

CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS PARA MODELACIÓN DINÁMICA DE
LOS SUELOS

LUIS MANUEL CASTILLO SUAREZ

DIRECTOR: VICENTE MERCADO PUCHE

UNIVERSIDAD DEL NORTE.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

ÉNFASIS EN GEOTECNIA

BARRANQUILLA

2019

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios, por brindarme la oportunidad de continuar en mi formación académica. Al Dr. Vicente Mercado por su dirección en la realización de esta tesis, por su dedicación y por ser un referente académico que inspira el estudio y la investigación.

Agradezco al Dr. William Fuentes, quien también formó parte de preparación como ingeniero en el campo de la geotecnia. A la Universidad de la Guajira, de la cual soy egresado, la cual creyó en mi potencial y financió este postgrado.

A Aura Quintero, quien siempre permaneció a mi lado durante este proceso, dándome ánimo y creyendo siempre en este proyecto.

Finalmente, agradezco a mis padres por su apoyo y consejo frente a esta etapa de mi vida.

Tabla de contenido

CAPITULO I	1
1.1. Introducción	2
1.1.1 Modelos de suelo.	4
1.1.2. Calibración de modelos.....	5
1.1.3. Incertidumbre.....	8
1.2. Objetivos.....	10
1.2.2. Objetivo general.....	10
1.2.3. Objetivos Específicos.....	10
CAPÍTULO II.....	11
2. DESCRIPCIÓN DEL SUELO Y ENSAYO TRIAXIAL.....	11
2.1. Descripción del suelo.....	12
2.1.1. Montaje experimental de Torsten Wichtmann.....	14
2.2. Ensayo triaxial cíclico consolidado isotrópicamente no drenado.	15
CAPÍTULO III.....	17
3. MODELO CONSTITUTIVO DEL SUELO	17
3.1. Esfuerzo – deformación	19
3.2. Regla de flujo.....	21
3.3. Regla de endurecimiento.....	23
CAPÍTULO IV.....	25
4. INFERENCIA BAYESIANA.....	25
4.1. Inferencia Bayesiana.....	26
4.2. Algoritmo de muestreo Slice Sample	28
CAPÍTULO V.....	30
5. CALIBRACIÓN DEL MODELO	30
5.1. Descripción de los ensayos	31
5.2. Calibración de los parámetros.....	34
5.3. Análisis de los resultados.....	36
5.3.1. Análisis del ensayo TCUI10	36
5.3.2. Análisis del ensayo TCUI13	43
5.3.3. Análisis del ensayo TCUI16	52

5.3.4.	Análisis de los ensayos TCUI10, TCUI13, TCUI16 calibrando los parámetros de manera simultánea.	60
5.3.5.	Análisis de los valores posteriores para cada parámetro.	68
5.3.6.	Análisis de sensibilidad.....	74
5.4.	Verificación de los resultados.....	79
5.4.1.	Verificación de los parámetros del modelo ajustados mediante el uso de ensayos adicionales.....	79
5.4.2.	Verificación de efectos de la variabilidad en la respuesta dinámica de depósito licuable. 84	
6.	CONCLUSIONES	94
	Anexos	97
	A.1 Código en lenguaje de Matlab para inferencia bayesiana.....	98
	A.2 Código en lenguaje de Matlab para escritura de los parámetros y llamar a software Opensees.	100
	A.3 Código en lenguaje de programación TCL para simular ensayo triaxial cíclico no drenado al element test.	102
	Lista de referencias	107

Lista de tablas

v

Tabla 1. Módulo cortante inicial para las diferentes presiones de confinamiento efectivas de los ensayos según Wichtmann (2004).	33
Tabla 2. Distribuciones de probabilidad de los valores iniciales asumidos para los parámetros del modelo a ser estimados.	36
Tabla 3. Número de elementos en la dirección vertical para cada capa de suelo.	89

Lista de figuras

Figura 1. Granulometría arena utilizada en los ensayos.	13
Figura 2. Foto de los granos de la arena utilizada tomada con un microscopio óptico. Fuente: Wichtmann & Triantafyllidis, 2016.....	13
Figura 3. Esquema Ensayo triaxial. Fuente:(ASTM, 2013).....	14
Figura 4.Muestra sometida a vacío luego de la extracción de los moldes. Fuente: (Torsten Wichtmann, 2005).....	16
Figura 5. Visualización superficies de fluencia del modelo. Fuente:(Yang, Elgamal, & Parra, 2003)	19
Figura 6. Curva hiperbólica backbone para un suelo no lineal, respuesta esfuerzo-deformación. Representación lineal por partes de la plasticidad en múltiples superficies (después de Prevost 1985 y Parra 1996). Fuente:(Yang et al., 2003).....	21
Figura 7. Esquema de la respuesta del modelo ante esfuerzo cortante no drenado. Fuente:(Mercado et al., 2019)	22
Figura 8. Esquema de la respuesta del modelo en la configuración del dominio de fluencia. Fuente: (Yang et al., 2003)	24
Figura 9. Procedimiento de muestreo para una sola variable utilizando Slice Sampling. Fuente:(Neil, 2003).....	29
Figura 11. Esquemización del proceso de calibración.....	35
Figura 12. Resultado de la estimación de los parámetros mediante el uso de un modelo constitutivo de suelo usando los resultados del ensayo TCUI 10: En la diagonal principal se presentan histogramas de frecuencia y por fuera de esta se encuentran los valores posteriores.....	38
Figura 13. Distribución de los valores iniciales de los parámetros e histograma de frecuencia para los valores posteriores del ensayo TCUI10.	39
Figura 14. Exceso de presión de poros para datos de laboratorio TCUI10 y modelo. a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultado para la parte final de la simulación.	40
Figura 15. Deformación vertical para datos de laboratorio y modelo. a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultados para la parte final de la simulación.	41
Figura 16. Ciclos de esfuerzo-deformación para (a) datos experimentales y (b) datos producto de la simulación del MAP para el ensayo TCUI10.	42
Figura 17. Resultado de la estimación de los parámetros mediante el uso de un modelo constitutivo de suelo usando los resultados del ensayo TCUI13: En la diagonal principal se presentan histogramas de frecuencia y por fuera de esta se encuentran los valores posteriores.....	46
Figura 18. Distribución de las iniciales de los parámetros e histograma de frecuencia para los valores posteriores del ensayo TCUI13.	47

Figura 19. Exceso de presión de poros para datos de laboratorio y modelo TCUI13. a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultado para la parte final de la simulación.	48
Figura 20. Deformación vertical para datos de laboratorio y modelo . a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultados para la parte final de la simulación.	50
Figura 21. Ciclos de esfuerzo-deformación para (a) datos experimentales y (b) datos producto de la simulación del MAP para el ensayo TCUI13.	51
Figura 22.Resultado de la estimación de los parámetros mediante el uso de un modelo constitutivo de suelo usando los resultados del ensayo TCUI16: En la diagonal principal se presentan histogramas de frecuencia y por fuera de esta se encuentran los valores posteriores.....	53
Figura 23. Distribución de los valores iniciales de los parámetros e histograma de frecuencia para los valores posteriores del ensayo TCUI16	55
Figura 24.Exceso de presión de poros para datos de laboratorio y modelo TCUI16. a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultado para la parte final de la simulación.	56
Figura 25. Deformación vertical para datos de laboratorio y modelo. a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultados para la parte final de la simulación.	57
Figura 26.Ciclos de esfuerzo-deformación para (a) datos experimentales y (b) datos producto de la simulación del MAP para el ensayo TCUI16.	59
Figura 27.Resultado de la estimación de los parámetros mediante el uso de un modelo constitutivo de suelo usando los resultados de los ensayo TCUI10, TCUI13 Y TCUI16: En la diagonal principal se presentan histogramas de frecuencia y por fuera de esta se encuentran los valores posteriores.	62
Figura 28. Distribución de los valores iniciales de los parámetros e histograma de frecuencia para las muestras posteriores de los ensayos TCUI10, TCUI13 Y TCUI16.	63
Figura 29. Exceso de presión de poros (izquierda) y Deformación vertical (derecha) para datos de laboratorio y modelo del ensayo TCUI10.....	64
Figura 30. Exceso de presión de poros (izquierda) y Deformación vertical (derecha) para datos de laboratorio y modelo del ensayo TCUI13.....	65
Figura 31. Exceso de presión de poros (izquierda) y Deformación vertical (derecha) para datos de laboratorio y modelo del ensayo TCUI16.....	67
Figura 32. Esfuerzo-deformación para los datos de laboratorio y del modelo para los ensayos (desde arriba hacia abajo) TCUI10, TCUI13 Y TCUI16.	68
Figura 33. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas del ángulo de fricción.	69
Figura 34. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas del Módulo cortante de referencia.....	70
Figura 35. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas del coeficiente de Poisson.	71

Figura 36. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas del parámetro contracción.	72
Figura 37. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas del coeficiente dependiente de presión.	73
Figura 38. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas de la desviación estándar.	74
Figura 39. Exceso de presión de poros para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI10.	75
Figura 40. Deformación vertical para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI10.	76
Figura 41. Exceso de presión de poros para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI13.	76
Figura 42. Deformación vertical para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI13.	77
Ilustración 43. Exceso de presión de poros para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI16.	78
Figura 44. Deformación vertical para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI13.	79
Figura 45. Exceso de presión de poros para datos de laboratorio y modelo en los ensayos TCUI09 (a) y TCUI12 (b).	81
Figura 46. Deformación vertical para datos de laboratorio y modelo en los ensayos TCUI09 (a) y TCUI12 (b).	82
Figura 47. Esfuerzo-deformación para los datos de laboratorio y del modelo para los ensayos (desde arriba hacia abajo) TCUI9 y TCUI12.	83
Figura 48. Distribución transversal del WLA. fuente: Modificado de NEES (2015).	85
Figura 49. Ubicación geográfica de WLA y epicentro del sismo Superstition Hills. Fuente: tomado de: (Holzer et al., 2016)	87
Figura 50. Registro de los sensores el 24 de noviembre de 1987 durante el sismo Superstition Hills. Fuente: (Holzer et al., 2016)	88
Figura 51. Aceleración en la superficie (azul) y en la base (rojo) de la columna de suelo de WLA luego de la simulación.	91
Figura 52. Razón de presión de poros registrado diversos sensores de WLA durante el sismo Superstition Hills. fuente:(T. Leslie. Youd & Holzer, 1994).	92
Figura 53. Exceso de presión de poros en función del tiempo. Promedio de los resultados de las 100 muestras (azul) y desviación estándar de los resultados (área amarilla).	93

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL

1.1. Introducción

Existen suelos saturados en donde en presencia de sismos o vibraciones considerables en el entorno el agua en los poros puede acumular exceso de presión y como consecuencia de esto los esfuerzos efectivos disminuyen. Ante cargas cíclicas puede llegar a acumularse exceso de presión de poros en el agua intersticial de tal manera que los esfuerzos efectivos de confinamiento (σ_3') tiendan a presentar disminución en sus valores; de esta manera se denominó licuación inicial al estado para el cual $\sigma_3' = 0$ es alcanzado por primera vez (Seed, 1979). Usualmente las zonas susceptibles a sufrir licuación presentan suelos granulares sueltos y saturados debido a un nivel freático superficial, lo cual puede resultar en fallos en estructuras durante un movimiento sísmico que desencadene este fenómeno (Irigaray, 2012).

El potencial de licuación de los suelos es muchas veces estudiado a partir del comportamiento de la presión del agua en los poros y la deformación axial registrados a través de los ensayos triaxiales cíclicos no drenados, en los cuales, una muestra de suelos es sometida a deformaciones cíclicas, simulando aproximadamente las cargas cíclicas que experimenta el suelo en campo libre durante un evento sísmico. Para el caso de arenas sueltas, se evidencia un aumento progresivo en la presión del agua en los poros a medida que avanza el fenómeno de excitación, acompañado de la degradación del módulo de rigidez al corte y grandes deformaciones (Wichtmann & Triantafyllidis, 2016). En la práctica ingenieril, la evaluación del potencial de licuación generalmente se realiza con métodos simplificados en base en ensayos de campo como en Ensayo de Penetración Estándar (SPT), el Ensayo de Penetración de Cono (CPT) o mediciones de velocidad de onda de corte in situ (Andrus & Stokoe, 2000; R. Boulanger & Idriss, 2014; Youd & Idriss, 2001). Estas metodologías se han desarrollado, calibrado y ajustado a través de los años con base en observaciones en campo.

Sin embargo, en muchas ocasiones las simulaciones computacionales son una alternativa más adecuada para la evaluación del potencial de licuación debido a la complejidad del sistema o requerimientos del análisis. Si bien esas herramientas han demostrado capacidades básicas para la predicción del potencial de licuación en algunos sitios (Kutter et al., 2018; Manzari et al., 2014; Prevost & Popescu, 1994; M Zeghal, Manzari, Kutter, & Abdoun, 2014), el consenso general es que todavía existe un gran desconocimiento en cuanto al comportamiento de los modelos numéricos en términos de la sensibilidad a la variación de sus parámetros y sus correlaciones internas (Zeghal et al., 2014; Zeghal et al., 2018).

El presente trabajo presenta la calibración de un modelo constitutivo para la simulación del comportamiento cíclico de suelos a través de un análisis bayesiano, mediante un método de muestreo denominado Slice Sampling (Neil, 2003). En el presente trabajo se utiliza un modelo constitutivo de suelos dependiente de presión con múltiples superficies de fluencia (PressureDependMultiYield) para representar el suelo. La calibración del modelo se realizó a partir de una serie de ensayos triaxiales cíclicos consolidados isotrópicos no drenados (TCUI) realizados en la Ruhr-University Bochum (Wichtmann, 2005). El método de calibración propuesto, no sólo permite identificar parámetros óptimos que ajusten la respuesta del modelo al comportamiento observado del suelo en el laboratorio, sino que también ofrece información en cuanto a la incertidumbre asociada a cada parámetro calibrado, así como información en cuanto a las correlaciones internas que puedan existir entre los parámetros del modelo. La implementación de la técnica de calibración propuesta no sólo representa un avance en cuanto a la automatización objetiva del proceso de ajuste de parámetros, sino que ofrece una herramienta alternativa para la comprensión de los parámetros de un modelo constitutivo en términos de su incertidumbre y de sus interacciones.

1.1.1 Modelos de suelo.

Existen múltiples modelos constitutivos disponibles en la literatura para predecir el comportamiento mecánico de los suelos ante diferentes situaciones de carga. En la década de 1990, algunos autores describieron modelos para el cálculo de los efectos de la licuación y publicaron sus resultados en libros para consulta, como es el caso de Arulanandan y Scott (1993). En 2008, Taiebat y Dafalias (2008) presentan ante la comunidad científica un modelo constitutivo de suelo que tiene en cuenta la anisotropía del suelo y está basado en la mecánica de suelos de estado crítico con una superficie de fluencia en forma de un cono cerrado (Taiebat & Dafalias, 2008); más adelante se realizan importantes publicaciones respecto a modelos constitutivos de suelos que pueden recrear la respuesta mecánica del suelo ante carga cíclica en suelos no cohesivos, por ejemplo, Fuentes y Triantafyllidis (2015) presentan el modelo ISA el cual usa el concepto intergranular propuesto por Niemunis y Herle (1997) pero sin el espacio de deformación intergranular y de modelos hipoplásticos de Karlsruhe. Este modelo relaciona la razón de esfuerzo con la razón de deformación a través de una ecuación constitutiva. Boulanger y Ziotopoulou (2015) presentaron a la comunidad científica el modelo PM4Sand (versión 3) el cual tiene como principal finalidad su aplicación en la ingeniería geotécnica sísmica para estudios de licuación; este modelo presenta dos versiones anteriores publicadas en 2010 y 2012, y utiliza un sistema de esfuerzo-deformación controlados, que a su vez es compatible con la teoría del estado crítico, e implementa una superficie limitante (“bounding surface”) propuesta por Dafalias y Manzari (2004). En 2014 se lleva a cabo el proyecto de análisis y experimentos de licuación (LEAP), el cual es una investigación colaborativa internacional entre investigadores relacionados con licuación. El equipo

del proyecto LEAP estuvo conformado por investigadores de Estados Unidos, Reino Unido, Japón, China y Taiwán. Este proyecto incluyó experimentos que consistieron en la realización de ensayos de centrífuga en seis laboratorios en los países anteriormente mencionados (Cambridge University, Kyoto University, University of California Davis, National Central University, Rensselaer Polytechnic Institute, y Zhejiang University). En esta fase se utilizó la arena de Ottawa como material de ensayo para construir el suelo en los modelos y se construyeron y ensayaron los modelos en condiciones similares. Los resultados de los ensayos experimentales fueron publicados en el 2018 (Kutter et al., 2018). El proyecto LEAP buscó también evaluar las capacidades de los modelos constitutivos disponibles para el análisis de los suelos propensos a licuación, y en especial sus habilidades para predecir las deformaciones permanentes debido a cargas cíclicas (Manzari et al., 2014)

1.1.2. Calibración de modelos

Cada modelo constitutivo funciona dependiendo de ciertas reglas y consideraciones numéricas que hacen que la respuesta mecánica del modelo se aproxime a la respuesta real del suelo que experimenta el fenómeno que se quiere simular; como por ejemplo, las reglas de flujo, la forma de la superficie de fluencia, por mencionar algunos. Las relaciones esfuerzo-deformación provistas por un modelo dependen de parámetros constitutivos los cuales definen el comportamiento del material simulado.

Debido a esto como paso inicial de cualquier simulación numérica del comportamiento mecánico del suelo se realiza un proceso de calibración de los parámetros de los modelos, para acercar los resultados de la simulación a los obtenidos en la experimentación o en la realidad; esto incluso aunque estas mediciones experimentales están sujetas a la variabilidad de sus resultados

debido al proceso de ejecución de las mediciones del fenómeno. En la práctica el proceso de calibración es frecuentemente realizado mediante prueba y error, variando los parámetros de entrada del modelo de forma tal que haya mayor aproximación con lo obtenido en las mediciones y esto se define a través de la comparación visual de la respuesta esfuerzo deformación experimental con la respuesta simulada. Existen sin embargo, metodologías de calibración automatizadas las cuales requieren de un proceso iterativo que se realiza mediante un análisis numérico computacional para el cual es necesario definir una función objetivo, un algoritmo de búsqueda y un criterio de selección para la terminación del proceso. Un proceso automatizado puede ser necesario o conveniente dependiendo de la cantidad de parámetros a calibrar y del tiempo computacional para correr cada simulación (Gupta, Sorooshian, & Yapo, 1999). Dentro de este contexto, Zhang et al. (2012) presentan una metodología para calibrar parámetros mediante el análisis bayesiano aplicando una simulación híbrida de la cadena markoviana de Monte Carlo, realizando la descomposición de un problema de actualización de parámetros de gran dimensión en varias actualizaciones de menor dimensión; dicha actualización se empleó en cálculos del coeficiente de presión lateral de tierra en reposo y la capacidad portante para una cimentación superficial (Zhang, Tang, Zhang, & Huang, 2012). Después, fueron presentados los resultados de la investigación de Groholski et al. (2014) en la cual mencionan que para los resultados de los arreglos de sensores “downhole” de Wildlife en California, Estados Unidos, se realizó la calibración de los parámetros mediante métodos paramétricos y no paramétricos para un modelo de materiales basado en redes neuronales que simula la respuesta esfuerzo-deformación, aplicado a una columna de suelo (Groholski, Hashash, & Matasovic, 2014).

En 2016, investigadores realizaron la calibración de los parámetros de su modelo mediante la utilización de la Cadena Transicional Markoviana de Monte Carlo (Ching & Chen, 2007), la

cual entre sus beneficios incluye el no necesitar del descarte de muestras iniciales, lo cual es un proceso común en la calibración automática de parámetros; otra ventaja de la metodología propuesta por Ching y Chen (2007) es que permite una convergencia más rápida de la simulación respecto a otros métodos (Ching & Wang, 2016). Más recientemente, Mercado et al. (2017) propusieron un esquema de optimización global para realizar la estimación de las propiedades en condiciones de pequeñas deformaciones, para la caracterización del comportamiento contractivo del suelo en los depósitos de arenas ante cargas sísmicas. La técnica de Mercado et al. (2017) no requiere de una modelación de todo el depósito de suelo a estudiar; sino que para este estudio se utilizaron mediciones puntuales provenientes de distintos tipos de ensayos de campo y de laboratorio a gran escala, como es el caso de los ensayos de centrífuga dinámica y de caja de contenedores laminares sobre mesa vibratoria así como registros de sensores instalados en arreglos de sensores “downhole” en campo en el sitio de Wildlife en el estado de California en Estados Unidos (Mercado et al., 2017). En ese mismo año Akeju, et al. (2017) publican los resultados de su investigación, la cual tenía como finalidad realizar la calibración de un modelo constitutivo de suelos a través de un metodología Bayesiana, registrando la variabilidad entre los datos obtenidos mediante el análisis numérico y los obtenidos en el ensayo de columna resonante en el laboratorio en arenas gruesas y gravas finas. La técnica propuesta por Akeju, et al. (2017) permite además elegir cuál es el mejor modelo constitutivo de tres evaluados, que bajo estas condiciones ajustan las curvas de reducción del módulo de corte normalizado de los suelos.

También se han efectuado estudios relacionados con modelos que simulan el comportamiento de la arcilla ante carga cíclica, como es el caso del modelo CREEP-SCLAY1S (2015) el cual fue utilizado también para optimización de parámetros. Dicho modelo utiliza catorce parámetros los cuales son el objetivo de la optimización. El método de aproximación utilizado en

la optimización incluye un algoritmo genético, el cual inicia con una generación de cada parámetro de manera aleatoria. Luego, según la función objetivo, la cual es definida por la función del error, se seleccionan las muestras con mejores resultados para que avancen a la siguiente generación o iteración; las muestras mutan en cada generación y traen consigo una aproximación más satisfactoria de acuerdo a la función objetivo (Gras, Sivasithamparam, Karstunen, & Dijkstra, 2017).

1.1.3. Incertidumbre

Otro de los aspectos importantes evaluados en este trabajo es la incertidumbre debida al modelo constitutivo de suelo empleado para la calibración de los parámetros de suelo. Desde los inicios de la mecánica de suelos, ha sido recurrente el uso del término incertidumbre, asociado a distintos aspectos tales como la variabilidad espacial de los materiales, muestreo y medición de parámetros, y las metodologías de modelación disponibles. Casagrande se refiere a incertidumbre como “riesgo calculado” (Casagrande, 1965). Whitman (2000) por otra parte, hace una reseña del término incertidumbre en la conferencia de la ASCE de 1996 acerca de la incertidumbre en el medio geológico, en la cual resalta la diferencia entre la evaluación del riesgo y el riesgo cuantificado, en donde expresa que para él la evaluación del riesgo es parte del proceso a través del cual se llega a una cuantificación del riesgo. Baecher y Christian (2005) se refieren a la incertidumbre en los modelos como “el grado en el cual un modelo tiene la capacidad de realizar una simulación de lo que ocurre en la realidad”; esta incertidumbre está asociada a qué tan alejados están los resultados de la modelación del fenómeno físico real. Este trabajo hace también un acercamiento a la concepción de la incertidumbre debida a los parámetros del modelo, la cual se da por la lejanía de los valores de los parámetros luego de la evaluación de los mismos mediante los ensayos o

calibración de estos, y se incrementa aún más cuando se cuenta con un número muy limitado de muestras o ensayos de laboratorio (Baecher & Christian, 2005). Teniendo en cuenta lo anterior y entendiendo que tanto el modelo como los parámetros presentan cierto grado de incertidumbre, se podría pensar que no siempre un modelo constitutivo con muchos parámetros es más acertado si se habla con respecto a la incertidumbre; porque cada parámetro traerá consigo una incertidumbre, entonces habría un modelo con parámetros bastante acertados, pero a la vez con una incertidumbre muy grande en los resultados. Posteriormente, Popescu et al. (2007) efectuaron el análisis de variación de resultados entre un modelo de un depósito de suelo mediante elementos finitos en 3D y 2D (plane strain) para análisis de suelos; los autores realizaron una serie de simulaciones con ciertos registros de aceleración de entrada para el modelo, los cuales fueron generados mediante un proceso de simulación no estacionaria diseñado por Deodatis (1996). Estos datos fueron introducidos al modelo y se evaluó la respuesta sísmica de la presión del agua en los poros, desplazamiento y asentamientos máximos. Más recientemente, Tang et al. (2017) presentaron los resultados de la evaluación de la incertidumbre de varios modelos clásicos para el cálculo de la capacidad portante para cimentaciones superficiales, el primero es el propuesto por Yamaguchi (1965) y el segundo es el propuesto por Meyerhof (1974), ambos a partir de análisis de estabilidad mediante el método del equilibrio límite. Se establece una relación entre el valor de capacidad portante calculado mediante modelos de elementos finitos y la capacidad portante medida en los ensayos de modelación centrífuga; luego, con un análisis posterior que entra a evaluar este factor se llega a la conclusión de que los modelos evaluados ofrecen una predicción razonable de la capacidad portante para el tipo de suelo analizado (Tang, Phoon, Zhang, & Li, 2017). Este mismo año, Montgomery y Boulanger (2017) presentan un estudio de los efectos de la variabilidad espacial en el asentamiento debido a una licuación inducida. Los autores presentan una

comparación entre los resultados de simulaciones con modelos uniformes y estocásticos de taludes infinitos, en la cual se aprecia una concordancia entre los resultados de ambos tipos de análisis; esto incluso a pesar que en los modelos con una capa uniforme no varían las propiedades del suelo a lo largo de esta y en el modelo estocástico se aprecian diferentes valores de $(N_1)_{60cs}$ en el desarrollo de todo el espesor de la capa y a través de la longitud de la misma (Montgomery & Boulanger, 2017).

1.2.Objetivos

1.2.2. Objetivo general

Explorar las capacidades de una metodología Bayesiana de calibración de modelos constitutivos de suelos con capacidad de predecir la respuesta mecánica del suelo ante carga cíclica, a fin de evaluar parámetros óptimos, incertidumbre de los parámetros calibrados y correlaciones internas.

1.2.3. Objetivos Específicos

- Reproducir el comportamiento esfuerzo-deformación y de la acumulación de presión del agua en los poros del suelo a través de un modelo constitutivo.
- Definir parámetros de entrada que ajusten la respuesta de los element test del modelo a los resultados de laboratorio, estableciendo la incertidumbre asociada a la calibración.
- Verificar los resultados de la calibración utilizando ensayos de laboratorio adicionales.
- Verificar los efectos de la incertidumbre en los parámetros calibrados sobre la respuesta modelada de un sitio con suelo potencialmente licuable.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DEL SUELO Y ENSAYO TRIAXIAL

2.1. Descripción del suelo

El tipo de suelo utilizado en este trabajo es una arena de cuarzo con granos subangulares. Los datos del suelo utilizado para realizar esta investigación fueron tomados de la tesis doctoral de Wichtmann (2005). De los distintos ensayos de laboratorio, fueron seleccionados los triaxiales cíclicos consolidados isotrópicamente no drenados (a estos ensayos se les nombró utilizando las siglas “TCUI” al inicio del nombre de cada una). Los resultados de estos ensayos se pueden observar en la base de datos publicada por el autor (T. Wichtmann, n.d.). En la sección Karlsruhe fine sand database, se encuentran varios ensayos realizados a esta arena denominada de Karlsruhe, y en la opción “Stress cycles, isotropic consolidation (TCUI)” se pueden apreciar las gráficas de resultados de cada uno de los veintidós (22) ensayos de este tipo.

Para los ensayos analizados se utilizó una arena uniforme media gruesa a gruesa con ($D_{10} = 0.115 \text{ mm}$, $D_{30} = 0.128 \text{ mm}$, $D_{50} = 0.15 \text{ mm}$, $D_{60} = 0.17 \text{ mm}$), coeficiente de uniformidad $C_u = D_{60}/D_{10} = 1.4$ e índice de curvatura $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})} = 0.9$ (Figura 1). Las relaciones de vacío mínima y máxima fueron determinadas mediante pluviación en aire en muestras grandes ($d = 28 \text{ cm}$, $h = 8 \text{ cm}$). La relación de vacíos máxima fue $e_{max} = 0.992$, y la relación de vacíos mínima $e_{min} = 0.679$. La forma de los granos fue observada mediante un microscopio óptico (Figura 2). Los ensayos triaxiales que se tomaron para la realización de esta investigación fueron realizados con una presión de confinamiento efectiva de 100, 200 y 300 kPa, con una densidad relativa aproximada $I_{D0} \cong 0.60$, dentro de una denominación de densidad relativa densa mediante la fórmula sugerida en la norma INVIAS 136 (INVIAS, 2013). Los resultados experimentales analizados corresponden a los ensayos TCUI10, TCUI13 y TCUI16 realizados por Wichtmann (2005).

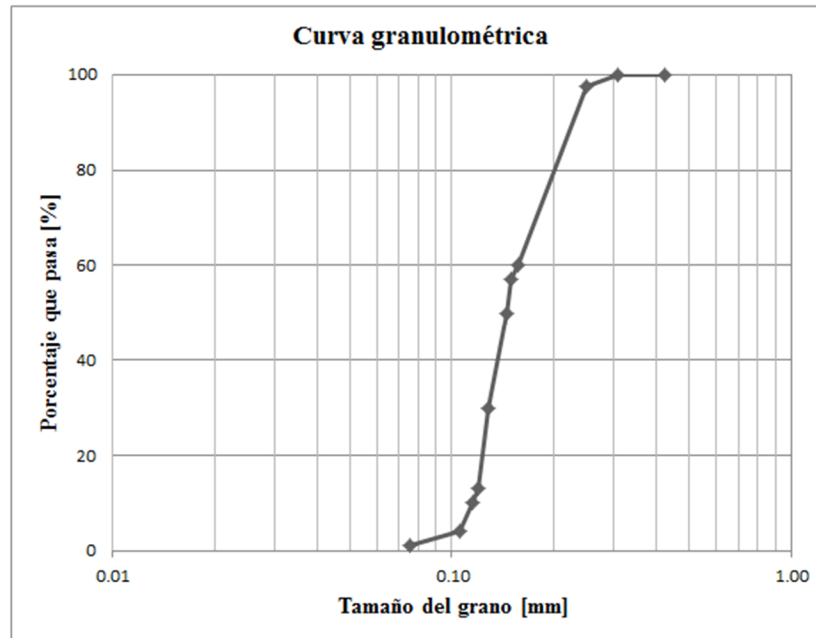


Figura 1. Granulometría arena utilizada en los ensayos.

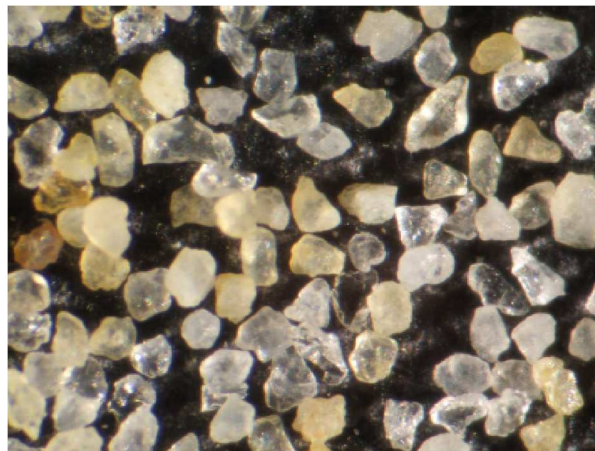


Figura 2. Foto de los granos de la arena utilizada tomada con un microscopio óptico. Fuente: Wichtmann & Triantafyllidis, 2016

2.1.1. Montaje experimental de Torsten Wichtmann

Los datos experimentales fueron obtenidos de ensayos triaxiales cíclicos consolidados isotrópicamente no drenados, con un primer ciclo drenado, realizados a la arena descrita en el capítulo 2.1. Descripción del suelo. La realización de un primer ciclo drenado ha sido estudiado por varios investigadores del campo y ha arrojado buenas aproximaciones a lo que ocurre experimentalmente a la arena; varios autores han utilizado esta extrapolación de la relación de acumulación en los siguiente ciclos después del primer ciclo para un elemento o el modelado de una muestra (Diyaljee & Raymond, 1982; Hettler, 1981).

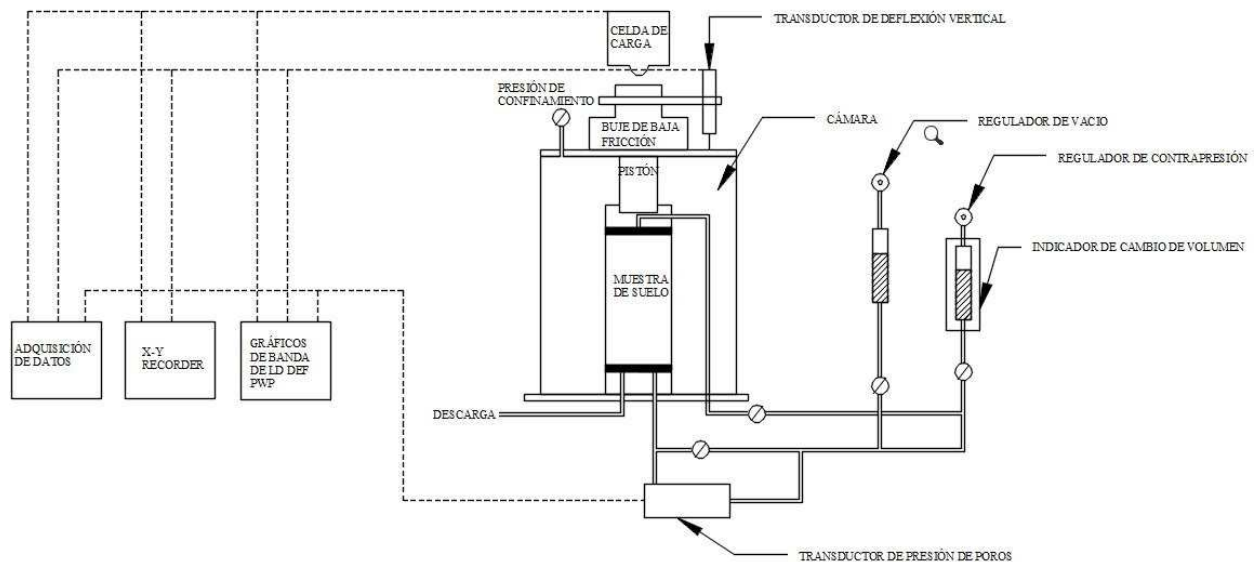


Figura 3. Esquema Ensayo triaxial. Fuente: (ASTM, 2013)

Las muestras utilizadas en los ensayos triaxiales pertinentes a esta tesis tienen un diámetro $d = 10 \text{ cm}$ y una altura $h = 20 \text{ cm}$, el diámetro mínimo de la muestra para estos ensayos es de 2” (5.1 cm) según la norma ASTM D5311M-13 y la relación altura-diámetro debe estar entre 2.0 y 2.5. Los ciclos fueron realizados a un desplazamiento constante de 0.05 mm/min.

2.2. Ensayo triaxial cíclico consolidado isotrópicamente no drenado.

Estos ensayos se realizan normalmente para evaluar cuál es la capacidad de resistencia a las cargas cíclicas inducidas en la muestra. La importancia de este tipo de ensayos radica en la utilidad en la evaluación de la capacidad de resistencia de un suelo a esfuerzos cortantes inducidos, los cuales pueden ser una representación de un sismo o una carga cíclica. Para la realización de este ensayo, inicialmente se debe encapsular una muestra de suelo debidamente preparada según las especificaciones de preparación de muestras para ensayos triaxiales en una membrana de látex (ASTM, 2011). Esta muestra es luego confinada en una cámara triaxial, para ser sometida a una presión de confinamiento inicial; la muestra es luego cargada en la parte superior mediante una barra de carga según se puede observar en la Figura 3, la cual muestra un esquema del aparato de ensayo triaxial.

La consolidación isotrópica es definida como aquel estado en el cual el esfuerzo efectivo vertical de consolidación es igual al esfuerzo efectivo lateral de consolidación. Para lograr esto, es necesario mantener aplicada una contrapresión constante e incrementar la presión en la cámara hasta que la diferencia entre estas sea igual a la presión de consolidación deseada (ASTM, 2013). El siguiente paso luego de realizada la consolidación isotrópica se somete la muestra a una carga axial sinusoidal; esto genera una deformación y cambios en la presión de poros los cuales son

registrados por los transductores de presión de poros y de deformación vertical. La falla en este ensayo es considerada al momento en el que el exceso de presión de poros se iguala a la presión de confinamiento inicial, queriendo decir esto que los esfuerzos efectivos han disminuido tanto que se acercan a cero; para dicha condición puede considerarse que la licuación se ha presentado.



Figura 4. Muestra sometida a vacío luego de la extracción de los moldes. Fuente: (Torsten Wichtmann, 2005)

CAPÍTULO III

MODELO CONSTITUTIVO DEL SUELO

En la literatura se dispone de diferentes modelos constitutivos cuya función es simular el comportamiento dinámico de los suelos en términos de su relación esfuerzo-deformación. Entre estos modelos podemos mencionar los desarrollados por Elgamal y Parra (2003), Taiebat, Y.F. Dafalias (2008), Fuentes y Triantafyllidis (2015), Boulanger y Ziotopoulou (2015). Para este estudio se emplea el modelo PDMY (Pressuredependentmultiyield), el cual es un modelo elasto-plástico con múltiples superficies de fluencia, dependiente de presión, el cual puede simular la respuesta del suelo ante diversos escenarios de carga (Yang, Lu, & Elgamal, 2008). Dicho modelo ha sido probado de manera satisfactoria en casos como monopilotes, evaluación del potencial de licuación, comportamiento de muro muros de contención, entre otros (Chen, 2010; Ismael & Lombardi, 2019; Patra & Haldar, 2018).

El modelo utiliza una colección de múltiples superficies de fluencia las cuales tienen una geometría cónica en el espacio de esfuerzos principales; en este espacio, el eje hidrostático coincide con el centro de todas las superficies de fluencia (Figura 5). Se asume que el comportamiento del material en la parte elástica es lineal e isotrópico. La regla de endurecimiento para obtener la respuesta histerética característica de un suelo de acuerdo a las reglas de Masing (1926), está basada en una versión modificada de la regla de endurecimiento de Mroz (1979), que indica que la superficie de fluencia se traslada en el espacio de esfuerzos

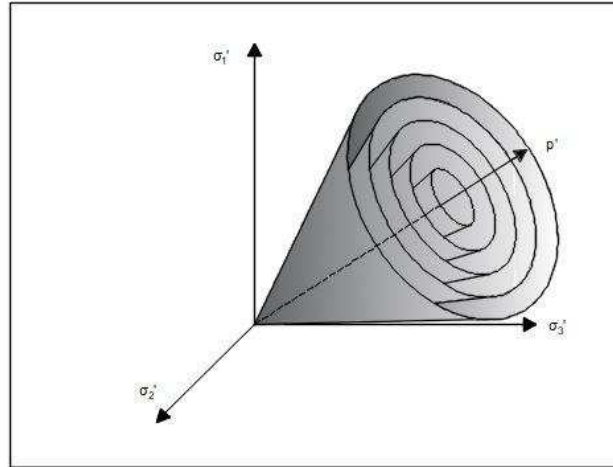


Figura 5. Visualización superficies de fluencia del modelo. Fuente: (Yang, Elgamal, & Parra, 2003)

3.1. Esfuerzo – deformación

La curva inicial que define la relación esfuerzo-deformación (o curva “backbone”) está basada en la función propuesta por Kondner, la cual describe un comportamiento hiperbólico (Kondner, 1963). La función hiperbólica es bastante simple si se consideran otros modelos más complejos como la función logarítmica o la función propuesta por Ramberg-Osgood (Puzrin, 2012), pero esta se ajusta bien al comportamiento de un modelo no lineal a pequeñas deformaciones como es este caso. La función está dada por la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{G_{max}\gamma}{1 + \gamma/\gamma_{ref}} \quad (1)$$

en donde τ representa el esfuerzo cortante, γ la deformación cortante, G_{max} es el módulo cortante a pequeñas deformaciones a una presión de confinamiento efectiva media p'_r , el cual se puede visualizar en la Figura 6 como el módulo referente a esa pequeña deformación que se genera al comenzar a aplicar un esfuerzo distinguible por tener una pendiente mayor en el primer tramo de

la curva, $\gamma_{ref} = \frac{\tau_{max}}{G_{max}}$ es la deformación cortante de referencia a una presión de confinamiento efectiva p'_r . Entonces τ_{max} es la máxima fuerza de corte a p'_r , cuando la deformación γ se acerca a infinito, para lograr alcanzar dicho esfuerzo a una deformación finita se le realizó a la curva hiperbólica una finalización tal que $\tau_f < \tau_{max}$, (Figura 6) se puede expresar en términos del ángulo de fricción del suelo, y se representaría con la siguiente ecuación:

$$\tau_{max} = G_{max}\gamma_{ref} = \frac{2\sqrt{2}\sin\phi}{3-\sin\phi} p'_r \quad (2)$$

El modelo define una constante positiva la cual define la variación de G como una función de la presión de confinamiento efectiva p'_r ; esta constante es el coeficiente de dependencia de presión d y se relaciona con el modulo cortante por la expresión dada por $G_{max} = G_{ref}(p'/p'_r)^d$. Usualmente, se asume un valor de $d=0.5$ para arenas (Yang et al., 2008). El módulo volumétrico (“bulk modulus”, en inglés) aplicado en la configuración del suelo, B , está basado en la teoría elástica, relacionado con el módulo cortante G de la siguiente manera $B = 2G(1 + \nu)/(3 - 6\nu)$ donde ν es la relación de Poisson.

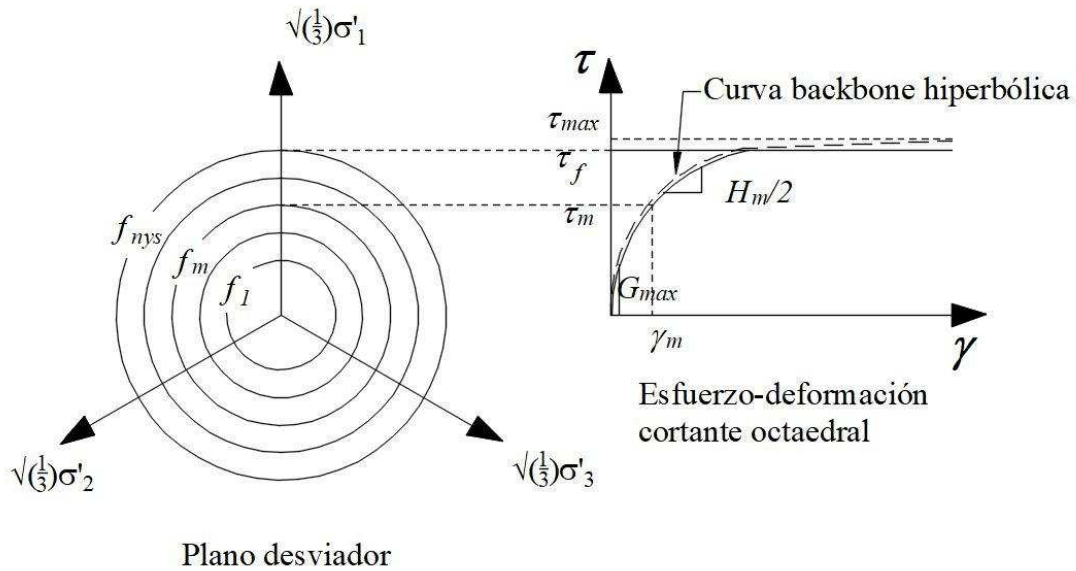


Figura 6. Curva hiperbólica backbone para un suelo no lineal, respuesta esfuerzo-deformación. Representación lineal por partes de la plasticidad en múltiples superficies (después de Prevost 1985 y Parra 1996). Fuente: (Yang et al., 2003)

3.2. Regla de flujo

Este modelo introduce una regla no asociativa para definir el flujo plástico de la componente volumétrica, y define la relación de la deformación plástica volumétrica con base en la superficie de la fase de transformación (PT), la cual actúa como una frontera en el plano p' -esfuerzo cortante a través de la cual se divide el comportamiento dilatante del comportamiento contractiva en el plano (Figura 7). La porción la parte inferior sería la región correspondiente al comportamiento contractivo del suelo (Tramo a-b), mientras que la región superior a la línea de transformación de

fase corresponde al comportamiento dilatante del suelo (Tramo b-c) en el proceso de carga. En la etapa de descarga (Tramo c-d) se aprecia un comportamiento contractivo del suelo.

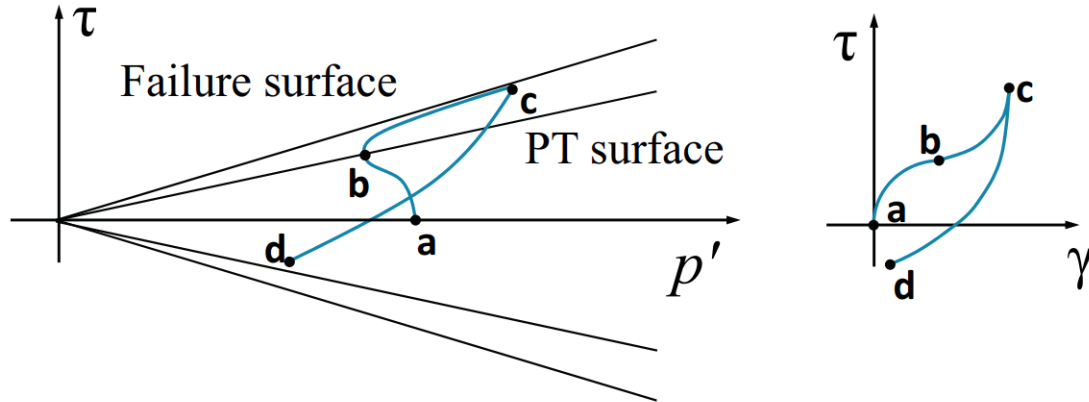


Figura 7. Esquema de la respuesta del modelo ante esfuerzo cortante no drenado. Fuente: (Mercado et al., 2019)

Según el trabajo realizado por Prevost (1985), la localización del estado de esfuerzo se puede inferir con la relación de esfuerzo η , el cual está dado por la siguiente $\eta = q/p'$, para la cual q es el esfuerzo de von Mises y p' es la presión media de confinamiento. Ahora bien, si se define la relación de esfuerzos a través de la fase de transformación PT como η_{PT} , entonces para toda relación de esfuerzos tal que $\eta < \eta_{PT}$ durante la carga no drenada se considerará dentro de la superficie de transformación de fase y presentará un comportamiento contractante. Por el contrario si $\eta > \eta_{PT}$ durante la carga no drenada esta se encontrará por fuera de la superficie de transformación de fase y exhibe un comportamiento dilatante. La expresión η_{PT} se puede expresar también en términos del ángulo de transformación de fase de la siguiente manera:

$$\eta_{PT} = \frac{6 \sin \varphi_{PT}}{3 - \sin \varphi_{PT}} \quad (3)$$

Entonces la regla de flujo para una tendencia contractiva se define como:

$$\frac{\dot{\varepsilon}_{vol}^p}{\dot{\varepsilon}_{eq}^p} = \frac{3}{2} \frac{(\eta/\eta_{PT})^2 - 1}{Q_{dev}(\eta/\eta_{PT})^2 + 1} c_1 \quad (4)$$

donde $\dot{\varepsilon}_{vol}^p$ y $\dot{\varepsilon}_{eq}^p$ son los incrementos volumétricos y desviador de deformación plástica respectivamente; se utilizan las definiciones de elasticidad donde $\dot{\varepsilon}_{vol}^p = tr(\dot{\varepsilon}^p)$ y también $\dot{\varepsilon}_{eq}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{dev}^p : \dot{\varepsilon}_{dev}^p}$ para lo cual $\dot{\varepsilon}_{dev}^p = \dot{\varepsilon}^p - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{vol}^p \delta$, donde δ es el símbolo delta de Kronecker, y Q_{dev} es una medida de la componente desviadora de la dirección normal a la superficie de fluencia (ver más detalles en la descripción realizada por Prevost (1985)). El parámetro c_1 representa la tendencia de contractividad del material y se presenta como una constante que permite el ajuste de la respuesta volumétrica.

Para el comportamiento dilatante en el proceso de carga no drenada la regla de flujo sería la siguiente:

$$\frac{\dot{\varepsilon}_{vol}^p}{\dot{\varepsilon}_{eq}^p} = \frac{3}{2} \frac{(\eta/\eta_{PT})^2 - 1}{Q_{dev}(\eta/\eta_{PT})^2 + 1} d_1 \quad (5)$$

donde $d_1 > 0$ y es una constante que controla el comportamiento dilatante del suelo.

3.3. Regla de endurecimiento

El actual modelo emplea una regla de endurecimiento cinemática puramente desviadora basado en los trabajos de Mróz (1967) y Prevost (1985), la cual genera una respuesta histerética tal y como se debe de esperar si el modelo pretende conservar las reglas de Masing.

En la Figura 8 se puede apreciar la superficie de fluencia f_m en el espacio de deformación desviadora; en la figura se aprecia la dirección de traslación con la cual la superficie será

trasladada. La configuración de las superficies de fluencia y las leyes que controlan su traslación son descritas en detalle por Yang et al. (2003).

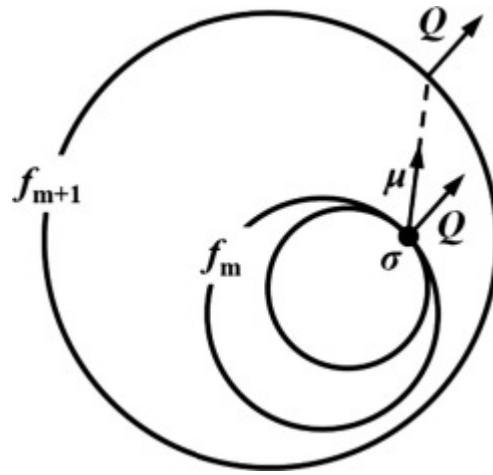


Figura 8. Esquema de la respuesta del modelo en la configuración del dominio de fluencia. Fuente: (Yang et al., 2003)

CAPÍTULO IV
INFERENCIA BAYESIANA

4.1. Inferencia Bayesiana.

La inferencia Bayesiana permite realizar una actualización a la distribución de probabilidad de un conjunto de parámetros inciertos θ dado un modelo M a partir de una respuesta medida D . La discrepancia (o error) entre lo observado y los resultados de la predicción del modelo se puede expresar de la siguiente manera:

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{D}_i - \mathbf{h}_i(\boldsymbol{\theta}|M) \quad (7)$$

en donde $\mathbf{h}_i(\boldsymbol{\theta}|M)$ es la respuesta modelada a través del modelo utilizando los parámetros $\boldsymbol{\theta}$, dado un modelo M , con $i=1, \dots, r$ en donde r es el número de puntos considerados para la medición de las respuestas observada y modelada. Por otra parte, se puede definir $p(\boldsymbol{\theta}|M)$ como “prior” o distribución de la probabilidad anterior de los parámetros $\boldsymbol{\theta}$ dado un modelo M ; esta distribución corresponde a la probabilidad de observar cada parámetro de acuerdo al conocimiento previo que se tiene de cada uno de ellos.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que para calcular la distribución de probabilidad posterior de los parámetros se usa el teorema de Bayes:

$$p(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D}, M) = \frac{p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta}, M)p(\boldsymbol{\theta}|M)}{p(\mathbf{D}|M)} \quad (8)$$

El término $p(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{D}, M)$, también conocido como “posterior”, indica la probabilidad de observar el conjunto de parámetros $\boldsymbol{\theta}$ dada las observaciones \mathbf{D} , para el modelo M . La distribución $p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta}, M)$ indica la función de verosimilitud (likelihood) de los datos \mathbf{D} dados $\boldsymbol{\theta}$ para el modelo M . Asumiendo una distribución normal para el error o discrepancia entre la respuesta observada \mathbf{D} y la modelada \mathbf{h} , la función de verosimilitud se puede expresar de la siguiente manera:

$$p(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta}, M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} e^{-\frac{|\mathbf{D}-\mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}|M)|^2}{2\sigma_e^2}} \quad (8)$$

Esta función corresponde a una distribución normal en donde σ_e es la desviación estándar entre la respuesta observada y la modelada.

En el caso específico de análisis que concierne a este trabajo, el vector θ está dado por un conjunto de parámetros que definen el modelo constitutivo, además de la desviación estándar del modelo, σ_e , de tal manera que $\theta = [\varphi \ G_{ref} \ \nu \ c_1 \ d \ \sigma_e]$. La inclusión de σ_e dentro del conjunto de parámetros a actualizar se hace necesaria ya que, en principio, el valor de σ_e es desconocido y varía en función del resto de parámetros del modelo.

La respuesta observada dentro del problema de interés corresponde a $\mathbf{D}_i = [\frac{(\varepsilon_v)_i}{(\varepsilon_v)_{max}}, \frac{(u)_i}{(u)_{max}}]$, donde $(\varepsilon_v)_i$ es la deformación vertical y $(u)_i$ es el exceso de presión de poros medidos en el tiempo t_i del ensayo triaxial, y $(\varepsilon_v)_{max}$ y $(u)_{max}$ son los máximos valores medidos para la deformación vertical y el exceso de presión de poros respectivamente. Por otra parte, la respuesta modelada es $\mathbf{h}_i(\theta|M) = [\frac{(\varepsilon_v^m)_i}{(\varepsilon_v^m)_{max}}, \frac{(u^m)_i}{(u^m)_{max}}]$, donde $(\varepsilon_v^m)_i$ es la deformación vertical y $(u^m)_i$ es el exceso de presión de poros medidos en el tiempo t_i estimados mediante la modelación para un conjunto de parámetros θ , y $(\varepsilon_v^m)_{max}$ y $(u^m)_{max}$ son los máximos valores registrados en los datos obtenidos de la modelación numérica para la deformación vertical y el exceso de presión de poros respectivamente.

Dado que la distribución $p(\mathbf{D}|\theta, M)$ es desconocida, se utilizará una técnica de muestreo de distribuciones desconocidas basadas en proceso de muestreo estocástico a través de Cadenas de Markov. Una vez aproximada la distribución de $p(\mathbf{D}|\theta, M)$, se podrá establecer el conjunto de parámetros que ofrecen un valor máximo de la distribución de probabilidad (θ^{MAP}), siendo este conjunto de parámetros aquellos que cuentan con la máxima probabilidad de ajustar el modelo.

4.2. Algoritmo de muestreo Slice Sample

Existen diferentes métodos de muestreo y entre ellos se destacan los métodos basados en las cadenas de Markov (1906). El concepto detrás de estas cadenas fue introducido por el matemático ruso Andréi Markov en 1906, el cual en esencia plantea un proceso estocástico discreto mediante el cual la probabilidad de que ocurra un evento depende únicamente del último evento (Neil, 2003).

El método “slice sampling” tiene como propósito realizar el muestreo de la distribución de la discrepancia entre la respuesta modelada y la respuesta medida con respecto a los parámetros del modelo. La idea detrás de esta técnica de muestreo es generar muestras aleatorias de parámetros (θ). Cada uno de estos conjuntos de parámetros generará un valor de $p(\mathbf{D}|\theta, M)$ luego de la modelación de la respuesta. El algoritmo, mediante la implementación de un estándar de aceptación descarta las muestras con valores de $p(\mathbf{D}|\theta, M)$ que no cumplen con el estándar de aceptación, manteniendo las muestras que sí cumplen con el estándar. Eventualmente, la distribución de las muestras generadas convergerá con la distribución de la función $p(\mathbf{D}|\theta, M)$ (Neil, 2003).

La metodología utilizada por el algoritmo “slice sampling”, para muestrear valores de x bajo una cierta distribución $f(x)$ se puede resumir de la siguiente manera:

- a) Se escoge un cierto valor x_0 para el cual $f(x_0) > 0$.
- b) Se define de manera aleatoria un valor y el cual se encuentra entre 0 y $f(x_0)$ (ver Figura 10a).
- c) Se define una línea horizontal en la posición de y . Dicha línea definirá un “rebanada” (slice, en inglés) la cual corresponde a un intervalo del eje x para el cual el valor de $f(x)$ será mayor que y (ver Figura 10b).

- d) Se escoge un nuevo valor de x_1 dentro de la rebanada identificada (ver Figura 10c), y se repite el procedimiento.

A partir de este procedimiento se garantiza que las muestra tomadas tienen una densidad de probabilidad que esté por encima de y . De esta manera se espera que la distribución de las muestras converja a la correcta distribución de probabilidad luego de un número considerable de muestras. Los detalles del algoritmo son descritos por Neil (2003).

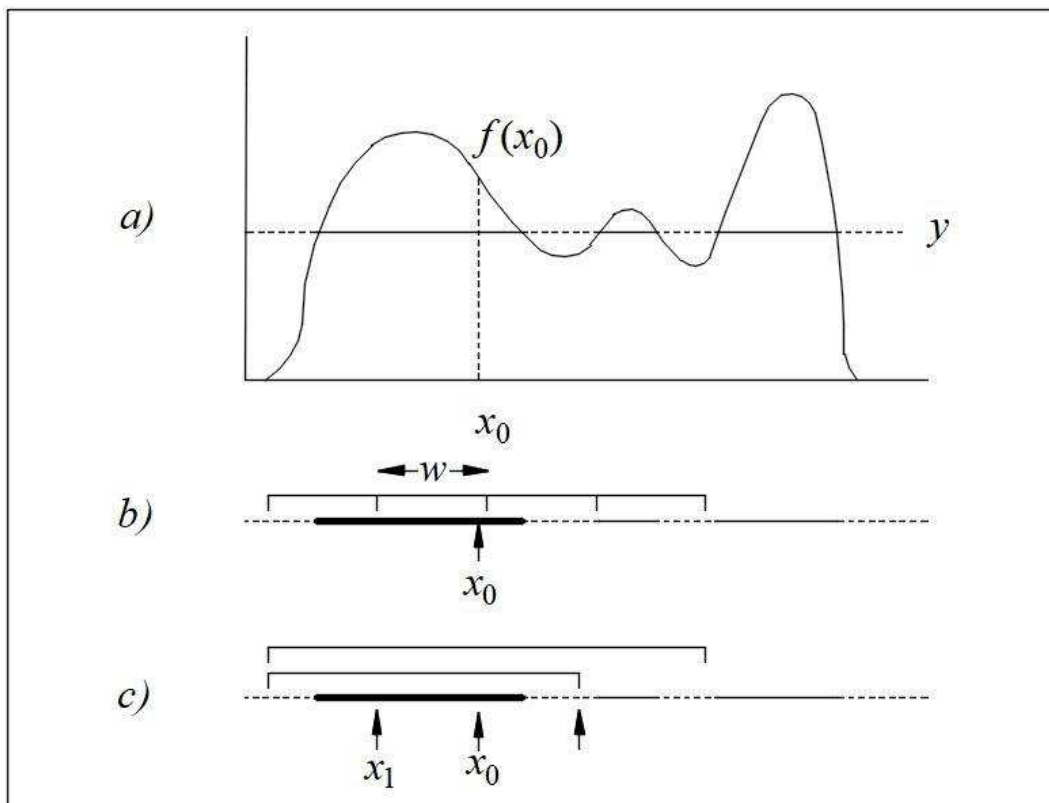


Figura 9. Procedimiento de muestreo para una sola variable utilizando Slice Sampling. Fuente:(Neil, 2003)

CAPÍTULO V
CALIBRACIÓN DEL MODELO

5.1.Descripción de los ensayos

Los ensayos triaxiales cíclicos isotrópicamente consolidados no drenados fueron realizados en el laboratorio de la Ruhr-University Bochum de Alemania, los ciclos fueron aplicados a un desplazamiento constante de 0.05mm/min y durante cada uno de los ensayos se cambiaba la dirección de la carga al llegar a una amplitud de carga o descarga, controlado por unos valores máximos y mínimos de esfuerzos desviadores. Unos tamaños de muestra no muy usuales en la práctica fueron empleados, cuyas dimensiones eran $d = 10 \text{ cm}$ y una altura $h = 20 \text{ cm}$, igualmente válidas para el tipo de ensayo que se realizó.

El ángulo de fricción de la arena en estado crítico fue obtenido mediante el análisis de ensayos triaxiales monotónicos drenados consolidados isotrópicamente, realizados también en la investigación de Wichtmann (2016). Los resultados de los ensayos triaxiales monotónicos drenados con $0.57 < I_{D0} < 0.68$ se pueden observar en la Figura 11, mediante los datos de estos ensayos se calculó el ángulo de fricción crítico empleando la fórmula que relaciona el ángulo de fricción φ_c con la pendiente de la línea de estado crítico M de la siguiente manera:

$$M = \frac{6 \sin(\varphi_c)}{3 - \sin(\varphi_c)} \quad (11)$$

Para la cual el ángulo de fricción crítico obtenido $\varphi_c = 31.2^\circ$, corresponde a lo registrado en los parámetros iniciales del documento anteriormente mencionado.

De la misma manera se realizó la curva granulométrica de la cual se obtuvo la clasificación de la arena usando el sistema unificado el suelo sería según la norma INV-E 181-13, la cual corresponde a una arena mal gradada (SP) (INVIAS, 2013), que era lo que el autor buscaba para los ensayos de laboratorio.

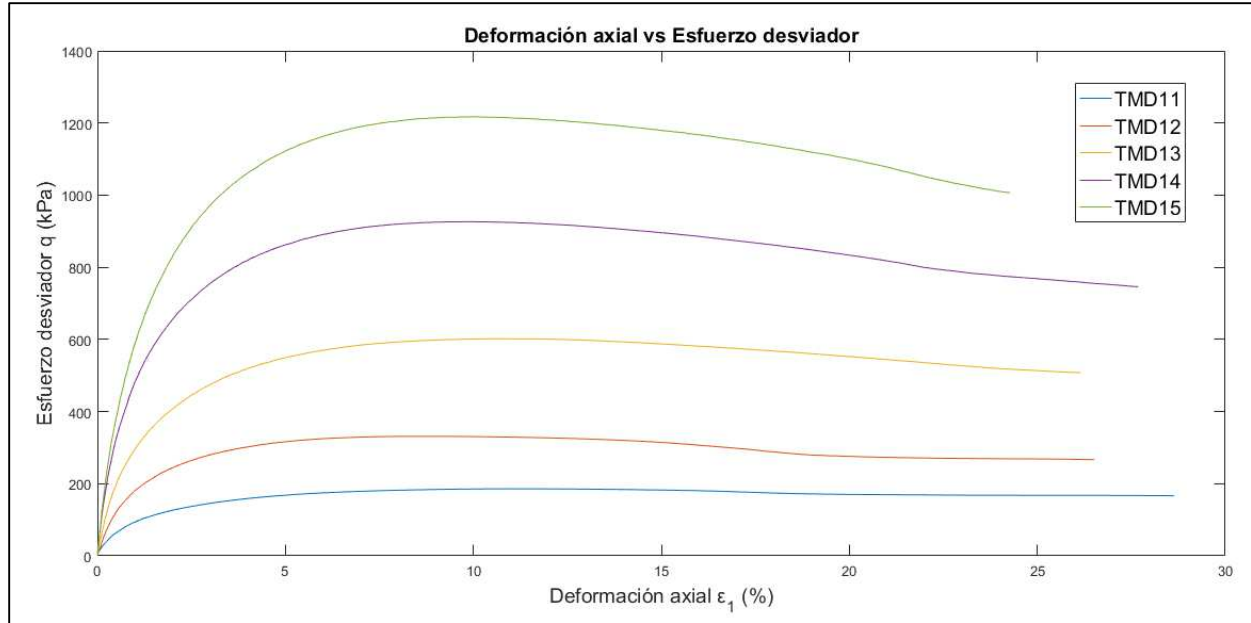


Figura 10. Deformación axial vs Esfuerzo desviador para los ensayos triaxiales monotónicos drenados.
Fuente: (Torsten Wichtmann, 2005)

El tipo de suelo utilizado en este trabajo fue determinado como una arena de cuarzo con granos subangulares por lo cual se asume un peso específico relativo de 2.65, típico para la arena de cuarzo (Das, 2006). Para el cálculo del módulo cortante inicial Wichtmann (2004) planteó y utilizó una fórmula, en la cual se relaciona el estado inicial del módulo cortante G_{max} con el esfuerzo de confinamiento σ'_0 , la presión atmosférica P_a y la relación de vacíos inicial e_0 , la cual fue pensada pretendiendo controlar la relación de vacío inicial y para lograr esto fue preparada la muestra por medio del método de vibración seca (ASTM, 2011). El módulo cortante según tipo de suelo utilizado por Wichtmann fue determinado de la siguiente manera:

$$G_{max} = A \frac{a-e}{1+e} P_a^{1-2n} p^{2n} \quad (12)$$

Para la cual los valores adicionales son constantes como el factor, constante para un suelo dado $A = 2.75$, el factor constante que representa una función de relación de vacíos $a = 1.46$ y el exponente

$n=0.21$. Mediante el uso de dicha fórmula se obtienen el valor inicial de $G_0 = 108355$ kPa para una presión de confinamiento inicial σ'_0 de 300 kPa, correspondiente al ensayo TCUI16, el resultado de este es mostrado en la Tabla 1. A partir de este valor se puede tener un valor de referencia para el cálculo del valor inicial del G_{max} , el cual se relacionan mediante un confinamiento efectivo de referencia, el confinamiento efectivo del ensayo, un módulo cortante inicial de referencia G_{ref} y un coeficiente dependiente de la presión de confinamiento instantánea d (el manual recomienda 0.5 para este coeficiente (Yang et al., 2008)) y estos se encuentran relacionados de la siguiente manera:

$$G_{max} = G_{ref} \left(\frac{p'}{p'_r} \right)^d \quad (13)$$

Esta relación se encuentra en la formulación numérica del material PDMY y trae como resultado los valores que se observan en la Tabla 1 tomando como módulo cortante de referencia G_{ref} el valor obtenido para las condiciones del ensayo TCUI16 según la fórmula 12 y se aprecia la variación del módulo cortante inicial en los valores obtenidos para los ensayos TCUI10 y TCUI13 los cuales se encuentran dentro de unos valores aceptables para el tipo de suelo.

Tabla 1. Módulo cortante inicial para las diferentes presiones de confinamiento efectivas de los ensayos según Wichtmann (2004).

Ensayo	TCUI 10	TCUI 13	TCUI 16
$G_{max} = G_{ref} \left(\frac{p'}{p'_r} \right)^d$	62559 kPa	88472 kPa	108355 kPa

5.2. Calibración de los parámetros

La intención es ajustar parámetros de un modelo constitutivo, de tal manera que el modelo sea capaz de describir el comportamiento del material modelado ante cargas cíclicas previo a que suceda el fenómeno de licuación; momento el cual varía en cada ensayo de laboratorio utilizado debido a las diferentes presiones de confinamiento utilizadas en cada uno de estos.

Mediante la aplicación de análisis Bayesiano a través del uso de una herramienta de muestreo como lo es “Slice Sample”, descrito en el capítulo 4 de esta tesis, se establecen parámetros θ_m para intentar replicar los resultados de los ensayos triaxiales isotrópicos consolidados no drenados descritos en el capítulo 2. Dichos ensayos de laboratorio arrojaron resultados de los cuales se tomaron el esfuerzo desviador, la deformación vertical y el exceso de presión del agua en los poros en su respectivo tiempo medido t_i . Todo esto es llevado a una formulación numérica de acuerdo al modelo constitutivo aplicado y que se describió en el capítulo 3 mediante modelación numérica con el programa Opensees. Se toman los datos anteriormente mencionados correspondientes a los ensayos triaxiales cíclicos y se establece un vector de respuestas $\mathbf{D}_i = \left[\frac{(\varepsilon_v)_i}{(\varepsilon_v)_{max}}, \frac{(u)_i}{(u)_{max}} \right]$.

Se busca entonces a través del algoritmo de muestreo, identificar un conjunto de parámetros $\theta = [\varphi \ G_{ref} \ \nu \ c_1 \ d \ \sigma_e]$ tal que minimicen la diferencia entre la respuesta observada en el espécimen ensayo de laboratorio (\mathbf{D}) y la respuesta modelada en el element test ($\mathbf{h}(\theta|M)$). Para cada uno de los parámetros del vector θ se establece una distribución de probabilidad anterior (prior) gaussiana con una media y una desviación estándar de la forma $N(\mu, \sigma)$. Las distribuciones utilizadas para la calibración de los parámetros según cada uno de los ensayos a modelar se presentan en la Tabla 2.

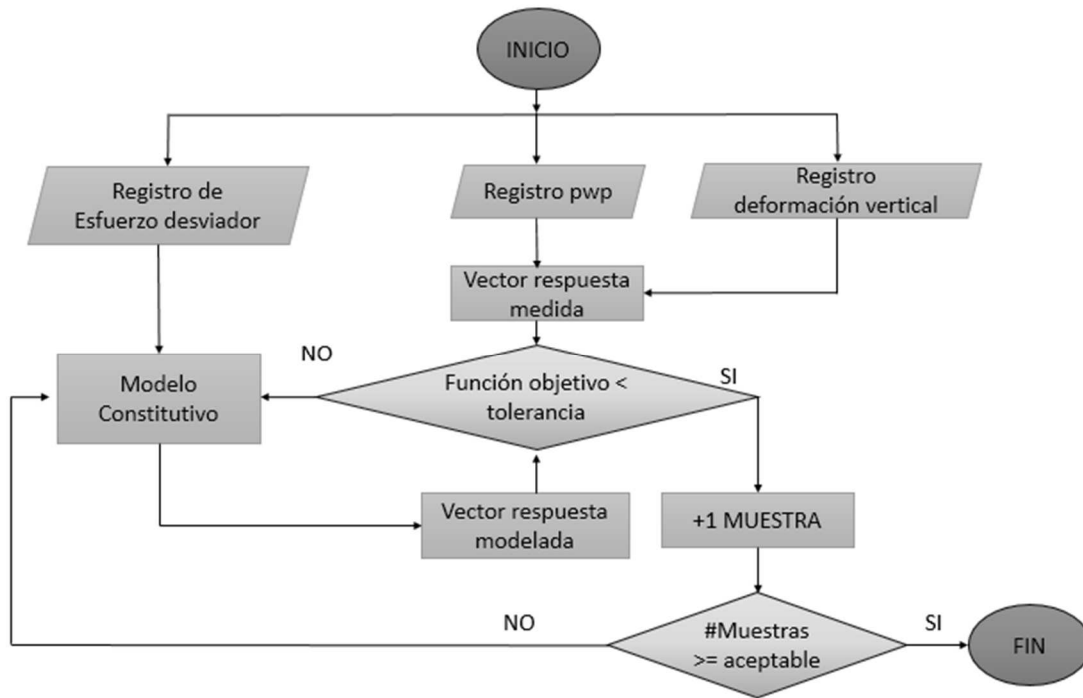


Figura 11. Esquematación del proceso de calibración.

En la figura 11 se establece el proceso de calibración de forma esquemática. Dicho esquema indica por ejemplo que el vector respuesta está compuesto por los registros de presión de agua en los poros y la deformación vertical de los ensayos de laboratorio descritos en 5.1. Al modelo constitutivo del suelo se le somete a los mismos valores de esfuerzo desviador registrados en dichos ensayos, esto con el fin de luego comparar la respuesta de la modelación matemática mediante la confrontación del vector respuesta modelada, compuesto por el registro de presión de agua en los poros y la deformación vertical producido por el modelo incorporado en Opensees (ver Apéndice A.2), con el vector respuesta medida. De acuerdo a la función objetivo se establece si la muestra satisface los criterios y si hará parte de las muestras de la cadena Markoviana producto del análisis bayesiano (ver Apéndice A.1).

Se tomaron 5000 muestras mediante el método de muestreo de rebanadas o “*slice sampling*” (Neil, 2003), y se realizó inicialmente un descarte de las primera 1000 muestras, descarte que constituye el proceso llamado “burning”; proceso que se lleva a cabo con el fin que las muestras a tomar tengan parámetros estables, lo cual no sucede en las primeras muestras y así lograr muestras más acordes a lo que se espera sea una buena aproximación.

Tabla 2. Distribuciones de probabilidad de los valores iniciales asumidos para los parámetros del modelo a ser estimados.

Parámetro	ϕ_c °	G_{ref} kPa	ν -	c_l -	d -	σ_e -
Prior TCUI 10	N(31.2,5)	N(108355,1500)	N(0.3,0.04)	N(0.05,0.03)	N(0.5,0.01)	N(0.15,0.03)
Prior TCUI 13	N(31.2,5)	N(108355,1500)	N(0.3,0.04)	N(0.05,0.03)	N(0.5,0.01)	N(0.15,0.03)
Prior TCUI 16	N(31.2,5)	N(108355,1500)	N(0.3,0.04)	N(0.05,0.03)	N(0.5,0.01)	N(0.15,0.03)

5.3. Análisis de los resultados

5.3.1. Análisis del ensayo TCUI10

A continuación se analizarán los resultados relacionados con el ensayo triaxial cíclico consolidado isotrópicamente no drenado TCUI10. Este cuenta con una presión de confinamiento efectiva inicial de aproximadamente 100 kPa. El propósito es simular el comportamiento de los datos de laboratorio aplicando la misma carga y descarga (30 kPa) para cada ciclo tomando lo aplicado en el laboratorio.

En la Figura 11 se muestra en la diagonal principal una serie de histogramas de frecuencia representan la distribución de las muestras generadas a partir de los criterios de selección de muestras adecuadas debido a la calibración. Los demás paneles dan una idea de la correlación que

existe entre cada uno de los parámetros respecto a los demás parámetros. Como primera observación se puede destacar la fuerte correlación negativa existente entre c_I y ν , la cual es esperada, debido a que ambos parámetros influyen en el comportamiento de la deformación volumétrica del material. Valores pequeños de c_I representa menor contracción volumétrica debido a la relación presentada en la ecuación (4), mientras que ν está relacionado con la deformación volumétrica mediante el módulo Bulk del suelo, para el cual, entre más grande es el valor de ν menor será el valor de B y para dicho caso se observaría una tendencia reducida en la contracción volumétrica. Entre los parámetros d y G_{ref} se detecta también una correlación positiva, no tan fuerte, pero apreciable, lo cual también se podría esperar, debido a la relación que tienen ambos en el comportamiento del módulo cortante del suelo, el cual fue establecido en la ecuación (13). También es de resaltar que el resultado esperado de σ_e corresponde con lo observado, ya que no muestra correlación alguna con los demás parámetros

Entre los parámetros G_{ref} y ν se alcanza a distinguir una débil correlación negativa la cual podría relacionarse con la formulación adoptada para calcular el módulo Bulk del suelo donde se muestra multiplicado a G , el cual depende de G_{ref} y a su vez también dividido por términos que dependen de ν . Para el caso del ensayo TCUI10 los demás parámetros no presentan una correlación observable. El resultado de σ_e concuerda de acuerdo a lo esperado, ya que no presenta correlación con los demás parámetros según los datos graficados en la Figura 12.

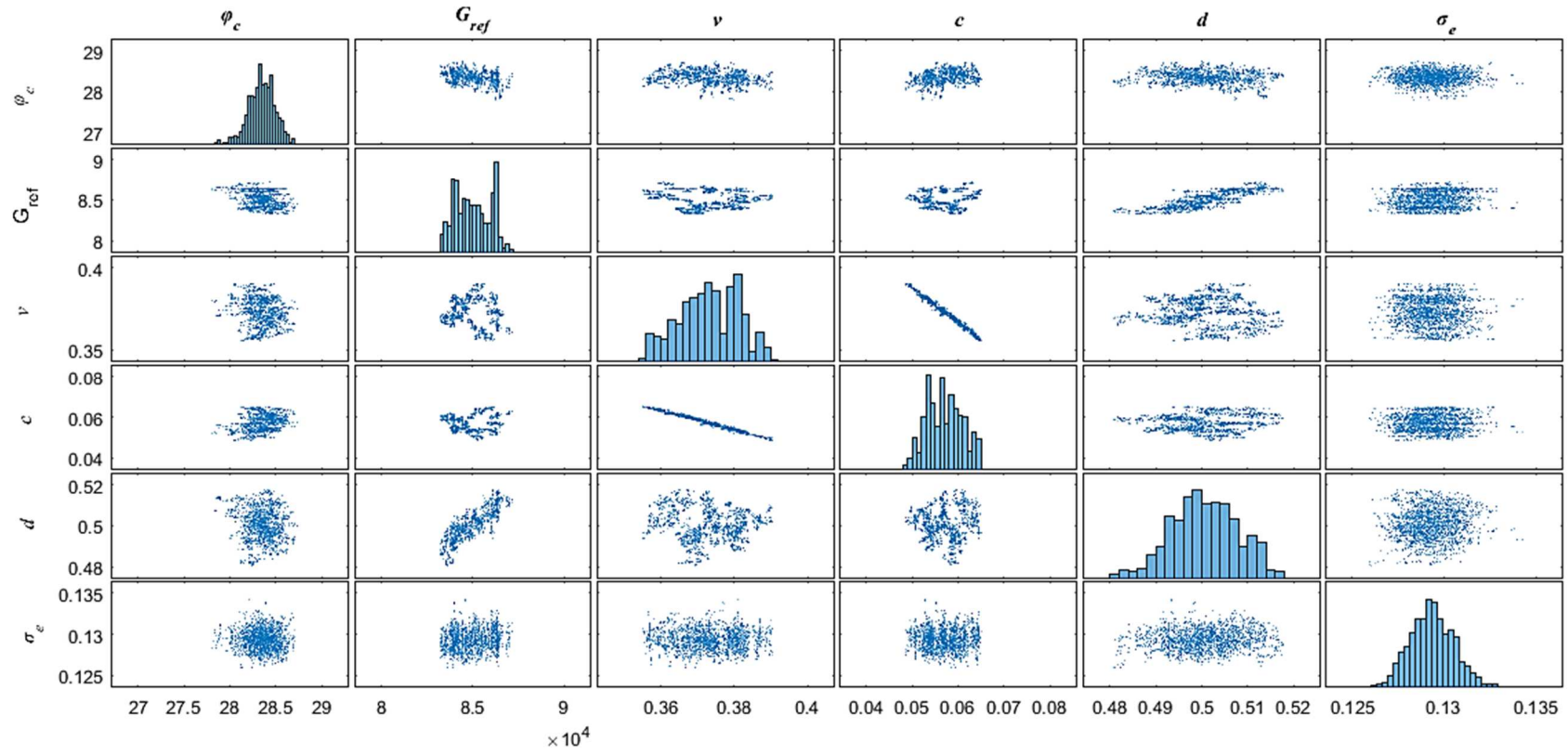


Figura 12. Resultado de la estimación de los parámetros mediante el uso de un modelo constitutivo de suelo usando los resultados del ensayo TCUI 10: En la diagonal principal se presentan histogramas de frecuencia y por fuera de esta se encuentran los valores posteriores.

Se evidencia una diferencia en la Figura 13 entre la distribución de las de los parámetros iniciales a calibrar identificables como líneas azules y la distribución de las muestras que se obtuvieron luego de la calibración de dichos parámetros (histogramas). Para el caso de los parámetros σ_e y d , los valores posteriores son similares a los iniciales, mientras que para los posteriores de los demás parámetros difieren de los iniciales. El parámetro que más se aleja e incluso se encuentra por fuera de la distribución inicial de probabilidad es G_{ref} , lo que indica que dicho parámetro fue alejándose de la inicial a través del proceso de calibración hasta llegar a las muestras representadas.

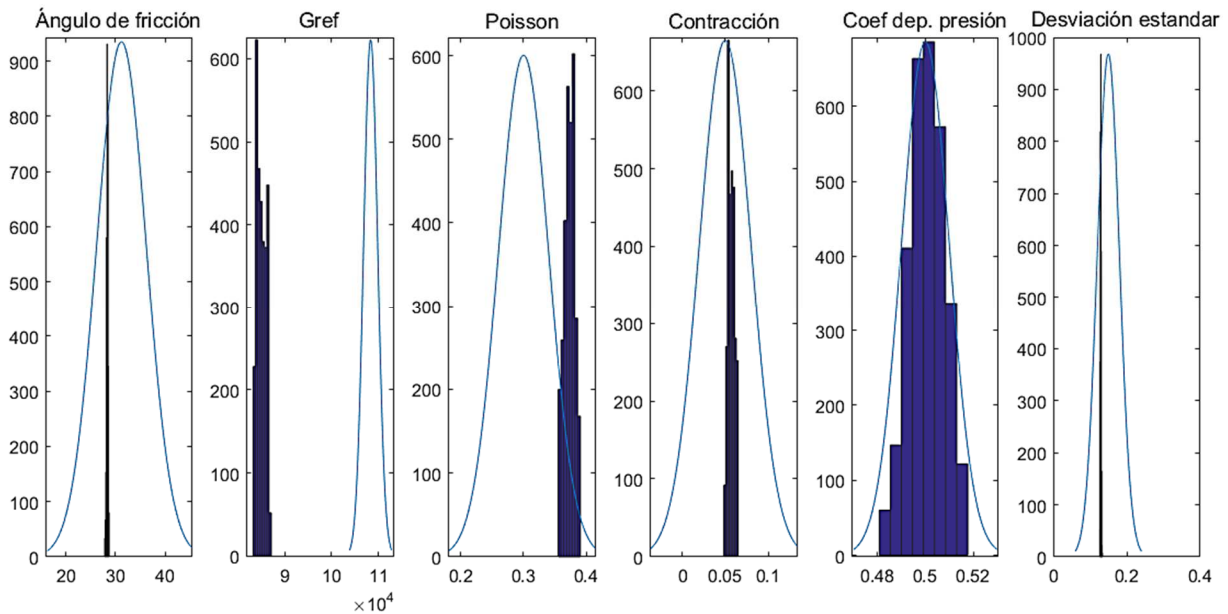


Figura 13. Distribución de los valores iniciales de los parámetros e histograma de frecuencia para los valores posteriores del ensayo TCUI10.

La Figura 14 muestra la respuesta del exceso de presión de poros con respecto al tiempo para el cual fueron tomados los datos del ensayo triaxial cíclico consolidado no drenado TCUI10 (color azul), así también se presenta los datos de salida producto del análisis numérico de 100 muestras simuladas y se grafica la media del dichos resultados (color rojo) y la desviación estándar

para estas mismas muestras (área de color amarillo). Las muestras utilizadas para esto fueron seleccionadas de entre las muestras presentes en las cadenas de Markov generadas por el análisis bayesiano.

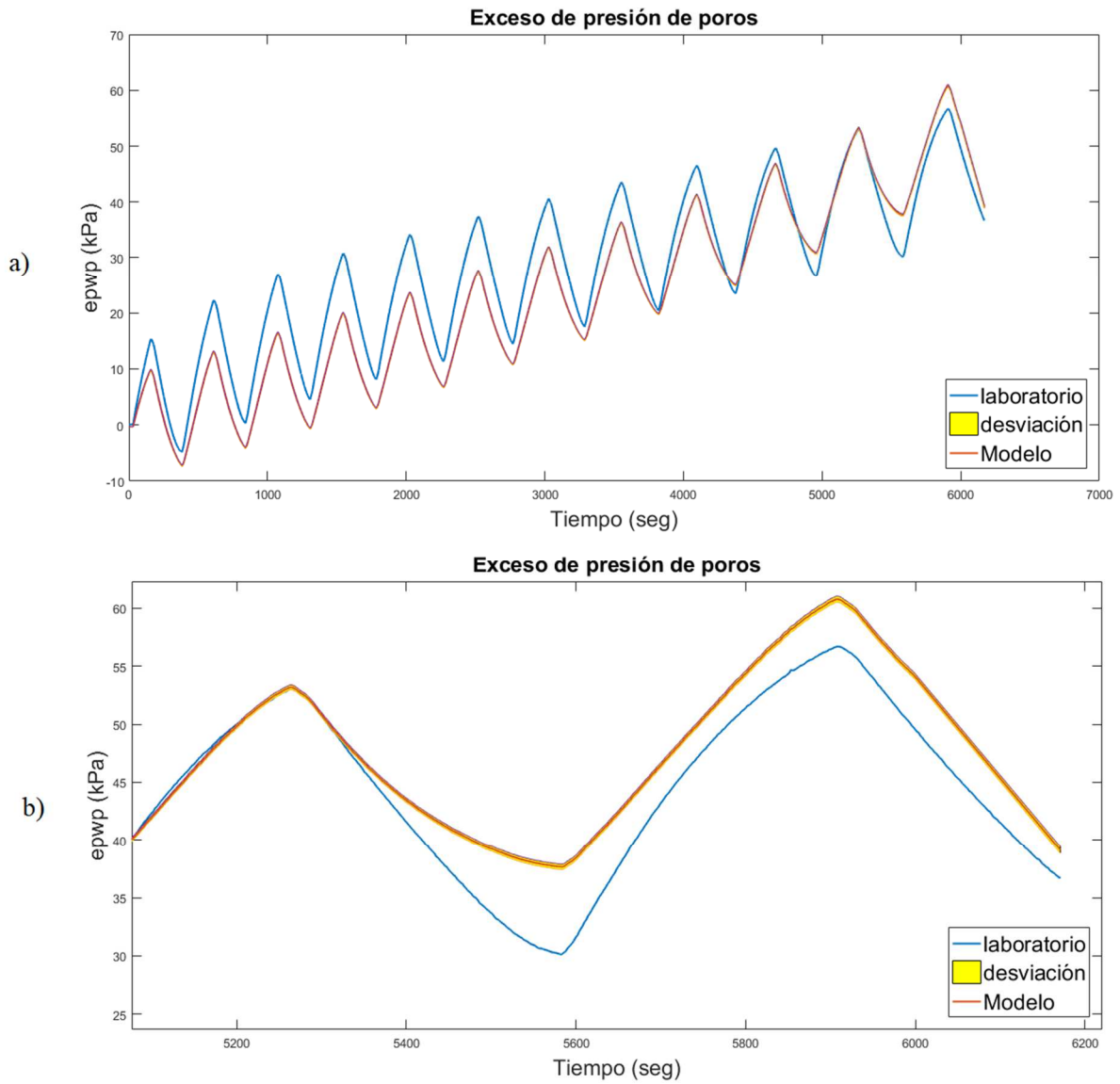


Figura 14. Exceso de presión de poros para datos de laboratorio TCUI10 y modelo. a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultado para la parte final de la simulación.

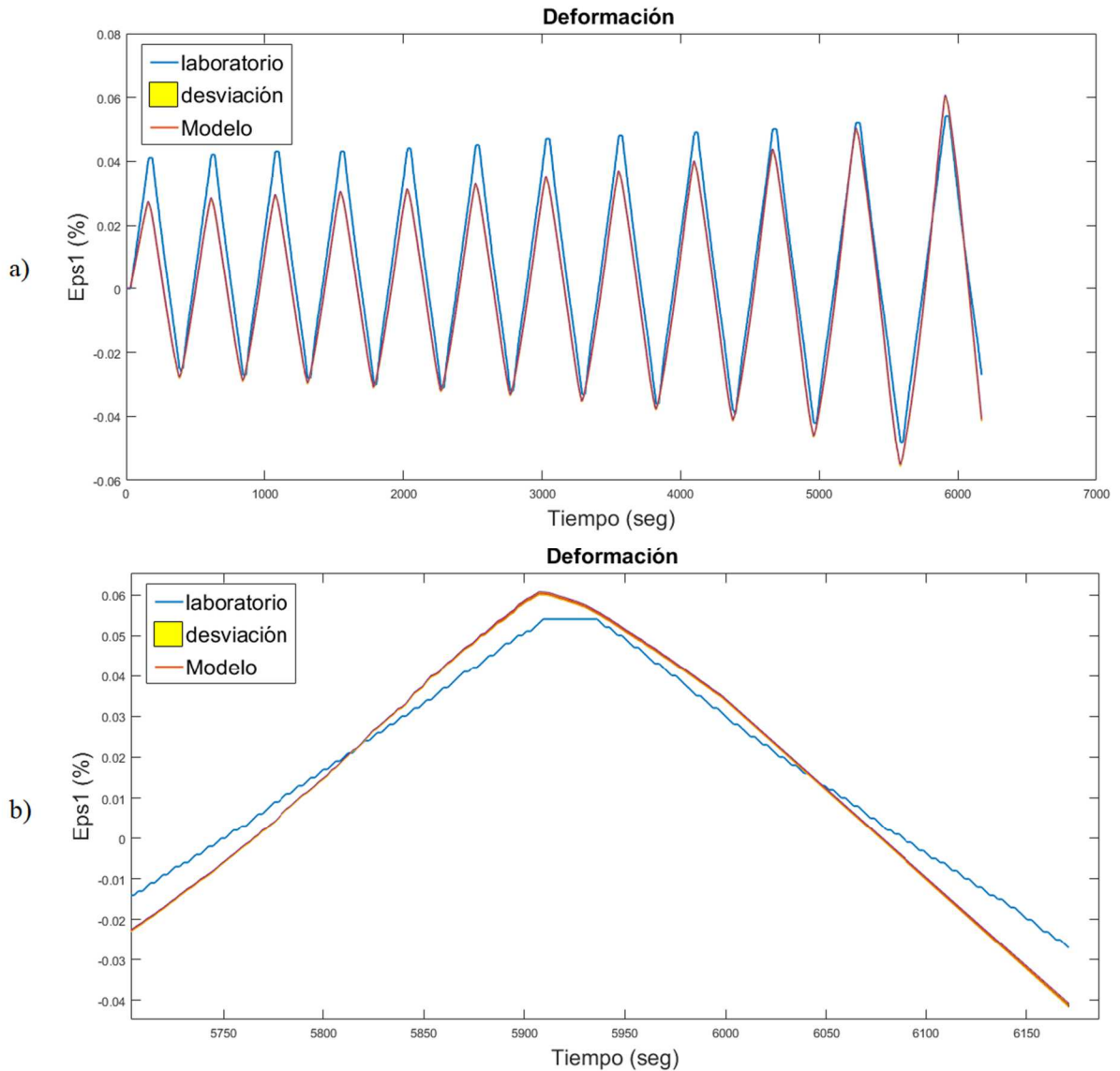


Figura 15. Deformación vertical para datos de laboratorio y modelo. a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultados para la parte final de la simulación.

Al realizar un análisis al comportamiento del exceso de presión de agua en los poros tanto de la respuesta de laboratorio junto con el promedio de las cien respuestas simuladas, se evidencia una buena aproximación y por lo tanto un buen ajuste de los parámetros de entrada si se evaluara solamente mediante este criterio, a simple vista no se aprecia la desviación entre ambos resultados por lo que se presenta en la parte b de la Figura 14 la parte final de los resultados.

En la Figura 15 se muestra el comportamiento de la deformación vertical con respecto al tiempo para la respuesta del ensayo de laboratorio (color azul), así también se muestra la media de la respuesta arrojada por el análisis computacional de cien muestras seleccionadas de manera aleatoria de las muestras que fueron determinadas como buenas en el proceso de muestreo (color rojo), así como la desviación estándar de estas cien muestras (área amarilla), se evidencia un comportamiento inicial de la deformación vertical con valores menores para el modelo respecto a los valores de laboratorio y solo al final del tiempo de simulación los valores de la deformación de esta son mayores a los del laboratorio. Este comportamiento se mantiene a lo largo de los ciclos de la simulación. La dispersión de los resultados de estas muestras seleccionadas es bastante baja y es notable incluso cuando se muestra solamente la última parte de los datos y aun no se visualiza el área correspondiente a la desviación estándar del modelo, incluso luego del acercamiento al último ciclo del ensayo (Figura 15b).

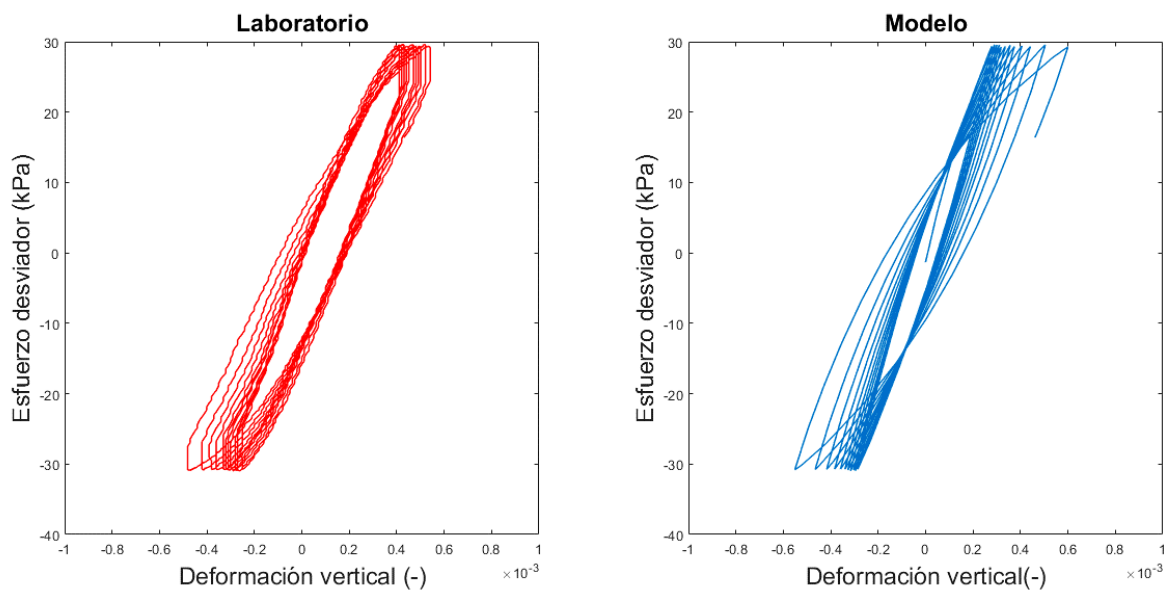


Figura 16. Ciclos de esfuerzo-deformación para (a) datos experimentales y (b) datos producto de la simulación del MAP para el ensayo TCUI10.

El comportamiento del suelo simulado se puede observar también mediante una gráfica de deformación vertical-esfuerzo desviador, como en la Figura 16 de la cual se observa que los datos de laboratorio (rojo) muestran un comportamiento bastante uniforme en los primeros ciclos. Una mayor deformación en estos primeros ciclos en los valores positivos de deformación cuando se compara con el resultado del análisis numérico del MAP (azul), pero en los últimos ciclos se aprecia mayor deformación vertical tanto positiva como negativa, indicando esto una mayor degradación del módulo cortante del suelo. Sin embargo es un buen acercamiento por parte del modelo a los resultados de laboratorio. El modelo logra captar y reproducir la tendencia contractiva. Tanto los datos de laboratorios como los del MAP presentan un comportamiento para este caso bastante simétrico y no se ve que haya afectado la no dependencia del ángulo de Lode en la reproducción del fenómeno (Elgamal, Yang, Parra, & Ragheb, 2003).

El análisis Bayesiano utilizado para realizar la calibración de los parámetros que se ajustaron al comportamiento observado en el laboratorio, ha arrojado unos valores que al comparar los resultados numéricos con aquellos de laboratorio para el ensayo TCUI10 parece satisfactorio en términos de reproducción del fenómeno. En cuanto a la calibración de los parámetros, los valores posteriores se encuentran cercanos a los iniciales para los parámetros calibrados a excepción del parámetro G_{ref} el cual se encuentra por debajo de los valores usuales para el tipo de suelos en las condiciones ensayadas (Figura 13). El análisis también evidencia la cuantificación de la incertidumbre asociada a cada parámetro del modelo utilizado.

5.3.2. Análisis del ensayo TCUI13

Se analizarán los resultados relacionados con el ensayo triaxial cíclico consolidado no drenado TCUI13. Este cuenta con una presión de confinamiento efectiva inicial de aproximadamente 200

kPa. El propósito es simular el comportamiento de los datos de laboratorio aplicando la misma carga y descarga (60 kPa) para cada ciclo tomando lo aplicado en el laboratorio.

En la Figura 17 se muestra en la diagonal principal una serie de histogramas de frecuencia, que representan la distribución de las muestras generadas a partir de los criterios de selección de muestras adecuadas debido a la calibración. Los demás paneles dan una idea de la correlación que existe entre cada uno de los parámetros respecto a los demás parámetros. Inicialmente se puede visualizar en la diagonal principal que los parámetros c_I y ν no muestran una tendencia que los asemeje a una distribución de probabilidad normal, como pasa en los demás parámetros de esta. Esto se asume que se debe a la fuerte correlación negativa que hay entre estos dos parámetros, la cual es esperada, debido a que ambos parámetros influyen en el comportamiento de la deformación volumétrica del material. La existencia de los dos picos en los histogramas correspondientes se debe a que para los valores de los parámetros en los cuales se observan picos, se presentan altos valores posteriores. La presencia de varios picos indica la falta de una solución única al problema de calibración, es decir, distintas combinaciones de parámetros (en este caso c_I y ν) tienen la misma probabilidad de ajustar la respuesta observada. El panel que relaciona a c con ν evidencia una alta colinealidad entre estos parámetros, lo cual confirma la imposibilidad de llegar a una respuesta única para la identificación de sus valores óptimos. Entre los parámetros d y G_{ref} se observa nuevamente una correlación positiva, no tan fuerte, pero apreciable. Este comportamiento se le puede adjudicar a la relación que tienen d y G_{ref} en el comportamiento del módulo cortante del suelo, anteriormente establecido en la ecuación (13) del capítulo 5. Nuevamente se presenta el resultado esperado de σ_e , ya que no muestra correlación alguna con los demás parámetros según la serie de datos que se muestran por fuera de la diagonal principal de la Figura 17.

En el caso del ensayo TCUI13 no se observa una correlación concluyente entre los parámetros G_{ref} y ν a diferencia de lo observado en el ensayo TCUI10. Los demás parámetros tampoco presentan una correlación observable. De la relación existente entre los parámetros correlacionados que se describieron anteriormente se puede decir que no trae consigo problemas en la capacidad de predicción del modelo siempre y cuando se mantenga la relación observada entre los valores de los parámetros correlacionados.

Se hace evidente la diferencia en la Figura 18 entre la distribución de los iniciales de los parámetros a calibrar identificables como líneas azules, y la distribución de muestras que se obtuvo luego de la calibración de estos (histogramas). En el caso de los parámetros ϕ_c y d los valores posteriores son similares a los iniciales, aun σ_e se mantiene dentro de un rango que se podría considerar aceptable respecto a la información inicial, mientras que los datos posteriores de los demás parámetros difieren de los datos tomados como valores iniciales. El parámetro que más se aleja e incluso se encuentra por fuera de la distribución inicial de probabilidad es nuevamente G_{ref} , aunque, para este ensayo poisson (ν) y contracción (c_I) también presentan datos por fuera de lo que se consideraría esperado.

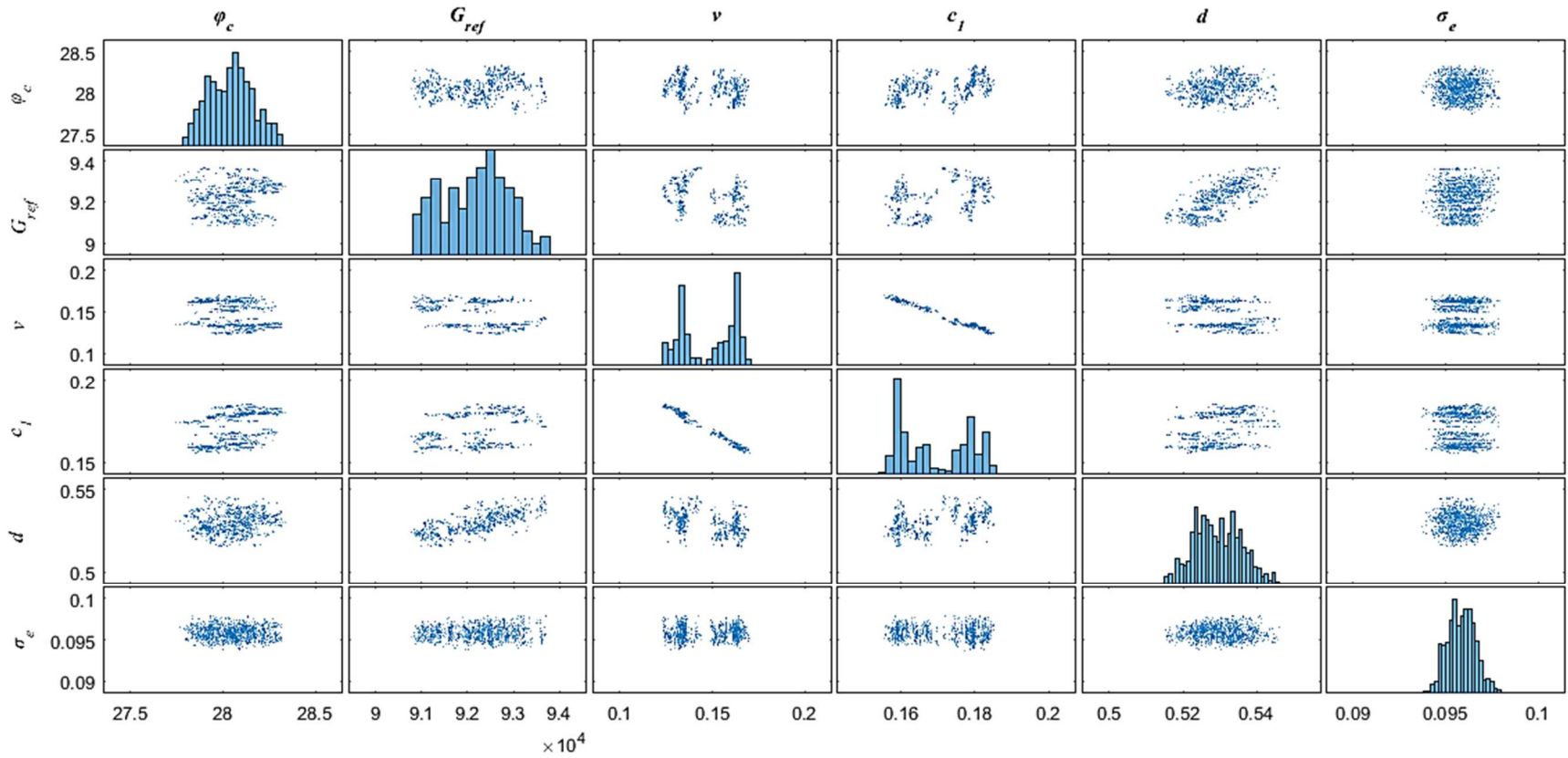


Figura 17. Resultado de la estimación de los parámetros mediante el uso de un modelo constitutivo de suelo usando los resultados del ensayo TCUI13: En la diagonal principal se presentan histogramas de frecuencia y por fuera de esta se encuentran los valores posteriores.

La calibración de los parámetros para este ensayo da una idea de algunas de las peculiaridades de estos métodos de calibración automáticos; ya que el análisis numérico utiliza el criterio que se le ha suministrado inicialmente para aproximar el modelo, pero la función a optimizar no necesariamente converge en parámetros que representen de manera correcta la física del problema, por lo cual muchas veces es necesario en el proceso inicial realizar algunas restricciones, para que la calibración no se aleje de los parámetros que ofrecen una mejor explicación de la física que gobierna el problema.

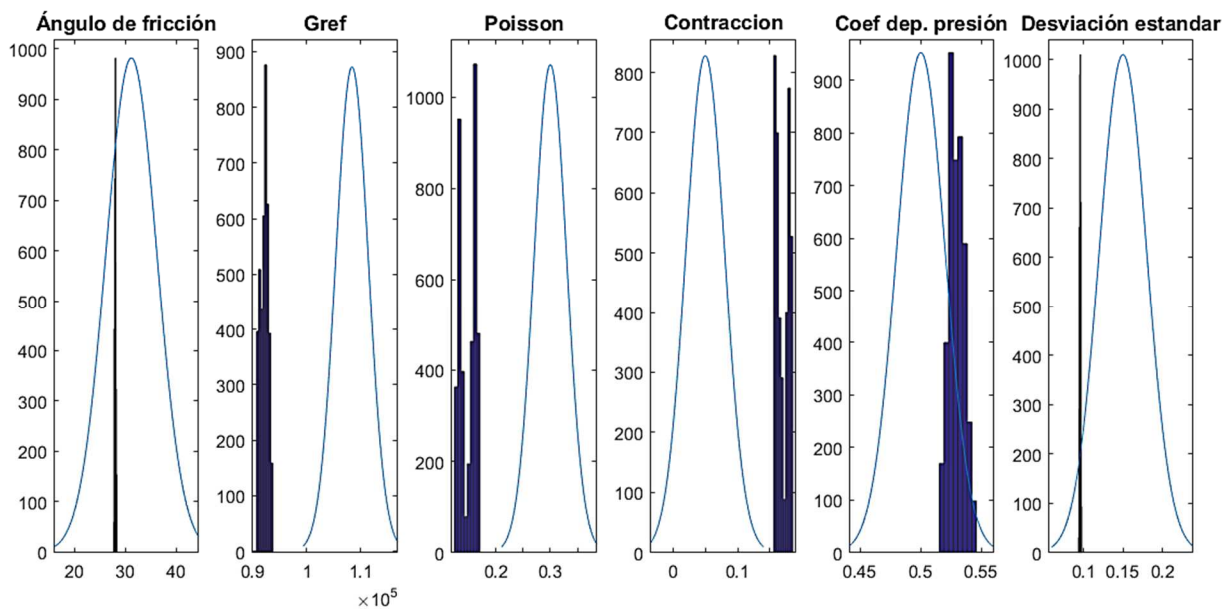


Figura 18. Distribución de las iniciales de los parámetros e histograma de frecuencia para los valores posteriores del ensayo TCUI13.

La Figura 19 muestra la respuesta del exceso de presión de poros con respecto al tiempo para el cual fueron tomados los datos del ensayo triaxial cíclico consolidado drenado TCUI13 (color azul); también presenta los datos de salida producto del análisis numérico de 100 muestras simuladas y se grafica la media del dichos resultados (color rojo) y la desviación estándar para estas mismas muestras (área de color amarillo).

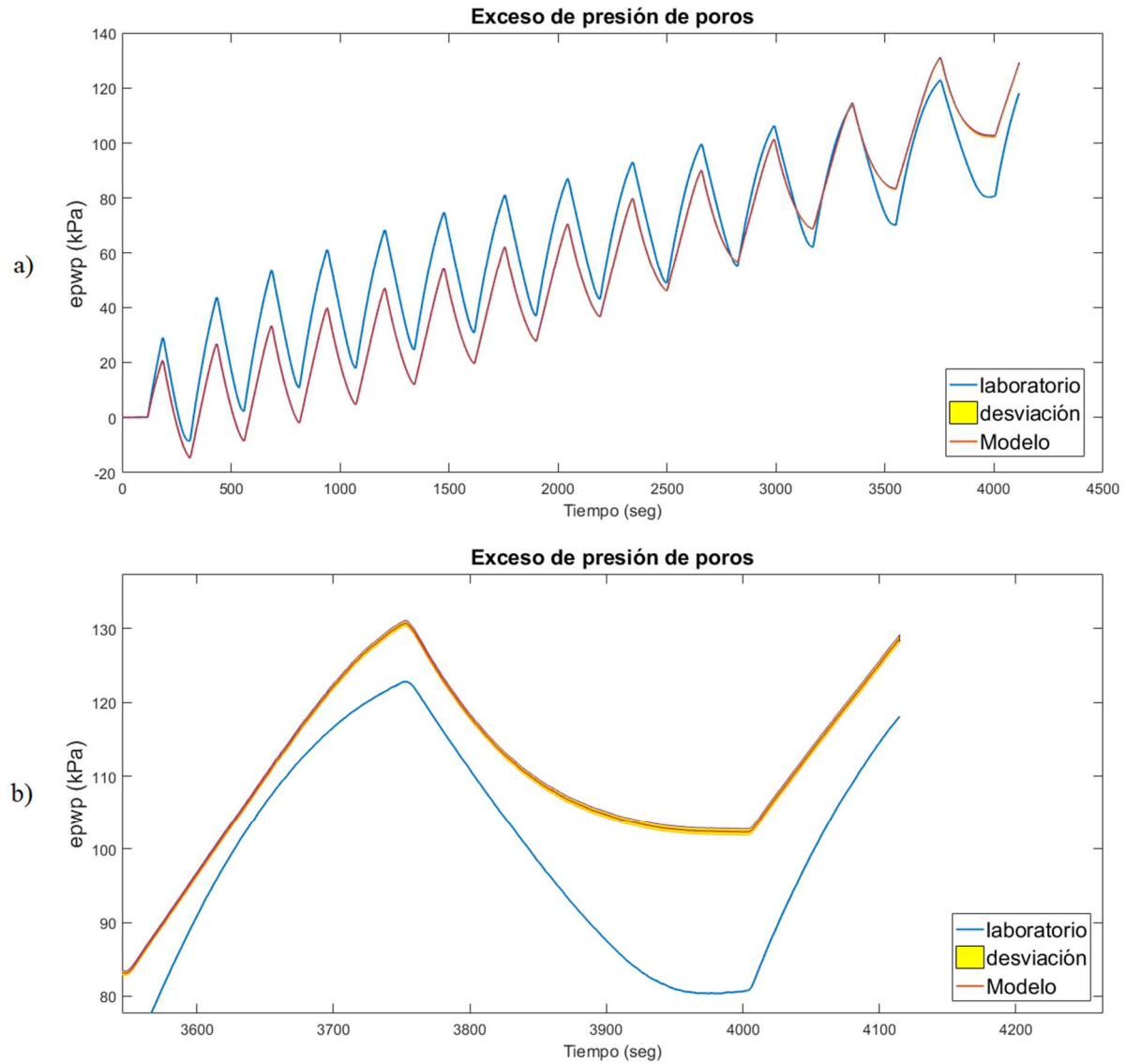


Figura 19. Exceso de presión de poros para datos de laboratorio y modelo TCUI13. a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultado para la parte final de la simulación.

Las muestras utilizadas para esto fueron seleccionadas de manera aleatoria de entre las muestras presentes en las cadenas de Markov generadas por el análisis bayesiano. Si se analiza el comportamiento del exceso de presión del agua en los poros para la respuesta de laboratorio junto con el promedio de las cien respuestas simuladas se evidencia una buena aproximación y por lo

tanto un buen ajuste de los parámetros teniendo en cuenta que para la calibración de los parámetros se valoraba la presión de poros y la deformación vertical.

Nuevamente a simple vista no se aprecia la desviación estándar de las muestras que fueron seleccionadas de manera aleatoria, por lo que se presenta en la parte b de la Figura 19 la parte final de los resultados. Se aprecia también la manera en la que se desarrolla con respecto al tiempo la presión del agua en los poros, la cual inicialmente se muestra menor para el modelo antes de los 3000 segundos, a partir de los 3500 segundos cambia esto y los resultados del modelo tienden a ser mayores. Esto indica que existe una discrepancia entre las capacidades del modelo para simular la generación de poros y el comportamiento real de los suelos observado en el laboratorio.

Por otro lado la Figura 20 presenta el comportamiento de la deformación vertical a través del tiempo para la respuesta del ensayo de laboratorio (color azul), así también se muestra la media de la respuesta arrojada por el análisis computacional de cien muestras seleccionadas de manera aleatoria, de las muestras que fueron determinadas como buenas en el proceso de muestreo (color rojo), así como la desviación estándar de estas cien muestras (área amarilla). Se evidencia un comportamiento inicial de la deformación vertical con valores menores para el modelo con respecto a los valores de laboratorio. Dicho comportamiento se mantiene a lo largo de todos los ciclos. La dispersión de los resultados de las muestras es baja y casi imperceptible en la escala usada para la parte a de la Figura 20; se hace necesario un acercamiento para apreciar la desviación de los resultados del modelo (Figura 20b).

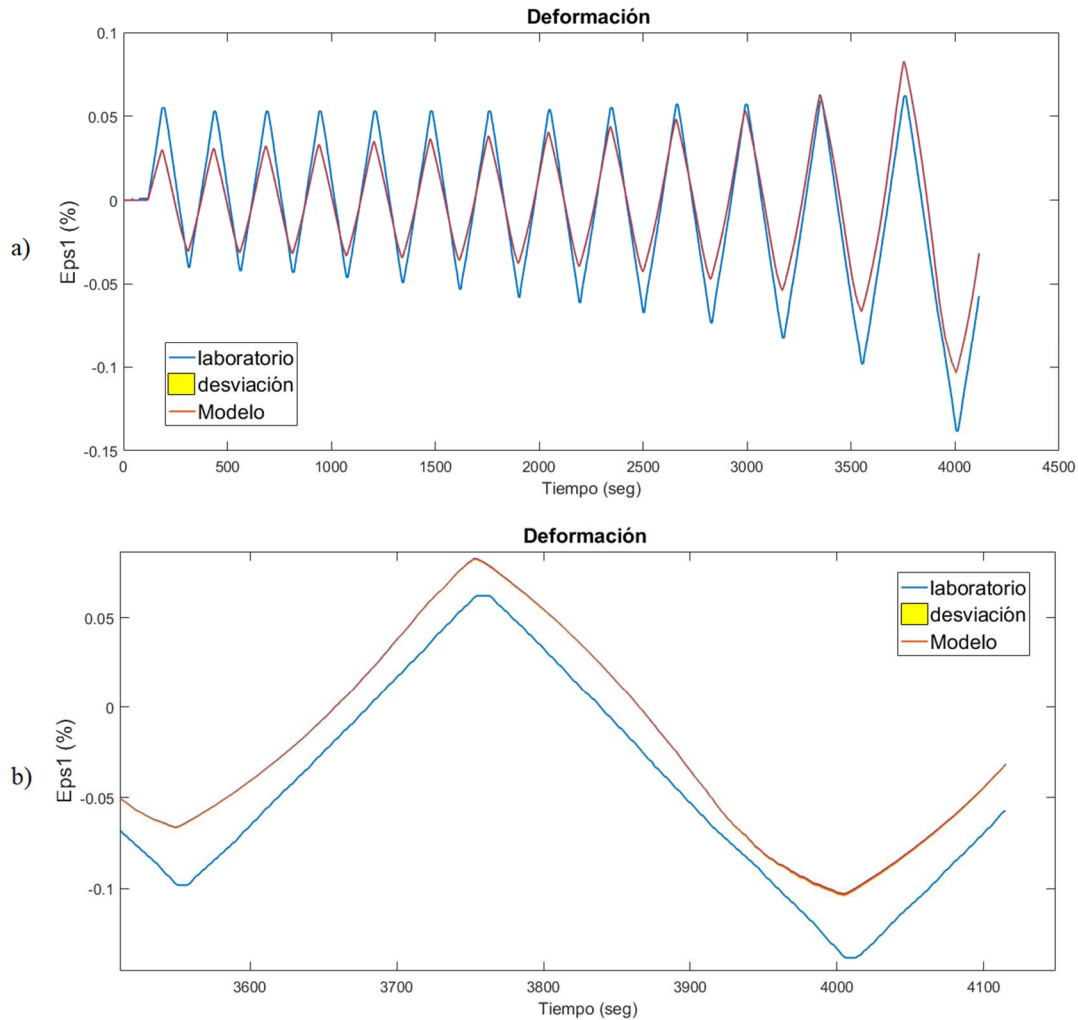


Figura 20. Deformación vertical para datos de laboratorio y modelo . a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultados para la parte final de la simulación.

Otra forma de ver el comportamiento del suelo simulado es mediante una gráfica de deformación vertical-esfuerzo desviador, como en la Figura 21, en la cual los datos de laboratorio (rojo) muestran un comportamiento bastante uniforme en los primeros ciclos de carga. En estos ciclos se aprecia que el rango de deformaciones entre carga y descarga permanece prácticamente dentro del mismo intervalo, mientras que durante las descargas se aprecia cada vez mayores deformaciones verticales hacia los últimos ciclos. Por otra parte, los resultados de la simulación

numérica utilizando parámetros del MAP (azul) muestran deformaciones inferiores para los ciclos iniciales (en comparación con los resultados de laboratorio). Hacia los ciclos finales, la simulación computacional del element test muestra un incremento de las deformaciones verticales; a diferencia del comportamiento del suelo registrado en el laboratorio, el modelo computacional ofrece una descripción simétrica del comportamiento del suelo en cuanto a la relación esfuerzo-deformación en ciclos de carga, con respecto a los ciclos de descarga. Esto es una limitación del modelo y se debe a que no considera los efectos del ángulo de Lode (Elgamal et al., 2003).

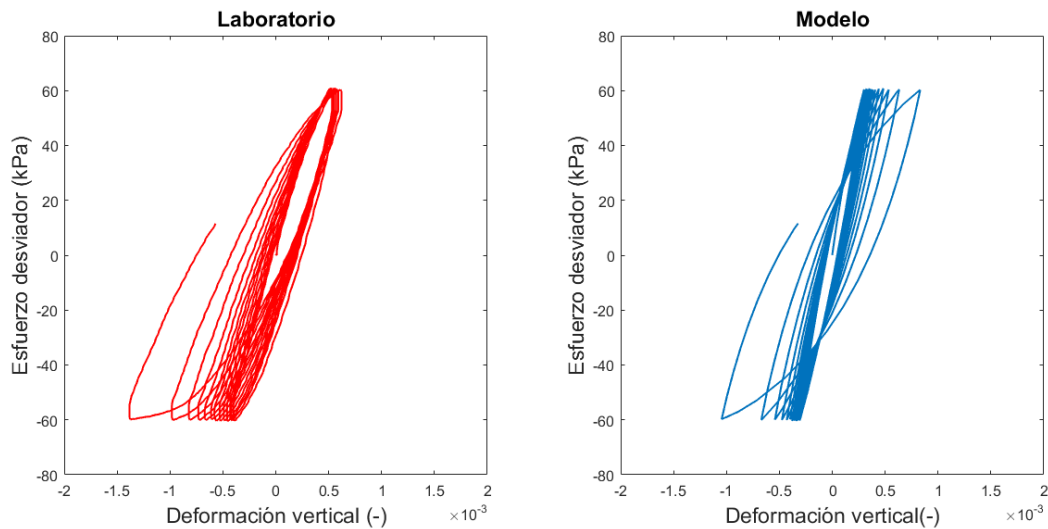


Figura 21. Ciclos de esfuerzo-deformación para (a) datos experimentales y (b) datos producto de la simulación del MAP para el ensayo TCUI13.

El análisis bayesiano utilizado para realizar la calibración de los parámetros que se ajustaran al comportamiento observado en el laboratorio ha arrojado unos valores que al comparar los resultados numéricos con aquellos de laboratorio para el ensayo TCUI13 parece satisfactorio en términos de reproducción del fenómeno. En cuanto a la calibración de los parámetros, se ven bastante alejados los valores posteriores de los iniciales para varios de los parámetros calibrados (Figura 18). El análisis también evidencia la cuantificación de la incertidumbre asociada a cada parámetro del modelo utilizado.

5.3.3. Análisis del ensayo TCUI16

Se analizarán los resultados relacionados con el ensayo triaxial cíclico consolidado no drenado TCUI16. Este cuenta con una presión de confinamiento efectiva inicial de aproximadamente 300 kPa. El propósito es simular el comportamiento de los datos de laboratorio aplicando la misma carga y descarga (90 kPa) para cada ciclo tomando lo aplicado en el laboratorio.

En la Figura 22 se muestra en la diagonal principal una serie de histogramas de frecuencia, que representan la distribución de las muestras generadas a partir de los criterios de selección de muestras adecuadas debido a la calibración. Los demás paneles dan una idea de la correlación que existe entre cada uno de los parámetros respecto a los demás parámetros. Existe una fuerte correlación negativa entre los parámetros c_1 y v , presente este mismo tipo de resultado para los ensayos TCUI10 Y TCUI13, la relación de estos parámetros es esperada debido a su influencia en el comportamiento de la deformación volumétrica del material. Valores pequeños de c_1 representarán una menor contracción volumétrica debido a la relación presentada en la ecuación (4) del capítulo 3, a su vez v mantiene también una relación con la deformación volumétrica mediante el módulo Bulk del suelo. Nuevamente entre los parámetros d y G_{ref} . Se detecta también una correlación, la cual es positiva, no tan fuerte y marcada como el caso de v y c_1 , pero apreciable y consistente en los tres ensayos. Este comportamiento se puede justificar si se analiza la relación que tienen ambos en el comportamiento del módulo cortante del suelo, el cual fue establecido en la ecuación (13). También es de resaltar que el resultado esperado de σ_e corresponde con lo observado, ya que no muestra correlación alguna con los demás parámetros según la serie de datos que se muestran por fuera de la diagonal principal de la Figura 22.

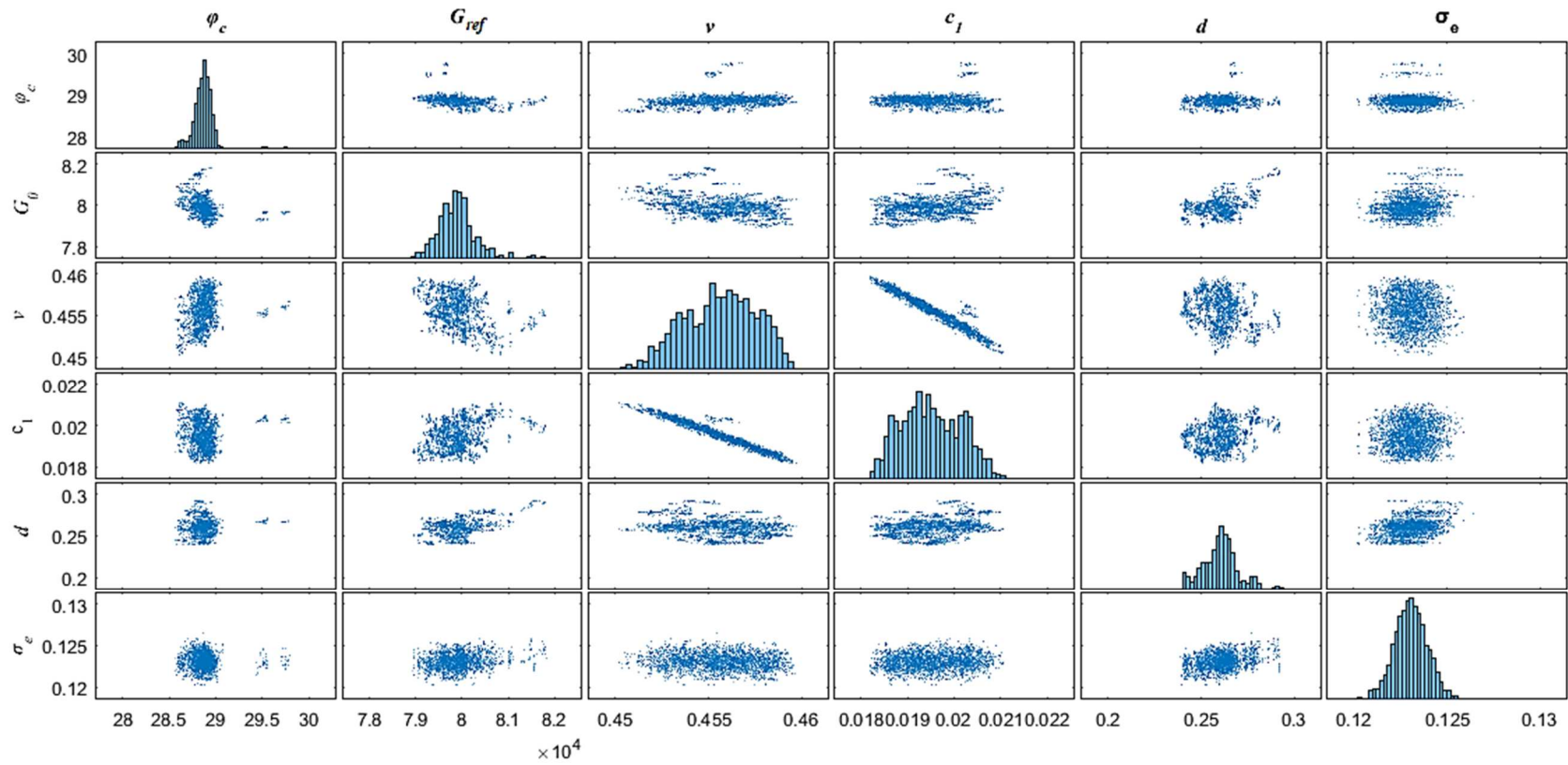


Figura 22. Resultado de la estimación de los parámetros mediante el uso de un modelo constitutivo de suelo usando los resultados del ensayo TCUI16: En la diagonal principal se presentan histogramas de frecuencia y por fuera de esta se encuentran los valores posteriores.

Para el ensayo TCUI16 se alcanza a visualizar entre los parámetros G_{ref} y ν una débil correlación negativa la cual puede estar relacionada con la formula usada en el modelo para el cálculo del módulo Bulk del suelo, donde se encuentra multiplicado el parámetro G el cual depende de G_{ref} y dividido por términos que dependen de ν . Para dicha relación entre los parámetros G_{ref} y ν no es lo suficientemente notable dicha correlación como para los casos de d y G_{ref} y entre ν y c_1 . Los demás parámetros no presentan una correlación observable. De la relación existente entre los parámetros correlacionados que se describieron anteriormente se puede decir que no trae consigo problemas en la capacidad de predicción del modelo siempre y cuando los parámetros realicen los incrementos y disminución de los valores en los parámetros.

Se puede evidenciar una diferencia en la Figura 23 entre la distribución de las previas de los parámetros a calibrar presentadas como líneas azules y las distribuciones de las muestras luego de la calibración (histogramas). En el caso del parámetro σ_e los valores posteriores son similares a los valores iniciales y en cierta medida ϕ_c también muestra un comportamiento de la distribución de las muestras semejante a los valores iniciales, mientras que los valores posteriores de los demás parámetros difieren de estas. El parámetro que más se aleja e incluso se encuentra por fuera de la distribución inicial de probabilidad continua siendo G_{ref} , pero, en este caso los valores para el ángulo de fricción están por debajo de los valores iniciales determinados mediante los ensayos mostrados en la Figura 10, de esta misma manera el valor de los valores iniciales de c_1 era alto y se ajustó a valores normales mediante la actualización de este parámetro, dejando en evidencia que la calibración se realizó en concordancia con el fenómeno físico. El parámetro ν presentó un aumento en los valores de las muestras hasta establecer unos valores cercanos al límite superior de los valores de ν . Esto, tal vez debido a la restricción impuesta al modelo respecto a ν , para impedir que el parámetro tomara valores fuera del sentido físico que gobierna el modelo.

La Figura 24 muestra la respuesta del exceso de presión del agua en los poros respecto al tiempo para el cual fueron tomados los datos del ensayo triaxial cíclico consolidado isotrópicamente no drenado TCUI16 (color azul): también se presenta en dicha Figura los datos de salida producto del análisis numérico de 100 muestras simuladas y se grafica la media del dichos resultados (color rojo) y la desviación estándar para estas mismas muestras (área de color amarillo). Las muestras utilizadas para esto fueron seleccionadas de manera aleatoria de entre las muestras presentes en las cadenas de Markov generadas por el análisis bayesiano. Si se analiza el comportamiento del exceso de presión del agua en los poros para la respuesta de laboratorio junto con el promedio de las cien respuestas simuladas se tiene una buena aproximación en cuanto a la reproducción del comportamiento del suelo ante las cargas impuestas.

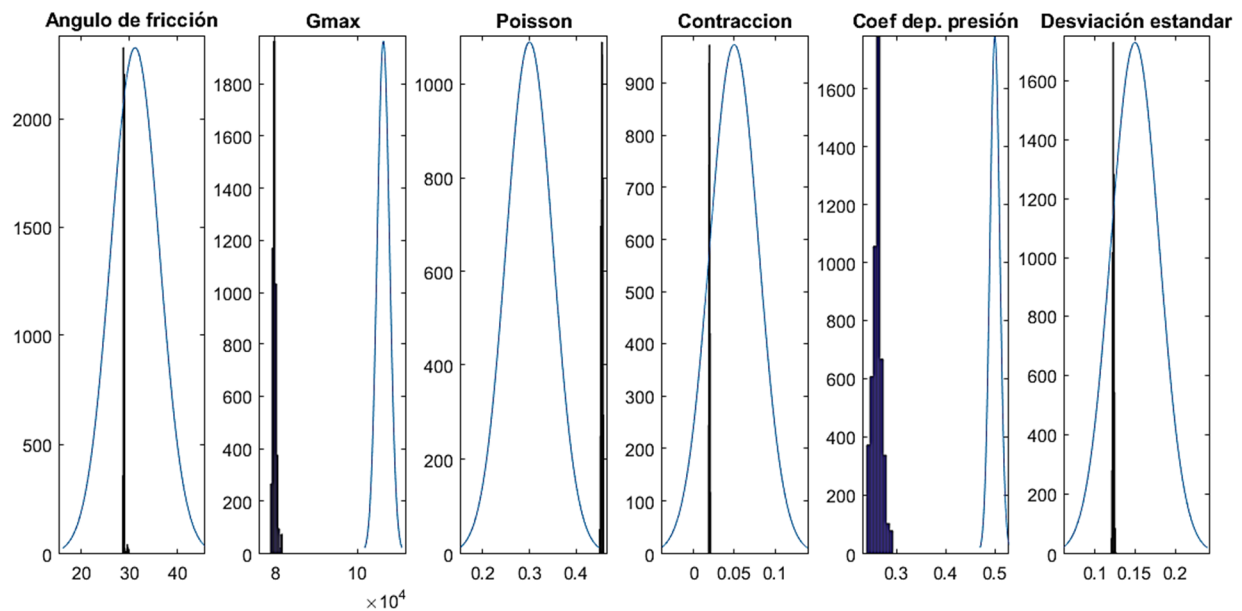


Figura 23. Distribución de los valores iniciales de los parámetros e histograma de frecuencia para los valores posteriores del ensayo TCUI16

A simple vista no se aprecia la representación de la desviación estándar de las muestras que fueron seleccionadas de manera aleatoria, por lo que se presenta un acercamiento a la parte

final de los resultados con el fin de ser identificable, esto es la parte b de la Figura 24. Inicialmente los valores de exceso de presión de poros para el modelo se muestran menores que los resultados de laboratorio, mientras que si se observa la parte final, llega a desarrollar mayores valores de presión de poros que en los datos de laboratorio.

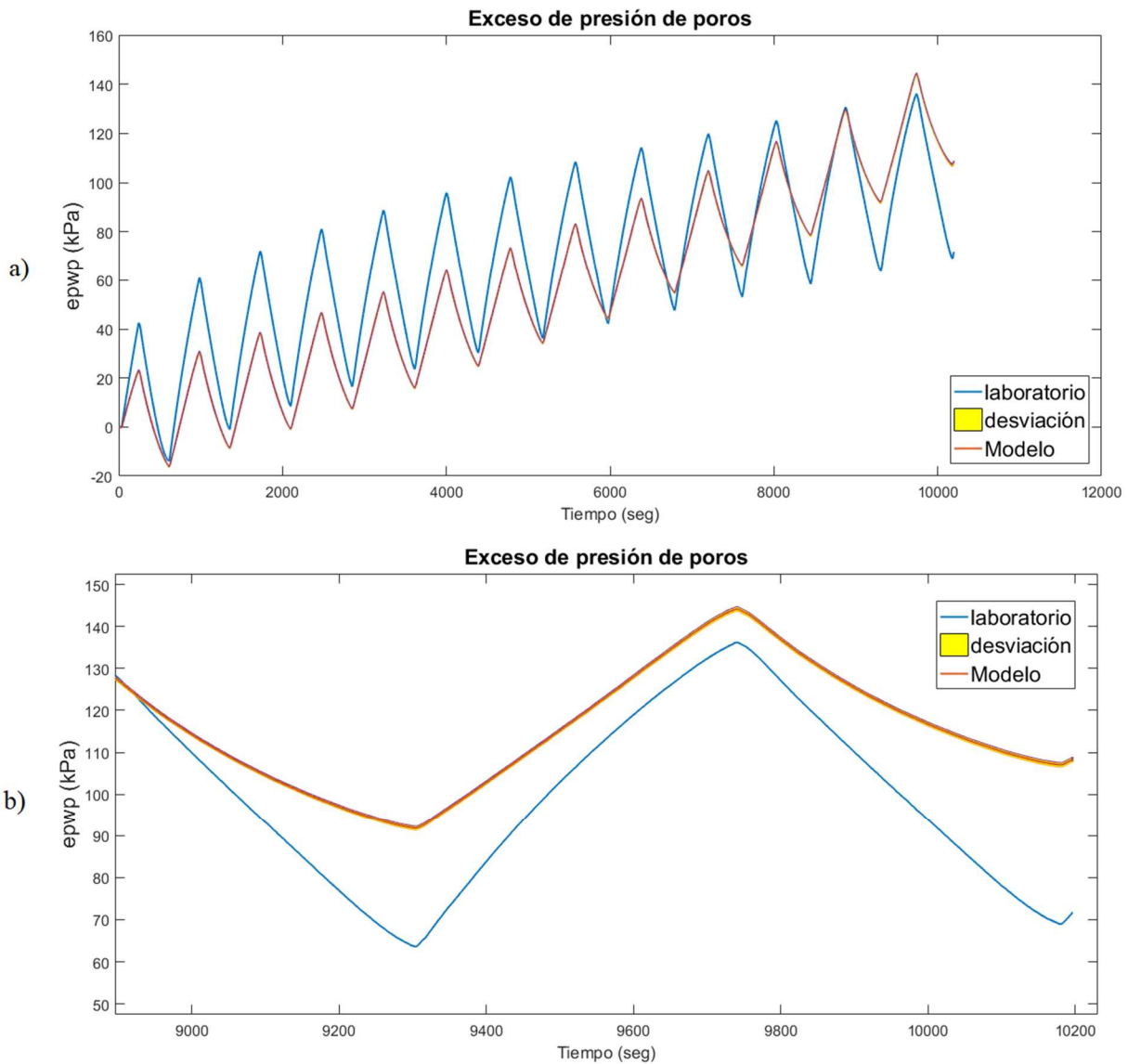


Figura 24. Exceso de presión de poros para datos de laboratorio y modelo TCUI16. a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultado para la parte final de la simulación.

Dicho cambio entre la parte inicial y la parte final de la simulación indica que existe una discrepancia entre las capacidades del modelo para simular la generación de poros y el comportamiento real de los suelos observados en el laboratorio.

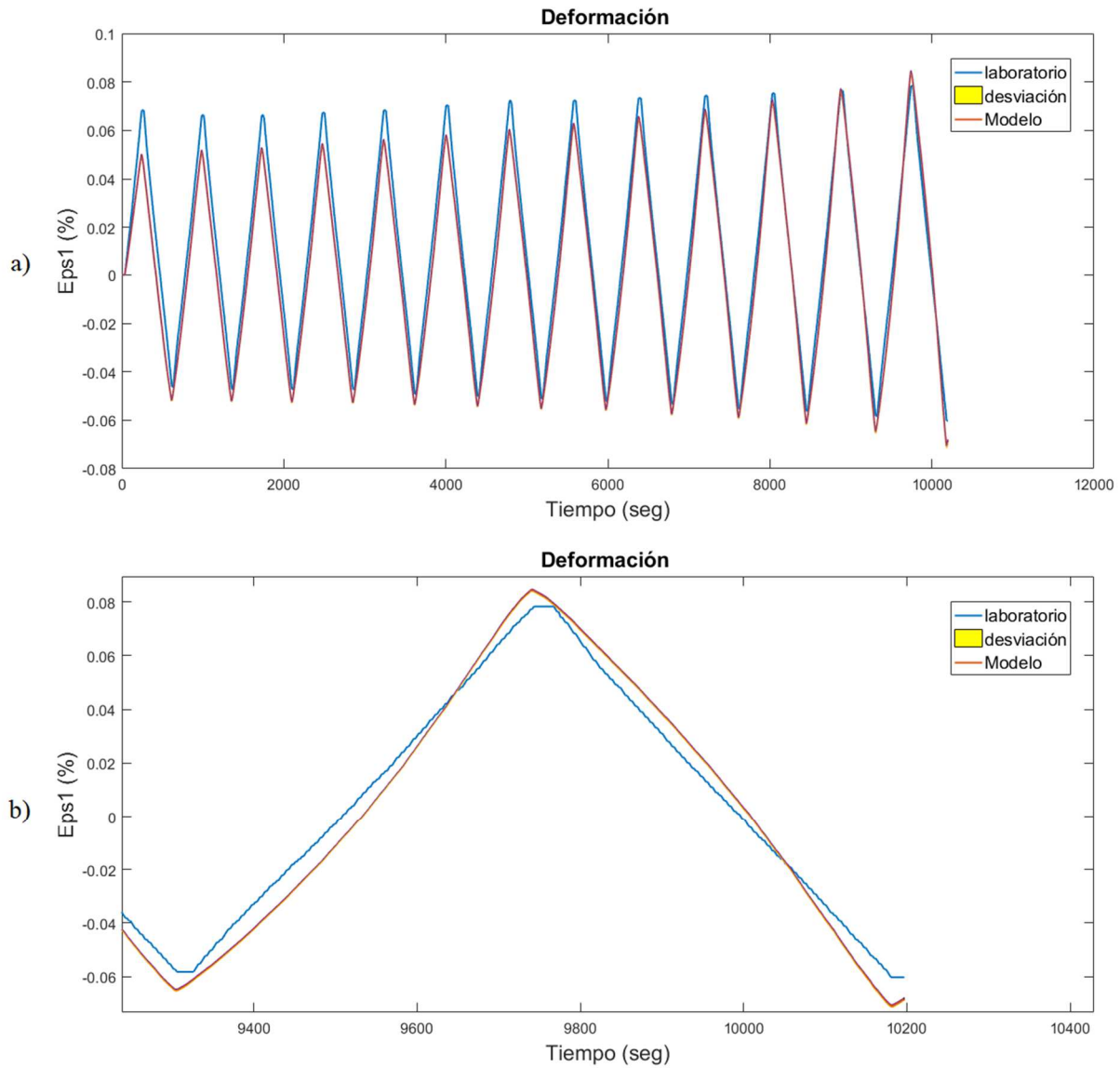


Figura 25. Deformación vertical para datos de laboratorio y modelo. a) Resultado para todos los datos tomados para análisis. b) Resultados para la parte final de la simulación.

También se puede resaltar el hecho de la diferencia entre la simulación y los datos de laboratorio referente al recorrido que hay en cada ciclo entre los picos de estos, donde se muestra mayor desarrollo de acumulación de presión de poros en todos los ciclos, eso, si se toma como punto de partida de cada ciclo el valor más bajo de este.

Por otro lado la Figura 25 presenta muestra el comportamiento de la deformación vertical a través del tiempo para la respuesta del ensayo de laboratorio (color azul), así también se muestra la media de la respuesta arrojada por el análisis computacional de cien muestras buenas seleccionadas de manera aleatoria de las muestras que fueron determinadas como buenas en el proceso de muestreo (color rojo), así como la desviación estándar de estas cien muestras (área amarilla). Se puede inferir un comportamiento bastante ajustado a la respuesta de laboratorio por parte del modelo. Las diferencias entre las deformaciones en el element teste realizado con el modelo y los ensayos de laboratorio muestran errores pequeños; también se presenta que la dispersión de los resultados de estas muestras es bastante baja y es notable esto incluso cuando se muestra solamente la última parte de los datos. No se visualiza de forma clara el área representada por el color amarillo asignado a la desviación (Figura 25b) de estas cien muestras seleccionadas según el criterio mencionado anteriormente.

Se puede evidenciar el comportamiento del suelo ensayado en la Figura 26 para los datos de laboratorio (rojo), muestran un comportamiento bastante uniforme y en apariencia simétrico durante los ciclos del fenómeno. La deformación es aproximadamente la misma para los demás ciclos. Se puede resaltar el buen ajuste de la deformación en la zona de transición entre cargas y descargas a lo largo de todos los ciclos en comparación con el análisis numérico del MAP (azul). Alrededor de los últimos ciclos se ve un mejor ajuste si se incluye tanto la fase de carga como de descarga. Para los tres ensayos analizados siempre presentan un primer ciclo con mayores

deformaciones en la carga, que para el caso que se está analizando continua estando presente. En general el proceso de calibración tiene un mejor ajuste para este ensayo en la deformación, para lo cual arrojó un muy buen ajuste, mientras que a simple vista parece ser que el ajuste en la acumulación de presión de poros para los otros dos ensayos era mejor. De igual manera un mejor ajuste para la deformación vertical no afectó de manera que cambiara la representación física del fenómeno de exceso de presión de poros. Por lo tanto sigue siendo un buen acercamiento por parte del modelo a los resultados de laboratorio.

La respuesta del exceso de presión de poros presenta poca dispersión de las muestras utilizadas para determinar la desviación de entre todas aquellas que se denominaron buenas (θ_m).

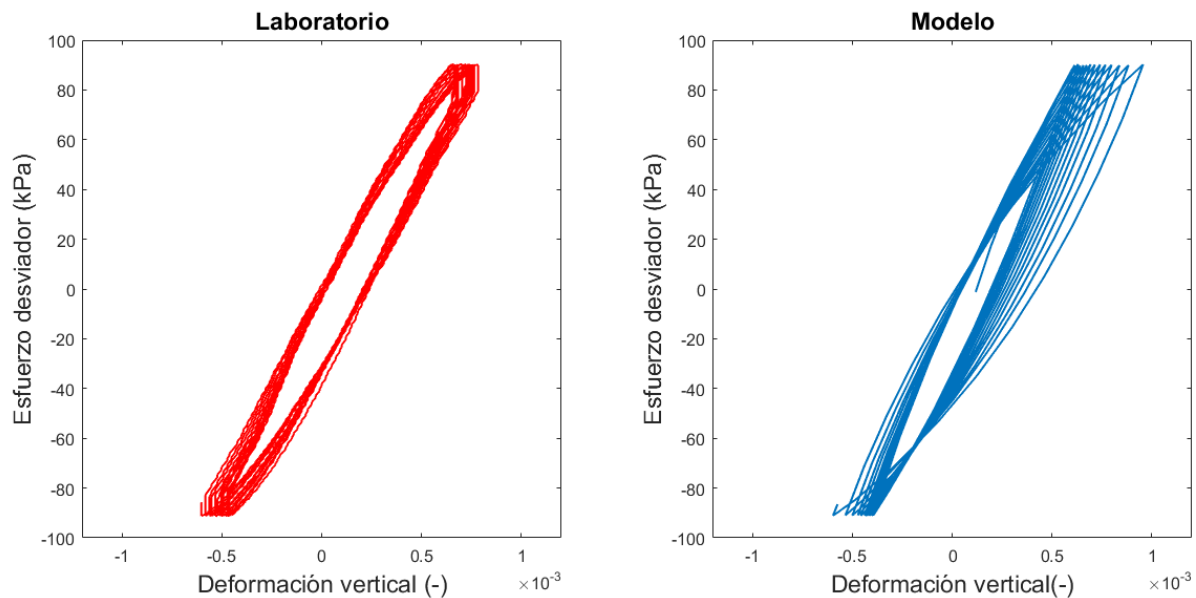


Figura 26. Ciclos de esfuerzo-deformación para (a) datos experimentales y (b) datos producto de la simulación del MAP para el ensayo TCUI16.

El análisis bayesiano utilizado para realizar la calibración de los parámetros que se ajustaran al comportamiento observado en el laboratorio ha arrojado unos valores que al comparar los resultados numéricos con aquellos de laboratorio para el ensayo TCUI16 parece satisfactorio.

El análisis también evidencia la cuantificación de la incertidumbre asociada a cada parámetro del modelo utilizado.

5.3.4. Análisis de los ensayos TCUI10, TCUI13, TCUI16 calibrando los parámetros de manera simultánea.

Se analizarán los resultados relacionados con el ensayo triaxial cíclico consolidado no drenado TCUI10, TCUI13 YTCUI16. Estos ensayos cuentan con una presión de confinamiento efectiva inicial de aproximadamente 100 kPa, 200 kPa y 300 kPa respectivamente. El propósito de esto es simular el comportamiento de los datos de laboratorio aplicando la misma carga y descarga (TCUI10=30 kPa, TCUI13=60 y TCUI16=90 kPa) para cada ciclo tomando lo aplicado en el laboratorio.

En esta sección se realiza el análisis para la calibración de los parámetros θ_m definidos en el capítulo 5 mediante el mismo análisis Bayesiano aplicado para cada ensayo de manera independiente, pero, para este caso se calibraron dichos parámetros para satisfacer los tres ensayos de manera simultánea. Se tiene en cuenta que cada uno de los ensayos tiene diferentes valores de esfuerzo desviador para cada ciclo, además de una presión de confinamiento diferente para cada uno de los ensayos. En la Figura 27 se muestra en la diagonal principal una serie de histogramas de frecuencia, que representan la distribución de las muestras generadas a partir de los criterios de selección de muestras adecuadas debido a la calibración. Los demás paneles dan una idea de la correlación que existe entre cada uno de los parámetros respecto a los demás parámetros. Esto con el fin de usarlo como herramienta para interpretar los resultados arrojados por el análisis bayesiano y de esta manera observar, por ejemplo, la fuerte correlación negativa existente entre c_l y v , la cual fue manifiesta en cada uno de los ensayos analizados independientemente. Esto podría ser

atribuido a la influencia que poseen ambos en el comportamiento de la deformación volumétrica del material explicado anteriormente. Se observa entre los parámetros d y G_{ref} una correlación positiva que da muestra de cierta dependencia entre los parámetros y consistente en los tres ensayos hasta el momento analizados. Consecuentemente con el resultado esperado, σ_e presenta unos valores posterior de acuerdo a ello en la Figura 27, ya que no muestra correlación alguna con los demás parámetros según la serie de datos en ella. En este caso es más fácil de identificar entre los parámetros G_{ref} y ν una débil correlación negativa la cual puede estar relacionada con la fórmula usada en el modelo para el cálculo del módulo Bulk del suelo, esta correlación podría incluso no tenerse en cuenta por lo baja que es, pero, es mencionada por estar presente los ensayos TCUI10 y TCUI16. Los demás parámetros no presentan una correlación observable.

En la Figura 28 aparece la distribución de los valores iniciales de los parámetros a calibrar identificadas como líneas azules y la distribución de muestras que se obtuvo luego de la calibración de estos (histogramas). En el caso de los parámetros σ_e , d y ϕ_c presentan un ajuste que se asemeja en los valores posteriores a los iniciales, mientras que los valores posteriores de los demás parámetros difieren de los valores iniciales. Hay que tener en cuenta que los iniciales utilizadas para este ensayo fueron los datos mismos usados para el ensayo TCUI16, dado que la presión de referencia fue tomada de dicho ensayo.

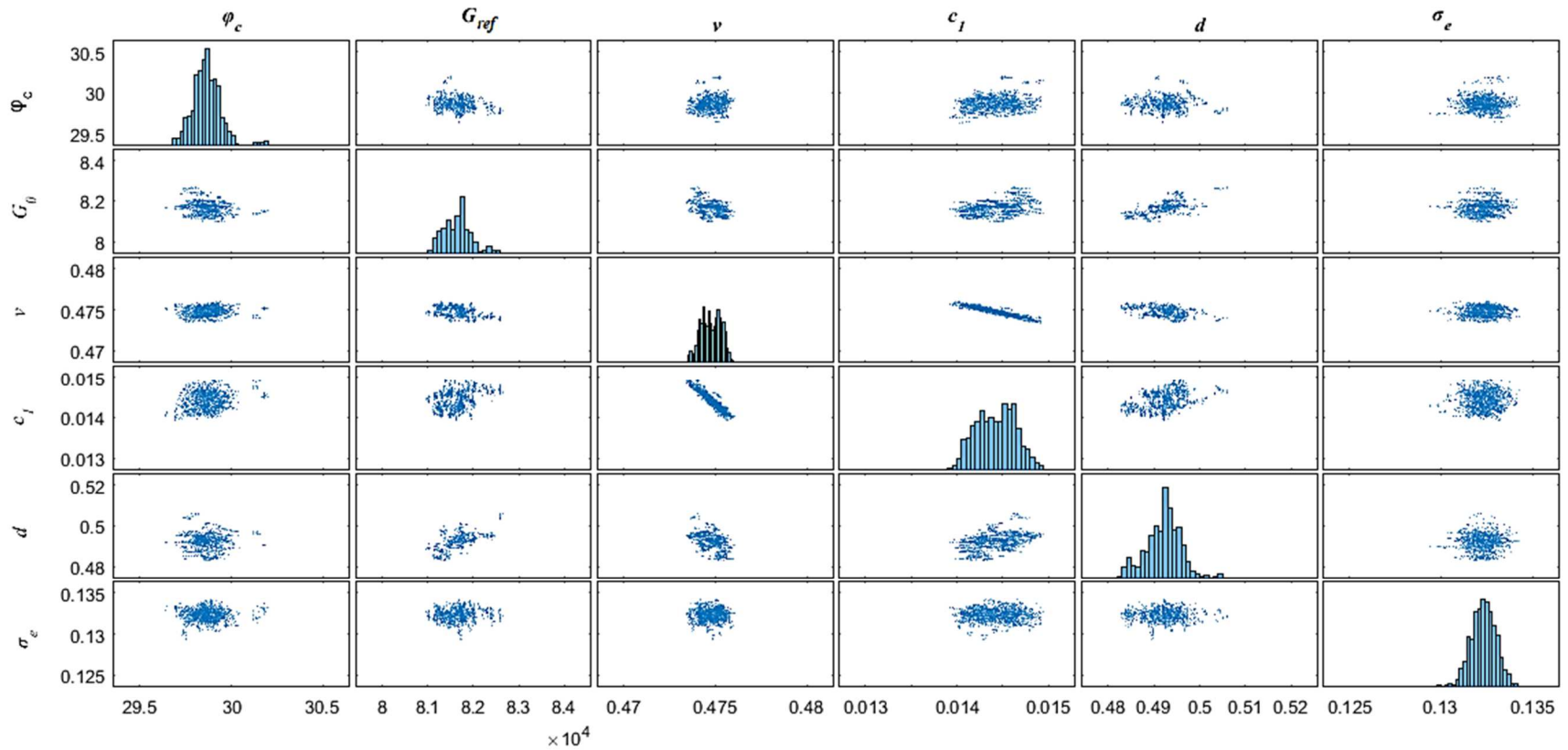


Figura 27. Resultado de la estimación de los parámetros mediante el uso de un modelo constitutivo de suelo usando los resultados de los ensayo TCUI10, TCUI13 Y TCUI16: En la diagonal principal se presentan histogramas de frecuencia y por fuera de esta se encuentran los valores posteriores.

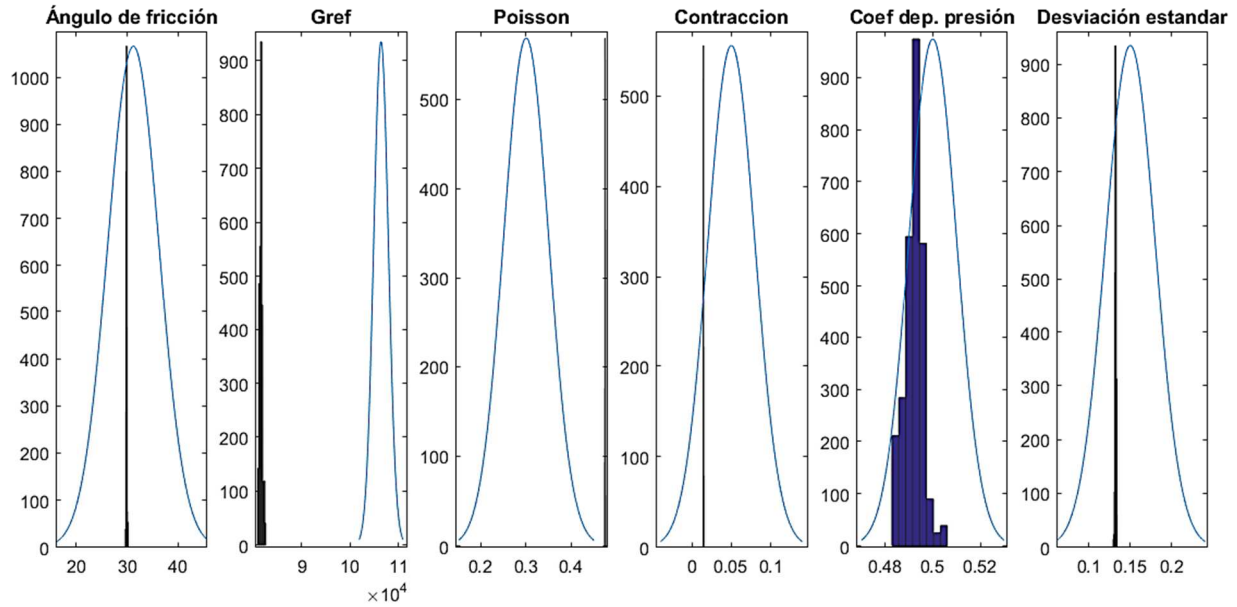


Figura 28. Distribución de los valores iniciales de los parámetros e histograma de frecuencia para las muestras posteriores de los ensayos TCUI10, TCUI13 Y TCUI16.

El parámetro que más se aleja e incluso se encuentra por fuera de la distribución inicial de probabilidad vuelve a ser G_{ref} . El parámetro ν también presenta sus valores posteriores alejados de los valores iniciales y cerca del límite superior impuesto para dicho parámetro.

En la Figura 29 se muestra la fracción de los resultados de exceso de presión de poros y deformación vertical en función del tiempo correspondiente al ensayo TCUI10. En dicha Figura inicialmente muestra un ajuste bueno en el exceso de presión de poros (izquierda) donde se muestra el promedio de las 100 muestras seleccionadas (color rojo) y la desviación estándar de cada uno de los puntos (color amarillo) correspondientes a la aplicación de esfuerzos desviadores para los ciclos de dicho ensayo.

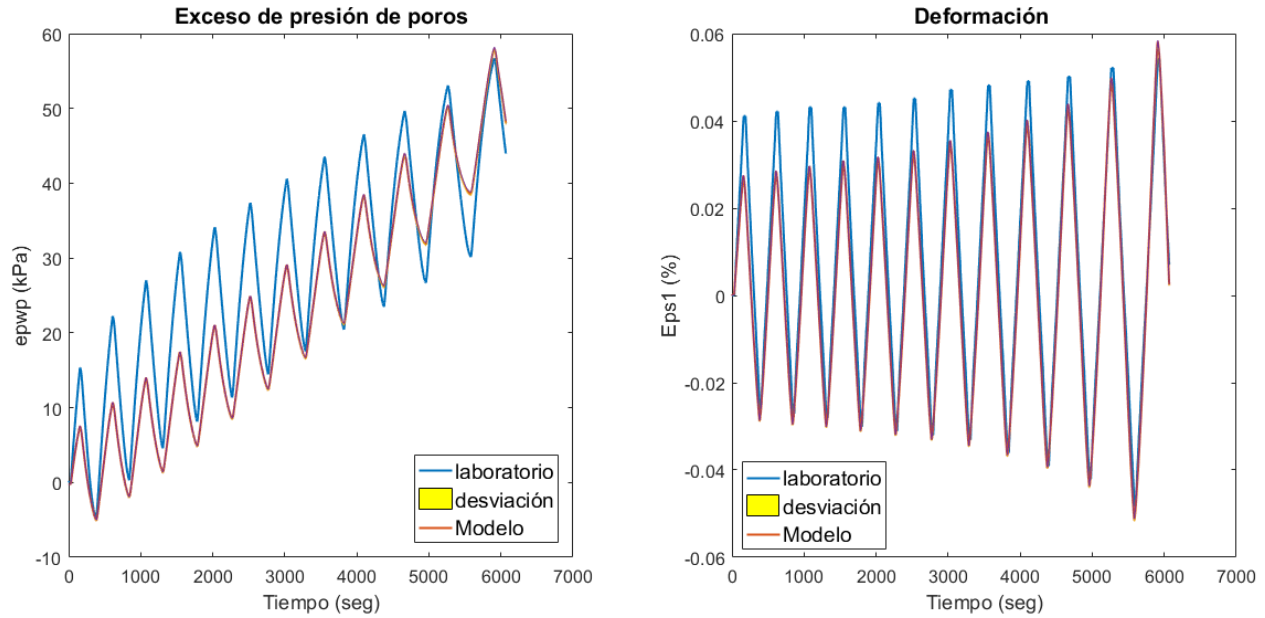


Figura 29. Exceso de presión de poros (izquierda) y Deformación vertical (derecha) para datos de laboratorio y modelo del ensayo TCUI10.

Se hace evidente una diferencia entre los datos de laboratorio (color azul) y los datos resultados de la modelación. Para este caso la presión de poros se acumula inicialmente en menor cantidad en la simulación que en los datos de laboratorio; este comportamiento se mantiene hasta casi finalizada la simulación, solo en los dos últimos ciclos se ve un aumento importante hasta alcanzar valores de exceso de presión de poros similares a los del ensayo de laboratorio. Sin embargo, el recorrido entre los valores máximo superior e inferior que se presentan en cada ciclo es mayor para el laboratorio que para las muestras tomadas de los valores posteriores. Por parte de la deformación vertical de la fracción correspondiente al ensayo TCUI10 (derecha) la aproximación de cada ciclo para el promedio de las 100 muestras (color rojo) se ajusta muy bien a los datos de laboratorio (color azul). Correspondiente a los resultados reseñados anteriormente, en los primeros ciclos se presentan mayores deformaciones. El área correspondiente a la desviación estándar (color amarillo) es casi imperceptible, mostrando poca variabilidad entre las muestras.

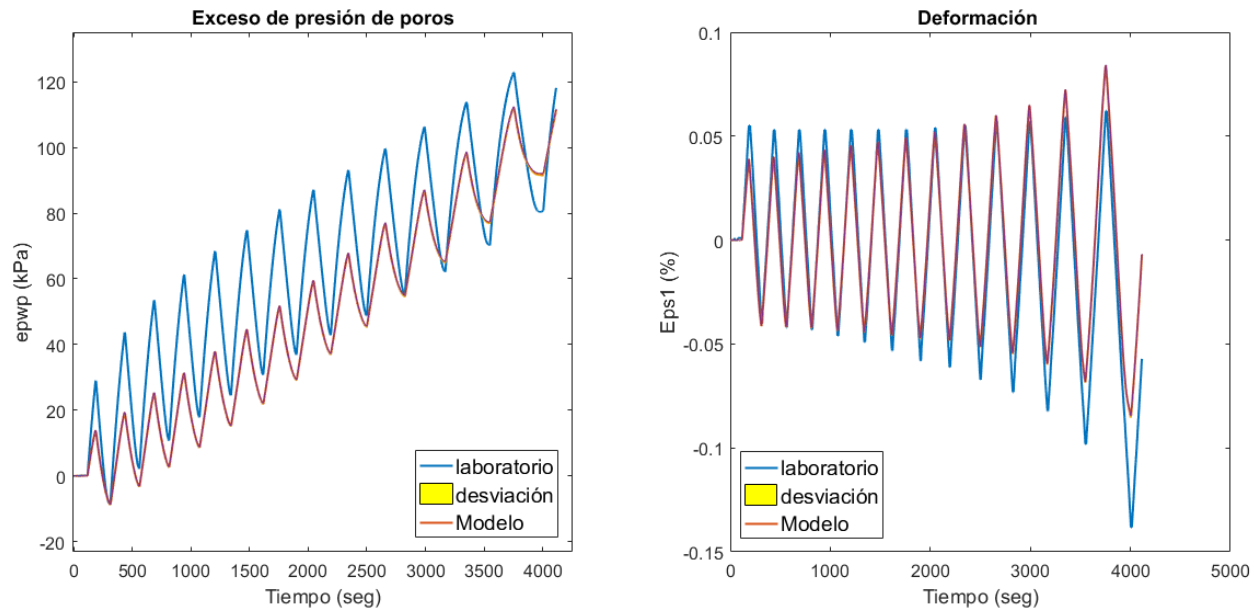


Figura 30. Exceso de presión de poros (izquierda) y Deformación vertical (derecha) para datos de laboratorio y modelo del ensayo TCUI13.

En la Figura 30 se muestra la fracción de los resultados de exceso de presión de poros y deformación vertical en función del tiempo correspondiente al ensayo TCUI13. Inicialmente se ve que el exceso de presión de poros (izquierda) ofrece un ajuste bueno al comportamiento que este debería presentar en un suelo en estas condiciones. Se muestra el promedio de las mismas 100 muestras seleccionadas (color rojo) y la desviación estándar de cada uno de los puntos (color amarillo) correspondientes a la aplicación de esfuerzos desviadores para los ciclos de dicho ensayo. Se muestra claramente una diferencia entre los valores debido a la modelación y los de laboratorio (color azul), en dicho caso se observa en los primeros ciclos que al final de la carga la acumulación de presión de poros para el laboratorio resulta ser aproximadamente el doble de lo modelado, en la fase de descarga se aproxima un poco más a los resultados de laboratorio. Por otro lado si se observa la deformación vertical de la fracción correspondiente al ensayo TCUI13 (derecha) la aproximación a la descarga de cada ciclo para el promedio de las 100 muestras (color

rojo) se ajusta muy bien a los datos de laboratorio (color azul) y vemos nuevamente mayores deformaciones iniciales para los datos de laboratorio, pero, que luego se estabiliza y ajusta mejor luego de los primeros ciclos, se logra observar un buen acercamiento al comportamiento del suelo en laboratorio con el uso de las muestras reseñadas anteriormente.

En la Figura 31 se muestra la fracción de los resultados de exceso de presión de poros y deformación vertical en función del tiempo correspondiente al ensayo TCUI16. En este se puede ver un ajuste no preciso en el exceso de presiones de poros (izquierda) se muestra el promedio de las mismas 100 muestras seleccionadas (color rojo) y la desviación estándar de cada uno de los puntos (color amarillo) correspondientes a la aplicación de esfuerzos desviadores para los ciclos de dicho ensayo. En este caso ocurre un fenómeno similar al visto para la fracción debida a TCUI13 donde inicialmente se puede ver una diferencia marcada entre los valores debido a la modelación y los de laboratorio (color azul). En dicho caso se observa desde los primeros ciclos que el exceso de presión de poros para el laboratorio resulta ser aproximadamente el doble de lo modelado para los valores máximos de cada ciclo. Este comportamiento se mantiene hasta alrededor de la mitad de la simulación en donde empieza una transición hacia valores mayores. Esto ayuda a afianzar la postura respecto a la discrepancia en las capacidades del modelo para simular el comportamiento del exceso de presión de poros respecto al comportamiento real de este en los suelos.

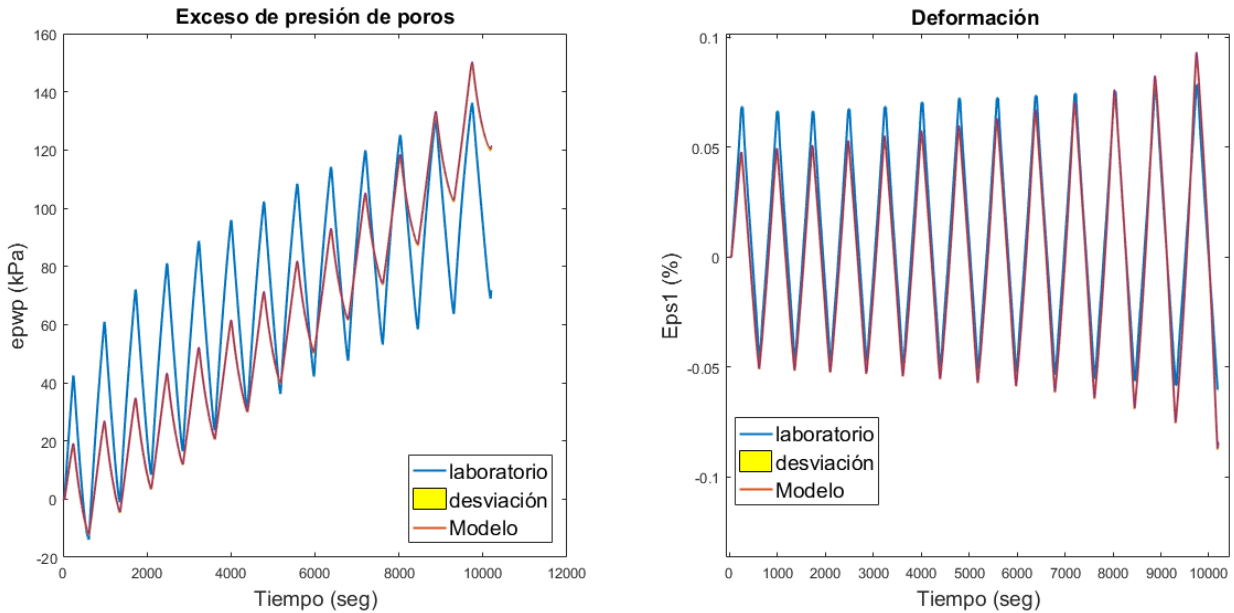


Figura 31. Exceso de presión de poros (izquierda) y Deformación vertical (derecha) para datos de laboratorio y modelo del ensayo TCUI16.

Por otro lado, del análisis se observa la deformación vertical de la fracción correspondiente al ensayo TCUI16 (derecha) para cada ciclo del promedio de las 100 muestras (color rojo). Se ve un mejor ajuste respecto a los datos de laboratorio (color azul) si se compara con el exceso de presión de poros. Se presenta mayor deformación en los primeros ciclos para el laboratorio, pero, luego se ajusta mejor hacia los ciclos centrales. Se puede mencionar entonces, que se observa un buen acercamiento al comportamiento del suelo en laboratorio con el uso de las muestras reseñadas anteriormente.

Para interpretar la aproximación del modelo a los datos de laboratorio se puede hacer mediante el análisis del comportamiento esfuerzo-deformación de cada uno de los ensayos simulados. Para este caso ya han sido determinados los ensayos objetivos del análisis y se tiene una comparativa entre los resultados debidos a la simulación de los parámetros del MAP y los datos producto de los ensayos de laboratorio. En la Figura 32 se muestran los gráficos de esfuerzo

desviador-deformación vertical para los ensayos TCUI10, TCUI13 y TCUI16 (en ese orden desde arriba hacia abajo) tanto para los resultados de la simulación en la cual se calibraron los parámetros para estos tres ensayos de manera simultánea, como para los datos de laboratorio. Se observa que la deformación en los primeros ciclos para los resultados de laboratorio correspondiente a los análisis de deformación-tiempo, son mayores en los tres ensayos, que para el caso de los ensayos TCUI10 y TCUI16 es la diferencia que se puede apreciar inicialmente. En general se aprecia un buen ajuste entre lo observado y lo que se logra predecir con el modelo para cada uno de los ensayos mediante la calibración de los parámetros utilizando tres ensayos a la vez.

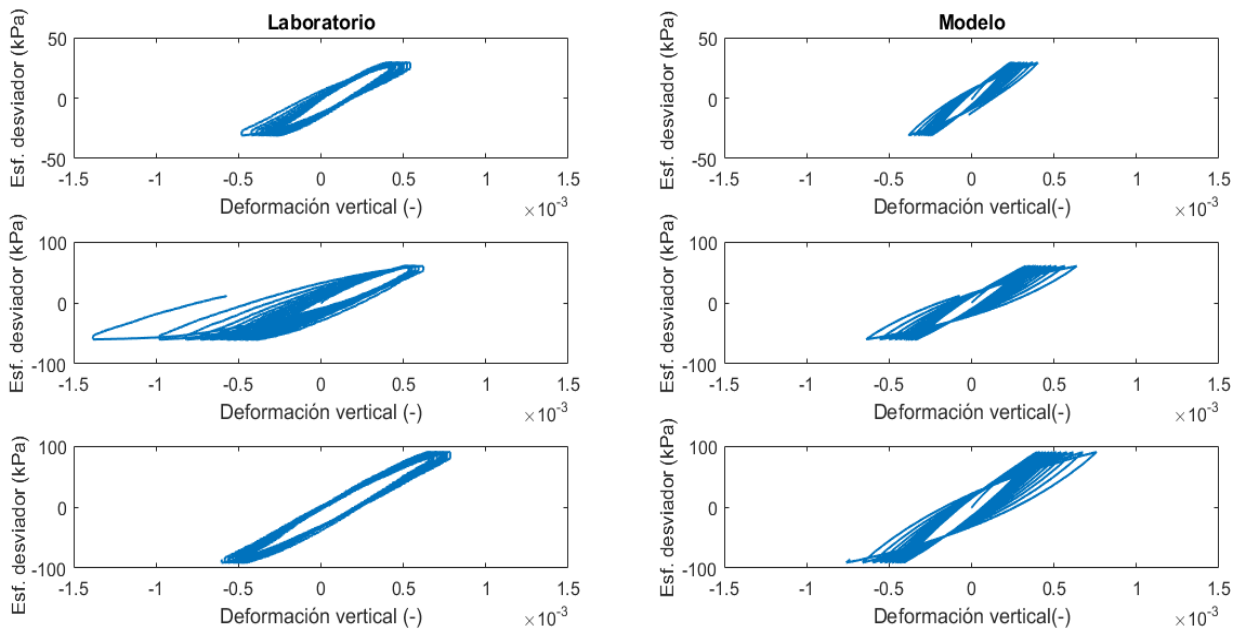


Figura 32. Esfuerzo-deformación para los datos de laboratorio y del modelo para los ensayos (desde arriba hacia abajo) TCUI10, TCUI13 Y TCUI16.

5.3.5. Análisis de los valores posteriores para cada parámetro.

Mediante el proceso de calibración de los parámetros del modelo de suelo PDMY descrito en capítulos anteriores, mediante el análisis bayesiano, se obtuvieron muestras consideradas buenas

según los criterios de selección de muestra suministrado al análisis numérico de dichos datos. Se presenta a continuación una serie de diagramas de caja que contienen los valores de dichas muestras luego del proceso de calibración. Se puede decir de la Figura 33 que el ángulo de fricción para todos los ensayos se encuentra por debajo del valor obtenido mediante los ensayos triaxiales monotónicos consolidados drenados.

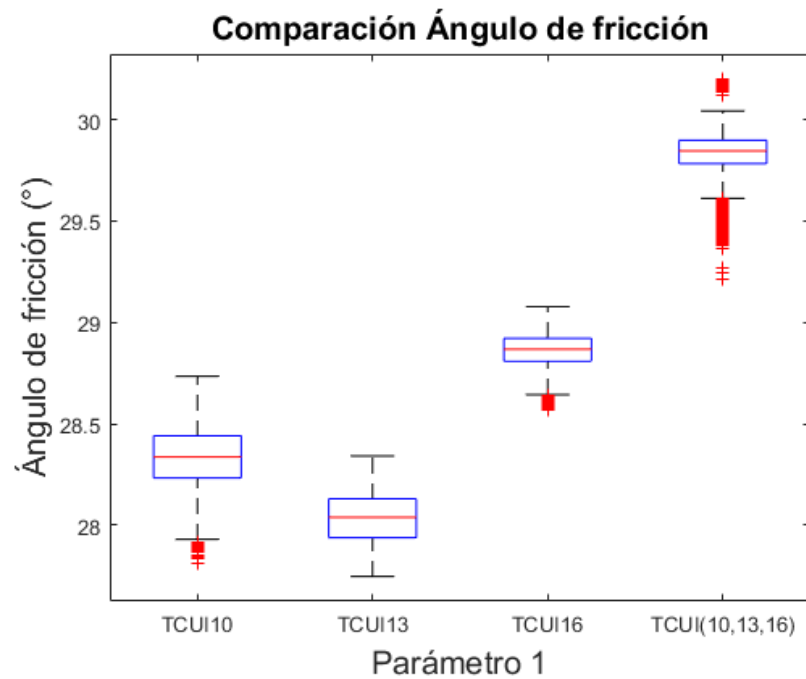


Figura 33. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas del ángulo de fricción.

El valor de 31.2° correspondiente también a lo reportado por Wichtmann (2016) no es alcanzado por ninguna de las muestras. Aún en la calibración de los tres ensayos simultáneos, el cual presenta unos mayores valores posteriores no se llega a dicho valor. Para el parámetro del módulo de corte de referencia que se puede ver en la Figura 33, parece encontrarse entre 80000 kPa y 94000 kPa según los valores posteriores. Según el cálculo de este parámetro mediante el uso de ecuaciones postuladas por alguno autores que tienen la forma que simplificó Kokusho (1987), para la cual se cambian ciertas variables dependiendo del autor se encuentra por debajo de lo

esperado en todos los casos. También se puede tener en cuenta que el valor de la media de los valores iniciales es de 108355 kPa. Se observa una mayor variabilidad del parámetro en el ensayo TCUI10 y se aprecian datos atípicos por fuera de los bigotes del diagrama en la parte superior correspondiente al tercer cuartil en los ensayos TCUI10 y el correspondiente a los 3 ensayos calibrados simultáneamente, el cual tiene estos datos atípicos con valores bastante mayores a la mediana.

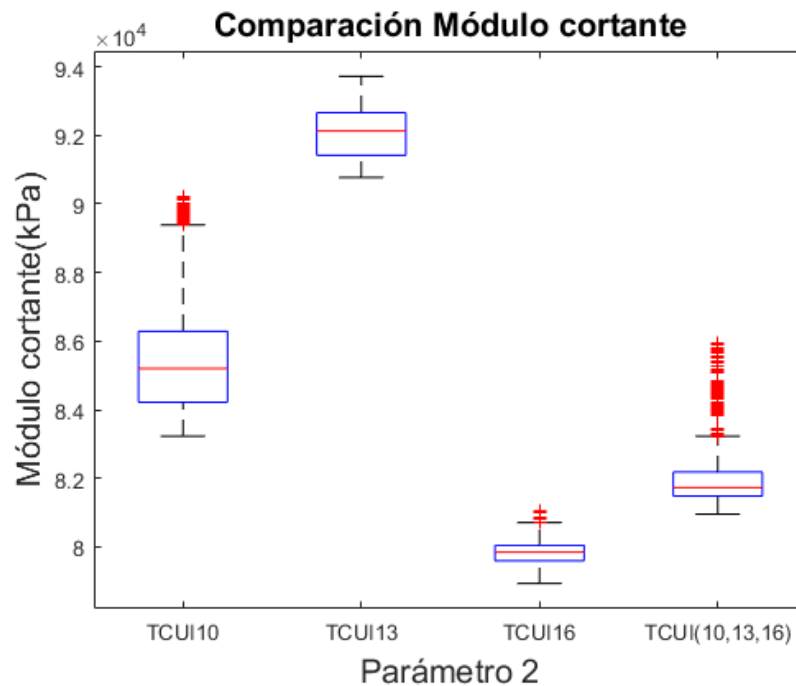


Figura 34. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas del Módulo cortante de referencia.

Se muestran los diagramas de caja para el parámetro coeficiente de Poisson en cada una de las calibraciones realizadas en la Figura 35. Se puede observar una variación de dicho parámetro tanto hacia valores mayores que la inicial como en el caso de TCUI16 y la calibración simultánea donde dichos valores tienden a valores cercanos a 0.5, el cual es el máximo valor que puede alcanzar dicho coeficiente por su significado físico y por la restricción impuesta al modelo, mientras que este parámetro para el ensayo TCUI13 tomó valores pequeños, inferiores a 0.2, hay

que anotar que la mayor variabilidad en los resultados se presenta en este ensayo. Se reportan mayor cantidad de valores atípicos dentro de las muestras para la calibración simultánea de los ensayos.

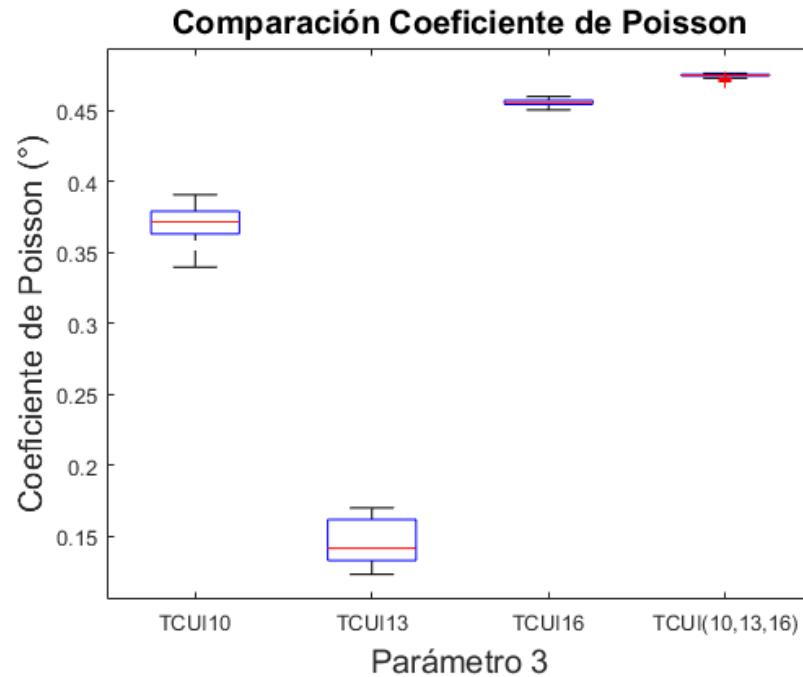


Figura 35. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas del coeficiente de Poisson.

En la Figura 36 se muestran los diagramas de caja correspondientes a parámetro contracción. Este parámetro está ligado directamente al comportamiento contractivo del modelo. Se espera que a mayores valores de confinamiento efectivo inicial el valor de contracción sea menor para un mismo esfuerzo desviador con confinamientos menores, comportamiento que se evidencia en el ensayo TCUI10 y TCUI16. En el caso de este parámetro para el ensayo TCUI13 toma valores altos, esto, en contra del sentido físico que gobierna el modelo, el cual debería llevar a que este ensayo presentara unos valores de c_l menores que en el ensayo TCUI10.

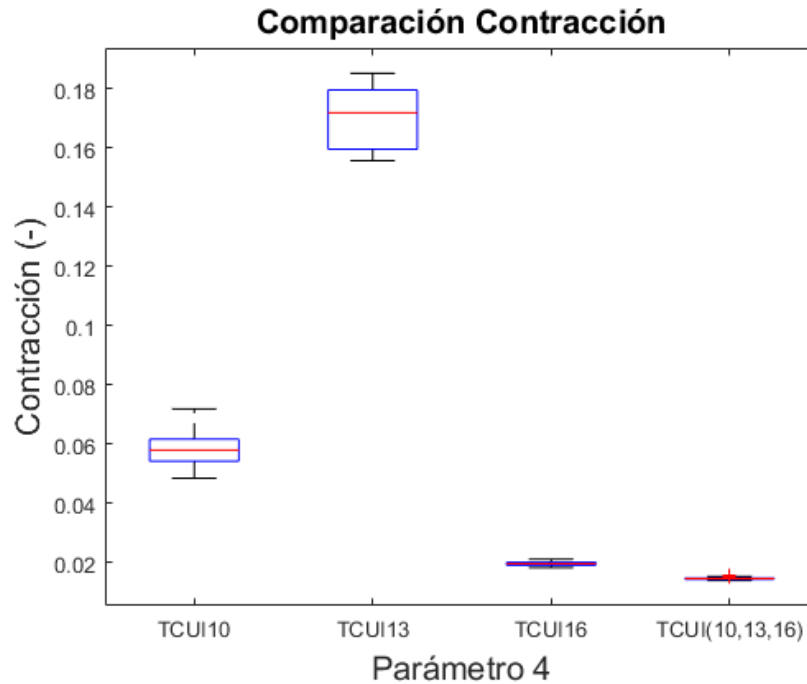


Figura 36. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas del parámetro contracción.

Para la calibración simultánea se muestra valores pequeños, similares a los de TCUI16, esto podría justificar los bajos valores iniciales en la acumulación de presión de poros en casi todos los ensayos calibrados vistos en las Figuras 30, 31 y 32. Otro de los parámetros calibrados es el coeficiente dependiente de presión. Se idealiza para el modelo como una constante de valor 0.5, dicho valor fue tomado como media de la distribución normal introducida como valores iniciales para la calibración. Luego de los diferentes procesos de calibración se obtuvieron muestras que se presentan a continuación como diagramas de caja para cada ensayo calibrado en la Figura 37.

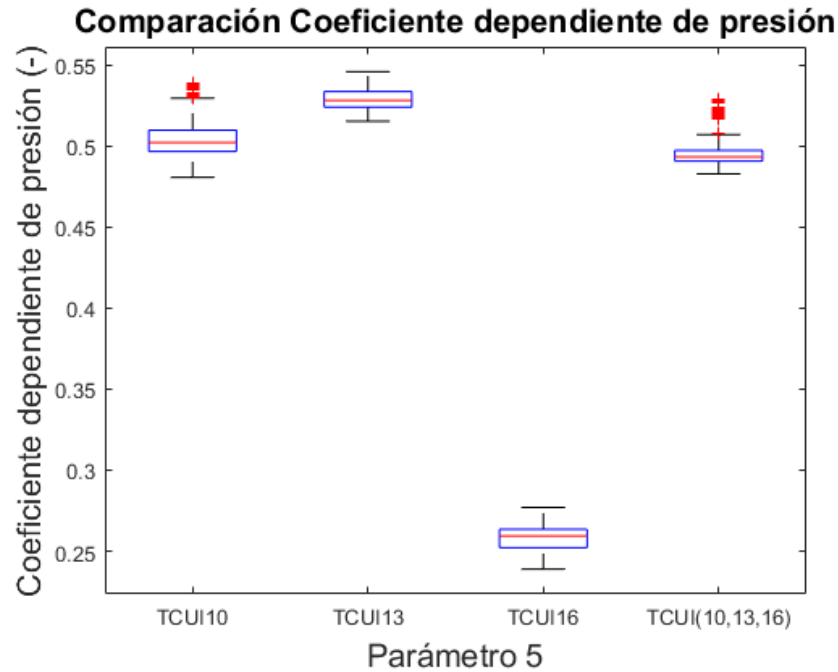


Figura 37. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas del coeficiente dependiente de presión.

Se alcanza a observar que para los ensayos TCUI10, TCUI13 y la calibración simultánea presentan valores cercanos a 0.5 siendo esto correspondientes con la teoría que lo asume como una constante, sin embargo, en el caso del ensayo TCUI16 muestra un comportamiento del parámetro por debajo de lo esperado, con valores entre 0.3 y 0.2. En el caso de la Figura 38 se presentan los diagramas de caja correspondientes a los valores posteriores del parámetro desviación estándar del modelo, donde se percibe la variación de los valores de las muestras. Para esta Figura se obtienen valores esperados.

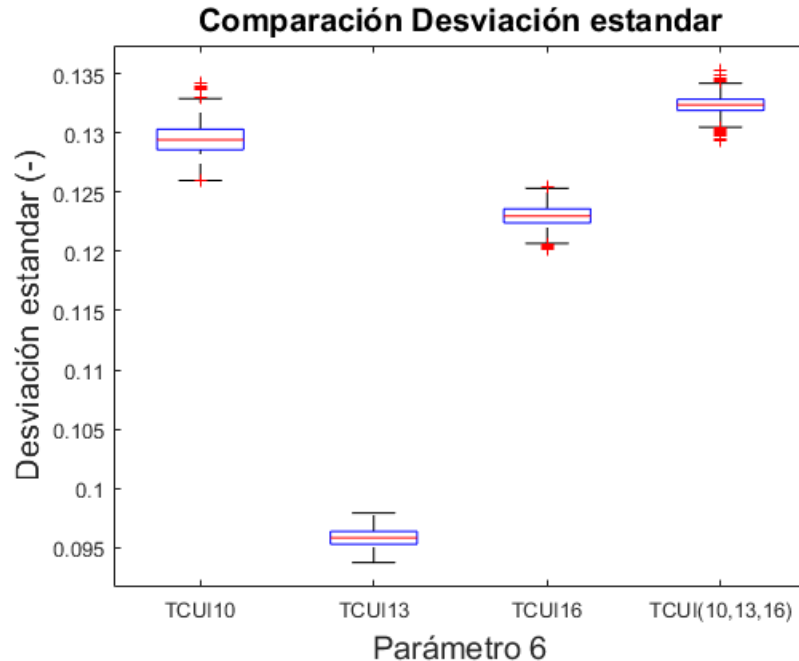


Figura 38. Diagrama de caja para los valores de las muestras buenas de la desviación estándar.

5.3.6. Análisis de sensibilidad.

Para cada uno de los parámetros calibrados se determinaron las correlaciones existentes y los valores posteriores que mejor ajustan la respuesta de la modelación matemática a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio. Para entender mejor la influencia de cada uno de los parámetros calibrados en la respuesta del modelo, se presentan a continuación los resultados de un análisis de sensibilidad. Para esto se determina la media de los valores posteriores para cada uno de los parámetros calibrados, luego se varía cada parámetro individualmente, teniendo en cuenta los valores de las colas inferiores y superiores para los diagramas de cajas anteriormente presentados. Los valores de las colas inferiores y superiores fueron determinado mediante la resta y suma a la mediana respectivamente de 1.5 veces el rango intercuartil.

En las figuras 39, 41 y 43 se presentan los resultados de la variación de los parámetros de manera individual para evaluar la respuesta del exceso de presión de agua en los poros de cada element test.

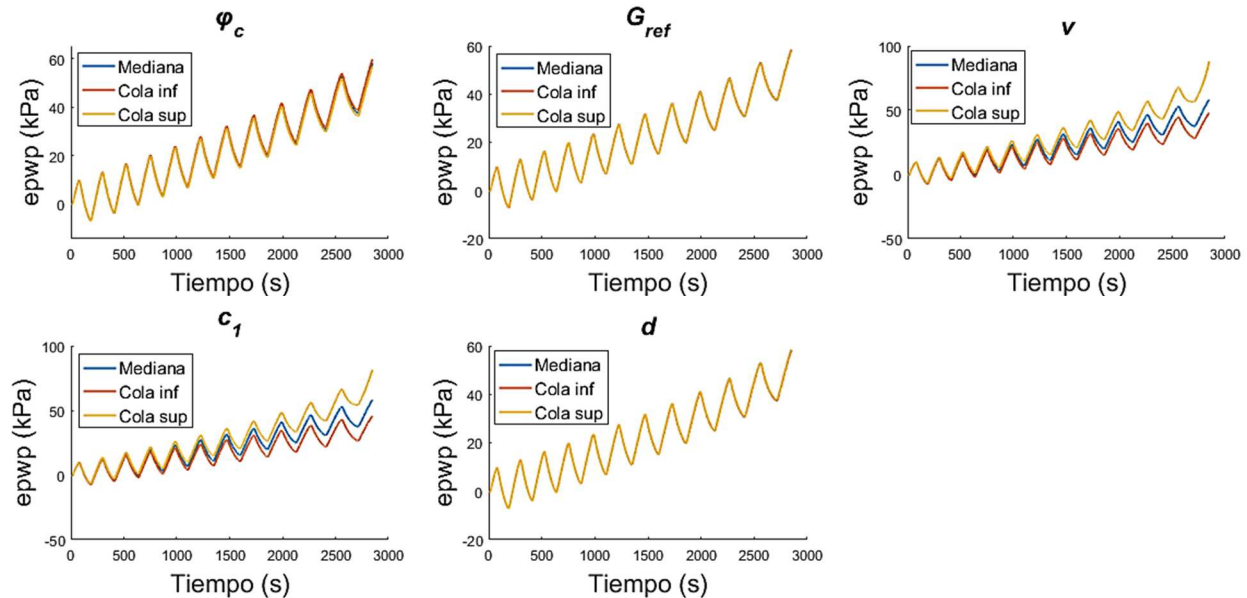


Figura 39. Exceso de presión de poros para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI10.

Inicialmente se puede observar la poca variación de la respuesta del análisis numérico debido a los cambios en los valores de G_{ref} y d . No se realiza un análisis para σ_e debido a que no es un parámetro que influya en el comportamiento físico del modelo constitutivo utilizado para el análisis. Se puede ver en estas figuras también la influencia a en la variabilidad de los resultados de los parámetros ν y c_1 , que influyen en el comportamiento volumétrico del material utilizado, el parámetro c_1 controla la tendencia contractiva del material o la acumulación de presión de agua en los poros, es esperado que tenga gran influencia en la variabilidad de la respuesta de la acumulación de presión de agua en los poros (epwp).

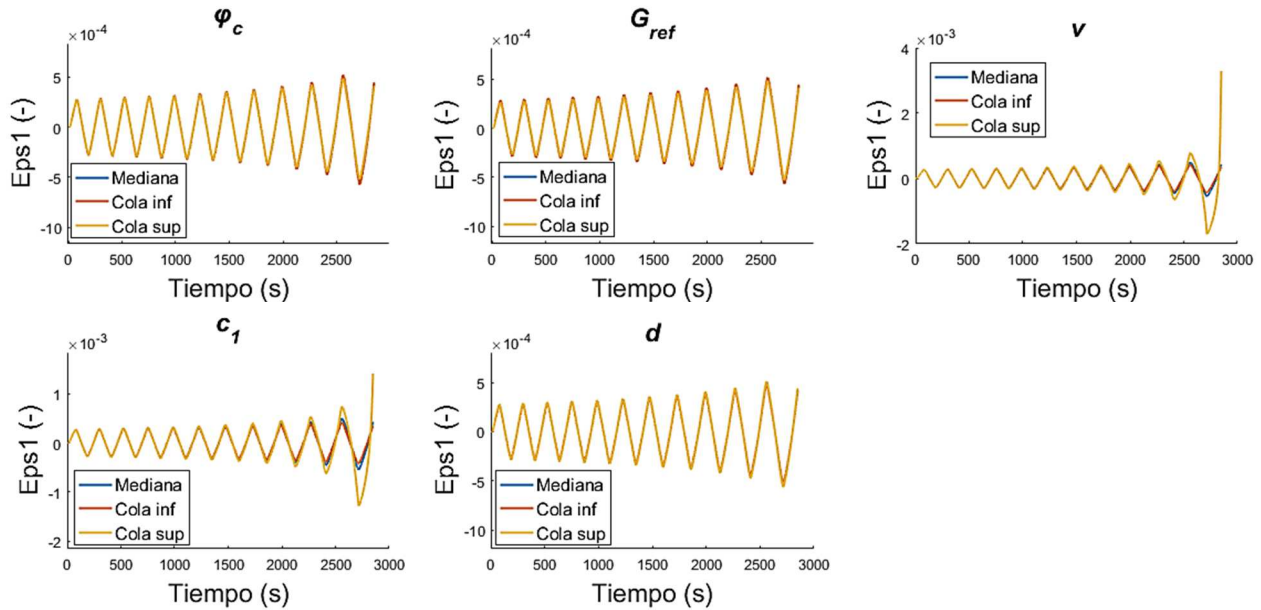


Figura 40. Deformación vertical para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI10.

Igualmente se observa una variación mucho menor en los resultados debido al cambio en los valores de ϕ_c , el cual está relacionado con la resistencia del suelo al esfuerzo cortante.

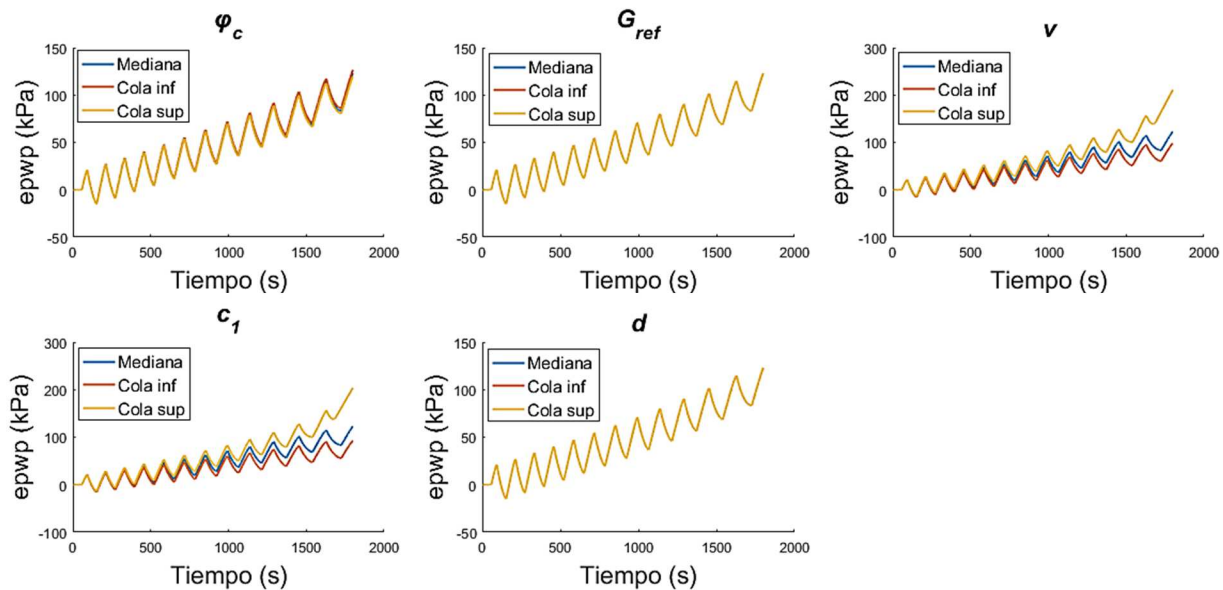


Figura 41. Exceso de presión de poros para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI13.

De las respuestas del exceso de presión de agua en los poros se puede inferir que los parámetros que más influyen en la variabilidad de la respuesta del modelo son v y c_1 , para los cuales se ve una tendencia en las tres figuras que representan los ensayos TCUI10, TCUI13 y TCUI16.

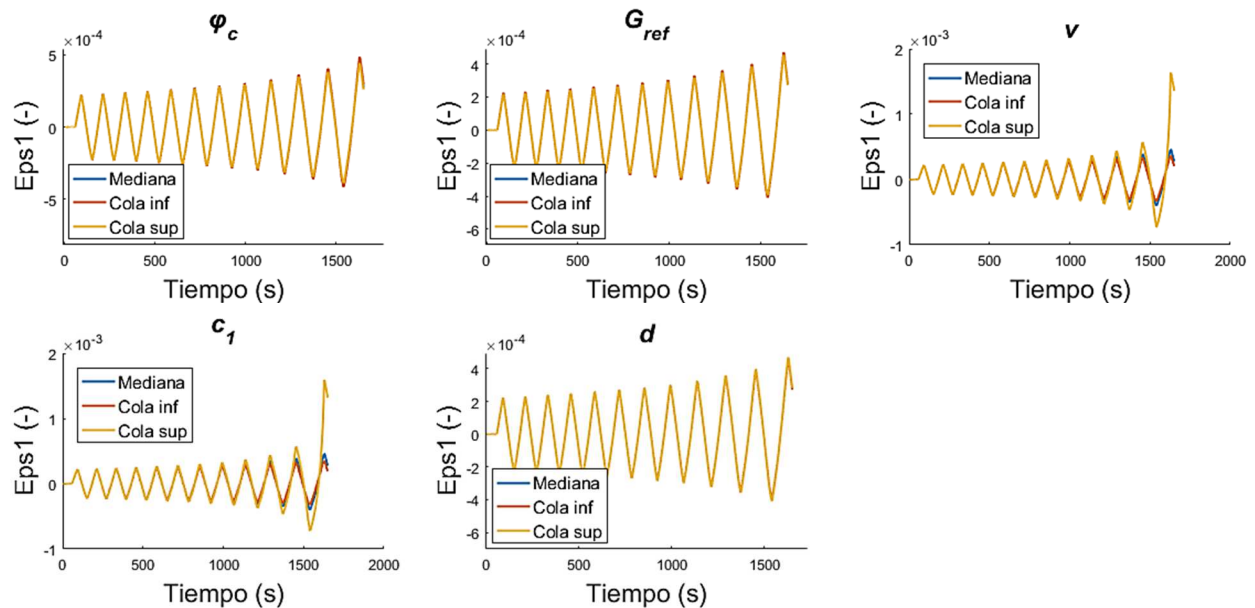


Figura 42. Deformación vertical para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI13.

En las figuras 40, 42 y 44 se presentan los resultados de la variación de los parámetros de manera individual para evaluar la respuesta de la deformación vertical de cada element test. Inicialmente se ve la poca variabilidad de las respuestas debido a los cambio de los valores extraídos de los diagramas de caja para los parámetros G_{ref} , ϕ_c y d . Para este caso se suma a los parámetros que muestran poca variabilidad el parámetro ϕ_c , para el cual la variación de la respuesta es mayor que en los parámetros G_{ref} , d y σ_e , pero igualmente de manera visual es difícil de apreciar.

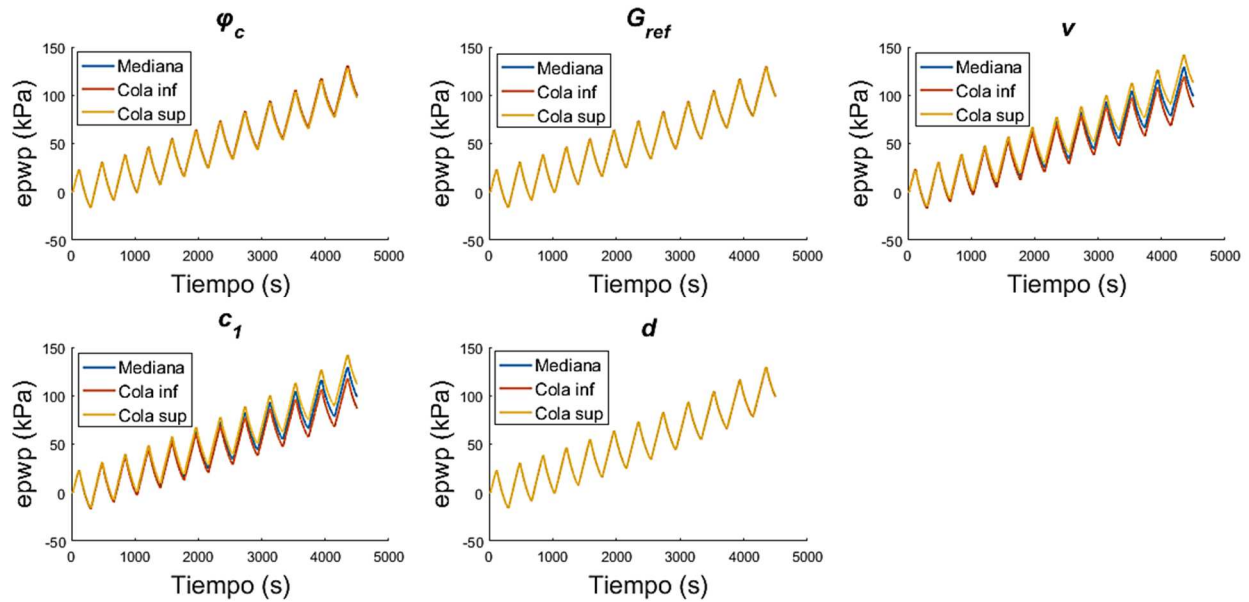


Ilustración 43. Exceso de presión de poros para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI16.

La mayor variabilidad en la respuesta de la deformación vertical se presenta en la variación de los parámetros ν y c_1 nuevamente, observable de una forma más evidente en los resultados de los element test para los ensayos TCUI10 y TCUI13, para los cuales se observan grandes deformaciones verticales en comparación con las ofrecidas al variar los demás parámetros. También se puede ver que la variación para el ensayo TCUI16 es menor para estos valores de las colas inferiores y superiores debido a la distribución de los valores posteriores de los parámetros ν y c_1 que presentan una desviación estándar bastante baja, a la que se puede atribuir la baja variabilidad de los resultados de la figura 44. Se podría decir entonces que de los parámetros utilizados para la calibración, ν y c_1 son aquellos a los cuales es más sensible el modelo a variar la respuesta de exceso de presión de agua en los poros y a deformación vertical debido al cambio de los valores de estos parámetros.

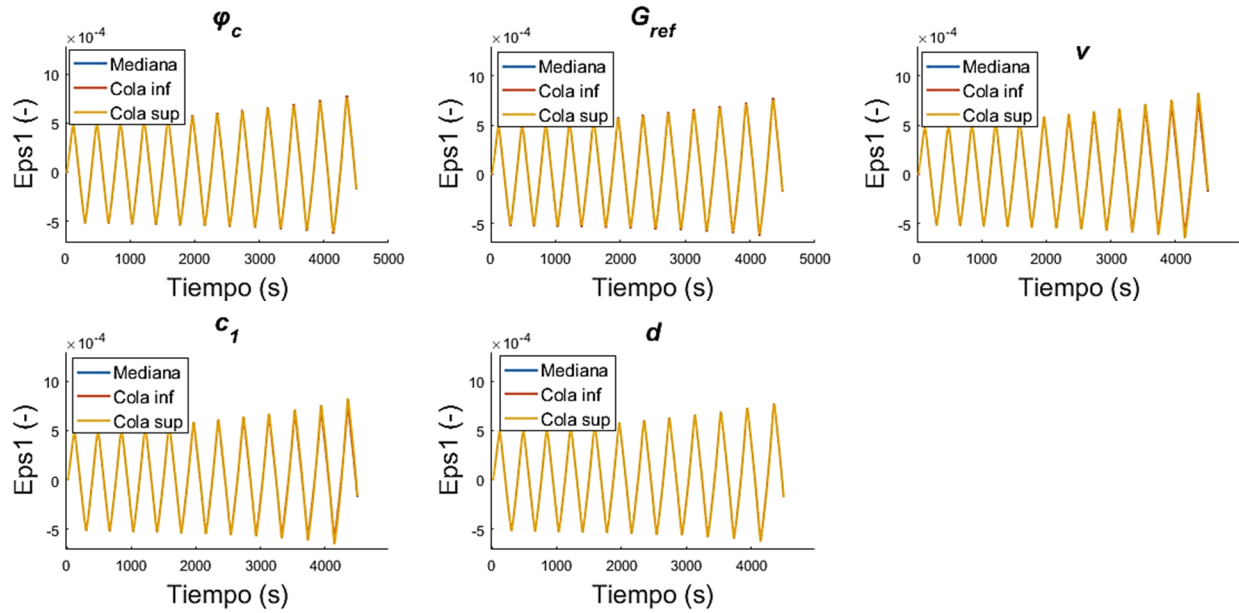


Figura 44. Deformación vertical para los datos, resultado de la variación de cada parámetro calibrado para el ensayo TCUI13.

5.4. Verificación de los resultados.

5.4.1. Verificación de los parámetros del modelo ajustados mediante el uso de ensayos adicionales.

Para la verificación de los resultados de la actualización del modelo se utilizaron dos ensayos triaxiales isotrópicos consolidados no drenados adicionales. Estos fueron realizados a la misma arena de Karlsruhe utilizada para los ensayos calibrados en este estudio, con características descritas en el capítulo 2. Los ensayos tomados para esto son nombrados por Wichtmann (2016) TCUI09 y TCUI12, los cuales tienen una presión de confinamiento inicial de 100 kPa y 200 kPa respectivamente. También tienen una densidad relativa inicial similar a las de los ensayos calibrados, esto era valores I_{D0} alrededor de 0.60. A estos ensayos le fueron aplicados unos esfuerzos desviadores que cambiaban de dirección al llegar al máximo valor de este en cada

dirección, mayor información de los datos iniciales y resultados se encuentran en las publicaciones de Wichtmann (2016).

A continuación se analizarán los resultados relacionados con el ensayo triaxial cíclico consolidado no drenado TCUI9 y TCUI12. Estos cuentan con unas presiones de confinamiento efectivas iniciales de aproximadamente 100 kPa y 200 kPa. El propósito es simular el comportamiento de los datos de laboratorio aplicando la misma carga y descarga (25 kPa y 50 kPa) para cada ciclo tomando lo aplicado en el laboratorio.

La Figura 45 muestra la respuesta del exceso de presión de poros con respecto al tiempo para el cual fueron tomados los datos del ensayo triaxial cíclico consolidado isotrópico no drenado TCUI9 (a) y TCUI12 (b) cada uno de color azul. También se presenta los datos de salida producto del análisis numérico de 100 muestras aleatorias tomadas de los valores posteriores de ensayos TCUI10 y TCUI13, los cuales presentan similar presión de confinamiento efectivo inicial, dicho número de muestras por cada ensayo. Se realizó la modelación con estos parámetros y se grafica la media de sus resultados representados con el color rojo y la desviación estándar (áreas de color amarillo). Las muestras utilizadas para esto fueron seleccionadas de manera aleatoria de entre las muestras presentes en las cadenas de Markov generadas por el análisis Bayesiano.

Se puede ver en la Figura 46 el comportamiento de la deformación vertical a través del tiempo para las respuestas de los ensayos de laboratorio TCUI9 (a) Y TCUI12 (b) de color azul. así también se muestra la media de las respuestas arrojadas por el análisis computacional de cien muestras seleccionadas de manera aleatoria, de las muestras de la cadena de Markov (color rojo)

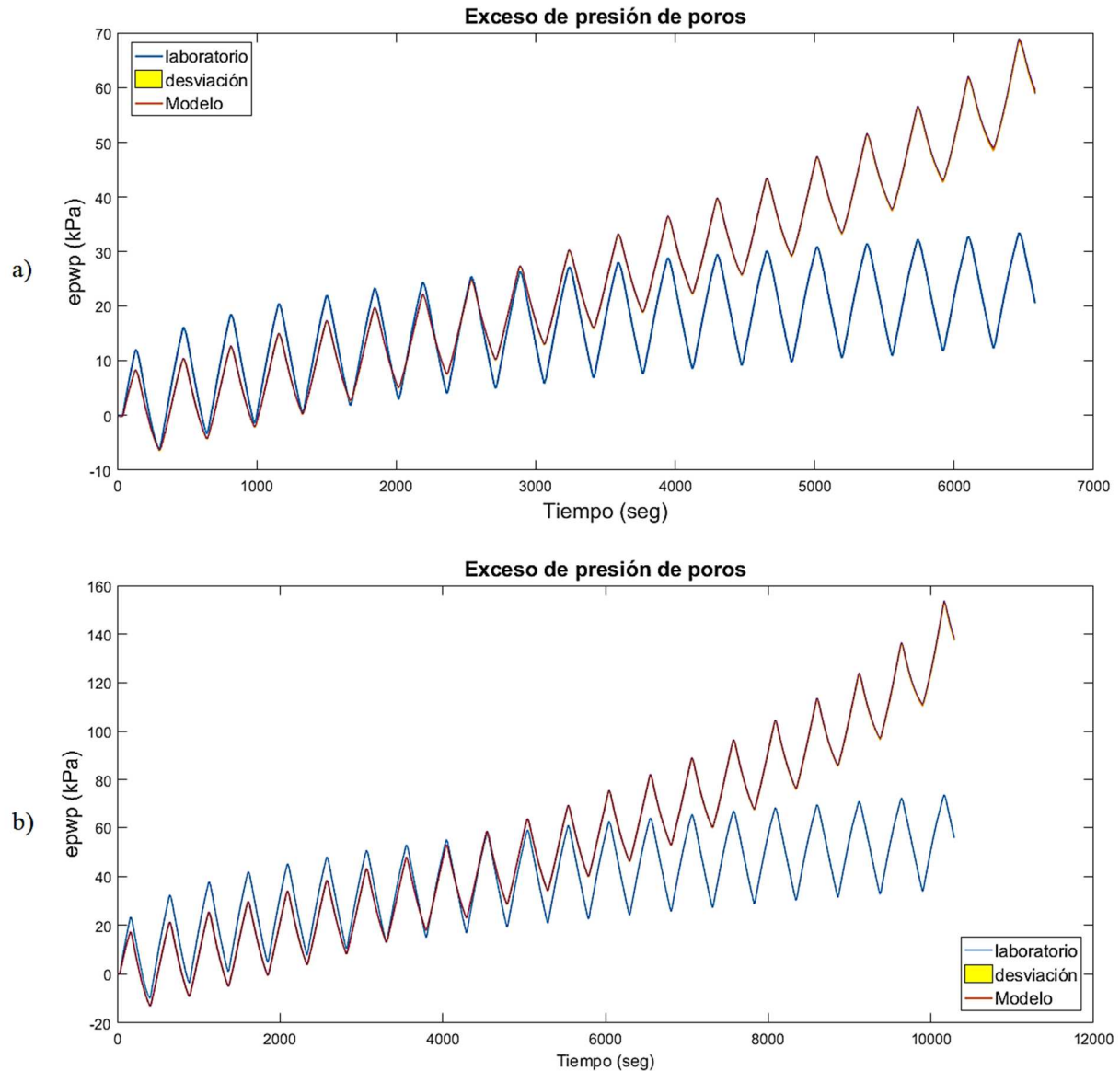


Figura 45. Exceso de presión de poros para datos de laboratorio y modelo en los ensayos TCUI09 (a) y TCUI12 (b).

para cada uno de los ensayos, así como la desviación estándar de cada una de las cien muestras (área amarilla). Se evidencia un comportamiento inicial de la deformación vertical con valores menores para el modelo con respecto a los valores de laboratorio, pero, el recorrido para cada ciclo es similar en ambos resultados durante gran parte de la simulación. Al final de ambas,

las deformaciones de los resultados de los modelos son mayores a las de los ensayos alejándose de lo que para estos ensayos se obtuvo. Las dispersiones de los resultados de las muestras son bajas y casi imperceptibles en la escala utilizada. Se puede decir que en reproducción del comportamiento de deformación vertical el modelo provee una buena aproximación en los primeros ciclos, pero, luego se aleja de los valores experimentales.

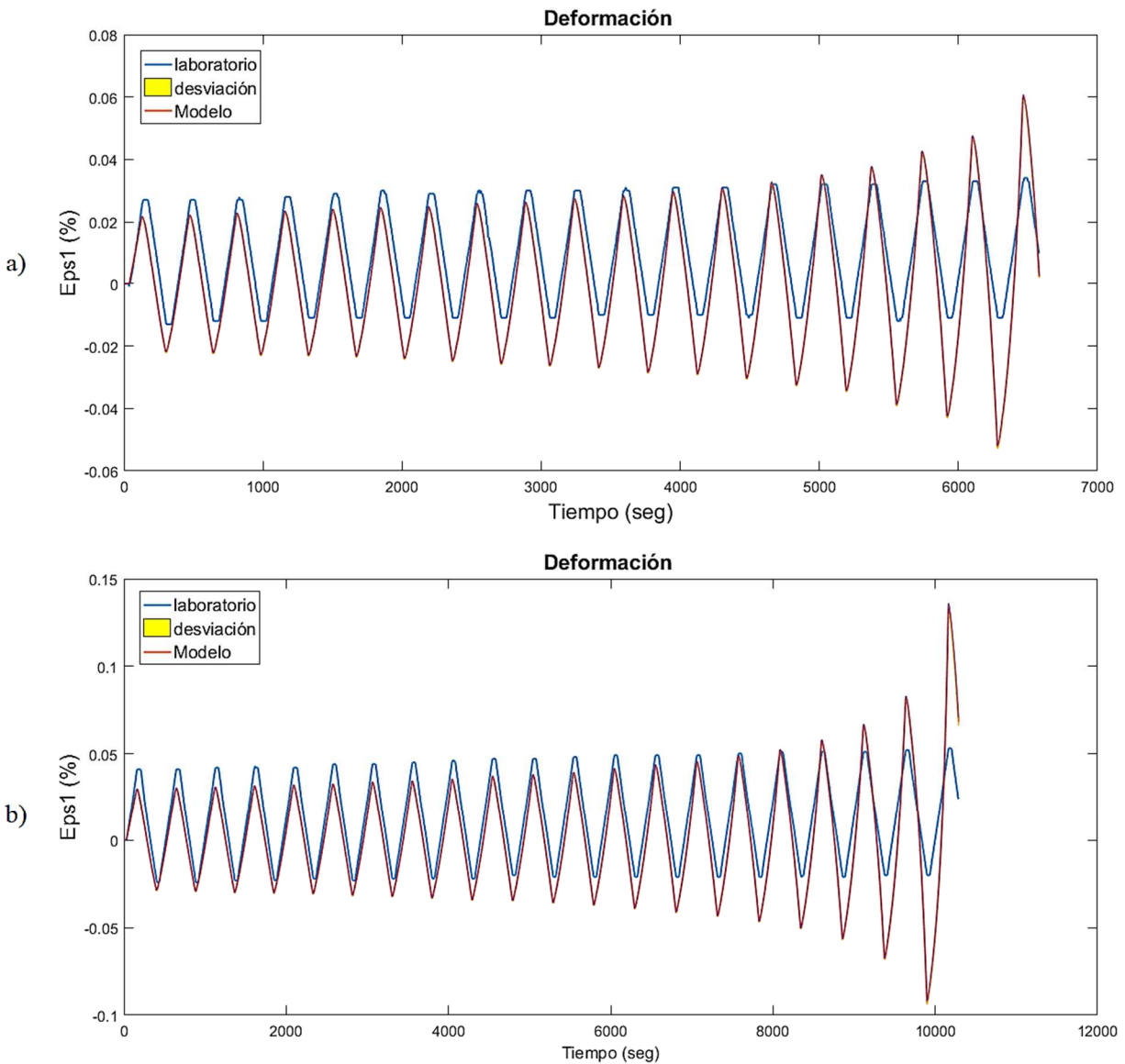


Figura 46. Deformación vertical para datos de laboratorio y modelo en los ensayos TCUI09 (a) y TCUI12 (b).

En la Figura 47 está el comportamiento esfuerzo desviador-deformación vertical de la respuesta de la modelación para los ensayos TCUI9 (a) y TCUI12 (b) utilizando los parámetros de los MAP obtenidos luego del análisis bayesiano de los ensayos TCUI10 y TCUI13 respectivamente.

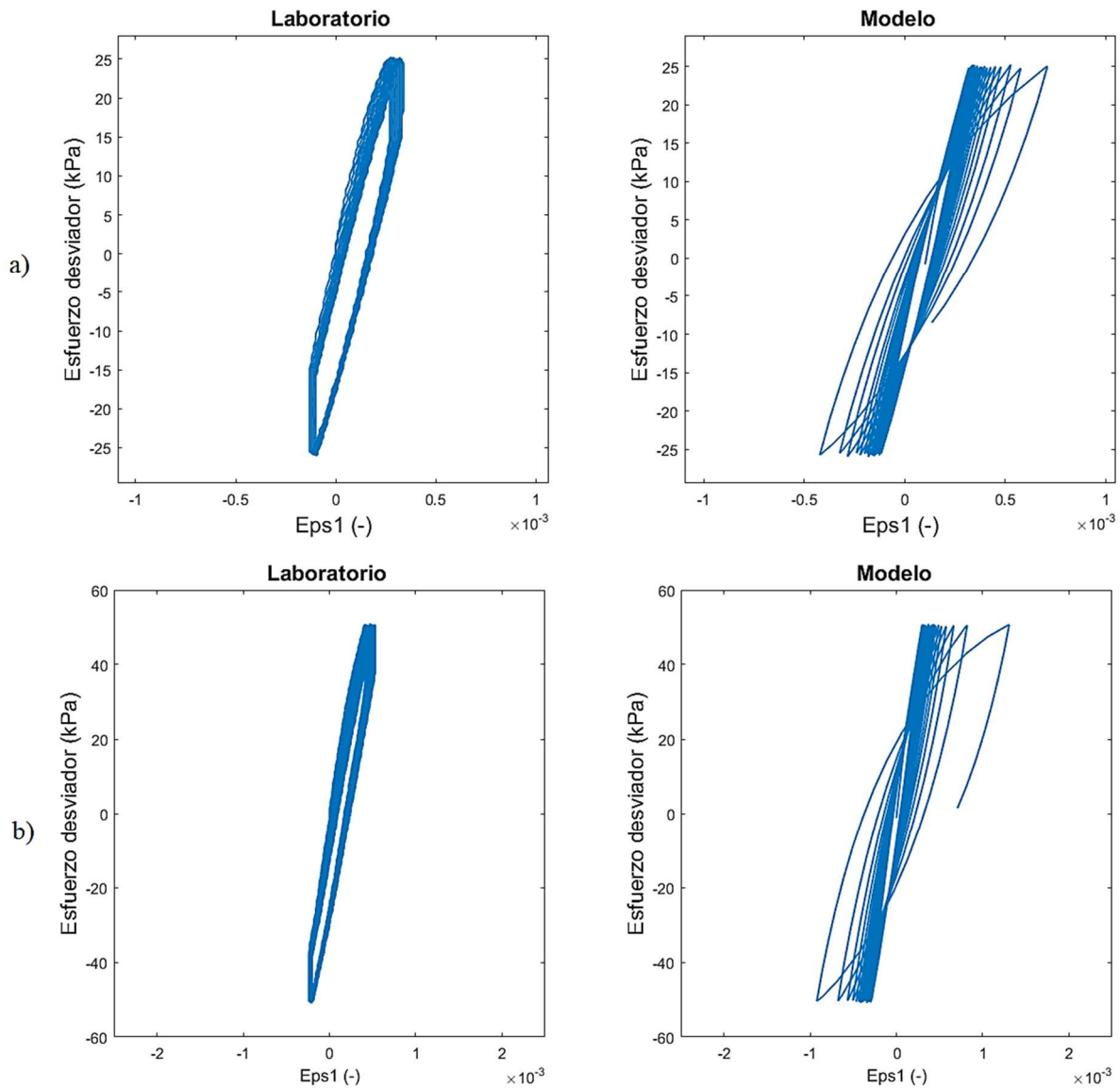


Figura 47. Esfuerzo-deformación para los datos de laboratorio y del modelo para los ensayos (desde arriba hacia abajo) TCUI9 y TCUI12.

Según el resultado obtenido es observable la similitud inicial de la deformación para ambos resultados, capturando el comportamiento del suelo en por lo menos la mitad de los ciclos para cada uno de los ensayos.

Luego de ciertos ciclos ambos resultados comienzan a ofrecer mayores deformaciones, causando que se aprecien valores de deformación vertical de aproximadamente el doble del máximo valor observable (a) para el caso del ensayo TCUI9 el cual no es alarmante pero si algo a tener en cuenta. Para los resultados del ensayo TCUI12 (b) se registran valores de deformación vertical de más de cuatro veces el máximo valor obtenido en laboratorio, resultando esto por fuera de lo que realmente fue captado en el laboratorio.

5.4.2. Verificación de efectos de la variabilidad en la respuesta dinámica de depósito licuable.

El *Wildlife Liquefaction Array* (WLA) tiene como función monitorear los movimientos de tierra y a su vez es un sitio de investigación, este se encuentra localizado en el extremo sur de la falla de San Andrés. El WLA registra numerosos sismos a diario en su área sísmicamente activa, pero, además cuenta con instrumentación suficiente para proveer información esencial para el estudio de diferentes fenómenos, entre ellos el de la licuación.

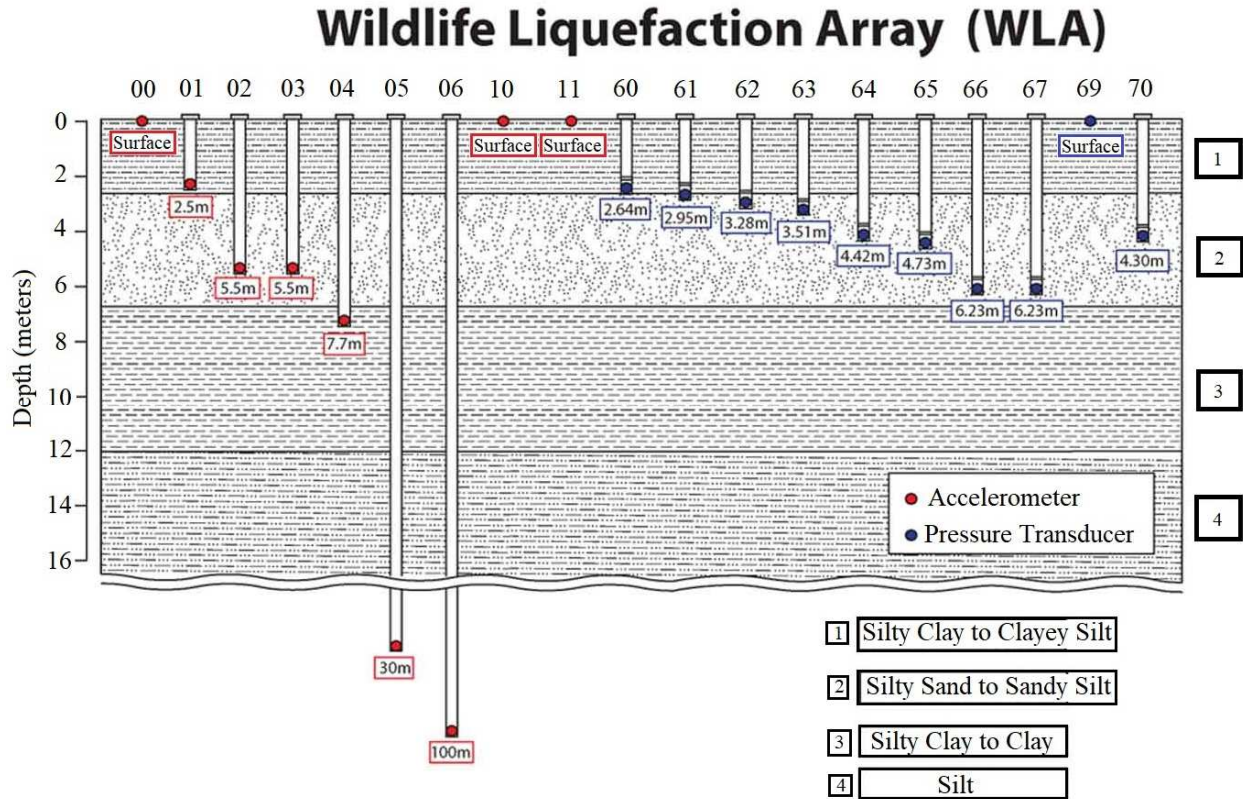


Figura 48. Distribución transversal del WLA. fuente: Modificado de NEES (2015)

El sitio instrumentado es susceptible a licuar, por lo que se instalaron transductores de presión y acelerómetros distribuidos de la manera que se ve en la Figura 48. La distribución de dichos instrumentos se realizó con el fin de captar a diferentes profundidades los incrementos de presión de poros y la respuesta dinámica del suelo ante los movimientos de este (NEES, 2015).

En la Figura 48 adicionalmente de la distribución de la instrumentación se puede observar la estratigrafía del depósito del suelo hasta una profundidad de 16 m. El primer estrato de suelo que se encuentra es clasificado como una arcilla limosa a limo arcilloso, tiene un espesor de unos 2.5 m. Luego se encuentra una capa de arena limosa a limo arenoso. Luego hay una capa de arcilla limosa a arcilla de unos 5.5 m de espesor. Por último hasta una profundidad de 12 m el material

de dicho estrato fue clasificado como limo, el nivel freático del suelo oscila entre 1 m y 2 m de profundidad.

Se realizó la modelación de un depósito con características estratigráficas similares a la de Wildlife. Se utilizó, sin embargo un material arenoso correspondiente a la arena analizada en los capítulos anteriores, la cual no corresponde al sitio de Wildlife. Este análisis permitió sin embargo estudiar los efectos de la variabilidad en los parámetros calibrados sobre la respuesta de sitio modelada.

Un sismo bastante conocido y registrado en este lugar de monitoreo es el sismo Superstition Hills, registrado el 23 de noviembre de 1987. En la Figura 49 se puede apreciar una vista superficial de la ubicación de WLA y el epicentro del sismo Superstition Hills en la parte norte de la falla Superstition Hills a unos 31 km al sur-oeste de WLA (Holzer, Youd, & Hanks, 2016). El sismo Superstition Hills fue registrado con una magnitud de 6.6 Mw y una aceleración pico en la superficie de 0.21 g. En la Figura 50 se presenta el registro vertical y dos horizontales de aceleración del sismo Superstition Hills tanto para la superficie como debajo de la capa licuable. Debido a la rápida respuesta de licuación de la simulación se tomaron los valores de aceleración de Superstition Hills y se dividió a la mitad para observar el comportamiento de la presión de poros debido a la excitación del sismo.

La capa licuable de suelo se encuentra hasta una profundidad de 7.00 m, por lo tanto para la modelación numérica de la columna de suelo del depósito licuable de Wildlife, se toman los primeros 7.50 m de profundidad del depósito.

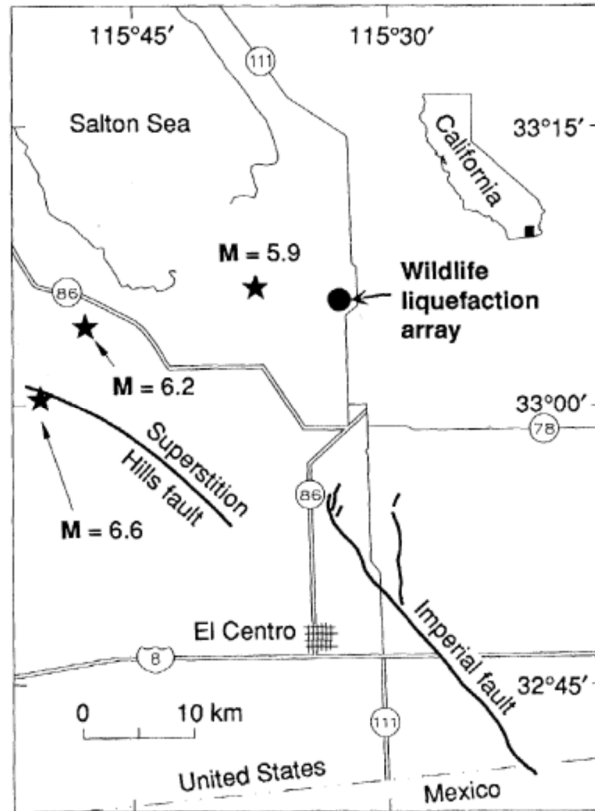


Figura 49. Ubicación geográfica de WLA y epicentro del sismo Superstition Hills. Fuente: tomado de: (Holzer et al., 2016)

Para el análisis numérico se realiza mediante análisis de elementos finitos de una columna de suelo en 2D empleando el software Opensees. Se establece la geometría del suelo en cuatro capas de suelo las cuales fueron enumeradas desde la más profunda hasta la superficie. Para simplicidad del modelo se crean 2 tipos de suelos, una arcilla para las capas 1, 3 y 4; una arena para la capa 2. El nivel freático se establece a una profundidad de 2.00 m. La capa 1 tiene un espesor de 0.50 m y comprende desde 7.50 m hasta 7.00 m de profundidad; la capa 2 tiene un espesor de 4.50 m, entre 7.00 m y 2.50 m de profundidad; la capa 3 tiene un espesor de 0.50 m, entre los 2.50 m y 2.00 m de profundidad y por último la capa 4 tiene un espesor de 2.00 m de espesor, comprendido entre 2.00 m y la superficie del terreno.

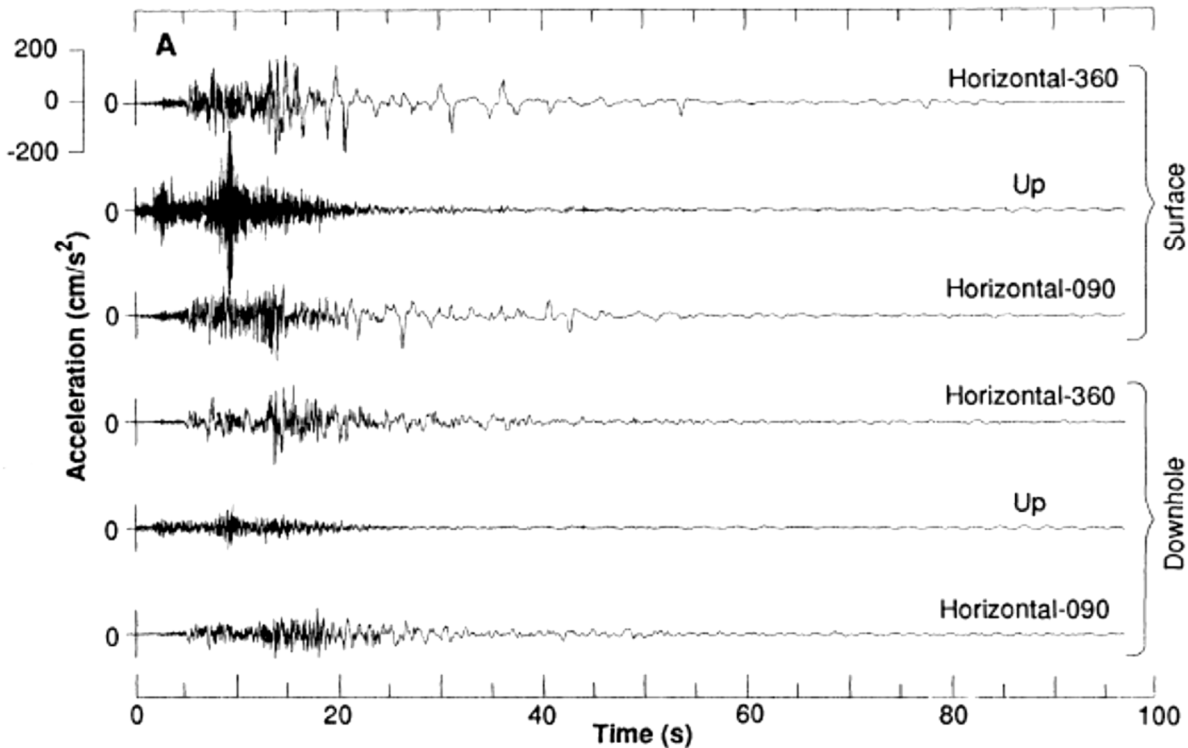


Figura 50. Registro de los sensores el 24 de noviembre de 1987 durante el sismo Superstition Hills. Fuente: (Holzer et al., 2016)

La geometría del enmallado para el uso de elementos finitos consta de 1 elemento en dirección horizontal de 0.50 m de espesor a través de todos los estratos de suelo. El número de elementos en dirección vertical varía según cada una de las capas. El refinado de los elementos es mejor en la dirección vertical puesto que se supone que en dirección horizontal la variación de los resultados podría ser despreciable debido a la naturaleza del suelo. Los elementos utilizados son de 4 nodos, los cuales poseen los grados de libertad presión de poros y desplazamiento. Los grados de libertad del desplazamiento (vertical y horizontal) están amarrados a cualquier profundidad para imponer unos límites periódicos (Elgamal, Yang, & Parra, 2002). Los datos registrados de aceleración del sismo Superstition Hills en la componente horizontal-360, con la modificación

mencionada anteriormente, se aplican en los nodos de la base. La distribución del enmallado en la dirección vertical se puede consultar en la tabla 3.

Tabla 3. Número de elementos en la dirección vertical para cada capa de suelo.

<i>Capa de suelo</i>	<i>Número de elementos</i>
Capa 1	2
Capa 2	18
Capa 3	2
Capa 4	8
Total	30

El material utilizado para la simulación es PDMY (Yang et al., 2008) para los 2 tipos de suelos reseñados anteriormente. Los parámetros utilizados para el material arcilloso provienen de datos típicos para este tipo de material y son consideradas estas propiedades para las capas 1, 3 y 4. Para los parámetros utilizados en el suelo arenoso se utilizaron 100 muestras tomadas de manera aleatoria de la cadena de Markov producto del análisis Bayesiano para el ensayo TCUI10 el cual presentaba las condiciones de esfuerzo de confinamiento inicial con mayor similitud de los tres ensayos a las condiciones que se podía encontrar in situ. También se tiene en cuenta el hecho que, el material del modelo es dependiente de presión y la densidad del estrato de arena es considerada constante y se utiliza un set de parámetros θ_m para cada simulación.

El sismo inducido al modelo es el que aparece en la Figura 51, el cual corresponde al sismo Superstition Hills multiplicado por 0.50, debido a que con los datos originales licua demasiado

pronto y no se logra apreciar bien la respuesta. Como resultado luego de la simulación de las 100 muestras aleatorias de los parámetros se obtiene una serie de respuestas en la superficie referente a la aceleración, de la cual se puede observar el promedio de los resultados (color azul) y la desviación estándar (área amarilla). De dicha Figura se puede resaltar la poca variación de la respuesta en la superficie, observable como desviación estándar. Se infiere de esto que el modelo ofrece respuestas cercanas unas de otras con el set de 100 parámetros utilizados para el cálculo del comportamiento.

También es notable el incremento en la magnitud de la aceleración en la superficie del terreno con respecto a los valores registrados en la base, correspondiente también a los registros de los sensores superficiales y a 7.50 m de profundidad. Se puede observar que inicialmente el comportamiento de la aceleración en la superficie ofrece un comportamiento bastante moderado, hasta aproximadamente 5 segundos de iniciado el fenómeno de excitación. Aumenta los valores de aceleración registrados por el sensor y da lugar a la acumulación de exceso de presión de poros, tal y como se alcanza a apreciar en la Figura 51.

De las mismas muestras para calcular la respuesta superficial de la aceleración horizontal se estimó el promedio de las respuestas de acumulación de presión de poros en función de los primeros 40 segundos del fenómeno y su desviación estándar de los datos a medida que se registraba el fenómeno (Figura 51).

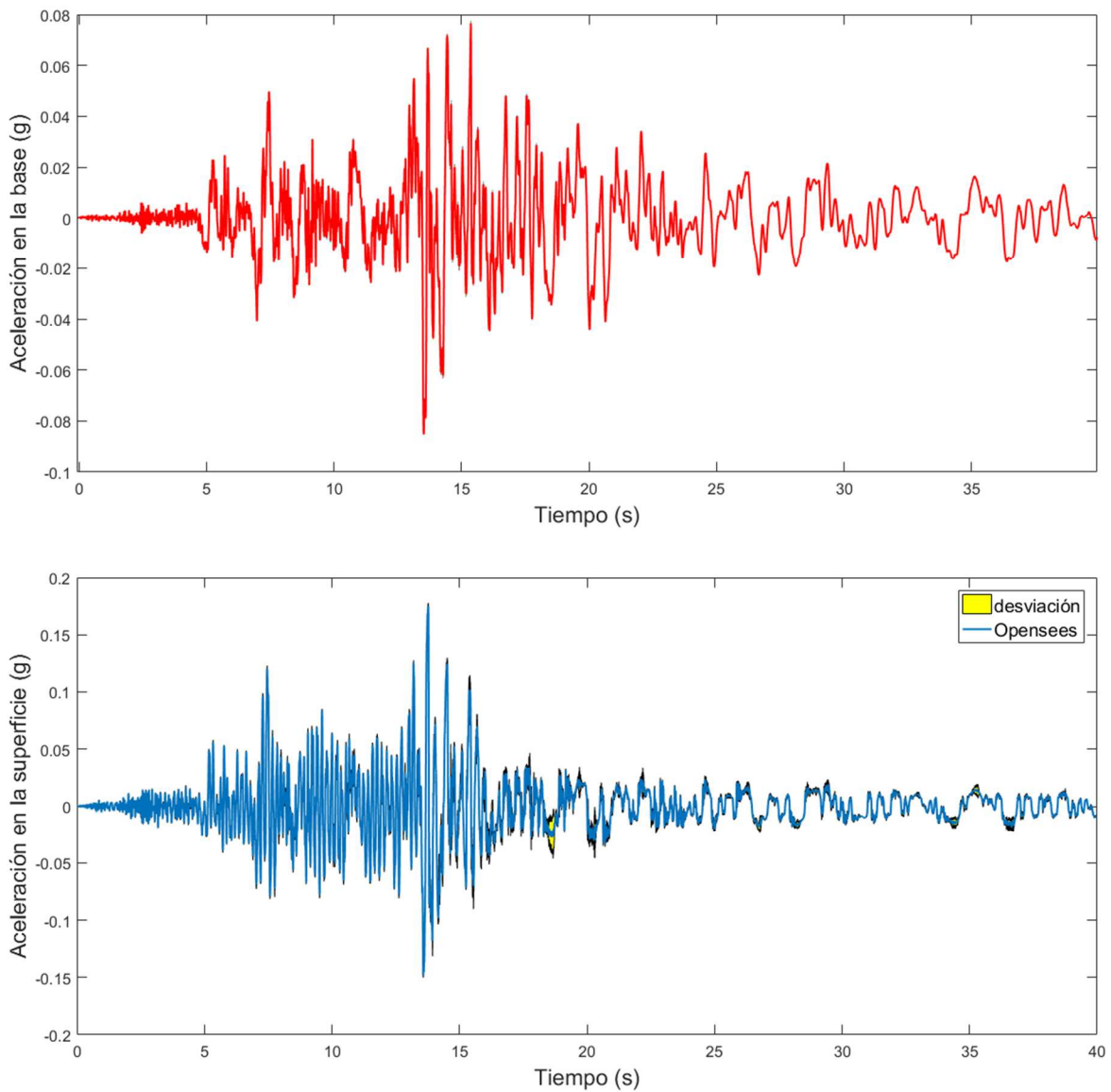


Figura 51. Aceleración en la superficie (azul) y en la base (rojo) de la columna de suelo de WLA luego de la simulación.

Se observa una baja dispersión de las simulaciones con respecto al comportamiento de presión del agua en los poros al observar en la Figura 52 el registro del sensor P5 ubicado a 2.90m de profundidad, profundidad a la cual está ubicado dicho transductor de presión.

La simulación de la respuesta del sismo logra captar el comportamiento de la presión de poros debido al sismo inducido. La respuesta del modelo indica que se acumula más rápidamente el exceso de presión de poros que en lo reportado en el sensor, debido a que el suelo se licúa mucho antes para el modelo que para los datos de WLA.

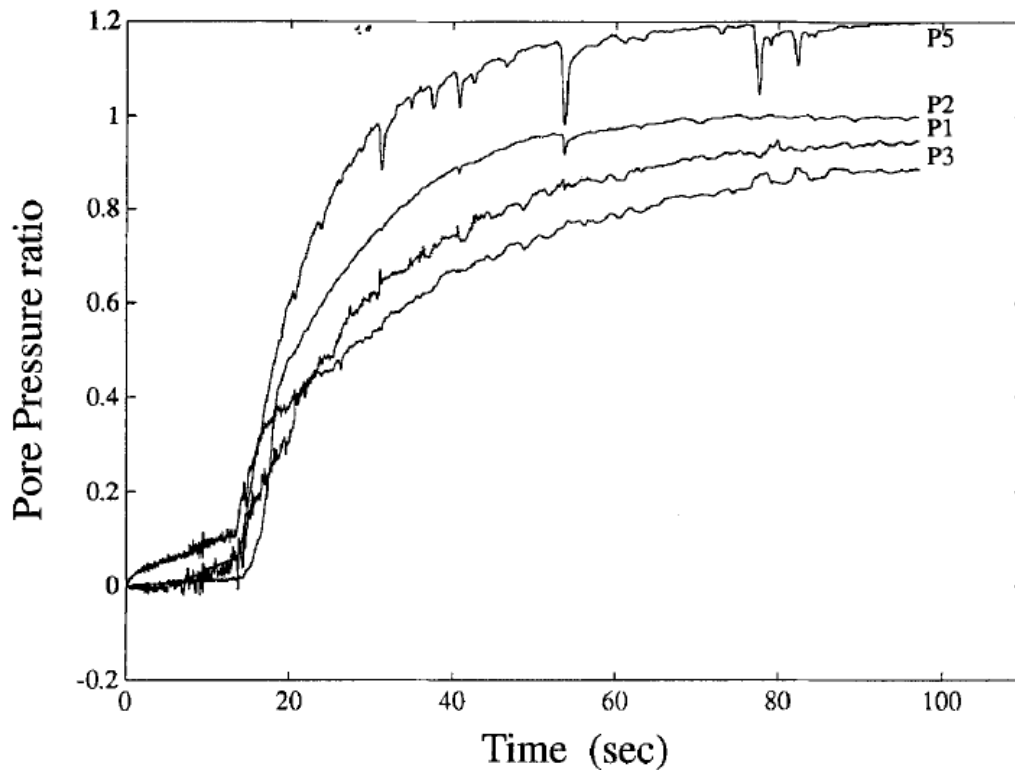


Figura 52. Razón de presión de poros registrado diversos sensores de WLA durante el sismo Superstition Hills. fuente:(T. Leslie. Youd & Holzer, 1994)

Dicho comportamiento se puede atribuir al tipo de suelo utilizado, ya que las clasificaciones son distintas para ambos. La arena de Karlsruhe en las condiciones estudiadas podría ser más susceptible a licuar que la arena limosa a limo arenoso del estrato comprendido entre 2.50 m y 7.00 m de WLA.

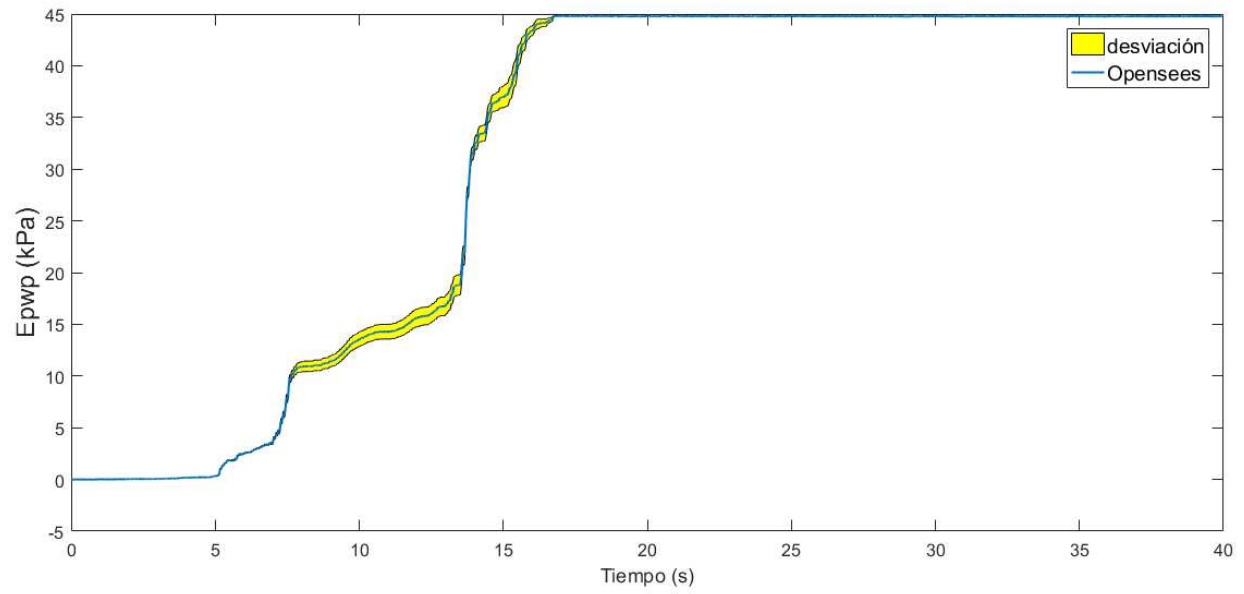


Figura 53. Exceso de presión de poros en función del tiempo. Promedio de los resultados de las 100 muestras (azul) y desviación estándar de los resultados (área amarilla).

CONCLUSIONES

En este trabajo se tomaron datos experimentales de ensayos triaxiales monotónicos drenados y ensayos triaxiales consolidados isotrópicos no drenados, realizados a la Arena de Karlsruhe. También fue necesario utilizar datos del sismo Superstition Hills registrado en el Wildlife Licuefaction Array (WLA). La finalidad de dichos datos era realizar la estimación de la función de densidad de probabilidad de algunos parámetros de un modelo constitutivo a calibrar mediante la evaluación de los resultados posteriores mediante un análisis Bayesiano para cada serie de parámetros. El modelo utilizado para calibrar dichos parámetros fue PressureDependentMultiYield (PDMY), el cual es un modelo constitutivo dependiente de presión que se ha empleado en la simulación de comportamiento de suelos sometidos a carga cíclica.

Los parámetros calibrados según este procedimiento fueron, el ángulo de fricción interno crítico (ϕ_c), módulo cortante máximo de referencia (G_{ref}), coeficiente de Poisson (ν), la constante que contrale el comportamiento contractivo del suelo, contracción (c_I) y el coeficiente dependiente de presión (d). Adicionalmente se evalúa la predicción del error (σ_e), el cual se estima al evaluar los valores normalizados de la deformación vertical (ε_v) y la presión de poros (u).

Para cada parámetro calibrado se obtuvo una distribución de las muestras contenidas en la cadena de Markov, producto del análisis Bayesiano. A los resultados obtenidos fueron evaluados para cada parámetro, la media y el máximo valor a posteriori (MAP) en cada dato y estimada también la desviación estándar del mismo para evaluar la incertidumbre asociada al modelo.

Se establecieron las correlaciones observables entre cada parámetro calibrado. De esa manera se puede decir que para este modelo existe una fuerte correlación negativa entre ν y c_I ; también existe una correlación, positiva, entre d y G_{ref} . Para estas correlaciones se establecen

posibles causantes de obtener dichas relaciones a la física que gobierna el modelo. Para los demás parámetros se alcanzaban a apreciar ciertas correlaciones para las modelaciones de algunos ensayos de laboratorio, que luego no eran visible en otros, por lo tanto no se llega a nada concluyente.

De esta forma se obtuvieron distribuciones de probabilidad para cada uno de los parámetros de entrada del modelo constitutivo utilizado, las cuales fueron utilizadas para evaluar la respuesta mecánica de una columna de suelo del sitio WLA evaluada con un modelo numérico de elementos finitos en 2D construido en el Software Opensees. El modelo consiste en un depósito de suelos de WLA de 7.50 m de profundidad, el cual presenta un estrato licuable que fue reemplazado por arena de Karlsruhe con los parámetros calibrados y que posteriormente se le aplicó en la base un sismo a través de un registro sísmico real. Los resultados de la modelación son consistentes con la naturaleza del fenómeno de licuación observado en la arena licuable de WLA, teniendo en cuenta la diferencia entre los tipos de suelo encontrados en el sitio.

La comparación entre la respuesta del modelo y los registros de presión de poros de los ensayos triaxiales indica que el método empleado para la selección de los parámetros de calibración es adecuado, en tanto que los resultados de la modelación efectuada con el modelo calibrado con este método ofrecen una buena aproximación de la respuesta mecánica de la arena estudiada. En todos los casos se observó que el recorrido del exceso de presión del agua en los poros en cada ciclo de carga era menor en casi toda la duración del element test simulado en comparación con el ensayo empleado para la calibración. Se aprecia una buena aproximación del comportamiento esfuerzo-deformación de la arena en los ensayos de laboratorio vs. Los element tests simulados, con la mayor diferencia visualizada casi siempre en el primer ciclo de carga, debido a que para primer ciclo de carga la deformación era siempre mayor a los datos obtenidos

de la simulación, pero esta diferencia era esperada. Para algunos ensayos la variación en las deformaciones se observó en los valores positivos y en otros las variaciones en el comportamiento se observaron en los valores negativos. Las simulaciones siempre ofrecen una respuesta simétrica debido a que no tienen dependencia del ángulo de Lode, por lo tanto, no se verá una diferencia entre carga y descarga como si sucede en los ensayos de laboratorio y en cada ensayo usado en la calibración.

El análisis Bayesiano resultó ser un método de calibración que ofrece resultados que con la función objetivo utilizada buscan el menor error, realizando la selección de valores para los parámetros que reprodujeran el fenómeno de una manera lo más cercana a los resultados de laboratorio. Al realizarse la comparación entre los resultados de laboratorio y los resultados de las simulaciones con el análisis Bayesiano, se puede decir que el análisis Bayesiano ofrece una buena aproximación a la respuesta esperada del modelo de elementos finitos y la variabilidad de la respuesta de la aceleración en la superficie del estrato de suelo potencialmente licuable debido a la incertidumbre del modelo es bastante baja, al igual que la variabilidad de las respuesta de la presión de poros y deformación vertical.

Anexos

A.1 Código en lenguaje de Matlab para inferencia bayesiana.

```

clear
close all

delete RecordPar.txt
delete RecordPwp.txt
delete RecordPost.txt
delete RecordStrain.txt

%%load TData16.mat      %%lab data
n=5000; %number of data points from lab used for comparison

prior1 = @(par1) normpdf(par1,31.2,5);      % prior for angle
prior2 = @(par2) normpdf(par2,108355,1500); % prior for Gmax
prior3 = @(par3) normpdf(par3,0.3,0.04);    % prior for poisson
prior4 = @(par4) normpdf(par4,0.05,0.03);   % prior for c1
prior5 = @(par5) normpdf(par5,0.5,0.01);    % prior for d
prior6 = @(par6) normpdf(par6,0.15,0.03);   % prior for standard deviation
of the model

RPwp=load('Pwp.txt'); %Recorded pore pressure (lab)
RPwp=RPwp(1:n);
RPwp=RPwp-RPwp(1,1); % Pore pressure excess      %%%

%RVertS=eps1; %Recorded vertical strain (lab)
RVertS=load('VertStrain.txt'); %Recorded vertical strain (lab) %%%
RVertS=RVertS(1:n);

RDev=load('Deviator.txt'); %Recorded vertical strain (lab)
RDev=RDev(1:n);

%Correcting recorded time
% RTime=load('Time.txt');
% for j=1:length(RTime)-1
%     if RTime(j+1)==RTime(j); RTime(j+1)=RTime(j+1)+1e-4; end
% end

%parI: exponent of gammaref, c1, poisson, std deviation
%[ RPwp/max(RPwp): RVertS/max(abs(RVertS))]: vector of normalized pwp and
strains
%Triaxial( parI,n ): yields a vector of normalized modeled pwp and strains
post = @(parI) sum( log( normpdf (Triaxial( parI,n ), [ RPwp/max(RPwp);
RVertS/max(abs(RVertS))] , parI(6) ) ) ... % likelihood
+ log( prior1(parI(1)) ) + log( prior2(parI(2)) ) + log(
prior3(parI(3)) ) + log( prior4(parI(4)) ) + log( prior5(parI(5)) ) + log(
prior6(parI(6)) ) % priors

tic

initial = [31.2 108355 0.3 0.05 0.5 0.15];
nsamples = 5000; %número de muestras
trace = slicesample(initial,nsamples,'logpdf',post,'width',[5 4000 0.1 0.05
0.1 0.2],'burnin',1000);%Enero 2

```

```

toc

load ('RecordPost.txt')
load ('RecordPar.txt')
load ('RecordPwp.txt')
load ('RecordStrain.txt')

[maxim,pos]=max(RecordPost);

%Recording modeled trace

    save('tracemod.mat','trace')

% %
figure(5)
plot(1:2*n, [ RPwp/max(RPwp); RVertS/max(abs(RVertS))], 1:2*n,
Triaxial(RecordPar(pos,:),n ),'--')
load stress1.out %Modeled stress with time
load strain1.out %Modeled strain with time

figure(6)

subplot(1,2,1)
plot(RVertS, RDev)
xlim([-0.0025 0.0025])

subplot(1,2,2)
plot(-strain1(:,4), (-stress1(:,4)+ stress1(:,3) ) )
xlim([-0.0025 0.0025])

figure(7)
plot( -( stress1(:,4)+2*stress1(:,3))/3,- stress1(:,4)+ stress1(:,3) )

nn1=1;
nn2=length(trace(:,1));
%traces
figure(1)
subplot(7,1,1);plot(trace(:,1));
subplot(7,1,2);plot(trace(:,2));
subplot(7,1,3);plot(trace(:,3));
subplot(7,1,4);plot(trace(:,4) );
subplot(7,1,5);plot(trace(:,5) );
subplot(7,1,6);plot(trace(:,6) );

figure(2)
subplot(1,6,1);hist(trace(nn1:nn2,1),8)
subplot(1,6,2);hist(trace(nn1:nn2,2),8)
subplot(1,6,3);hist(trace(nn1:nn2,3),8)
subplot(1,6,4);hist(trace(nn1:nn2,4),8)
subplot(1,6,5);hist(trace(nn1:nn2,5),8)

```

```
subplot(1,6,6);hist(trace(nn1:nn2,6),8)

figure(3)
plotmatrix(vertcat(trace(nn1:nn2,:)));
```

A.2 Código en lenguaje de Matlab para escritura de los parámetros y llamar a software

Opensees.

```
function OutPwpStr=Triaxial(par,n)

delete press1.out stress1.out strain1.out

c1=par(4);
if c1<0; c1=0; end
if c1>0.2; c1=0.2; end

d1=0;

sigma0=300; %Initial effective confining pressure
refpress=300; %Initial effective confining pressure taken as reference
pressure at which Gmax is measured

%grefexp=par(1); %in m/m
phi=par(1);
v=par(3); %Poisson

if v>0.48; v=0.48; end
if v<0.05; v=0.05; end

Gmax=par(2); %small strain shear modulus
B=2/3*Gmax*(1+v)/(1-2*v); %small strain bulk modulus

phaseT=phi;

d=par(5); %press depend coef

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Writing parameters to tcl file

fid = fopen('Parameters.tcl','w+');
fprintf(fid,['#Input parameters' ] );
fprintf(fid,'\n');
fprintf(fid,['set friction ' ,num2str(phi)]);
fprintf(fid,'\n');
fprintf(fid,['set phaseTransform ' ,num2str(phaseT)]);
```

```

fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, ['set G1 ' , num2str(Gmax)]);
fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, ['set B1 ' , num2str(B)]);
fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, ['set refpress ' , num2str(refpress)]);
fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, ['set sigma0 ' , num2str(sigma0)]);
fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, ['set c1 ' , num2str(c1)]);
fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, ['set d1 ' , num2str(d1)]);
fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, ['set d ' , num2str(d)]);
fclose(fid);

%Recording trial parameters
fid = fopen('RecordPar.txt', 'a+');
fprintf(fid, num2str(par(1)));
fprintf(fid, ' ');
fprintf(fid, num2str(par(2)));
fprintf(fid, ' ');
fprintf(fid, num2str(par(3)));
fprintf(fid, ' ');
fprintf(fid, num2str(par(4)));
fprintf(fid, ' ');
fprintf(fid, num2str(par(5)));
fprintf(fid, ' ');
fprintf(fid, num2str(par(6)));
fprintf(fid, '\n');
fclose(fid);

! opensees TriaxialCU.tcl

load press1.out %Modeled pore water pressure with time
load strain1.out %Modeled strain with time

RTime=load('Time.txt');%Corrected Time from lab data   %%%
RTime=RTime(1:n);

Mtime=press1(:,1); %Model time
Mpw=-press1(:,2); %Modeled pore water pressure
Mstrain=-strain1(:,4)+strain1(1,4); %Modeled vertical strain

%Output pore water pressure and vertical strain at data points from lab data
PwpTr=interp1(Mtime,Mpw,RTime,'linear','extrap'); %Interpolating to time
points recorded in lab
StrainTr=interp1(Mtime,Mstrain,RTime,'linear','extrap'); %Interpolating to
time points recorded in lab

```

```

%Extracting recorded data
RPwp=load('Pwp.txt'); %Recorded pore pressure (lab)
RPwp=RPwp(1:n);
RVertS=load('VertStrain.txt'); %Recorded vertical strain (lab)
RVertS=RVertS(1:n);

OutPwpStr=[PwpTr/max(RPwp); StrainTr/max(abs(RVertS)) ] ;

%Recording posterior (taken from Triaxial.m
prior1 = @(par1) normpdf(par1,31.2,5); % prior for angle
prior2 = @(par2) normpdf(par2,108355,1500); % prior for Gmax
prior3 = @(par3) normpdf(par3,0.3,0.04); % prior for poisson
prior4 = @(par4) normpdf(par4,0.05,0.03); % prior for c1
prior5 = @(par5) normpdf(par5,0.5,0.01); % prior for d
prior6 = @(par6) normpdf(par6,0.15,0.03); % prior for standard deviation
of the model

%postRecord = sum( log( normpdf(OutPwpStr, [ RPwp/max(RPwp);
RVertS/max(abs(RVertS))] , par(4) ) ) ) ... % likelihood
% + log( prior1(par(1)) ) + log( prior2(par(2)) ) + log(
prior3(par(3)) ) + log( prior4(par(4)) )+ log( prior5(par(5)) ) ) %priors
postRecord = sum( log( normpdf (OutPwpStr, [ RPwp/max(RPwp);
RVertS/max(abs(RVertS))] , par(6) ) ) ) ... % likelihood
+ log( prior1(par(1)) ) + log( prior2(par(2)) ) + log(
prior3(par(3)) ) + log( prior4(par(4)) ) + log( prior5(par(5)) ) + log(
prior6(par(6)) ) % priors

fid = fopen('RecordPost.txt','a+');
fprintf(fid,num2str(postRecord'));
fprintf(fid,'\n');
fclose(fid);

end

```

A.3 Código en lenguaje de programación TCL para simular ensayo triaxial cíclico no drenado al element test.

```

wipe

source Parameters.tcl

set gamma 0.600 ;# Newmark integration parameter

```

```

set dt 0.5 ;# time step for analysis, does not have to be the same
as accDt.
set numSteps 23000 ;# number of time steps of simulation
set rhoS 1.91 ;# saturated mass density
set rhoF 1.00 ;# fluid mass density
set densityMult 1. ;# density multiplier

set Bfluid 2.2e6 ;# fluid shear modulus
set fluid1 1 ;# fluid material tag
set solid1 10 ;# solid material tag

set accMul 2 ;# acceleration multiplier
set pi 3.1415926535 ;
set inclination 0;

set loadIncr [expr $sigma0/4.0] ;# Initial load (will be multiplied by
4 because is applied on 4 nodes per direction)
set loadIncr2 0.25 ;# Initial load (will be multiplied by 4 because is
applied on 4 nodes)
set loadIncrLat [expr $loadIncr2/2.0] ;# Lateral load (will be
multiplied by 4)

set massProportionalDamping 0.0 ;
set InitStiffnessProportionalDamping 0.001;

set bUnitWeightX [expr ($rhoS-
$rhoF)*9.81*sin($inclination/180.0*$pi)*$densityMult] ;# buoyant unit weight
in X direction
set bUnitWeightY 0.0
;# buoyant unit weight in Y direction
set bUnitWeightZ [expr -($rhoS-$rhoF)*9.81*cos($inclination/180.0*$pi)]
;# buoyant unit weight in Z direction
set ndm 3 ;# space dimension

model BasicBuilder -ndm $ndm -ndf $ndm

nDMaterial PressureDependMultiYield $solid1 $ndm 0.0 $G1 $B1 $friction 0.1
$refpress $d \
;# phaseTransform $c1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
#nDMaterial PressureDependMultiYield02 $solid1 $ndm 0.0 $G1 $B1 $friction
0.1 $refpress 0.5 \
# ;# phaseTransform $c1 0.0
$d1 0.0 0 0 0.8 0 ;#contra1 contra3

dilat1 dilat3 c2 d2 11 12
nDMaterial FluidSolidPorous $fluid1 $ndm $solid1 $Bfluid

node 1 0.00000 0.0000 0.00000
node 2 0.00000 0.0000 1.00000
node 3 0.00000 1.0000 0.00000
node 4 0.00000 1.0000 1.00000
node 5 1.00000 0.0000 0.00000
node 6 1.00000 0.0000 1.00000
node 7 1.00000 1.0000 0.00000

```

```
node      8      1.00000      1.0000      1.00000
```

```
fix      1      1      1      1
fix      2      1      1      0
fix      3      1      0      1
fix      4      1      0      0
fix      5      0      1      1
fix      6      0      1      0
fix      7      0      0      1
fix      8      0      0      0
```

```
#element bbarBrick      1      1      5      7      3      2      6      8      4      $fluid1
$bUnitWeightX $bUnitWeightY $bUnitWeightZ
element bbarBrick      1      1      5      7      3      2      6      8      4      $fluid1
0      0      0
```

```
updateMaterialStage -material $solid1 -stage 0
updateMaterialStage -material $fluid1 -stage 0
```

```
# equalDOF
# tied nodes around
equalDOF      2      4      3
equalDOF      2      6      3
equalDOF      2      8      3

equalDOF      5      6      1
equalDOF      5      7      1
equalDOF      5      8      1

equalDOF      3      4      2
equalDOF      3      7      2
equalDOF      3      8      2
```

```
set nodeList {}
for {set i 1} {$i <= 8} {incr i 1} {
    lappend nodeList $i
}
```

```
set elementList {}
for {set i 1} {$i <= 1} {incr i 1} {
    lappend elementList $i
}
```



```

timeSeries Path 10 -time {0 90000} -values {1 1}
pattern Plain 1 10 {
load 2 0 0 -$loadIncr
load 3 0 -$loadIncr 0
load 4 0 -$loadIncr -$loadIncr
load 5 -$loadIncr 0 0
load 6 -$loadIncr 0 -$loadIncr
load 7 -$loadIncr -$loadIncr 0
load 8 -$loadIncr -$loadIncr -$loadIncr
}

# GRAVITY APPLICATION (elastic behavior)
# create the SOE, ConstraintHandler, Integrator, Algorithm and Numberer
system ProfileSPD
test NormDispIncr 1.E-10 25 2
constraints Transformation
integrator LoadControl 0.1
algorithm Newton
numberer RCM
analysis Static
analyze 10

# switch the material to plastic
updateMaterialStage -material $fluid1 -stage 1
updateMaterialStage -material $solid1 -stage 1

analyze 10

setTime 0.0 ;# reset time, otherwise reference time is not zero for time
history analysis
wipeAnalysis

##### create recorders #####
#eval "recorder Node -file allNodesDisp.out -time -node $nodeList -dof 1 2
3 -dT 0.01 disp"
#eval "recorder Node -file allNodesAcce.out -time -node $nodeList -dof 1 2 3
-dT 0.01 accel"
#eval "recorder Node -file Pwp.out -time -node $nodeList -dof 3 -dT 0.01
vel"
eval "recorder Element -ele $elementList -time -file stress1.out -dT 0.01
material 1 stress"
eval "recorder Element -ele $elementList -time -file strain1.out -dT 0.01
material 1 strain"
eval "recorder Element -ele $elementList -time -file press1.out -dT 0.01
material 1 pressure"

##### create dynamic time history analysis #####

```

```

timeSeries Path 20 -fileTime Time.txt -filePath Deviator.txt
pattern Plain 2 20 {
load 2 0 0 -$loadIncr2
load 4 0 0 -$loadIncr2
load 6 0 0 -$loadIncr2
load 8 0 0 -$loadIncr2
}

#timeSeries Path 20 -fileTime Time.txt -filePath Deviator.txt
#pattern Plain 2 20 {
#load 2 0 0 -$loadIncr2
#load 3 0 $loadIncrLat 0
#load 4 0 $loadIncrLat -$loadIncr2
#load 5 $loadIncrLat 0 0
#load 6 $loadIncrLat 0 -$loadIncr2
#load 7 $loadIncrLat $loadIncrLat 0
#load 8 $loadIncrLat $loadIncrLat -$loadIncr2
#}

rayleigh $massProportionalDamping 0.0 $InitStiffnessProportionalDamping 0.
integrator Newmark $gamma [expr pow($gamma+0.5, 2)/4]
constraints Penalty 1.e18 1.e18 ;# can't combine with test NormUnbalance
test NormDispIncr 1.0e-5 25 0 ;# can't combine with constraints Lagrange
#algorithm Newton ;# tangent is updated at each iteration
algorithm ModifiedNewton ;# tangent is updated at the begining of each
time step not each iteration
system ProfileSPD ;# Use sparse solver. Next numberer is
better to be Plain.
numberer Plain ;# method to map between between equation
numbers of DOFs
analysis VariableTransient ;# splitting time step requires
VariableTransient

##### perform the Analysis and record time used #####
set startT [clock seconds]
#analyze $numSteps $dt [expr $dt/64] $dt 10
analyze $numSteps $dt
set endT [clock seconds]
puts "Execution time: [expr $endT-$startT] seconds."
#eval "recorder Element -ele $elementList -file backbone.out -dT 1000
material 1 backbone 80 100 200 300"

```

Lista de referencias

- Andrus, R. D., & Stokoe, K. H. (2000). *Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity*. *126(11)(FEBRUARY 2000)*, 1015–1025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126)
- Arulanandan, K., & Scott, R. F. (1993). *Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems*. A.A. Balkema.
- ASTM. (2011). Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. *Norm*. <https://doi.org/10.1520/D7181>
- ASTM. (2013). D5311 - Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil. *Astm D5311M-13, 92(Reapproved)*, 1–11. <https://doi.org/10.1520/D5311>
- Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2005). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. Chicester, UK: John Wiley & Sons.
- Boulanger, R., & Idriss, I. (2014). *CpPT and SPT Based Liquefaction Triggering*. (April).
- Boulanger, R. W., & Ziotopoulou, K. (2015). *PM4Sand (Version 3): a Sand Plasticity Model for Earthquake Engineering*. (March).
- Casagrande, A. (1965). The role of ‘Calculated Risk’ in Earthwork and Foundation Engineering. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 91(4)*, 1–40.
- Chen, J. L. (2010). Seismic Behaviour of Retaining Wall-Backfill Systems with Vegetation. *IET Conference Proceedings*, 482-487(5). Retrieved from <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2010.0475>
- Ching, J., & Chen, Y.-C. (2007). Transitional Markov Chain Monte Carlo Method for Bayesian

- Model Updating, Model Class Selection, and Model Averaging. *Journal of Engineering Mechanics*, 133(7), 816–832. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2007\)133:7\(816\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2007)133:7(816))
- Ching, J., & Wang, J.-S. (2016). Application of the Transitional Markov Chain Monte Carlo Algorithm to Probabilistic Site Characterization. *Engineering Geology*, 203, 151–167. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.10.015>
- Dafalias, Y. F., & Manzari, M. T. (2004). Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change Effects. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(6), 622–634.
- Das, B. M. (2006). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* (5th ed.). México D.F.: Cengage Learning.
- Deodatis, G. (1996). Non-stationary Stochastic Vector Processes: Seismic Ground Motion Applications. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 11(3), 149–167.
- Diyaljee, V. A., & Raymond, G. P. (1982). Repetitive Load Deformation of Cohesionless Soil. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 108(10), 1215–1229.
- Elgamal, A., Yang, Z., & Parra, E. (2002). Computational Modeling of Cyclic Mobility and Post-Liquefaction Site Response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(4), 259–271. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00022-2)
- Elgamal, A., Yang, Z., Parra, E., & Ragheb, A. (2003). Modeling of Cyclic Mobility in Saturated Cohesionless Soils. *International Journal of Plasticity*, 19(6), 883–905. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(02\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(02)00010-4)
- Fuentes, W., & Triantafyllidis, T. (2015). ISA Model: A Constitutive Model for Soils with Yield Surface in the Intergranular Strain Space. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39(11), 1235–1254. <https://doi.org/10.1002/nag.2370>

- Gras, J. P., Sivasithamparam, N., Karstunen, M., & Dijkstra, J. (2017). Strategy for Consistent Model Parameter Calibration for Soft Soils Using Multi-Objective Optimisation. *Computers and Geotechnics*, *90*, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.06.006>
- Groholski, D. R., Hashash, Y. M. A., & Matasovic, N. (2014). Learning of Pore Pressure Response and Dynamic Soil Behavior from Downhole Array Measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *61–62*, 40–56. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.01.018>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, *4*(2), 135–143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Hettler, A. (1981). Verschiebungen starrer und elastischer Gründungskörper in Sand bei monotoner und zyklischer Belastung. *Institut Für Bodenmechanik Und Felsmechanik Der Universität Fridericiana*, *90*.
- Holzer, T. . L. ., Youd, T. . L. ., & Hanks, T. . C. . (2016). Dynamics of Liquefaction during the 1987 Superstition Hills , California , Earthquake. *American Association for the Advancement of Science Stable*, *244*(4900), 56–59.
- INVIAS. (2013). *Normas de ensayo para materiales de carreteras. Sección 100*. 798. Retrieved from <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- Irigaray, C. (2012). *Susceptibilidad a Licuefacción En La Vega De Granada (España)*. (January).
- Ismael, B., & Lombardi, D. (2019). Evaluation of Liquefaction Potential for Two Sites Due to the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence. In N. Sundararajan, M. Eshagh, H. Saibi, M.

- Meghraoui, M. Al-Garni, & B. Giroux (Eds.), *On Significant Applications of Geophysical Methods: Proceedings of the 1st Springer Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG-1), Tunisia 2018* (pp. 237–241). https://doi.org/10.1007/978-3-030-01656-2_54
- KOKUSHO, T. (1987). In-situ Dynamic Soil Properties and Their Evaluations. *Proc. 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Retrieved from <http://ci.nii.ac.jp/naid/80003882823/en/>
- Kondner, R. L. (1963). Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 89(1), 115--144.
- Kutter, B. L., Carey, T. J., Hashimoto, T., Zeghal, M., Abdoun, T., Kokkali, P., ... Manzari, M. T. (2018). *LEAP-GWU-2015 Experiment Specifications, Results, and Comparisons*. 113(May 2017), 616–628.
- Manzari, M. T., Kutter, B. L., Zeghal, M., Iai, S., Tobita, T., Madabhushi, S. . P. G., ... Armstrong, R. J. and others. (2014). LEAP Projects: Concept and Challenges. In *n Proceedings, 4th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation* (pp. 109--116).
- Markov, A. A. (1906). Rasprostranenie zakona bol'shiih chisel na velichiny, zavisyaschie drug ot druga. *Izvestiya Fiziko-Matematicheskogo Obschestva Pri Kazanskom Universitete*, 15, 135–156.
- MASING, G. (1926). Eigenspannumyen und verfeshungung beim messing. In *Proc. Inter. Congress for Applied Mechanics* (pp. 332–335).
- Mercado, V., El-Sekelly, W., Zeghal, M., Abdoun, T., Dobry, R., & Thevanayagam, S. (2017). Characterization of the Contractive and Pore Pressure Behavior of Saturated Sand Deposits

- Under Seismic Loading. *Computers and Geotechnics*, 82, 223–236.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.10.015>
- Mercado, V., Ochoa-Cornejo, F., Astroza, R., El-Sekelly, W., Abdoun, T., Pastén, C., & Hernández, F. (2019). Uncertainty Quantification and Propagation in the Modeling of Liquefiable Sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 123(February), 217–229.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.04.016>
- Meyerhof, G. G. (1974). Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 11(2), 223–229. <https://doi.org/10.1139/t74-018>
- Montgomery, J., & Boulanger, R. W. (2017). Effects of Spatial Variability on Liquefaction-Induced Settlement and Lateral Spreading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(1), 04016086. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001584](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001584)
- Mróz, Z. (1967). On the Description of Anisotropic Workhardening. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 15(3), 163–175. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(67\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0022-5096(67)90030-0)
- Mróz, Z., Norris, V. A., & Zienkiewicz, O. C. (1979). Application of an Anisotropic Hardening Model in the Analysis of Elasto–Plastic Deformation of Soils. *Géotechnique*, 29(1), 1–34.
<https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.1>
- NEES (Network for Earthquake Engineering Simulation). (2015). Wildlife Liquefaction Array. Retrieved September 25, 2019, from <http://www.nees.ucsb.edu/facilities/wla>
- Neil, R. (2003). Slice sampling (with discussion). *The Annals of Statistics*, 31(3), 705–767.
 Retrieved from [http://www.jstor.org/stable/10.2307/3448413%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Slice+sampling+\(with+discussion\)#6](http://www.jstor.org/stable/10.2307/3448413%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Slice+sampling+(with+discussion)#6)

- Niemunis, A., & Herle, I. (1997). Hypoplastic Model for Cohesionless Soils with Elastic Strain Range. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 2(4), 279–299. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1484\(199710\)2:4<279::AID-CFM29>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1484(199710)2:4<279::AID-CFM29>3.0.CO;2-8)
- Patra, S. K., & Haldar, S. (2018). *Response of Monopile Supported Offshore Wind Turbine in Liquefied Soil*. (December).
- Popescu, R., Prevost, J., & Deodatis, G. (2007). 3D Effects in Seismic Liquefaction of Stochastically Variable Soil Deposits. In *Risk and Variability in Geotechnical Engineering*.
- Prevost, J. H., & Popescu, R. (1994). *An assessment of VELACS" Class A" predictions*. Buffalo, NY US.: US National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER).
- Prevost, Jean H. (1985). A Simple Plasticity Theory for Frictional Cohesionless Soils. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 4(1), 9–17. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(85\)90030-0](https://doi.org/10.1016/0261-7277(85)90030-0)
- Puzrin, A. M. (2012). Small Strain Nonlinearity. In *Constitutive Modelling in Geomechanics: Introduction* (pp. 155–166). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27395-7>
- Seed, B. (1979). Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation gfor Level Ground During Earthquakes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 105.
- Sivasithamparam, N., Karstunen, M., & Bonnier, P. (2015). Modelling Creep Behaviour of Anisotropic Soft Soils. *Computers and Geotechnics*, 69, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.04.015>
- Taiebat, M., & Dafalias, Y. F. (2008). SANISAND: Simple Anisotropic Sand Plasticity Model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(8), 915–

948. <https://doi.org/10.1002/nag.651>

Tang, C., Phoon, K.-K., Zhang, L., & Li, D.-Q. (2017). Model Uncertainty for Predicting the Bearing Capacity of Sand Overlying Clay. *International Journal of Geomechanics*, 17(7), 04017015. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000898](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000898)

Whitman, R. V. (2000). Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(7), 583–593. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2000\)126:7\(583\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:7(583))

Wichtmann, T., & Triantafyllidis, T. (2004). Influence of a Cyclic and Dynamic Loading History on Dynamic Properties of Dry Sand, part I: cyclic and dynamic torsional prestraining. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(2), 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2003.10.004>

Wichtmann, Torsten. (n.d.). Torsten wichtmann. Retrieved September 28, 2019, from Bauhaus-Universität Weimar website: <http://www.torsten-wichtmann.de/>

Wichtmann, Torsten. (2005). Explicit Accumulation Model for Non-Cohesive Soils Under Cyclic Loading. *Institut Für Grundbau Und Bodenmechanik, Phd*, 274. <https://doi.org/10.1.556.209>

Wichtmann, Torsten, & Triantafyllidis, T. (2016). An Experimental Database for the Development, Calibration and Verification of Constitutive Models for Sand with Focus to Cyclic Loading: Part II—Tests With Strain Cycles and Combined Loading. *Acta Geotechnica*, 11(4), 763–774. <https://doi.org/10.1007/s11440-015-0412-x>

Yamaguchi, H. (1965). Practical Formula of Bearing Value for Two Layered Ground. *Proc. 2nd ARCSMFE*, 2, 122–126.

Yang, Z., Elgamal, A., & Parra, E. (2003). Computational Model for Cyclic Mobility and

- Associated Shear Deformation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(12), 1119–1127. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.045417>
- Yang, Z., Lu, J., & Elgamal, A. (2008). Opensees Soil Models and Solid-Fluid Fully Coupled Elements: User's Manual, Version 1. *San Diego: University of California*, (October). Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:OpenSees+Soil+Models+and+Solid-+Fluid+Fully+Coupled+Elements+User+?+s+Manual#0>
- Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance Of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), 297–313. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2001\)127](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2001)127)
- Youd, T. Leslie., & Holzer, T. L. (1994). Piezometer Performance At Wildlife. *Journal of GeoEngineering*, 120(6), 975–995.
- Zeghal, M, Manzari, M., Kutter, B., & Abdoun, T. (2014). LEAP: Selected Data for Class C Calibrations and Class A Validations. In *Safety and Reliability: Methodology and Applications* (p. 117).
- Zeghal, Mourad, Goswami, N., Kutter, B. L., Manzari, M. T., Abdoun, T., Arduino, P., ... Ziotopoulou, K. (2018). Stress-Strain Response of the LEAP-2015 Centrifuge Tests and Numerical Predictions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 804–818. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.10.014>
- Zhang, J., Tang, W. H., Zhang, L. M., & Huang, H. W. (2012). Characterising geotechnical model uncertainty by hybrid Markov Chain Monte Carlo simulation. *Computers and Geotechnics*,

43, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.02.002>