mejor disposición para responder las dudas. Gracias al profesor Pedro Soto y a Víctor, por permitirme trabajar en su laboratorio e intentar guiarme cuando no funcionaban los ensayos. Gracias a Omar y Mario, por ayudarme siempre con todo lo que necesité para desarrollar esta memoria y por la amabilidad y disposición detrás de ello.

Gracias a Maribel y Roberto, mis papás, por permitirme estudiar acá y siempre creer en mí. Por llenarme de cariño y por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y las recompensas asociadas también. Gracias por apoyarme en todo, por los cuentos de Kikiki y Dindín, las llamadas diarias por Skype y la magia que, a pesar de los años, sigue siempre presente. Soy muy afortunada de tenerlos conmigo. Muchas gracias por todo.

Gracias a mi hermana Maite por compartir esta experiencia de vivir juntas en Santiago. Por todo el cariño y compañía, por ser el apoyo fundamental en este tiempo lejos de nuestra “querida” Talca. Gracias Wiwi por aceptarme y quererme a pesar de lo diferente que podemos llegar a ser.

Gracias a María Tapia, mi abuela paterna. Por todos los cirios y rezos para que me fuera bien. Por las comidas ricas y las atenciones de siempre. Por recibirme en su casa cuando empezó esto y nunca dejarnos de lado. Gracias también a ti, Amachi, por siempre haber confiado en que era capaz de hacer lo que quisiera cuando estabas bien. Gracias a mis abuelos que empezaron esto conmigo, pero ya no están, José y Manuel. Gracias por lo bien, querida y especial que siempre me hicieron sentir.

Gracias a mi mejor amiga Isabel, por acompañarme desde primero básico en absolutamente todo, inclusive cuando las Barbies podían ser un tema de discordia importante. Gracias por siempre estar tan presente a pesar de la distancia.

Gracias Jose, por todo tu apoyo y cariño. Por la ayuda infinita con Matlab, los programas, los ensayos y las infaltables barritas de cereal. Por la compañía, la paciencia y cada uno de tus gestos que me hacen tan feliz. Gracias Bonito por elegirme para terminar esta etapa juntos y siempre siempre siempre estar conmigo y creer en mí.

Gracias a mi equipo de vóleibol por hacerme parte de un grupo tan lindo y que quiero tanto. Gracias a ustedes mis fines de semana en Santiago eran distintos. Gracias por aceptar que fuera su capitana y hacerme sentir tan querida y apoyada. Sin duda son lo que más voy a extrañar de la universidad.

Por último, gracias a todas las personas que conocí en este tiempo y que estuvieron para apoyarme. A los niños/as de la geopecera que me recibieron tan bien y apoyaron tanto, sobre todo después de las reuniones. A mis amigas de primer año, en particular a la Chaio. A mis queridos cucarachas, Nati, Leandro y Francisc; a los que conocí en el departamento de Civil y a los que en algún minuto fueron parte fundamental de este proceso, pero por algún motivo ya no lo son. Gracias también a la tía Isabel y a los guardias Moisés y Luis, por tratarme con tanto cariño. En fin, gracias absolutamente a todos. Me siento muy feliz de poder terminar esta etapa rodeada de personas lindas y que me llenan de cariño día a día.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 General	1
1.2 Objetivo General	2
1.3 Objetivos Específicos	2
1.4 Estructura del Trabajo	2
2. Localización y Formación de Grietas de Deseccación	3
2.1 Etapas de Formación y Propagación de Grietas de Deseccación	4
2.2 Comportamiento de Suelos Sometidos a Ciclos de Humedecimiento y Secado.	9
2.3 Influencia de Ciclos de Humedecimiento y Secado en Estabilidad de Taludes	14
3. Técnicas de Fotogrametría.....	16
3.1 Correlación Digital de Imágenes, Ncorr.....	17
3.1.1 Funcionamiento del Programa Ncorr.....	17
3.1.2 Parámetros de Entrada de Ncorr	19
3.1.3 Resultados Gráficos de Ncorr	20
3.2 Velocimetría de Imágenes de Partículas- Correlación Digital de Imágenes, GeoPIV-RG.....	22
3.2.1 Funcionamiento del Programa GeoPIV-RG	22
3.2.2 Parámetros de Entrada de GeoPIV-RG	24
3.2.3 Resultados Gráficos de GeoPIV-RG	25
3.3 Aplicaciones de Fotogrametría en Laboratorio.....	27
3.4 Técnicas de Monitoreo de Taludes en Terreno.....	28
4. Montaje Experimental	33
4.1 Ensayos Cíclicos de Temperatura.....	33
4.1.1 Control de Temperatura	34
4.1.2 Registro Fotográfico	34

4.1.3 Iluminación	34
4.2 Ensayos de Caracterización de Materiales	35
4.2.1 Límites de Atterberg	35
4.2.2 Ensayos Edométricos.....	37
5. Análisis Fotogramétrico en Laboratorio	40
5.1 Captura y Selección de Imágenes	40
5.2 Procesamiento de Imágenes.....	40
5.3 Recursos Computacionales Utilizados	43
6. Ensayos Fotogramétricos en Suelos Finos	46
6.1 Ensayos de Bentonita y Caolinita con la Totalidad de la Superficie de las Placas de Petri Cubierta.....	46
6.2 Ensayo de Bentonita y Caolinita con la Mitad de la Superficie de las Placas de Petri Cubierta.....	49
6.3 Ensayo de Bentonita y Caolinita con la Totalidad de la Superficie de las Placas de Petri Cubierta y sin Contacto Lateral	51
6.4 Ensayo de Relave con la Totalidad de la Superficie de las Placas de Petri Cubiertas	52
6.5 Resultados Post- Procesamiento de Ensayos en Suelos Finos.....	55
6.6 Comparación de los Resultados Obtenidos en Ncorr y GeoPIV-RG.....	63
7. Ensayos Fotogramétricos en Arenas	71
7.1 Arena Media.....	72
7.2 Arena Fina.....	75
8. Análisis y Discusión de Resultados	78
8.1 Ensayos en Suelos Finos.....	78
8.1.1 Influencia del Índice de Plasticidad en el Comportamiento de Suelos Finos..	78
8.1.2 Influencia de Ciclos de Temperatura en el Comportamiento de Suelos Finos	81
8.1.3 Formación y Propagación de Grietas de Deseccación	83

8.1.4 Aplicación de Fotogrametría sobre Suelos Finos	85
8.2 Ensayos de Arenas	89
8.2.1 Aplicación de Fotogrametría sobre Arena Media	89
8.2.2 Aplicación de Fotogrametría sobre Arena Fina	90
8.3 Comparación de Configuración entre Ncorr y GeoPIV-RG	91
8.3.1 Configuración de Procesamiento en Suelos Finos.....	91
8.3.2 Configuración de Procesamiento en Arenas	92
8.4 Aplicabilidad de Fotogrametría en Terreno	92
8.4.1 Consideraciones para Aplicación de Fotogramétricas en Terreno	92
8.4.2 Beneficios y Limitaciones de la Aplicación de Fotogrametría en Terreno	93
9. Conclusiones y Recomendaciones	95
9.1 Conclusiones.....	95
9.2 Recomendaciones.....	96
10. Bibliografía.....	97
ANEXOS	101

1. Introducción

1.1 General

Cuando los suelos son sometidos a ciclos de humedecimiento y secado pueden sufrir deformaciones que se traducen en agrietamiento, proceso que está controlado por la succión del suelo y su contenido de humedad inicial, entre otros factores (Morris *et al.* 1992). Junto con esto, las deformaciones por contracción volumétrica pueden aumentar la cantidad de grietas de desecación (ejemplos en arcillas se pueden ver en Albrecht y Benson 2001). Aún más, estudios realizados en materiales arcillosos (Take y Bolton 2011) indican que las consecuencias de la expansión y la contracción producto de los ciclos de humedecimiento y secado son potencialmente irreversibles, lo que genera que taludes puedan fallar en las zonas de desarrollo de grietas. Este comportamiento ha sido estudiado en taludes compuestos por suelos volcánicos de Colombia por Herrera y Lizcano (2007), quienes concluyen que las variaciones de humedad estacionales están directamente relacionadas con deslizamientos en este tipo de suelos.

Además, a causa del cambio climático, para mediados del siglo XXI se esperan aumentos de temperatura sobre todo Chile continental y el océano adyacente (Garreaud 2011), lo que implica condiciones climáticas con mayor presencia de fenómenos extremos, sequías e inundaciones, que pueden acelerar los ciclos de secado descritos y con ello generar procesos de desestabilización de taludes en espacios naturales, lo que podría ser abordado con un seguimiento fotogramétrico adecuado.

Las mediciones de deformaciones y desplazamientos producto de estos cambios de humedad son críticas en muchas estructuras geotécnicas; sin embargo, la medición fuera de laboratorio mediante técnicas convencionales de instrumentación es costosa y laboriosa en comparación al análisis digital de imágenes que, si bien requiere recursos computacionales importantes, permite estudiar la propagación de grietas y deformaciones superficiales de manera sencilla, precisa y sin contacto.

La fotogrametría es una técnica que existe desde el año 1893 y que permite, mediante el análisis de imágenes, conocer las dimensiones y posiciones de objetos en el espacio. Actualmente, su uso está orientado a la fotografía digital y existen programas especializados para su aplicación en distintas áreas. Dentro de las técnicas desarrolladas para estudios geotécnicos, se encuentra la correlación digital de imágenes (CDI) y la velocimetría de imágenes de partículas (VIP).

Blaber *et al* (2015) y Stanier *et al* (2015) desarrollaron los programas Ncorr (CDI) y GeoPIV-RG (VIP-CDI), respectivamente. Ambos son bidimensionales, gratuitos y, mediante la comparación de fotografías en diferentes estados de deformación, tienen la capacidad de determinar los desplazamientos y deformaciones incrementales a partir de la evaluación de la intensidad de píxeles (Take 2015).

En este contexto, surge la inquietud de estudiar en laboratorio las técnicas de fotogrametría que fueron mencionadas anteriormente, y de esta forma, determinar su aplicabilidad en el monitoreo de la estabilidad de proyectos geotécnicos de distintas escalas y frente a diversas situaciones.

1.2 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es determinar si mediante los programas computacionales Ncorr (basado en Correlación digital de imágenes) y GeoPIV-RG (basado en Velocimetría de imágenes de partículas – Correlación digital de imágenes), es posible identificar correctamente las deformaciones y desplazamientos generados en suelos finos y arenas, producto de la pérdida de humedad al verse sometidos a ciclos de temperatura en laboratorio.

1.3 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son:

- Definir las características de las fotografías requeridas, para la aplicación adecuada de fotogrametría mediante los programas Ncorr y GeoPIV-RG.
- Comparar los resultados de Ncorr y GeoPIV-RG para la detección de deformaciones y desplazamientos en suelos finos y arenas.
- Determinar la influencia del índice de plasticidad, el tamaño de las muestras y la cantidad de ciclos de temperatura en el deterioro de los suelos finos.
- Establecer la aplicabilidad de las técnicas de fotogrametría en proyectos geotécnicos en función de resultados de laboratorio.

1.4 Estructura del Trabajo

Este trabajo se divide en 9 capítulos, además de la introducción. En el Capítulo 2 se aborda la formación y propagación de grietas de desecación en suelos finos, además de su influencia en la estabilidad de taludes. En el Capítulo 3, se muestran las técnicas de fotogrametría empleadas en este trabajo de título, junto con aplicaciones de laboratorio y terreno. El Capítulo 4 expone el montaje experimental utilizado para el desarrollo de los ensayos de laboratorio. El Capítulo 5 presenta el análisis fotogramétrico desarrollado considerando la configuración de los programas y los recursos computacionales utilizados. En el Capítulo 6 se exponen los ensayos fotogramétricos realizados sobre suelos finos, junto con los resultados obtenidos luego de procesamientos posteriores. El Capítulo 7 muestra los ensayos fotogramétricos realizados sobre muestras de arenas medias y finas. En el Capítulo 8 se realiza una discusión sobre el trabajo efectuado y la aplicabilidad de las técnicas en terreno. Finalmente, el Capítulo 9 presenta las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

2. Localización y Formación de Grietas de Desección

Los suelos, al igual que otros materiales pueden desplazarse y deformarse de acuerdo a los esfuerzos a los que las partículas se encuentren sometidas. Un cambio en la situación natural provoca una modificación en el campo de esfuerzos internos, lo que puede traducirse en la generación de desplazamientos y deformaciones. Dichos cambios pueden deberse tanto a factores naturales como artificiales y son capaces de hacer que las estructuras aledañas resulten dañadas y que su serviciabilidad se vea disminuida, así como también que se genere una pérdida de resistencia mecánica en el mismo suelo debido a la presencia de grietas (Morris *et al.* 1992).

La formación de grietas ha sido estudiada ampliamente por diversos autores producto de los potenciales daños que pueden generar, entre los cuales destacan inestabilidades de taludes (Baker, 1981), fallas en presas (Peng y Zhang 2011) y las reducciones de capacidad de carga en fundaciones (Silvestri *et al.* 1992). Producto de esto, se han desarrollado varias hipótesis que explican su formación; sin embargo, al ser el suelo un material muy complejo, existen muchos factores que gobiernan el proceso y que hacen que sea difícil de modelar.

En general, cuando se estudia la formación de grietas de desecación, estas se asocian con tensiones dentro del suelo que superan su resistencia, típicamente en el contexto de secado no uniforme o contracciones volumétricas libres restringidas lateralmente, como lo plantean Lachenbruch (1962), Allen (1982), Morris *et al.* (1992) y Hallet y Newson (2005), entre otros. De igual forma, autores como Zarzycki *et al.* (1982) sugieren que el desarrollo de grietas en suelos producto de desecación se puede entender conceptualmente mediante la teoría de secado irregular, la que determina que el desarrollo de grietas ocurre por la diferencia de presiones capilares y la posterior falla en las paredes de los poros.

Considerando lo anterior, varios autores han intentado determinar las etapas que existen en el proceso de formación y propagación de grietas y los factores predominantes, entre los cuales se plantea el índice de plasticidad, el límite líquido, el índice de contracción volumétrica e inclusive las particularidades topográficas. Los primeros parámetros hacen referencia a la susceptibilidad que presenta un suelo frente a las deformaciones volumétricas, mientras que las particularidades topográficas son características menos estudiadas, pero igualmente relevantes. De hecho, Shin y Santamarina (2011) demuestran que en los lugares donde existen defectos en la superficie de muestras de laboratorio, ya sea producto de cráteres submilimétricos o pequeñas irregularidades superficiales, la formación de grietas se desencadena producto de la distorsión de la contracción volumétrica del medio cercano. La Figura 1 expone un ejemplo de lo planteado.

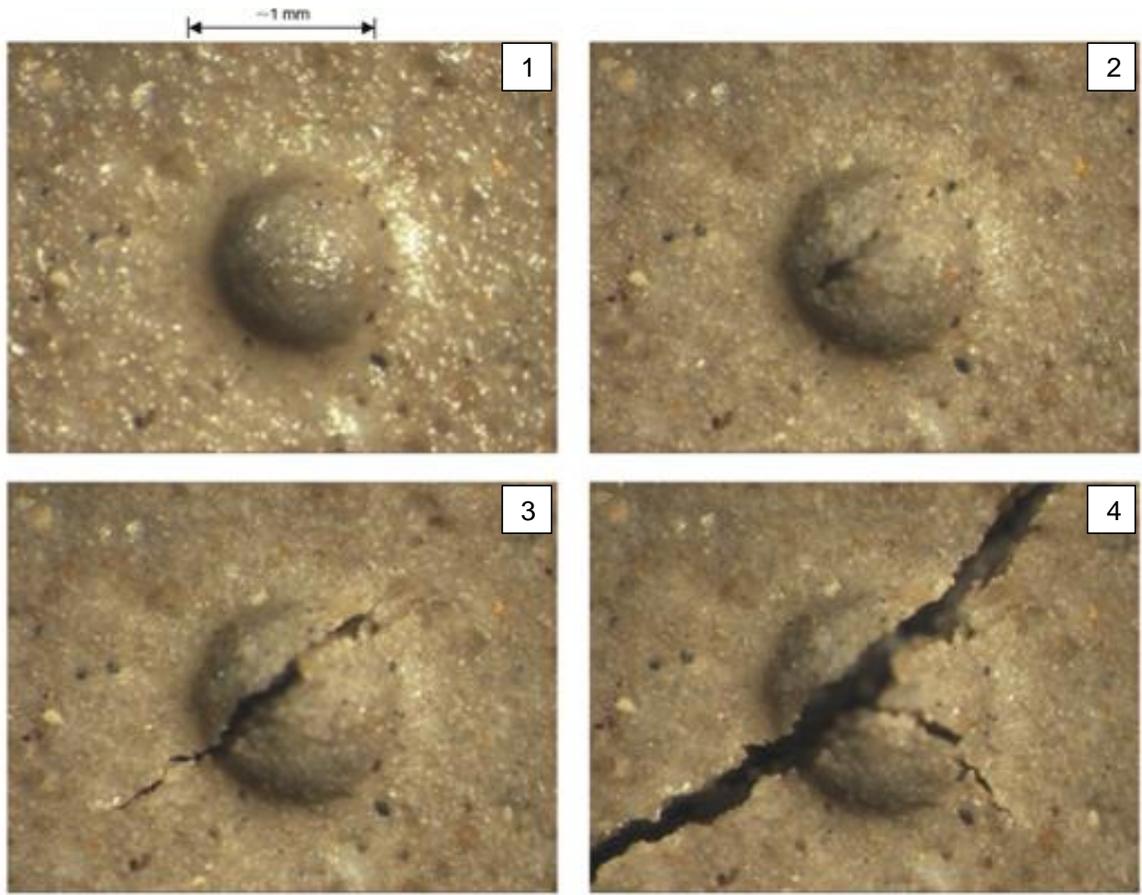


Figura 1. Secuencia de formación de grieta originada por burbuja de aire atrapada en la superficie.
(Modificado de Shin y Santamarina 2011)

2.1 Etapas de Formación y Propagación de Grietas de Deseccación

Shin y Santamarina (2011) plantean que en general las teorías de formación y propagación de grietas solo tienen una base conceptual, como lo es la definida por Zarzycki *et al.* (1982), o bien, al relacionar exclusivamente la tensión con la falla, son incapaces de reconocer el comportamiento inherente, sin cohesión, pero friccional dependiente del esfuerzo efectivo de los suelos. Por esto, mediante un método que involucra un análisis a nivel de partícula (tensión de membrana en la interfaz aire-agua) y uno a macroescala (cambios en las tensiones efectivas y volúmenes cerca de imperfecciones y puntas de grietas) estudian la formación y propagación de grietas. De acuerdo a este estudio, al considerar una combinación de métodos experimentales y numéricos sobre 273 muestras de Ca-Montmorillonita (L.L: 97%, L.P: 47%, w:150%), existen 4 etapas en la formación y propagación de grietas de desecación. Los experimentos desarrollados consisten en mezclar Ca-Montmorillonita con agua desionizada y ubicar la mezcla en contenedores plásticos de 87 mm de diámetro y 12 mm de alto a 25°C y 35% de humedad relativa. El monitoreo de las grietas se estudia mediante fotogrametría y ensayos de succión, además de modelamientos con elementos finitos para obtener índices de vacío e intensidades de esfuerzos. Las etapas propuestas por Shin y Santamarina (2011) se desarrollan a continuación y se resumen en la Figura 2.

a) Agua libre sobre el suelo

En este estado el agua se evapora libremente, la presión de poros es positiva en todos los lugares dentro del suelo y no hay succión capilar (Figura 2.a). Luego de esto, el nivel de agua alcanza la superficie del suelo (Figura 2.b), momento en que la presión de poros se anula en la superficie.

b) Movilización de la membrana de tensión y desarrollo de la succión

La evaporación adicional deja a la membrana de la interfaz aire-agua contra la superficie de los granos y otras irregularidades superficiales del suelo (Figura 2.c). La membrana atrapa las partículas de suelo y se desarrolla la succión capilar en el fluido de poros (descrita por la ecuación de Laplace) y en la estructura granular. El suelo se consolida, la rigidez de la estructura aumenta gradualmente y la magnitud del asentamiento vertical es equivalente a la cantidad de agua que se evapora. El suelo permanece saturado a través de este estado.

c) Invasión de la membrana- Iniciación de agrietamiento

El aumento de rigidez de la estructura de suelo dificulta aún más la consolidación. Si la evaporación continúa, la succión capilar causa que la interfaz aire-agua invada el suelo (Figura 2.d). La intrusión de aire comienza en los poros más grandes, generalmente asociados con las particularidades topográficas de la superficie. El transporte de vapor desde la superficie de suelo se dificulta cada vez más, a medida que la interfaz aire-agua se incorpora en el suelo, por lo que la tasa de evaporación decrece casi completamente mientras la succión total aumenta.

d) Propagación de grietas

La propagación de grietas se genera por la invasión de la membrana en los poros dilatados en las puntas de las grietas, donde el índice de vacío aumenta y la tasa de entrada de aire disminuye. Una vez que la membrana de la interfaz aire-agua invade la punta de la grieta, una nueva superficie se forma y el proceso se repite. La movilidad de las partículas y la variación en el índice de vacíos decrece en profundidad, por lo que la invasión de la membrana se genera preferentemente en los poros laterales y la propagación de grietas se desarrolla a lo largo de la superficie (Figura 2.e). La masa de suelo experimenta esfuerzos compresivos en todos los lugares y tiempos durante el proceso de desecación-agrietamiento. Eventualmente entre grietas, el suelo se vuelve no saturado.

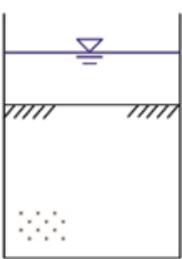
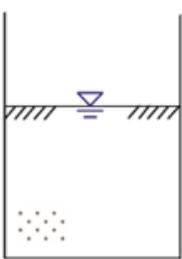
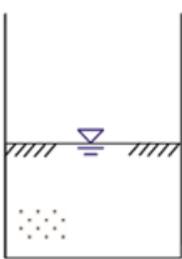
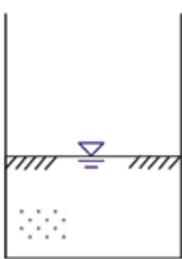
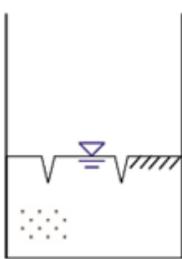
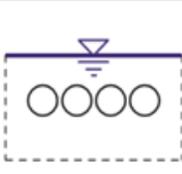
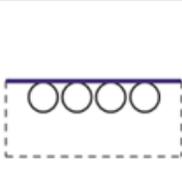
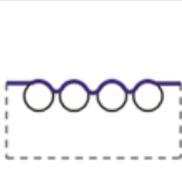
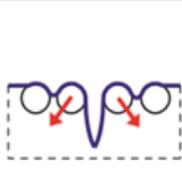
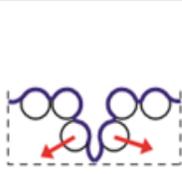
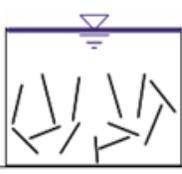
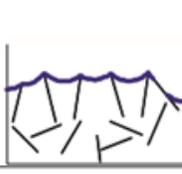
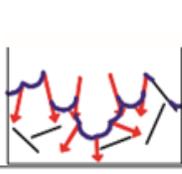
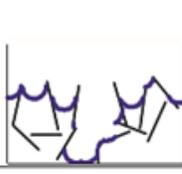
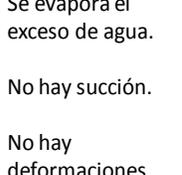
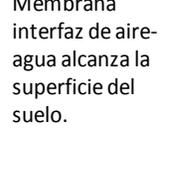
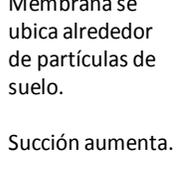
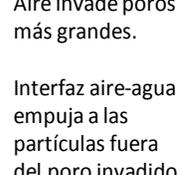
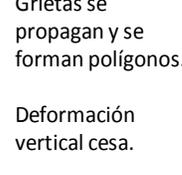
Estados	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Vista Global					
Suelo Grueso					
Vista escala de partícula					
Suelo Fino					
Comentarios	Se evapora el exceso de agua. No hay succión. No hay deformaciones en estructura de suelo.	Membrana interfaz de aire-agua alcanza la superficie del suelo.	Membrana se ubica alrededor de partículas de suelo. Succión aumenta. Se consolida la estructura de suelo y aumenta su rigidez	Aire invade poros más grandes. Interfaz aire-agua empuja a las partículas fuera del poro invadido. Tamaño del poro aumenta en la punta y la grieta crece.	Grietas se propagan y se forman polígonos. Deformación vertical cesa. Eventualmente, la masa de suelo se vuelve no saturada.

Figura 2. Etapas de formación y propagación de grietas de desecación. (Modificado de Shin y Santamarina 2011)

Según Li y Zhang (2011) las etapas de formación y desarrollo de grietas que se pueden deducir de ensayos de laboratorio, se definen en base al contenido de agua de las muestras mientras que, los ensayos *in situ* permiten establecer las etapas en función del desarrollo de las grietas en el suelo. Además, plantean que los modelos a escala no representan las condiciones naturales del suelo, como la inclusión de partículas más grandes y su interacción con la atmósfera y, que las condiciones de borde propias de un modelo a escala, no coinciden con las naturales.

Dado lo anterior, Li y Zhang (2011) realizaron un estudio *in situ* en dos suelos diferentes con el fin de determinar las etapas de formación de grietas a nivel macro. El primero corresponde a un talud compuesto por un relleno de suelo (L.L:40,4%, L.P:15,6%) clasificado como arcilla limosa con expansividad media (según ASTM D4829-03), mientras que el segundo está formado por un suelo residual (L.L:42,1%, L.P:15,6%) de categoría arcilla limosa con baja expansividad. El monitoreo de las grietas se desarrolla

con fotogrametría y al momento de su inicio, se remueve el suelo superficial para que no existan grietas preexistentes que alteren el comportamiento posterior.

El estudio del agrietamiento se realizó mediante la comparación de fotografías de días posteriores a una lluvia de 28,9 mm que se desarrolló en el lugar. La Figura 3 presenta el resultado de fotografías para el suelo de relleno (izquierda) y el residual (derecha), mientras que la Tabla 1 resume los contenidos de humedad obtenidos en laboratorio, y la cantidad de días transcurridos en cada fotografía para cada uno de los suelos en estudio.

Tabla 1. Resumen de días transcurridos y humedad respectiva para cada tipo de suelo estudiado por Li y Zhang (2011).

Fotografía	Suelo Relleno		Suelo Residual	
	Días transcurridos	Humedad [%]	Días transcurridos	Humedad [%]
a	1	25	1	14,6
b	3	19,9	2	12,9
c	5	17,3	3	11,3
d	6	17,2	5	9,9
e	8	16,7	7	9,6
f	11	13,1	11	9

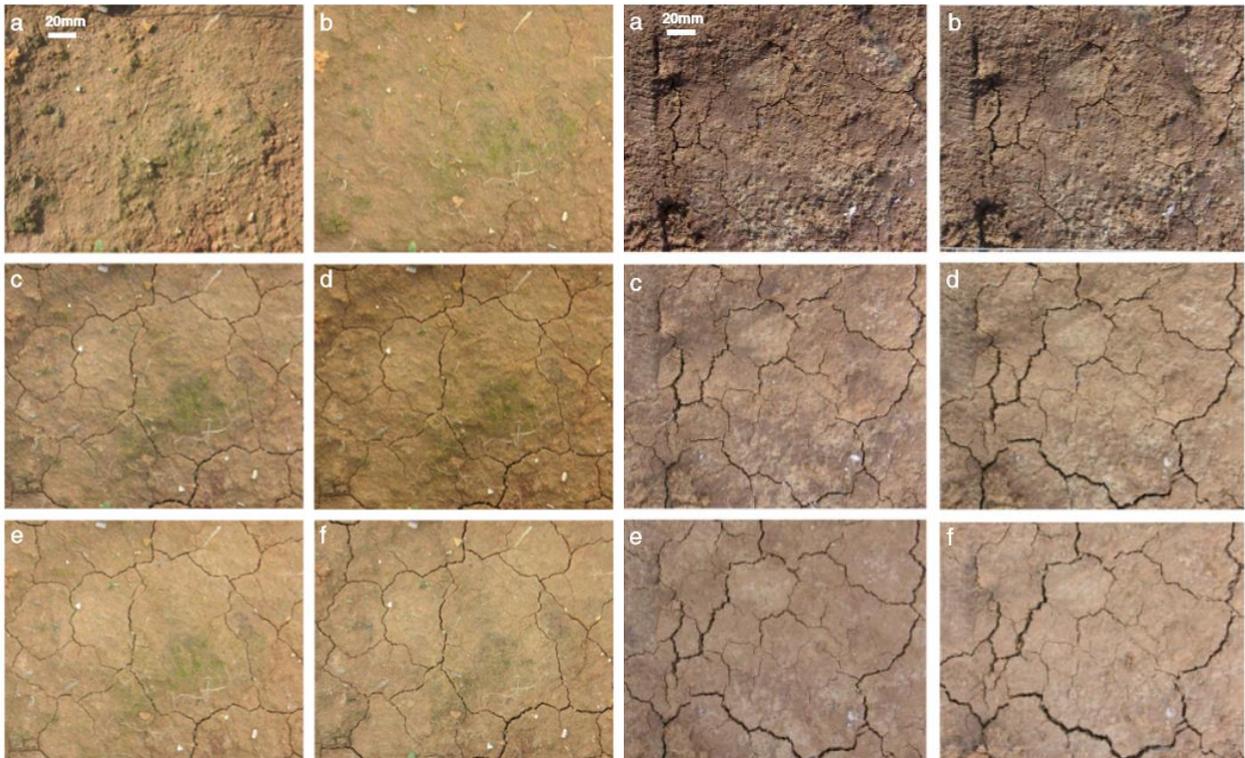


Figura 3. Muestras de suelo de relleno (izquierda) y suelo residual (derecha) en proceso de secado distintos días después de ocurrida la lluvia. (Modificado de Li y Zhang 2011)

Como se puede observar en la Figura 3, las grietas en los primeros dos días después de la lluvia se desarrollan lentamente, pero en ambos casos, el cambio generado entre los días 3 y 5 (Figura 3.b-3.c suelo de relleno y Figura 3.c-3.d suelo residual) es abrupto, exponiendo una mayor cantidad de grietas. Luego de 6 días de secado, el número de grietas es casi constante y el aumento de la apertura es mínimo. En base a los resultados descritos, Li y Zhang (2011) proponen 3 etapas en el proceso de formación y desarrollo de grietas. Una imagen representativa de cada una de ellas se presenta en la Figura 4.

- a) **Estado inicial:** Las grietas se desarrollan lentamente. El agua del suelo se evapora preferencialmente en la dirección vertical de la matriz de suelo y la tasa de evaporación es pequeña (Figura 4.a).
- b) **Estado primario:** La evaporación se produce desde la superficie en dirección vertical y desde las paredes de las grietas de manera horizontal (Figura 4.b). El contenido de agua sigue disminuyendo por lo que las grietas se desarrollan rápidamente formando una red poligonal. Las ramas de grietas aparecen preferentemente al final de estas y en los puntos de giro, pero de igual forma, grietas pequeñas se desarrollan desde el centro de las ya existentes con dirección aproximadamente perpendicular. Este comportamiento se explica mediante el modelo de red de resortes de Vogel et al. (2005), en el cual el suelo se modela como una red triangular bidimensional de resortes simples de Hooke. Cuando el resorte se corta, una grieta se forma. Perpendicular a esta, los resortes están relajados; sin embargo, en los resortes paralelos la tensión aumenta. Dado esto, si la punta de una grieta se acerca a otra existente, la intersección más probable de ambas será de 90° .
- c) **Estado estacionario:** La tasa de evaporación desde el suelo disminuye producto de la similitud de humedades relativas entre el ambiente y el suelo. Producto de esto, se genera un desarrollo muy lento de las grietas superficiales, el cual está determinado por el desplazamiento de humedad relativa desde los niveles profundos del suelo, lo que demora bastante hasta alcanzar un estado estacionario (Figura 4.c).

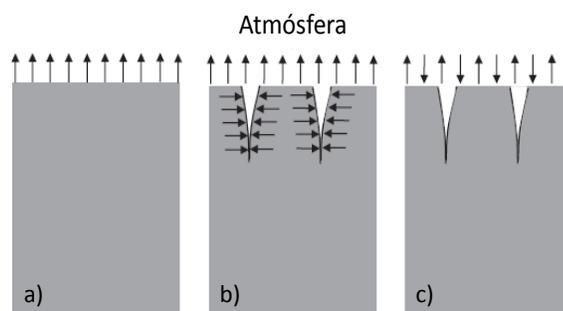


Figura 4. Etapas en la formación y desarrollo de grietas de desecación. (Modificado de Li y Zhang 2011)

Si bien las etapas desarrolladas por Shin y Santamarina (2011) y Li y Zhang (2011), se construyen a partir de análisis que abordan distintos puntos de vista, ambas son aplicables para el estudio del comportamiento de los suelos sometidos a condiciones de secado. Además, coinciden en la propagación geométrica de las grietas, desde una perspectiva de contenido de agua e interacción entre partículas y desde la formación propiamente tal de las grietas.

2.2 Comportamiento de Suelos Sometidos a Ciclos de Humedecimiento y Secado

Las propiedades de algunos tipos de suelos pueden verse alteradas cuando son sometidos a procesos de secado. La desecación se puede desarrollar tanto al aire libre, como de manera artificial y las características que se ven más perturbadas con esta condición, son la capacidad de retención de agua y el índice de plasticidad. Según Herrera y Lizcano (2007), la tasa de cambio en la disminución de estas propiedades depende de la humedad inicial, la temperatura y la duración del proceso de desecación, mientras que para Albrecht y Benson (2001) y Tang *et al* (2008), el contenido de arcillas, las condiciones de borde y el espesor de las capas son agentes importantes y también necesarios de incluir en este análisis.

El proceso de pérdida de plasticidad y humedad en suelos finos debido a la desecación, puede generar, en mayor o menor grado, cambios volumétricos (hinchamiento y contracción), los cuales producen deformaciones plásticas o el agrietamiento de la muestra. Este deterioro, en base a los estudios realizados en arcillas por Ling Chu y Benson (2000), no puede ser recuperado durante procesos posteriores de rehidratación, debido a que existe una reducción irreversible en la capacidad de hinchamiento del suelo, provocada por el intercambio de cationes en el proceso, lo que se traduce en una reducción del espesor de la doble capa y un aumento en el tamaño efectivo del poro. Junto con esto, Herrera y Lizcano (2007) plantean que la irreversibilidad en los cambios de plasticidad no es clara, por lo que no es posible definir las alteraciones ni daños permanentes. Sin embargo, según Varela (2016), existe una posibilidad de recuperación en cierta medida de las propiedades, específicamente de los límites de Atterberg, la cual depende de la agresividad del secado al que sea sometido el material. De esta manera, si la variación de temperaturas no es brusca, existe la posibilidad de obtener propiedades más parecidas a las iniciales luego de los procesos de secado.

Junto con lo descrito, en base a ensayos cíclicos de humedecimiento (saturación mediante permeámetro) y secado (muestras sin restricciones laterales a 20°C durante dos semanas) realizados por Albrecht y Benson (2001) sobre discos de suelos con presencia de arcillas, de diámetro 10,2 cm y altura 11,64 cm, se demuestra que existe una relación directa entre las contracciones volumétricas y el agrietamiento de las muestras ensayadas. La relación anterior permite evaluar diversos aspectos. Dado esto, es necesario determinar que el menor valor de contracción volumétrica se produce en muestras compactadas cerca del contenido óptimo de agua, ya que, cuando el procedimiento se realiza lejos de este valor, la unidad de peso seco es menor, por lo que más agua y menos partículas de suelo existen por unidad de volumen (Figura 5.a). Además de esto, Albrecht y Benson (2001) presentan como resultado que, a mayor valor del índice de plasticidad, es mayor la contracción volumétrica generada en las muestras (Figura 5.b).

Considerando lo anterior, se determina que un índice de plasticidad más alto genera un mayor nivel de agrietamiento, producto de la relación entre el deterioro del suelo y las deformaciones volumétricas. Así, los resultados obtenidos por Albrecht y Benson (2001) en muestras de distintos suelos sometidos a ciclos de humedecimiento y secado, se presentan en la Figura 6, mientras que en la Tabla 2 se exponen los parámetros asociados a ellas.

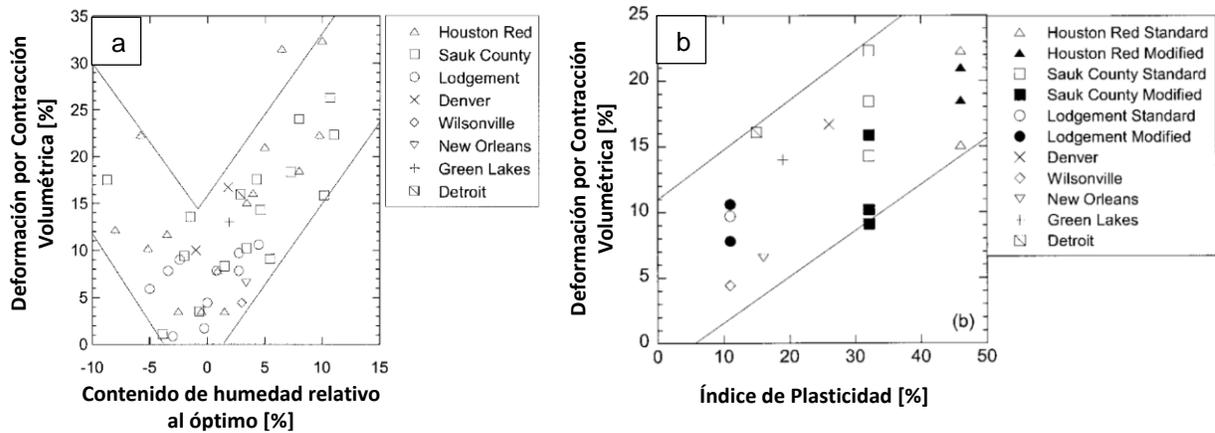


Figura 5. a) Relación entre deformación volumétrica y contenido óptimo de agua, b) Relación entre deformación volumétrica e índice de plasticidad (Modificado de Albrecht y Benson 2001).

Tabla 2. Parámetros de muestras de suelo ensayadas con ciclos de humedecimiento y secado por Albrecht y Benson (2001).

Nombre de muestra	Límite Líquido [%]	Índice de Plasticidad [%]	Clasificación USCS	Humedad óptima Proctor estándar [%]	Arcilla Predominante
Houston Red	67	46	CH	19	Ilita/Esmectita
Denver	49	26	CL	18	Esmectita
Lodgement	18	11	CL	9	Cuarzo
Sauk Country	67	32	CH	21	Ilita/Esmectita

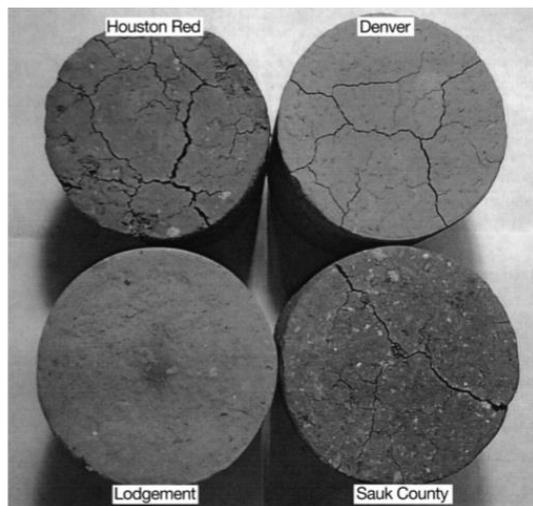


Figura 6. Resultado de Muestras sometidas a ciclos de humedecimiento y secado. (Albrecht y Benson 2001)

Estudios posteriores desarrollados por Rayhani *et al.* (2008) en suelos naturales utilizados para cubiertas y revestimientos de vertederos, con distintos índices de plasticidad, concuerdan con lo obtenido por Albrecht y Benson (2001). Las muestras se preparan con una humedad sobre el 2% del óptimo, se depositan en recipientes de 300 mm de diámetro por 150 mm de alto y se someten a 3 ciclos de humedecimiento (agua

destilada por 24 horas) y secado (50°C por 24 horas). Al final de los ensayos, los resultados determinan que mientras mayor es el índice de plasticidad del suelo en estudio, mayor es la cantidad de grietas generadas en las muestras y más significativas son sus dimensiones. Los parámetros de los suelos utilizados, junto con los resultados de grietas obtenidos se exponen en la Tabla 2, mientras que la Figura 7 expone la distribución de grietas generada en la muestra de suelo 3 (Gorgan).

Tabla 3. Resultados de muestras de suelo ensayadas con ciclos de humedecimiento y secado.

Parámetro	N°1 (Karaj)	N°2 (Kahrizak)	N°3 (Gorgan)	N°4 (70%Karaj+30%Na-Bentonita)
L.L [%]	32,2	36	42,8	62,2
I.P [%]	11,4	14,7	21,2	37,3
W (opt)%	17	18	20,5	22
Largo grieta [mm]	95	92	115	121
Ancho grieta [mm]	3,5	3,2	5,5	6,2
Profundidad grieta [mm]	15	18	57	63



Figura 7. Distribución de grietas en muestra de suelo 3, Gorgan (Rayhani *et al.* 2008).

Complementando lo anterior, autores como Morris *et al.* (1991) determinan que el agrietamiento en suelos sometidos a procesos de secado, está controlado por la succión del suelo, el contenido de agua inicial y las propiedades, como el módulo de compresión, el módulo de Poisson, la resistencia al corte y la superficie específica. Sin embargo, también determinan que, si bien se sabe que los suelos finos como las arcillas tienden a agrietarse al secarse y cuáles son los factores que influyen en este comportamiento, no es claro cómo se puede predecir la profundidad de las deformaciones y el espaciamiento exhibido entre ellas.

Además, Morris *et al.* (1991) afirman que las grietas generadas producto de desecación, presentan orientaciones preferentemente verticales (de igual forma que los resultados obtenidos por Rayhani *et al.* 2008). Ejemplos de agrietamientos importantes se han

encontrado en relaves de minas de carbón en Australia, en donde las grietas alcanzan los 0,5 metros de profundidad. La Figura 8 expone lo descrito.



Figura 8. Agrietamiento en relaves de mina de carbón en Queensland, Australia. (Morris *et al.* 1991)

Por otra parte, Tang *et al.* (2008), de acuerdo a ensayos desarrollados en arcillas que exhiben límites líquidos de 36,7% y plásticos de 18,9 %, sometidas a procesos de secado con temperaturas de 40°C, señalan que, a medida que aumenta el espesor de las muestras analizadas, el número de grietas e intersecciones disminuye, pero no así la magnitud de ellas y, con ello, la razón entre el área agrietada y el área total se incrementa.

Junto con esto, Tang *et al.* (2011) estudian el comportamiento de la arcilla Romainville, la cual ha sido considerada responsable de una gran cantidad de daños en las construcciones de París, debido a los procesos de hinchamiento y contracción, además del fenómeno de agrietamiento al que se ve expuesta. La arcilla Romainville está formada por Illita y Esmectita mayoritariamente y presenta un límite líquido y un índice de plasticidad de 77% y 37% respectivamente. Los ensayos consisten en aplicar ciclos de humedecimiento (saturar la mezcla homogéneamente agregando agua destilada) a 4 muestras de arcilla Romainville y dejarlas secar a 25°C sobre una pesa, hasta que el peso de la muestra se estabilice. A medida que avanzan los ciclos, se mide el contenido de humedad que presenta la muestra cuando comienza a agrietarse en cada ciclo. Sus resultados indican que a medida que aumenta la cantidad de ciclos de humedecimiento y secado, disminuye el contenido de humedad que debe perderse para que la muestra vuelva a agrietarse. Además de esto, concluyen que para el material analizado, la razón entre el área agrietada de la muestra y el área total alcanza el 30%, valor que después del tercer ciclo tiene una variación prácticamente nula. Resultados gráficos de lo expuesto se presentan en la Figura 9.

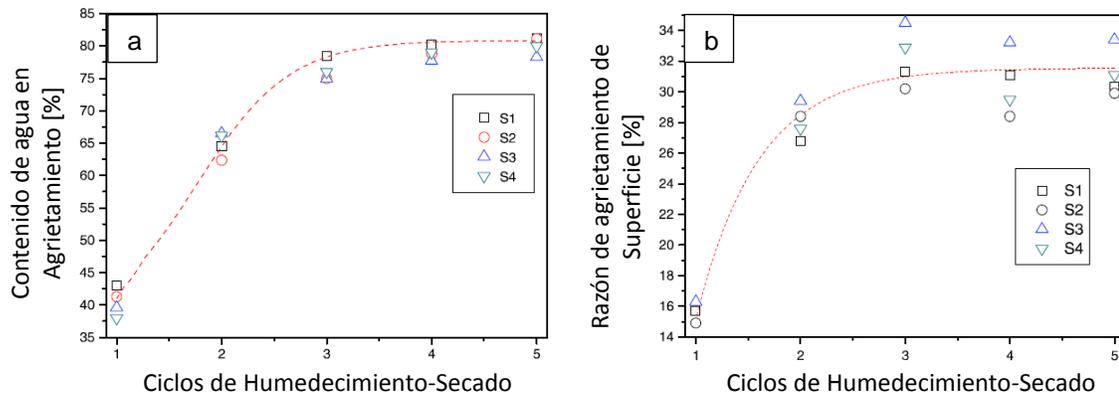


Figura 9. a) Contenido de agua en inicio de agrietamiento en función de ciclos, b) Razón de agrietamiento de superficie versus ciclos de humedecimiento y secado. (Modificado de Tang *et al.*, 2011)

Sumado a lo descrito, Tang *et al.* (2011) agregan que después del primer ciclo desarrollado, las formas de las grietas son relativamente regulares y la mayoría de los trozos se asemejan a rectángulos y pentágonos, como se puede apreciar en la Figura 10.a, lo cual es consistente con las etapas de desarrollo de grietas definidas por Li y Zhang (2011) y la teoría de Vogel *et al.* (2005). Sin embargo, luego del segundo ciclo aplicado, las formas de los trozos son más irregulares y los segmentos de las grietas son más ásperos (Figura 10.b). Finalmente, el tercer, cuarto y quinto ciclo exponen características geométricas y morfológicas similares entre sí (Figura 10.c,d,e).

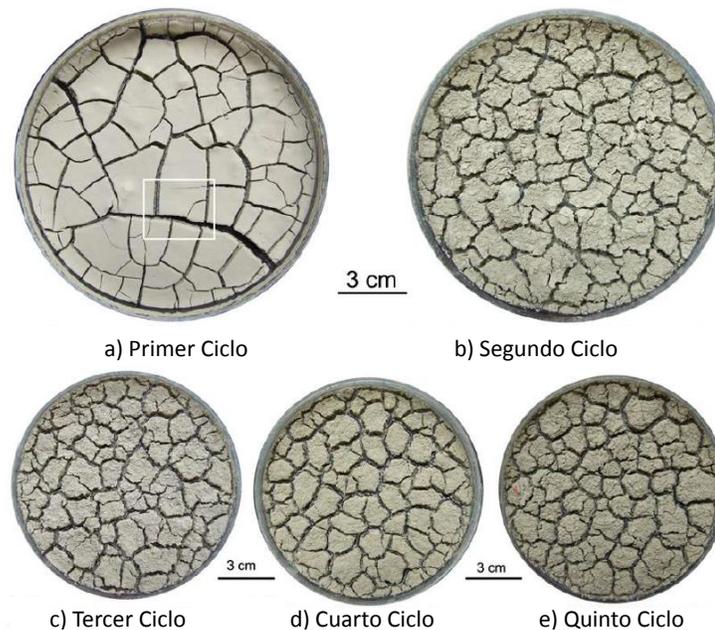


Figura 10. Evolución de agrietamiento generado en arcilla Romainville producto de ciclos de humedecimiento y secado. (Modificado de Tang *et al.* 2011).

De acuerdo a todo lo expuesto, el efecto de las grietas es significativo y no puede ser descuidado al considerar la respuesta de un suelo en un proyecto de ingeniería, tanto en taludes por posibles fallas y deslizamientos, como en suelos superficiales producto del aumento de la conductividad hidráulica y de la compresibilidad en un suelo agrietado.

2.3 Influencia de Ciclos de Humedecimiento y Secado en Estabilidad de Taludes

Vaughan y Walbancke (1973) plantean una dificultad en el diseño ingenieril de taludes en arcilla, producto de las disminuciones de carga que enfrentan en ciclos de secado por evapotranspiración, y a las variaciones en la tasa de hinchamiento, cuando se presenta agua en las cercanías de un talud. Dado lo descrito, los taludes en arcilla se encuentran expuestos a amplios rangos de presiones de poro, pudiendo incluso llegar a valores negativos, lo que se traduce en probabilidades elevadas de fallas por deslizamientos.

Para poder definir el progreso de todo tipo de falla en un talud, Leroueil (2001) determina 4 etapas, las cuales se resumen en prefalla, falla inicial, post falla y etapas de reactivación. Durante la prefalla no se genera un deslizamiento, sino que se obtienen deformaciones derivadas de cambios tensionales y falla progresiva. En particular, en el caso de taludes de arcillas las deformaciones generadas en la prefalla están asociadas a cambios en las presiones de poros, influenciadas por las variaciones de esfuerzos efectivos debidos al cambio en la infiltración, lo que puede llevar a una falla progresiva por la fragilidad, análoga a una situación de fatiga (Take y Bolton 2010). Si la primera etapa continúa hasta el punto en el que el talud ya no puede mantenerse en equilibrio, la etapa de falla inicial se ha alcanzado, caracterizada por la formación de una superficie de falla continua. Luego de esto, se desarrolla la tercera etapa correspondiente a postfalla, la cual considera todos los desplazamientos de suelos generados desde el inicio de la falla hasta que se alcanza una tasa de desplazamiento nula. Finalmente, la etapa de reactivación muestra deslizamientos ocasionales a lo largo de las superficies de rupturas preexistentes. La Figura 11 presenta un gráfico de la tasa de desplazamiento de un talud en función del tiempo, tomando en cuenta las 4 etapas mencionadas.

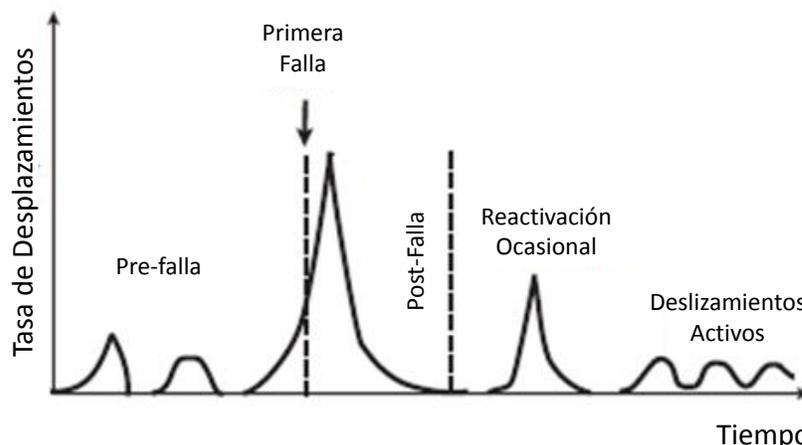


Figura 11. Etapas de falla en un talud. (Modificado de Leroueil, 2001)

De acuerdo a lo expuesto, Leroueil (2001) sugiere que deslizamientos de taludes, ya sea considerando esfuerzos efectivos constantes o debido a cambios en el contenido de agua producto de variaciones estacionales, pueden inducir una componente adicional de ablandamiento del suelo que depende del tiempo y que pueden generar una mayor inestabilidad en el talud.

Debido a la relevancia del estudio de taludes sometidos a ciclos de humedecimiento y secado, Take y Bolton (2010) realizan modelos a escala de taludes en arcillas, con el fin

de determinar el deterioro generado. En base a los resultados obtenidos, concluyen que los diseños que pretenden asegurar la estabilidad de taludes de arcilla a largo plazo, necesitan considerar las variaciones estacionales de humedad pues repercuten en la dilatancia, la contracción y el reblandecimiento local del suelo en el talud. Junto con esto, plantean que es necesario estar consciente del mecanismo progresivo de falla para poder monitorear y prever situaciones riesgosas. Además, Take y Bolton (2010) demuestran, que la prerruptura inicial, es decir, la primera etapa de falla de un talud producida por reblandecimientos, se debe a la repetición de la dilatancia en periodos sucesivos de humedecimiento.

Sumado a lo anterior, evidencias de inestabilidad de taludes producto de ciclos de humedecimiento y secado se han estudiado en Colombia por Herrera y Lizcano (2007). Ellos muestran que, debido a la exposición de suelos de ceniza volcánica a ciclos intensos, se han generado alteraciones en la estructura, en el estado tensional y en el flujo de agua que circula a través del suelo, efectos que, a mayor o menor medida, alteran el comportamiento mecánico del suelo.

Además, Herrera y Lizcano (2007) agregan que, si en el suelo se tiene un estado de saturación completa, la pérdida de agua producto de las condiciones ambientales producirá contracción, mientras que, si el estado existente es de saturación parcial y se está en presencia de suelos finos como limos y arcillas, se desarrollarán fuerzas de succión. De acuerdo a esto, pueden generarse grietas en la superficie del suelo, las que producen zonas de inestabilidad y erosión. Una representación del deterioro sufrido por un talud estudiado por Herrera y Lizcano (2007) se expone en la Figura 12.

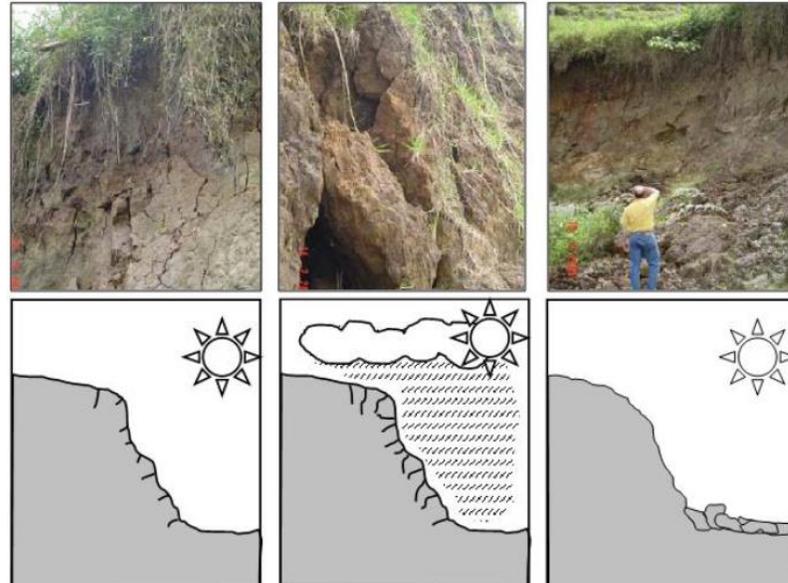


Figura 12. Degradación gradual de taludes. (Herrera y Lizcano 2007)

3. Técnicas de Fotogrametría

Dentro de las herramientas que tienen como finalidad determinar si existe un desplazamiento y/o una deformación sobre el suelo, se encuentra el monitoreo mediante instrumentación especializada y el análisis visual. El primero de ellos es capaz de determinar asentamientos, deslizamientos y consolidaciones, entre otros parámetros, mediante el uso de instrumentos como extensómetros e inclinómetros, mientras que el análisis visual consiste en estudiar las estructuras y objetos contiguos al suelo, evaluando si existen daños o variaciones en ellos y asociándolos directamente con la existencia de desplazamientos y/o deformaciones cuantificables.

Las ventajas comparativas de la identificación de desplazamientos y deformaciones mediante análisis visual sobre la instrumentación, son el menor costo y la posibilidad de realizar estudios sin generar alteraciones al suelo producto del contacto. Las desventajas son que solo permite realizar mediciones superficiales y que presenta una gran sensibilidad a los cambios de luminosidad y textura, que se pueden traducir en una pérdida de precisión.

Actualmente, el análisis visual se enfoca en la aplicación de técnicas de fotogrametría sobre imágenes consecutivas, para determinar las dimensiones de las deformaciones y de los desplazamientos originados producto de la variación de esfuerzos internos en el suelo.

Entre los métodos de fotogrametría utilizados para el estudio de deformaciones y desplazamientos, existen aquellos que incorporan la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (VIP), otros que implementan la correlación digital de imágenes (CDI) y aquellos que utilizan ambas (PIV-DIC).

En los últimos años, varios programas computacionales para el estudio de suelos mediante fotogrametría han sido desarrollados y, dentro de ellos se encuentran las aplicaciones creadas en el año 2015 por Blaber *et al.* (Ncorr) y Stanier *et al.* (GeoPIV-RG). El primero de ellos utiliza la técnica de correlación digital de imágenes, mientras que el segundo aplica una combinación de la velocimetría de imágenes de partículas y la correlación digital de imágenes. Ambos se utilizarán en este trabajo de título y su funcionamiento se explica a continuación.

3.1 Correlación Digital de Imágenes, Ncorr

La correlación digital de imágenes (CDI) es una técnica que se basa en el supuesto de que las características superficiales de un objeto, se desplazan junto con la superficie del objeto y se conservan después de la deformación. En consecuencia, al buscar una zona en dos imágenes consecutivas, se pueden determinar los desplazamientos (Yoneyama 2016). Por esta razón, para utilizar la correlación digital de imágenes, las superficies analizadas deben tener un patrón y, en el caso en el que no se observen rasgos distintivos en la superficie de un objeto, es necesario agregar una textura de manera artificial.

La CDI convierte la tonalidad de las imágenes en monocromáticas. De esta forma, un patrón aleatorio en la superficie del objeto se cuantifica como niveles de grises en los puntos de muestreo en un plano bidimensional. Los niveles de grises no uniformes se distribuyen en un subconjunto extraído de una imagen inicial, al registrar un patrón aleatorio en una superficie del objeto. Un área con niveles de grises equivalentes a los del subconjunto inicial se busca en la imagen capturada después de generar una deformación. Finalmente, se encuentra la posición del subconjunto en cada una de las imágenes posteriores a la inicial. La Figura 13 expone una representación del principio básico de esta técnica.

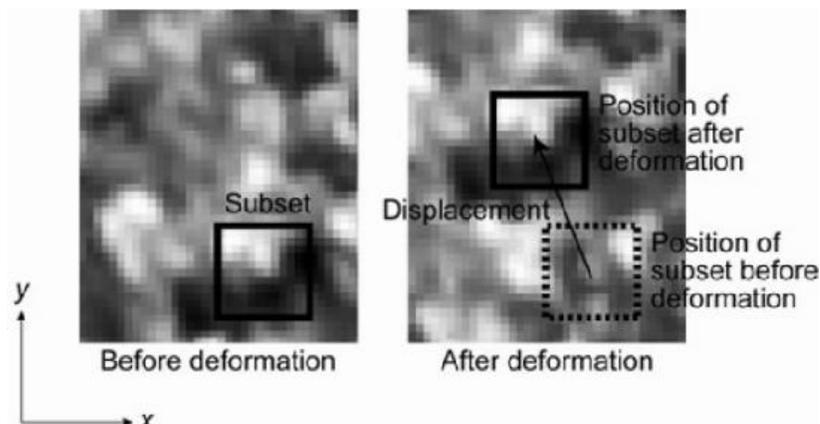


Figura 13. Funcionamiento de Correlación Digital de Imágenes. (Yoneyama 2016)

3.1.1 Funcionamiento del Programa Ncorr

El programa Ncorr es un software gratuito creado por Blaber *et al.* (2015) capaz de determinar deformaciones y desplazamientos a través de la correlación digital de imágenes (CDI).

El algoritmo que utiliza Ncorr consiste en dividir la imagen de referencia (usualmente no deformada) en regiones más pequeñas referidas como subconjuntos o subventanas de píxeles. La deformación se asume homogénea para cada subconjunto y se realiza un seguimiento al movimiento de cada uno de los subconjuntos en todas las imágenes procesadas, con respecto a la de referencia (Blaber *et al.* 2015).

Cuando se está en presencia de grandes deformaciones, Ncorr genera una actualización de la zona de interés (ZDI) para que la correlación entre imágenes no empeore y los resultados no se vean alterados. Para realizar esto, el programa crea un límite alrededor

de la zona, el cual es tratado como un polígono. Este límite se actualiza en base a los valores de desplazamientos obtenidos a través del campo de desplazamientos de la última imagen de referencia. La actualización ocurre cuando los valores de coeficiente de correlación o iteraciones para convergencia son superados.

El procedimiento que utiliza Ncorr para el cálculo de desplazamientos y deformaciones puede resumirse en 5 etapas.

1. Se definen los subconjuntos como un grupo de píxeles circulares y contiguos en las coordenadas de la configuración de referencia. Para llevar las coordenadas de los píxeles desde la imagen de referencia hacia el resto de las imágenes, se realiza una transformación de primer orden lineal.
2. El desplazamiento se determina mediante una estimación inicial, la cual es utilizada como dato de entrada para el esquema de optimización iterativa. Este valor es encontrado calculando la correlación cruzada normalizada en ubicaciones de píxeles enteros. La ubicación del subconjunto se recupera con respecto a la configuración de la imagen actual, ubicando el coeficiente de correlación máximo. De esta forma la estimación inicial genera los desplazamientos horizontales "U" y verticales "V" (en píxeles).
3. Se utiliza una optimización no lineal para mejorar los resultados con resolución de subpíxeles, buscando el mejor valor de los coeficientes de correlación, que está dado por el valor más cercano a cero. Para realizar esto, Ncorr usa el método de composición inversa de Gauss-Newton (IC-GN). Este es un método iterativo, que busca encontrar un valor óptimo del vector de desplazamientos refinado, que optimiza el coeficiente de correlación. En cada iteración el procedimiento encuentra una pequeña deformación ΔP del subconjunto de referencia inicial que se ajusta mejor al subconjunto deformado. El mejor valor de correlación (dado por el valor más cercano a 0) se encuentra con un procedimiento iterativo basado en las series de expansión de Taylor.
4. Para encontrar los valores para los demás puntos, Ncorr utiliza el método de fiabilidad guiada, el cual consiste en seleccionar un punto semilla (seed point), cuya ubicación corresponde al centro del subconjunto de referencia inicial usado en el análisis previo. Este punto es el único que utiliza la correlación cruzada normalizada, para obtener una estimación inicial dentro del subconjunto. Después de calcular los parámetros de deformación y correlación para el punto semilla, este se inactiva mientras que los contiguos a él se activan. Luego de esto, se forma una estructura de datos que almacena los valores de correlación, los 6 parámetros de deformación (considerando desplazamientos horizontales, verticales y sus derivadas) y la ubicación de los centros de cada subconjunto para cada uno de los puntos existentes en él. El programa comienza a iterar con los valores almacenados previamente en la estructura de datos. Luego, los 4 puntos circundantes, en el caso de que sigan activos y dentro de la región de interés, son analizados usando los datos de desplazamientos del último punto de la estructura de datos, considerando a este como la estimación inicial para el método de optimización no lineal. El proceso se repite hasta que ya no existan más puntos contiguos no analizados. La Figura 14 esquematiza el procedimiento descrito.

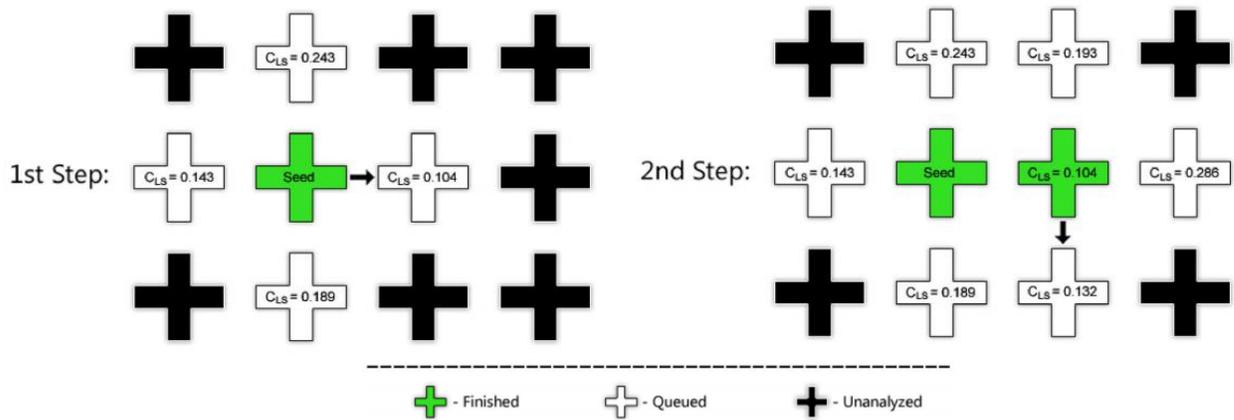


Figura 14. Esquema del proceso de fiabilidad guiada (Modificado de Blaber *et. al.* 2015).

- Finalmente, se calcula el campo de deformaciones, lo que involucra diferenciación. La diferenciación es sensible al ruido, lo que significa que cualquier ruido en el campo de desplazamiento, será aumentado al calcular las deformaciones. Ncorr utiliza el campo de deformaciones Green-Lagrangian, lo cual se traduce en 3 ecuaciones y 4 gradientes de desplazamiento como se presenta en la ecuación (1).

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right), \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right),$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right) \quad (1)$$

Donde:

- ε_{xx} [-]: Deformación en eje x.
- ε_{xy} [-]: Deformación en eje xy.
- ε_{yy} [-]: Deformación en eje y.
- u [px]: Desplazamiento horizontal.
- v [px]: Desplazamiento vertical.

3.1.2 Parámetros de Entrada de Ncorr

Los parámetros de entrada para el procesamiento de imágenes mediante Ncorr son 6 y se desarrollan a continuación. Además, en el Anexo A.1 se explica la forma de procesar las imágenes y la interfaz del programa.

- Radio de subconjuntos:** Define el tamaño de los subconjuntos en los que se divide la totalidad de la imagen.
- Espaciamiento entre subconjuntos:** Indica cada cuántos pixeles se analiza un nuevo subconjunto. Mientras menor sea este valor, resultados más precisos pueden obtenerse, pero mayor es el tiempo computacional requerido.
- Diferencia de norma de vector y cantidad de iteraciones:** Determinan los límites de la resolución iterativa. Ncorr sugiere utilizar 10^{-8} unidades como diferencia en la norma y una cantidad de 50 iteraciones.

- d) **Número de núcleos utilizados:** Limita la cantidad de recursos computacionales destinados al procesamiento de las imágenes.
- e) **Radio de subconjuntos deformados:** Define el radio de subconjuntos para obtener la deformación exhibida.

Asimismo, Ncorr permite activar configuraciones para imágenes con grandes deformaciones y análisis discontinuos. La activación del análisis para grandes deformaciones permite realizar una actualización de la zona de interés y de la imagen de referencia automáticamente. El análisis discontinuo evita que se generen errores en los subconjuntos aledaños a las zonas agrietadas.

Cuando las imágenes son procesadas con Ncorr es posible determinar dos o más zonas de interés independientes. Por este motivo, es posible analizar más de una zona simultáneamente con parámetros de entrada equivalentes entre sí.

En todos los análisis desarrollados en adelante los únicos valores que varían son los radios y espaciamientos entre subconjuntos. Los parámetros iterativos se definen según lo sugerido por Ncorr.

3.1.3 Resultados Gráficos de Ncorr

Los resultados que entrega Ncorr al procesar las imágenes son desplazamientos verticales y horizontales, además del campo de deformaciones ϵ_{xx} , ϵ_{yy} y ϵ_{xy} . Lo anterior se presenta tanto en matrices, como de forma gráfica con escalas de colores sobre las fotografías analizadas. Ejemplos de la aplicación del programa sobre muestras de bentonita y caolinita agrietadas producto de ciclos de temperatura, considerando los parámetros expuestos en la Tabla 4, se presentan en la Figura 16. La Figura 15 expone la situación final de las muestras analizadas.

Tabla 4. Configuración utilizada en programa Ncorr sobre muestras de caolinita y bentonita.

	Bentonita	Caolinita
Radio de Subconjuntos [px]	120	120
Espaciamiento de Subconjuntos [px]	12	12
Diferencia de norma [-]	10^{-8}	10^{-8}
Cantidad de Iteraciones [-]	50	50
Cantidad de núcleos [-]	8	8



Figura 15. Grietas en muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha).

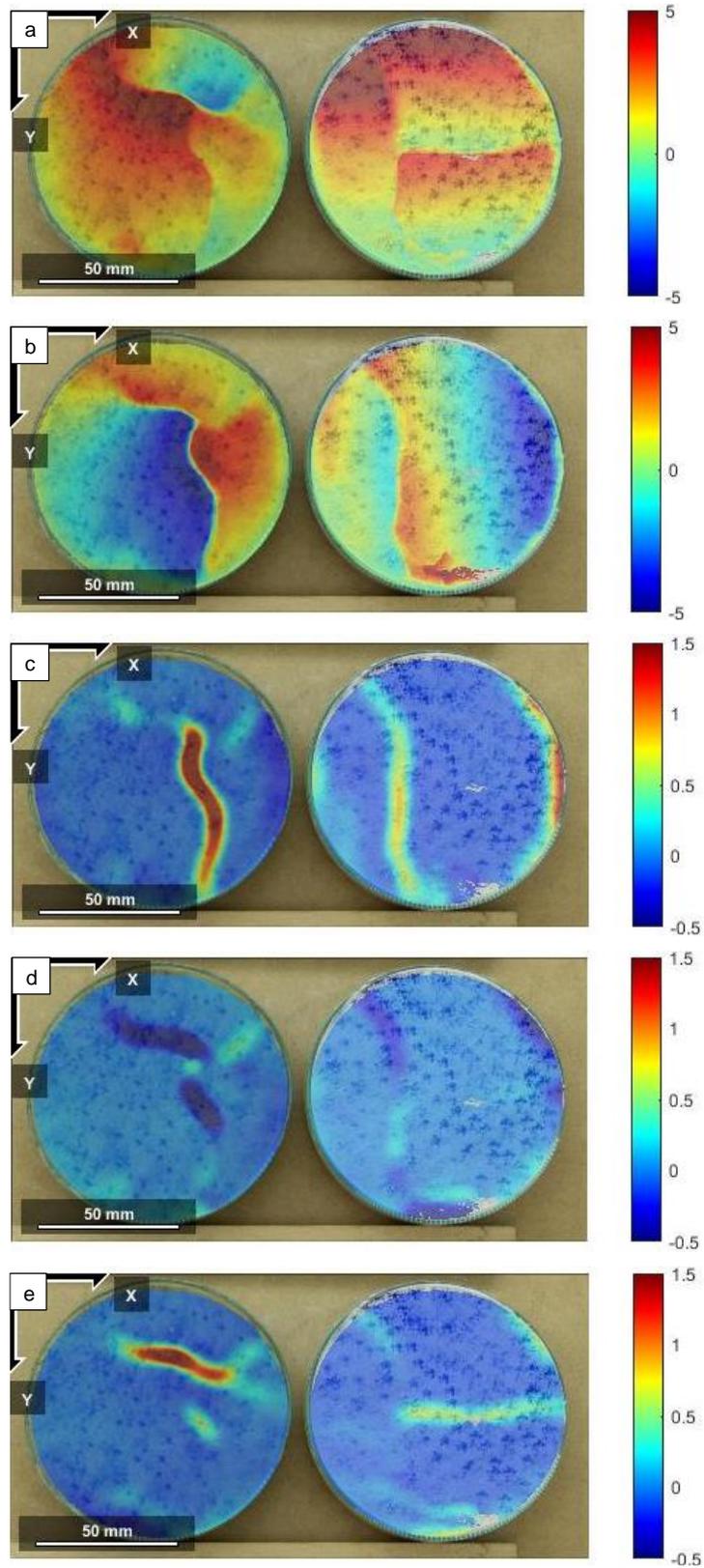


Figura 16. Resultados mediante Ncorr de (a) desplazamiento vertical y (b) desplazamiento horizontal [mm] de muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha). Además, se presentan las deformaciones (c) ϵ_{xx} , (d) ϵ_{xy} y (e) ϵ_{yy} .

3.2 Velocimetría de Imágenes de Partículas- Correlación Digital de Imágenes, GeoPIV-RG

La velocimetría de imágenes de partículas es una técnica que busca realizar un seguimiento a la textura de las imágenes analizadas (es decir, la variación espacial del brillo). A grandes rasgos esta técnica puede resumirse en las 5 etapas que se presentan a continuación y se resumen en la Figura 17.

- Se aplica un mallado a la imagen de referencia.
- Se identifica un cuadro de análisis en la imagen de referencia con coordenadas (u_1, v_1) y dimensiones $L \times L$.
- Se evalúa la correlación entre el cuadro extraído de la imagen 1 (tiempo= t_1) y un subconjunto más grande de la imagen 2 (tiempo= t_2). La nueva posición del cuadro de análisis se establece por la ubicación del subconjunto que genere la mejor correlación (determinada por el máximo valor).
- La ubicación de la correlación máxima se establece con precisión de subpixel ajustando una interpolación bicúbica alrededor del mayor peak en píxeles enteros.
- El procedimiento se repite para todos los cuadros del mallado dentro de la imagen y luego, para todas las imágenes dentro de la serie analizada, generando las trayectorias completas de cada cuadro.

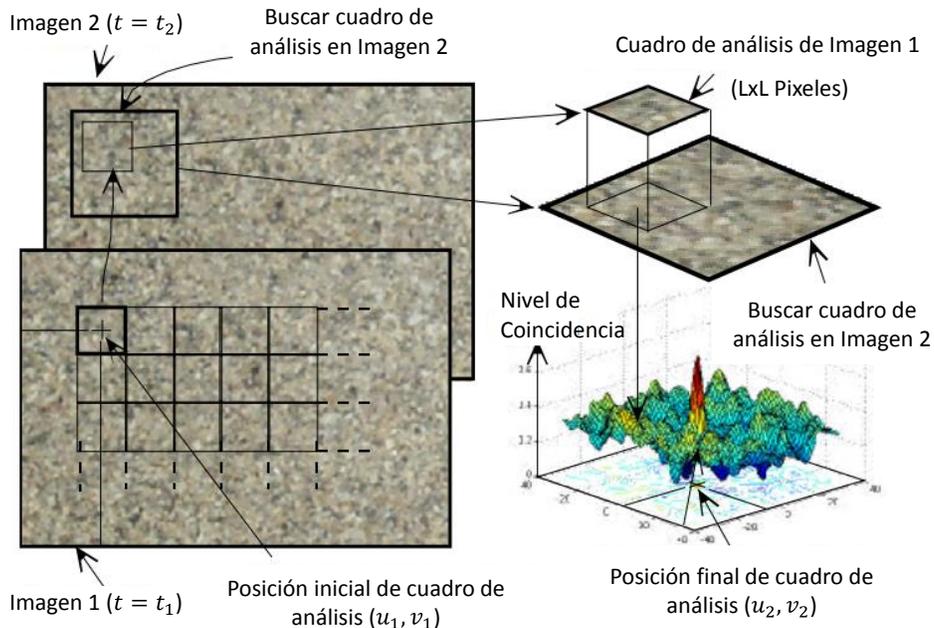


Figura 17. Esquema de funcionamiento de técnica VIP. (Modificado de White *et al.* 2002)

3.2.1 Funcionamiento del Programa GeoPIV-RG

El programa GeoPIV-RG es un software creado por Stanier *et al.* (2015), gratuito al igual que Ncorr, que permite obtener los desplazamientos y deformaciones mediante una mezcla de las técnicas de fotogrametría: velocimetría de imágenes de partículas (VIP) y correlación digital de imágenes (CDI).

El método que aplica GeoPIV-RG para obtener las deformaciones y desplazamientos, es bastante similar a Ncorr ya que ambos utilizan la fiabilidad guiada y un factor de correlación para encontrar la ubicación del subconjunto analizado.

GeoPIV-RG utiliza una combinación de un análisis de saltos (leapfrog) y uno secuencial (sequential). El primero consiste en analizar cada imagen respecto a la imagen de referencia inicial, lo que permite que no se generen errores aleatorios ya que considera el desplazamiento como el valor total existente entre dos imágenes y no como la suma de varios desplazamientos menores. Sin embargo, esto genera que exista una posible incompatibilidad entre lo analizado, por la baja correlación en las zonas de grandes deformaciones (Stanier *et al* 2015). Cuando la correlación alcanza el valor límite definido por el usuario, la imagen de referencia se actualiza y se desarrolla el análisis secuencial, lo que permite que disminuya la distorsión y, por ende, mejore la correlación entre las imágenes. Sin embargo, al mismo tiempo aumenta la acumulación de errores aleatorios debido a que el desplazamiento final es encontrado como la suma de muchos desplazamientos pequeños, cada uno de los cuales tiene asociado un error.

Luego de que el primer cuadro se analiza, los cálculos posteriores se condicionan usando los resultados de los subconjuntos vecinos que presenten la mejor correlación (definida por el mayor valor). Esto permite que no sea necesario definir una zona de búsqueda del subconjunto en la imagen actual, sino que queda definida por el resultado obtenido del subconjunto previo. Si existe una incompatibilidad de ese valor, entonces la zona de búsqueda se puede ampliar inclusive a toda la imagen.

Al contrario de Ncorr, GeoPIV-RG utiliza puntos de control estacionarios, es decir, necesita que las imágenes procesadas presenten puntos de referencia fijos con sus coordenadas definidas, para que el movimiento de la cámara pueda ser aislado del movimiento del suelo (White *et al.* 2002).

El algoritmo utilizado por GeoPIV-RG puede resumirse en 6 etapas (Stanier *et al.* 2015)

- 1- Se ingresan las imágenes, parámetros de análisis (coeficientes de correlación aceptables, y radios y espaciamientos de subconjuntos), región de interés y las coordenadas iniciales de los subconjuntos (mediante centroides de puntos de control y mallado).
- 2- El usuario selecciona un punto semilla en la imagen de referencia (imagen 1) y se define la imagen objetivo (típicamente imagen 2). Para el buen funcionamiento, el punto semilla debe exhibir pequeñas deformaciones a lo largo de la serie de imágenes de análisis con el fin de que presente una buena correlación y no entorpezca los resultados de los puntos contiguos.
- 3- Se calculan los desplazamientos del subconjunto semilla. Para esto, es necesario tener como datos de entrada las imágenes objetivo y de referencia, los parámetros de análisis y las coordenadas iniciales del punto semilla (x_i, y_i) . Luego, se utiliza la correlación cruzada para estimar el desplazamiento en número enteros de píxeles del subconjunto semilla. Se aplica la interpolación de composición inversa de Gauss-Newton (IC-GN) y una B-spline para los parámetros de deformación $\left(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}\right)$ dando un desplazamiento con

precisión de pixel. Por último, se generan como datos de salida las coordenadas optimizadas del subconjunto semilla (x_f, y_f) y el coeficiente de correlación cruzada normalizada $CC_{ZNCC-seed}$. La correlación cruzada normalizada se utiliza para indicar la compatibilidad que existe entre dos imágenes. Los valores 1,-1,0 indican correlación perfecta, inversa y nula respectivamente.

- 4- Se compara el coeficiente de correlación cruzada normalizada obtenido en la etapa 3 con el valor definido por el usuario (típicamente 0,9). Si se satisface la relación $CC_{ZNCC-seed} \leq CC_{ZNCC-seed-usuario}$ entonces es necesario actualizar la imagen de referencia y volver a la tercera etapa. En caso contrario se calcula el campo de desplazamientos usando una densidad dependiente del mallado definido por el usuario y el método de fiabilidad guiada (equivalente al expuesto en la sección 3.1.1 de Ncorr, pero considerando los puntos con valores máximos de correlación como los mejores)
- 5- Se interpola el campo de desplazamientos y el valor de correlación cruzada normalizada CC_{ZNCC} a las ubicaciones de mallado actual dadas por el usuario.
- 6- Se verifica si dado el mallado del usuario se cumple en todos los puntos que $CC_{ZNCC} \leq CC_{ZNCC-min-usuario}$. Si la relación no se cumple, entonces se ve si todas las imágenes en cola se analizaron. Si falta alguna, se actualiza la imagen objetivo y se vuelve al tercer punto hasta terminar la secuencia completa. Si todas las imágenes se analizaron se obtiene como resultado final las coordenadas de los puntos del mallado generado por el usuario (x_f, y_f) y los correspondientes valores de correlación para cada punto. Si la relación se cumple, entonces es necesario cambiar el valor de correlación y comenzar nuevamente el análisis.

3.2.2 Parámetros de Entrada de GeoPIV-RG

Los parámetros de entrada para el análisis mediante GeoPIV-RG son 6 y se desarrollan a continuación. En el Anexo A.2 se explica la forma de procesar las imágenes y la interfaz del programa.

- a) **Diámetro de subconjuntos:** Define el tamaño de los subconjuntos que dividen la imagen.
- b) **Espaciamiento entre subconjuntos:** Indica cada cuántos pixeles se analiza un nuevo subconjunto.
- c) **Límite de iteración y tolerancia de resultados de deformación:** Determinan los límites de la resolución iterativa. GeoPIV-RG sugiere utilizar 10 iteraciones como límite y una tolerancia de salida de 1e-5.
- d) **Coficiente de correlación de punto semilla $CC_{ZNCC-seed}$:** Limita las diferencias exhibidas entre un subconjunto y otro para aceptar la nueva posición del subconjunto deformado en los puntos semilla. Inicialmente se propone 0,9.
- e) **Coficiente de correlación mínimo:** Limita las diferencias exhibidas en los puntos que no son semilla. El valor inicial sugerido por GeoPIV-RG es de 0,75.

Como es posible observar un dato de entrada para utilizar el programa GeoPIV-RG es la correlación aceptable, mientras que en Ncorr el programa la obtiene como dato de salida, pero no restringe su análisis por ese parámetro. Esto hace que no sea necesario incluir el valor como usuario antes del procesamiento, generando una ventaja de Ncorr sobre GeoPIV-RG. Esto porque *a priori* no se conoce la correlación que el programa determina sobre las imágenes analizadas y, si los valores son sobrepasados, el análisis se termina generando pérdidas innecesarias de recursos computacionales y de tiempo, producto de la mala definición inicial de los límites.

En los análisis desarrollados con GeoPIV-RG solo se cambiaron los diámetros y espaciamientos de los subconjuntos, además de los coeficientes de correlación. Los límites de iteración se definieron de acuerdo a lo sugerido por el programa.

3.2.3 Resultados Gráficos de GeoPIV-RG

Los resultados que entrega GeoPIV-RG al procesar las imágenes, son matrices de desplazamientos verticales y horizontales, además del campo de deformaciones ϵ_{xx} , ϵ_{yy} y ϵ_{xy} . Gráficamente, el programa muestra los desplazamientos vectoriales de los puntos analizados, junto con los gráficos de contorno de desplazamientos horizontales, verticales y totales. Por último, GeoPIV-RG presenta gráficos de la deformación incremental sobre cada fotografía analizada. Ejemplos de la aplicación del programa sobre muestras de bentonita y caolinita agrietadas (Figura 15), considerando los parámetros expuestos en la Tabla 5 y la configuración de puntos de control presentada en la Figura 18, se muestran en la Figura 19. Los puntos de control negros no se consideraron en el análisis.

Tabla 5. Configuración utilizada en el programa GeoPIV-RG sobre muestras de caolinita y bentonita.

	Bentonita	Caolinita
Radio de Subconjuntos [px]	60	60
Espaciamiento de Subconjuntos [px]	12	12
Correlación punto semilla [-]	0,3	0,01
Correlación mínima [-]	0,15	0,005

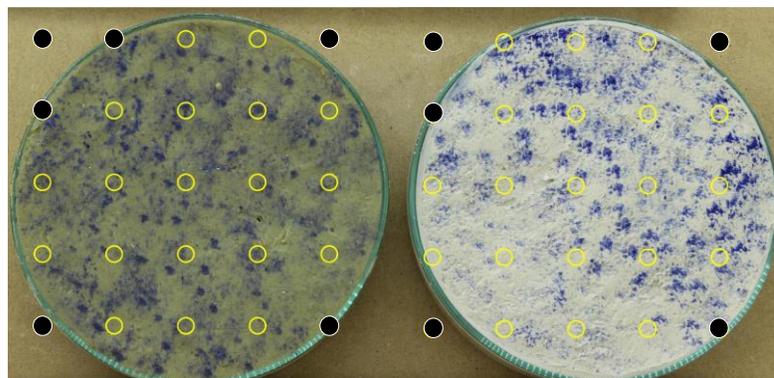


Figura 18. Puntos de control sobre muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha).

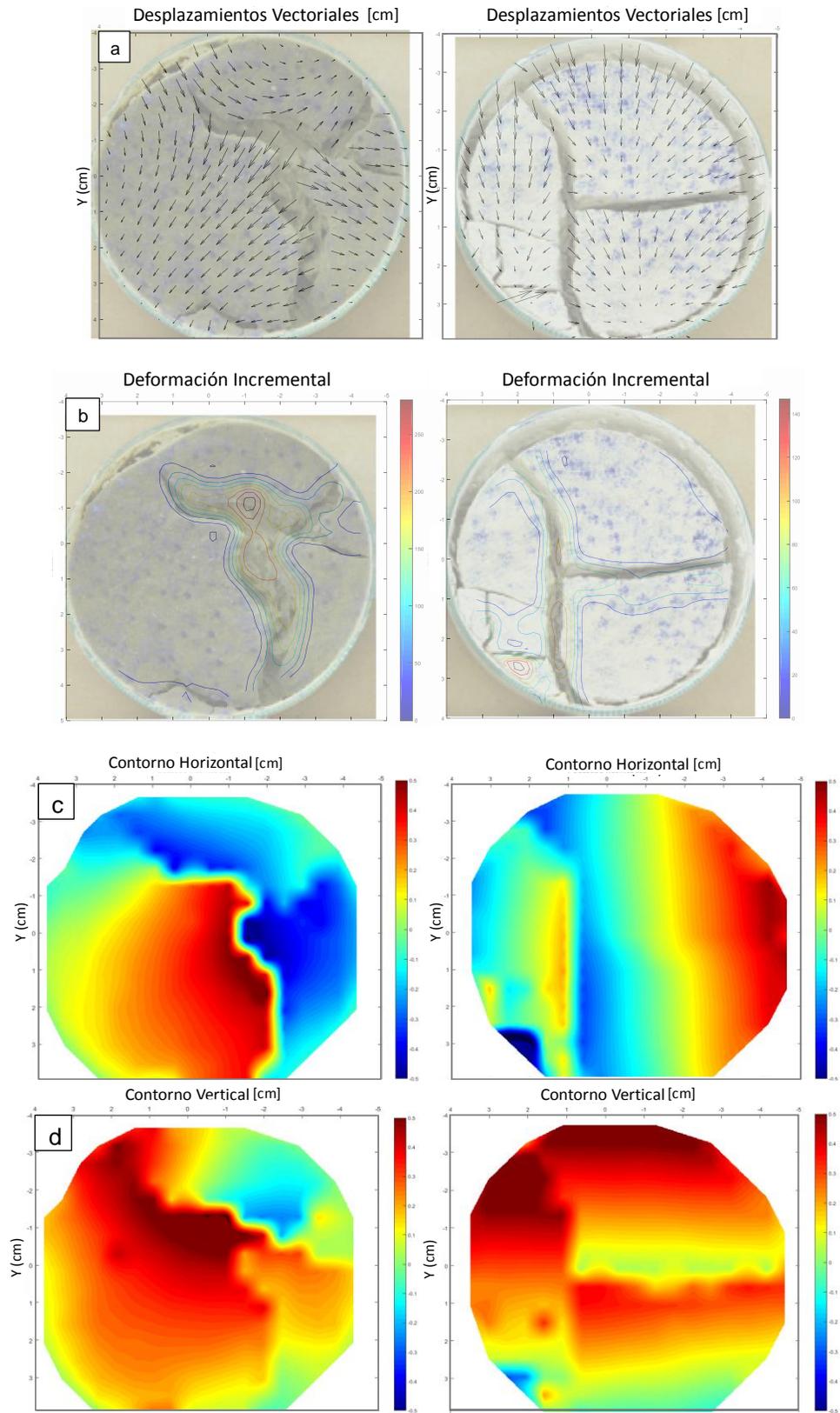


Figura 19. Resultados de (a) desplazamientos vectoriales y (b) deformaciones incrementales obtenidos mediante el programa GeoPIV-RG en muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha). Además, se presentan resultados de desplazamientos de contornos: (c) horizontal, (d) vertical y (e) resultante.

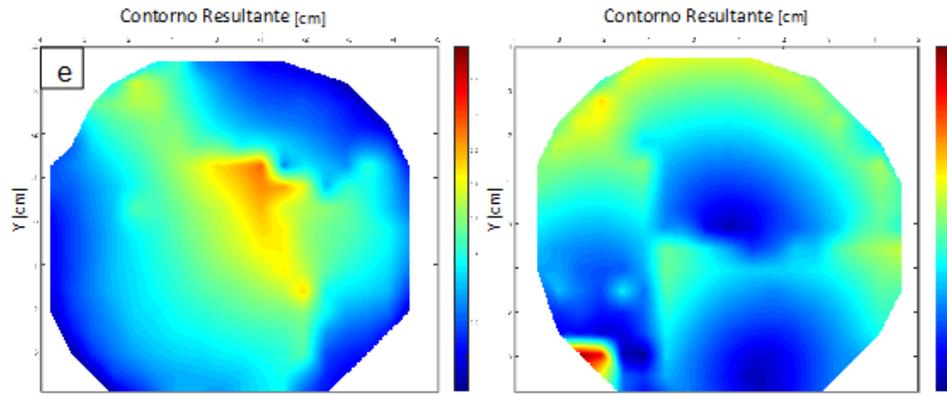


Figura 19 (continuación). Resultados de (a) desplazamientos vectoriales y (b) deformaciones incrementales obtenidos mediante el programa GeoPIV-RG en muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha). Además, se presentan resultados de desplazamientos de contornos: (c) horizontal, (d) vertical y (e) resultante.

3.3 Aplicaciones de Fotogrametría en Laboratorio

Estudios realizados por Take y Bolton (2010) referidos a la estabilidad de taludes arcillosos sometidos a ciclos de humedecimiento y secado, utilizan técnicas de fotogrametría para determinar los desplazamientos y deformaciones que se generan en la superficie de un talud mediante el uso del programa GeoPIV (versión anterior a GeoPIV-RG). Algunos resultados de desplazamientos vectoriales obtenidos mediante el procesamiento de imágenes sobre fotografías capturadas en etapas de contracción (secado del suelo) e hinchamiento (humedecimiento del suelo), se presentan en la Figura 20.

Asimismo, Shaojun *et al.* (2015) mediante el uso del programa GeoPIV estudiaron la superficie de falla que presenta un talud de arena y Ca-Montmorillonita, al someterlo a ensayos en los que varía el nivel de agua mediante test centrífugos. Resultados de los desplazamientos y de la superficie de falla generada mediante GeoPIV, se presentan en la Figura 21.

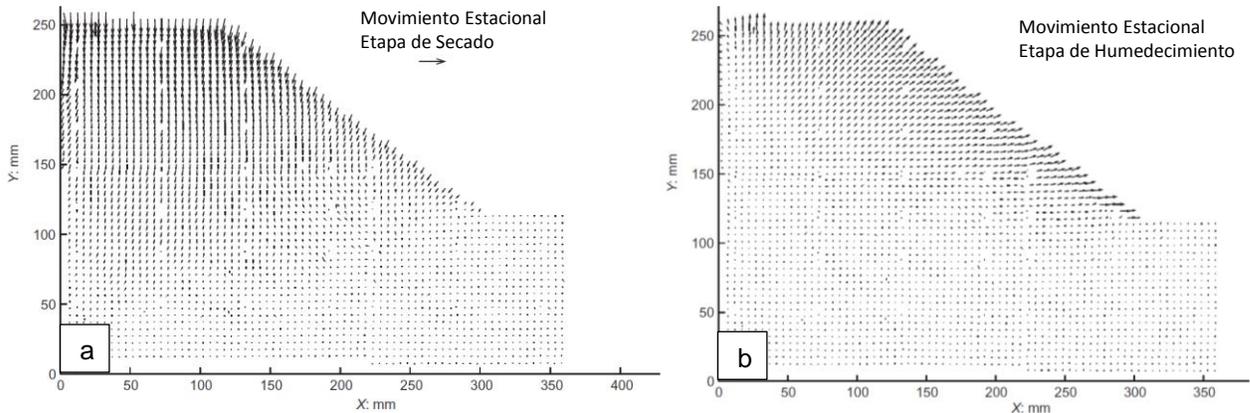


Figura 20. Resultados de desplazamiento vectorial en a) Ciclos de Secado y b) Ciclos de Humedecimiento (Modificado de Take y Bolton 2010).

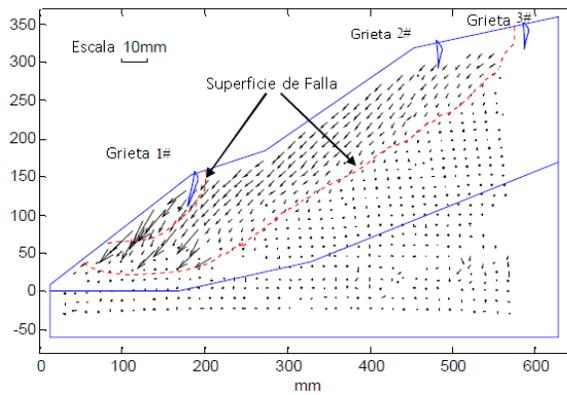


Figura 21. Desplazamientos vectoriales y superficie de falla sobre talud de arena y Ca-Montmorillonita. (Modificado de Shaojun *et al.* 2015)

Junto con lo anterior, estudios desarrollados por Wei *et al.* (2015) en muestras de arcilla, buscan entender cómo las grietas y microgrietas son capaces de propagarse y evolucionar al estar sometidas a condiciones de secado. Para desarrollar esto, utilizan el programa VIC-2D (software pagado que aplica la técnica CDI), para encontrar el campo de desplazamientos y calcular las deformaciones locales en las muestras estudiadas. Resultados del análisis generado se presentan en la Figura 22.

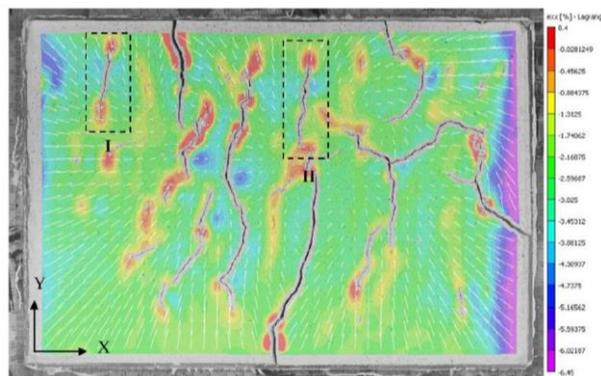


Figura 22. Deformación ϵ_{xx} en muestra de arcilla al utilizar programa VIC-2D. (Wei *et al.* 2015)

3.4 Técnicas de Monitoreo de Taludes en Terreno

Actualmente se utilizan diversos elementos para el control de estabilidad de taludes y superficies. Dentro de ellos se encuentra el LIDAR (Light Detection and Ranging), método que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie. Esta aplicación, puede ser tanto terrestre como aérea y consiste en generar millones de puntos (nube) que representan formas tridimensionales de las superficies respectivas. Luego de obtener la nube de puntos, es necesario aplicar un programa computacional capaz de procesar los datos.

Aplicaciones de esta técnica han sido desarrolladas en muchos lugares del mundo, considerando diversas magnitudes de desplazamientos. Caudal *et al.* (2016) aplican LIDAR terrestre y aéreo sobre una falla de talud en la mina LAB Chrysotile en Canadá. La zona de estudio y los desplazamientos acumulados se exponen en la Figura 23.

Otro de los instrumentos utilizados para el análisis de estabilidad y deslizamientos de tierra es el radar. Este instrumento es capaz de medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos tanto móviles como estáticos mediante el uso de ondas electromagnéticas. En comparación con LIDAR, es más lento y más caro, sin embargo, presenta la ventaja de poder funcionar en movimiento. Una aplicación del radar desarrollado para monitorear un talud ubicado en Granby, Colorado, llevada a cabo por Rosenblad y Gomez (2016) se presenta en la Figura 24.

De acuerdo a lo expuesto, es posible realizar el monitoreo de estabilidad de taludes mediante el uso de láser y radares; sin embargo, aplicaciones fotogramétricas a pequeña escala con bajo costo son menos frecuentes debido a que requieren controlar una gran cantidad de factores como los cambios de luminosidad, el movimiento de la cámara, la independencia en su funcionamiento y las referencias geográficas.

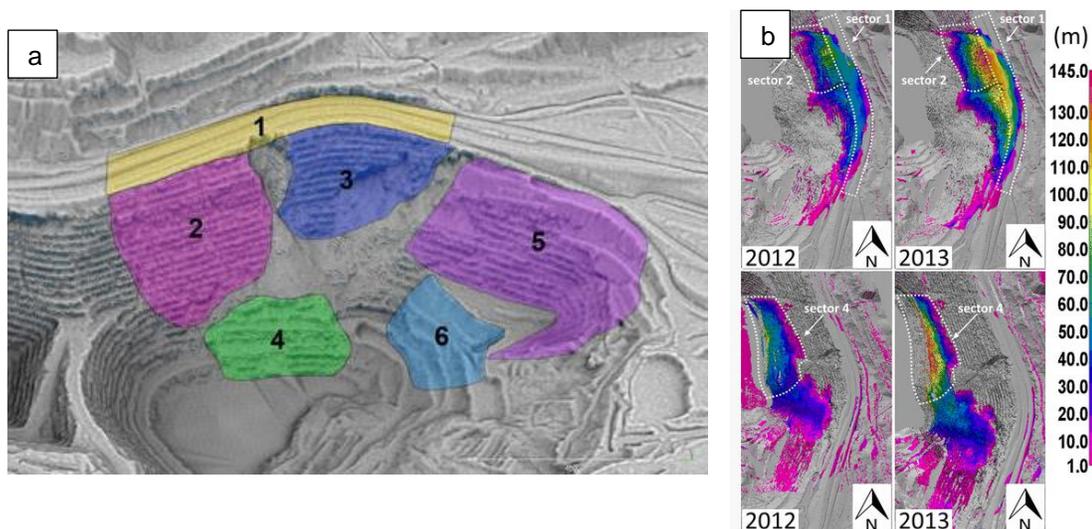


Figura 23. Resultados de análisis desarrollados con LIDAR terrestre y aéreo en la mina Chrysofile en Canadá. (a) Presenta la división por sectores de las zonas de análisis, mientras que (b) expone los desplazamientos acumulados entre 2010-2012 y 2010-2013. (Caudal *et al.* 2016)

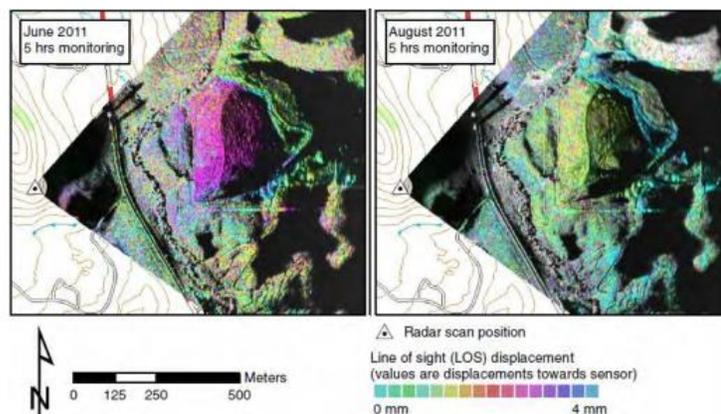


Figura 24. Mapas de desplazamiento derivado de monitoreo continuo a un talud usando radares. Rosenblad y Gomez (2016)

Producto de lo anterior, autores como Buill *et al.* (2016) realizan una comparación de técnicas de fotogrametría para el monitoreo de deslizamientos rocosos. Según su

estudio, uno de los mayores problemas para el uso de fotografías, es el efecto de sombras producto de los cambios de luminosidad generados, sin embargo, plantean que para resolver esto es posible utilizar la técnica HDR (high dynamic range), que tiene como objetivo generar un rango similar de luminosidad entre las imágenes procesadas. Su aplicación considera el uso de 3 fotografías con diferentes rangos de luminosidad utilizando una con su configuración específica, una segunda subexpuesta y la tercera ligeramente expuesta. Sin embargo, Buill *et al.* (2016) no realizan un seguimiento fotogramétrico con la técnica HDR, por lo que es solo una recomendación para un uso posterior. La Figura 25 presenta un ejemplo de lo propuesto por Buill *et al.* (2016).

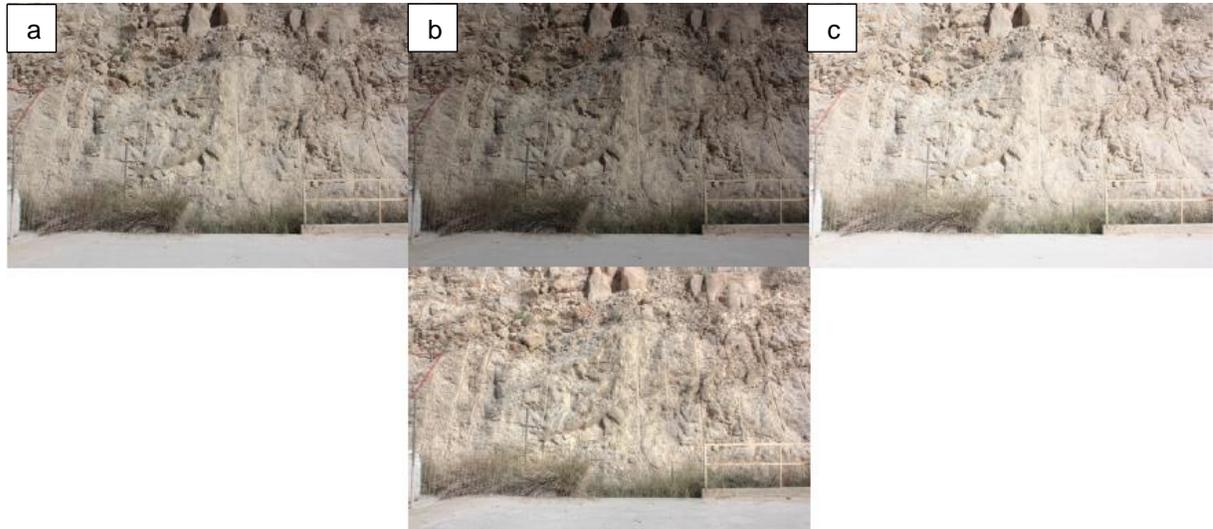


Figura 25. Resultado de imagen luego de aplicar la técnica HDR sobre 3 fotografías considerando (a) la configuración específica, (b) una configuración subexpuesta y (c) una configuración ligeramente expuesta (Modificado de Buill *et al.* 2016).

Además, Buill *et al.* (2016) señalan que, si bien existen ventajas en la fotografía aérea, como abarcar áreas más grandes y de difícil acceso, la fotogrametría terrestre es más económica y puede tener mejor resolución en comparación con videos grabados mediante UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Por último, los autores plantean que los errores generados producto de levantamientos tridimensionales son muy similares entre ambos métodos.

No obstante lo anterior y de acuerdo a lo estudiado por Travelletti *et al.* (2012), además del problema del cambio de luminosidad entre un instante de tiempo y otro, existe la alteración que puede sufrir la superficie en términos de vegetación y textura. Resultados obtenidos por los autores exponen una comparación de dos zonas de análisis. La primera no presenta grandes cambios en la vegetación y, al volver a fotografiar la zona un año después a la misma hora en un día despejado (para disminuir la probabilidad de alteraciones por luminosidad), es posible obtener los desplazamientos vectoriales esperados. Sin embargo, en la segunda zona existe una gran alteración en la vegetación y una disminución en la textura, lo que produce que las fotografías y por ende los

resultados se vean alterados. Una imagen de lo descrito se puede observar en la Figura 26.

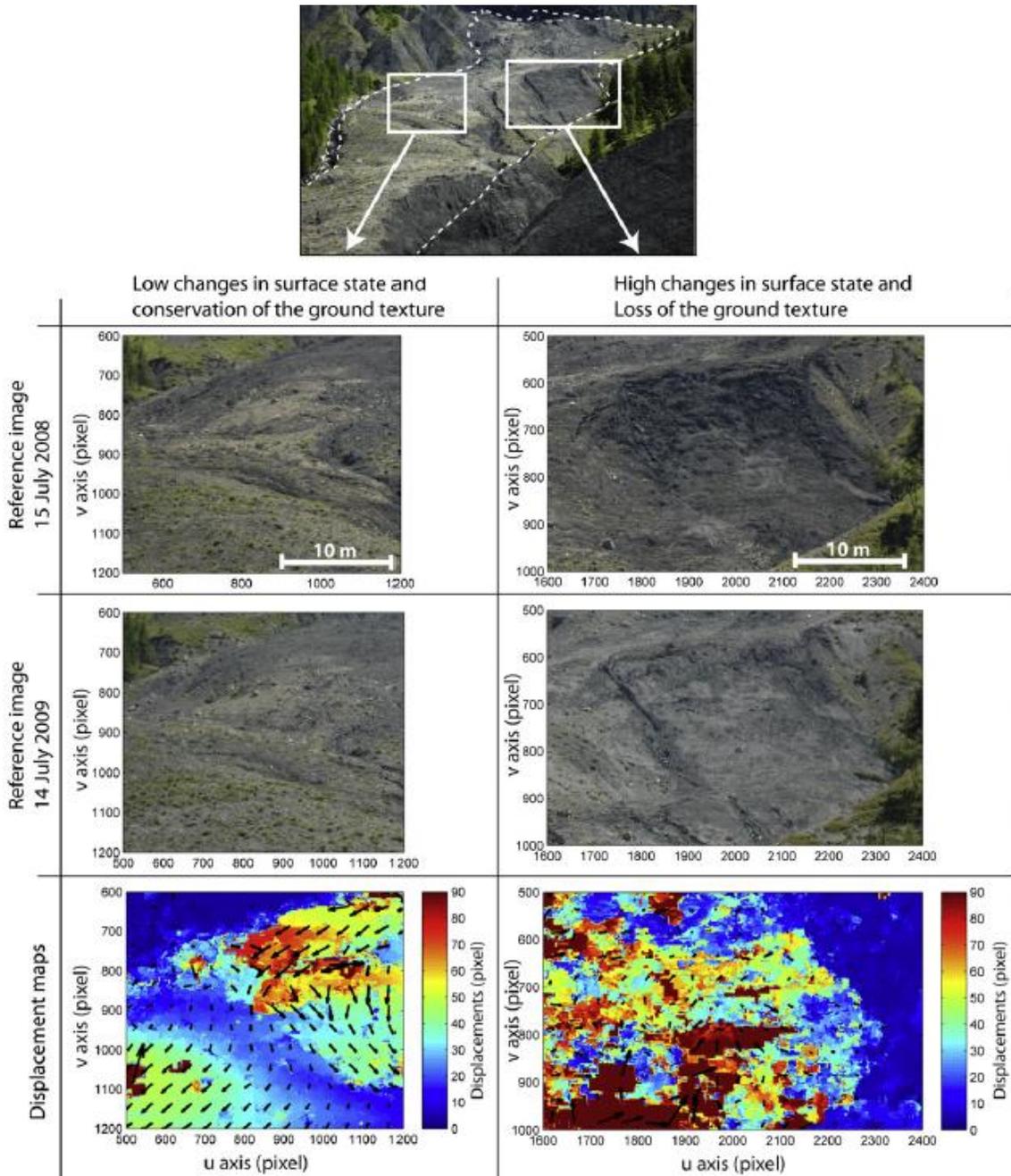


Figura 26. Comparación de resultados obtenidos mediante captura terrestre de fotografías en un intervalo de un año. Las imágenes de la izquierda presentan los desplazamientos asociados a una zona sin cambios bruscos superficiales, mientras que los cuadros derechos exponen desplazamientos más marcados asociados a cambios en la vegetación y la superficie (Travelletti *et al.* 2012).

Desplazamientos de tierra importantes se han desarrollado en la provincia de Sichuan, China. A causa de esto, Shi *et al.* (2016) plantearon un sistema de monitoreo en base a imágenes satelitales y a la técnica de correlación digital de imágenes para la determinación de desplazamientos y deformaciones en superficie. Los resultados obtenidos por los autores, señalan que los datos de satélites VHR (very high resolution)

pueden ser una fuente de información útil e inclusive única para dimensionar espacial y temporalmente los desplazamientos y deformaciones de la superficie y, que la correlación digital de imágenes es una técnica válida. Además, plantean que el sistema de adquisición de imágenes combinado con el detector de desplazamientos puede proveer un método de bajo costo para el estudio de deslizamientos de superficie. Algunos resultados de los desplazamientos obtenidos mediante uso de CDI, se presentan en la Figura 27.

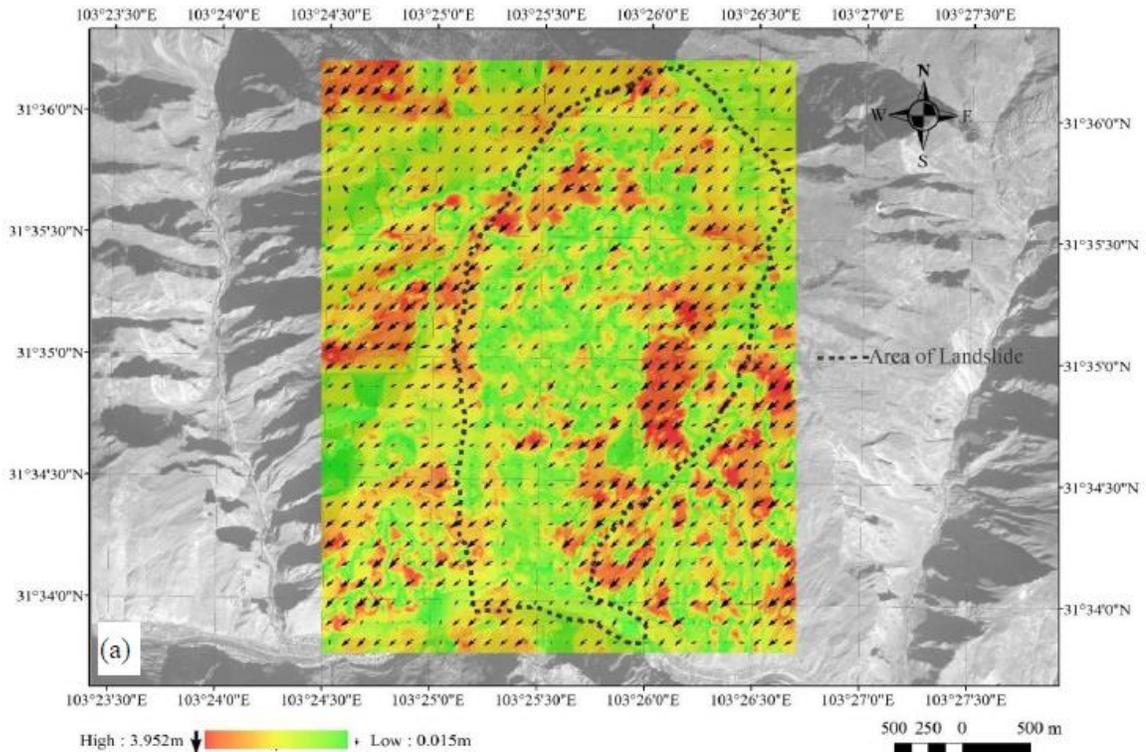


Figura 27. Mapa de desplazamiento horizontal entre Enero de 2010 y Febrero de 2013 en una ladera de Xishan. (Shi *et al.* 2016).

En el estudio desarrollado por Shi *et al.* (2016) no se generan alteraciones producto de la luminosidad o el cambio en la textura, como es el caso de Travelletti *et al.* (2012). Lo anterior se debe a que las escalas consideradas son totalmente diferentes, ya que mientras los cuadros analizados por el primero consideran dimensiones de 45x25 m² aproximadamente, las capturas estudiadas por Shi *et al.* (2016) abarcan zonas de 4500x2500 m². Sin embargo, al utilizar imágenes satelitales de alta resolución, generalmente un pixel equivale a 2,5-10 metros, los desplazamientos 2D medibles más pequeños son de 0,25-1 metro y la precisión que se puede alcanzar corresponde a 0,2 pixeles. Por otro lado, en las imágenes analizadas por Travelletti *et al.* (2012) la unidad de pixel corresponde a 0,04 metros aproximadamente, por lo que la precisión puede alcanzar mejores valores en el caso de la fotogrametría terrestre. Sin embargo, lo anterior está totalmente relacionado con la resolución de las imágenes utilizadas y las dimensiones analizadas.

4. Montaje Experimental

Los ensayos desarrollados en este trabajo de título consideraron la aplicación de ciclos de temperatura sobre muestras de suelos fotografiadas en intervalos constantes de tiempo, además de la caracterización de los materiales utilizados.

4.1 Ensayos Cíclicos de Temperatura

Las muestras de suelo se someten a ciclos de temperatura al interior de un contenedor de vidrio térmicamente aislado con planchas de poliestireno expandido. Las dimensiones del contenedor son 100cmx70cmx70cm (largo, ancho, alto), mientras que las planchas de poliestireno poseen un espesor de 4 cm.

En uno de los costados del contenedor, el poliestireno presenta una abertura que permite fotografiar las muestras ensayadas en distintos estados de deformación. Para el desarrollo de los ensayos se utiliza una base de madera inclinada en 58°, con el fin de obtener resultados perpendiculares entre la cámara y el suelo ensayado, además de generar desplazamientos en las muestras de suelo y arena. La base de madera se ubica directamente sobre el vidrio de la base y no sobre el poliestireno expandido, para prevenir la generación de desplazamientos relativos producto de la deformación del material. Todas las muestras analizadas se posicionan dentro de placas de Petri de vidrio de 9 cm de diámetro y 1,8 cm de alto, las que a su vez se ubican sobre la base de madera. En la Figura 28 es posible observar la disposición de los elementos utilizados dentro del contenedor en el laboratorio.

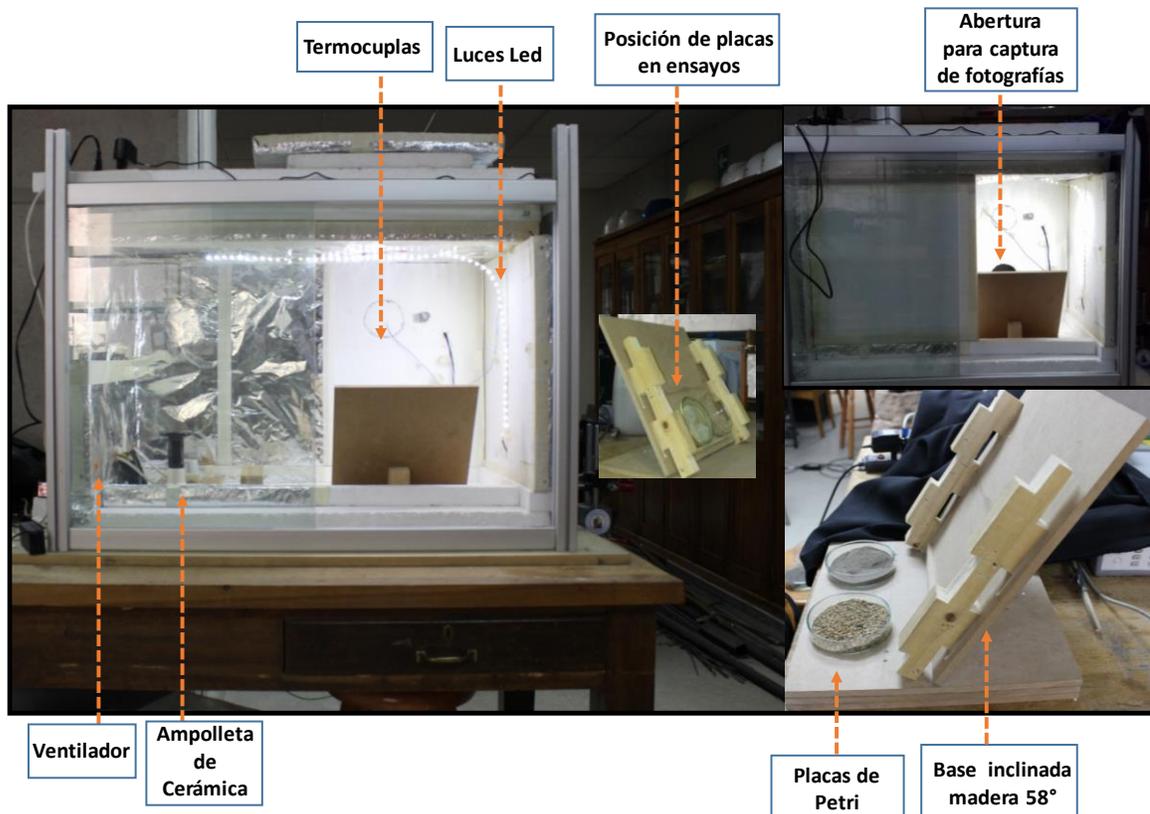


Figura 28. Disposición de contenedor térmicamente aislado e implementos utilizados en laboratorio.

4.1.1 Control de Temperatura

La temperatura varía cíclicamente al interior del contenedor producto del calor que genera una ampolleta de cerámica Exoterra de 60W, la cual se enciende y apaga a través de una conexión con un termostato AKO-D14726. En este aparato se define la temperatura mínima de funcionamiento, junto con la amplitud de los ciclos requerida.

Además, dentro del montaje experimental existen 4 termocuplas (Figura 28); 3 al interior del contenedor y una al exterior para medir la temperatura ambiente, las cuales están conectadas a un registrador de datos Agilent modelo 34972, el que a su vez está conectado a un computador. El registrador de datos captura los valores de temperatura cada 5 segundos. Debido a que no existe una calibración entre el termostato y las termocuplas, los valores entre ambas mediciones pueden diferir en aproximadamente 3 grados. Una imagen que representa el control de temperatura en laboratorio con computador, adquisidor de datos y termostato se presenta en la Figura 29.a.

4.1.2 Registro Fotográfico

Todos los ensayos son fotografiados con una cámara digital Canon EOS Rebel T3i y un lente Canon EF-S 18–55mm f/3,5-5,6. La utilización de ambos permite registrar fotografías de suelos finos con resolución de 5184 pixeles por 2527 pixeles y videos de arena de 640 pixeles por 480 pixeles, considerando 29 cuadros por segundo. Dado lo anterior, cada pixel representa 0,04 mm aproximadamente de las muestras de suelo y 0,4 mm de las de arena. La cámara se ubica en el costado trasero del contenedor, donde existe una abertura en el poliestireno extendido que permite al lente de la cámara enfocar el objetivo. La Figura 29.b presenta la disposición del trípode y la cámara en laboratorio.



Figura 29. Disposición de instrumentos para el control de temperatura (a) y el seguimiento fotográfico (b).

4.1.3 Iluminación

La iluminación de los ensayos se desarrolla mediante una cinta de 1 metro de luces led blanco frío de 24W de potencia, que se ubica al interior del contenedor, adherida al poliestireno en su costado derecho y en la parte superior. Su elección se debió a su bajo consumo energético, lo que permite que la generación de calor sea baja y no se alteren de forma considerable los ciclos de temperatura recreados por la ampolleta de cerámica. Exteriormente no es necesario mantener una iluminación constante, gracias a las opciones de configuración automáticas de sensibilidad ISO de la cámara, por lo que solo se considera la luz presente en el laboratorio en las distintas horas de grabación.

4.2 Ensayos de Caracterización de Materiales

Las muestras de suelo estudiadas correspondieron a materiales finos, como caolinita, bentonita y finos de relave, y a arenas medias y finas. Para poder analizar el comportamiento de los distintos materiales en estudio, se determinaron los límites de Atterberg de todos los suelos finos y se realizan ensayos de consolidación sobre las muestras de bentonita y caolinita.

4.2.1 Límites de Atterberg

El límite líquido de la bentonita, caolinita y finos de relave se determinó mediante el método de la Cuchara de Casagrande y el del Cono Sueco, en base a la norma ASTM Standard D4318 (2010). Para todos los suelos utilizados se consideró solo la porción que pasaba bajo la malla #200 debido a que esa es la fracción que se ensayó en los ciclos de secado. Los implementos utilizados para cada uno de los ensayos se presentan en la Figura 30.

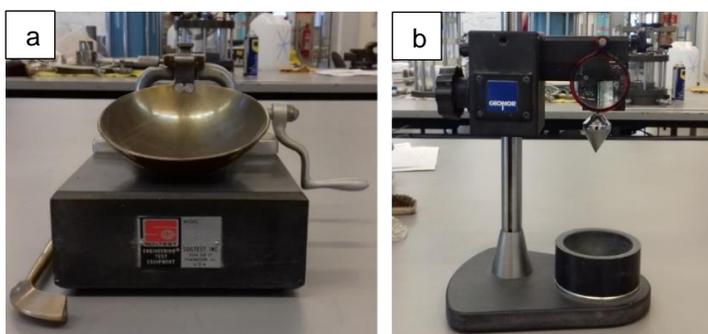


Figura 30. Instrumentos utilizados para determinación de límite líquido. a) Cuchara de Casagrande Soiltest, b) Cono Sueco Geonor.

Producto de la imprecisión exhibida en los resultados a partir de la cuchara de Casagrande, se optó por definir el valor del límite líquido de acuerdo al ensayo del Cono Sueco. Los resultados gráficos obtenidos mediante ambos métodos para la caolinita, bentonita y finos de relave se presentan en la Figura 31, Figura 32 y Figura 33 respectivamente.

El límite plástico de los suelos finos estudiados se obtuvo por medio del ensayo de amasado sobre dos muestras de cada tipo de suelo, de acuerdo a la norma ASTM Standard D4318 (2010). Los resultados obtenidos para este ensayo junto con los límites líquidos y el índice de plasticidad final, se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Resumen de valores de límites de Atterberg para los suelos finos estudiados.

	Caolinita	Bentonita	Relave
Cuchara Casagrande [%]	59,40	579,96	21,39
Cono Sueco [%]	67,10	456,05	25,51
Ensayo límite plástico 1 [%]	28,83	52,17	19,30
Ensayo límite plástico 2 [%]	30,57	51,72	19,64
Índice de Plasticidad [%]	37,30	404,05	6,03

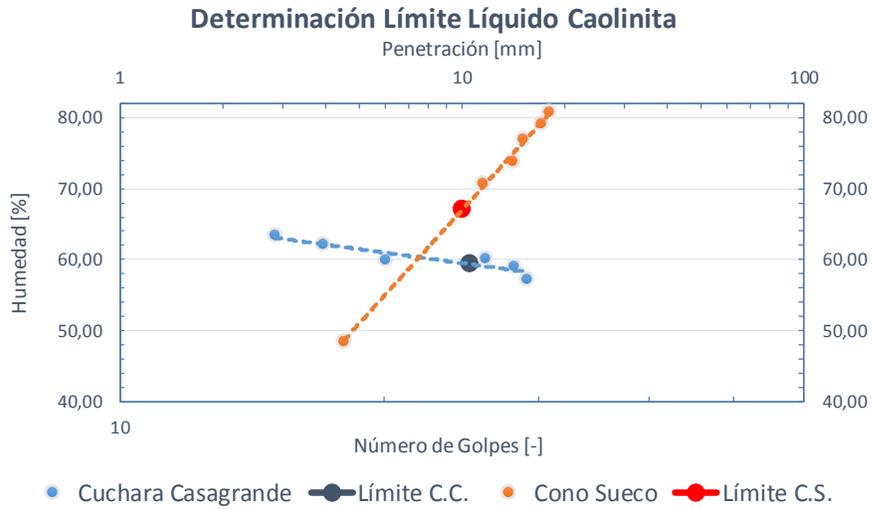


Figura 31. Determinación de límite líquido de la caolinita con Cuchara de Casagrande y Cono Sueco.

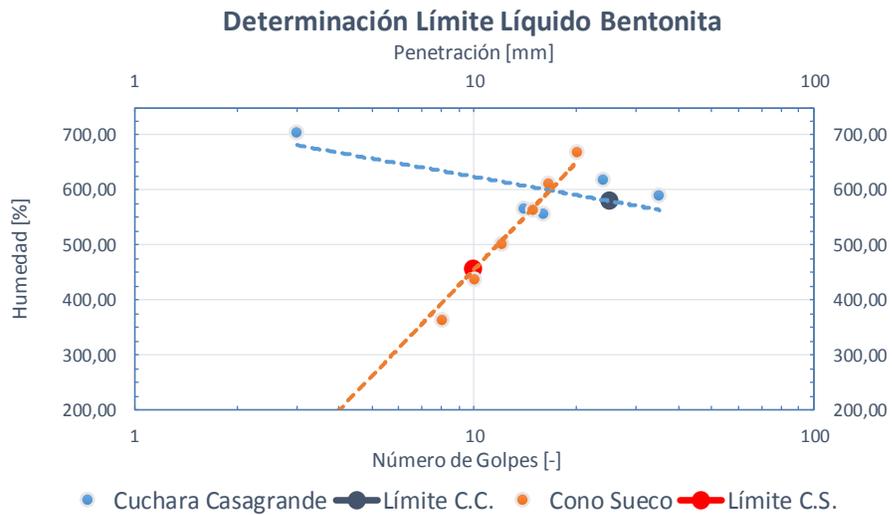


Figura 32. Determinación de límite líquido de la bentonita con Cuchara de Casagrande y Cono Sueco.

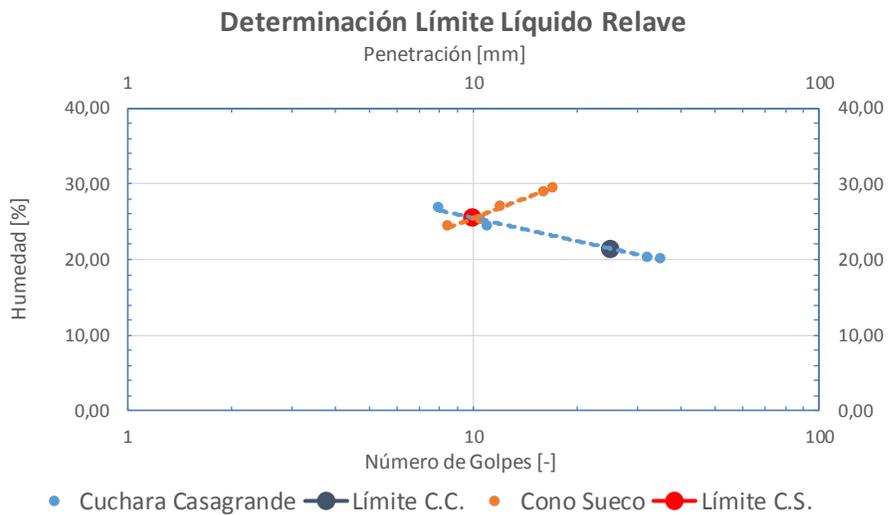


Figura 33. Determinación de límite líquido de finos de relave con Cuchara de Casagrande y Cono Sueco.

4.2.2 Ensayos Edométricos

Se realizaron ensayos de consolidación de acuerdo a la norma ASTM standard D2435 (1999), en las muestras de caolinita y bentonita, con el fin de identificar cómo afecta el índice de plasticidad a la compresibilidad de estos materiales. Los finos de relave no se analizaron producto de la disponibilidad de equipos, sin embargo, Sánchez (2016) realizó ensayos edométricos sobre probetas de relave integral, por lo que se utilizan sus datos para realizar la comparación entre todos los suelos finos utilizados (Figura 39). Algunas imágenes que muestran la instalación experimental del ensayo descrito, se presentan en la Figura 34.



Figura 34. Instalación experimental de ensayos de consolidación para caolinita y bentonita.

Las dimensiones de las probetas eran 2 cm de altura y 5 cm de diámetro aproximadamente. Los ensayos edométricos se realizaron durante 80 días, tiempo que fue insuficiente para completar los ciclos de carga y descarga de las muestras, por lo que la caolinita logró completar cargas de 0,1, 0,25, 0,5, 1, 2, 4 y 8 kgf/cm², además de dos ciclos de descarga de 4 y 1 kgf/cm², mientras que los ensayos de bentonita solo abarcaron 4 ciclos de carga de 0,1, 0,25, 0,5 y 1 kgf/cm². En la Tabla 7 se presentan las características iniciales de las probetas analizadas.

Los resultados de asentamientos en función del tiempo, producto de los ciclos de carga y descarga aplicados sobre la probeta de caolinita, se presentan en la Figura 35 y Figura 36 respectivamente, mientras que para la probeta de bentonita, lo obtenido a causa de las cargas aplicadas se expone en la Figura 37. Finalmente, se presentan los resultados del índice de vacío en función de la carga aplicada, para la probeta de caolinita en la Figura 38. Debido al prolongado tiempo de consolidación de la bentonita, el gráfico de esta arcilla no puede ser desarrollado.

Es importante señalar que en este trabajo de título no se desarrollaron ensayos de gravedad específica. Dado lo anterior, para poder obtener las curvas de los índices de vacío, se utilizaron datos de Medinaceli y Trujillo (2016).

Tabla 7. Características iniciales de probetas de caolinita y bentonita previas a ensayos de consolidación.

Características de Probetas		
Arcilla Analizada	Caolinita	Bentonita
Densidad Natural [g/cm ³]	1,81	1,26
Humedad Natural [%]	40,0	94,4
Densidad Seca Inicial [g/cm ³]	1,29	0,65
Índice de vacíos inicial [-]	1,011	2,709
Gravedad específica [-]	2,60	-

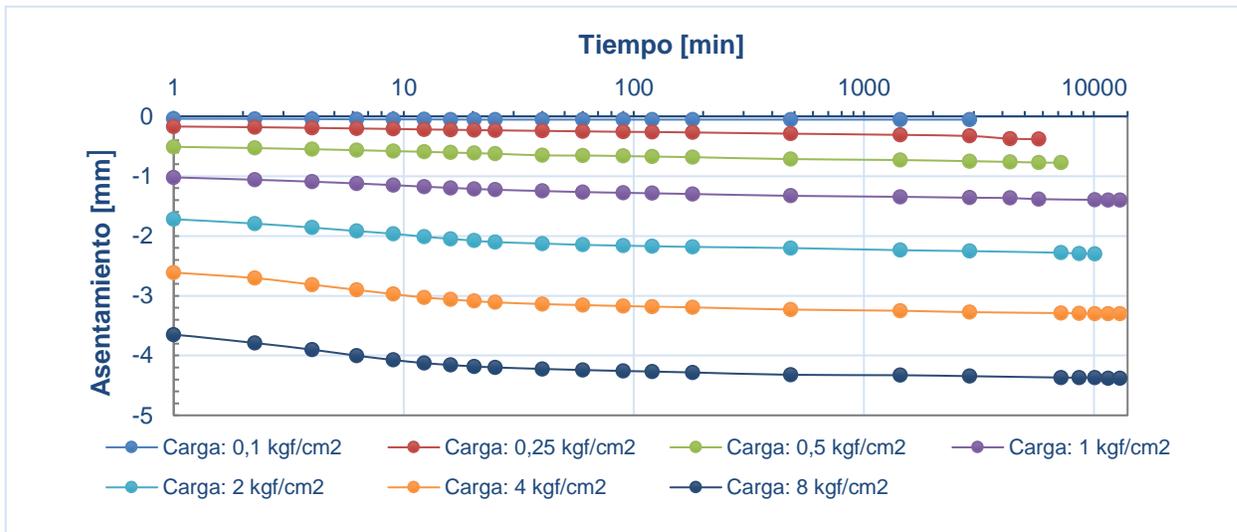


Figura 35. Asentamiento en función del tiempo para la probeta de caolinita en ciclos de carga en escala semilogarítmica.

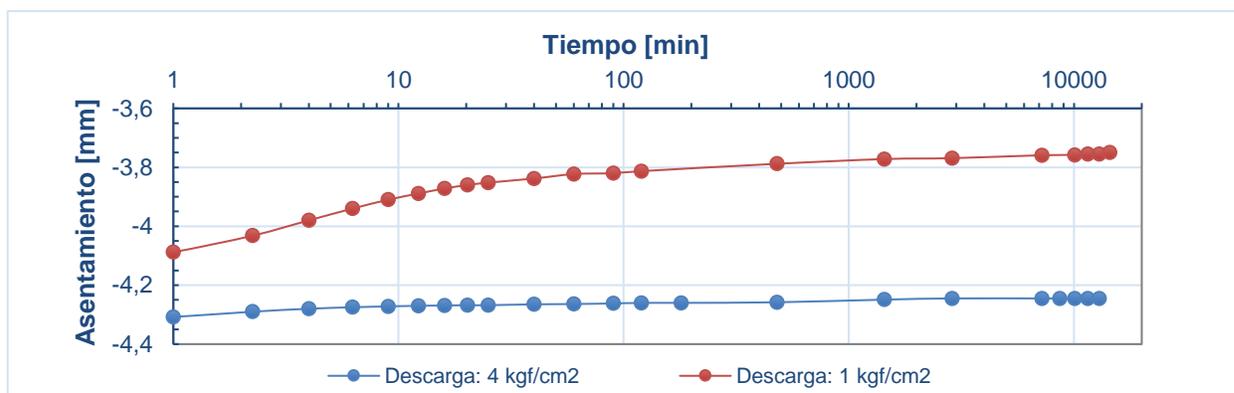


Figura 36. Asentamiento en función del tiempo para la probeta de caolinita en ciclos de descarga en escala semilogarítmica.

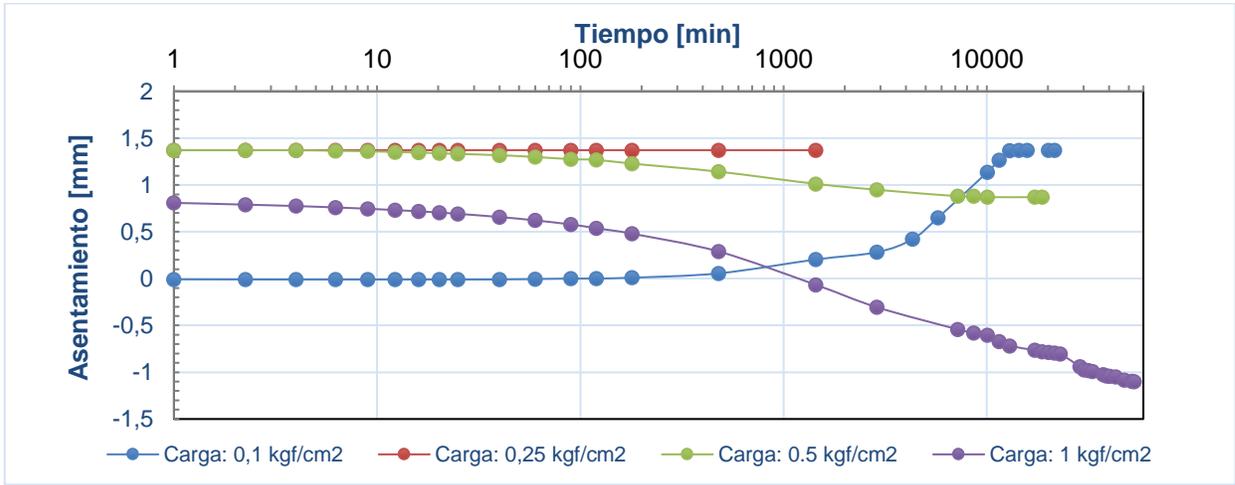


Figura 37. Asentamiento en función del tiempo para la probeta de bentonita en ciclos de carga en escala semilogarítmica.

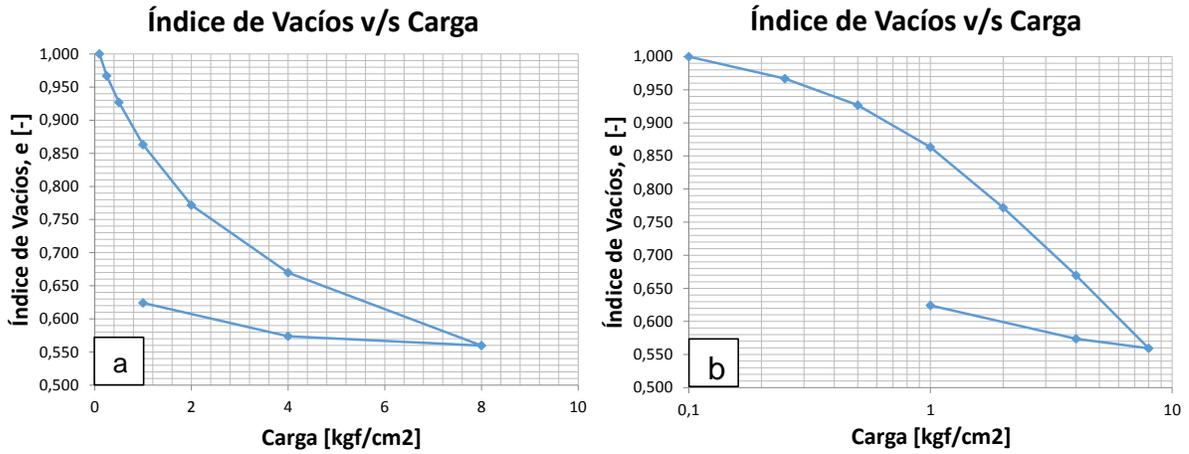


Figura 38. Índice de vacíos en función de la carga aplicada para probeta de caolinita en (a) escala lineal y (b) semilogarítmica.

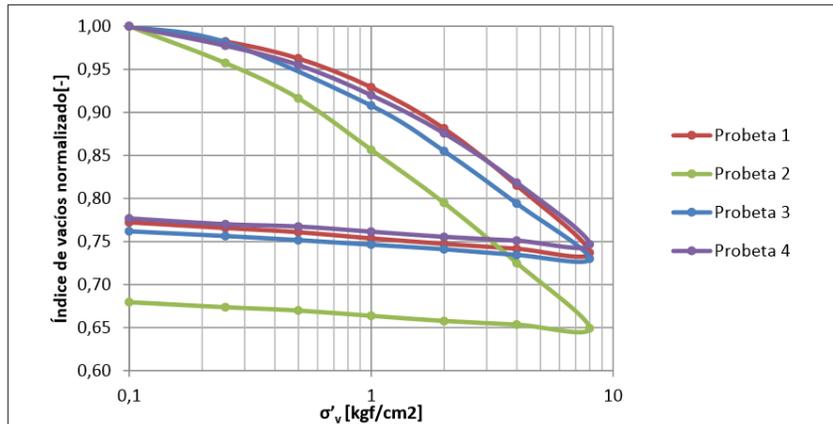


Figura 39. Índice de vacíos en función de la carga aplicada para probeta de relave integral en escala semilogarítmica (Sánchez 2016).

5. Análisis Fotogramétrico en Laboratorio

5.1 Captura y Selección de Imágenes

La captura de las fotografías comenzó con los ciclos de temperatura dentro del contenedor. Los suelos finos ensayados se fotografiaron cada 3 minutos durante 2 o 4 días dependiendo de las muestras en estudio.

Para el caso de arenas, tanto medias como finas, la frecuencia de muestreo inicialmente fue de 1 foto cada 180 segundos, de igual forma que la considerada para el caso de suelos finos. Sin embargo, producto de que los movimientos de arenas fueron de gran magnitud y repentinos, se realizaron videos con tasas de muestreo de 29 cuadros por segundo. De estos videos se seleccionaron los cuadros en los que se generaron desplazamientos importantes y con la ayuda del programa "Video to Picture", se convirtieron a fotografías de 640x480 pixeles. Si bien la calidad de las imágenes obtenidas mediante video fue notablemente menor a las capturadas directamente con la cámara, esta era la máxima posible con los implementos utilizados.

5.2 Procesamiento de Imágenes

El procesamiento de imágenes se realizó mediante los programas computacionales Ncorr y GeoPIV-RG, ambos compilados en rutinas desarrolladas para Matlab.

Para los análisis de desplazamientos y deformaciones de suelos finos, se utilizaron intervalos de 10 fotografías, es decir, imágenes cada 30 minutos con el fin de generar un ahorro en los recursos computacionales, mientras que el procesamiento de imágenes de arenas medias y finas consideró fotos cada 3 minutos y cuadros cada 0,034 segundos (extraídos de videos).

El procesamiento con el programa Ncorr no requirió que las imágenes presentaran características especiales; sin embargo, para realizar los análisis con el programa GeoPIV-RG fue necesario contar con puntos de control estáticos dentro de las fotografías que permitieran controlar el movimiento de la cámara. Durante los ensayos realizados, estos puntos no se incorporaron producto de que pudieran entorpecer los resultados al eliminar zonas de análisis, además de generar sombras sobre las muestras. Por esto, se agregaron con posterioridad puntos de control sobre las fotografías con el software Matlab.

Lo anterior consistió en generar círculos de 50 pixeles de radio (en el caso del análisis mediante fotografías) y 5 pixeles de radio (para las imágenes adquiridas mediante videos), equiespaciados cada 450 y 60 pixeles, respectivamente, en la imagen de referencia del ensayo. La rutina definía las posiciones y la cantidad de círculos generados, además de recortar las secciones de los círculos de la primera imagen. Teniendo los círculos de la imagen de referencia, estos se agregaron sobre las imágenes posteriores, utilizando las mismas coordenadas iniciales. Luego de esto, fue posible procesar las imágenes en GeoPIV-RG. La configuración de puntos de control definida para cada ensayo realizado, se puede apreciar en el Anexo B.

Cada ensayo presentó una configuración de imágenes diferente debido al tiempo destinado para su realización, a la disposición de la cámara y a la muestra en estudio. Para el caso de los ensayos con suelos finos, se consideraron diversas configuraciones sobre las placas de Petri. En una se cubrió totalmente la superficie de las placas con y sin contacto lateral entre el vidrio y el suelo. En la otra, se cubrió solamente la mitad de la superficie de las placas. Los espesores de suelo en las placas también son variables. En el caso de arenas, se utilizaron arenas medias y finas considerando imágenes provenientes tanto de fotografías como de cuadros de video. Los parámetros utilizados para el procesamiento de imágenes, tanto para suelos finos como para arenas, se presentan en la Tabla 8 y Tabla 9, respectivamente.

Tabla 8. Resumen de configuración utilizada para el procesamiento de fotografías en ensayos de suelos finos.

Superficie	Bentonita-Caolinita					Relave		
	Completa			Completa	Media	Completa		
Contacto Lateral	Sí			No	Sí	Sí		
Espesor de muestras [cm]	1,8	0,8	0,2	1,8	0,8	1,8	0,8	0,2
Cantidad de Fotos Analizadas [-]	94	90	44	139	49/91*	46	95	86
Intervalo de Tiempo entre Fotos [min]	30	30	30	30	30	30	30	30
Equivalencia de pixel [mm]	0,0396	0,0426	0,0374	0,0425	0,0379	0,034	0,0378	0,0382

* El análisis de fotografías en ambos programas para caolinita consideran 49 fotos y para bentonita 91 fotos debido al desplazamiento generado en la primera muestra.

Tabla 9. Resumen de Configuración utilizada para procesamiento de fotografías en ensayos de arenas.

Tipo de Registro	Arena Media		Arena Fina	
	Fotos	Video	Video	Video
Cantidad de Fotos Analizadas [-]	30	27	27	28
Intervalo de Tiempo entre Fotos [s]	180	0,034	0,034	0,034
Equivalencia de pixel [mm]	0,0280	0,2943	0,3054	0,3078

Las configuraciones definidas en el programa GeoPIV-RG para cada análisis desarrollado se presentan en la Tabla 10 y Tabla 11, mientras que los parámetros considerados con el programa Ncorr se exponen en la Tabla 12 y Tabla 13.

Es importante señalar que con el programa Ncorr se realizaron dos análisis con distintos parámetros de entrada para el caso de suelos finos, mientras que con GeoPIV-RG solo se abordó una configuración. Para el caso de arenas ambos programas consideraron solo una configuración de uso.

Tabla 10. Parámetros de entrada para el análisis de fotos con programa GeoPIV-RG en suelos finos.

Superficie	Bentonita-Caolinita					Relave		
	Completa			Completa	Media	Completa		
Contacto Lateral	Sí			No	Sí	Sí		
Espesor de muestras [cm]	1,8	0,8	0,2	1,8	0,8	1,8	0,8	0,2
Espaciamiento Subconjunto [px]	12	12	6; 12*	12	12	12	12	12
Diámetro Subconjunto [px]	120	120	60; 120*	120	120	120	120	120
Correlación punto semilla [-]	0,01; 0,3 *	0,3	0,1; -0,2*	0,0025; 0,035*	0,3; 0,0075*	0,0003	-0,03	-0,07
Correlación mínima [-]	0,005; 0,15*	0,15	0,005; -0,35*	0,0012; 0,015*	0,15; 0,0035*	1,5x10 ⁻⁵	-0,015	-0,06
Cantidad puntos de Control [-]	19; 20*	18; 19*	21	18; 15*	13; 11*	23	20	20

* El primer valor corresponde al análisis para caolinita mientras que el segundo muestra la configuración para la bentonita. Si se presenta un solo valor, entonces ambas muestras utilizan configuraciones equivalentes.

Tabla 11. Parámetros de entrada para el análisis de fotos con el programa GeoPIV-RG en arenas.

Tipo de Registro	Arena Media		Arena Fina	
	Fotos	Video	Video	Video
Espaciamiento Subconjunto [px]	12	1	1	1
Diámetro Subconjunto [px]	120	20	20	20
Coefficiente Correlación semilla [-]	0,1	0,005	0,1	0,2
Coefficiente Correlación mínima [-]	0,05	0,0025	0,005	0,05
Cantidad puntos de Control [-]	12	19	18	17

Tabla 12. Parámetros de entrada para el análisis de fotos con el programa Ncorr en suelos finos.

Superficie	Bentonita-Caolinita					Relave		
	Completa			Completa	Media	Completa		
Contacto Lateral	Sí			No	Sí	Sí		
Espesor de muestras [cm]	1,8	0,8	0,2	1,8	0,8	1,8	0,8	0,2
Espaciamiento Subconjuntos [px]	12; 5	12; 5	5; 2	12; 5	12; 5	5	4; 2	4; 2
Radio Subconjunto [px]	120; 70	120; 70	20; 10	120; 70	120; 70	70	40; 20	40; 20
Radio Subconjunto Deformación [px]	5	5	5	5	5	5	5	5

Tabla 13. Parámetros de entrada para el análisis de fotos con el programa Ncorr en arenas.

Tipo de Registro	Arena Media		Arena Fina	
	Fotos	Video	Video	Video
Espaciamiento Subconjuntos [px]	5	1	1	1
Radio Subconjunto [px]	70	10	10	10
Radio Subconjunto Deformación [px]	5	5	5	5

5.3 Recursos Computacionales Utilizados

Para realizar el procesamiento de las imágenes, se utilizó un computador que presenta las características que se exponen en la Tabla 14. En el caso de Ncorr, una de las opciones del programa es decidir la cantidad de núcleos con los que se quiere trabajar, lo cual siempre se fijó como el máximo disponible. Sin embargo, cuando el análisis se desarrolla con GeoPIV-RG, la opción no está disponible y el código es cerrado, por lo que no se conoce realmente su uso de recursos.

Tabla 14. Recursos computacionales utilizados en el procesamiento de las imágenes.

Recursos Computacionales	
Sistema Operativo	Windows 7, 64 bits
Cantidad de Núcleos [-]	8
Procesador	AMD FX(tm)-8350
Memoria Ram [Gb]	32

La demora en obtener los resultados tiene una relación directa con la cantidad de fotos procesadas y la facilidad con la que puede reconocerse la zona de estudio en todas las fotografías. Por lo tanto, mientras las fotos presenten una mayor textura, el tiempo de procesamiento disminuye, la correlación mejora, el ruido se reduce y los resultados son más confiables (McCormick y Lord 2010). Además, el coeficiente que permite generar un ahorro en el tiempo de análisis, es el espaciamiento definido para los subconjuntos, ya que mientras mayor sea este valor, más rápido es el análisis, pero menos puntos se analizan, lo que puede generar que los resultados se distorsionen.

Considerando las aplicaciones desarrolladas, el tiempo de demora en analizar 90 fotografías de 4.250.932 px² es aproximadamente de 24 horas en Ncorr y de 72 horas en GeoPIV-RG con las configuraciones de la Tabla 10 y Tabla 12, respectivamente. Sin embargo, existe la posibilidad de realizar un análisis más grueso *a priori* que permita identificar a grandes rasgos los desplazamientos existentes y reduzca el gasto de recursos.

Un ejemplo de la situación descrita se puede apreciar en la Figura 40. En ella pueden observarse 4 imágenes correspondientes a los desplazamientos vectoriales obtenidos mediante GeoPIV-RG y los totales generados mediante un procesamiento posterior de los datos de una muestra de bentonita, con el software Matlab. Los resultados se obtienen tras realizar el análisis de 90 fotografías con el programa, considerando un diámetro de subconjunto de 120 píxeles y un espaciamiento entre subconjuntos de 120 píxeles versus uno de 120 y 12 píxeles, respectivamente. La comparación expuesta tiene la ventaja de

que el procesamiento más grueso se puede alcanzar en solo 3 horas y, al graficar los desplazamientos vectoriales, es posible identificar el movimiento y sentido de los puntos. Sin embargo, esto no proporciona mayor información y ambos análisis no son comparables.

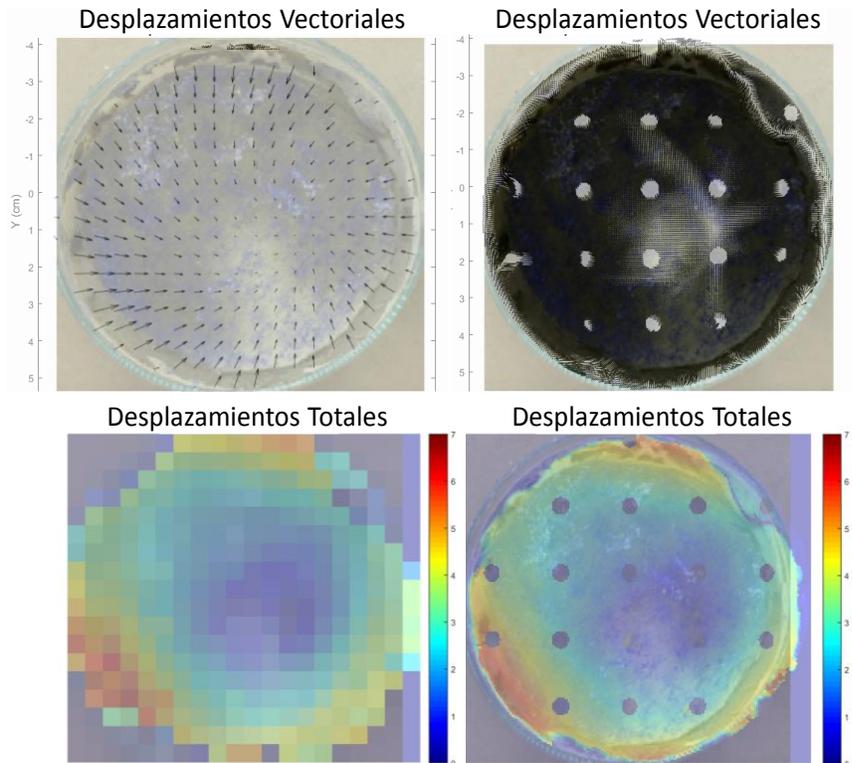


Figura 40. Comparación de desplazamientos vectoriales y totales mediante un análisis desarrollado con un espaciado de subconjuntos de 120 píxeles (izquierda) y con uno de 12 píxeles (derecha) en GeoPIV-RG.

Una comparación similar puede realizarse mediante el software Ncorr. Este programa considera un valor máximo de espaciado de subconjuntos de 20 píxeles, por lo que el análisis de 90 fotos tarda aproximadamente 13 horas y los resultados se distorsionan totalmente. En la Figura 41 se puede apreciar una comparación de lo obtenido con una configuración de radio del subconjunto de 120 píxeles y espaciados de 20 y 12, respectivamente. Las imágenes presentadas consideran las deformaciones ϵ_{xx} obtenidas mediante Ncorr y los desplazamientos totales generados, luego de un procesamiento posterior de los datos.

Como se puede apreciar, en el caso de Ncorr los resultados obtenidos con un análisis más grueso (20 píxeles) no representan lo que realmente ocurre, por lo que no sirve como una aproximación inicial de un análisis fotogramétrico. Además, el tiempo de procesamiento de las imágenes con espaciados de 20 píxeles y radio 120 píxeles en comparación con la configuración de espaciado de 12 píxeles y radio 120 píxeles, no mejora considerablemente, ya que solo pasa de 24 horas de procesamiento a 18.

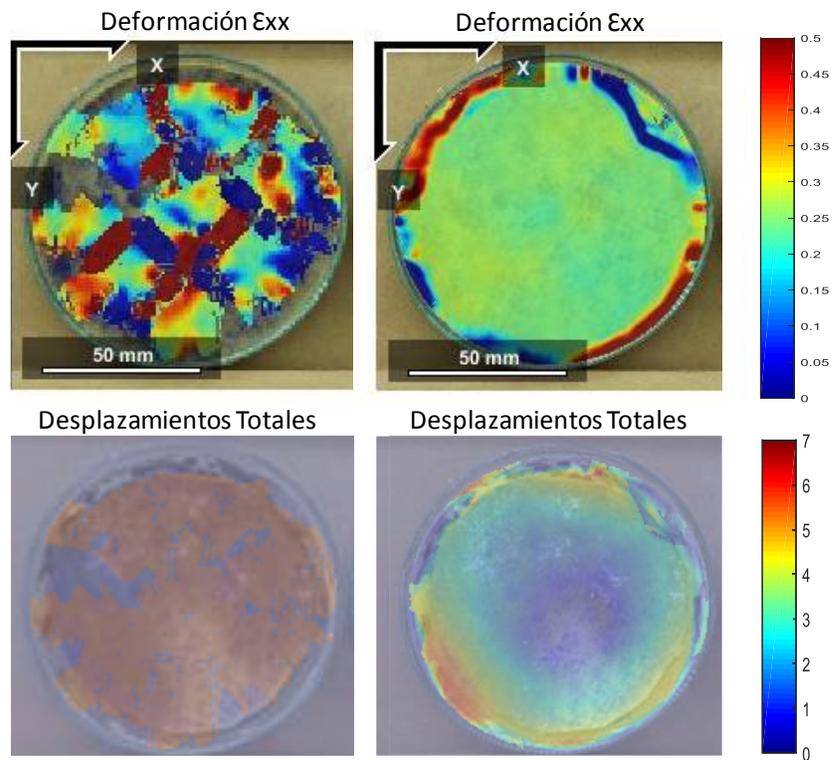


Figura 41. Comparación de deformación ϵ_{xx} y desplazamientos totales, mediante un análisis desarrollado con un espaciamiento de subconjuntos de 20 píxeles (izquierda) y con uno de 12 píxeles (derecha) en GeoPIV-RG.

Por su parte, los análisis desarrollados con Ncorr y GeoPIV-RG sobre arenas con cuadros de 61.790 px^2 , considerando las configuraciones expuestas en las Tabla 11 y Tabla 13 son bastante rápidos, llegando incluso a finalizar en 20 minutos. Esto refleja la importancia en la resolución de las imágenes ya que, si bien el tiempo de procesamiento es considerablemente menor, la equivalencia de píxeles a milímetros cambia en un orden de magnitud, lo que aumenta los errores asociados a los análisis desarrollados.

6. Ensayos Fotogramétricos en Suelos Finos

A continuación, se presentan los ensayos fotogramétricos desarrollados sobre muestras de bentonita, caolinita y finos de relave sometidos a ciclos de temperatura con distintas configuraciones de superficie y espesor.

6.1 Ensayos de Bentonita y Caolinita con la Totalidad de la Superficie de las Placas de Petri Cubierta

Estos ensayos se realizaron con bentonita, caolinita y agua potable. Se mezclaron las arcillas con el agua hasta alcanzar una pasta homogénea y se incorporó el material en cada placa de Petri en tres configuraciones distintas. La primera consideró el espesor total de las placas, es decir, 18 mm, la segunda se hizo con un espesor intermedio de 8 mm y la tercera abarcó un espesor de 2 mm. Se realizaron marcas aleatorias con tinta china azul sobre la superficie de las muestras para aumentar su textura al momento de fotografiar las muestras y se pesaron en la situación inicial y final.

La tinta china que se utilizó se compone de carbón vegetal compactado con un pegamento de base acuosa y colorante azul. Si bien estos componentes pueden alterar el comportamiento de las arcillas, su aplicación es solo superficial. Además, con los ensayos se busca determinar si es posible medir las grietas y desplazamientos y no predecirlos, por lo que no altera el desarrollo experimental.

La elección de agua potable se debió a la consideración de una condición natural sobre las muestras de suelo, equivalente en todos los ensayos. De todas formas, se realizó una prueba sobre muestras de bentonita y caolinita con agua destilada y espesor de 8 mm para comparar el resultado, el cual no mostró cambios significativos. Los parámetros de cada ensayo se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Parámetros de muestras de bentonita y caolinita en ensayos de superficie completa.

	Bentonita				Caolinita			
Espesor [mm]	18	8	8*	2	18	8	8*	2
Humedad Inicial [%]	173,9	205,1	188,8	165,7	62,9	65,4	64,6	64,0
Humedad Final [%]	74,5	48,4	74,3	0	16,6	1,2	2,6	0
Densidad Total [gr/cm ³]	1,07	1,00	1,04	0,96	1,34	1,20	1,17	1,11

*El ensayo considera agua destilada en su mezcla con las arcillas.

Se sometieron las muestras a ciclos de temperatura de 20°C de amplitud dentro del contenedor. Los ciclos difieren entre un ensayo y otro debido a que dependen de la temperatura ambiente al momento de realizar el ensayo. Las muestras de caolinita y bentonita de un mismo espesor se ensayaron simultáneamente.

La Figura 42 muestra los ciclos de temperatura a los que se sometieron los materiales para cada ensayo. En el gráfico se observa la temperatura en función del tiempo

registrada por 4 termocuplas identificadas por los números 107,109,113 y 117 T.A. Las 3 primeras se encontraban al interior del contenedor durante el desarrollo del ensayo, mientras que la 117 T.A se ubicó exteriormente para medir la temperatura ambiente. Los parámetros más importantes de los ciclos de temperatura descritos se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Características de ciclos de temperatura de muestras de bentonita y caolinita en ensayos con la totalidad de las superficies de las placas cubierta.

Parámetros de Ciclos de Temperatura				
Espesor de muestras [mm]	18	8	8*	2
Tiempo de ciclado [h]	47,7	45,87	47,66	22,51
Cantidad de ciclos [un]	22	27	7	1
Temperatura mínima [°C]	25,5	26,0	25,7	26,0
Temperatura máxima [°C]	45,7	47,9	47,7	
Periodo promedio de ciclos [h]	2,4	1,7	4,3	-

* El ensayo considera agua destilada en su mezcla con las arcillas.

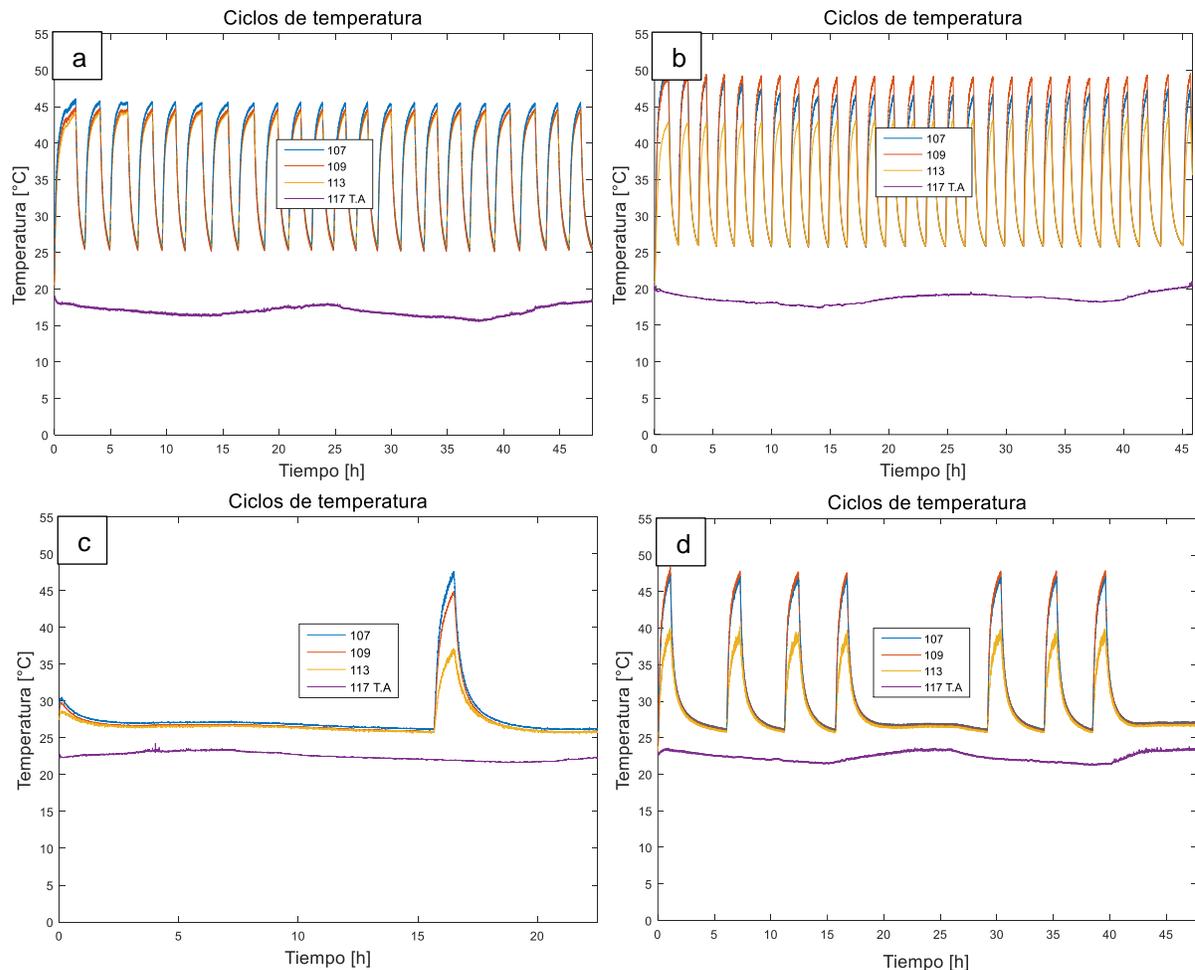


Figura 42. Ciclos de temperatura a los que se sometieron muestras de bentonita y caolinita con la totalidad de la superficie de las placas cubierta con agua potable considerando (a) espesor de 18 mm, (b) de 8 mm y (c) de 2 mm. Además, se presentan los ciclos de temperatura (d) sobre muestras de bentonita y caolinita de 8 mm de espesor y agua destilada.

Las imágenes que presentan el estado inicial y final de las muestras de bentonita y caolinita con un espesor de 18 mm, 8 mm y 2 mm se presentan en la Figura 43, Figura 44 y Figura 45, respectivamente.

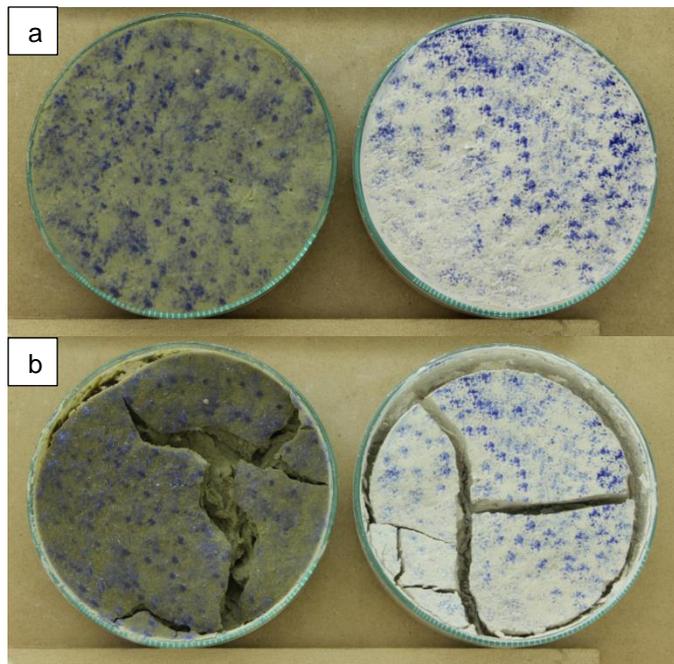


Figura 43. Muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha) con espesor de 18 mm, en (a) situación inicial y (b) situación después de 22 ciclos de temperatura.

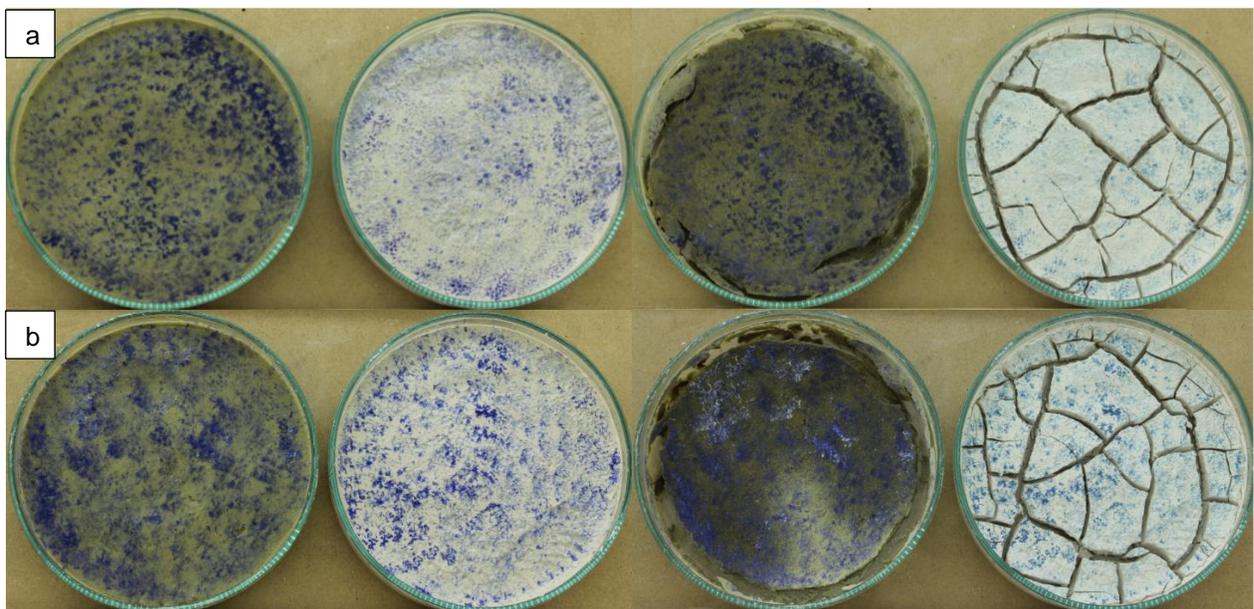


Figura 44. Situación inicial y final de muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha) con espesor de 8 mm considerando (a) agua destilada y (b) agua potable.

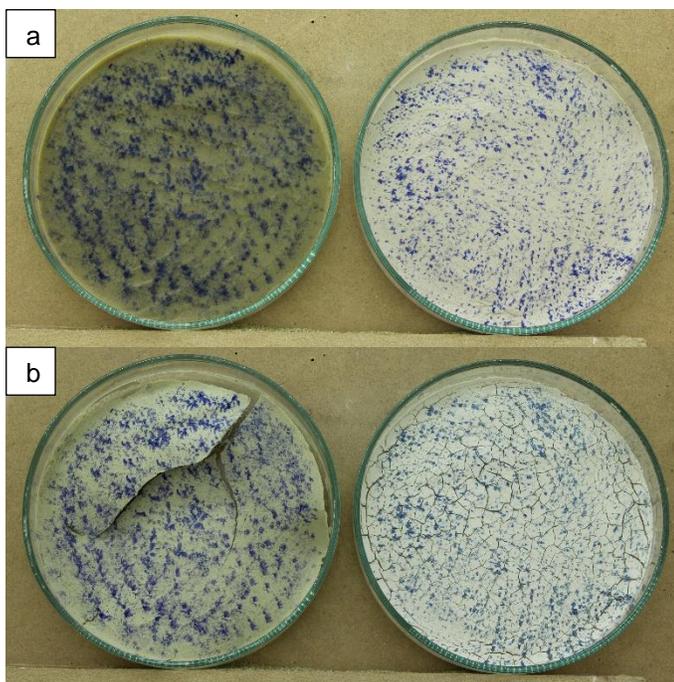


Figura 45. Muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha) con espesor de 2 mm, en (a) situación inicial y (b) situación después de 1 ciclo de temperatura.

6.2 Ensayo de Bentonita y Caolinita con la Mitad de la Superficie de las Placas de Petri Cubierta

Tal como en los ensayos anteriores de superficie total de bentonita y caolinita, se mezclaron las arcillas con el agua potable para formar una pasta homogénea, y se incorporó el material en cada placa de Petri. Esta vez solo se rellenoó la mitad de la superficie de las placas con un espesor de 8 mm, para determinar si los programas podían detectar los movimientos inducidos por la inclinación de las muestras, además de representar la situación que podría desarrollarse en un talud real cuando se agrieta el suelo, pudiendo favorecer su deterioro. Luego, se realizaron marcas aleatorias con tinta china azul sobre la superficie de las arcillas. Los parámetros del ensayo se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Parámetros de muestras de bentonita y caolinita en ensayos con la mitad de la superficie de las placas cubierta.

	Bentonita	Caolinita
Espesor [mm]	8	8
Humedad Inicial [%]	208,9	62,4
Humedad Final [%]	74,3	2,6
Densidad total [gr/cm ³]	0,93	1,17

La Figura 46 presenta los ciclos de temperatura a los que se sometieron las muestras de arcillas registrados por las 4 termocuplas (107,109,113,117 T.A), mientras que las características de estos se muestran en la Tabla 18. Además, el estado inicial y final de las muestras se presentan en la Figura 47.

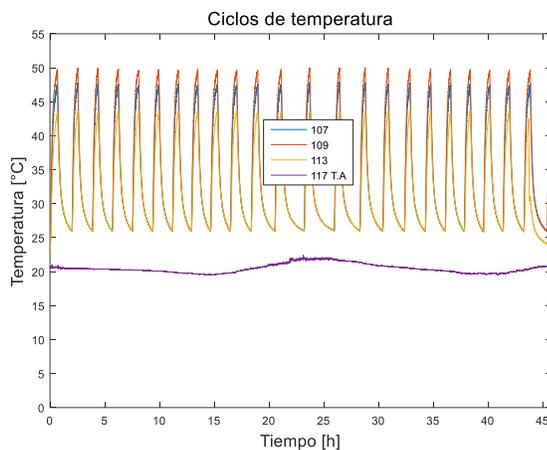


Figura 46. Ciclos de temperatura a los que se somete muestra de bentonita y caolinita con mitad de superficie de placa de Petri cubierta y espesor de 8 mm.

Tabla 18. Características de ciclos de temperatura de muestras de bentonita y caolinita con mitad de superficie de placa de Petri cubierta y espesor de 8 mm.

Parámetros de Ciclos de Temperatura	
Tiempo de ciclado [h]	45,8
Cantidad de ciclos [un]	23
Temperatura mínima [°C]	26,0
Temperatura máxima [°C]	49,8
Periodo promedio de ciclos [h]	2,4

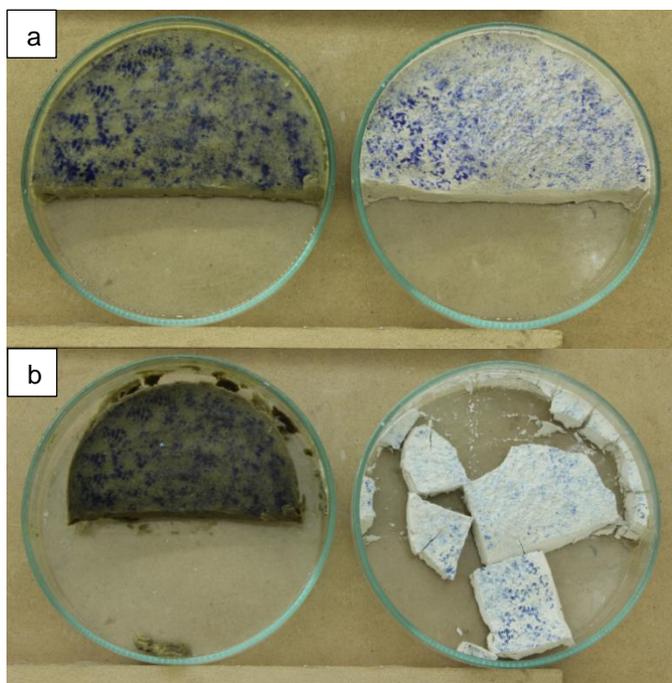


Figura 47. Muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha) con mitad de superficie de las placas cubiertas y espesor de 8 mm, en (a) situación inicial y (b) situación después de 23 ciclos de temperatura.

6.3 Ensayo de Bentonita y Caolinita con la Totalidad de la Superficie de las Placas de Petri Cubierta y sin Contacto Lateral

Se realizó un nuevo ensayo de bentonita y caolinita considerando la superficie total de las placas y un espesor de 18 mm, para evaluar la incidencia del agrietamiento de las muestras por la adherencia de las arcillas con el vidrio de las placas de Petri. Se mezclaron las arcillas con agua potable y se rellenaron las placas con ambos materiales. Una vez terminado el procedimiento, se realizó una separación entre las arcillas y el vidrio de las placas con una espátula de laboratorio para evitar que la deformación lateral quedara restringida y se realizaron las marcas superficiales con tinta china azul. La Tabla 19 presenta los parámetros del ensayo para cada arcilla.

Tabla 19. Parámetros de muestras de bentonita y caolinita en ensayo sin contacto lateral, con la totalidad de las placas de Petri cubierta.

	Bentonita	Caolinita
Espesor [mm]	18	18
Humedad Inicial [%]	162,1	64,9
Humedad Final [%]	32,0	0
Densidad total [gr/cm ³]	1,25	1,66

La Figura 48 presenta los ciclos de temperatura a los que se sometieron las arcillas, registrados por las 4 termocuplas (107, 109, 113, y 117 T.A), mientras que las características principales de estos se exponen en la Tabla 20.

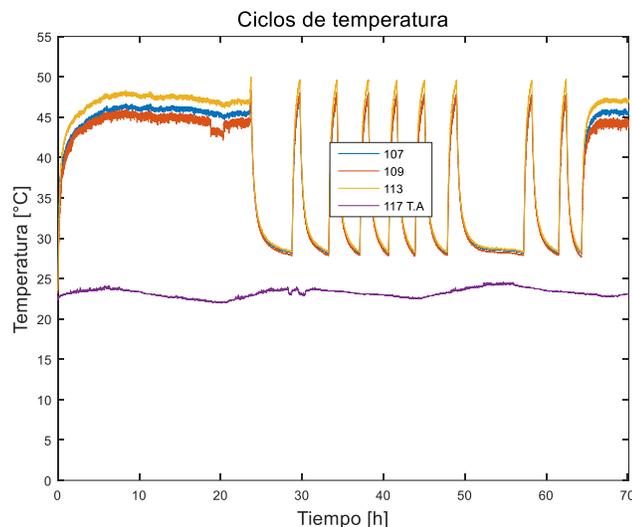


Figura 48. Ciclos de temperatura a los que se someten muestras de bentonita y caolinita con la totalidad de la superficie, espesor de 18 mm y sin contacto lateral.

Las imágenes que presentan el estado inicial y final de las muestras de bentonita y caolinita con un espesor de 18 mm y sin contacto lateral, se presentan en la Figura 49.

Tabla 20. Características de ciclos de temperatura de muestras de bentonita y caolinita en ensayo de superficie total sin contacto lateral.

Parámetros de Ciclos de Temperatura	
Tiempo de ciclado [h]	70,1
Cantidad de ciclos [un]	9
Temperatura mínima [°C]	27,9
Temperatura máxima [°C]	49,5
Periodo promedio de ciclos [min]	-

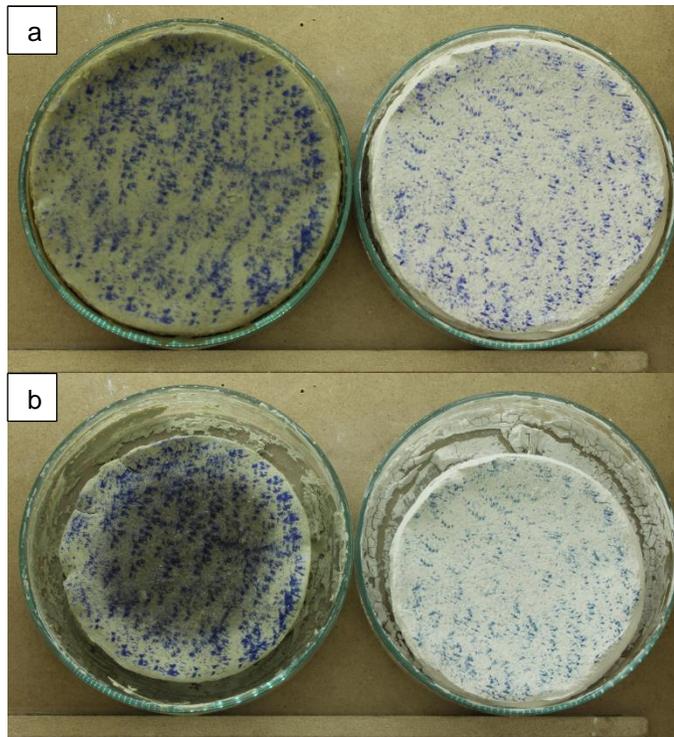


Figura 49. Muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha) con superficie total, espesor de 18 mm y sin contacto lateral, en (a) situación inicial y (b) situación después de 9 ciclos de temperatura.

6.4 Ensayo de Relave con la Totalidad de la Superficie de las Placas de Petri Cubiertas

Este ensayo se realizó con la fracción fina del material que conforma un relave integral. Las porciones de relave se mezclaron con agua potable, y se depositaron en las placas de Petri sobre toda la superficie en tres configuraciones distintas, con espesores de 18, 8 y 2 mm. Los parámetros de cada ensayo se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. Parámetros de muestras de relave en ensayos de superficie completa.

Espesor [mm]	Finos de Relave		
	18	8	2
Humedad Inicial [%]	22,7	23,7	30,0
Humedad Final [%]	4,1	0	0
Densidad total [gr/cm ³]	1,75	1,8	2,42

La Figura 50 presenta los ciclos de temperatura aplicados sobre las muestras y registrados por las 4 termocuplas (107, 109, 113 y 117 T.A). Los parámetros más importantes quedan expuestos en la Tabla 22.

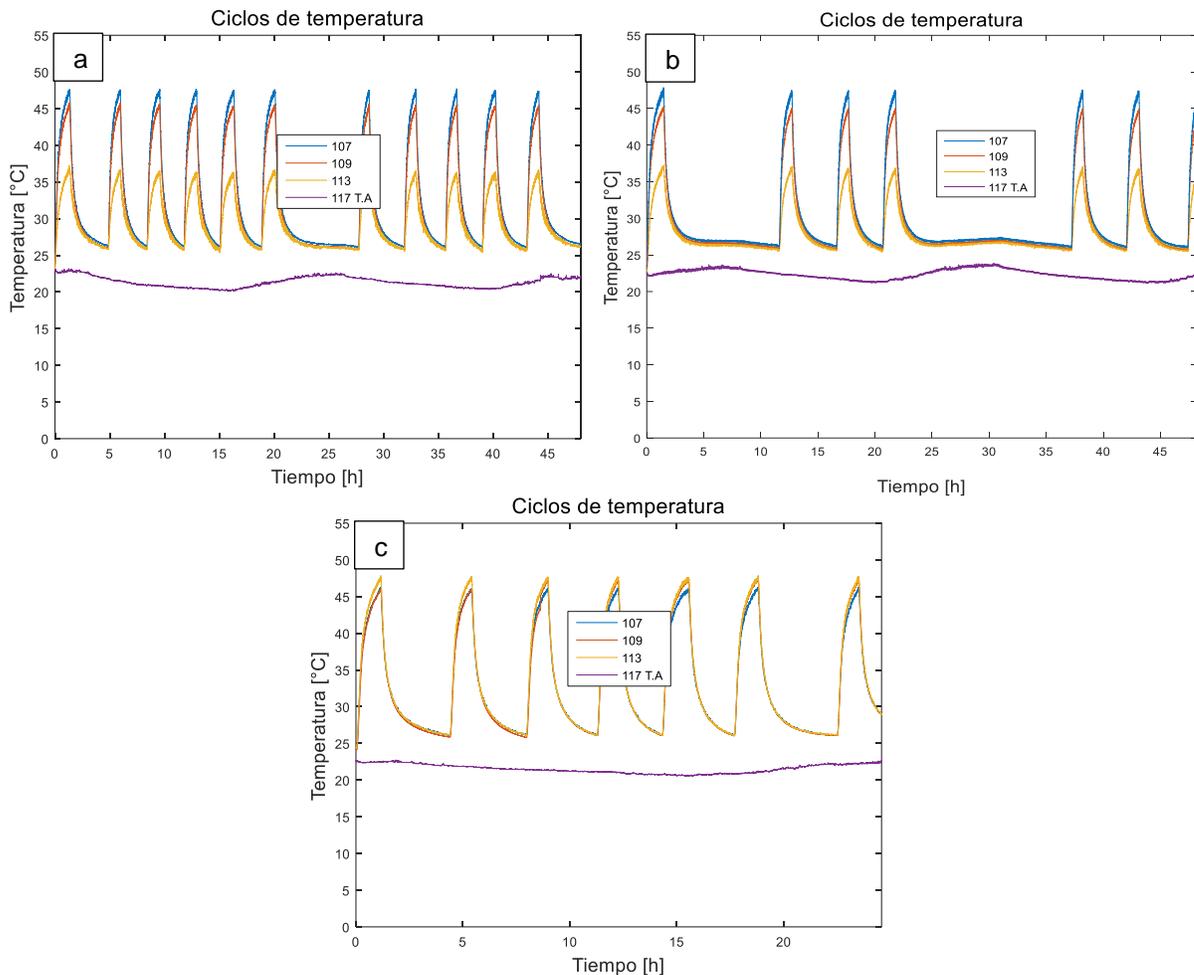


Figura 50. Ciclos de temperatura a los que se someten muestras de relave con (a) espesor de 2 mm, (b) espesor de 8 mm y (c) espesor de 18 mm.

Tabla 22. Características de ciclos de secado de muestras de relave en ensayos de superficie total.

Parámetros de Ciclos de Temperatura			
Espesor de muestras [mm]	18	8	2
Tiempo de ciclado [h]	24,6	48,2	47,9
Cantidad de ciclos [un]	7	6	11
Temperatura mínima [°C]	26,0	25,5	25,4
Temperatura máxima [°C]	47,8	47,4	47,7
Periodo promedio de ciclos [h]	3,6	-	-

La Figura 51 y la Figura 52 presentan fotografías de la situación inicial y final de las 3 muestras de finos de relave, respectivamente.

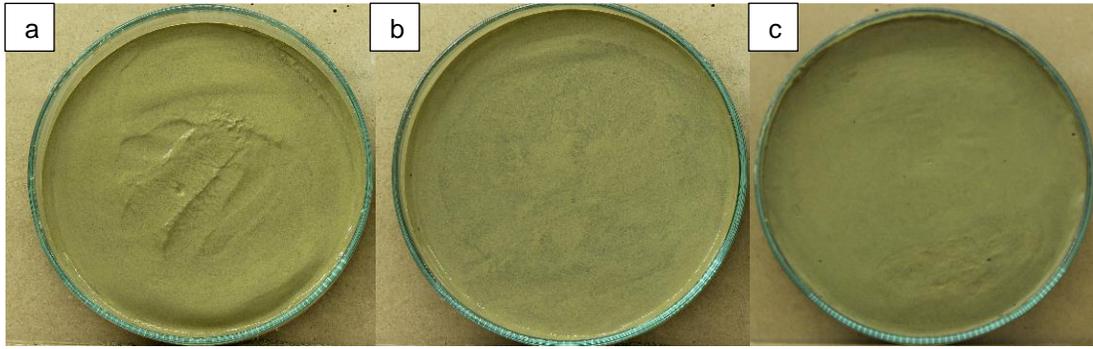


Figura 51. Muestras de relave bajo malla 200 en la situación inicial, con superficie total y espesor de (a) 2 mm, (b) 8 mm y (c) 18 mm.

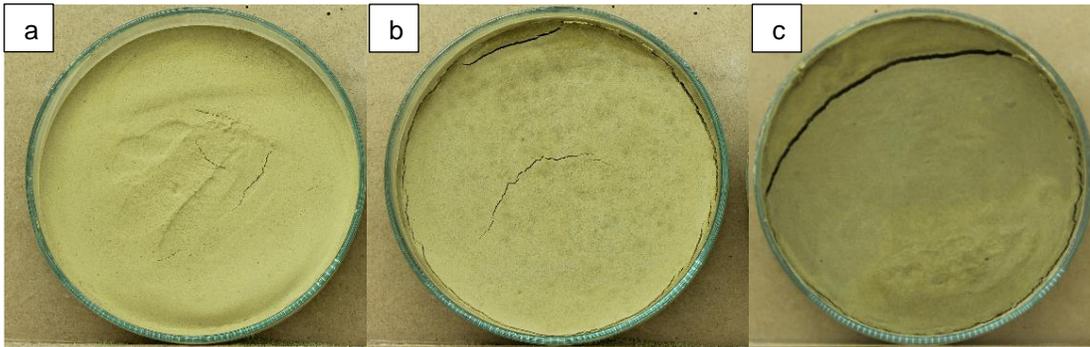


Figura 52. Muestras de relave bajo malla 200 en la situación final, con superficie total y espesor de (a) 2 mm, (b) 8 mm y (c) 18 mm.

6.5 Resultados Post- Procesamiento de Ensayos en Suelos Finos

Al analizar las imágenes de cada ensayo mediante Ncorr y GeoPIV-RG, se obtuvo el campo de deformaciones y desplazamientos matricialmente. Con esto se generó un procesamiento de los datos para obtener los desplazamientos y deformaciones totales en las situaciones finales mediante el software Matlab. Las imágenes que exponen los resultados de desplazamientos y deformaciones descritos para los ensayos desarrollados en la Sección 6, se presentan desde la Figura 53 a la Figura 59.

Para las muestras de caolinita y bentonita con la mitad de la superficie de las placas de Petri cubiertas, el procesamiento se realizó de manera independiente entre una arcilla y la otra. Esto se explica porque las fotos analizadas para ambas muestras difieren por el desplazamiento que exhibe la caolinita (ver Figura 47), ya que ninguno de los softwares utilizados fue capaz de incorporarlo en el análisis. Por esto fue necesario realizar un procesamiento por separado. Para la caolinita se consideró en el análisis un conjunto de fotos hasta la imagen sin desplazamiento. Para la bentonita se realizó el procesamiento hasta la imagen final. Los resultados del procesamiento de los datos obtenidos mediante GeoPIV-RG corresponden a las fotografías que se aprecian cortadas, mientras que las imágenes completas corresponden a los resultados entregados por Ncorr. El corte expuesto se debe a que GeoPIV-RG no identifica los diferentes subconjuntos en las placas de Petri por a la falta de textura expuesta, por lo que este programa solo analizó la zona en la que existía suelo.

Solo se presentan los resultados gráficos obtenidos mediante Ncorr con la configuración que expone los datos más cercanos al agrietamiento exhibido por las muestras. Los datos de configuración utilizados para encontrar estos resultados se presentan en la Tabla 23, mientras que los resultados gráficos obtenidos con la segunda configuración aplicada se exponen en el Anexo C.1.

Tabla 23. Configuración que entrega los mejores resultados en programa Ncorr

Superficie	Bentonita-Caolinita					Relave		
	Completa			Completa	Media	Completa		
Contacto Lateral	Sí			No	Sí	Sí		
Espesor de muestras [cm]	1,8	0,8	0,2	1,8	0,8	1,8	0,8	0,2
Espaciamiento Subconjuntos [px]	12	5; 12*	5	5; 12*	12; 5*	5	2	2
Radio Subconjunto [px]	120	70; 120*	20	70; 120*	120; 70*	70	20	20
Radio Subconjunto Deformación [px]	5	5	5	5	5	5	5	5

*El primer valor corresponde al análisis para caolinita mientras que el segundo muestra la configuración para la bentonita. Si se presenta un solo valor, entonces ambas muestras utilizan configuraciones equivalentes.

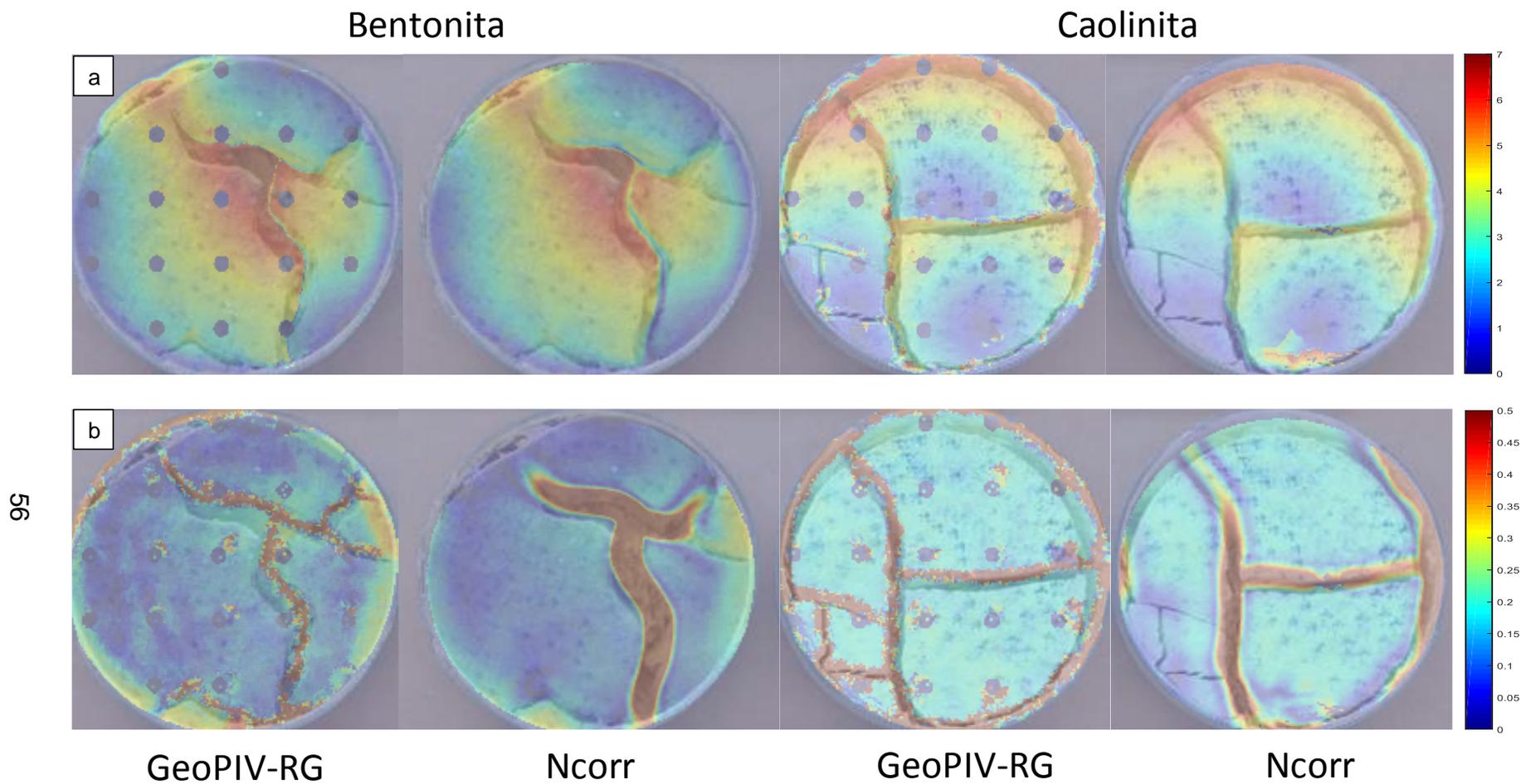


Figura 53. Resultados de (a) desplazamientos totales [mm] y (b) deformaciones totales, obtenidos en las muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha) mediante la aplicación de GeoPIV-RG y Ncorr. Ensayo con la totalidad de la superficie cubierta y espesor de 18 mm.

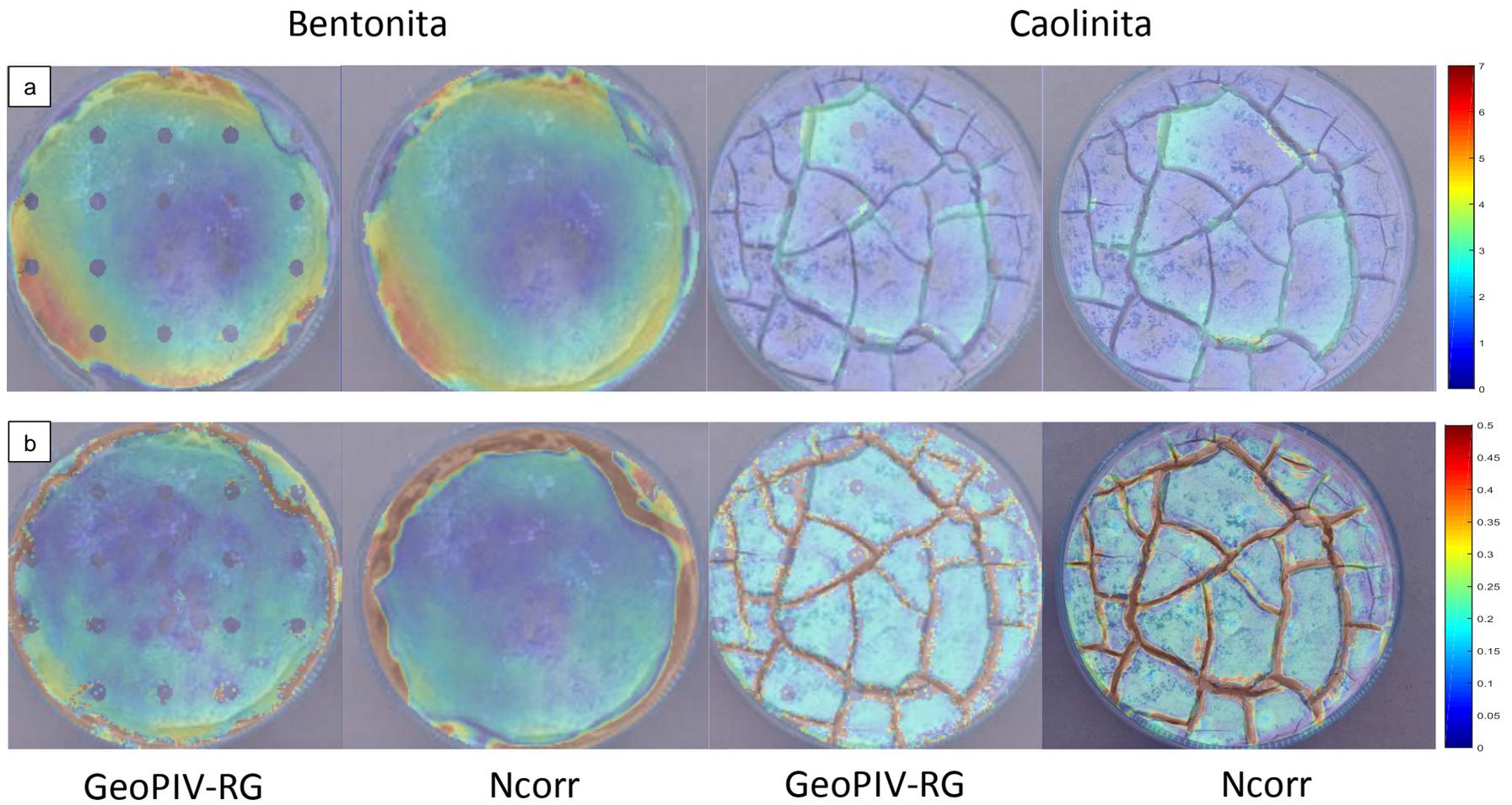


Figura 54. Resultados de (a) desplazamientos totales [mm] y (b) deformaciones totales, obtenidos en las muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha) mediante la aplicación de GeoPIV-RG y Ncorr. Ensayo con la totalidad de la superficie cubierta y espesor de 8 mm.

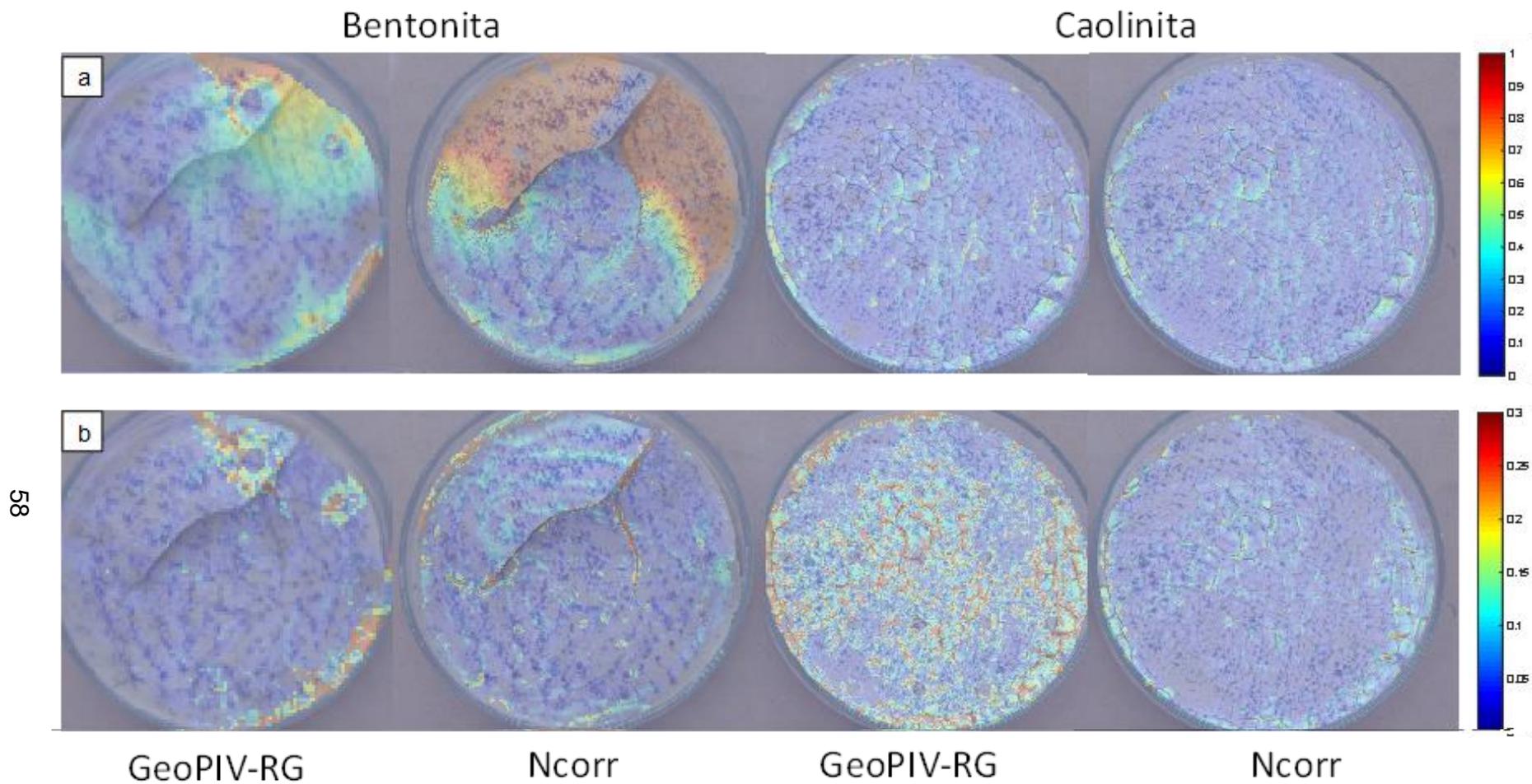


Figura 55. Resultados de (a) desplazamientos totales [mm] y (b) deformaciones totales, obtenidos en las muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha) mediante la aplicación de GeoPIV-RG y Ncorr. Ensayo con la totalidad de la superficie cubierta y espesor de 2 mm.

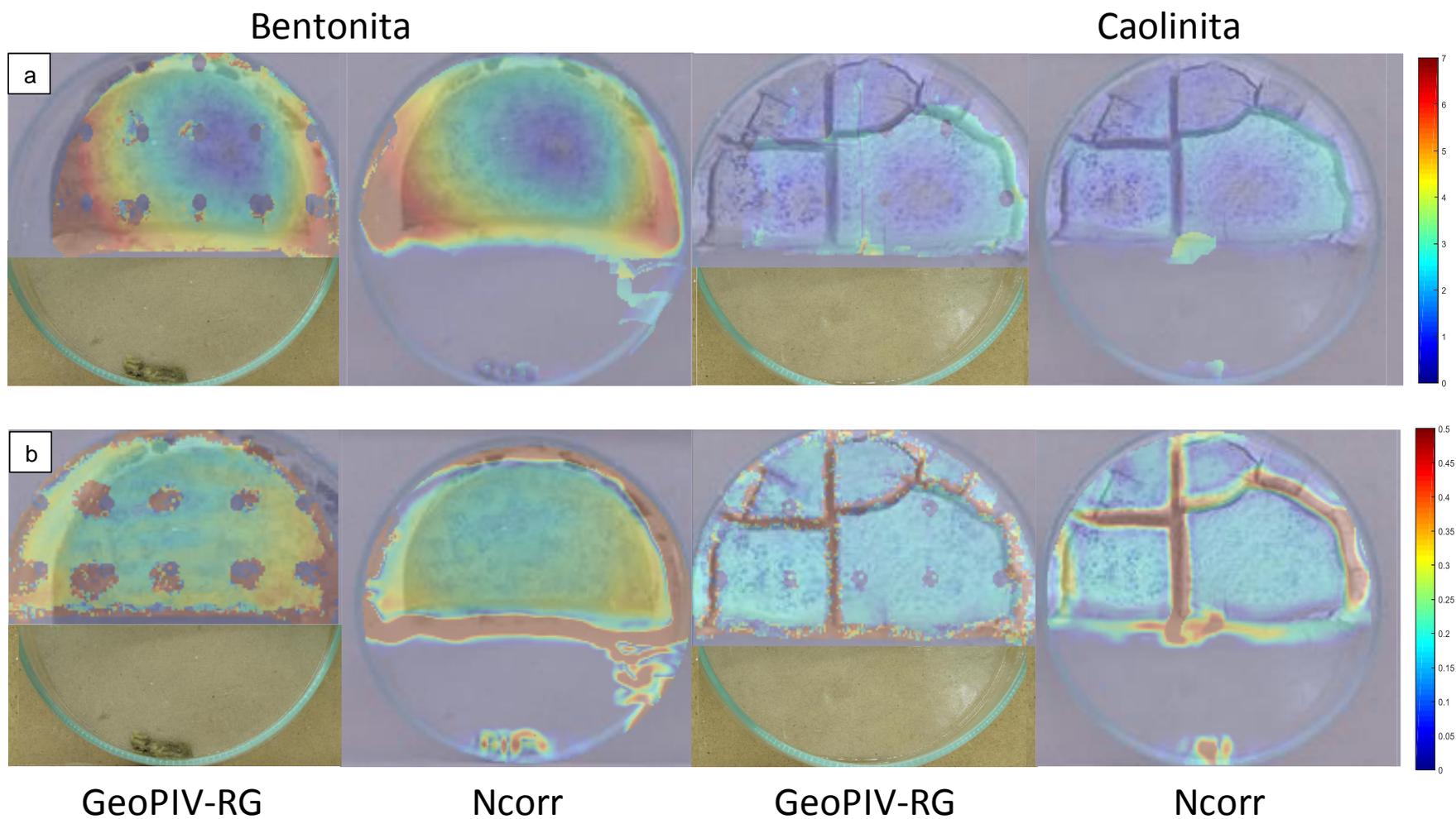


Figura 56. Resultados de (a) desplazamientos totales [mm] y (b) deformaciones totales, obtenidos en las muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha) mediante la aplicación de GeoPIV-RG y Ncorr. Ensayo con la mitad de la superficie cubierta y espesor de 8 mm.

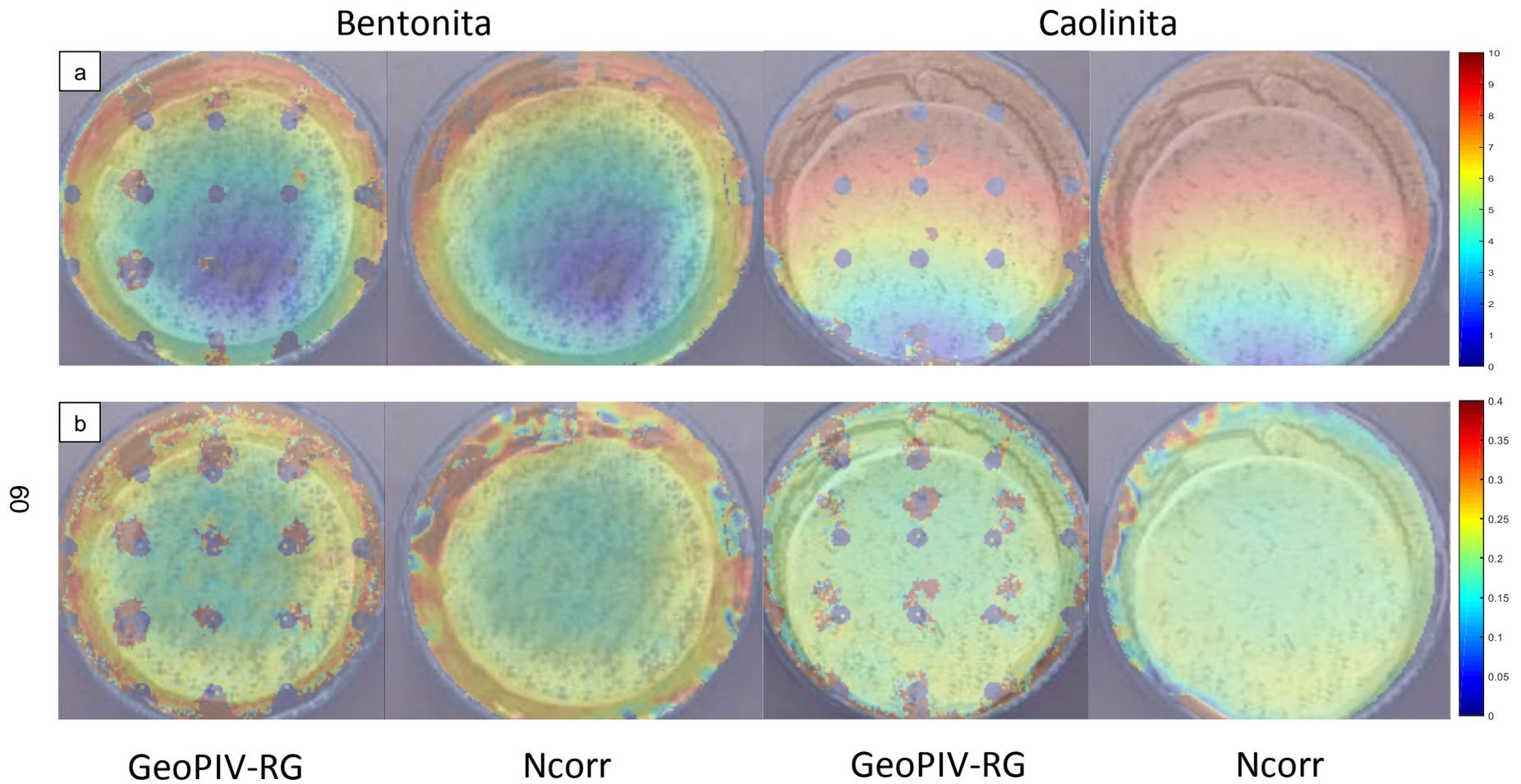


Figura 57. Resultados de (a) desplazamientos totales [mm] y (b) deformaciones totales, obtenidos en las muestras de bentonita (izquierda) y caolinita (derecha) mediante la aplicación de GeoPIV-RG y Ncorr. Ensayo con la totalidad de la superficie cubierta, sin contacto lateral y espesor de 18 mm.

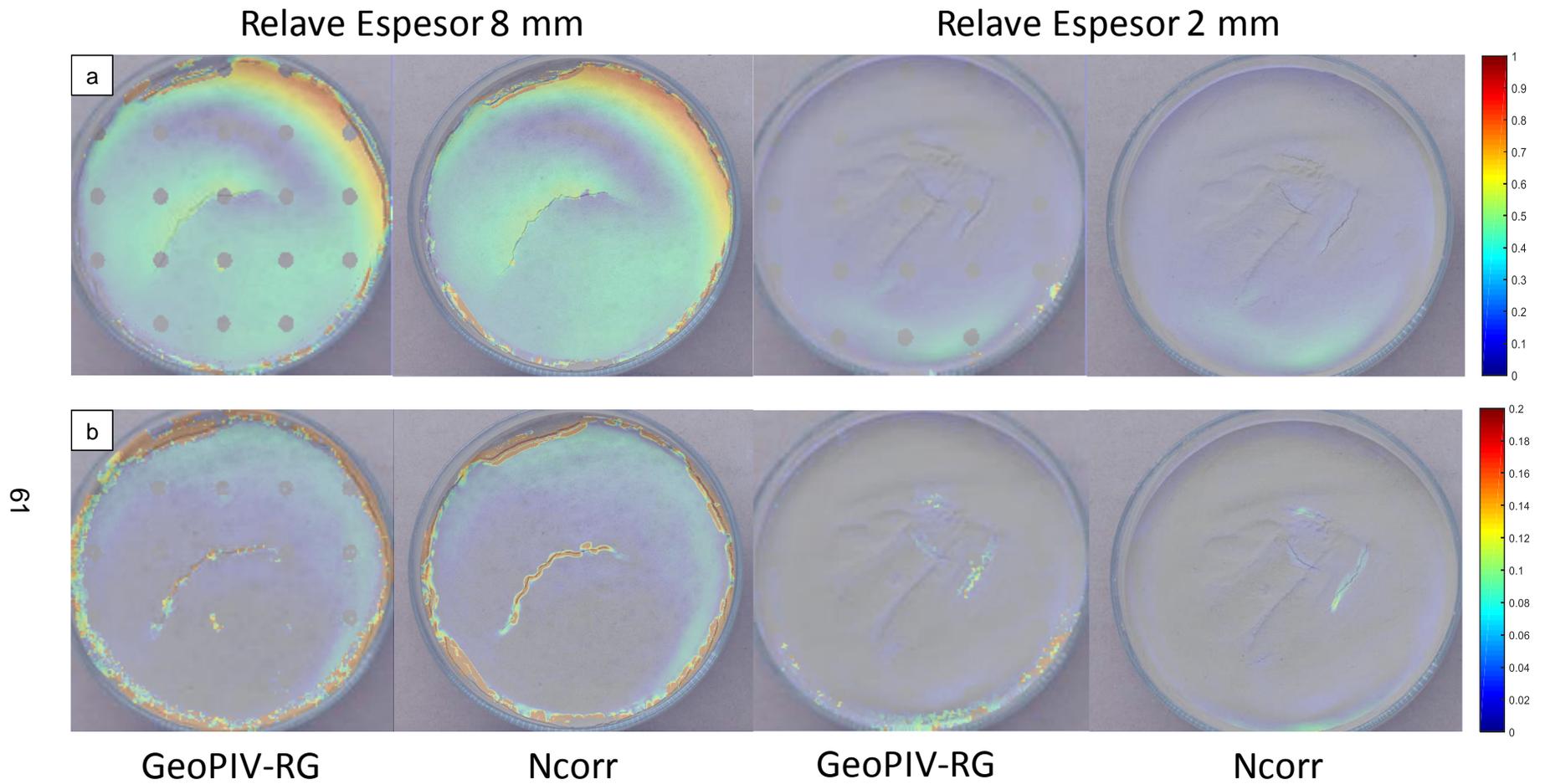


Figura 58. Resultados de (a) desplazamientos totales [mm] y (b) deformaciones totales obtenidos mediante la aplicación de GeoPIV-RG y Ncorr para muestras de finos de relave con espesor de 8 mm (izquierda) y 2 mm (derecha).

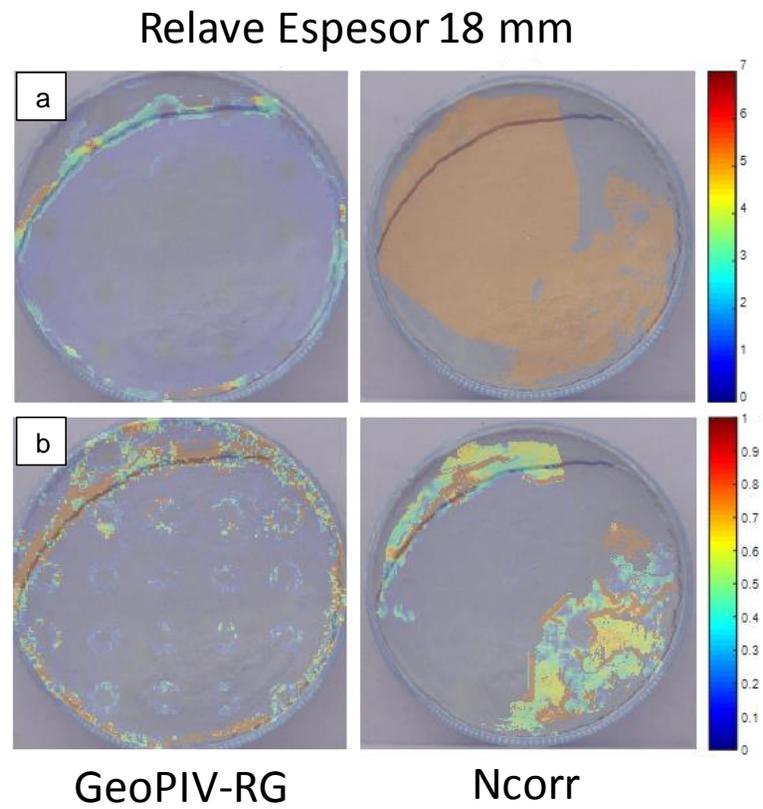


Figura 59. Resultados de (a) desplazamientos totales [mm] y (b) deformaciones totales obtenidos mediante la aplicación de GeoPIV-RG y Ncorr para muestra de finos de relave con espesor de 18 mm.

6.6 Comparación de los Resultados Obtenidos en Ncorr y GeoPIV-RG

Para comparar la precisión de los análisis con cada programa computacional, se estableció que las zonas agrietadas de cada fotografía estaban definidas por los puntos que presentaban una deformación mayor a un porcentaje determinado, que dependía de la magnitud de deformación exhibida en cada ensayo.

Con lo señalado, se determinó una razón entre el área agrietada y el área total de cada muestra en función del tiempo para los resultados obtenidos con cada software. Para comparar las zonas agrietadas, se determinó además la razón de agrietamiento en función del tiempo mediante el programa Autocad 2016. La deformación mínima para considerar una zona agrietada o contraída en cada ensayo se presenta en la Tabla 24. La Figura 60 expone un ejemplo de la determinación del área agrietada en bentonita de 18 mm de espesor. En la imagen 60.a se muestra la deformación de la muestra, mientras que en la 60.b solo se resaltan los pixeles con una deformación mayor o igual al 20%.

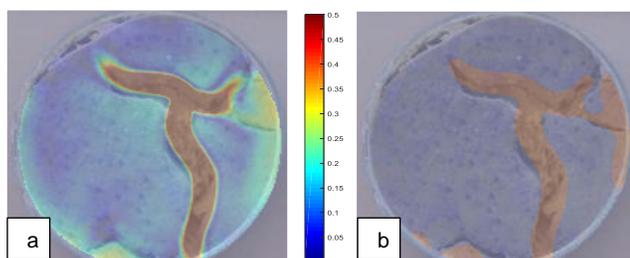


Figura 60. Determinación de la razón de agrietamiento con Ncorr en muestra de bentonita de 18 mm.

Tabla 24. Deformación mínima para considerar agrietamiento y/o contracción en cada ensayo.

Superficie	Bentonita-Caolinita				Relave			
	Completa			Media	Completa			
Contacto Lateral	Sí			No	Sí	Sí		
Espesor [cm]	1,8	0,8	0,2	1,8	0,8	1,8	0,8	0,2
Deformación mínima [%]	20	20	15	25	25	50	20	5

El porcentaje de deformación mínima se determinó en base a un procedimiento de prueba y error que permitió alcanzar el mejor ajuste de las zonas que presentaron grietas y contracciones volumétricas en los ensayos. Sin embargo, en algunos casos las muestras se vieron afectadas por desplazamientos importantes y la definición de un porcentaje límite no fue representativa para la exposición del área agrietada. Estos fueron los casos de la caolinita en el ensayo con la totalidad de la superficie de la placa de Petri sin contacto lateral, además del ensayo de bentonita con la mitad de la superficie de la placa.

Las zonas que se consideraron agrietadas y/o contraídas para cada uno de los ensayos analizados, junto con los gráficos que muestran la razón de agrietamiento y los ciclos de temperatura en función del tiempo, para los dos análisis desarrollados con Ncorr, así como la configuración escogida para GeoPIV-RG y la estimación de Autocad, se exponen desde la Figura 61 a la Figura 67. En el Anexo C.2 se presentan las imágenes que muestran las zonas agrietadas al considerar la configuración que genera resultados más alejados por Ncorr.

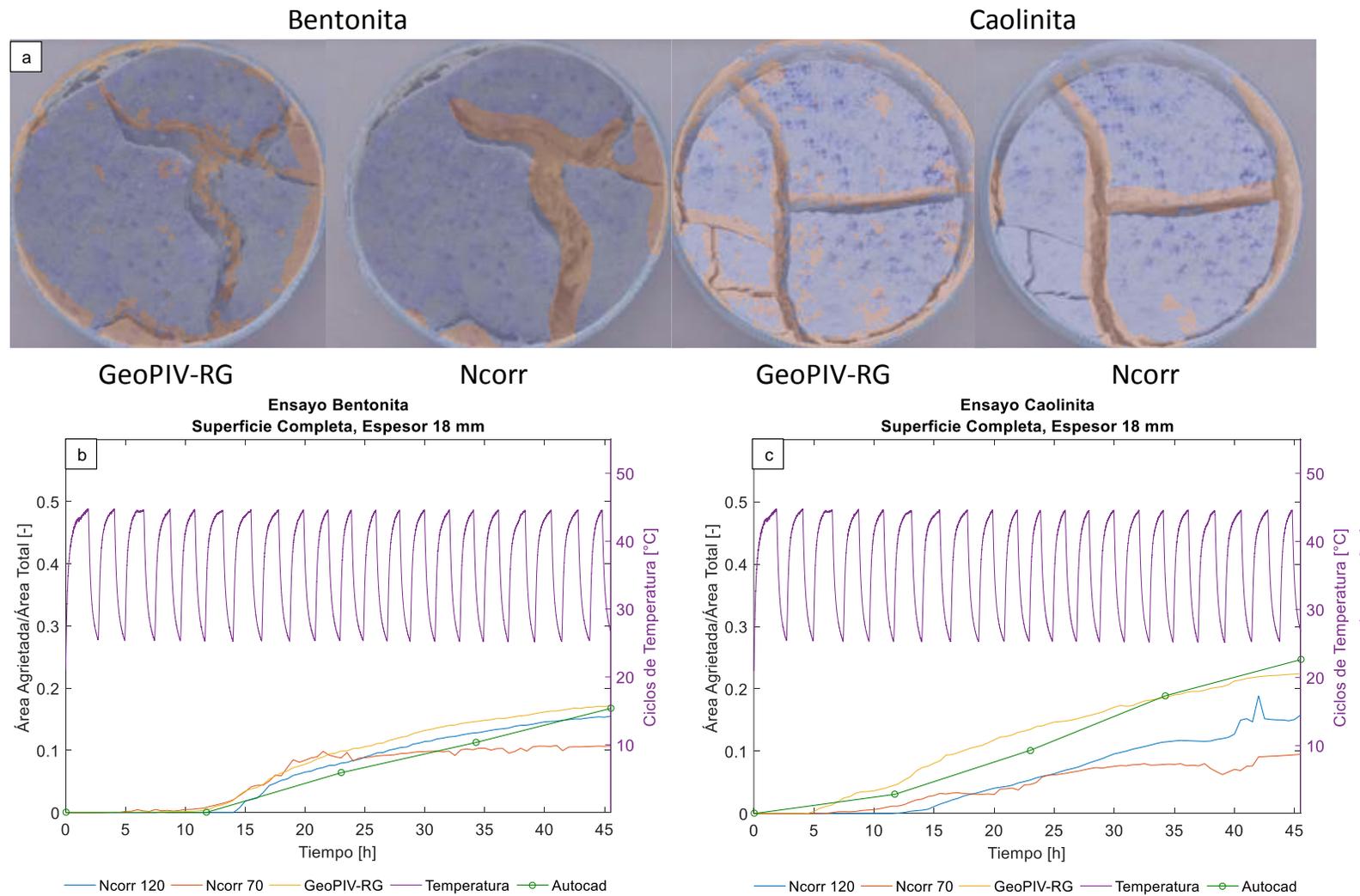


Figura 61. Resultados de (a) zonas agrietadas consideradas en los programas Ncorr y GeoPIV-RG, además de gráficos de agrietamiento en función del tiempo para muestras de (b) bentonita y (c) caolinita en ensayo de superficie total de las placas de Petri y espesor de 18 mm.

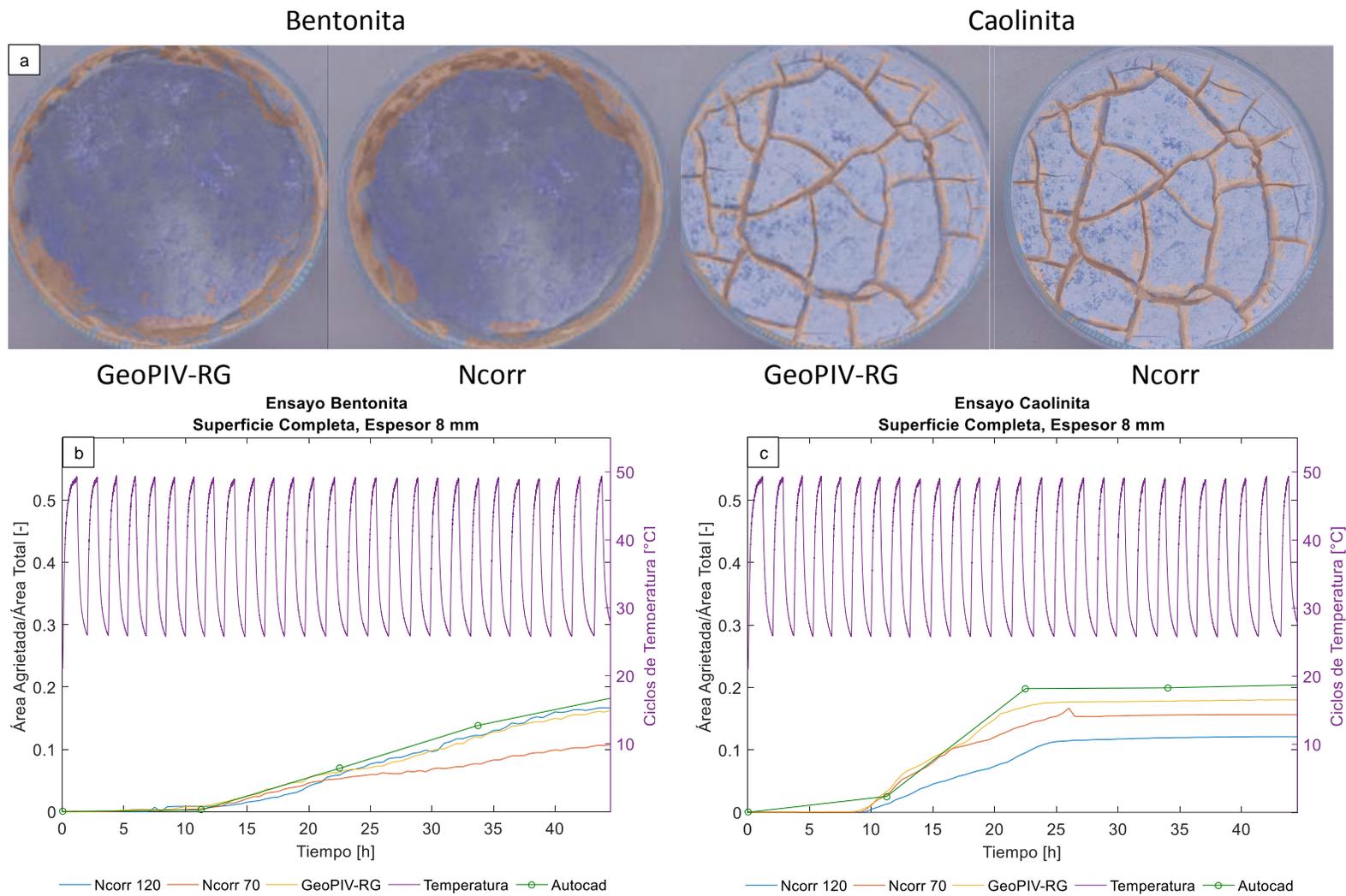


Figura 62. Resultados de (a) zonas agrietadas consideradas en los programas Ncorr y GeoPIV-RG, además de gráficos de agrietamiento en función del tiempo para muestras de (b) bentonita y (c) caolinita en ensayo de superficie total de las placas de Petri y espesor de 8 mm.

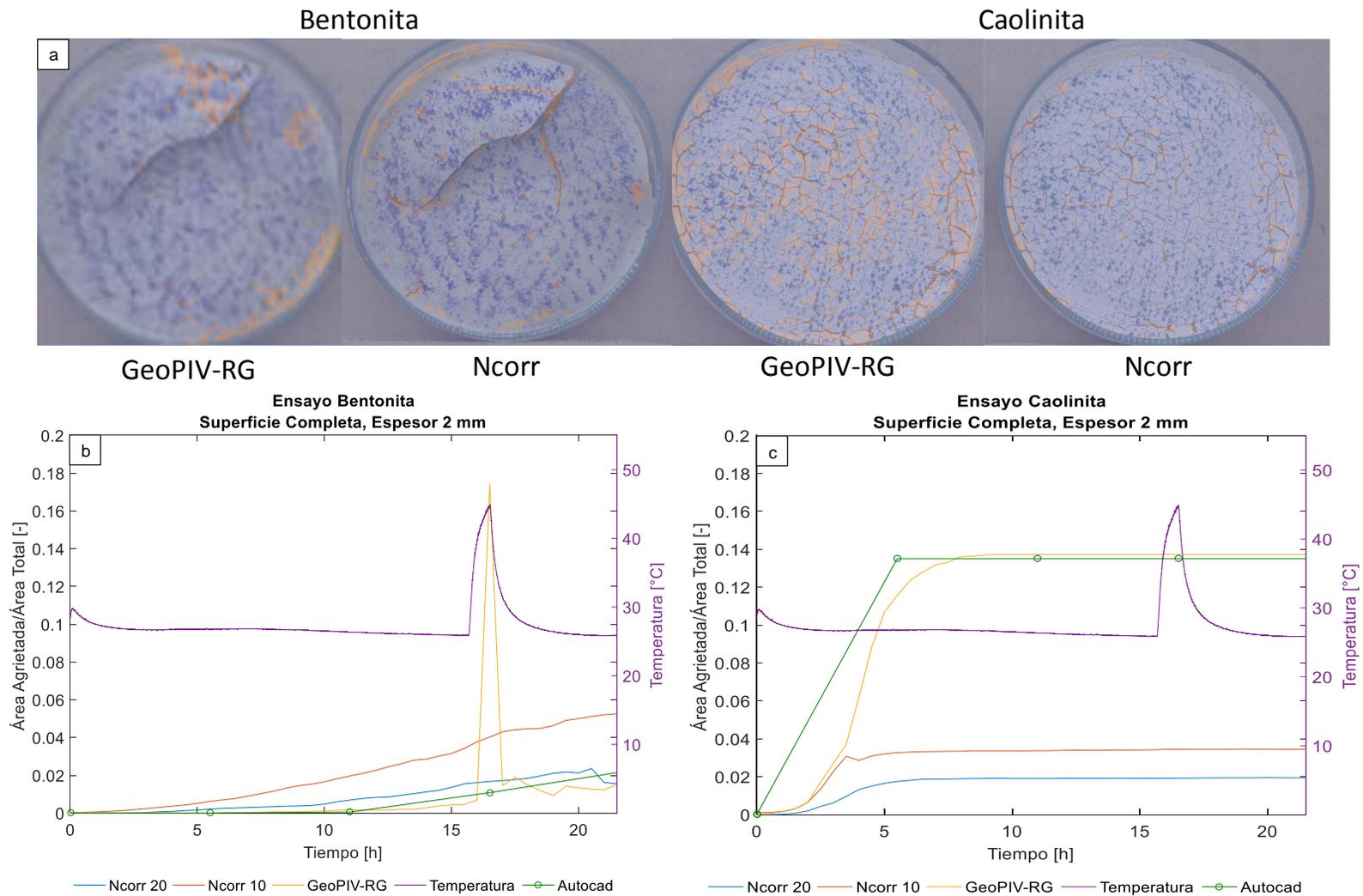


Figura 63. Resultados de (a) zonas agrietadas consideradas en los programas Ncorr y GeoPIV-RG, además de gráficos de agrietamiento en función del tiempo para muestras de (b) bentonita y (c) caolinita en ensayo de superficie total de las placas de Petri y espesor de 2 mm.

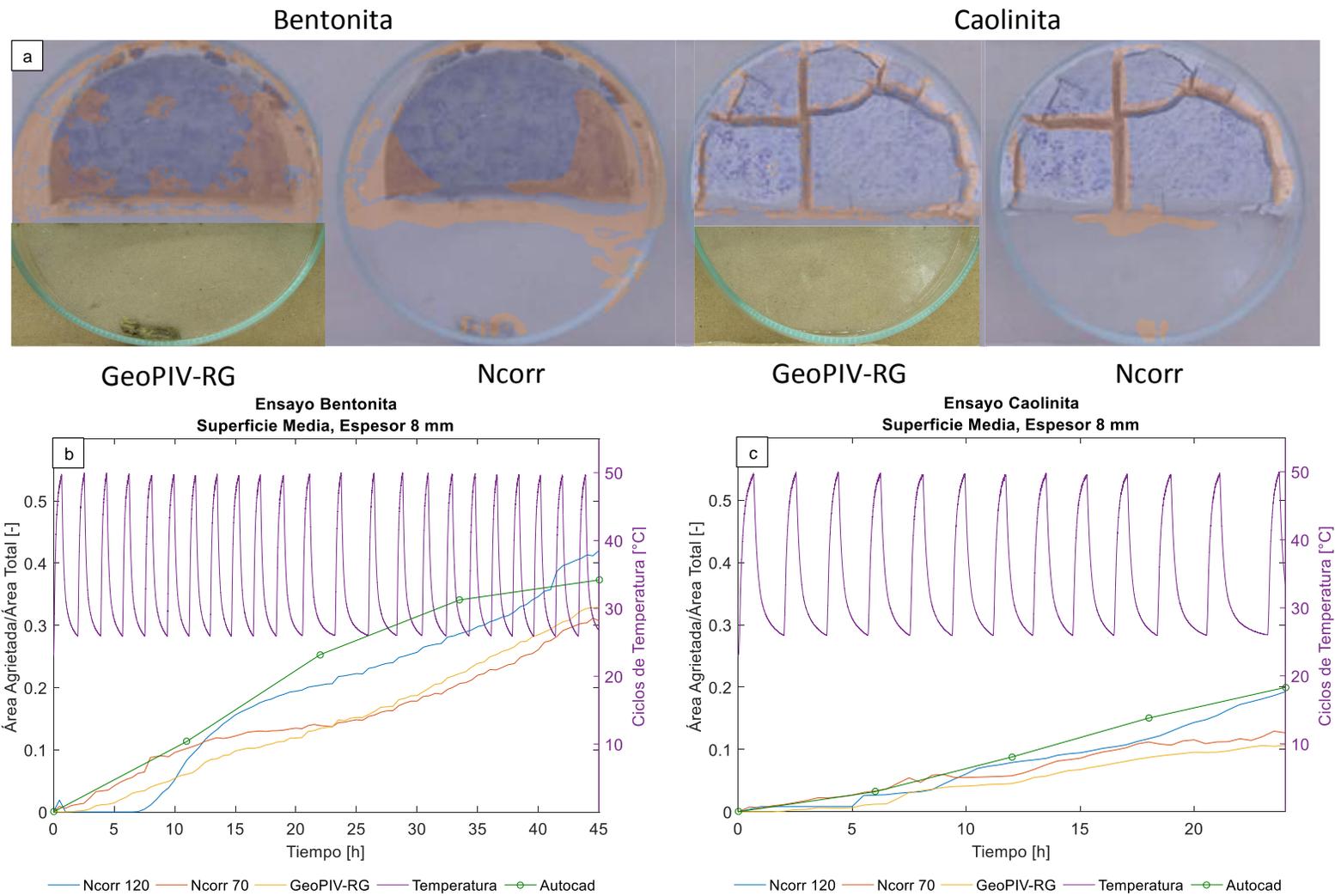


Figura 64. Resultados de (a) zonas agrietadas consideradas en los programas Ncorr y GeoPIV-RG, además de gráficos de agrietamiento en función del tiempo para muestras de (b) bentonita y (c) caolinita en ensayo de mitad de superficie de las placas de Petri y espesor de 8 mm.

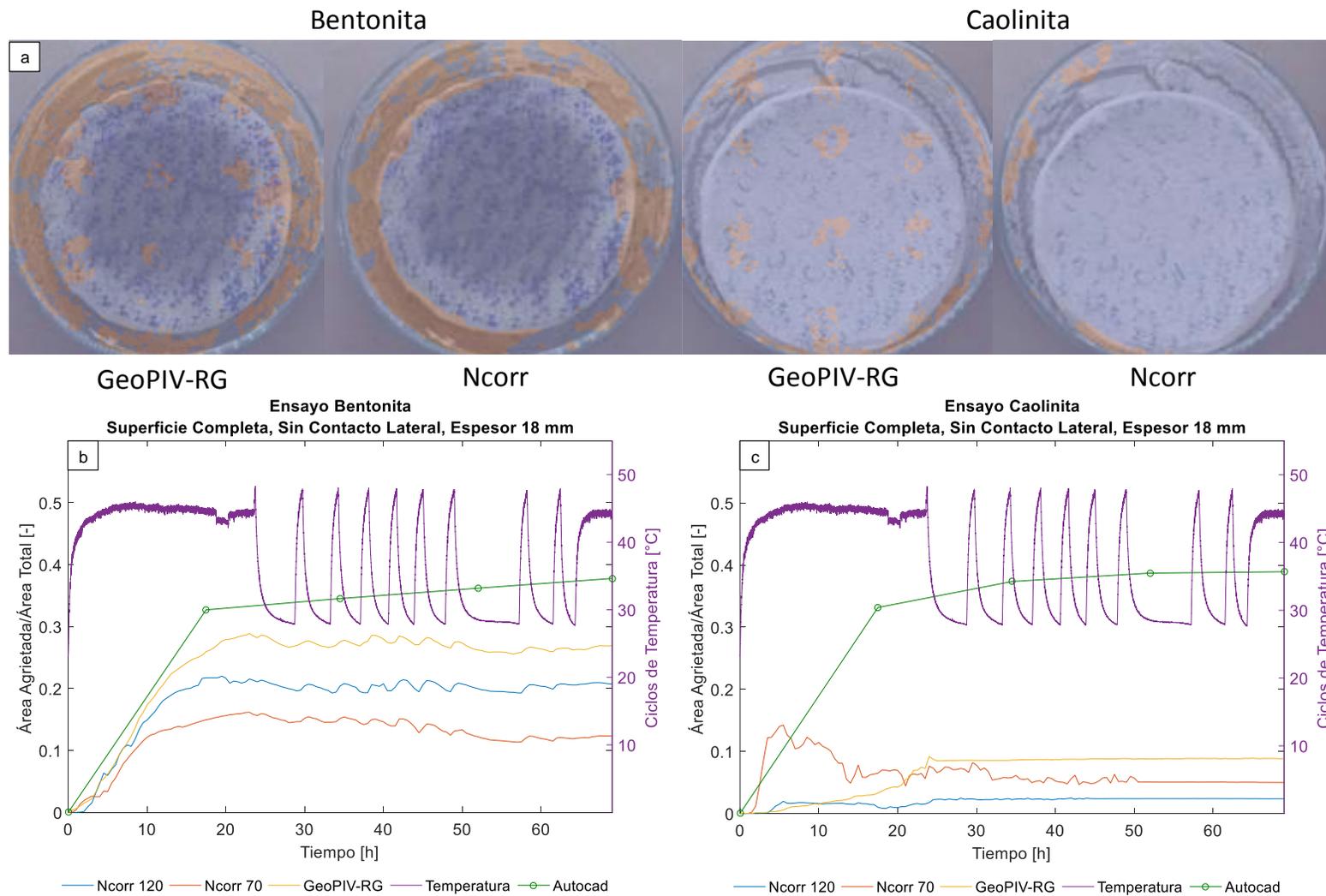


Figura 65. Resultados de (a) zonas agrietadas consideradas en los programas Ncorr y GeoPIV-RG, además de gráficos de agrietamiento en función del tiempo para muestras de (b) bentonita y (c) caolinita en ensayo de superficie total de las placas de Petri, sin contacto lateral y espesor de 18 mm.

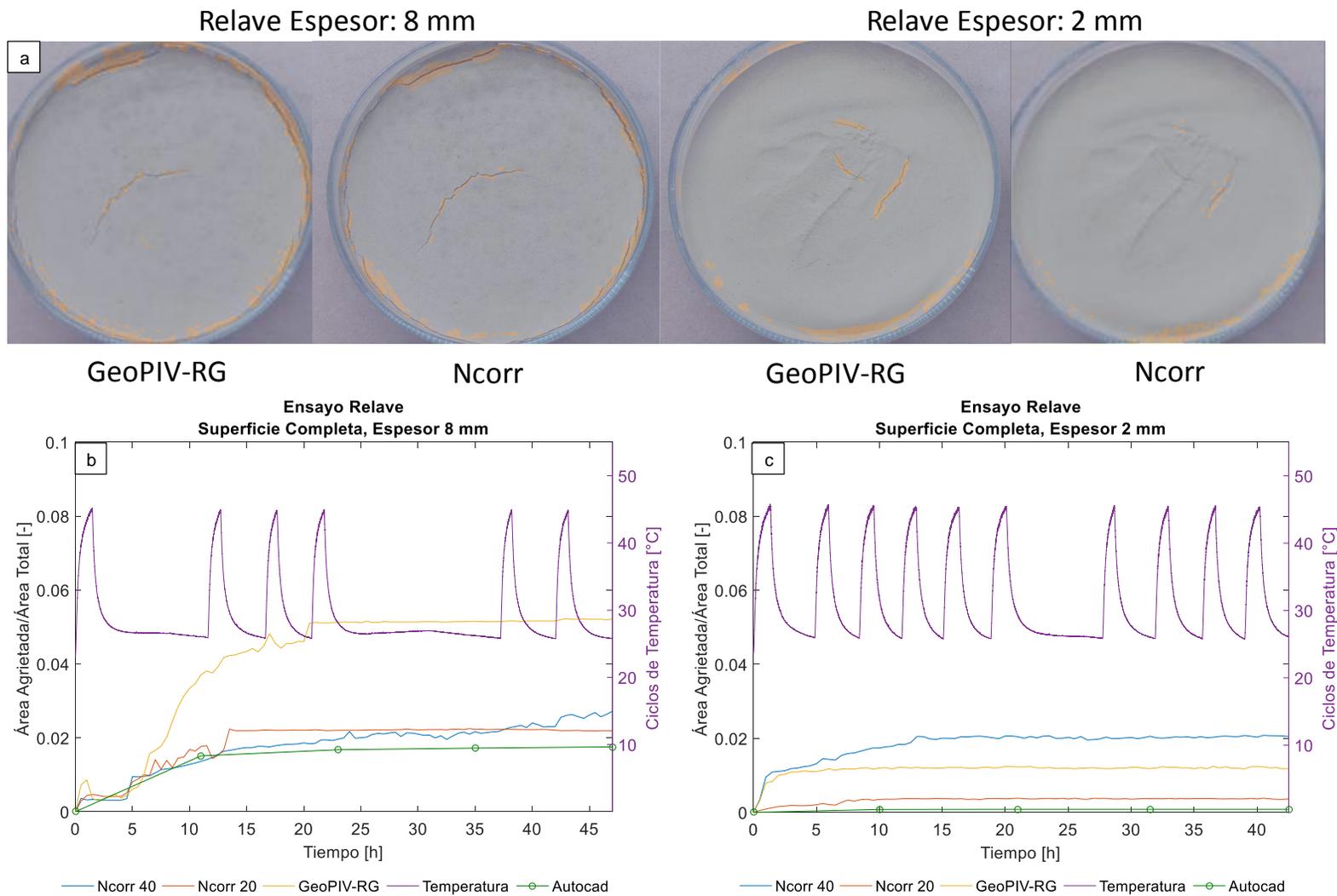


Figura 66. Resultados de (a) zonas agrietadas consideradas en los programas Ncorr y GeoPIV-RG, además de gráficos de agrietamiento en función del tiempo para muestras de finos de relave con espesor de (b) 8 mm y (c) 2 mm en ensayo de superficie total de las placas de Petri.

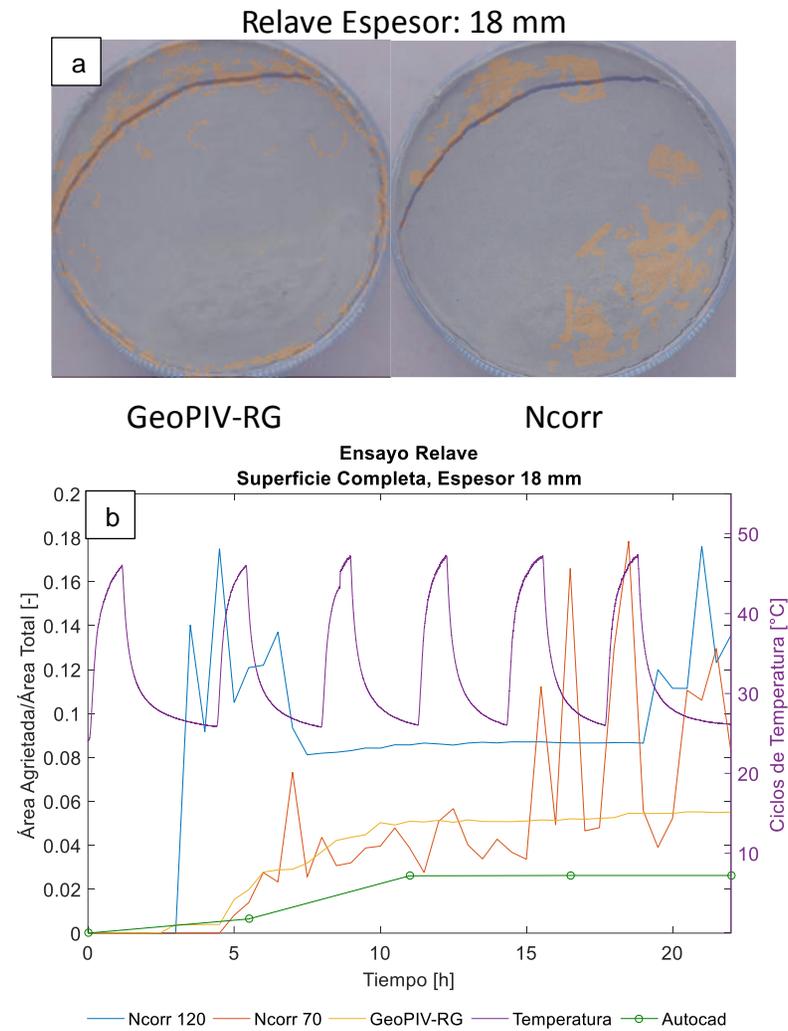


Figura 67. Resultados de (a) zonas agrietadas consideradas en los programas Ncorr y GeoPIV-RG, además de gráfico de agrietamiento en función del tiempo para muestra de finos de relave con espesor de (b) 18 mm en ensayo de superficie total de placa de Petri.

7. Ensayos Fotogramétricos en Arenas

Los ensayos desarrollados en arenas consistieron en evaluar si los programas computacionales utilizados eran capaces de detectar los desplazamientos y deformaciones generados por la pérdida de humedad cuando las arenas conforman un talud en laboratorio, producto de los ciclos de temperatura a los que fueron sometidas las muestras.

Para ejecutar los ensayos, se dispusieron aproximadamente 100 gr de cada tipo de arena en las placas de Petri y se humectó la superficie, con el fin de que al posicionar las placas sobre una base inclinada, el material se desprendiera al comenzar a disminuir su contenido de humedad. De esta forma se reprodujo una situación que se puede desarrollar en terreno o laboratorio con desplazamientos y deformaciones bruscas de las partículas. Para eliminar los problemas de cohesión generados en las primeras pruebas con los materiales, ambas arenas pasaron por un proceso de lavado antes de ser ensayadas y su humectación se llevó a cabo con agua destilada.

En los ensayos se utilizaron arenas medias y finas. Para ambos casos se obtuvieron sets de imágenes a partir de fotografías y de la conversión desde videos. Sin embargo, como los desplazamientos de las arenas finas fueron tan bruscos y su textura es baja en relación a la de las arenas medias, ninguno de los dos programas fue capaz de identificar los desplazamientos y las deformaciones registrados en fotografías en estas muestras de suelo, por lo que solamente se analizaron imágenes provenientes de cuadros de videos.

7.1 Arena Media

Las arenas medias que se utilizan fueron tamizadas entre malla #10 y malla #30. Luego de realizar una serie de ensayos, se escogieron dos situaciones para analizar mediante los programas. La primera de ellas involucró un conjunto de imágenes tomadas cada 3 minutos que consideraban desplazamientos pequeños de las partículas, mientras que la segunda abarcó imágenes con desplazamientos más importantes obtenidas mediante la transformación de un video a cuadros de imágenes.

La disposición inicial de las arenas medias utilizadas en las placas de Petri, sobre la superficie de madera inclinada se puede apreciar en la Figura 68. Como es posible observar, existe una clara diferencia entre la calidad de la imagen proveniente de una fotografía y un video; sin embargo, la única forma de poder analizar desplazamientos más grandes con el montaje experimental existente, fue mediante la conversión de videos obtenidos mediante la cámara fotográfica expuesta en la sección 4.1.2.

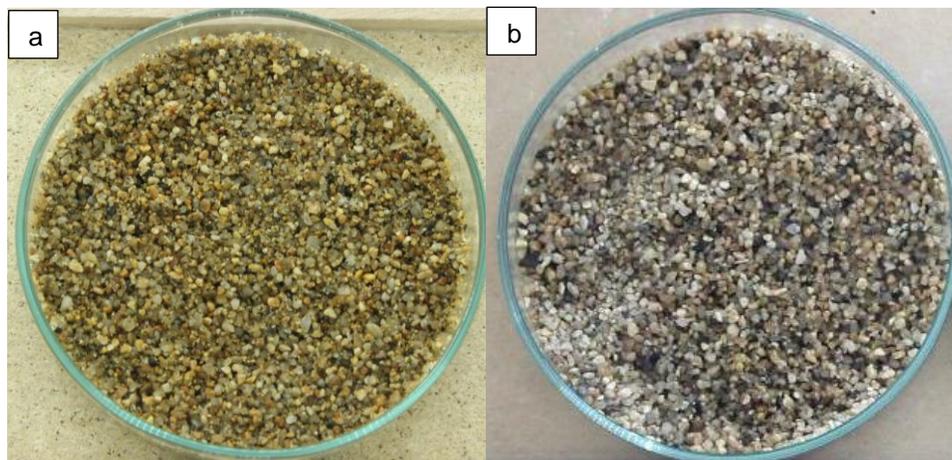


Figura 68. Situación inicial de arenas medias analizadas considerando a) imagen proveniente de fotografía, y b) imagen obtenida a partir de conversión de un video.

Los resultados de los desplazamientos y las deformaciones totales obtenidos a partir del análisis de imágenes de arenas medias generadas mediante fotografías y conversión de videos se presentan en la Figura 71 y Figura 72, respectivamente. Para un mejor entendimiento de los desplazamientos generados, se presentan los resultados de una imagen intermedia analizada y de la final.

Además, para acentuar los pequeños movimientos de las partículas de arena media en los ensayos provenientes de fotografías, en el Anexo D se exponen las imágenes de la situación inicial y final con las zonas desplazadas destacadas.

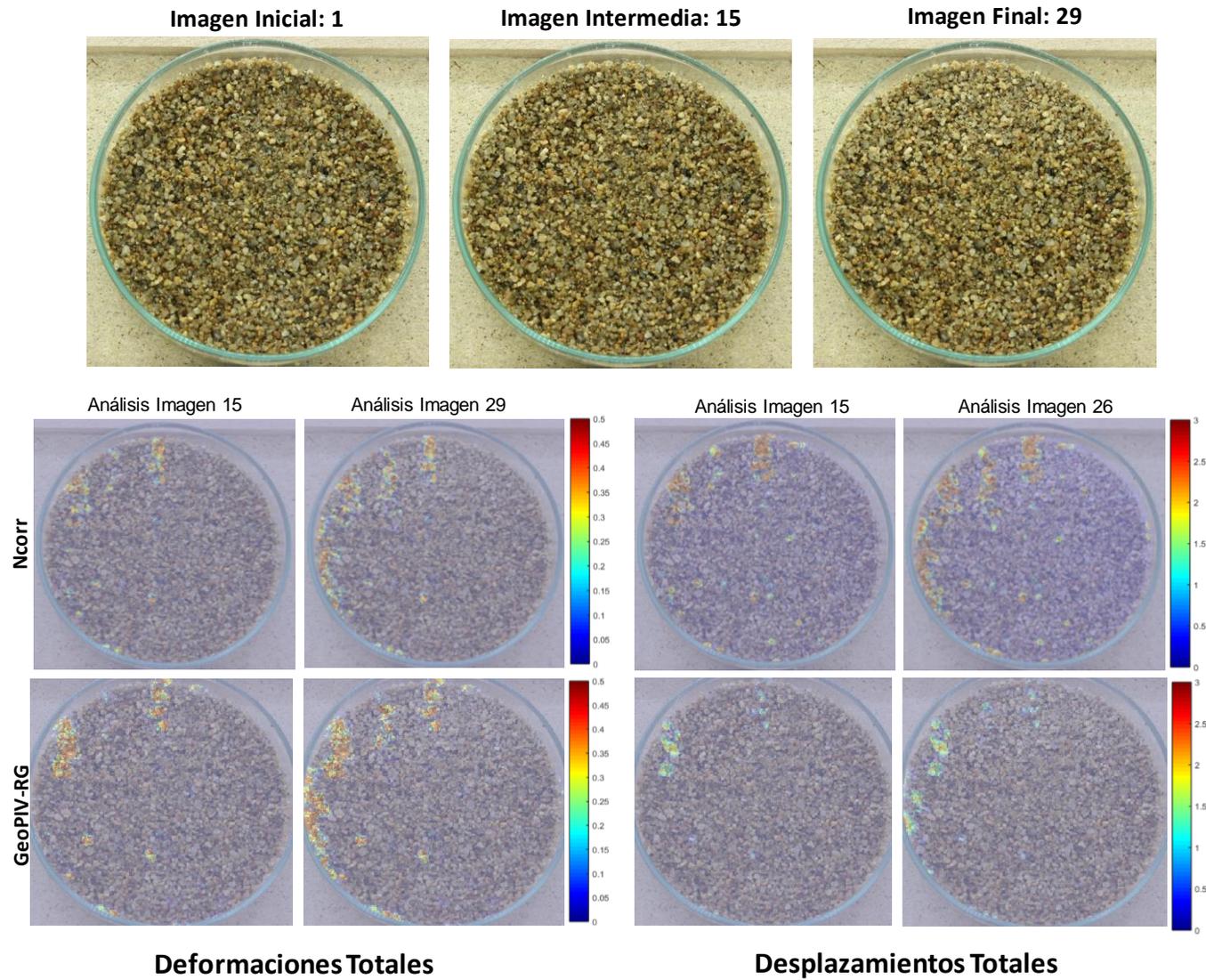


Figura 69. Resultados de desplazamientos [mm] y deformaciones totales tras los análisis con GeoPIV-RG y Ncorr sobre arena media con fotografías.

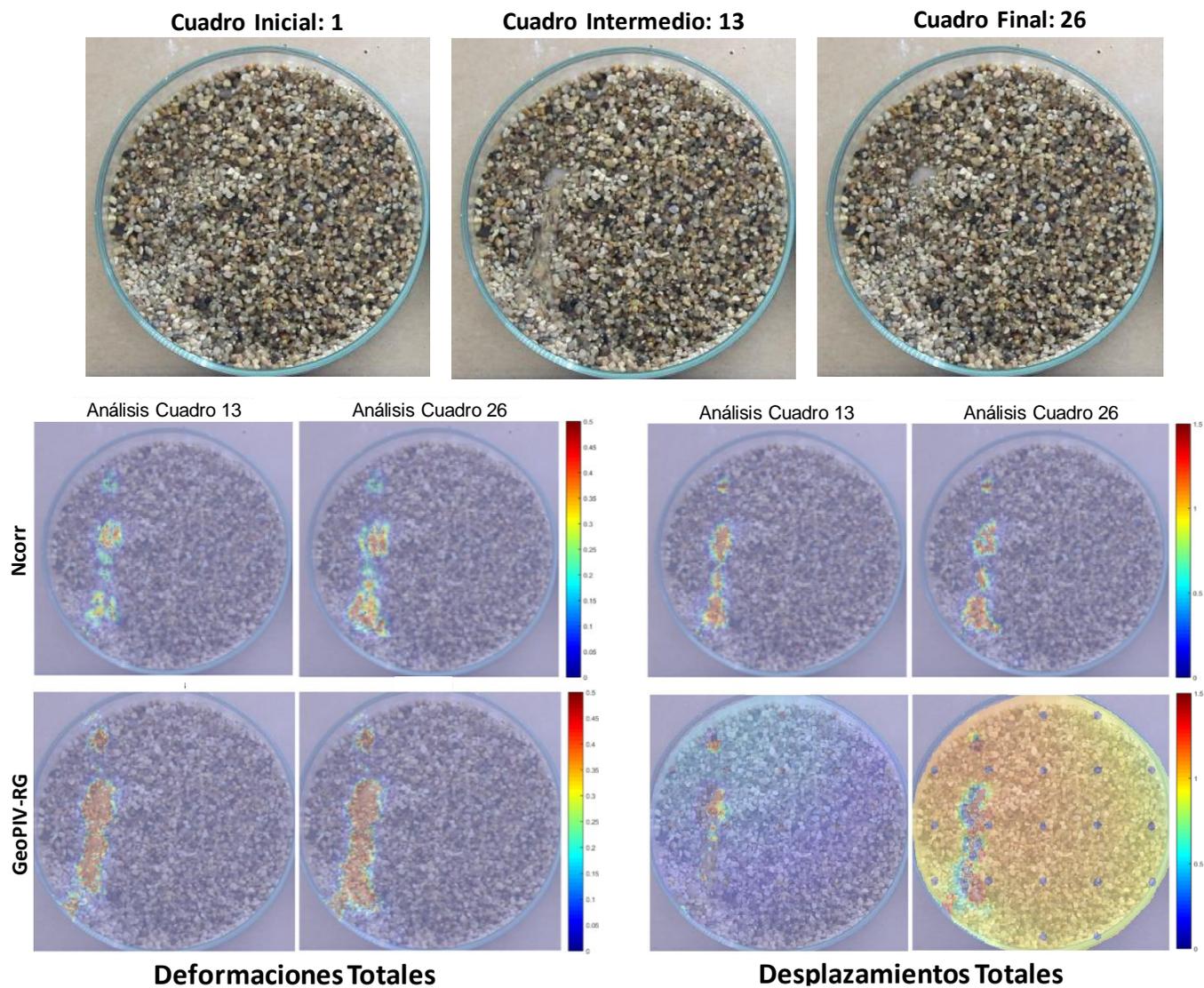


Figura 70. Resultados de desplazamientos [mm] y deformaciones totales tras análisis con GeoPIV-RG y Ncorr sobre arena media y cuadros de video.

7.2 Arena Fina

La arena fina que se utilizó en los ensayos consideró dos configuraciones diferentes. La primera abarcó tamaños de partículas entre la malla #100 y la malla #50, mientras que la segunda consideró material bajo la malla #100 y sobre la malla #200. Lo anterior se realizó con el fin de evidenciar si existe alguna diferencia en sus comportamientos y si se podían rescatar mayores datos en el análisis fotogramétrico posterior.

Al igual que con la arena media, con las arenas finas se escogieron dos situaciones para analizar mediante los programas, pero en este caso ambas involucraron la obtención de imágenes mediante conversión de videos. La primera de ellas considera un conjunto de cuadros que registran los desplazamientos de arenas bajo malla #50 y sobre malla #100, mientras que la segunda considera arenas bajo la malla #100 y sobre la malla #200. La disposición inicial de arenas finas utilizadas en las placas de Petri sobre la superficie de madera inclinada, se puede apreciar en la Figura 71.

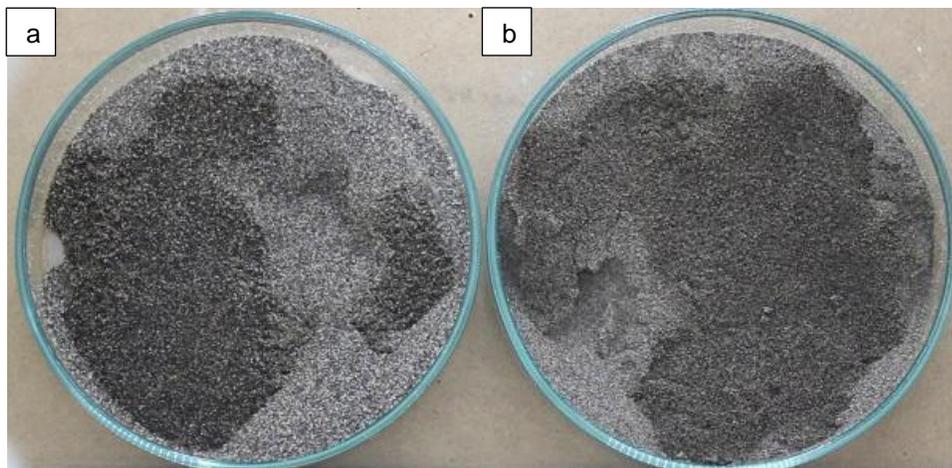


Figura 71. Situación inicial de arenas finas analizadas, a) sobre malla #100 y b) bajo malla #100.

Los resultados de desplazamientos y deformaciones totales obtenidos a partir del análisis de imágenes de arenas finas generadas mediante conversión de videos se presentan en la Figura 72 y la Figura 73. Para un mejor entendimiento de los desplazamientos producidos, se presentan los resultados de una imagen intermedia analizada y de la final, de igual forma que en los casos de arenas medias expuestos previamente.

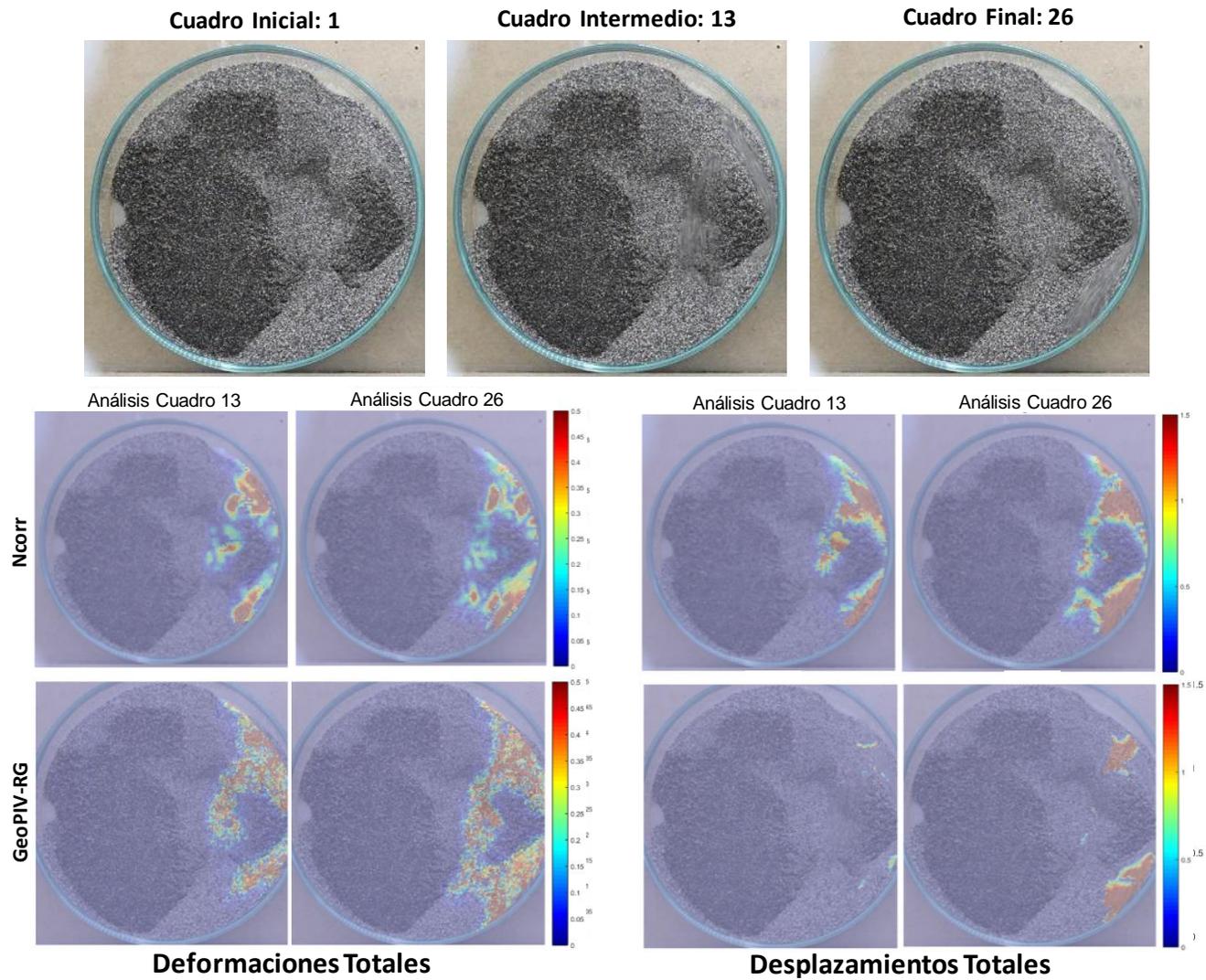


Figura 72. Resultados de desplazamientos [mm] y deformaciones totales tras los análisis con GeoPIV-RG y Ncorr con arenas finas sobre malla #100.

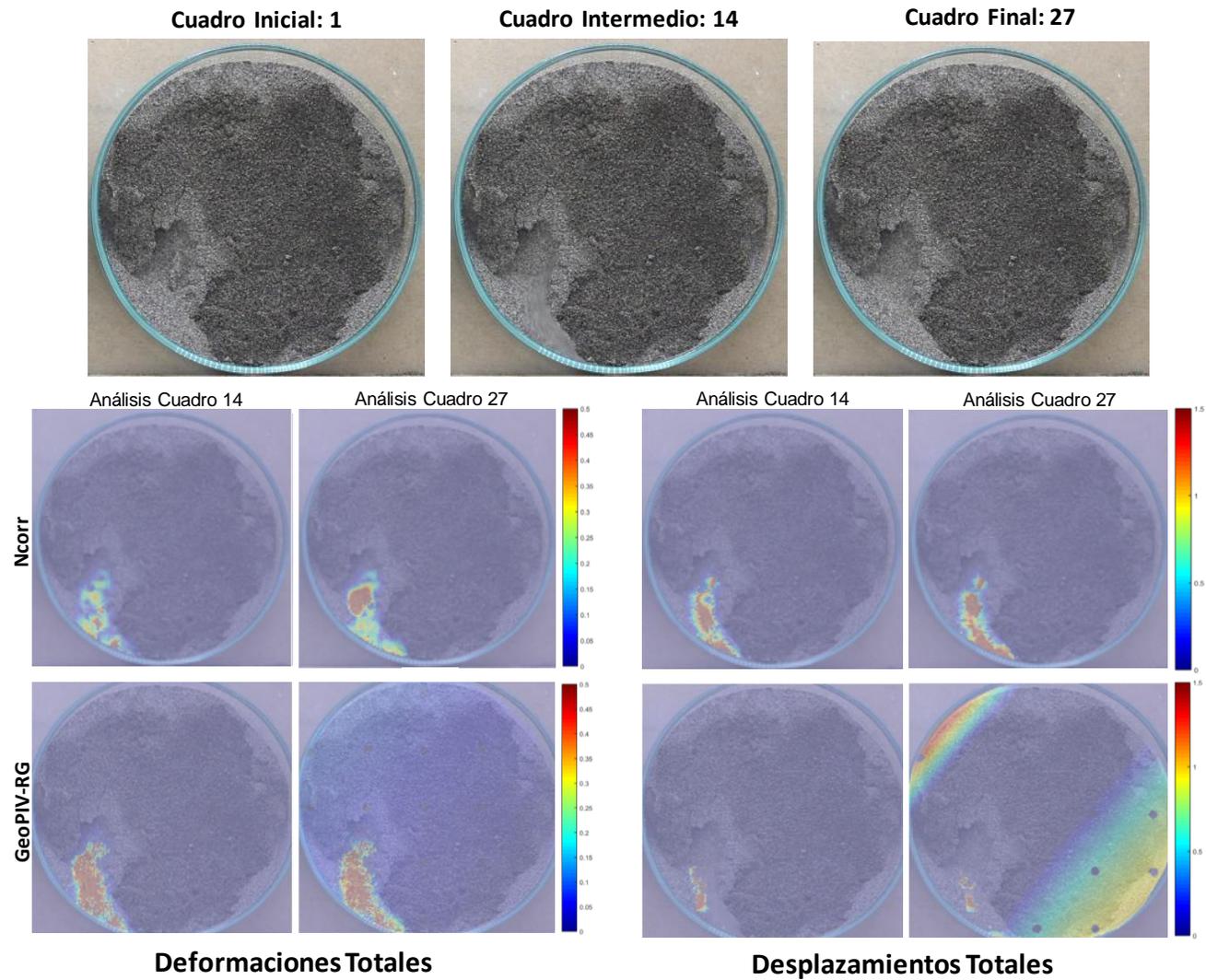


Figura 73. Resultados de desplazamientos [mm] y deformaciones totales tras los análisis en GeoPIV-RG y Ncorr con arenas finas sobre malla #200.

8. Análisis y Discusión de Resultados

8.1 Ensayos en Suelos Finos

8.1.1 Influencia del Índice de Plasticidad en el Comportamiento de Suelos Finos

En primer lugar, es posible comparar el estado final de las muestras de caolinita y bentonita de todos los ensayos realizados, tanto las que cubren la totalidad de la superficie de las placas de Petri como las que cubren la mitad, abarcando distintos espesores y condiciones de borde. La situación final de las muestras estudiadas se expone en la Figura 74.

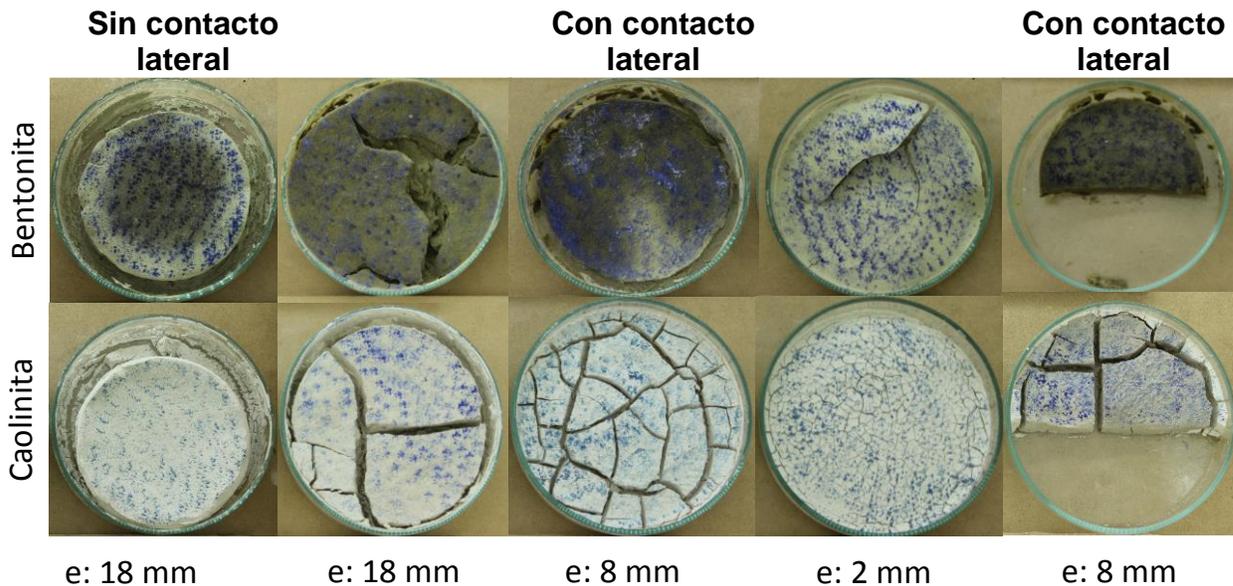


Figura 74. Resumen de la situación final de los ensayos de caolinita y bentonita sometidas a ciclos de secado.

En la Figura 74 se puede observar que las muestras de caolinita y bentonita sin contacto lateral con la placa de Petri no desarrollaron grietas superficiales, sino que solo contracción volumétrica. Este comportamiento es esperable debido a que no existe una restricción de deformación en ese sentido.

Además, si se analizan las muestras que ocupan toda la altura de las placas de Petri (18 mm) con contacto lateral, se aprecia que existe agrietamiento tanto para la bentonita como para la caolinita. En el caso de la bentonita, la mayor deformación está concentrada en el centro, mientras que para la caolinita existen más sectores en los que se presentan agrietamientos. La máxima magnitud de la grieta en la bentonita alcanza los 9,7 mm y para la caolinita la grieta central abarca 4,6 mm, lo que refleja la concentración de la deformación en la primera muestra.

Por el contrario, al observar los resultados de caolinita y bentonita con un espesor de 8 mm y contacto lateral en toda la placa, se puede determinar que la bentonita solo se contrae volumétricamente desde los extremos. El agrietamiento en la caolinita es muy

notorio llegando a formar una red de grietas similar a la observada por Tang *et al.* (2011) al someter muestras de arcilla Romainville a un ciclo de secado. Además, la razón de agrietamiento exhibida por la muestra de caolinita con estas condiciones alcanza el 20%, valor similar al exhibido por la arcilla Romainville (16%) después del primer ciclo. Si bien existe un 4% de diferencia, los resultados son bastante similares como se esperaba producto de que ambos bordean un índice de plasticidad del 40%.

Un resultado similar se aprecia en el ensayo de caolinita y bentonita con la mitad de la superficie de la placa de Petri y un espesor de 8 mm. La bentonita solo presenta contracción volumétrica desde los extremos, mientras que la caolinita desarrolla un agrietamiento notorio en el centro.

En el ensayo de caolinita y bentonita de espesor 2 mm y superficie completa, la caolinita presenta una gran cantidad de grietas de baja magnitud. La muestra de bentonita también se agrieta, pero se diferencia de la caolinita por su predominante deformación vertical (fuera del plano de la imagen).

Por otra parte, una comparación del resultado expuesto por las tres muestras de finos de relave analizadas, se presenta en la Figura 75. Al analizar la figura expuesta, es claro ver que existe un incremento en la magnitud de las grietas que exhiben las muestras cuando el espesor utilizado aumenta, lo que confirma lo estudiado por Tang *et al.* (2008).

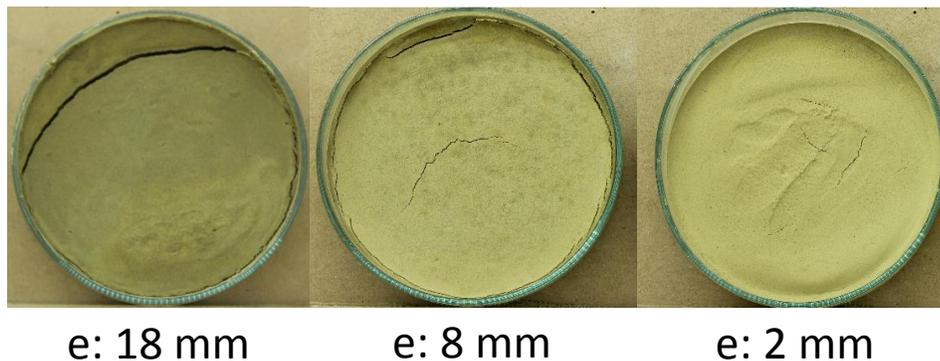


Figura 75. Resumen de situación final de ensayos de finos de relave sometidos a ciclos de temperatura.

Junto con lo anterior, es posible comparar el comportamiento de los suelos finos sometidos a ciclos de temperatura que abarcan la totalidad de la superficie de la placa de Petri. Esta comparación considera el nivel de agrietamiento en función del espesor de la muestra, además del contenido de humedad una vez finalizado el ensayo. La comparación considera los resultados obtenidos mediante Autocad, para todas las muestras analizadas (Figura 76).

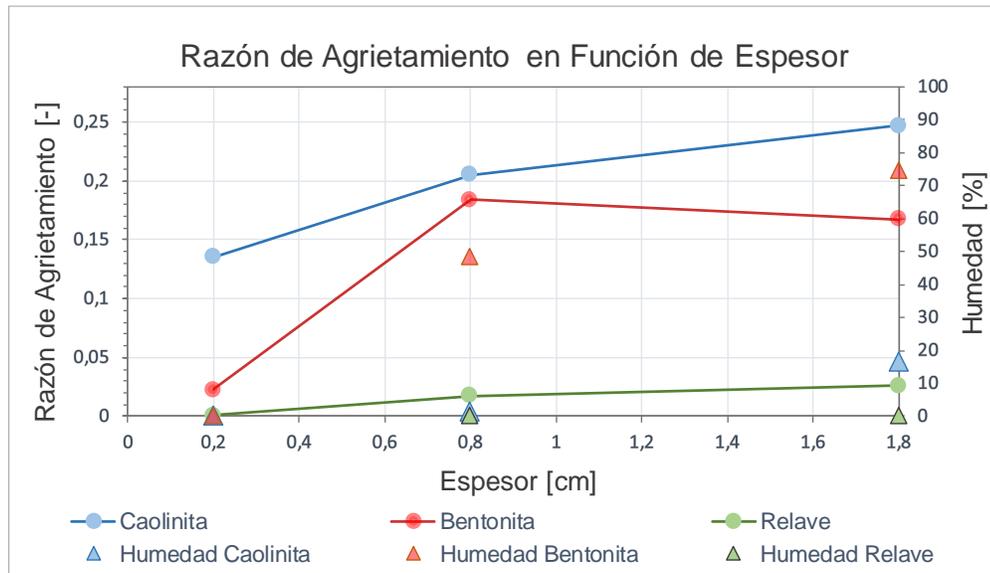


Figura 76. Gráfico de Razón entre área agrietada y área total, y humedad final en función del espesor para suelos finos analizados.

La Figura 76 muestra que a medida que aumenta el espesor de las muestras de finos de relave y caolinita, mayor es la razón entre el área agrietada y el área total, es decir, mayor es la deformación superficial, tal como lo expone Tang *et al.* (2008). Sin embargo, este comportamiento no ocurre en el caso de la bentonita, que disminuye su agrietamiento para el mayor espesor analizado.

Además, la caolinita y los finos de relave cumplen que a mayor índice de plasticidad (Tabla 6), mayor es la deformación exhibida, como concluyen Albrecht y Benson (2001) y Rayhani *et al.* (2008). Sin embargo, la bentonita nuevamente se escapa de lo esperado. Esto se podría deber a dos factores. El primero de ellos tiene relación con los contenidos de humedad de las muestras. Si se observa la Figura 76, es posible precisar que el contenido de humedad final de las muestras de bentonita es al menos 39 veces mayor, en el caso del espesor de 0,8 cm y 4 veces más grande cuando se analiza el espesor de 1,8 cm, en relación a los contenidos de humedad de las muestras de caolinita. Sin duda esto genera un problema en el análisis, debido a que no se está realizando una comparación bajo las mismas condiciones experimentales. Más aún, si se analizan las curvas de razón de agrietamiento en función del tiempo (Figura 61.b y Figura 62.b), para el caso de la bentonita la pendiente sigue siendo creciente una vez finalizado el ensayo, para espesores de 8 mm y 18 mm. Por el contrario, lo anterior solo se cumple para un espesor de 18 mm en el caso de la caolinita y la pendiente es menor que la de la bentonita.

El segundo factor que pudiese influir en los resultados de la bentonita es el análisis fotogramétrico desarrollado. Las imágenes analizadas solo consideran la deformación horizontal de las muestras, lo que hace imposible que pueda determinarse la deformación vertical de los suelos en función del tiempo y, con ello, la contracción volumétrica total. Producto de esto, no se pueden comparar directamente los resultados de este estudio con los gráficos generados por Albrecht y Benson (2001) que se presentan en la Figura 5, ya que los autores consideran la deformación volumétrica.

Además, si se agrega al análisis descrito el caso del ensayo de caolinita y bentonita sin contacto lateral con la totalidad de la superficie de las placas de Petri cubiertas, se reafirma lo expuesto, es decir, la razón de agrietamiento al finalizar el ensayo es mayor para la caolinita (0,39) que para la bentonita (0,38), aunque debe considerarse que los valores de humedad difieren en más de un 30% (Tabla 19).

Cuando se analiza el caso de las muestras de caolinita y bentonita que cubren la mitad de la superficie de las placas de Petri, la situación cambia. Si se considera el mismo tiempo de secado justo antes de que la caolinita deslice, la bentonita es la que exhibe una mayor contracción, con una razón de agrietamiento de 0,26 sobre 0,20 de la caolinita. Este es el único caso en el que la razón de agrietamiento de la bentonita es mayor, lo que se puede explicar por dos motivos. El primero se debe a que, como se vio previamente en la Figura 76, el mayor agrietamiento en los ensayos de bentonita se presenta en la muestra de 8 mm de espesor. El segundo es que, al considerar la mitad de la superficie de la placa de Petri en el ensayo, existe una mayor superficie de suelo en contacto directo con el aire del contenedor. Ambas situaciones generan una pérdida de agua más rápida y con ello, una contracción más rápida del suelo.

Como los ensayos realizados involucraron el uso de agua potable, surge la interrogante acerca de si este tipo de agua podría haber alterado los resultados. Sin embargo, durante el desarrollo del trabajo se repitieron los mismos ensayos con agua destilada sobre muestras de caolinita y bentonita con 8 mm de espesor y superficie completa (Figura 44.a), pero los resultados no mostraron diferencias significativas.

8.1.2 Influencia de Ciclos de Temperatura en el Comportamiento de Suelos Finos

La Figura 77 compara la razón de agrietamiento en función del tiempo para las muestras de caolinita y bentonita en los distintos ensayos desarrollados. De acuerdo a lo expuesto para el caso de la bentonita y la caolinita, la muestra que se contrae más rápidamente es la que no presenta contacto lateral y tiene un espesor de 18 mm. Sin embargo, la comparación realizada puede no ser totalmente válida, producto de la variación que existe en los ciclos de temperatura aplicados. Como es posible observar en la Figura 48, en el desarrollo del ensayo sin contacto lateral y espesor de 18 mm, la temperatura máxima de 46°C se mantiene constante durante las primeras 24 horas de ensayo, lo que favorece la rápida pérdida de agua de los suelos estudiados y beneficia el aumento de la razón de agrietamiento.

Si se analizan las demás curvas de la Figura 77 para el caso de la bentonita, se observa que el agrietamiento que se desarrolla más rápido y en mayor magnitud es el de la muestra de 8 mm de espesor y la mitad de la superficie de la placa de Petri cubierta, seguida por los de la totalidad de la superficie cubierta, y 8 y 18 mm de espesor, respectivamente. El resultado anterior es esperable en cuanto la pérdida de agua se dificulta a medida que aumenta el espesor y disminuye la superficie de las muestras en contacto directo con el aire.

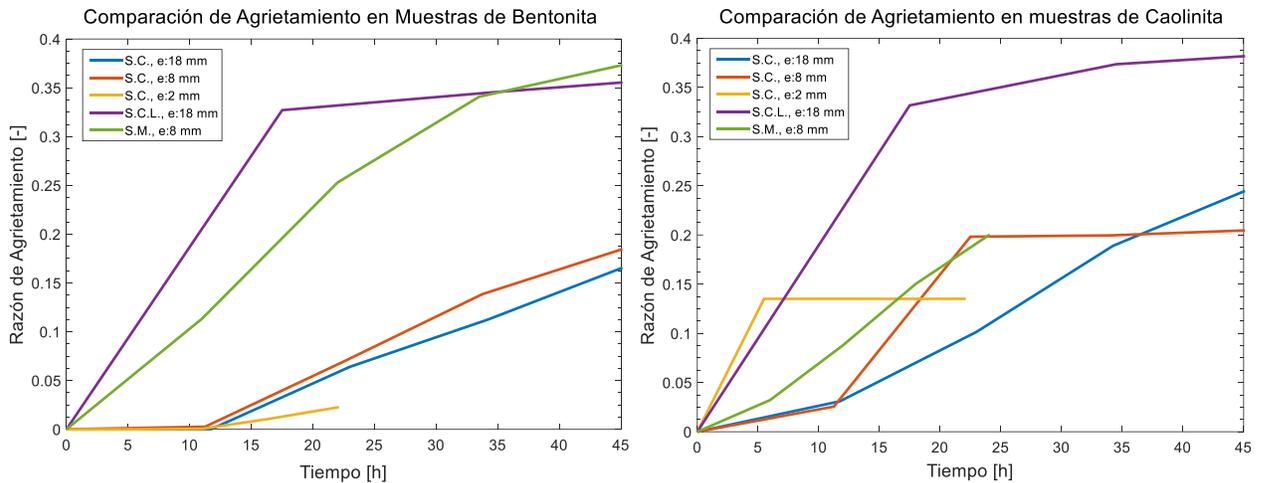


Figura 77. Comparación de la razón de agrietamiento para las muestras de bentonita y caolinita en todos los ensayos desarrollados. S.C.: superficie completa de las placas de Petri, S.M.: mitad de la superficie y S.C.L.: superficie completa de las placas sin contacto lateral.

Si se comparan los ensayos para el caso de la caolinita, de acuerdo a la Figura 77, se ve que inicialmente la muestra con superficie total de la placa de Petri y espesor de 2 mm, es la que se agrieta más rápidamente, alcanzando un valor constante luego de 6 horas de ciclado. Además, se observa que, si bien inicialmente el ensayo con la totalidad de la placa de Petri cubierta y un espesor de 8 mm, genera un agrietamiento más rápido producto de la mayor facilidad de pérdida de agua con respecto al del espesor de 18 mm, el agrietamiento final de la muestra con la placa completamente cubierta y espesor de 18 mm es mayor.

Si se agrega al análisis el agrietamiento en función del tiempo de las muestras de finos de relave en estudio, no se observa la influencia del periodo de los ciclos en el comportamiento de los suelos. Esto se puede observar en la Figura 50 (Sección 6.4) y en la Figura 78, que se presenta a continuación.

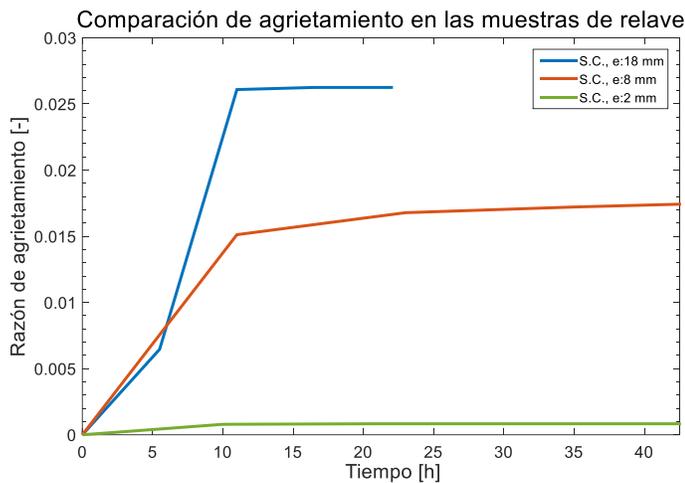


Figura 78. Comparación de la razón de agrietamiento para las muestras de relave en los ensayos desarrollados. S.C.: superficie completa de las placas de Petri.

El mayor daño en las muestras de finos de relave para los 3 espesores considerados, ocurre en las primeras 11 horas de secado. Si se observa la Figura 50, para las muestras de 2 mm y 18 mm de espesor, el primer ciclo tarda 5 horas aproximadamente en completarse y, para la de 8 mm, el periodo llega a las 12 horas. Pasadas las 11 horas de secado, el comportamiento de este suelo es insensible a los cambios de temperatura, lo que se puede entender a causa de su baja plasticidad y el reducido contenido de humedad inicial.

Producto de que el montaje experimental no cuenta con un sistema de enfriamiento, sino que depende del gradiente de temperatura entre el contenedor y el ambiente, los ciclos desarrollados en todos los ensayos no son equivalentes. Esto agrega una variable extra al comportamiento de los suelos analizados, lo que puede interferir con los resultados.

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante Ncorr y GeoPIV-RG en todos los ensayos desarrollados, no se ven grandes cambios en el comportamiento de los suelos cuando están expuestos a la fase de calentamiento o enfriamiento. Sin embargo, esto puede deberse a que los ciclos presentan periodos cortos y que el análisis fotogramétrico desarrollado considera imágenes cada 30 minutos. Para poder realizar un análisis que involucre las diferencias que exhibe el comportamiento de los suelos frente a los cambios de temperatura, sería necesario abordar una mayor cantidad de imágenes dentro de cada fase de los ciclos, lo que requiere incrementar considerablemente el uso de recursos computacionales y el tiempo de análisis.

8.1.3 Formación y Propagación de Grietas de Deseccación

Las imágenes tomadas permiten estudiar el lugar de formación inicial de grietas producto del secado por los diferentes suelos finos ensayados. Así, si se observa la Figura 79, es posible identificar que existe una zona con una irregularidad topográfica en la muestra de caolinita de 18 mm de espesor, la que posteriormente se transforma en una grieta. Lo mismo pasa con la muestra de finos de relave de 8 mm de espesor, que se presenta en la Figura 80; sin embargo, en este caso es menos notoria tanto la particularidad topográfica como el efecto que esto genera. De esta manera, se comprueba el efecto que tienen las irregularidades superficiales en los procesos de pérdida de humedad y posterior formación de grietas de desecación en suelos finos, como lo plantean Shin y Santamarina (2011).

Además, si se analiza la propagación de grietas de la caolinita en el tiempo, en la muestra que considera la totalidad de la superficie de la placa de Petri y un espesor de 8 mm, se comprueba lo descrito por Li y Zhang (2011), ya que la red de grietas comienza a formarse al final y en los puntos de giro de las grietas ya existentes, como también desde su centro con dirección aproximadamente perpendicular. La Figura 81 presenta una comparación en el tiempo de la propagación de grietas descrita.

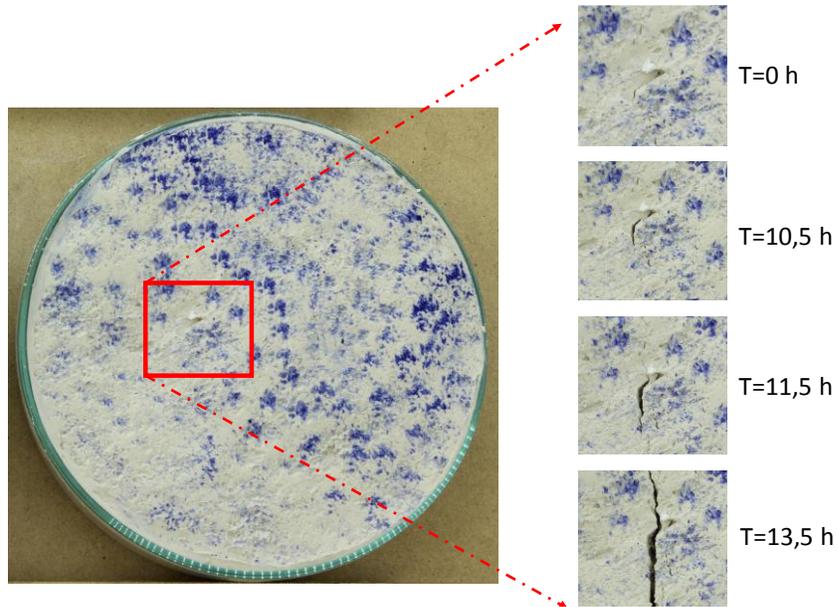


Figura 79. Comparación en el tiempo de un segmento con irregularidad topográfica de la muestra de caolinita, de 18 mm de espesor.

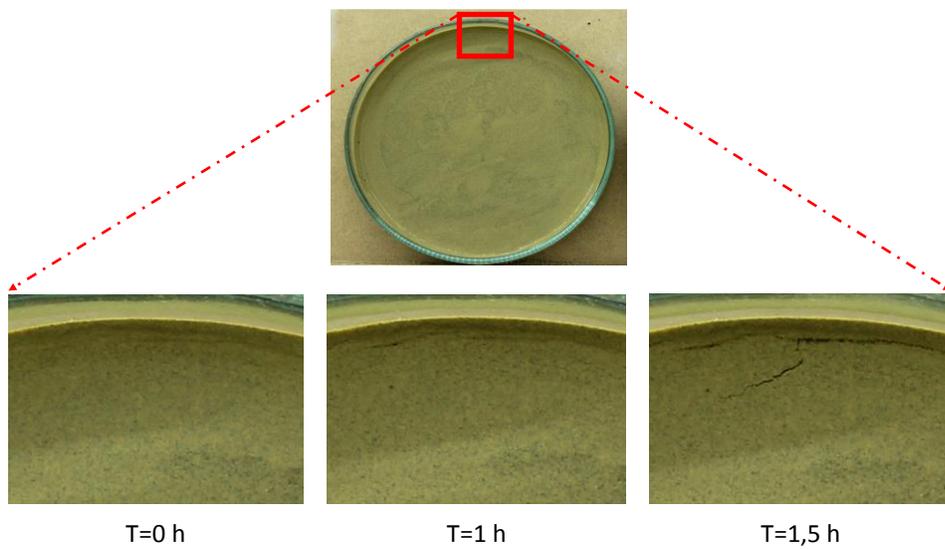


Figura 80. Comparación en el tiempo para un segmento de la muestra de finos de relave de 18 mm de espesor, con irregularidad topográfica.

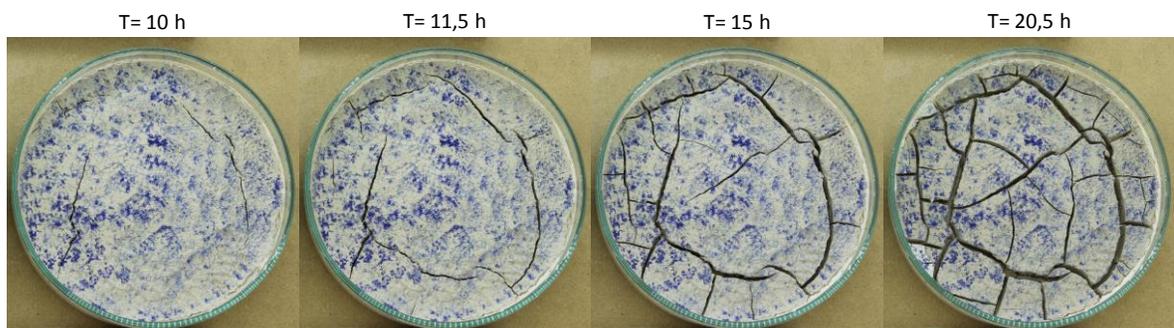


Figura 81. Propagación de las grietas en el tiempo sobre la muestra de caolinita con espesor de 8 mm.

8.1.4 Aplicación de Fotogrametría sobre Suelos Finos

Si se comparan los resultados finales de la razón de agrietamiento y/o contracción, obtenidos mediante los programas Ncorr y GeoPIV-RG, para cada uno de los ensayos desarrollados, y dichos resultados se contrastan con lo generado por Autocad, es posible obtener el error porcentual asociado a cada análisis fotogramétrico. Un resumen de lo descrito se presenta en la Figura 82.

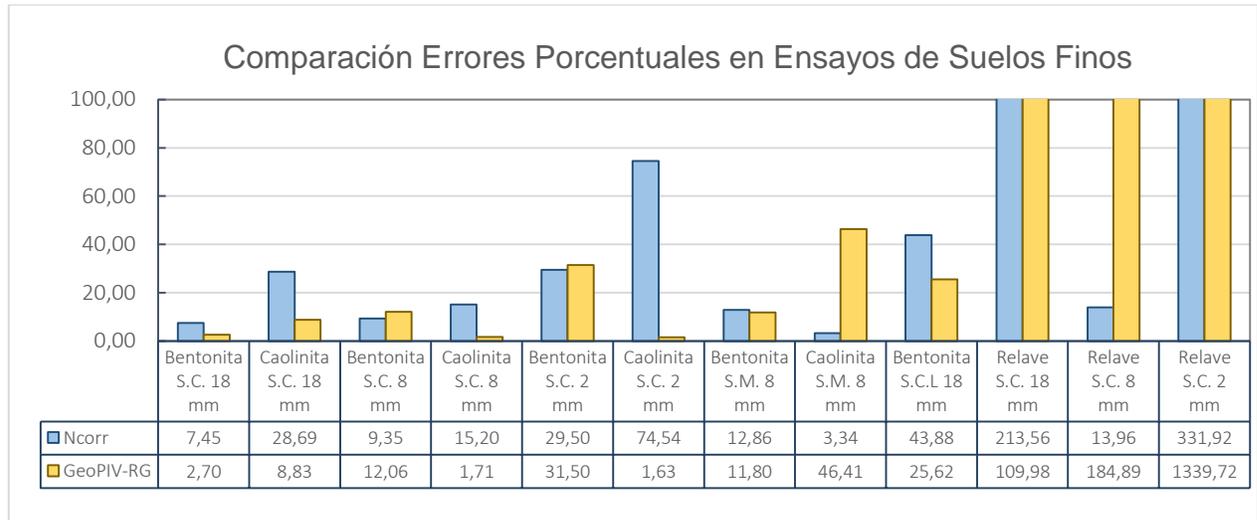


Figura 82. Gráfico de comparación de los errores porcentuales producto de los análisis fotogramétricos resultantes con Ncorr y GeoPIV-RG, en contraste con Autocad, para suelos finos. S.C.: superficie completa de las placas de Petri, S.M.: mitad de la superficie y S.C.L: superficie completa de las placas sin contacto lateral.

De acuerdo a la figura anterior, ambos programas reconocen adecuadamente las deformaciones generadas en las muestras de bentonita que consideran la totalidad de la superficie de las placas de Petri y espesores de 18 y 8 mm, alcanzando diferencias con los resultados de Autocad cercanas al 10%. Sin embargo, si se observan las imágenes que determinan las deformaciones entregadas por cada uno de los programas en el caso del espesor máximo (Figura 61), ambos análisis consideran una deformación extra inexistente en el costado derecho de la placa de Petri. Además, la contracción del extremo superior izquierdo es considerada como desplazamiento. Para el caso del espesor menor (Figura 62, 8 mm), las superficies que los programas identifican como agrietadas coinciden con lo que se visualiza, pero existen áreas que no son reconocidas por los programas, lo que tiene una relación directa con la elección del radio de píxeles para el análisis.

Por otra parte, la muestra de caolinita que abarca toda la superficie de las placas y posee un espesor de 18 mm, presenta diferencias más importantes que la bentonita en ambos programas, siendo Ncorr el que exhibe un error más evidente. Sin embargo, si se observa la Figura 53 se aprecia que la diferencia entre ambos programas, es que Ncorr reconoce la zona superior solo como desplazada, mientras que GeoPIV-RG incluye deformaciones en esa zona y en áreas cercanas a los puntos de control utilizados. Además, producto del radio considerado en Ncorr, las grietas más pequeñas no son identificables para el programa, pero radios menores exponen más ruido y resultados más disímiles. Para el

caso de caolinita y espesor de 8 mm las diferencias son bajas, sobre todo con el caso de GeoPIV-RG. Al observar la Figura 62 se determina que ambos programas son capaces de identificar el agrietamiento que se verifica visualmente.

Al evaluar los resultados sobre la muestra de bentonita que abarca la mitad de la superficie de la placa, las diferencias son bastante bajas, cercanas al 10% con respecto a los resultados de Autocad. Sin embargo, si se observa la Figura 64, la identificación de la deformación por ambos programas no corresponde a lo que se aprecia visualmente, lo que genera dudas en los resultados alcanzados. Esto puede deberse a la pérdida de textura en las imágenes producto de la exposición del vidrio de la placa de Petri por la contracción volumétrica de la muestra, interfiriendo en la interpretación de las imágenes que hacen los programas. Además, la elevada contracción volumétrica que exhibe la muestra puede alterar la posición del suelo lateralmente, deformación que no es considerada en Autocad.

Para el caso del análisis de la caolinita con superficie media, con el programa GeoPIV-RG los resultados difieren en cerca del 46%, mientras que con Ncorr son bastante similares, alcanzando un 3,3%. Esto se explica producto de que, al contraerse el material y como ya se ha señalado, quedan expuestas partes de la placa de Petri consideradas en la zona de interés, que dejan de analizarse producto de la baja textura. En el caso de Ncorr, si bien no se reconoce exactamente la zona, existe una porción mayor que exhibe deformaciones (Figura 71), lo que hace que el resultado se acerque más al de Autocad.

Los resultados obtenidos para el ensayo de bentonita con superficie completa y sin contacto lateral, presentan una mayor diferencia en el caso de Ncorr que en el de GeoPIV-RG. Nuevamente, los errores se asocian a la pérdida de textura. Sin embargo, el análisis con GeoPIV-RG identifica como zonas deformadas áreas cercanas a los puntos de control que en la realidad no se deforman, aumentando la proporción de área deformada y acercándose artificialmente al valor calculado con Autocad.

Por otra parte, la muestra de caolinita con superficie completa y sin contacto lateral no se consideró en el análisis, dado que como se genera un desplazamiento uniforme en toda la muestra, las deformaciones determinadas por el porcentaje límite son o muy grandes o muy pequeñas. Esto genera que no se consiga un ajuste para la zona que se contrae, de acuerdo al valor límite de deformación predefinido metodológicamente (Tabla 24), como sí ocurrió en los otros casos.

En el ensayo fotogramétrico sobre muestra de finos de relave de 2 mm de espesor, las diferencias entre lo obtenido por Autocad y Ncorr, alcanzan el 300% y para GeoPIV-RG llegan al 1300%. Con este ensayo se comprueban las alteraciones producidas por luces y sombras repentinas sobre las imágenes. Un ejemplo de lo señalado se presenta en la Figura 83. Al observar las imágenes, es posible determinar que al inicio del ensayo existe un reflejo de luz producto del agua. A medida que transcurre el ensayo, el agua se evapora y se pierde el efecto de la luz. Producto de lo anterior, los programas GeoPIV-RG y Ncorr, consideran que en esa zona se desarrollan desplazamientos y deformaciones, las cuales son inexistentes. Esto coincide con lo que plantean Travelletti *et al.* (2012), de acuerdo a los errores en los cambios bruscos de textura presentes en los análisis.

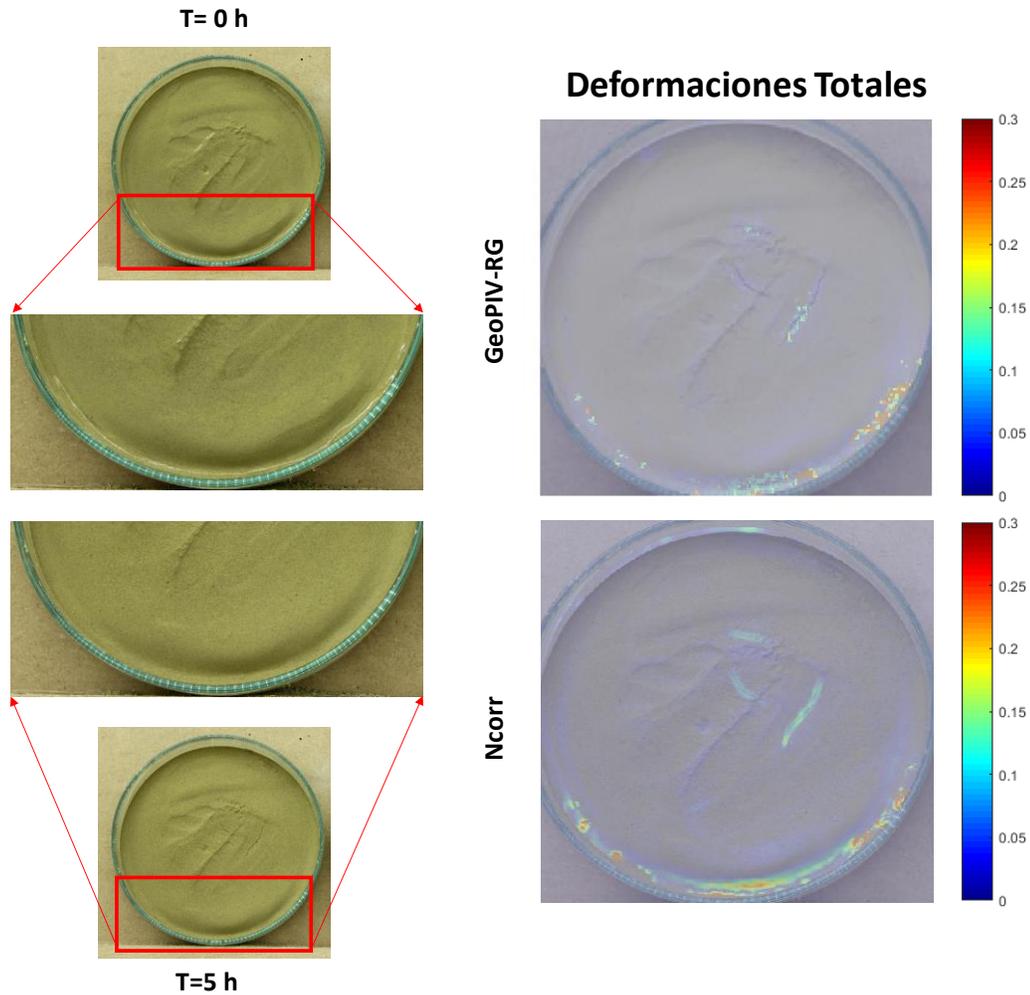


Figura 83. Comparación de la deformación total obtenida mediante análisis fotogramétrico con Ncorr y GeoPIV-RG sobre muestras de relave de 8 mm de espesor.

Con las diferencias obtenidas en los resultados de este ensayo se establece que, si bien los dos programas consideran deformaciones en la zona iluminada y alteran sus resultados, GeoPIV-RG es más sensible a estos cambios en comparación con Ncorr.

Para la muestra de relave de 8 mm de espesor, ambos programas sobreestiman la zona agrietada al considerar píxeles próximos a los deformados, los que no presentan agrietamiento. GeoPIV-RG se aleja en un 150% más que Ncorr. Sin embargo, si se observa la Figura 66, lo obtenido por los dos programas no difiere mucho y la magnitud del error está directamente relacionada con el bajo agrietamiento expuesto por la muestra.

Además, un punto a considerar en este ensayo es que, si se analiza la superficie de la muestra a través del tiempo, se aprecia un claro cambio de textura en el suelo; sin embargo, esto no altera los resultados de deformaciones y desplazamientos generados por Ncorr y GeoPIV-RG. Esto ocurre debido a que se analiza una gran cantidad de imágenes y los cambios no son bruscos, en comparación con el efecto de la luz expuesto previamente. La Figura 84 muestra un ejemplo de lo descrito.

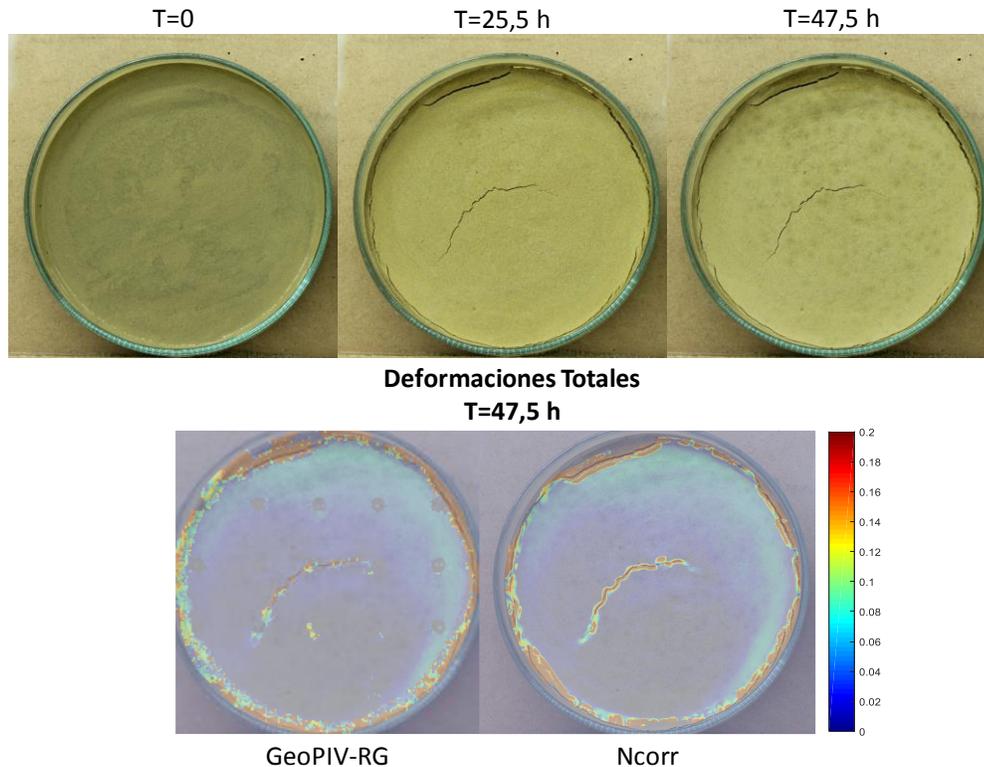


Figura 84. Comparación de la deformación total obtenida mediante el análisis fotogramétrico con Ncorr y GeoPIV-RG, sobre muestras de relave de 8 mm de espesor, frente a cambios de textura.

Por último, si se observan los resultados obtenidos por ambos programas sobre la muestra de finos de relave de 18 mm de espesor (Figura 59 y Figura 67), se determina que la disminución de textura puede generar resultados erróneos en los análisis. Sin embargo, al comparar ambos programas, se verifica que GeoPIV-RG es más efectivo en la detección de la zona agrietada cuando las imágenes presentan texturas menores en comparación con Ncorr.

Al análisis anterior, es necesario agregar que si se observan las razones de agrietamiento para todos los suelos finos (Figura 61 a Figura 66), y se comparan las curvas en el tiempo obtenidas por ambos programas, los casos que presentan mayor ruido coinciden con dos factores. El primero de ellos es la magnitud de los desplazamientos y deformaciones. Esto porque cuando entre fotografías existen cambios muy acentuados, el ruido en el análisis aumenta. El segundo factor se relaciona con la exposición de las placas de Petri. En los casos en los que las placas quedan más al descubierto, se genera un mayor ruido en los resultados producto de la pérdida de textura en el análisis. Sin embargo, las únicas muestras que no presentan una alteración en la superficie, entendida esta como la aplicación de tinta para aumentar la textura en las imágenes, son las de relave y, pese a que existe ruido en el análisis y una sobreestimación de las zonas agrietadas, igualmente se reconocen las zonas en las que existen deformaciones y desplazamientos para 2 de los 3 casos analizados.

Finalmente se puede determinar que cuando existen deformaciones verticales significativas, los programas no reconocen adecuadamente las zonas agrietadas (Figura 55), siendo GeoPIV-RG el que entrega peores resultados.

8.2 Ensayos de Arenas

El análisis de los desplazamientos de arenas mediante fotogrametría, no siempre es abordable producto de que los subconjuntos en los que se divide inicialmente la imagen y que permiten determinar los valores de desplazamientos y deformaciones, varían abruptamente. Esto hace que los programas no tengan cómo hacer un seguimiento preciso a las nuevas posiciones. Sin embargo, si los desplazamientos presentan magnitudes importantes, tanto Ncorr como GeoPIV-RG son capaces de identificar la zona deformada, pero no en todos los casos la magnitud de dicha variación.

8.2.1 Aplicación de Fotogrametría sobre Arena Media

Si se compara la fotografía inicial, intermedia y final del primer ensayo de arena media (Figura 69), los programas Ncorr y GeoPIV-RG identifican las zonas de desplazamientos de granos; sin embargo, la magnitud de los resultados es altamente disímil. Para el programa Ncorr, el mayor desplazamiento alcanza los 29,3 mm, mientras que para GeoPIV-RG el valor máximo no supera los 8 mm. Además, en la Figura 85 es posible observar los desplazamientos totales y vectoriales de una zona de arena media, mediante GeoPIV-RG. De acuerdo a esto, GeoPIV-RG reconoce que existe un movimiento en la zona en que los granos deslizan, pero los desplazamientos vectoriales exponen direcciones erróneas, ya que algunos vectores sugieren que los granos se desplazan hacia la parte superior de la placa.

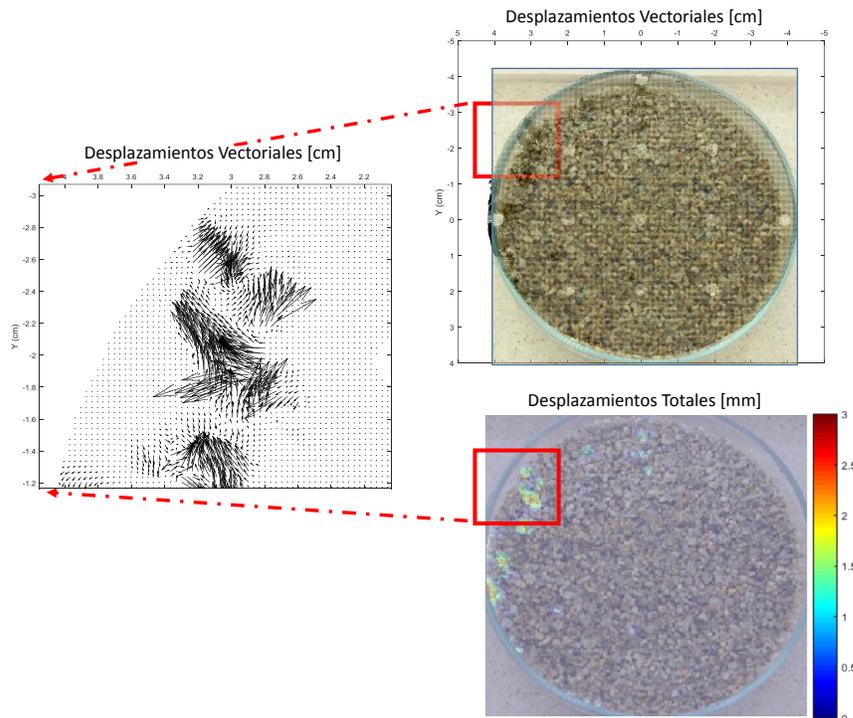


Figura 85. Comparación de los resultados de desplazamientos totales y vectoriales obtenidos mediante GeoPIV-RG

La segunda prueba con arena media, que considera distintos cuadros de un video (Figura 70), confirma la superioridad de Ncorr sobre GeoPIV-RG en la identificación de desplazamientos. Los erróneos desplazamientos obtenidos mediante GeoPIV-RG son

atribuibles a ruido durante el análisis, ya que definen movimientos en toda la superficie. Sin embargo, ambos programas reconocen la zona deformada.

8.2.2 Aplicación de Fotogrametría sobre Arena Fina

Para las arenas finas sobre malla #100 (Figura 72), ocurre una situación similar a las expuestas previamente. El programa Ncorr reconoce gráficamente mejor los desplazamientos que GeoPIV-RG; sin embargo, al analizar las deformaciones totales exhibidas por ambos programas, se determina que GeoPIV-RG reconoce mejor toda la zona afectada.

En este caso, si se comparan los valores de desplazamientos máximos para Ncorr, se obtiene un valor de 9,8 mm, mientras que para GeoPIV-RG el desplazamiento más grande equivale a 15,4 mm. Lamentablemente, no se puede determinar la precisión de los valores expuestos, producto de que el movimiento y tamaño de las partículas hace imposible realizar un seguimiento a los desplazamientos.

Si se realiza una comparación equivalente a la desarrollada para el caso de arenas medias con GeoPIV-RG, que considera los desplazamientos totales y vectoriales, se aprecia que los vectores reconocen un incremento de magnitud de desplazamiento, pero presentan una dirección ascendente, lo que claramente no tiene sentido físico.

Por último, al analizar los resultados obtenidos por ambos programas para la muestra de arena fina sobre malla #200 y bajo malla #100 (Figura 73), sucede lo mismo que en los casos anteriores. En GeoPIV-RG se presentan desplazamientos inexistentes en la realidad que pueden asociarse a ruido, mientras que Ncorr logra un mejor reconocimiento de la zona desplazada. Sin embargo, en este caso si bien las deformaciones son reconocidas por ambos programas, GeoPIV-RG también destaca erróneamente una zona no deformada.

Es importante destacar que existe una pérdida de los desplazamientos entre imágenes consecutivas, lo que implica que la magnitud de los desplazamientos obtenida puede ser errónea. Un ejemplo de la situación se presenta en la Figura 86.

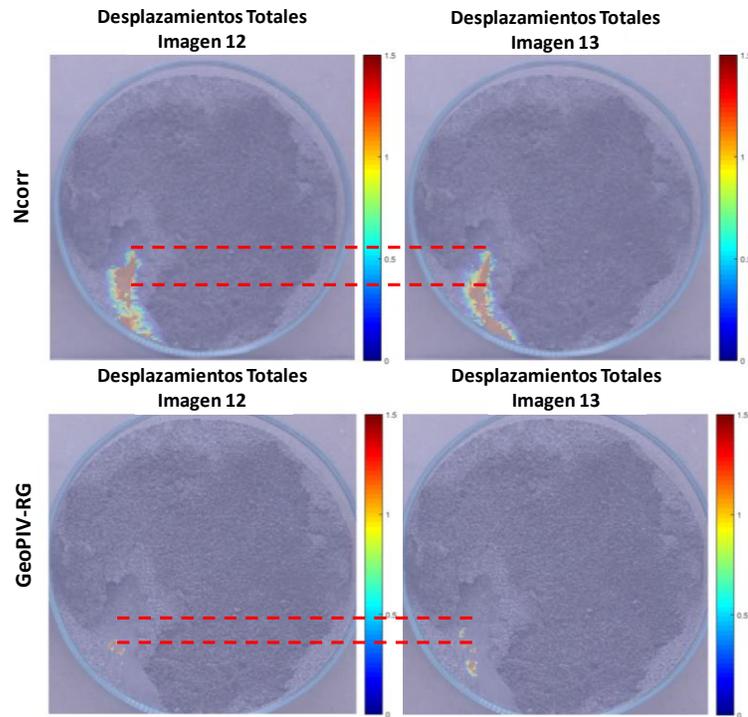


Figura 86. Comparación de los desplazamientos entre dos imágenes consecutivas, mediante Ncorr y GeoPIV-RG.

8.3 Comparación de Configuración entre Ncorr y GeoPIV-RG

8.3.1 Configuración de Procesamiento en Suelos Finos

El parámetro más importante en la configuración del procesamiento de imágenes, para el programa Ncorr y GeoPIV-RG, es el radio de píxeles de subconjuntos que se considera. Producto de esto, para todos los ensayos fotogramétricos de suelos finos desarrollados con Ncorr, se realizaron dos análisis considerando distintos radios y, de acuerdo a los resultados obtenidos, se puede realizar una propuesta de valores de radios de análisis a utilizar, en función de las grietas exhibidas. Un gráfico de lo descrito se presenta en la Figura 87.

En el análisis de suelos finos con GeoPIV-RG se utilizaron dos configuraciones distintas, intentando encontrar el mayor valor de radio que permitiera reconocer adecuadamente el área agrietada. Esto producto de que, al disminuir el radio, el programa exige mayor textura y diferenciación de tonalidades entre los conjuntos de píxeles analizados. Como este valor no cambia, es necesario disminuir el coeficiente de correlación admisible, lo que se traduce en un aumento de la probabilidad de que se incorporen resultados erróneos, producto de la confusión entre los subconjuntos de las imágenes analizadas. Considerando los resultados, para la mayoría de los casos analizados la configuración de 120 píxeles de diámetro generó aproximaciones de desplazamientos y deformaciones adecuadas. La Tabla 25 expone el rango para el cual son válidas las dos configuraciones aplicadas en el contexto experimental de este estudio.

Tabla 25. Configuración de GeoPIV-RG que genera la mejor identificación de las zonas agrietadas, en función de la magnitud en pixeles de la grieta.

Configuración de Procesamiento con GeoPIV-RG		
Magnitud de Grieta [px]	[0-20]	[20-240]
Espaciamiento Subconjuntos [px]	6	12
Diámetro de Subconjuntos [px]	60	120

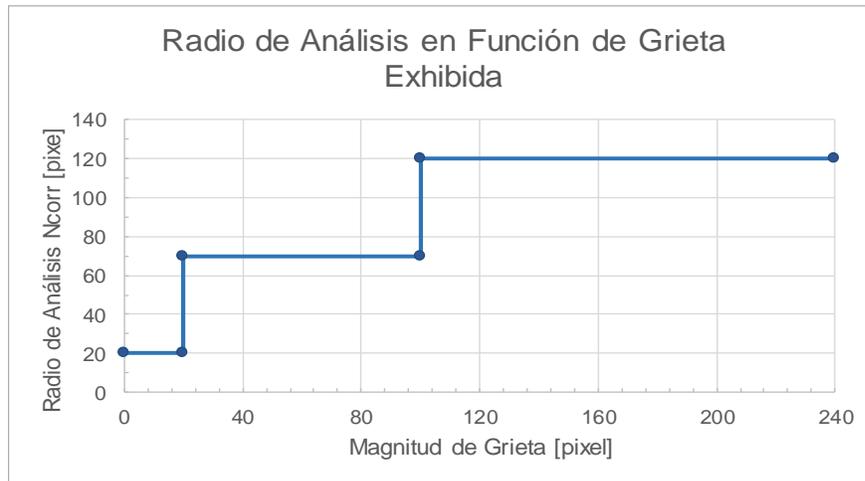


Figura 87. Configuración de Ncorr que genera la mejor identificación de las zonas agrietadas, en función de la magnitud en pixeles de la grieta.

8.3.2 Configuración de Procesamiento en Arenas

Para los casos de arenas se utilizaron configuraciones equivalentes en Ncorr y GeoPIV-RG; sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos no es posible determinar la mejor configuración de procesamiento. Esto se debe a que los desplazamientos totales calculados son poco confiables.

8.4 Aplicabilidad de Fotogrametría en Terreno

8.4.1 Consideraciones para Aplicación de Fotogramétricas en Terreno

De acuerdo a los resultados obtenidos en laboratorio, es posible comentar sobre aspectos prácticos si se quiere utilizar en terreno las técnicas de fotogrametría analizadas.

- a) Movimiento y foco de la cámara: Cualquier movimiento de la cámara puede generar desplazamientos relativos, lo que se traduce en errores en las mediciones. Producto de esto es necesario mantener la cámara siempre en la misma posición y con los mismos parámetros focales (velocidad de captura, apertura, ISO y distancia focal).
- b) Generación de sombras: De acuerdo a lo que plantea Shi *et al.* (2016), uno de los factores más perjudiciales en el uso en terreno de la fotogrametría, es la

generación de sombras sobre las imágenes, producto de que un cambio en la tonalidad de los píxeles, es asumido como un desplazamiento o deformación. Esto se comprueba con el ejemplo de la muestra de finos de relave desarrollada en la Figura 83. Una de las opciones para mejorar este aspecto es utilizar la técnica HDR (Shi *et al.* 2016), aunque esto no asegura el buen funcionamiento producto de las particularidades lumínicas presentes en zonas puntuales. Para evaluar el efecto y sus consecuencias, es necesario realizar pruebas en terreno.

- c) Variación de textura: Los cambios bruscos en la textura de las imágenes analizadas provocan alteraciones en los resultados de las deformaciones y desplazamientos. Sin embargo, como se determinó previamente con el ensayo de finos de relave y espesor de 8 mm (Figura 84), si el seguimiento fotográfico es continuo y con intervalos de tiempo pequeños, los programas no son afectados por las variaciones de tonalidad, producto de pérdidas de humedad, por lo que no incorporan desplazamientos ni deformaciones inexistentes. Si la variación en terreno incorpora cambios producto de erosión o lluvias, es probable que el análisis fotogramétrico no entregue buenos resultados.
- d) Resolución de la imagen: Mientras mayor sea la cantidad de píxeles de una fotografía, más precisos son los resultados y se hace posible que desplazamientos de partículas más pequeñas puedan ser analizados. Sin embargo, el tiempo empleado en el análisis depende directamente de la cantidad de píxeles de las imágenes, lo que puede involucrar un alto uso de recursos computacionales.

8.4.2 Beneficios y Limitaciones de la Aplicación de Fotogrametría en Terreno

De acuerdo a los resultados obtenidos con ensayos de laboratorio, las técnicas de fotogrametría utilizadas (CDI, VIP-CDI) son capaces de advertir deformaciones y desplazamientos sobre elementos que permanecen agrupados luego de la deformación (suelos finos), además de lograr identificar las zonas deformadas cuando se generan desplazamientos repentinos en zonas específicas de las muestras (arenas).

Producto de esto, la fotogrametría y posterior análisis computacional es una técnica útil que podría servir para advertir desplazamientos y deformaciones en superficies de taludes, terraplenes y otros elementos geotécnicos. Además, al poder aplicar las técnicas de fotogrametría de manera directa en terreno se podrían entender, por ejemplo, las implicancias de los ciclos de humedecimiento y secado sobre masas de suelo con las condiciones de borde propias de terreno y no con las limitaciones de un ensayo experimental, además de descartar la incidencia de los factores de escala y el contacto producto del monitoreo mediante técnicas convencionales de instrumentación. Sin embargo, la fotogrametría solo permite realizar mediciones superficiales y es altamente sensible a los cambios de textura, por lo que es necesario complementarla con otros métodos para realizar monitoreos.

Junto con lo anterior, como las técnicas de fotogrametría son capaces de identificar variaciones de tonalidades sobre imágenes consecutivas, este método podría servir para identificar fenómenos asociados a cambios de coloración como procesos de oxidación y sulfatación de suelos en terreno, aunque solo en la superficie.

Por último, como la aplicabilidad de las técnicas de fotogrametría está sujeta a condiciones ambientales, se hace difícil su realización de manera precisa en terreno, como lo ejemplifica Travelletti *et al.* (2012). Es por este motivo que se considera que la fotogrametría es una técnica válida cuando se realizan análisis a grandes escalas, ya que las condiciones ambientales y de textura son menos predominantes que en el caso de escalas menores, tal y como lo plantean Shi *et al.* (2016) con análisis de imágenes de alta resolución. Producto de esto, se recomienda la aplicación de las técnicas de fotogrametría cuando se estudia el comportamiento global de un elemento y no local. Un claro ejemplo del beneficio de la aplicación a gran escala de fotogrametría es la secuencia de imágenes que se presenta en la Figura 88 asociadas a la falla de la represa de Teton, EE.UU. Un seguimiento fotogramétrico adecuado podría haber advertido las filtraciones superficiales en el muro de la represa y con ello, haber evitado las consecuencias del desastre.



Figura 88. Secuencia de imágenes de falla de presa de Teton, 1975 (Rogers, 2011).

9. Conclusiones y Recomendaciones

9.1 Conclusiones

- Cuando se comparan suelos con altos índices de plasticidad, como la caolinita y la bentonita, las muestras que exponen mayores cambios superficiales al estar sometidas a las mismas condiciones de secado, son las que presentan menor plasticidad. Esto se explica por la mayor velocidad en el proceso de pérdida de agua, ya que al finalizar los ensayos la bentonita siempre mostró un mayor contenido de humedad que la caolinita. Así, además de considerar suelos con índices de plasticidad muy elevados o muy bajos en los análisis de estabilidad, también se debe considerar aquellos que se encuentren en situaciones intermedias porque pueden ser más sensibles a las condiciones ambientales presentes.
- El agrietamiento exhibido en las muestras de caolinita y finos de relave que tienen la totalidad de la superficie de las placas cubierta y contacto lateral depende del espesor. Esto corrobora lo sugerido por Tang *et al.* (2008). Muestras de mayor espesor presentan menos grietas, pero de mayores dimensiones. Sin embargo, para el caso de la bentonita, la muestra con espesor de 8 mm no se agrietó, por lo que no es comparable.
- Los resultados corroboran que cuanto mayor sea la textura de una imagen, menor es el ruido obtenido del análisis y, con ello, más precisos son los resultados. Sin embargo, esto no es una limitante en el análisis fotogramétrico con GeoPIV-RG, ya que se pueden analizar muestras con diferencias bajas en las tonalidades de píxeles e igualmente identificar las zonas afectadas.
- La detección de desplazamientos y deformaciones en suelos finos fue abordada adecuadamente por Ncorr y GeoPIV-RG cuando no existió pérdida de textura en las imágenes analizadas ni cambios bruscos entre fotografías consecutivas. Para el caso de los finos de relave, en los que la deformación era mínima y la textura baja, ambos programas sobredimensionaron las zonas agrietadas.
- El programa Ncorr (CDI) detecta mejor los desplazamientos de granos de arena, en comparación con GeoPIV-RG (VIP-CDI), sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos por ambos programas no es posible determinar de manera correcta los desplazamientos. Esto se debe a que el análisis de las imágenes pierde la referencia en los subconjuntos producto de los desplazamientos bruscos de partículas. En el caso de las deformaciones en masa de arenas, ambos programas fueron útiles para la detección de los movimientos. De acuerdo a los resultados obtenidos no se recomienda el uso de estos programas para el estudio de desplazamientos de partículas granulares.
- Para monitorear suelos que pueden experimentar desplazamientos importantes en intervalos cortos de tiempo, se requieren cámaras de alta velocidad para disminuir cambios bruscos entre imágenes, sin bajar la calidad y con ello, la precisión de las mediciones. En este estudio, aun incorporando el registro de arenas mediante

videos, no fue posible capturar adecuadamente la posición de las partículas en cada cuadro. Esto implica que no fue posible verificar si las técnicas utilizadas pueden determinar la magnitud de los desplazamientos y deformaciones adecuadamente.

- Si se consideran los factores de textura, luminosidad y movimiento de cámara, el análisis fotogramétrico podría ser una solución sencilla y eficiente para poder monitorear las deformaciones y formación de grietas en taludes, terraplenes y otros elementos geotécnicos como una primera aproximación. Lamentablemente, no se puede asegurar la correcta identificación de los desplazamientos con las técnicas consideradas.

9.2 Recomendaciones

- Este trabajo solo considera la aplicación de ciclos de temperatura en el estudio del deterioro de suelos finos. Una futura línea de investigación podría incluir sistemas de humedecimiento para las muestras, con el fin de estudiar situaciones más reales y combinar los efectos de hinchamiento y contracción de suelos, producto de las variaciones cíclicas de humedad. Además, sería recomendable medir las variaciones de humedad en el tiempo producto de los ciclos aplicados.
- El análisis de los suelos finos estudiados utiliza muestras remoldeadas de finos de relave y arcillas. Como a través de este trabajo se demuestra la efectividad de la metodología de análisis fotogramétrico, estudios posteriores deberían incluir probetas de suelos inalteradas y sensibles a cambios de humedad. Esto permitiría, por ejemplo, su aplicación en suelos volcánicos del sur de Chile para determinar el deterioro al que están expuestos los taludes formados por estos materiales ante cambios climáticos.
- Si se quiere realizar un análisis más profundo de la deformación de los suelos finos frente a ciclos de temperatura, es necesario abordar la deformación vertical con el fin de obtener la contracción volumétrica de las muestras y analizar la incidencia del índice de plasticidad en el comportamiento global. Junto a esto, se podría agregar al montaje experimental, un sistema de enfriamiento para que los ciclos no dependieran de la temperatura ambiente al momento de realizar los ensayos.
- Producto de que las técnicas de fotogrametría utilizadas no fueron capaces de reconocer adecuadamente los desplazamientos de arena, se hace necesario utilizar cámaras de alta velocidad que logren capturar en las fotografías las nuevas posiciones de los granos. De esta forma, se podría probar si con mejores herramientas fotográficas, los programas entregan buenos resultados aplicando una metodología similar a la desarrollada por Abarzúa (2013), quien utiliza la técnica de velocimetría de imágenes de partículas, sobre el monitoreo de aludes en laboratorio con cámaras de alta velocidad.

10. Bibliografía

- 1 Albrecht, B., & Benson, C. (2001). Effect of desiccation on compacted natural clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (January), 67–75.
- 2 Allen, R. J., & Sinclair, J. C. (1982). The Behaviour of Short Cracks. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 5(4), 343–347.
- 3 Abarzúa, F. (2013) Estudio experimental del inicio de aluviones en la cuenca alta del río Coya, mina El Teniente. Memoria para optar al Título de Ingeniera Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- 4 Baker, R. (1981). Tensile Strength, tension cracks, and stability of slopes. *Soils and Foundations*, 21(2), 17.
- 5 Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. (2015). Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Experimental Mechanics*, 55(6), 1105–1122.
- 6 Buill, F., Núñez-Andrés, M. A., Lantada, N., & Prades, A. (2016). Comparison of Photogrammetric Techniques for Rockfalls Monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 44(4).
- 7 Caudal, P., Grenon, MartinAmoushahi, S., Turmel, D., & Locat, J. (2016). Analysis of a Large Rock Slope Failure on the East Wall of the LAB Chrysotile Mine in Canada: Back Analysis, Impact of Water Infilling and Mining Activity. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1–16.
- 8 Garreaud, D. (2011). Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro - INIA*, (93).
- 9 Hallett, P. D., & Newson, T. A. (2005). Describing soil crack formation using elastic-plastic fracture mechanics. *European Journal of Soil Science*, 56(1), 31–38.
- 10 Herrera, M., Lizcano, A., Santamarina, J.C. (2007). Colombian volcanic ash soils. *Characterization and engineering properties of natural soils*, 2385–2409.
- 11 Lachenbruch, A. H. (1962). Mechanics of thermal contraction cracks and ice-wedge polygons in permafrost. *Geological Society of America Special Papers*, 70, 1–66.
- 12 Leroueil, S. (2001). Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms. *Geotechnique*, 51(3), 197–243.
- 13 Li, J. H., & Zhang, L. M. (2011). Study of desiccation crack initiation and development at ground surface. *Engineering Geology*, 123(4), 347–358.

- 14 Lin, L. C., & Benson, C. H. (2000). Effect of wet-dry cycling on swelling and hydraulic conductivity of GCLs. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(1), 40-49.
- 15 McCormick, N., & Lord, J. (2010). Digital image correlation. *Materials Today*, 13(12), 52–54.
- 16 Medinaceli Torrez, R., & Trujillo Lunario, E. (2016). Technical and economic study of kaolin deposit exploitation belonging to career engineering of mines, petroleum and geotechnical of UTO. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*, 46.
- 17 Morris, P. H., Graham, J., & Williams, D. J. (1992). Cracking in drying soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(2), 263–277.
- 18 Peng, M., & Zhang, L. M. (2011). Breaching parameters of landslide dams. *Landslides*, 9(1), 13–31.
- 19 Rayhani, M. H. T., Yanful, E. K., & Fakher, A. (2008). Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils. *Engineering Geology*, 97(1–2), 25–31.
- 20 Rogers, D. (2011). *Background on Failure of Teton Dam*. Recuperado el 15 de mayo de 2017, de: Missouri University of Science and Technology Web Site: http://web.mst.edu/~rogersda/teton_dam/Background%20on%20Teton%20Dam%20Failure.pdf
- 21 Rosenblad, B. L., Gomez, F., Loehr, J. E., & Gilliam, J. (2016). Observations of Rockfall and Earth Slope Movements using Ground-Based Interferometric Radar. In *67th Highway Geology Symposium Highway Geology Symposium*.
- 22 Sánchez, F. (2016). Análisis numérico y experimental del método de consolidación por vacío para relaves integrales. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- 23 Shaojun, L. I., Knappett, J., & Xiating, F. (2015). Investigation of Slope Stability Influenced by Change of Reservoir Water Level in Three Gorges of China. *Physical and Numerical Simulation of Geotechnical Engineering*, (18), 49.
- 24 Shi, B., Liu, C., Wu, H., & Lu, P. (2016). Elementary Analysis of the Mechanism of Xishan Landslide Based on Pixel Tracking on VHR Images. *International Journal of Geohazards and Environment*, 2(2), 53–71.
- 25 Shin, H., & Santamarina, J. C. (2011). Desiccation cracks in saturated fine-grained soils: particle-level phenomena and effective-stress analysis. *Géotechnique*, 61(11), 961–972.

- 26 Silvestri, V., Sarkis, G., Bekkouche, N., & Soulié, M. (1992). Evapotranspiration, trees and damage to foundations in sensitive clays. In *Canadian Geotechnical Conference* (Vol. 2, pp. 533-538).
- 27 Standard, A. S. T. M. (2010). D4318. 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- 28 Standard, A.S.T.M. (1999). D2435-04. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*.
- 29 Stanier, S. A., Blaber, J., Take, W. A., & White, D. J. (2015). Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications. *Canadian Geotechnical Journal*, 13(October 2015), 1–35.
- 30 Take, W. A. (2014). Thirty-Sixth Canadian Geotechnical Colloquium: Advances in visualization of geotechnical processes through digital image correlation. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(9), 1199–1220.
- 31 Take, W. A., & Bolton, M. D. (2011). Seasonal ratcheting and softening in clay slopes, leading to first-time failure. *Géotechnique*, 61(9), 757–769.
- 32 Tang, C. S., Cui, Y. J., Tang, A. M., & Shi, B. (2011). Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. *Engineering Geology*, 114(3–4), 261–266.
- 33 Tang, C.-S., Cui, Y.-J., Shi, B., Tang, A.-M., & Liu, C. (2011). Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles. *Geoderma*, 166(1), 111–118.
- 34 Tang, C., Shi, B., Liu, C., Zhao, L., & Wang, B. (2008). Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engineering Geology*, 101(3–4), 204–217.
- 35 Tang, C., Shi, B., Liu, C., Zhao, L., & Wang, B. (2008). Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engineering Geology*.
- 36 Travelletti, J., Delacourt, C., Allemand, P., Malet, J. P., Schmittbuhl, J., Toussaint, R., & Bastard, M. (2012). Correlation of multi-temporal ground-based optical images for landslide monitoring: Application, potential and limitations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 70, 39–55.
- 37 Varela, F. (2016) Efecto del tipo de secado en las propiedades índice y compresibilidad de suelos de origen volcánico. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

- 38 Vaughan, P. R. & Walbancke, H. J. (1973). Pore pressure changes and the delayed failure of cutting slopes in over-consolidated clay. *Geotechnique* 23, No. 4, 531–539.
- 39 Vogel, H. J., Hoffmann, H., & Roth, K. (2005). Studies of crack dynamics in clay soil: I. Experimental methods, results, and morphological quantification. *Geoderma*, 125(3–4), 203–211.
- 40 Wei, X., Hattab, M., Bompard, P., & Fleureau, J.-M. (2016). Highlighting some mechanisms of crack formation and propagation in clays on drying path. *Géotechnique*, 66(4), 287–300.
- 41 White, D. J., & Take, W. a. (2002). GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing. *Cambridge University Engineering Department Technical Report*, 322(October), 15.
- 42 Yoneyama, S. (2016). Basic principle of digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement. *Advanced Composite Materials*, 3046(February), 1–19.
- 43 Zarzycki, J., Prassas, M., & Phalippou, J. (1982). Synthesis of glasses from gels: the problem of monolithic gels. *Journal of Materials Science*, 17(11), 3371–3379.

ANEXOS

Anexo A. Interfaz Programas utilizados

En los siguientes anexos se presenta una guía para el uso de los programas utilizados, Ncorr y GeoPIV-RG.

A.1. Interfaz Ncorr

Para utilizar Ncorr es necesario definir una imagen de referencia inicial (Reference image) y las fotografías que serán procesadas (Current Images). En el caso de las fotografías que serán analizadas existen dos opciones de cargarlas al programa. La primera de ellas (Load All) es más rápida, pero necesita una gran cantidad de memoria debido a que guarda todos los datos de píxeles de cada una de las imágenes en el archivo de salida, mientras que la segunda (Load Lazy) es más lenta, pero necesita menos memoria. Si se utiliza la segunda, es necesario mantener la ruta que tenían en un principio las imágenes. La Figura 89 presenta la interfaz del programa Ncorr.

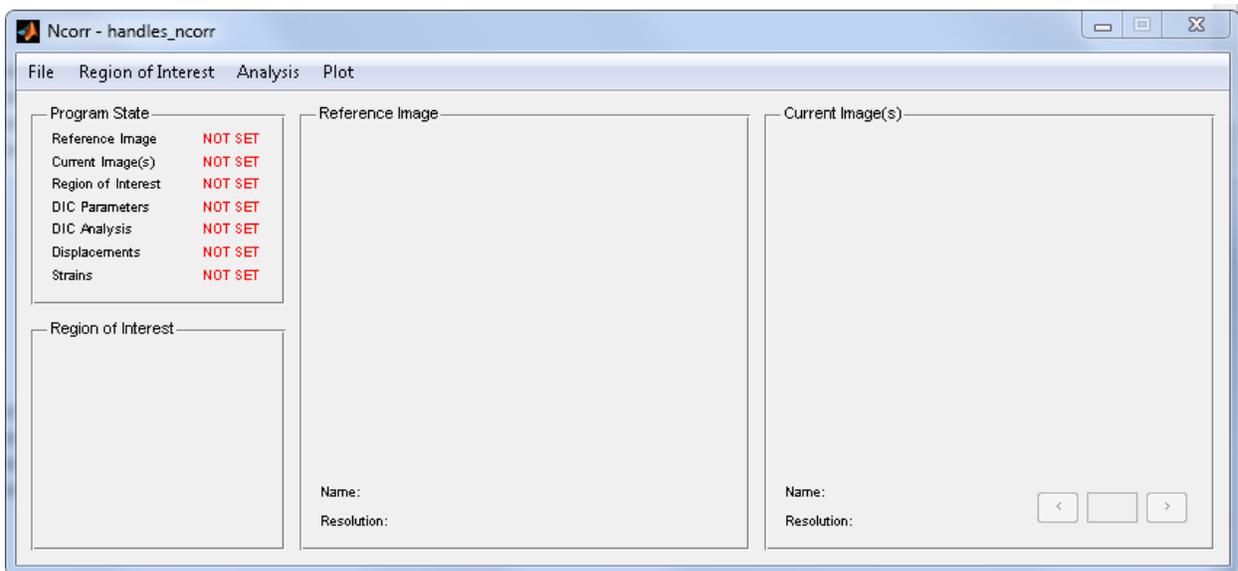


Figura 89. Interfaz del programa Ncorr.

Además, se debe determinar la región que se quiere analizar de la fotografía, nombrada como zona de interés (Region of Interest). La definición de esta zona puede hacerse mediante una imagen que presente el mismo tamaño de las fotografías utilizadas y defina la región requerida por blanco y lo que no se quiere analizar con negro, o bien, dibujando la zona buscada como se presenta en la Figura 90. Si las áreas determinadas confluyen en algún punto, entonces se tendrá solo una zona de interés, mientras que, si son totalmente independientes, el programa las analizará por separado.

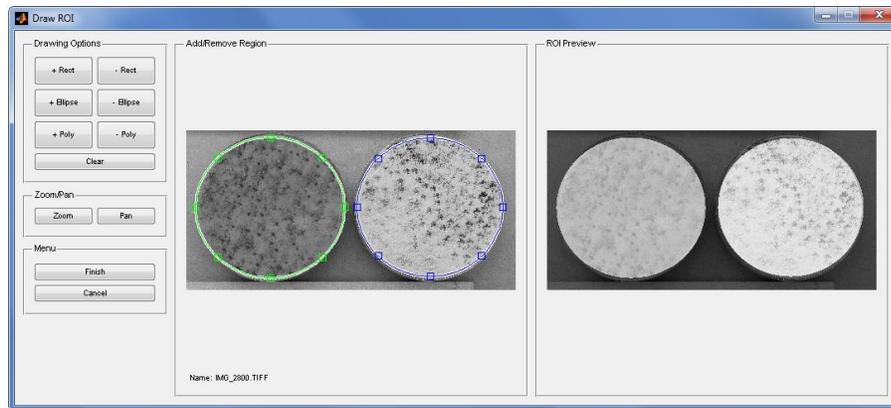


Figura 90. Determinación de Zona de Interés.

Luego, se definen los parámetros para el análisis de CDI, los cuales se dividen en opciones de subconjuntos, soluciones iterativas, opciones de núcleos múltiples, análisis de grandes deformaciones y análisis discontinuo como presenta la Figura 91.

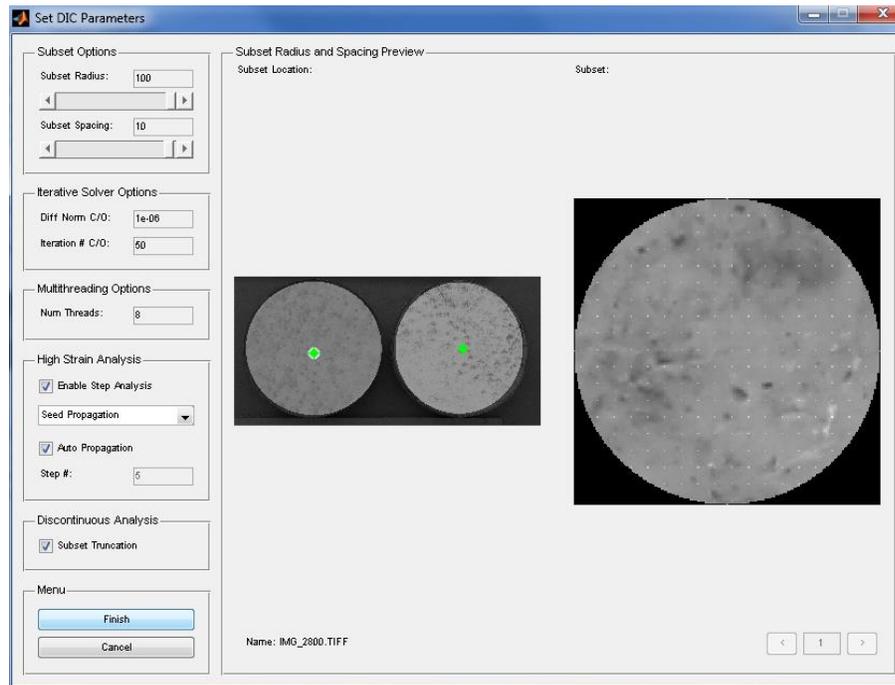


Figura 91. Ejemplo de definición de parámetros de CDI en Ncorr.

Dentro de las opciones de subconjuntos se tiene el radio y el espaciamento. El primer parámetro define cuán grande van a ser los subconjuntos de pixeles que se analizarán, mientras que el segundo indica cada cuántos pixeles existirá un punto de estudio. El parámetro más importante de la CDI es el radio debido a que si es muy pequeño, puede existir una gran cantidad de ruido en los resultados. Sin embargo, si es muy amplio los resultados pueden verse suavizados. Por otro lado, mientras menor sea el espaciamento de puntos para analizar, mejores resultados se pueden obtener, pero mayor es el tiempo computacional necesario para realizarlo (Blaber, 2015).

El análisis iterativo utilizado por CDI es la técnica de alineación de imagen composicional inversa, por lo que se necesita definir la diferencia de la norma del vector y la cantidad de iteraciones aceptable. Los parámetros predefinidos son diferencias de 10^{-8} en la norma y 50 iteraciones. Estos valores son bastante estrictos, pero si se quiere disminuir el tiempo de análisis, la cantidad de iteraciones puede reducirse y la diferencia entre la norma de los vectores aumentarse.

Además, es necesario definir con cuántos núcleos se trabajará lo cual depende absolutamente de las características que presente el computador utilizado. Mientras mayor sea la cantidad de núcleos, menos va a ser el tiempo necesario para el análisis.

Por otra parte, los parámetros de grandes deformaciones pueden ser o no activados, dependiendo del análisis que se quiera desarrollar, ya que si se habilita se genera una actualización de la imagen de referencia y la zona de interés. Al habilitar este segmento existen 2 opciones. La propagación semilla (seed propagation) y el salto (leap frog). La primera actualiza la imagen de referencia basada en el coeficiente de correlación y el número de iteraciones para la convergencia, mientras que la segunda requiere que el usuario defina cuántas imágenes se van a analizar antes de actualizar la foto de referencia. Para ambos casos puede o no seleccionarse el cuadro de propagación automática. En caso de no hacerlo el usuario tendrá que reemplazar la partición de la imagen cada vez que esta sea actualizada.

Por último, se tiene la opción para análisis discontinuo la cual previene a los subconjuntos envolverse alrededor de una grieta. Esto puede generar distorsiones cerca de las grietas. Si se quiere utilizar este análisis es necesario habilitar el cuadro de truncamiento de subconjunto. Una vez definidos todos los parámetros anteriormente mencionados, se debe realizar el análisis de CDI. Para esto, se define la región de interés que se quiere analizar y luego, dependiendo de la cantidad de núcleos definidos previamente, se particiona la imagen con el fin de realizar el cálculo simultáneo. Para realiza esto, se espera que las partes tengan tamaños similares y que se escojan puntos de grandes deformaciones. La Figura 91 muestra un ejemplo en Ncorr.

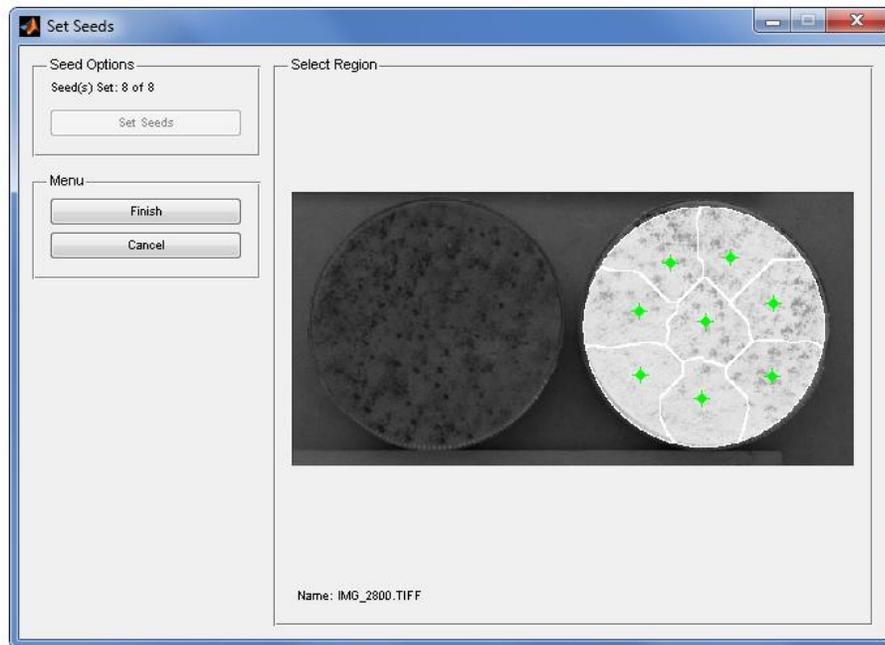


Figura 92. Partición de ZDI para realizar análisis de CDI en Ncorr.

Posteriormente es necesario calibrar los desplazamientos debido a que Ncorr realiza los cálculos considerando unidades de pixeles. Para realizar esto se define la unidad de medida a utilizar y la razón que existe entre esa unidad y un pixel. Esto se puede realizar introduciendo directamente el valor o por medio de la incorporación de una fotografía, en la cual se traza una línea y se define su longitud real. Además de esto, en este punto es posible limitar los valores de correlación de los resultados, de manera tal que, si el valor en algún punto es superado, el resultado queda eliminado. Una representación de lo descrito se expone en la Figura 93.

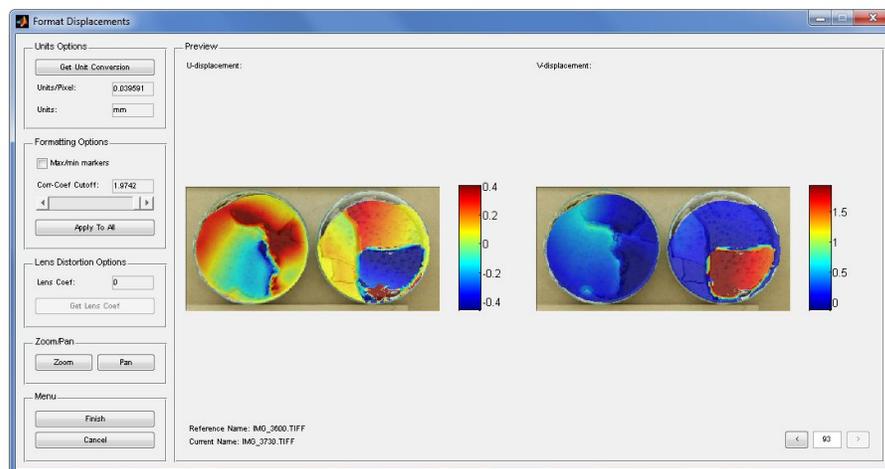


Figura 93. Definición del Formato de desplazamientos y coeficiente de correlación máximo.

Finalmente se calculan las deformaciones. Este análisis tiene incorporado un radio de deformación, y de igual manera que para la obtención de desplazamientos, este valor puede suavizar los resultados o provocar ruido en ellos. Al definir el parámetro, se deben

considerar los lugares con mayores deformaciones y observar en el plano tridimensional que se expone en la zona derecha de la interfaz. Si los círculos quedan bien definidos con la intersección del plano, entonces la elección es aceptable. Un ejemplo de la interfaz para dos casos distintos se presenta en la Figura 94 y Figura 95.

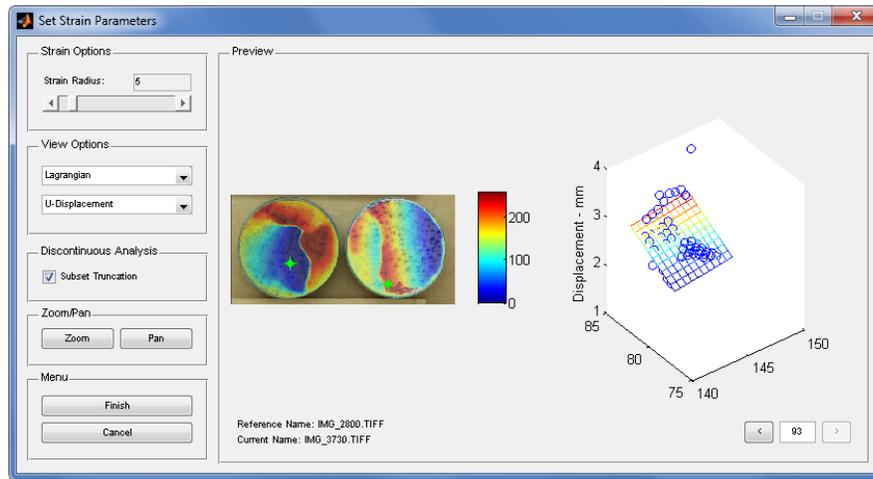


Figura 94. Ejemplo de definición aceptable del radio de deformación considerando 5 píxeles.

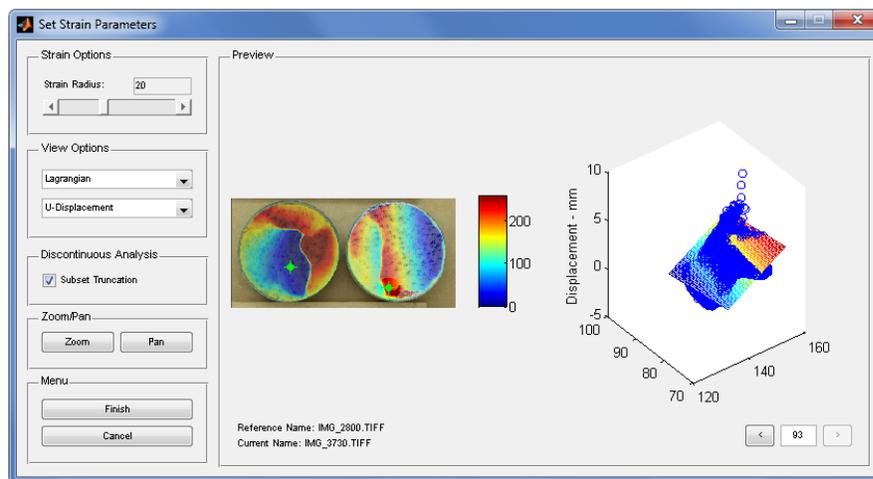


Figura 95. Ejemplo de mala definición del radio de deformación considerando 15 píxeles.

A.2. Interfaz GeoPIV-RG

El programa GeoPIV-RG, al igual que Ncorr, funciona desde la ventana de comandos de Matlab. Para utilizarlo es necesario que las imágenes procesadas presenten puntos de control estáticos y que las coordenadas de estos puntos sean conocidas. Estos datos deben estar ordenados en una matriz en la que las filas responden a la cantidad de puntos de control utilizados mientras que las columnas corresponden a la posición x e y respectivamente de cada punto. La unidad en la que deben ingresarse las coordenadas son milímetros y el orden debe ser de izquierda a derecha desde arriba hacia abajo.

Para iniciar un procesamiento de imágenes en primer lugar es necesario ubicar el archivo ejecutable que puede descargarse desde la página <http://www.geopivrg.com/>. Para ello desde la ventana de comandos de Matlab se escribe “geoPIV_RG_locate” y se selecciona el archivo “GeoPIV_RG.exe” descargado previamente.

Entre los archivos descargados se encuentra un listado de subrutinas que permiten ejecutar el programa, además de archivos de ayuda que se diferencian por terminar su nombre en “_help.m”. Estos archivos muestran qué es lo que necesita cada comando utilizado y los resultados que abordan. A modo de ejemplo, si se quiere tener información acerca de qué necesita y qué entrega el ejecutable para realizar los gráficos de deformación, se debe escribir “help geoPLOTSTRAIN_RG_help”.

Luego, es necesario cargar el archivo “.mat” que presenta las coordenadas de los puntos de control definidas previamente y utilizar el comando “geoCENTROID_RG(CP,'Ejemplo',50,25)”.

Donde:

CP: Nombre de la variable que tiene las coordenadas de los puntos de control

Ejemplo: Nombre escogido para el procesamiento desarrollado

50: Diámetro del punto de control

25: Radio del punto de control en pixeles

Una vez escrito el comando se escoge la imagen de referencia y se comienza a seleccionar el centro de cada punto de control. Para realizar esto se hace un zoom sobre los puntos, se presiona la tecla esc y se hace clic en el lugar indicado. Imágenes que representan lo descrito se exponen en la Figura 96. Posteriormente, se determinan los límites en pixeles de cada punto de control, para lo cual el programa crea un gráfico de intensidades de pixeles horizontales y verticales. La elección del límite inferior y superior debe estar en un tramo en el que tanto la coordenada horizontal como la vertical se encuentren paralelas. Si cuando se define esto la cruz no queda centrada en el punto de control, se vuelve a determinar otra zona en que pase lo descrito previamente. La Figura 97 esquematiza el procedimiento desarrollado. Lo anterior se realiza para todos los puntos de control que se consideren dentro de la fotografía.

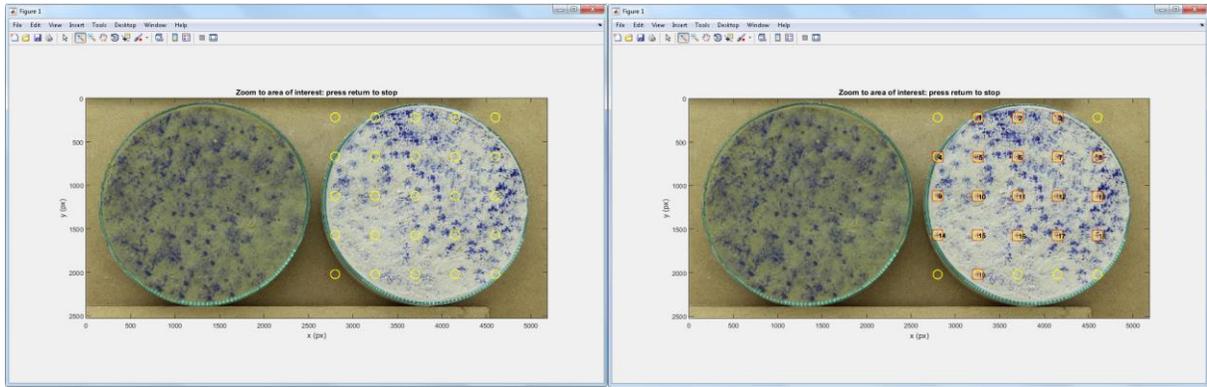


Figura 96. Ejemplo de definición de centros de puntos de control.

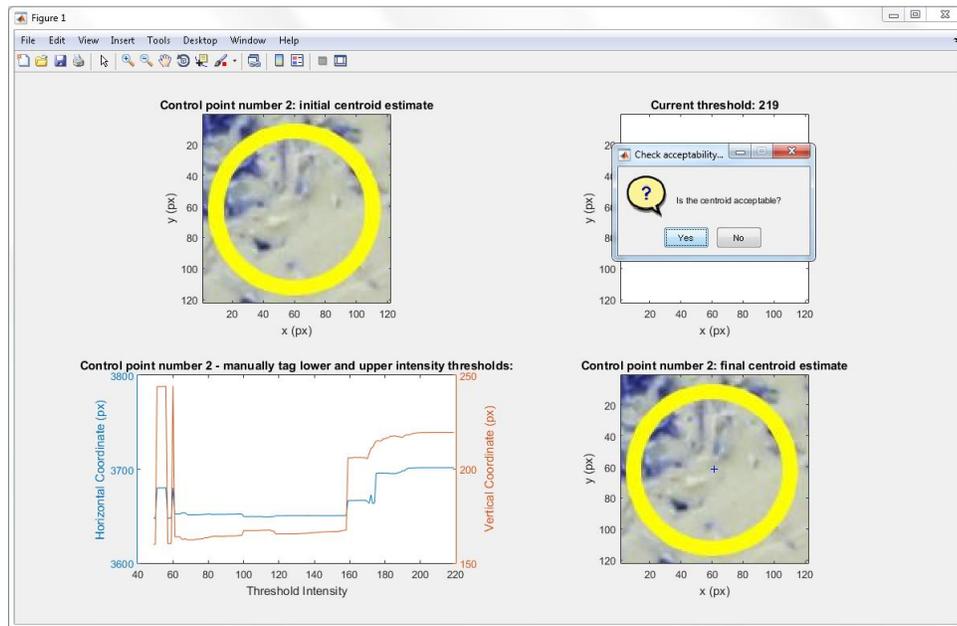


Figura 97. Ejemplo de definición de límites de puntos de control.

Luego de realizar lo descrito se obtienen dos archivos de salida que corresponde a la ubicación de los puntos de control en las imágenes (CENTROID_CP_Ejemplo.txt) y al archivo de entrada para el análisis de calibración espacial (MESH_CP_Ejemplo.txt).

Posteriormente es necesario definir el mallado de las imágenes y la zona de interés para el análisis. Para desarrollar esto se escribe “geoMESH_RG(‘Ejemplo’,120,12)”;

Donde:

- Ejemplo: Nombre escogido para el procesamiento desarrollado
- 120: Diámetro de los subconjuntos utilizados
- 12: Espaciamiento entre subconjuntos considerado

Es importante señalar que mientras menor sea el espaciamiento de subconjuntos escogidos, resultados más precisos pueden ser obtenidos, sin embargo, mayor es el tiempo de análisis.

Cuando el comando se ejecuta en Matlab se desglosan varias opciones. En primer lugar se genera la opción de excluir zonas que van a ser analizadas dentro de zona de interés con el fin de no afectar los resultados. Posteriormente hay que ingresar el radio de puntos de control y definir la ruta en la que se encuentra el archivo con las coordenadas de los puntos de control. Finalmente, se abre la imagen de referencia y mediante un polígono se debe definir la zona de interés. Luego de un tiempo de espera, se genera una imagen con cruces rojas dentro de la fotografía que representan los puntos de análisis. Las cruces no pueden sobrepasar los puntos de control definidos La Figura 98 presenta un ejemplo de lo descrito. Al contrario de Ncorr, GeoPIV-RG solo permite definir una zona de interés por cada análisis desarrollado.

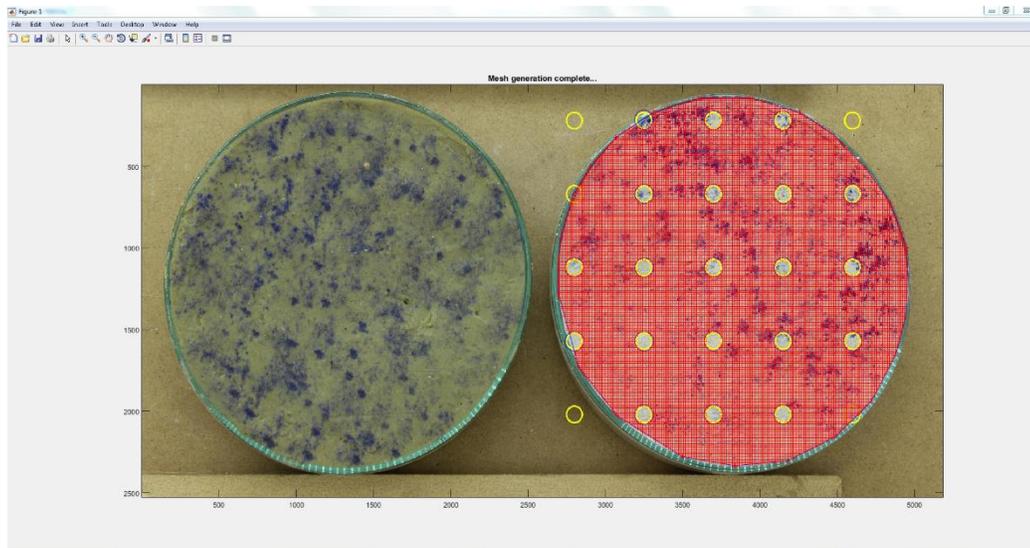


Figura 98. Definición de zona de interés sobre muestra de caolinita.

Con lo descrito se generan 2 archivos de salida. El primero es una imagen que presenta la zona definida como región de interés en blanco y el área ignorada en negro (ROI_Ejemplo.jpg) y un archivo de texto que contiene la ubicación y el tamaño de los subconjuntos (Mesh_Ejemplo.txt)

Una vez definida la ubicación de los puntos de control y los de análisis dentro de la imagen es necesario crear archivos de texto que contienen la configuración determinada para el procesamiento. GeoPIV-RG presenta 2 modos de análisis que corresponden a uno punto por punto “point by point” (modo 1) y otro a saltos “leapfrog” (modo 2).

Para crear el archivo que contiene la configuración en modo 1 se utiliza “geoLAUNCH_RG(100,150,1,4,'CP_Ejemplo','CP_Ejemplo',IMG_',',jpg',1,1e-5,10,0.9,0.75)”

Donde:

100: Número de primera imagen.
150: Número de última imagen.
1: Incremento de imagen.
4: Cantidad de números en el nombre de la imagen (IMG_0100.jpg).
CP_Ejemplo: Nombre para análisis de puntos de control.
CP_Ejemplo: Nombre de mallado.
IMG: Prefijo de imagen
JPG: Tipo de archivo de imagen
1: Modo de análisis 1 (punto por punto).
1e-5: Tolerancia de salida de optimización de deformación.
10: Límite de iteración.
0.9: Coeficiente de correlación aceptable para punto semilla
0.75: Coeficiente de correlación mínimo aceptado

Para crear el archivo de análisis con “leapfrog” se utiliza el mismo comando, pero se debe cambiar el nombre eliminando el prefijo “CP_”, el número 1 que indica el modo de análisis debe cambiar a 2 y, el límite de iteraciones pasa a ser la cantidad de fotos analizadas. Luego de haber generado los archivos, se utiliza el comando “geoPIV_RG_run('CP_Example_analysis_launcher’”, con el nombre respectivo definido previamente. Con el primer modo se genera un archivo llamado M1_data.mat, mientras que con el segundo el resultado de salida corresponde a M2_data.mat.

Por último, es necesario calibrar los datos, filtrar algunos en caso de no cumplir con correlación definida o zonas de interés y graficar los resultados.

Si se quieren filtrar los datos de salida de análisis mediante el coeficiente de correlación es necesario cargar el archivo “Load M2.data.mat” y utilizar el comando “filtered_data=geoFILTER_RG(data,X)”, donde X corresponde al valor de correlación mínima. Si existen datos que presentan valores menores a X se borrarán automáticamente. Para borrar datos manualmente es necesario escribir el comando “unwild_data=geoWILD_RG(data,1,50,1)”

Donde:

unwild_data: Archivo de salida
1: Primera imagen para graficar los vectores generados.
50: Última imagen para graficar los vectores generados.
1: Escala del vector para graficar
Luego, se debe abrir la imagen de referencia, hacer zoom en el área de interés y seleccionar los vectores que son potenciales errores para removerlos.

Para realizar la calibración espacial se utiliza el comando `XYdata=geoCALIBRATE_RG(data)`, se seleccionan los archivos "M1.data.mat" y el que presenta la ubicación de puntos de control "CENTROID_CP_Ejemplo". Finalmente se obtienen las deformaciones obtenidas mediante el análisis para lo cual se utiliza el comando `strains=geoSTRAIN_RG(XYdata)`

Una vez que todas las calibraciones y correcciones de datos se realizan, los archivos `unwild_data`, `data`, `filtered_data`, `XYdata` y `strains` se guardan en `M2.data.mat` y los resultados están listos para ser usados.

Si se quiere graficar los resultados de desplazamientos y deformaciones es necesario utilizar los comandos `geoPLOTDISP_RG(XYdata,1,5,0,0,1,0,1)` y `geoPLOTSTRAIN_RG(strains,1,5,0,0,1,10,0)` respectivamente.

Los números utilizados en el comando de desplazamientos corresponden a los siguientes:

- 1: Primera imagen
- 50: Última imagen
- 0: Desplazamiento horizontal
- 0: Desplazamiento vertical
- 1: Modo de gráfico

De igual forma, la configuración definida para graficar las deformaciones está dada por:

- 1: Primera imagen
- 50: Última imagen
- 0: Desplazamiento horizontal
- 0: Desplazamiento vertical
- 10: Componente de deformación
- 0: Modo de gráfico

Anexo B. Configuración de imágenes GeoPIV-RG

A continuación, se presenta la configuración de puntos de control utilizada en cada set de ensayos desarrollado para poder utilizar el programa GeoPIV-RG. Los círculos amarillos presentados sobre las muestras corresponden a los puntos de control utilizados, mientras que los negros son los que no se consideraron como referencia por encontrarse fuera de la zona de interés.

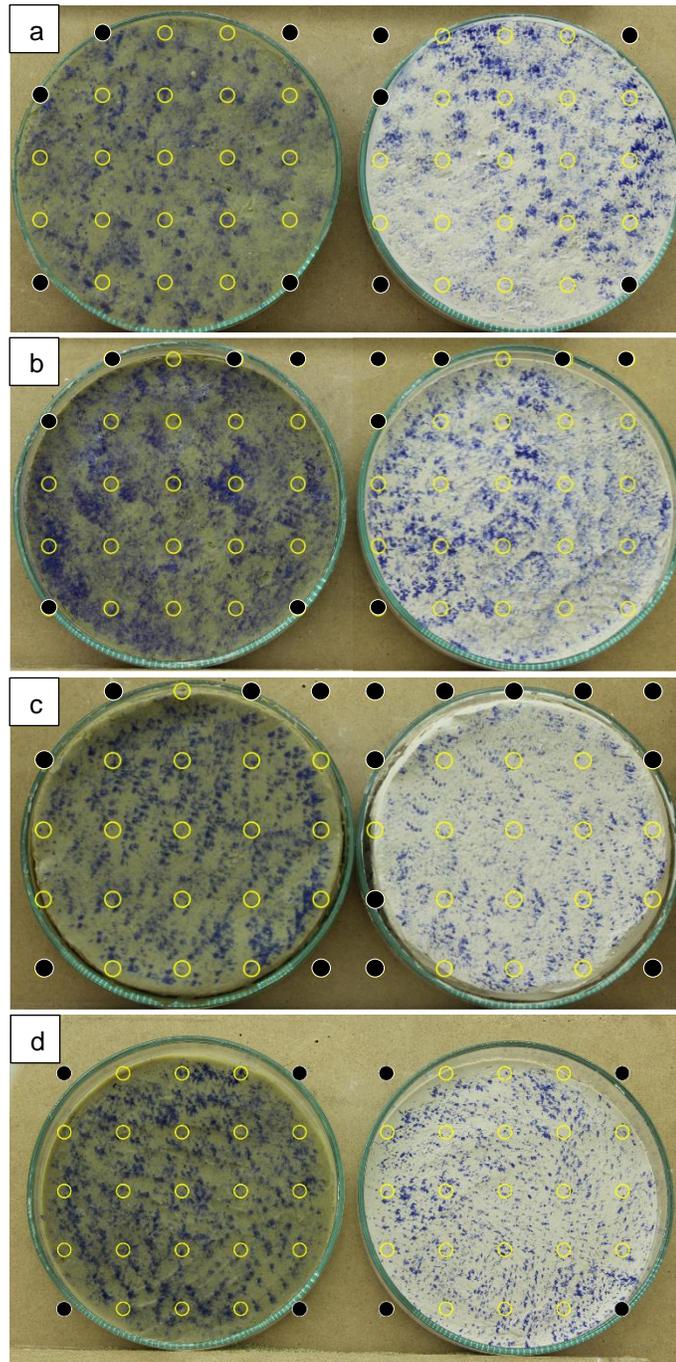


Figura 99. Configuración de puntos de control utilizada en ensayos de suelos finos y superficie total (a) espesor 18 mm, (b) espesor 8 mm, (c) sin contacto lateral, (d) espesor 2 mm.

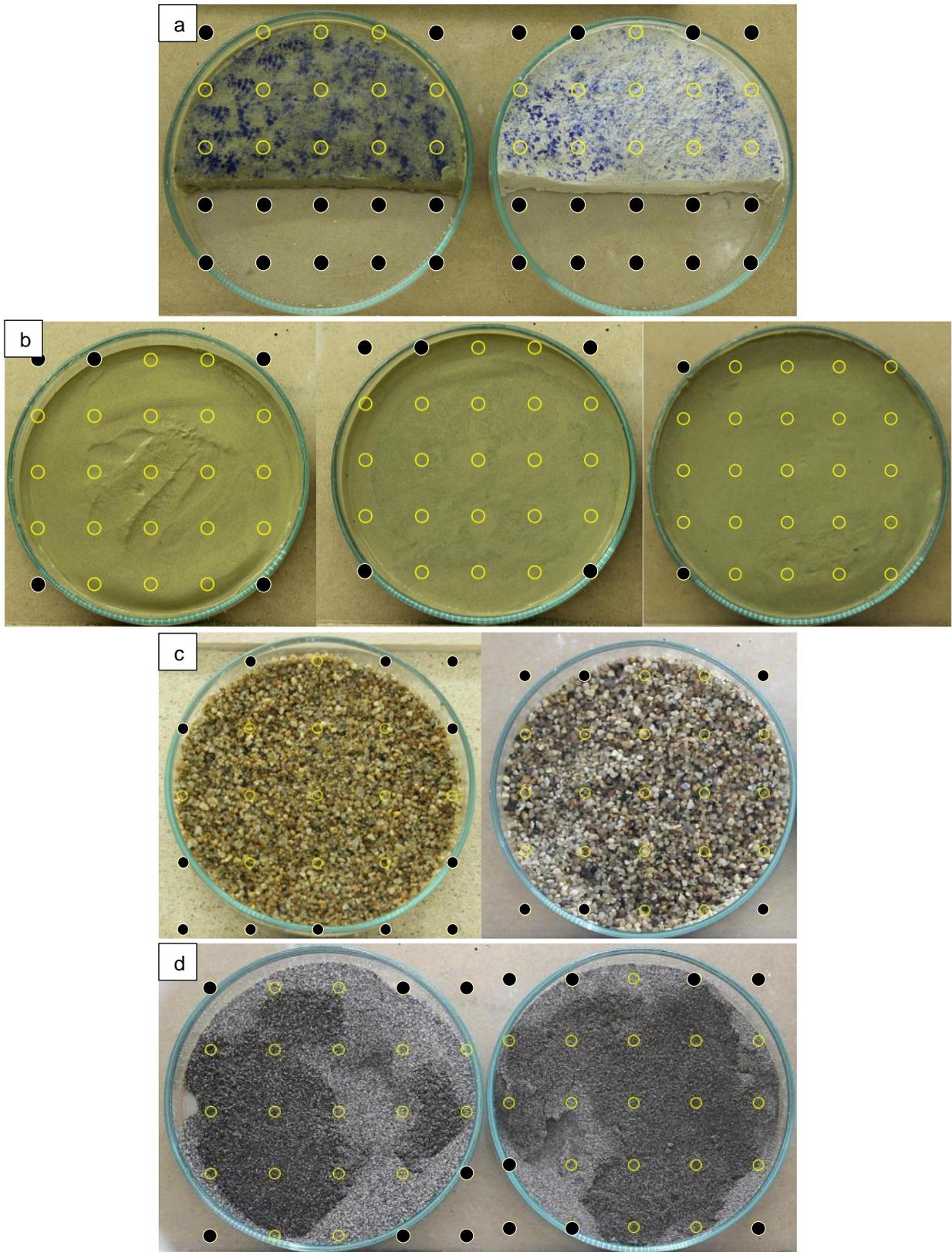


Figura 100. Configuración de puntos de control utilizada en ensayos de suelos finos con (a) superficie media, (b) relaves con superficie completa y arenas (c) medias y (d) finas.

Anexo C. Resultados de procesamiento de datos sobre suelos finos con segunda configuración de Ncorr

C.1. Resultados de desplazamientos y deformaciones totales complementarias

En la Figura 101 se presentan los resultados de desplazamientos y deformaciones totales obtenidos a partir de la configuración complementaria del programa Ncorr, sobre los ensayos de suelos finos.

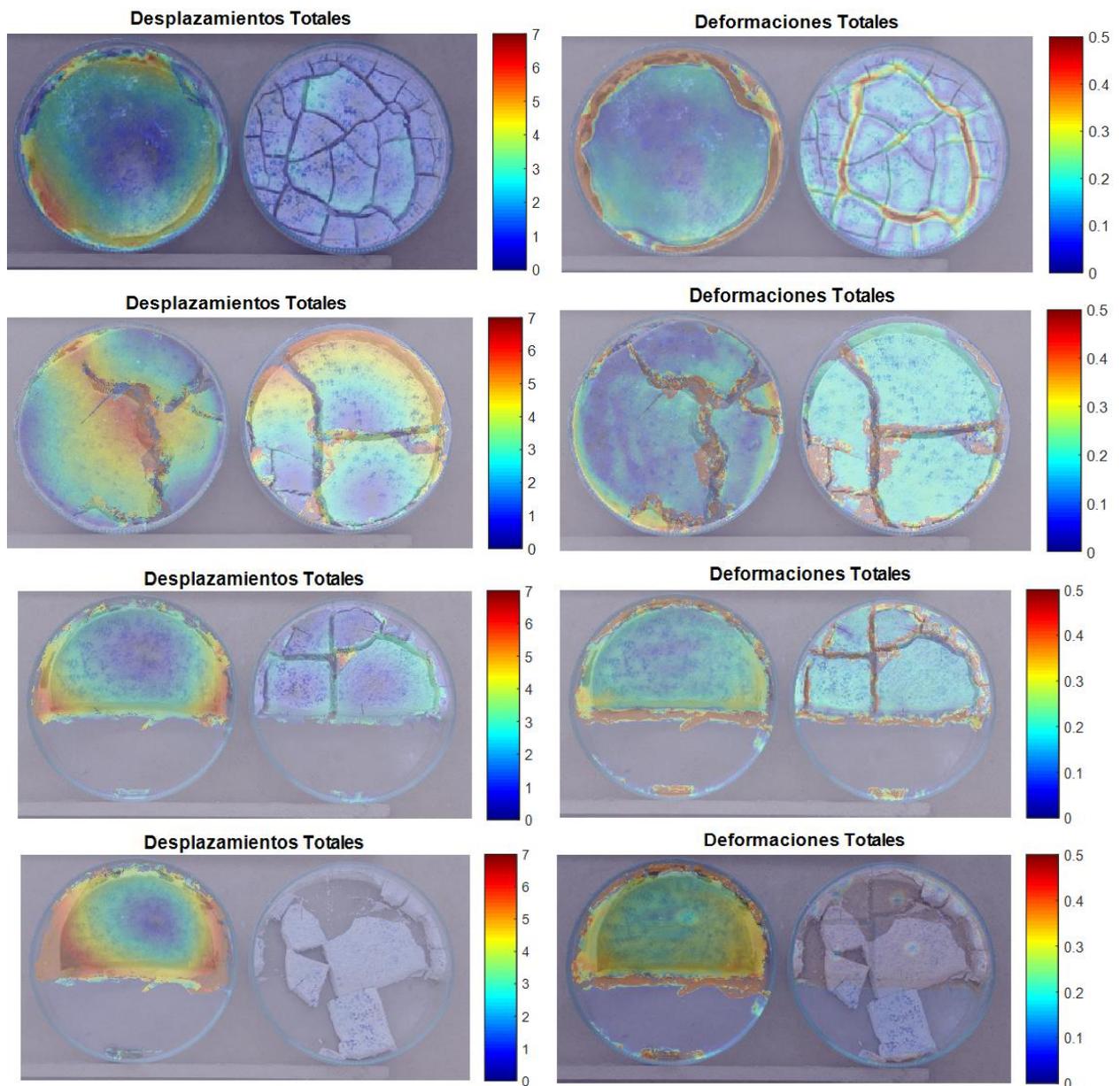


Figura 101. Resultados de desplazamientos y deformaciones totales obtenidos a partir de la segunda configuración utilizada en el programa Ncorr.

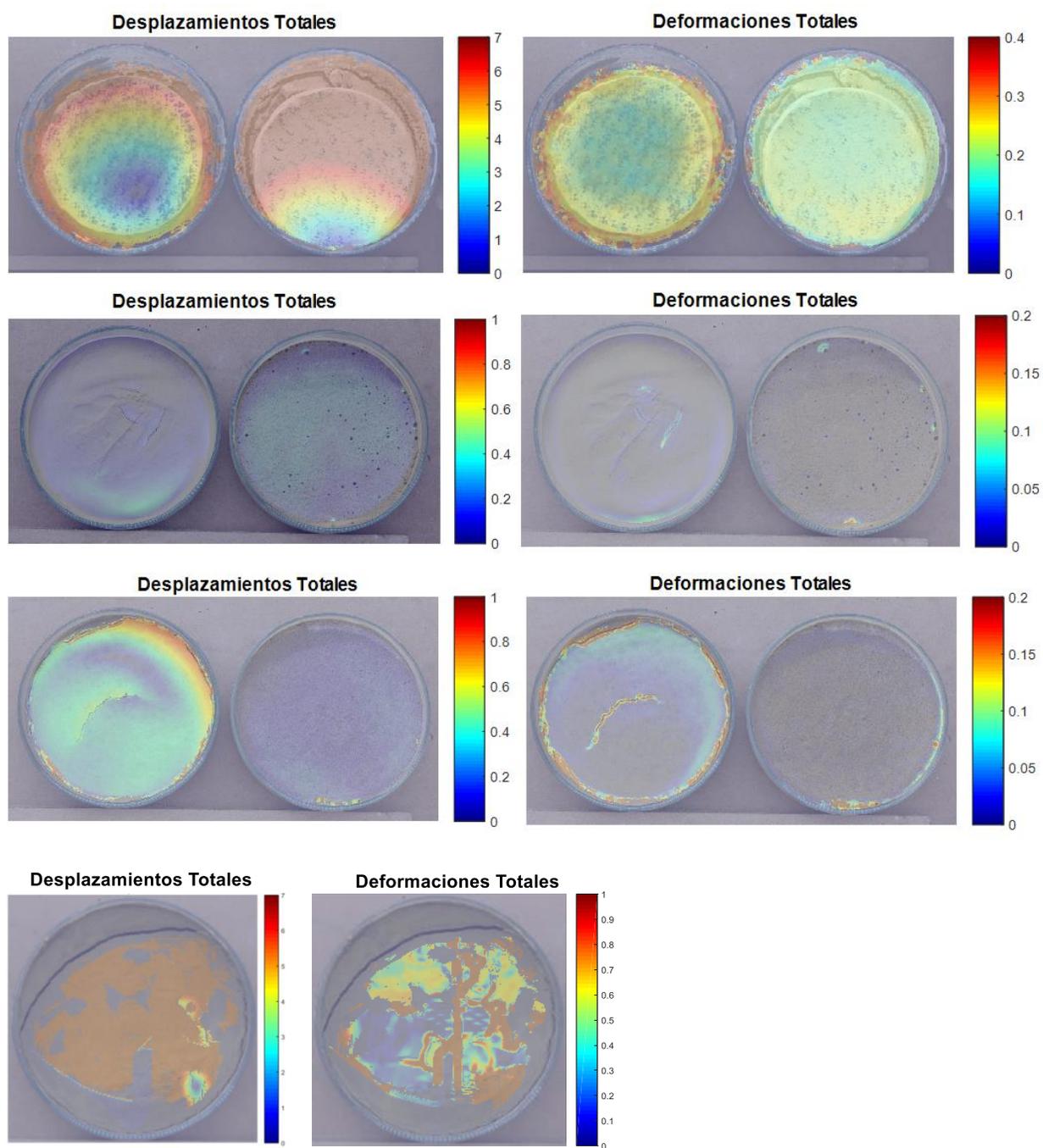


Figura 101 (continuación). Resultados de desplazamientos y deformaciones totales obtenidos a partir de la segunda configuración utilizada en el programa Ncorr.

C.2. Resultados de zonas agrietadas en suelos finos con segunda configuración de Ncorr

En la Figura 102 se exponen los resultados de áreas agrietadas y/o contraídas obtenidas con la configuración complementaria de Ncorr sobre los suelos finos ensayados.

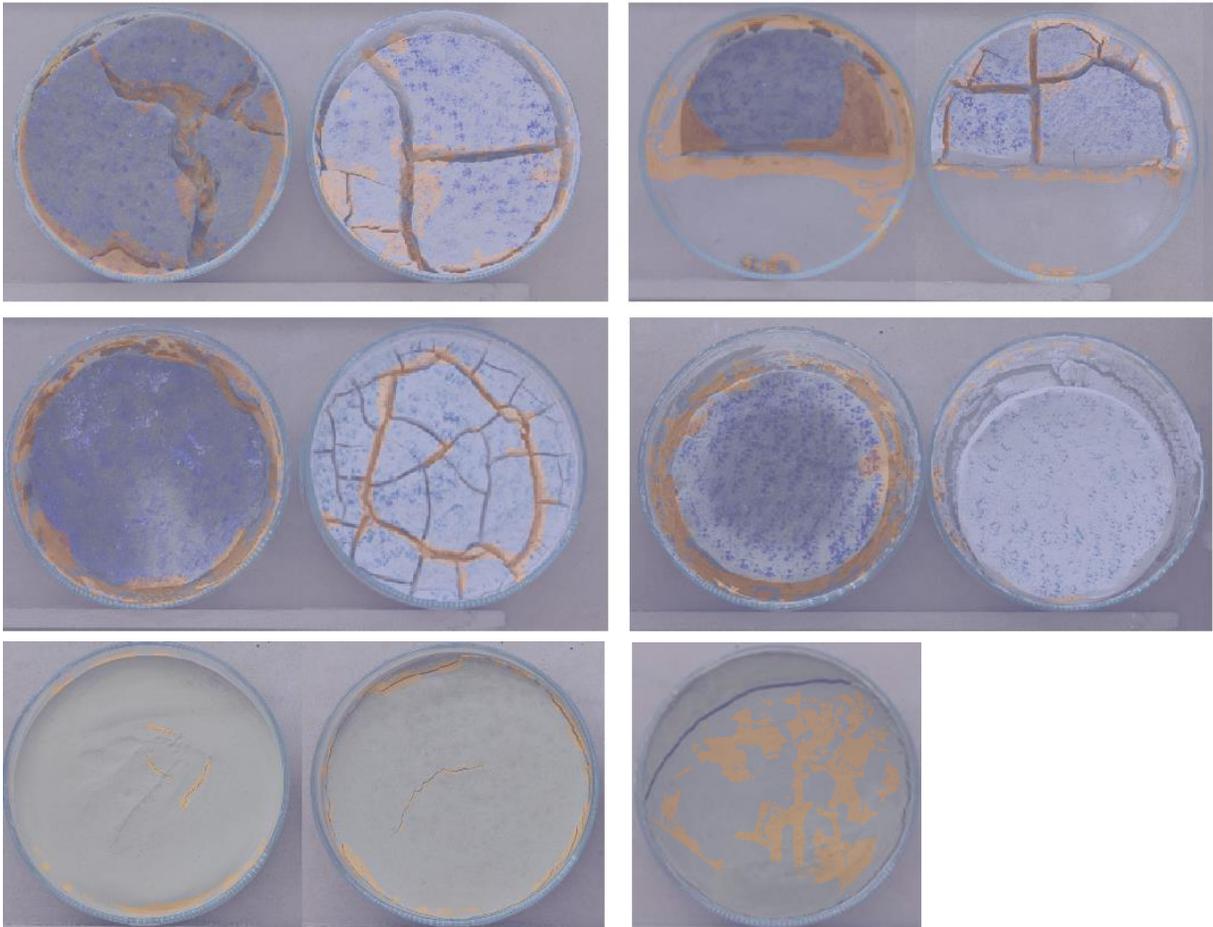


Figura 102. Identificación de zonas agrietadas de acuerdo a segunda configuración utilizada en el programa Ncorr para ensayos de suelos finos.

Anexo D. Situación inicial y final de ensayo con arena media y fotografías

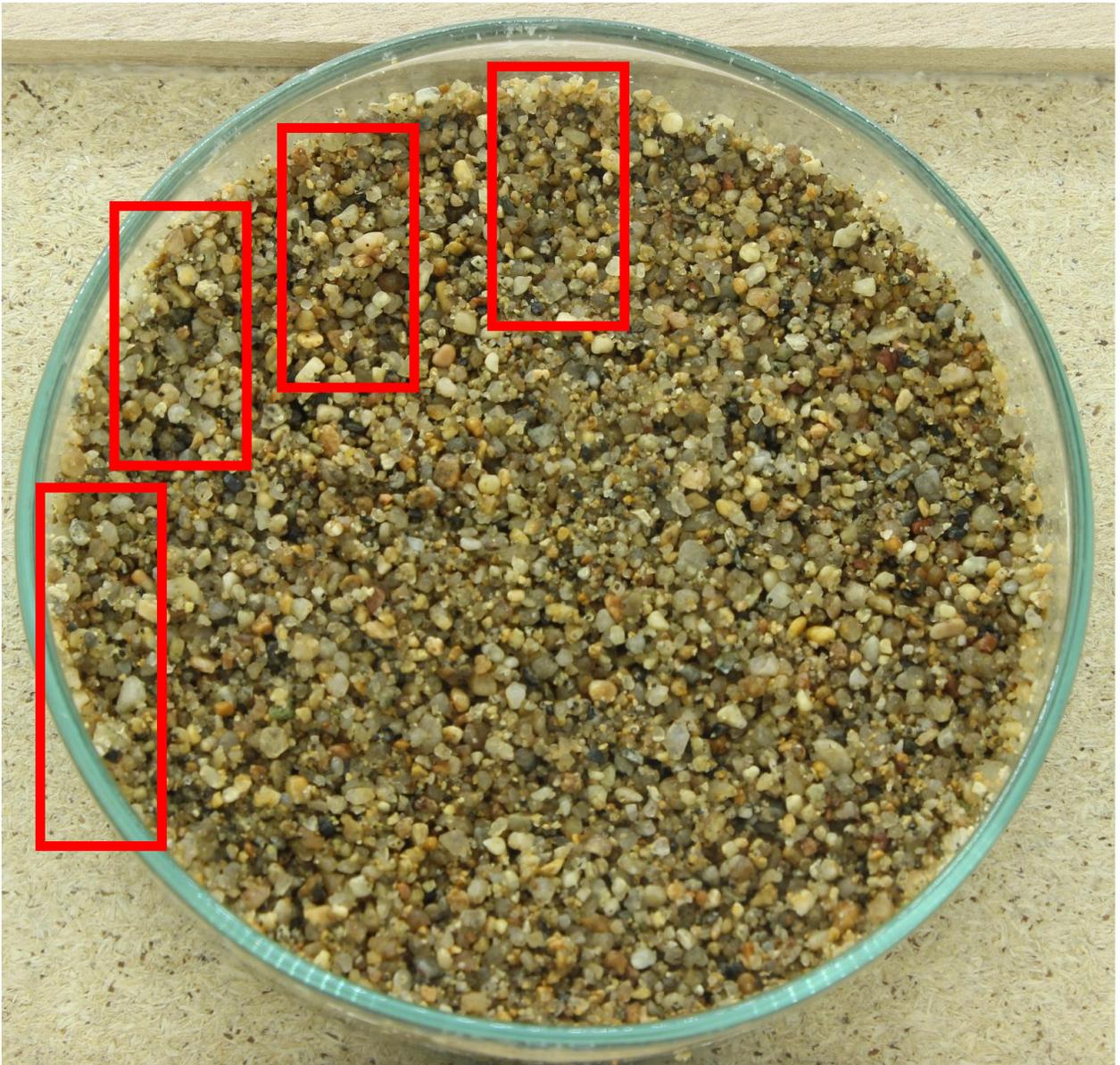


Figura 103. Situación inicial de muestra de arena media mediante fotografías.

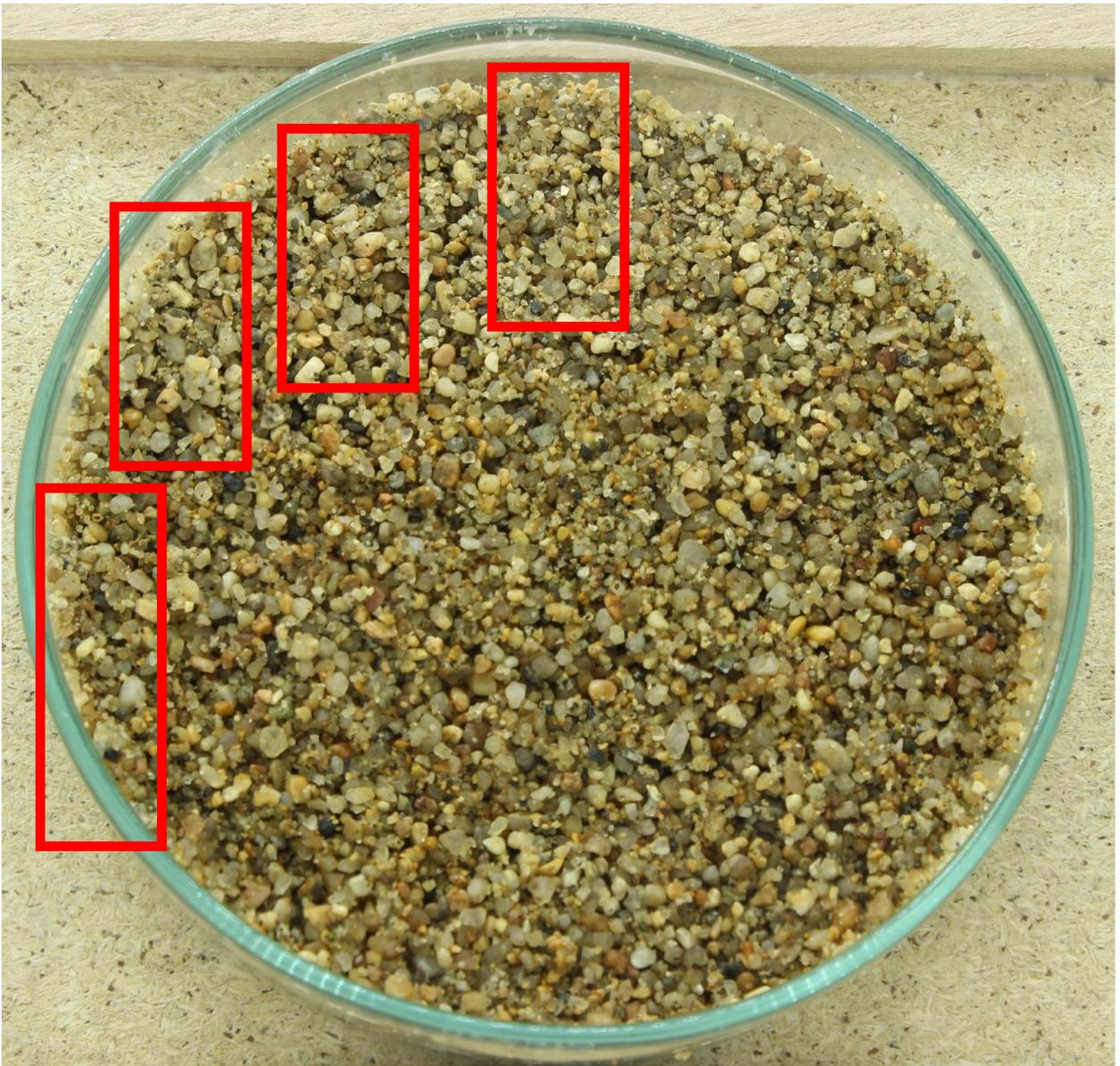


Figura 104. Situación final de muestra de arena media mediante fotografías.