



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Informe: EIC-Lanamme-INF-1409-2023
Código VI: 321-C0-226

INFORME FINAL

ANÁLISIS MECÁNICO DE SUBRASANTES EN DISTINTAS CONDICIONES DE HUMEDAD

Preparado por:

**Unidad de Investigación en Infraestructura del Transporte
Programa de Infraestructura del Transporte**

Documento generado con base en el Artículo 6, inciso i) de la ley 8114, Capítulo 7, artículo 66 del Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT

San José, Costa Rica
Enero, 2024



1. Informe EIC-Lanamme-INF-1409-2023		2. Copia No. 1	
3. Título y subtítulo: Análisis mecánico de subrasantes en distintas condiciones de humedad		4. Fecha del Informe Enero, 2024	
7. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440			
8. Notas complementarias			
9. Resumen <i>En la actualidad el diseño de pavimentos se realiza mediante metodologías de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras y Transportes (AASHTO por sus siglas en inglés) o según el AASHTOWare Pavement ME. En algunas ocasiones los diseños de la estructura de pavimento no son los óptimos debido a que estas metodologías no se adecuan en su totalidad a las condiciones climatológicas, propiedades de los materiales y factores de calibración de las condiciones locales. En este informe se presenta una propuesta de modelo calibrado para las condiciones locales, que busca predecir el módulo resiliente de los suelos, bajo condiciones de humedad variable. Además, se propone la inclusión de dicho modelo en la guía de diseño mecanística-empírica de Costa Rica. Adicionalmente, se presenta un modelo para predecir la curva característica suelo-agua de los suelos, utilizando características físicas. Finalmente, se presentan unos mapas de saturación que pretenden ser un insumo para obtener el rango de humedad al que se podría encontrar sometido un material específico para proyectos de carreteras particulares.</i>			
10. Palabras clave Contenido de humedad, subrasantes, mapas de saturación		11. Nivel de seguridad: Ninguno	12. Núm. de páginas 143
13. Preparado por: Ing. Tania Ávila Equivel, M.Sc. Unidad de Investigación en Infraestructura de Transporte	14. Revisado por: Ing. Eliécer Arias Barrantes, M.Sc. Unidad de Investigación en Infraestructura de Transporte		Ing. Gustavo Badilla Vargas, PhD Programa de Ingeniería Geotécnica
Ing. Fabián Elizondo Arrieta, M.B.A. Coordinador Unidad de Investigación en Infraestructura de Transporte	15. Aprobado por: Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc. Coordinadora General PITRA		Ing. Ana Monge Sandí, M.Sc. Coordinadora General PIG



TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
RESUMEN EJECUTIVO	11
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	12
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3. ANTECEDENTES.....	12
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	14
1.5. MARCO METODOLÓGICO	15
1.6. MARCO TEÓRICO.....	18
2. MAPAS DE SATURACIÓN	40
2.1. PUNTOS DE MUESTREO	40
2.2. MAPAS DE SATURACIÓN CON LA BASE DE DATOS ACTUALIZADA.....	40
3. RESULTADOS.....	44
3.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	44
3.2. CURVAS CARACTERÍSTICAS Y MODELACIÓN	46
3.3. MÓDULO RESILIENTE	60
4. MODELACIÓN MATEMÁTICA.....	76
4.1. MODELO MATEMÁTICO PARA LA PREDICCIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA SUELO-AGUA	77
4.2. MODELO MATEMÁTICO PARA LA PREDICCIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN CONDICIONES DE HUMEDAD VARIABLE	82
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	97
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
6.1. CONCLUSIONES.....	101
6.2. RECOMENDACIONES	101
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
8. APÉNDICES.....	107



8.1.	APÉNDICE 1: COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.....	107
8.2.	APÉNDICE 2: RESULTADOS DE LABORATORIO DE LOS PUNTOS MUESTREADOS	110
8.3.	APÉNDICE 3: VALORES DE SATURACIÓN DE LOS SUELOS MUESTREADOS Y CLASIFICACIÓN POR REGIONES	111
8.4.	APÉNDICE 4: RANGOS DE SATURACIÓN SEGÚN REGIÓN GEOGRÁFICA Y ÉPOCA CLIMÁTICA	112
8.5.	APÉNDICE 5: CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LAS MUESTRAS DE ESTUDIO.....	113
8.6.	APÉNDICE 6: DATOS Y RESULTADOS PARA MODELO DE θ_s	135
9.	ANEXOS	137
9.1.	ANEXO 1: PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE (ÁVILA, 2017).....	137



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 <i>METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN</i>	16
FIGURA 2 <i>COMPONENTES DE UN SUELO PARA PROBLEMAS GEOTÉCNICOS</i>	19
FIGURA 3 <i>REPRESENTACIÓN DE LOS CONCEPTOS DE SUCCIÓN MATRICIAL, OSMÓTICA Y TOTAL</i>	20
FIGURA 4 <i>MODELO CAPILAR PARA EL ANÁLISIS DE LA SUCCIÓN MATRICIAL</i>	21
FIGURA 5 <i>POSIBLES MOVIMIENTOS DE LA HUMEDAD EN CARRETERA</i>	24
FIGURA 6 <i>CURVA CARACTERÍSTICA DE UN SUELO</i>	26
FIGURA 7 <i>DISTRIBUCIÓN DE CARGAS SOBRE UN PAVIMENTO FLEXIBLE</i>	30
FIGURA 8 <i>DISTRIBUCIÓN DE CARGAS SOBRE UN PAVIMENTO RÍGIDO</i>	30
FIGURA 9 <i>TRAMOS SELECCIONADOS PARA MUESTREO</i>	40
FIGURA 10 <i>MAPA DE SATURACIÓN PERCENTIL 85 PARA LA ÉPOCA SECA</i>	41
FIGURA 11 <i>MAPA DE SATURACIÓN PERCENTIL 85 PARA LA ÉPOCA LLUVIOSA</i>	42
FIGURA 12 <i>MAPA DE SATURACIÓN PROMEDIO PARA LA ÉPOCA SECA</i>	42
FIGURA 13 <i>MAPA DE SATURACIÓN PROMEDIO PARA LA ÉPOCA LLUVIOSA</i>	43
FIGURA 14 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE HONE CREEK</i>	46
FIGURA 15 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE LORENA</i>	47
FIGURA 16 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE EL GUAPOTE</i>	48
FIGURA 17 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE RÍO CLARO</i>	49
FIGURA 18 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE VILLA COLÓN</i>	50
FIGURA 19 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE BARRIGONES</i>	51
FIGURA 20 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE SAN CAYETANO DE VENECIA</i>	52
FIGURA 21 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE BIJAGUAL</i>	53
FIGURA 22 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE SAN RAFAEL</i>	54
FIGURA 23 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE CINCHONA</i>	55
FIGURA 24 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE LOS CHILES</i>	56
FIGURA 25 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DEL CRUCE DE ATENAS</i>	57
FIGURA 26 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE GUÁCIMO</i>	58
FIGURA 27 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DEL LANAMMEUCR SEDE LIBERIA</i>	59
FIGURA 28 <i>CURVA SWCC DEL SUELO DE PAQUERA</i>	60



FIGURA 29 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE HONE CREEK* 61

FIGURA 30 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE LORENA* 62

FIGURA 31 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE EL GUAPOTE* 63

FIGURA 32 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE RÍO CLARO* 64

FIGURA 33 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE VILLA COLÓN* 65

FIGURA 34 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE BARRIGONES*..... 66

FIGURA 35 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE SAN CAYETANO* 67

FIGURA 36 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE BIJAGUAL* 68

FIGURA 37 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE SAN RAFAEL*..... 69

FIGURA 38 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE CINCHONA*..... 70

FIGURA 39 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE LOS CHILES*..... 71

FIGURA 40 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DEL CRUCE DE ATENAS*..... 72

FIGURA 41 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE GUÁCIMO*..... 73

FIGURA 42 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DEL LANAMMEUCR SEDE LIBERIA*..... 74

FIGURA 43 *RESULTADOS DEL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE PAQUERA* 75

FIGURA 44 *OBSERVACIÓN DE LOS DATOS PARA DEFINIR EL TIPO DE VARIANZA* 76



FIGURA 45 *LÍNEA DE MEJOR AJUSTE PARA EL θ_s ESTIMADO VERSUS EL VALOR MEDIDO* 79

FIGURA 46 *LÍNEA DE MEJOR AJUSTE PARA EL CONTENIDO VOLUMÉTRICO ESTIMADO VERSUS EL VALOR MEDIDO (REAL)* 81

FIGURA 47 *EFFECTO DE LA INTENSIDAD DE LOS ESFUERZOS DE CONFINAMIENTO Y DESVIADOR EN EL VALOR DE MÓDULO RESILIENTE* 83

FIGURA 48 *EVOLUCIÓN DEL MR CON EL NIVEL DE ESFUERZOS APLICADOS COMBINADOS* 83

FIGURA 49 *INCREMENTO DEL MR CONFORME AUMENTA LA SUCCIÓN MATRICIAL..* 84

FIGURA 50 *EFFECTO DE LAS VARIABLES ANALIZADAS EN EL MÓDULO RESILIENTE (MR)* 86

FIGURA 51 *AJUSTE DE LOS DATOS MEDIDOS VERSUS LOS CALCULADOS CON EL MODELO UNIVERSAL MODIFICADO*..... 88

FIGURA 52 *AJUSTE DE LOS DATOS MEDIDOS VERSUS LOS CALCULADOS CON EL MODELO LOGARÍTMICO* 89

FIGURA 53 *AJUSTE DE LOS DATOS MEDIDOS VERSUS LOS CALCULADOS CON EL MODELO EXPONENCIAL*..... 91

FIGURA 54 *AJUSTE DE LOS DATOS MEDIDOS VERSUS LOS CALCULADOS CON EL MODELO EXPONENCIAL, PARA CADA SUELO*..... 92

FIGURA 55 *AJUSTE DE LOS DATOS MEDIDOS VERSUS LOS CALCULADOS CON EL MODELO COMBINADO* 93

FIGURA 56 *AJUSTE DE LOS DATOS PARA LOS MODELOS LOGARÍTMICO Y COMBINADO* 96

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 *MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA SWCC* 27

TABLA 2 *PARÁMETROS DE MODELOS FREDLUND Y XING (1994) CALIBRADOS* 29

TABLA 3 *MODELOS MECANÍSTICOS BASADOS EN EL ESTADO DE ESFUERZOS* 34

TABLA 4 *MODELOS MATEMÁTICOS BASADOS EN RELACIONES EMPÍRICAS PARA EL CÁLCULO DEL MÓDULO RESILIENTE* 35



TABLA 5 <i>MODELOS CONSTITUTIVOS QUE INCORPORAN LA CONTRIBUCIÓN DE LA SUCCIÓN EN ALGÚN TENSOR DE ESFUERZO</i>	36
TABLA 6 <i>MODELOS CONSTITUTIVOS EXTENDIDOS ENFOCADOS EN EL ESTADO DE ESFUERZO DE LAS VARIABLES EN CONDICIONES NO SATURADAS</i>	37
TABLA 7 <i>CORRELACIONES ENTRE EL CBR Y DCP</i>	38
TABLA 8 <i>CORRELACIONES ENTRE EL CBR Y ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO EN LABORATORIO</i>	39
TABLA 9 <i>RELACIONES EMPÍRICAS PARA OBTENER EL MÓDULO RESILIENTE A PARTIR DEL CBR</i>	39
TABLA 10 <i>CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE TODAS LAS MUESTRAS DE ESTUDIO</i>	45
TABLA 11 <i>PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE HONE CREEK</i>	46
TABLA 12 <i>PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE LORENA</i>	47
TABLA 13 <i>PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE EL GUAPOTE</i>	48
TABLA 14 <i>PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE RÍO CLARO</i>	48
TABLA 15 <i>PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE VILLA COLÓN</i>	49
TABLA 16 <i>PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE BARRIGONES</i>	50
TABLA 17 <i>PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE SAN CAYETANO DE VENECIA</i>	51
TABLA 18 <i>PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE BIJAGUAL</i>	52
TABLA 19 <i>PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE SAN RAFAEL</i>	53
TABLA 20 <i>PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE CINCHONA</i>	54



TABLA 21 PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE LOS CHILES	55
TABLA 22 PARÁMETROS DEL MODELO DE FREDLUND Y XING PARA EL SUELO DE PAQUERA	59
TABLA 23 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE HONE CREEK.....	61
TABLA 24 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE LORENA.....	61
TABLA 25 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE EL GUAPOTE.....	62
TABLA 26 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE RÍO CLARO.....	63
TABLA 27 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE VILLA COLÓN.....	64
TABLA 28 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE BARRIGONES.....	65
TABLA 29 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE SAN CAYETANO	66
TABLA 30 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE BIJAGUAL	67
TABLA 31 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE SAN RAFAEL	68
TABLA 32 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE CINCHONA	69
TABLA 33 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE LOS CHILES	70
TABLA 34 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DEL CRUCE DE ATENAS	71
TABLA 35 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE GUÁCIMO	72



TABLA 36 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DEL LANAMMEUCR SEDE LIBERIA	73
TABLA 37 PUNTOS DE MUESTRA PARA EL ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE DEL SUELO DE PAQUERA	74
TABLA 38 COEFICIENTES OBTENIDOS DE LA REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE PARA EL MODELO DE PREDICCIÓN DEL θ_s	78
TABLA 39 DATOS OBTENIDOS DEL AJUSTE DE LOS MODELOS PARA PREDICCIÓN DE LA SWCC	80
TABLA 40 VARIABLES MÁS UTILIZADAS PARA PREDECIR EL MR	82
TABLA 41 ANÁLISIS DE COVARIANZA DE LAS VARIABLES	85
TABLA 42 REGRESIÓN LINEAL GENERALIZADA DEL MODELO UNIVERSAL MODIFICADO	87
TABLA 43 REGRESIÓN LINEAL GENERALIZADA DEL MODELO LOGARÍTMICO	89
TABLA 44 REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO EXPONENCIAL	90
TABLA 45 REGRESIÓN NO LINEAL DEL MODELO COMBINADO	93
TABLA 46 RESUMEN DE LAS REGRESIONES LINEALES Y NO LINEALES PARA CADA MODELO PRESENTADO	95
TABLA 47 COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PARA EL MODELO DE PREDICCIÓN SWCC DE CADA SUELO ESTUDIADO.....	97
TABLA 48 PORCENTAJE DE GANANCIA DEL MR (MENOS HÚMEDO A MÁS HÚMEDO) PARA CADA MATERIAL ESTUDIADO BAJO UNA MISMA CONDICIÓN DE ESFUERZO ..	99



RESUMEN EJECUTIVO

En la actualidad el diseño de pavimentos se realiza mediante metodologías de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras y Transportes (AASHTO por sus siglas en inglés) o según el AASHTOware Pavement ME. En algunas ocasiones los diseños de la estructura de pavimento no son los óptimos debido a que estas metodologías no se adecuan en su totalidad a las condiciones climatológicas, propiedades de los materiales y factores de calibración de las condiciones locales.

En este informe se presenta una propuesta de modelo calibrado para las condiciones locales que busca predecir el módulo resiliente de los suelos, bajo condiciones de humedad variable, dicho modelo posee un coeficiente de determinación ajustado de 0,9. Además, se propone la inclusión de dicho modelo en la guía de diseño mecánica-empírica de Costa Rica. Adicionalmente se presenta un modelo para predecir la curva característica suelo-agua de los suelos, utilizando características físicas. Finalmente, se presentan mapas de saturación que pretenden ser un insumo para obtener el rango de humedad al que se podría encontrar sometido un material específico, para proyectos de carreteras particulares.

1. INTRODUCCIÓN

Algunas estructuras de pavimento fallan de forma prematura debido a diseños inadecuados, que en ocasiones se dan debido a la omisión o el mal cálculo de ciertos factores en el diseño inicial. Los efectos ambientales y la carga de tráfico son los factores más difíciles de cuantificar y a su vez los más destructivos de la estructura de pavimento (Mena, 2013).

Según Mena (2013) los efectos climáticos causan deterioros en la estructura, siendo el elemento más perjudicial, la precipitación y niveles freáticos que llegan a la estructura del pavimento. El agua puede llegar a degradar capas como la base y sub-base hasta tener contacto con la subrasante y generar con ello disminución en la capacidad de soporte, deformaciones permanentes y deterioro de la superficie de rodadura. El aumento y disminución de la humedad puede causar que el suelo se expanda o se contraiga internamente provocando grietas o fisuras en la estructura del pavimento.



Este proyecto de investigación busca generar información sobre el grado de saturación en los suelos utilizados como subrasantes en Costa Rica, que sea de utilidad para la generación de modelos matemáticos. Modelos que permitan interpretar la afectación en la capacidad mecánica de un suelo que puede tener las variaciones en el contenido de humedad presente en él y para incluirlos en la Guía de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica que desarrolla el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR).

1.1. Objetivo General

Estudiar el efecto de la humedad en la respuesta mecánica de las subrasantes en Costa Rica.

1.2. Objetivos Específicos

- Realizar un mapa de saturación tanto para la época seca como para la época lluviosa.
- Realizar la caracterización física y mecánica de los suelos seleccionados con el fin de determinar las propiedades de materiales utilizados como subrasantes.
- Generar la curva característica suelo-agua (SWCC por sus siglas en inglés) para los suelos identificados, con el fin de obtener la relación existente entre la humedad y la succión en dichos materiales.
- Generar modelos de predicción de parámetros mecánicos para incluirlos en la Guía de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica.

1.3. Antecedentes

Ávila (2017) realizó un estudio sobre la cuantificación del efecto del contenido de agua en la rigidez de la subrasante mediante la medición del módulo resiliente. Basándose en el protocolo propuesto por Cary (2008), Ávila generó un modelo capaz de predecir, considerando el contenido de agua, el módulo resiliente (M_r) de los suelos cuando estos poseen valores de M_r menores a 300 MPa y con alguna subestimación en los mayores a 300 MPa. Los resultados obtenidos solamente aplican para materiales de grano fino con características similares a las de una arena limosa.

En el 2014 Araujo realizó un Trabajo de Investigación en la Universidad de Piura titulado *Ecuaciones de correlación del CBR con propiedades de suelos para la ciudad de Piura*. El propósito de este trabajo fue proponer un método alternativo para la obtención del valor del CBR de diseño mediante correlaciones con propiedades físicas y de compactación de los



suelos. De los modelos presentados concluyó que las propiedades más influyentes en el *California Bearing Ratio* (CBR, por sus siglas en inglés) son el porcentaje de gravas, el contenido óptimo de humedad, el porcentaje de finos y la densidad máxima seca.

Cary y Zapata (2011), realizaron una investigación en la cual se evaluó la respuesta resiliente del suelo sujeto a un estado de esfuerzos cuando está parcialmente saturado, donde emplearon material para base granular y material de subrasante. El fin de dicha investigación fue mejorar el modelo universal para la predicción del módulo resiliente incorporando la succión matricial como una variable fundamental. El modelo propuesto es válido tanto para condiciones de suelo no saturado como para suelos saturados y mejora las predicciones obtenidas en la metodología utilizada por la guía de diseño mecánica-empírica de estados unidos (MEPDG, por sus siglas en inglés), el cual se basa solamente en el contenido de humedad o grado de saturación como indicadores indirectos del nivel de succión.

En el año 2010, Bustillos presentó un estudio exploratorio del efecto de la saturación en el ensayo de CBR para el diseño de estructuras de pavimento. Por medio de pruebas de laboratorio Bustillos estableció una relación entre el valor del CBR y el cambio en la saturación del suelo en una carretera de la provincia de Cartago. Concluyó que el diseño de la estructura de la carretera en estudio se ve afectado por las condiciones de saturación a las que ésta es sometida a lo largo del año, por lo que establece que la estructura está sobrediseñada.

Herrera (2007), realizó una investigación en la cual analiza el comportamiento estructural de un suelo utilizado como subrasante en el sector de la carretera en La Abundancia, Ciudad Quesada, mediante la valoración del módulo resiliente bajo diversas condiciones de densidad y saturación. Estableció un modelo que relaciona el módulo resiliente en función de la humedad del suelo con respecto a su valor óptimo, el cual aplica para saturaciones entre 60% y 100%.

Black presentó un documento en 1962 donde establece una correlación que permite estimar el valor de CBR y su variación con el contenido de humedad, a partir de los resultados de las pruebas de plasticidad del suelo. Además, establece correlaciones con las cuales se deducen variaciones del CBR con el contenido de vacíos y el grado de saturación del suelo. Los



resultados de esta investigación se basan en suelos cohesivos inorgánicos. En 1961 se publicó una investigación que trata específicamente el problema de las arenas.

1.4. Justificación

La red vial es la base del desarrollo y crecimiento de un país. Las carreteras, además de facilitar las necesidades básicas como la educación, alimentación, salud y trabajo, permiten al ser humano satisfacer su necesidad de transportarse. Por estas razones, un adecuado diseño de la infraestructura vial incide positivamente en el crecimiento social y económico de una región (Rivera, citado por Guzmán, 2015), así como una inversión más eficiente de los recursos invertidos en infraestructura vial.

Es común, más no lo deseable, que los pavimentos fallen antes de alcanzar su vida útil, esto puede tener su origen en un diseño inadecuado de la estructura o una mal caracterización de los materiales. En Costa Rica el diseño de pavimentos rígidos y flexibles se realiza mediante la guía de diseño de la AASHTO en su versión de 1993. Esta metodología fue elaborada bajo condiciones de diseño específicas dentro las que destacan niveles de tránsito, condiciones climáticas y características topográficas de la zona de Ottawa, Illinois (Darter, 1991).

No obstante, la cantidad de vehículos y los niveles de carga a los que se encuentra sometida una carretera, varían a lo largo de su vida útil. Las condiciones climáticas a las que se enfrentará la vía en nuestro país difieren considerablemente de las condiciones bajo las cuales se generó el modelo AASHTO 93, por lo que Ávila (2017), recomienda describir de manera más adecuada el comportamiento de los materiales mediante pruebas más eficientes.

Hoy en día se utilizan metodologías que consideran el módulo resiliente (M_r) como una propiedad fundamental para evaluar la capacidad de soporte de los materiales que constituyen la estructura del pavimento (Garnica et al., citado por Chaves, 2017). Este parámetro no es una propiedad constante del suelo, sino que depende de varios factores como la densidad seca, el estado de esfuerzos, el contenido de humedad, número de repeticiones de carga, energía de compactación, tixotropía del suelo, entre otros (Ávila, 2017).

Según Chaves (2017), existen correlaciones con las que se puede conocer la magnitud del módulo resiliente a partir de parámetros como el valor del CBR. No obstante, estas



correlaciones, son desarrolladas en países donde los materiales no son representativos de las condiciones de Costa Rica.

El aumento en el contenido de humedad de una subrasante afecta las propiedades mecánicas y aporte estructural al pavimento.

Dado que las condiciones climáticas de Costa Rica favorecen condiciones críticas de humedad en subrasantes desde el punto de vista de aporte estructural, modelar la afectación de la humedad en las propiedades del material nos permite cuantificar su impacto en el desempeño de un pavimento.

Por tanto, introducir la mecánica de suelos no saturados en el diseño y análisis de pavimentos, permite obtener estructuras que consideran las condiciones en las que se encuentra el material de subrasante en diferentes épocas del año. Lo anterior, contempla la premisa de que los suelos no se encuentran bajo el 100% de saturación todo el tiempo. Por lo tanto, se busca trabajar con metodologías que permitan generar modelos que representen la variación de las propiedades mecánicas de los suelos, como el módulo resiliente y el CBR, involucrando el contenido de humedad en donde se logren obtener diseños que respondan de manera eficiente a las condiciones reales a las que se enfrentará la estructura del pavimento.

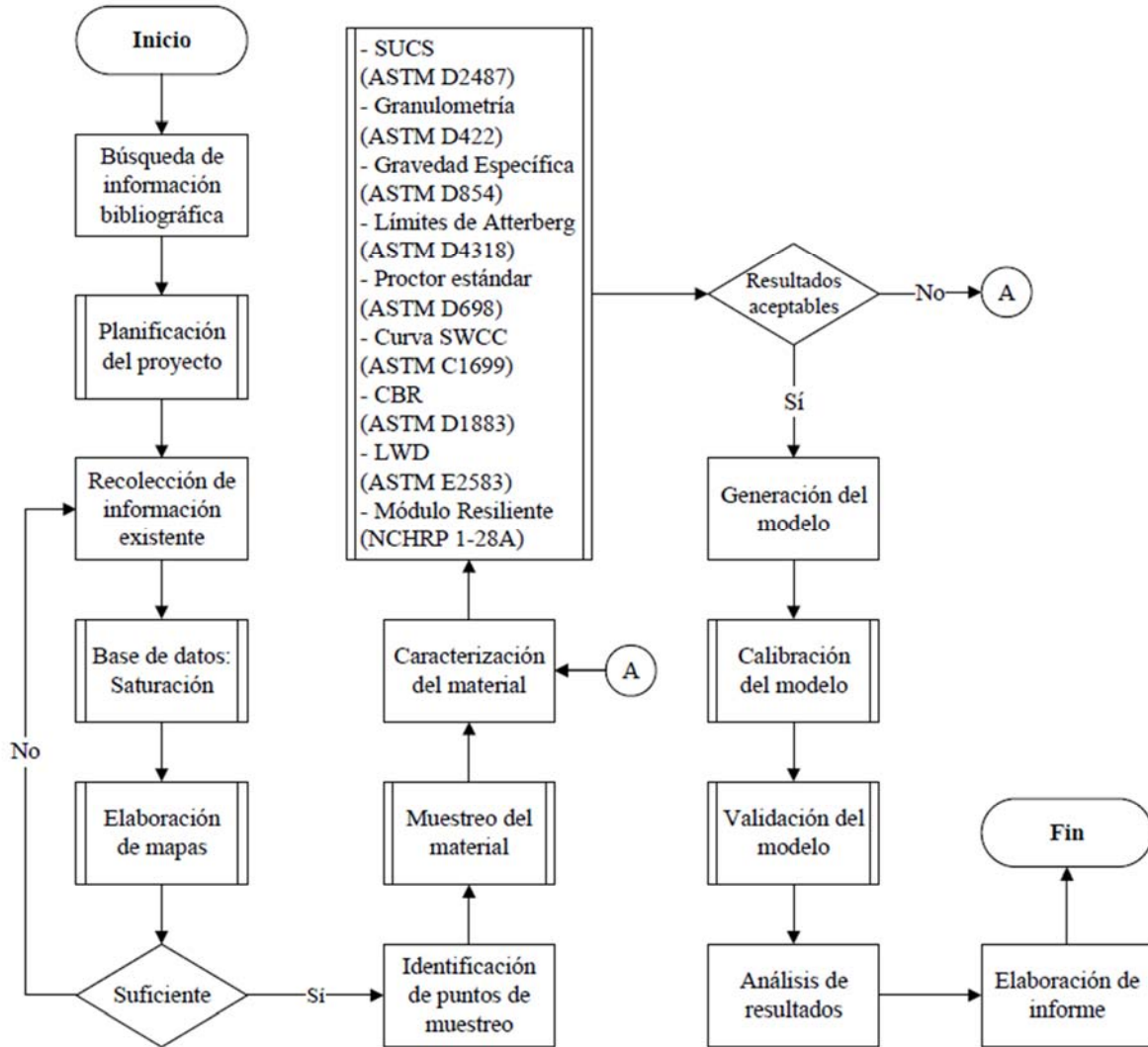
Finalmente, el cuantificar de manera más realista el efecto de la humedad en las propiedades mecánicas de los materiales nos permite tomar decisiones que mitiguen el efecto de la humedad en subrasantes, así como modelar de forma más apegada con la realidad el aporte de ésta en el pavimento.

1.5. Marco Metodológico

La metodología propuesta para la elaboración del proyecto se muestra en la Figura 1.



Figura 1 Metodología para la elaboración de la investigación



1.5.1. Investigación bibliográfica

En la primera fase del proyecto se realiza una revisión bibliográfica con el fin de registrar aquellas investigaciones sobre el tema en estudio. En esta etapa se plantea el proyecto por lo que se definen sus objetivos y se establece la importancia de la investigación.

1.5.2. Recolección y documentación de información existente

Una vez planteada la investigación se procede con la fase de recopilación y documentación de información existente. En esta fase se incluyen investigaciones previas, trabajos finales de



graduación e información recolectada de giras de campo realizadas por el LanammeUCR. Con la información obtenida se procede a elaborar una base de datos con el grado de saturación de diferentes suelos para distintas zonas de Costa Rica, tanto para la época seca como para época lluviosa. Con esta información se generan mapas con la saturación de algunos suelos del territorio nacional, sin embargo, estos cuentan con algunas limitaciones asociadas tales como: profundidades de las muestras, fechas exactas de muestreo, cantidad de datos obtenidos por zona.

1.5.3. *Identificación de puntos de muestreo*

Con la elaboración de los mapas de la fase anterior se identifican aquellas zonas en las que el LanammeUCR no había recolectado información para, a partir de ello, realizar giras de campo con las cuales se pueda obtener la información requerida para completar los mapas. Una vez actualizados los mapas se determinan 56 puntos donde se requiere muestreo, los cuales se trabajarán en cuatro grupos, por un periodo de cuatro años.

1.5.4. *Caracterización físico-mecánica del material*

En esta fase se seleccionan 15 muestras de suelo y se realizan los ensayos de caracterización física y mecánica. Por cada ensayo se realizarán dos réplicas exceptuando el ensayo de módulo resiliente del cual se realizarán tres repeticiones. Los ensayos considerados para la ejecución de la investigación son los siguientes:

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM D2487)
- Análisis granulométrico de suelos (ASTM D422)
- Determinación del Límite Líquido, límite plástico y el índice de plasticidad (ASTM D4318)
- Determinación de la gravedad específica del suelo mediante un picnómetro con agua (ASTM D854)
- Determinación de características de compactación de un suelo, próctor estándar (ASTM D698)
- Método estándar para la medición de la succión utilizando platos de presión (ASTM C1699)
- Índice de soporte de California "CBR" (ASTM D1883)
- Métodos armonizados de ensayo para la determinación en laboratorio del Módulo Resiliente para el diseño de pavimentos flexibles (NCHRP 1-28A), propuesta modificada en la tesis de Ávila (2017).



1.5.5. *Generación de los modelos*

Con base en los ensayos de Mr realizados a los suelos seleccionados se generan ecuaciones de predicción de parámetros mecánicos y se calibran las ecuaciones existentes en las que se toman en cuenta variables como el grado de saturación, los esfuerzos de confinamiento y desviador y la presión de poro de agua y aire. Una vez generadas las ecuaciones se les aplica un análisis estadístico de los datos, para así lograr la mejor correlación posible entre los datos y los modelos propuestos.

1.5.6. *Análisis de resultados, hallazgos y observaciones*

Mediante la obtención de los resultados de los ensayos realizados a las diferentes muestras y la calibración de los modelos, se procede a realizar el respectivo análisis de datos. Además, se realiza una comparación entre los modelos generados para determinar las principales diferencias según el tipo de suelo y su aporte para el diseño de pavimentos más eficientes.

1.5.7. *Elaboración de informes, publicaciones, manuales y productos*

Se realizan tres informes parciales, uno al final de cada año durante los primeros dos años, en los cuales se establece el avance de la investigación. Al finalizar el tercer año se elabora el informe final del proyecto en el que se muestra la totalidad de los resultados obtenidos, generando así las conclusiones y recomendaciones sobre los modelos propuestos. Además, los resultados obtenidos serán incorporados en las guías de diseño de pavimento para Costa Rica, a la vez que se realizará divulgación a través de actividades de transferencia y publicaciones, de la importancia de la cuantificación de la humedad en la modelación correcta del desempeño de pavimentos.

1.6. Marco Teórico

1.6.1. *Mecánica de suelos no saturados*

Los grandes centros poblacionales a nivel mundial se encuentran concentrados en áreas urbanas en las que predominan suelos con nivel freático profundos donde los vacíos del suelo se encuentran ocupados con agua y aire (Ávila, 2017). Es decir, se encuentran en estado no saturado. Para estos suelos aparece una nueva fase (aire) en un sistema que, para suelos saturados, está formado únicamente por dos fases (agua-suelo).

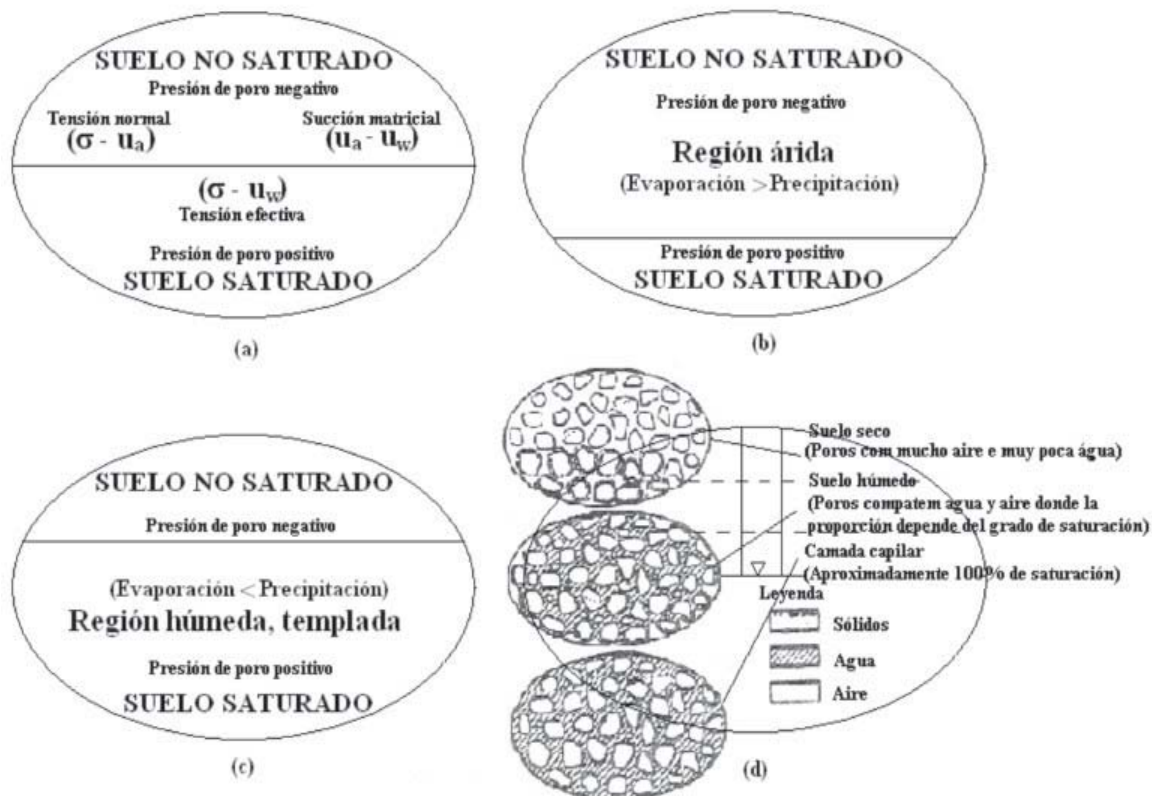


Los suelos no saturados se encuentran sometidos a un estado de tensión que, influenciado por el esfuerzo de succión, ocasiona que el volumen del suelo se modifique (Alfaro, 2008). La succión es aquella integrante del estado de esfuerzo que tiene en cuenta los efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructura del suelo, además, afecta los parámetros mecánicos, no obstante, la magnitud de estos depende de la humedad del medio poroso.

1.6.2. Estado tensional de suelos no saturados

Fredlund (1995, citado por Alfaro, 2008) establece que los suelos no saturados en el medio ambiente pueden ser esquematizados como se muestra en la Figura 2. La elipse contiene una línea horizontal, por debajo de la línea se encuentra el suelo saturado y por encima el suelo no saturado. Esta línea representa el nivel freático y se le conoce además como zona vadosa.

Figura 2 Componentes de un suelo para problemas geotécnicos



Nota. a) Generalización; b) Situación en región árida; c) Situación en región templada y húmeda; d) Composición del medio poroso. Editado a partir de Fredlund (en Alfaro, 2008).

Debajo del nivel freático las presiones intersticiales (o presión neutra) serán positivas. Inmediatamente arriba del nivel freático en la zona no saturada existe una franja capilar con un grado de saturación de aproximadamente 100% y que puede tener un espesor variable de hasta 10 m en función del tipo de suelo. Arriba de esa capa el suelo presenta presiones intersticiales o de poro negativas y que resultan de la diferencia de las presiones del aire (u_a) y del agua (u_w). La diferencia entre esas presiones ($u_a - u_w$) es llamada de succión matricial y que corresponde a una de las dos variables de esfuerzo que describen el comportamiento de un suelo no saturado (Alfaro, 2008).

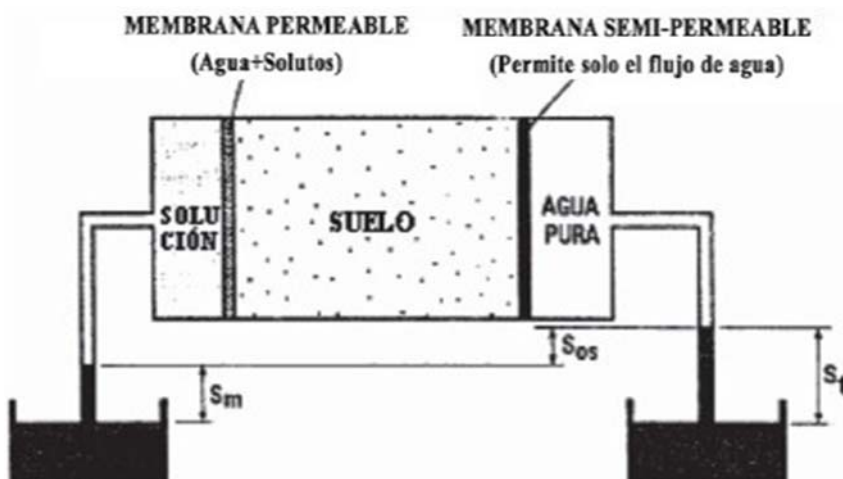
La succión en los suelos no saturados está compuesta por la succión matricial (Ψ_m) y la succión osmótica (Ψ_{osm}) y se puede expresar como se muestra en la ecuación (1):

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_{osm} \quad (1)$$

Alfaro (2008) define la succión total (Ψ_t) como la presión manométrica negativa que deberá ser aplicada a un reservorio de agua pura de tal forma que se mantenga en equilibrio a través de, una membrana semipermeable, el agua del reservorio y el agua del suelo (ver Figura 3).

Figura 3

Representación de los conceptos de succión matricial, osmótica y total



Nota. Editado a partir de Alfaro (2008).

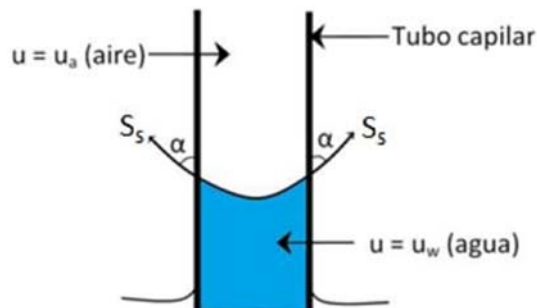
Cuando el agua del suelo es idéntica (contiene la misma composición) al agua padronizada (agua pura o solución con la misma composición del agua del suelo) la succión matricial es



igual a la total. Los efectos matriciales provienen de las presiones desarrolladas por el menisco capilar y adsorción del agua debido a fuerzas ejercidas por las superficies de las partículas. La interfase aire-agua generada por estos efectos se representa mediante el modelo capilar de la Figura 4 (Buckingham, citado por Alfaro, 2008).

Figura 4

Modelo capilar para el análisis de la succión matricial



Nota. Editado a partir de Alfaro (2008).

A través del equilibrio de fuerzas en la interfase aire-agua se observa que la fuerza ejercida por el aire es igual a las contrarias ejercidas por el agua. Cuando en la presión de poro de aire menos la presión de poro de agua ($u_a - u_w$), la presión del aire (u_a), corresponde a la atmosférica, la presión existente en las moléculas del agua es proporcional a la tensión superficial y al radio del tubo capilar.

La succión osmótica es igual a la succión total cuando el suelo se encuentra saturado. Cuando la componente matricial no ocurre, actúa solo el efecto de la concentración de los solutos (partículas de suelo). La importancia de la succión osmótica en mecánica de suelos parece estar más relacionada con los suelos dispersivos o expansivos, aunque en la mayoría de situaciones se admite que el valor de la succión total corresponde casi integralmente al valor de succión matricial. En la práctica es usual considerar a la succión del suelo como la succión matricial. En general, la succión osmótica tiene importancia en el comportamiento del suelo, cuando se presentan problemas que involucren contaminación química (Fredlund et al., citado por Alfaro, 2008).



1.6.3. Estado de esfuerzos

El estado de esfuerzos de los suelos no saturados se describe mediante los enfoques de Bishop 1959 (quien propone el enfoque de *esfuerzo efectivo modificado*), y Fredlund 1977 (quien planteó el enfoque de *la variable de estado de esfuerzo independiente* y el de la *variable de estado modificado*), esto según Lu et al. (2006).

El enfoque de Bishop involucra una forma modificada de la ecuación clásica de Terzaghi como se muestra en la ecuación (2):

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (2)$$

Donde:

σ' : Esfuerzo efectivo

χ : Parámetro de esfuerzo efectivo ($0 \leq \chi \leq 1$)

σ : Estado de esfuerzo total

u_a : Presión del aire

u_w : Presión del agua

Utilizando este enfoque, el criterio de falla de Mohr-Coulomb se expresaría como en la ecuación (3):

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (3)$$

Donde:

τ_f : Esfuerzo cortante de falla

c' : Cohesión efectiva

ϕ' : Ángulo de fricción efectivo

Ávila (2017), establece que con el enfoque planteado por Fredlund et al. 1977, el esfuerzo normal neto ($\sigma - u_a$) y la succión matricial ($u_a - u_w$) son tratados como variables independientes, en términos del rol que juegan dentro de la mecánica de suelos no saturados. El comportamiento macroscópico se describe con base en las variables de estado de esfuerzo



independientes y las propiedades del material (Lu et al., 2006). Utilizando este enfoque el esfuerzo al corte se describiría como en la ecuación (4):

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan \phi' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (4)$$

Donde se introduce ϕ^b como un ángulo de fricción adicional que captura la contribución de la succión matricial en la resistencia al corte.

1.6.4. Factores climáticos y su efecto en el desempeño de pavimentos

La infraestructura vial de un país se encuentra expuesta a sufrir deterioros acelerados a lo largo de su vida útil, ocasionados por el tráfico y el clima, acompañados comúnmente de sistemas inadecuados de drenajes y subdrenajes, así como también de un mantenimiento insuficiente. Un pavimento adecuadamente diseñado y construido debe ser capaz de resistir tanto las cargas como las variaciones estacionales del clima, o sea, brindando resiliencia ante eventos climáticos. El desempeño de una estructura de pavimento se ve afectado, principalmente, por factores ambientales como la precipitación, radiación solar, temperatura, nubosidad, humedad relativa, velocidad del viento y profundidad del nivel freático (Perera, 2015).

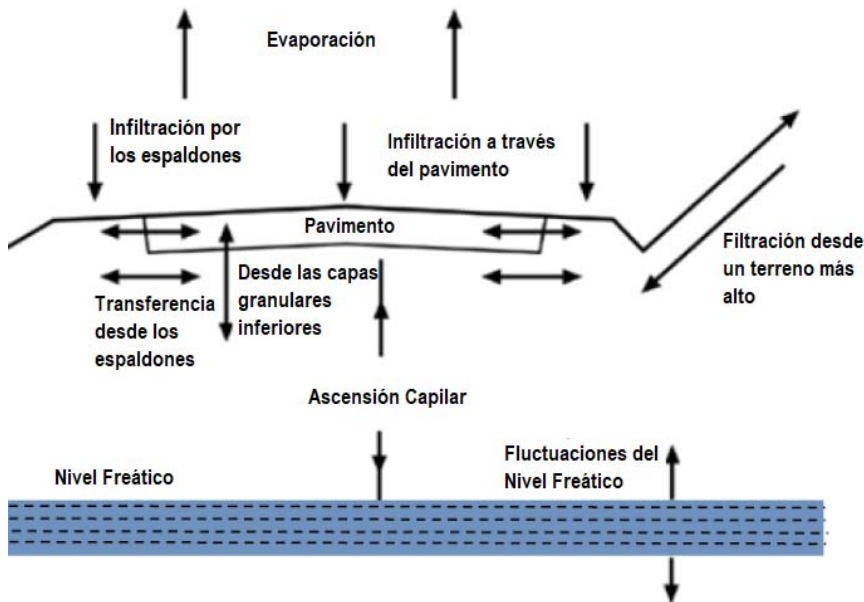
De estos factores los que presentan una afectación directa sobre el grado de saturación de la subrasante son: la precipitación, la humedad relativa y la profundidad del nivel freático. Todos afectan la susceptibilidad de la subrasante a deformarse producto de las cargas a la que se encuentra sometida y una disminución en su capacidad mecánica, efecto que se traduce en un posible deterioro de la estructura de pavimento que soporta.

El agua ingresa a la estructura del pavimento y a la subrasante mediante grietas en la capa asfáltica y en los espaldones, zanjas laterales o cunetas en mal estado, por fluctuaciones del nivel freático y por ascensión capilar, entre otras razones (ver Figura 5). Estos aspectos contribuyen a la degradación de la capacidad soportante de la estructura. El agua que ingresa a la estructura altera las propiedades de los materiales de subrasante como la resistencia al esfuerzo cortante, el grado de compactación, el módulo resiliente, la erosión, entre otros (Perera, 2015).



Figura 5

Posibles movimientos de la humedad en carretera



Nota. Adaptado a partir de Perera (2015)

Adicionalmente, las fluctuaciones del nivel freático tienen una influencia directa en el módulo resiliente de las capas que componen la estructura de pavimento. Cuando el nivel freático se encuentra cerca de la superficie (30 a 91 cm de profundidad), la influencia de las condiciones ambientales sobre el grado de saturación es nula. Por el contrario, cuando la profundidad del nivel freático es de 1,5 a 4,5 m de la superficie, el efecto que presentan las condiciones del medio ambiente sobre la succión del suelo comienza a ser importante para definir el módulo resiliente (Zapata et al., 2012).

1.6.5. Estimación de la saturación

Un suelo se encuentra saturado cuando prácticamente todos sus espacios vacíos están llenos de agua. Según Braja (2012), el grado de saturación “S” se puede calcular como la relación del volumen de agua en los espacios vacíos entre el volumen de vacíos (ver ecuación 5), o como en la ecuación 6.



$$S(\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

V_w = Volumen de agua

V_v = Volumen de vacíos

$$S(\%) = \frac{wG_s}{e} \quad (6)$$

Donde:

G_s = Gravedad específica del suelo

w = Contenido de humedad (%)

e = Relación de vacíos

Laporte y Saézn (1985) determinaron que se puede utilizar una gravedad específica constante de 2,69 para el cálculo de saturación. En el año 2013, Bravo en su trabajo de graduación observó que en la base de datos de Laporte y Saézn (1985) existía una relación entre el contenido de humedad y la relación de vacíos, donde obtuvo la siguiente ecuación para suelos finos (limos y arcillas):

$$e = 0,0214 * w + 0,3517 \quad (7)$$

Esta estimación la sustituyó en la ecuación (6) y junto con el valor de gravedad específica constante (2,69) se obtuvo una ecuación para obtener el grado de saturación en función del contenido de humedad (ver ecuación (8)).

$$S(\%) = \frac{2,69w}{0,0214w + 0,3517} \quad (8)$$

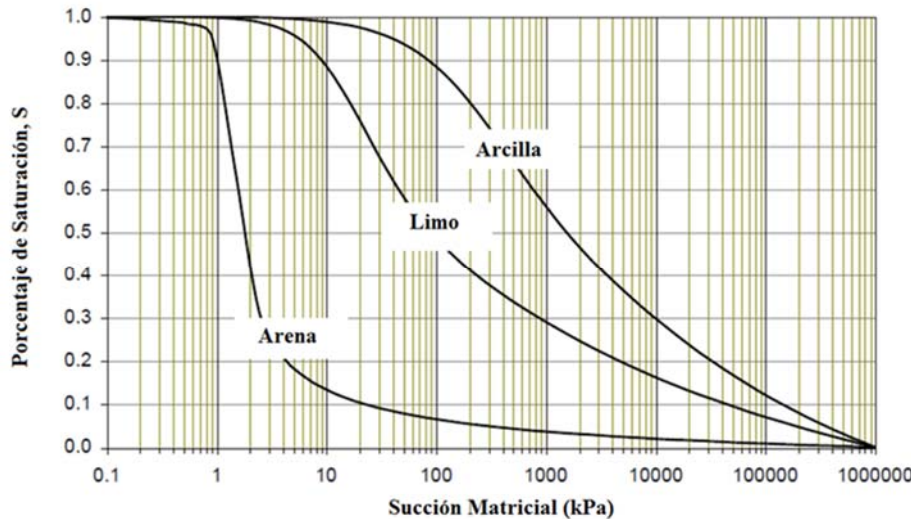
1.6.6. Curva característica Suelo-Agua (SWCC)

La Curva Característica Suelo-Agua (SWCC por sus siglas en inglés), se define como la relación entre el grado de saturación y la succión del suelo. Permite conocer la cantidad de agua retenida a diferentes esfuerzos de succión, la capacidad total de retener agua y la disponibilidad de agua en el suelo. La posición relativa, inclinación y forma de la curva se determinan según la geometría de los poros, la magnitud y composición mineralógica de la fracción que pasa la malla N°·40-0,425mm (Perera, 2015).



Como se observa en la Figura 6, la SWCC depende del tipo de suelo, lo cual resulta vital para modelar el flujo de la humedad (esfuerzos de succión) en los suelos no saturados (Mena, 2013).

Figura 6
Curva característica de un suelo



Fuente: Modificado de Mena, (2013).

Los estudios realizados en los suelos utilizados como subrasantes en carreteras se concentran en el concepto de Curva Característica Suelo-Agua, debido a que por medio de esta se calcula el contenido de humedad de las capas no ligadas de la estructura del pavimento, así como la succión producto de esta humedad (Chon kan, 2017).

Para utilizar la Curva Característica Suelo-Agua como herramienta para la creación de modelos de predicción del Módulo Resiliente, la curva característica SWCC se calcula para un nivel de compactación (relación de vacíos) característico (típicamente densidad máxima y humedad óptima, derivados del ensayo de Proctor Estandar) y posteriormente se estiman los niveles de succión correspondientes en función de la saturación. Estos valores son programados en cámaras triaxiales que permiten la aplicación de presiones a las muestras de suelo simulando el aporte de la succión y recreando las condiciones de campo (Yang et al., Cary et al., Ng et al., citados por Chon kan, 2017).



Otro protocolo utilizado para llevar a cabo este tipo de ensayos es el propuesto por el Programa de Cooperación Nacional para el Estudio de Autopistas (NCHRP, por sus siglas en inglés), que al igual que en el caso de la AASHTO, está basado en una serie de valores propuestos para esfuerzos desviadores y confinantes recomendados para carreteras. Este a su vez es resultado del estudio científico en el desarrollo de metodologías mecanístico-empíricas para el diseño de pavimentos rígidos y flexibles.

En la Tabla 1 se muestra una recopilación de modelos generados por distintos autores para predecir la curva característica suelo-agua.

Tabla 1
Modelos matemáticos para la predicción de la SWCC

Autor	Modelo	Descripción de parámetros
Gardner (1958)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{h}{a}\right)^b}$	θ_w = Contenido de humedad volumétrico a estimar (condición real) θ_r = Contenido de humedad volumétrico residual θ_s = Contenido de humedad volumétrico en condición saturada a, b = Parámetros de ajuste. h = Succión matricial en kPa
Brooks y Corey (1964)	$\theta_w = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{a_b}{h}\right)^{n_b}$	a_b = Parámetro de ajuste n_b = Parámetro de ajuste.
Brutsaert (1967)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + \left(\frac{h}{a_b}\right)^{n_b}}$	a_b, n_b = Parámetros de ajuste.
Farrel y Larson (1972)	$h = (u_a - u_w)_b \cdot e^{\alpha(\theta_s - \theta_w)}$	α = Constante empírica $(u_a - u_w)_b$ = Valor de entrada de aire
van Genuchten (1980)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{h}{a}\right)^b\right]^c}$	c = Parámetro de ajuste
van Genuchten y Burdine (1980)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{h}{a}\right)^b\right]^{\left(1 - \frac{2}{b}\right)}}$	a = Parámetro de ajuste b = Parámetro de ajuste
van Genuchten y Mualem (1980)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{h}{a}\right)^{bm}\right]^{\left(1 - \frac{2}{bm}\right)}}$	bm = Parámetro de ajuste
Williams et al. (1983)	$\ln \theta_e = A + B \ln(h)$	A = Parámetro de ajuste B = Parámetro de ajuste
McKee y Bumb (1987)	$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + e^{\left(\frac{h-a}{b}\right)}}$	a = Parámetro de ajuste b = Parámetro de ajuste



Tabla 1
Modelos matemáticos para la predicción de la SWCC (cont.)

Autor	Modelo	Descripción de parámetros
Fredlund y Xing (1994)	$\theta_w = \left[1 - \frac{\ln(1 + \frac{h}{h_r})}{\ln(1 + \frac{10^6}{h_r})} \right] \left[\frac{\theta_s}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{h}{a} \right)^b \right] \right]^c} \right]$	θ_w = contenido de humedad volumétrico (%) θ_s = contenido de humedad volumétrico a la saturación (%) a, b, c = Parámetros de ajuste h = Succión matricial (kPa) h_r = Succión a la cual se establece el contenido residual de agua (kPa)
Assouline (1998)	$\theta_w = \theta_L + (\theta_s - \theta_L) \left[1 - e^{-\xi \left(\frac{1}{\psi} - \frac{1}{\psi_L} \right)^\eta} \right]$	ψ = Presión capilar ψ_L = Presión capilar a un valor muy bajo de contenido de agua θ_L = Contenido de agua volumétrico en ψ_L η = Parámetro de ajuste ξ = Parámetro de ajuste
Pereira y Fredlund (2004)	$w = w_r + \frac{w_s - w_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_p} \right)^{n_p} \right]^{m_p}}$	a_p = Parámetro de ajuste n_p = Parámetro de ajuste m_p = Parámetro de ajuste

Nota. Editado a partir de Zapata et al. (2000) y Fredlund et al. (2012).

En su trabajo final de graduación Chon Kan (2017) propuso dos modelos para determinar la curva SWCC a partir del contenido de humedad del suelo. Estos modelos fueron calibrados basándose en el modelo de Fredlund y Xing (1994) de las ecuaciones (9) y (10).

$$\theta_w = \left[1 - \frac{\ln(1 + \frac{h}{h_r})}{\ln(1 + \frac{10^6}{h_r})} \right] \left[\frac{\theta_s}{\left[\ln \left[\exp(1) + \left(\frac{h}{a} \right)^b \right] \right]^c} \right] \quad (9)$$

$$\theta_s = 3.33859 - 0.0071107X_{LL} - 1.927596X_{\#4} + 0.3784705X_{\#200} - 0.004333X_{Cu} + 0.0852703X_{Cc} - 0.0739018D_{60} - 0.0004566X_{\gamma_d} \quad (10)$$

Donde las variables corresponden a las determinadas para este modelo en la Tabla 1.

El contenido volumétrico de saturación considera las siguientes variables: límite líquido (LL), índice de plasticidad (IP), porcentaje pasando la malla No.4 y la malla No.200, coeficiente de uniformidad (C_u) y coeficiente de curvatura (C_c), diámetro para el 60% de las partículas y densidad seca máxima.

El valor de succión residual h_r puede variar entre 1500-3000 kPa para limos y arcillas y puede llegar a valores de 10 kPa para arenas (Fredlund et al.,2012). El valor utilizado por Chon kan (2017) corresponde a 3000 kPa para ambos modelos.



En la Tabla 2 se presentan los valores de los parámetros obtenidos por Chon Kan (2017) tanto para el modelo general (considera todos los tipos de suelo estudiados) como para el modelo elaborado para suelos con contenido limoso. Adicionalmente, se muestran los valores del estadístico “R² ajustado” para cada modelo.

Tabla 2
Parámetros de modelos Fredlund y Xing (1994) calibrados

Parámetros	Modelo General	Modelo para suelos con contenido limoso
a	3,5242	0,5771
b	1,1712	0,8451
c	0,3404	0,3226
R ² ajustado	0,9010	0,9532

Nota. Editado a partir de Chon kan (2017).

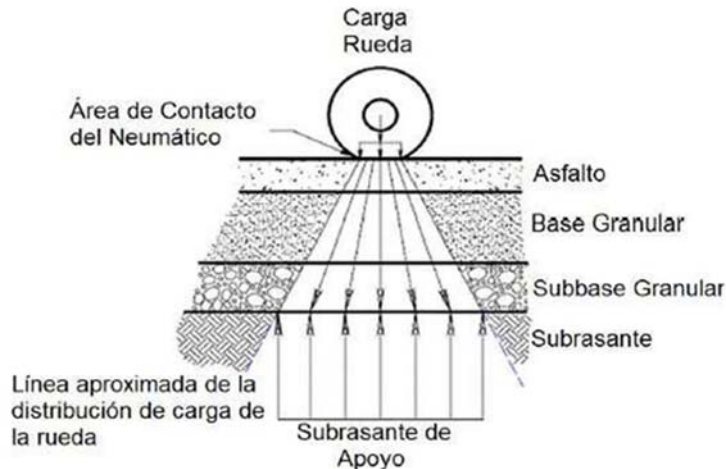
1.6.7. Efecto de la estructura de pavimento sobre la subrasante

El pavimento es una estructura compuesta por capas que forman una carretera, con espesores tales que puedan soportar las cargas vehiculares y transmitir las, de manera adecuada, a la subrasante. El pavimento, además, debe brindar confort, estabilidad y seguridad al usuario. Los pavimentos se clasifican en rígidos y flexibles dependiendo de la forma en que distribuyen las cargas.

Los pavimentos flexibles presentan una combinación de capas (capa asfáltica, base y subbase granular) que se encargan de disipar las cargas de tránsito de forma que al llegar a la subrasante no superen su capacidad mecánica (Perera, 2015). Se caracterizan por su capacidad de resistir la deformación ante las cargas, esta capacidad es mayor en las capas superiores y disminuye con la profundidad. En la Figura 7 se muestran las capas típicas que conforman un pavimento flexible y la distribución de las cargas sobre el mismo.

Figura 7

Distribución de cargas sobre un pavimento flexible

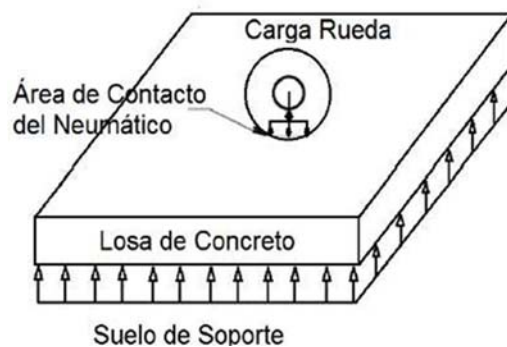


Nota. Editado a partir de Mena (2013).

Por otra parte, los pavimentos rígidos se componen de una losa de concreto que absorbe la mayor parte de la carga del tráfico. Por su alta rigidez distribuye las cargas sobre un área amplia de la subrasante, reduciendo las presiones. El mecanismo de distribución de cargas en un pavimento rígido se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Distribución de cargas sobre un pavimento rígido



Nota. Editado a partir de Mena (2013).

La respuesta de un pavimento se refiere al análisis mecánico, el cual se basa en la reacción que produce ante las cargas vehiculares y en contacto con el ambiente. El desempeño es una consecuencia de la respuesta y es la medida de las fallas desarrolladas durante su vida útil (Mena, citado por Ávila, 2017).



Según Chaves (2017), la subrasante funciona como cimentación de la estructura de pavimento, por lo que tiene gran influencia en su desempeño y durabilidad. En el diseño de la estructura del pavimento, típicamente la rigidez de las capas disminuye conforme la profundidad de la capa. El diseño se ve afectado por las características del suelo sobre el que se va a realizar la obra. Por tanto, cuando la calidad de la subrasante es baja se requiere que los espesores de las capas superiores sean mayores o utilizar materiales con mejores capacidades con el fin de minimizar los esfuerzos que llegan a esta. Modelos inadecuados de las propiedades del suelo de subrasante puede resultar en un diseño inadecuado permitiendo deformaciones excesivas o bien, un sobrediseño que probablemente tenga un impacto directo en el costo del proyecto. La fatiga y la deformación permanente son algunas de las fallas comúnmente asociadas a la deformabilidad de la subrasante.

1.6.8. *Módulo Resiliente*

El módulo resiliente se utiliza para caracterizar la respuesta mecánica de los materiales granulares constituyentes de la estructura de un pavimento. Este parámetro es fundamental para el diseño de pavimentos. Este módulo es definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable y se expresa en la ecuación (11):

$$M_r = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{axial}} \quad (11)$$

Donde:

- σ_1 = Esfuerzo principal mayor (sobrecarga)
- σ_3 = Esfuerzo principal menor (confinamiento)
- σ_d = Esfuerzo desviador
- ϵ_{axial} = Deformación recuperable

El módulo resiliente no es una propiedad constante en los materiales granulares y suelos. El comportamiento de un suelo ante los esfuerzos aplicados, no solo depende de los factores inherentes al suelo, sino de factores externos tales como el contenido de humedad, número de repeticiones de carga, estado de esfuerzos, densidad seca, tixotropía del suelo, energía de compactación, peso propio, entre otros (Herrera, 2007).

Para obtener el módulo resiliente existen tres formas: ensayos de laboratorio, correlaciones empíricas y mecánicas, y mediciones directas en el campo. En el laboratorio se realiza



mediante ensayos triaxiales dinámicos de cargas repetidas en probetas cilíndricas que simulan un elemento de suelo. Estas probetas de suelo, confeccionadas o talladas de muestras inalteradas o alteradas, serán ensayadas luego de proporcionarles las condiciones representativas que se espera tener en el campo. Las probetas se someten a un barrido de presiones de confinamiento σ_3 y esfuerzos desviadores σ_d ; donde para un estado de esfuerzos específico del suelo puede obtenerse su Mr. A partir de este ensayo se puede calcular el modelo matemático del módulo resiliente del material.

Una vez instalada la muestra en la celda y ubicado el marco de carga de la máquina triaxial el procedimiento secuencial considera las siguientes etapas:

- Preacondicionamiento, se aplican mil ciclos a un esfuerzo intermedio con la finalidad de que ocurra un reacomodo de las partículas de suelo.
- Secuencia del ensayo, se disminuye el esfuerzo de preconditionamiento y se aplican repeticiones de un esfuerzo desviador correspondiente a un pulso dinámico que puede variar de 1-2 segundos de duración. Luego se sigue incrementando el esfuerzo desviador y para cada incremento de esfuerzo desviador se aplica un número de repeticiones de carga, terminado el ciclo se varía el esfuerzo de confinamiento y se aplica de nuevo el barrido de esfuerzos desviadores aplicado en el primer ciclo.

En este ensayo se registra tanto la fuerza como las deformaciones producidas en la muestra.

Como se mencionó anteriormente, dicho módulo no es constante y depende de diferentes factores como el estado de esfuerzos, contenido de humedad, densidad seca, número de repeticiones de carga, energía de compactación, granulometría, frecuencia de carga y la tixotropía del suelo (Seed *et al.*, 1962; Lekarp *et al.*, 2000). En consecuencia, la respuesta resiliente de un suelo no posee un valor único, por lo que el módulo resiliente es una familia de curvas que un punto.

Las mediciones en campo se pueden realizar con diversos equipos como el deflectómetro de impacto (FWD, por sus siglas en inglés), el analizador portátil de propiedades sísmicas (PSPA), el método ultrasónico, entre otros (Ávila, 2017).



El desarrollo de modelos de esfuerzos de reacción y falla dentro de los modelos de desempeño para predecir el comportamiento de los pavimentos puede estar basado en:

1. Modelos matemáticos basados en las propiedades mecánicas fundamentales; y
2. Relaciones empíricas.

Los suelos y materiales granulares sin estabilizar utilizados como bases y subbases en pavimentos flexibles, exhiben una dependencia direccional (anisotropía) de su rigidez bajo un estado de esfuerzos en particular, al cual el material es sometido. Esta anisotropía del comportamiento resiliente puede ser representada adecuadamente con funciones dependientes del estado de esfuerzos en la capa granular. En la Tabla 3 se muestra un resumen de modelos mecanísticos más utilizados. Cabe resaltar que estos modelos solo consideran el estado de esfuerzos a los que es sometido el espécimen, sin embargo, no se consideran otros factores como la humedad, la compactación inicial, tixotropía, entre otros.

Como fue propuesto por Fredlund y Rahardjo (1993), el M_r de los suelos no saturados puede ser descrito como una función de tres variables de esfuerzos, tal y como se muestra en la ecuación (12):

$$M_r = f[(\sigma_3 - u_a), (u_a - u_w), (\sigma_1 - \sigma_3)] \quad (12)$$

Donde:

- u_a = Presión de poro de aire
- u_w = Presión de poro de agua
- $\sigma_3 - u_a$ = Esfuerzo de confinamiento neto
- $u_a - u_w$ = Succión matricial (ψ_m)
- $\sigma_1 - \sigma_3$ = Esfuerzo desviador (σ_d)

Estas variables de esfuerzo, a excepción de ψ_m , son consideradas en el Modelo Universal propuesto por Witczak y Uzan (1988), mediante el uso de la invariante de esfuerzo (θ) y esfuerzo cortante octahédrico (τ_{oct}) presentado en el apartado anterior.

Los procedimientos para el ensayo de M_r convencional están basados en el análisis en función de los esfuerzos totales (Esfuerzo efectivo más presión de poro). De acuerdo con este análisis, el equipo triaxial mide la respuesta mecánica del material que es sometido a diferentes combinaciones de esfuerzo desviador cíclico ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) y la presión de confinamiento total (σ_3).



Tabla 3

Modelos mecánicos basados en el estado de esfuerzos

Nombre	Descripción	Modelo
Modelo presión de confinamiento	Este modelo fue desarrollado por Dunlap en 1963 su ecuación fue desarrollada en arenas y gravas en estado seco y saturado bajo carga triaxial dinámica.	$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^{k_2}$
Modelo K- θ	Este modelo fue desarrollado por Seed y otros autores en 1967. El módulo resiliente está expresado como una función de los esfuerzos principales (θ) a los cuales el espécimen está sometido. El <i>primer invariante de esfuerzos</i> θ es igual a la suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) que actúan en el espécimen. La relación entre M_r y θ es una recta en un gráfico log-log. La desventaja de este modelo es que no toma en cuenta los efectos del esfuerzo cortante.	$M_r = k_1 \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2}$
Modelo K- σ_d	Este modelo fue desarrollado por Moosazadeh y Witczak en 1981. Es un modelo para los suelos cohesivos. Se introduce el esfuerzo desviador $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$.	$M_r = k_1 \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)^{k_2}$
Modelo May-Witczak	Desarrollado por May y Witczak en 1981. Considera al primer invariante de esfuerzos θ y el esfuerzo desviador σ_d . El esfuerzo desviador está relacionado directamente con el máximo esfuerzo cortante τ_m ($\sigma_3 / 2$) aplicado al espécimen. Como se toma en cuenta el esfuerzo cortante es aplicable a suelos cohesivos.	$M_r = k_3 \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_4} \left(\frac{\sigma_d}{Pa} \right)^{k_5}$
Modelo esfuerzo cortante octaédrico (Modelo Universal)	Desarrollado por Witczak y Uzan en 1988. Considera un cambio en el esfuerzo desviador por el esfuerzo cortante octaédrico que es un parámetro fundamental. Los esfuerzos fueron normalizados utilizando la presión atmosférica. Tiene la misma precisión que el modelo anterior pues el esfuerzo desviador y el esfuerzo octaédrico son proporcionales.	$M_r = k_1 Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right)^{k_3}$ $= \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$
Modelo de la Guía de Diseño 2002	Aplicable para todos los tipos de materiales no ligados para pavimentos, desde las arcillas más plásticas hasta las bases granulares más limpias.	$M_r = k_1 Pa \left(\frac{\theta}{Pa} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1 \right)^{k_3}$
Modelo del Programa de Desempeño a largo plazo de pavimentos (LTPP)	Es una versión modificada del modelo universal constitutivo.	$\log \left(\frac{M_r}{Pa} \right) = k_1 + k_2 \log \left(\frac{\theta}{Pa} \right) + k_3 \log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right) + k_4 \left(\log \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} \right) \right)^2$

Nota: Para todos los casos k_1 , k_2 , k_3 , k_4 y k_5 son constantes producto de la regresión lineal, θ es el primer invariante de esfuerzos, σ_1 , σ_2 y σ_3 son los esfuerzos principales, Pa es la presión atmosférica y τ_{oct} es el cortante octaédrico.

Desde la perspectiva utilizada en suelos no saturados, los esfuerzos totales son reemplazados por los esfuerzos normales netos, que se obtienen de la diferencia entre los esfuerzos totales y la presión de poro de aire ($\sigma - u_a$). Esta teoría no afecta la definición del esfuerzo desviador puesto que la presión de aire aplicada influye en la misma medida en los esfuerzos principales. Sin embargo, el efecto de la presión de poro de aire aplicada al espécimen debe ser compensada mediante el aumento de los esfuerzos totales (vertical y de confinamiento) en



proporción equivalente a la presión de poro de aire aplicada. Esta serie de ajustes en el estado de esfuerzos es comúnmente conocida como la técnica de traslación de ejes. Mediante la aplicación de esta técnica, el esfuerzo de confinamiento se convierte en el esfuerzo de confinamiento neto ($\sigma_3 - u_a$) y el esfuerzo principal vertical se convierte en el esfuerzo vertical neto ($\sigma_1 - u_a$). Por lo tanto, para obtener el esfuerzo de confinamiento total a aplicarse durante el ensayo, el esfuerzo neto de confinamiento es incrementado en proporción equivalente a la presión de poro de aire aplicada al espécimen para generar la succión deseada (Cary y Zapata, 2011).

Varios modelos han sido propuestos para simular el comportamiento del módulo resiliente tomando en cuenta diferentes factores influyentes, como el estado de esfuerzos, la succión del suelo, densidad entre otros. En la Tabla 4, la Tabla 5 y la Tabla 6 se muestran modelos de predicción del M_r para condiciones no saturadas desarrollados por distintos autores.

Tabla 4
Modelos matemáticos basados en relaciones empíricas para el cálculo del módulo resiliente

Autor	Modelo	Descripción
Johnson et al. (1986)	$M_r = (1,35 \cdot 10^6) \cdot (101,36 - \psi)^{2,36} \cdot (\theta_1)^{3,25} \cdot (\gamma_d)^{3,06}$	ψ = Succión total (kPa) θ_1 = primer invariante de esfuerzos (kPa) γ_d = densidad seca (Mg/m ³) Suelos arenosos.
Ceratti et al. (2004)	$M_r = 142 + 16,9\psi_m$	ψ_m = Succión matricial (kPa) Suelos A-7-6 según AASHTO y una succión máxima de 14 kPa.
Parreira y Goncalves (2000)	$M_r = 14,10\sigma_d^{0,782} + \psi^{0,076}$	σ_d = Esfuerzo desviador (kPa) Suelos A-7-6 según AASHTO y una succión máxima de 87 MPa.
Sawangsuriya et al. (2009)	$\frac{M_r}{M_r} = -5,61 + 4,5\log(u_a - u_w)$ $\frac{M_r}{M_r} = -0,24 + 0,25\log(u_a - u_w)$	$(u_a - u_w)$ = Presión de aire menos presión de agua (kPa) Para suelos finos y una succión máxima de 1000 kPa.
MEPDG (2004)	$\log\left(\frac{M_r}{M_{rSat}}\right) = a + \frac{b - a}{1 + e^{\left(\ln\left(\frac{b}{a}\right) + k_m(S - S_{opt})\right)}}$	M_{rSat} = Módulo en condiciones de saturación $(S - S_{opt})$ = Variación en el grado de saturación (decimales) a = el mínimo del $\log\left(\frac{M_r}{M_{rSat}}\right)$ b = el máximo del $\log\left(\frac{M_r}{M_{rSat}}\right)$

Nota. Adaptado a partir de Vanapalli y Han (2013).



Tabla 5

Modelos constitutivos que incorporan la contribución de la succión en algún tensor de esfuerzo

Autor	Modelo
Jin et al. (1968)	$\Delta M_r = K_1 K_2 \theta_B^{K_2-1} (\Delta \theta_{bT} + \Delta \theta_{bS})$
Heath et al. (2004)	$M_r = k_1 P a \left(\frac{P'}{P a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P a} \right)^{k_3}$ donde $P' = \frac{\theta_b}{3} + P_{suc} - u_a$ con $P_{suc} = \chi(u_a - u_w) = \frac{n_1 w G_s}{e} P a \left(\frac{1}{(w G_s)^{n_2}} - \frac{1}{e^{n_2}} \right)^{\frac{n_3}{n_2}}$
Liang et al. (2008)	$M_r = k_1 P a \left(\frac{\theta_b + \chi \psi_m}{P a} \right)^{k_2} \left(1 + \frac{\tau_{oct}}{P a} \right)^{k_3}$
Taamneh y Liang (2011)	$\frac{M_r}{P a} = k_1 \left(\frac{\sigma_{oct} + \chi \psi_m}{P a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P a} + 1 \right)^{k_3}$
Lytton (1996)	$M_r = k_1 P a \left(\frac{\theta_b + 3f\theta\psi_m}{P a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P a} \right)^{k_3}$
Yang et al. (2005)	$M_r = k_1 (\sigma_d + \chi \psi_m)^{k_2}$
Ashtiani (2009)	$M_r = k_1 P a \left(\frac{\theta_1 - 3f\theta (\psi_{m0} + \beta \frac{\theta_1}{3} + \alpha \tau_{oct})}{P a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P a} + 1 \right)^{k_3}$
Oh et al. (2012)	$M_r = k_1 P a \left(\frac{\theta_b + 3k_4\theta\psi}{P a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P a} + 1 \right)^{k_3}$

Nota. Para todos los casos ψ es la succión total, θ_1 es el primer invariante de esfuerzos, ψ_m es la succión matricial, ΔM_r es el cambio en el módulo debido a la variación de la temperatura y succión del suelo, $\Delta \theta_{bS}$ cambio en el primer invariante de esfuerzo debido a la succión del suelo, $\Delta \theta_{bT}$ cambio en el primer invariante de esfuerzos debido a la temperatura, σ_{oct} esfuerzo normal octaédrico, θ es el contenido volumétrico de agua, f es un factor de saturación ($1 < f < 1/\theta$), χ parámetro de esfuerzo efectivo de Bishop, P' esfuerzo efectivo promedio, P_{suc} confinamiento efectivo en la succión, e relación de vacíos, w contenido gravimétrico de agua, G_s gravedad específica, ψ_{m0} succión matricial inicial, α y β parámetros de Henkel para la presión de poro de agua, y $K_1, K_2, k_1, k_2, k_3, k_4, n_1, n_2, n_3$, son parámetros de regresión. Adaptado a partir de Vanapalli y Han (2013).



Tabla 6

Modelos constitutivos extendidos enfocados en el estado de esfuerzo de las variables en condiciones no saturadas

Autor	Modelo
Fredlund et al. (1977)	$\log(M_r) = c_{1d} - m_{1d}(\sigma_d)$
Gupta et al. (2007)	$M_r = k_1 Pa \left(\frac{\theta_b + 3k_4}{Pa}\right)^{k_2} \left(k_5 + \frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{k_3} + \alpha_1(u_a - u_w)^{\beta_1}$ $M_r = k_1 Pa \left(\frac{\theta_b}{Pa}\right)^{k_2} \left(1 + \frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{k_3} + k_{us} Pa \theta^k (u_a - u_w)$
Caicedo et al. (2009)	$M_r = k_1 Pa \left(1 + k_2 \frac{\sigma_d}{Pa}\right) \left(\frac{u_a - u_w}{Pa}\right)^{k_3} \left[\frac{(1,93-e)^2}{1+e} f(0,33)\right]$
Cary y Zapata (2011)	$\frac{M_r}{Pa} = k_1 \left(\frac{\theta_{net} + 3\Delta u_{w-sat}}{Pa}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{Pa} + 1\right)^{k_3} \left(\frac{\psi_{m0} - \Delta\psi_m}{Pa} + 1\right)^{k_4}$
Oloo y Fredlund (1996)	Para materiales gruesos: $M_r = k\theta_b^m + k_s(u_a - u_w)$ Para materiales finos: Si $k_1 > \theta_b$, $M_r = k_2 - k_3(k_1 - \theta_b) + k_s(u_a - u_w)$ Si $k_1 < \theta_b$, $M_r = k_2 - k_4(\theta_b - k_1) + k_s(u_a - u_w)$
Khoury et al. (2009)	$M_r = k_1 Pa \left(\frac{\theta_b}{Pa}\right)^{k_2} \left(k_4 + \frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{k_3} + \alpha_1(u_a - u_w)^{\beta_1}$
Khoury et al. (2011)	$M_r = \left[k_1 Pa \left(\frac{\theta_b}{Pa}\right)^{k_2} \left(1 + \frac{\tau_{oct}}{Pa}\right)^{k_3} + (\psi - \psi_o) \left(\frac{\theta_d}{\theta_s}\right)^{\frac{1}{n}} \right] \left(\frac{\theta_d}{\theta_s}\right)$
Ng et al. (2013)	$M_r = M_0 \left(\frac{p}{p_r}\right)^{k_1} \left(1 + \frac{q_{cyc}}{p_r}\right)^{k_2} \left(1 + \frac{u_a - u_w}{p}\right)^{k_3}$

Nota. Para todos los casos ψ es la succión total, θ_1 es el primer invariante de esfuerzos, u_a es la presión de poro de aire, u_w es la presión de poro de agua, ψ_m es la succión matricial, τ_{oct} esfuerzo a cortante octaédrico, θ es el contenido volumétrico de agua, f es un factor de saturación ($1 < f < 1/\theta$), e relación de vacíos, θ_s contenido volumétrico de agua a 0 succión, θ_d contenido volumétrico de agua a través de la curva de secado, ψ_{m0} succión matricial inicial, $\theta_{net}(\theta_b + 3u_a)$ invariante de esfuerzo neto, Δu_{w-sat} incremento en la presión de poro del agua bajo condiciones no saturadas, $\Delta\psi_m$ cambio relativo en la succión matricial con respecto a ψ_{m0} debido al incremento en la presión de poro del agua bajo condiciones no saturadas, $p \left(\frac{\theta_b}{3} - u_a\right)$ esfuerzo promedio neto, p_r presión de referencia (1kPa), q_{cyc} esfuerzo cortante cíclico, M_0 es el valor del módulo a un valor de referencia cuando $(u_a - u_w) = 0$, y $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, \alpha_1, \beta_1$, son parámetros de regresión. Adaptado a partir de Vanapalli y Han (2013).

Vanapalli y Han (2013), realizaron un análisis de los tipos de modelos mostrados en la Tabla 4, la Tabla 5 y la Tabla 6, concluyendo lo siguiente:

1. Los modelos empíricos tienden a sobreestimar los valores de módulo resiliente y los parámetros de calibración (k_i) sólo se podrían utilizar para suelos del mismo tipo para los que fueron calculados.



2. Los modelos que incorporan la contribución de la succión en algún tensor de esfuerzo son altamente sensibles al valor del módulo en la saturación, además son más flexibles al predecir el valor del M_r con respecto al estado de esfuerzos y la succión del suelo.
3. En general los modelos generan predicciones razonables, sin embargo, sólo son posibles cuando los parámetros de regresión se derivan de una base de datos experimental extensa sobre una amplia gama de estados de esfuerzo y valores de succión del suelo

1.6.9. California Bearing Ratio (CBR)

El CBR es un método utilizado para evaluar la calidad relativa del suelo para subrasante, sub-base y base en pavimentos. Este método fue propuesto en 1929 por los ingenieros Stanton y Porter del Departamento de Carreteras de California, de ahí su nombre *California Bearing Ratio* que en español significa Relación de Soporte California. En algunos países también se le conoce como Valor Relativo Soporte (VRS). Desde entonces, tanto en Europa como en América, el método CBR se ha generalizado y es una forma de caracterización de un suelo para ser utilizado como sub-rasante o material de base en la construcción de carreteras.

A lo largo de los años se han llevado a cabo una serie de investigaciones, tanto in situ como en laboratorio, con el fin de establecer correlaciones entre el CBR y algunas propiedades del suelo. El Penetrómetro de Cono Dinámico (DCP por sus siglas en inglés) es un dispositivo utilizado para determinar la resistencia a la penetración de suelos inalterados y compactados en campo (Chaves, 2017). Mediante este ensayo se puede determinar el CBR de un suelo en campo con las correlaciones que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7
Correlaciones entre el CBR y DCP

Autor	Relación
Kleyn y van Heerden (1983)	$\log_{10}(CBR) = 2,632 - 1,28\log_{10}(DCP)$
Smith y Pratt (1983)	$\log_{10}(CBR) = 2,555 - 1,145\log_{10}(DCP)$
Transport Road Research TRRL (1986)	$\log_{10}(CBR) = 2,317 - 0,8588\log_{10}(DCP)$
Livneh (1987)	$\log_{10}(CBR) = 2,56 - 1,16\log_{10}(DCP)$
Webster et al. (1992)	$\log_{10}(CBR) = 2,465 - 1,12\log_{10}(DCP)$
Webster et al. (1992) (suelos CH)	$\log_{10}(CBR) = 2,542 - \log_{10}(DCP)$
Webster et al. (1992) (suelos CL con CBR < 10)	$\log_{10}(CBR) = 3,538 - 2\log_{10}(DCP)$

Nota. Adaptado a partir de Srinivasa (en Chaves, 2017).



Por otro lado, también se puede relacionar el CBR con diversas propiedades del suelo como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8
Correlaciones entre el CBR y algunas propiedades del suelo en laboratorio

Autor	Relación	Propiedad
Black (1962)	$CBR = \frac{q_u}{70}$	Última capacidad de soporte, q_u (kPa)
Danistan y Vivulanandan (2010)	$CBR = 0,56\tau^{0,64}$	Esfuerzo cortante, τ
Powell et al. (1984)	$E_s = 17,59 \cdot CBR^{0,64}$	Módulo de subrasante, E_s (MPa)
Rao et al. (2008)	$CBR = -2,7543 + 0,2867E$	Módulo de Young, E
Behera y Mishra (2012)	7 días: $CBR = 108,8\sigma_c + 14,14$ 28 días: $CBR = 56,45\sigma_c + 39,12$	Esfuerzo de compresión inconfina, σ_c
Black (1962)	$CBR_{no\ saturado} = CBR_{saturado} \cdot \%S^{2,3}$	Grado de saturación, %S
Ampadu (2007)	$CBR_{no\ saturado} = CBR_{saturado} \cdot \left(\frac{u_a - u_w}{u_e}\right)^n$	Succión ($u_a - u_w$) y entrada de aire (u_e)

Nota. Adaptado a partir de Mulish et al. (2014).

Además, existen diversas correlaciones empíricas que buscan relacionar el módulo resiliente con propiedades de los materiales, como el CBR. En la Tabla 9 se muestran algunas correlaciones entre el módulo resiliente y el CBR de los suelos. Sin embargo, cabe aclarar que las mismas se ven limitadas por la obtención de un solo valor de Módulo Resiliente sin tomar en cuenta condiciones mencionadas como el estado de esfuerzos, contenidos de humedad, compactación, entre otras.

Tabla 9
Relaciones empíricas para obtener el módulo resiliente a partir del CBR

Autor	Relación
Heukelom y Foster (1960)	$Mr(psi) = 1500 \cdot CBR$
Green y Hall (1975)	$Mr(psi) = 5409 \cdot CBR^{0,71}$
Lister (1987)	$Mr(psi) = 2555 \cdot CBR^{0,64}$

Nota. Adaptado a partir de Ávila Esquivel (2017).



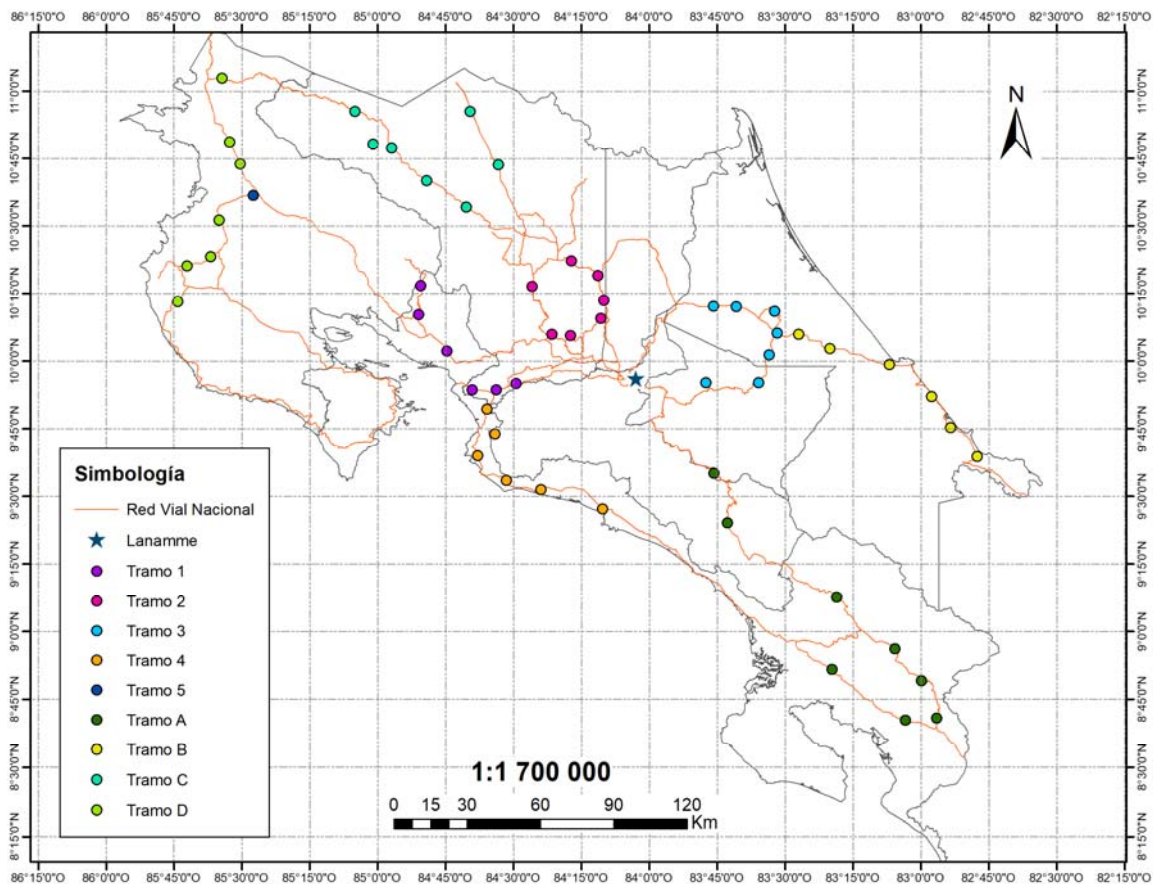
2. MAPAS DE SATURACIÓN

2.1. Puntos de muestreo

Se determinaron una serie de puntos de muestreo para robustecer la base de datos con la que se ejecuta el mapa de saturación. En la Figura 9 se presentan las localizaciones de los tramos donde se obtuvieron los resultados para la ejecución de los mapas de saturación.

Figura 9

Tramos seleccionados para muestreo



2.2. Mapas de saturación con la base de datos actualizada

Los puntos de muestreo se clasifican según las regiones establecidas: Zona Norte (12 puntos), Pacífico Norte (16 puntos), Pacífico Central (4 puntos), Pacífico Sur (8 puntos), Caribe Norte (7 puntos), Caribe Sur (7 puntos) y Valle Central (2 puntos).



Posteriormente, se realizaron las giras de campo en las cuales se obtiene una muestra de material con la que se calcula la humedad natural del suelo y la gravedad específica del mismo (ver apéndice 4). Haciendo uso de las ecuaciones (7) y (8) propuestas por Bravo (2013), se obtiene la relación de vacíos de estos suelos y seguidamente, el grado de saturación.

Una vez determinado el grado de saturación de los suelos muestreados, estos resultados se adjuntan a la base de datos generada con la información recopilada de diversas fuentes y se elaboran los mapas de saturación divididos por regiones y según la época del año. En total se realizaron 3 campañas de muestreo (verano 2021, invierno 2020 e invierno 2021), luego de analizada la variación en los datos se muestran los mapas finales obtenidos, estos se detallan en la Figura 10, Figura 11, Figura 12 y Figura 13.

Figura 10

Mapa de saturación percentil 85 para la época seca

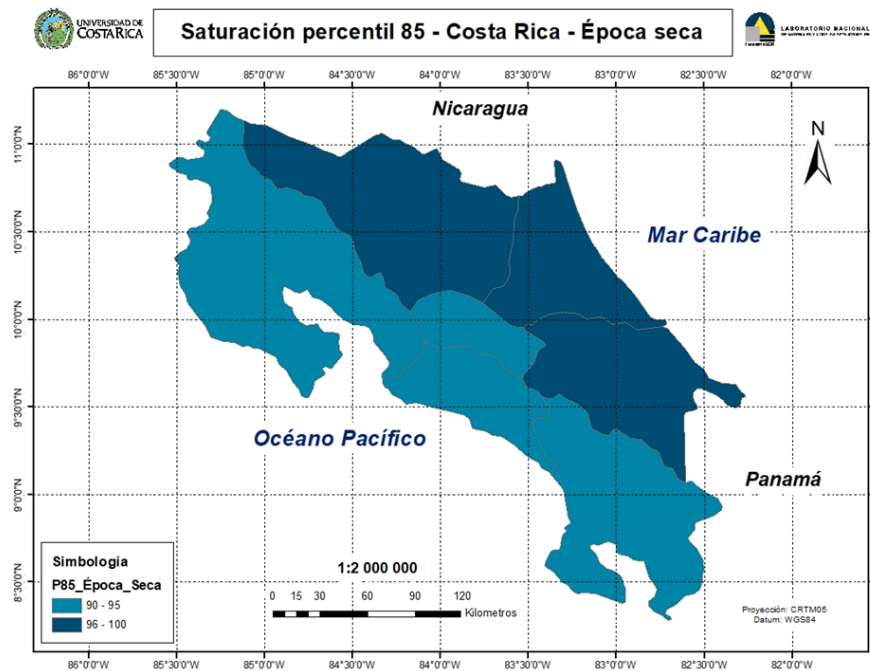




Figura 11
Mapa de saturación percentil 85 para la época lluviosa

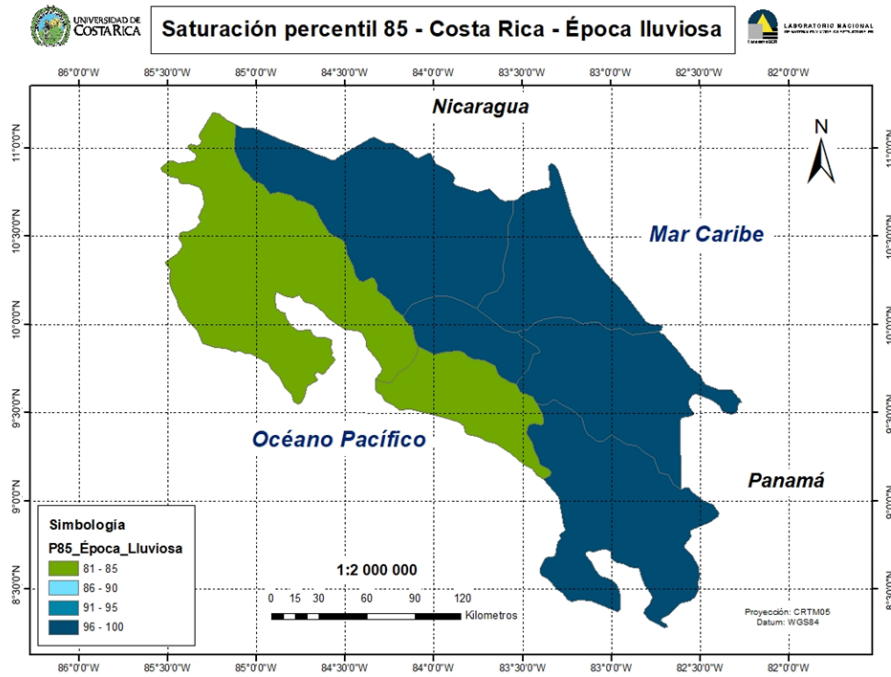


Figura 12
Mapa de saturación promedio para la época seca

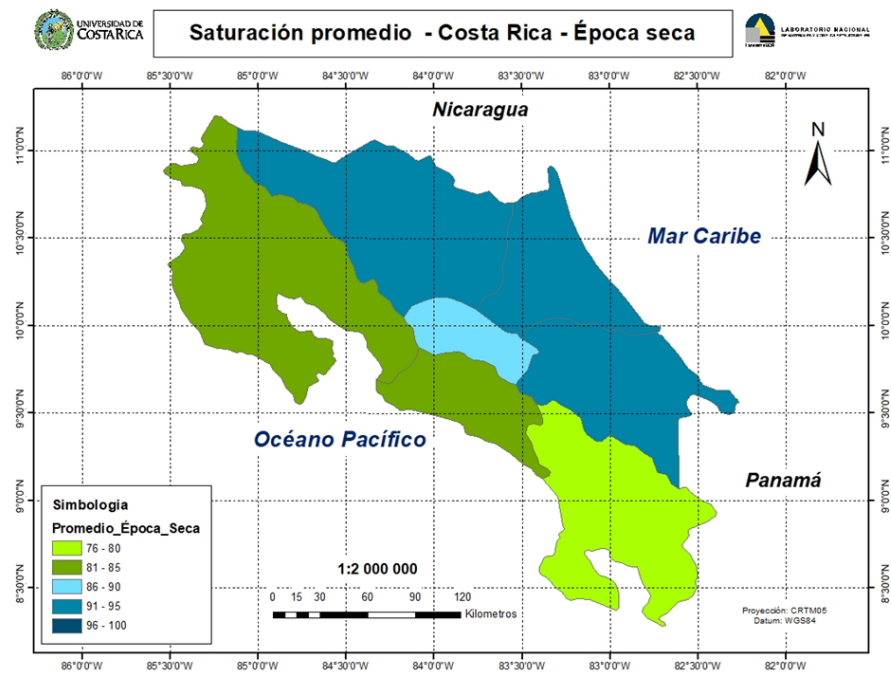
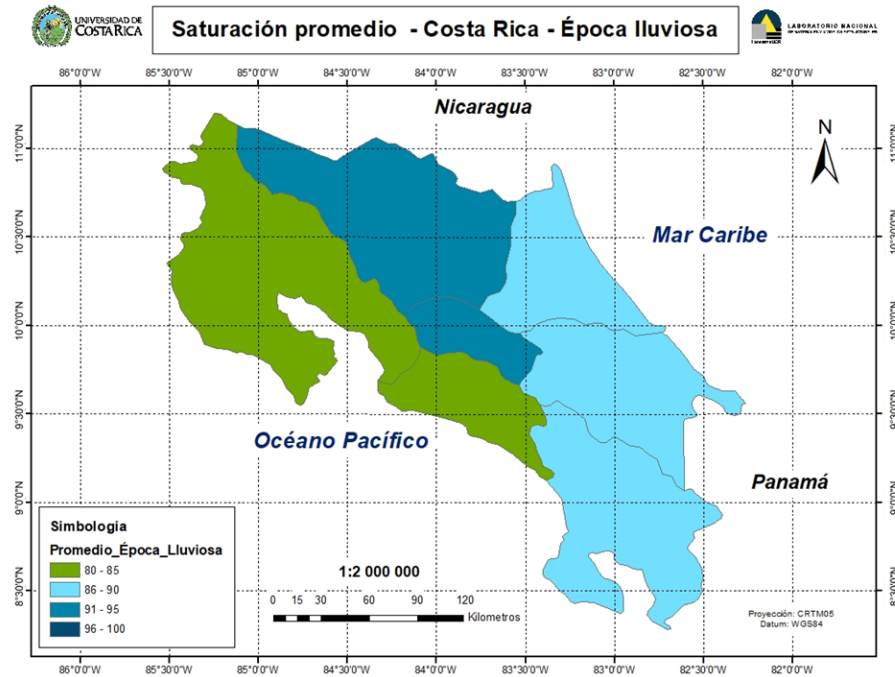




Figura 13

Mapa de saturación promedio para la época lluviosa



De acuerdo con lo mencionado en el apartado de Metodología, las limitaciones existentes, tales como profundidades de las muestras, fechas exactas de muestreo, cantidad de datos obtenidos, entre otras; generaron algunas inconsistencias en los valores de humedad (que en época seca sean mayores que en época húmeda para algunas regiones). A pesar de lo anterior, la intención de generarlos fue tener una idea inicial de rangos de humedad que permitieran establecer los valores de entrada, para el ensayo de módulo resiliente en condiciones de humedad variable (objetivo principal de la investigación).



3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de materiales

Una vez que se cuenta con el registro del contenido de humedad de los 56 puntos de muestreo, tanto para la época seca como para la época lluviosa. Para la selección de los puntos de muestreo, se utiliza la investigación titulada *Caracterización físico-química de los suelos de Costa Rica* realizada por Ávila y Araya (2014), en donde se establecen porcentajes de tipos de suelos que toman en cuenta criterios tales como la funcionalidad del suelo como material de subrasante y su incidencia en la construcción de obras del país, en su mayoría proyectos carreteros). Con base en lo anterior, se seleccionan un total de 11 puntos que representan porcentualmente la distribución de los tipos de suelo existentes como subrasantes de las rutas nacionales; a los que se le realizaron los ensayos de caracterización física tal como: límites de Atterberg, gravedad específica, granulometría, próctor estándar, entre otros. Adicionalmente, en este estudio se incluyen tres suelos analizados por Alfaro (2021) y un suelo analizado por Ávila (2017). Estos suelos corresponden a las zonas de Atenas, Guácimo, Liberia y Paquera. Para un total de 15 materiales analizados. Los resultados de la caracterización física de todos los suelos estudiados se presentan en la Tabla 10 a continuación, los datos completos se muestran en el Apéndice 5: Caracterización física de las muestras de estudio.

Tabla 10

Caracterización física de todas las muestras de estudio

ID	Procedencia	Gravedad específica	Humedad natural		Próctor estándar		Límites de Atterberg			Clasificación		% pasando		CBR
			Invierno	Verano	Humedad óptima	Densidad máxima seca (kg/m ³)	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	SUCS	AASHTO	0,075 mm	0,002 mm	
1	Hone Creek	2,702	28,3	33,8	18,6	1660	51	27	24	SC	A-2-7(6)	33,4	17,3	15,7
2	Lorena	2,673	32,0	23,3	25,4	1510	60	37	23	SM	A-7-5(12)	49,9	25,3	6,7
3	El Guapote	2,641	39,3	29,1	22,2	1570	41	30	11	ML	A-7-5(9)	78,7	15,9	7,2
4	Río Claro	2,664	41,3	26,4	32,0	1346	36	25	11	SM	A-6(0)	35,3*	16,8	19,9
5	Villa Colón	2,692	60,0	74,6	40,3	1085	98	65	33	MH	A-7-5(43)	88,9	57,9	9,5
6	Barrigones	2,687	63,0	30,3	25,2	1510	65	35	30	MH	A-7-5(34)	93,5*	56	4,8
7	San Cayetano	2,769	53,0	50,9	44,6	1190	85	52	33	MH	A-7-5(42)	90,4*	54	16,0
8	Bijagual	2,749	46,0	40,9	39,4	1245	79	51	28	MH	A-7-5(32)	84,8*	41,6	10,3
9	San Rafael	2,760	43,2	34,6	40,9	1232	85	53	32	MH	A-7-5(39)	89,5	55,9	12,3
10	Cinchona	2,507	118,0	90,9	65,0	850	72	61	11	MH	A-7-5(6)	53,2	0,0	14,8
11	Los Chiles	2,751	36,5	31,8	36,5	1272	73	41	32	MH	A-7-5(35)	87,4	62,8	10,6
12	Cruce de Atenas	2,873		29,6	27,1	1534	58	32	27	MH	A-7-5(25)	82,2	28,82	-**
13	Guácimo	2,769		53,5	37,2	1302	62	44	18	MH	A-7-5(20)	84,6	53,7	-**
14	UCR Liberia	2,540		17,3	19,3	1634	36	25	10	ML	A-4(5)	63,4	15,1	-**
15	Paquera	2,515		-**	18,4	1630	39	27	12	SM	A-2-6(0)	22,4	-**	-**

Nota. *Valores resultado de la prueba del método B con defloculante de la norma ASTM D1140.

**Datos no proporcionados por los autores de las tesis



3.2. Curvas características y modelación

En todos los suelos del estudio se determinó la curva característica de suelo-agua mediante la determinación de la succión del suelo a diferentes condiciones de humedad, esto según el método de ensayo establecido por Chon kan (2017). Además, todas las SWCC fueron obtenidas a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)). A continuación, se muestran los resultados obtenidos (puntos en las gráficas) y los modelos generados (línea continua) a partir de los datos.

3.2.1. Hone Creek

La curva SWCC del suelo de Hone Creek se determinó a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 11 y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 14.

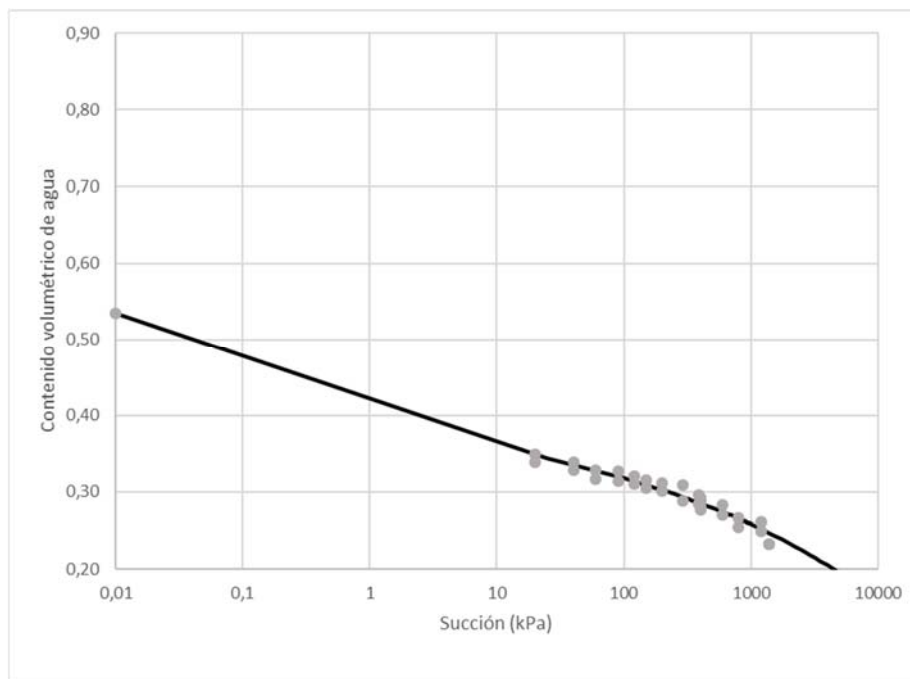
Tabla 11

Parámetros de regresión del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de Hone Creek

a	b	c
90,0184	0,636249	0,421130

Figura 14

Curva SWCC del suelo de Hone Creek





3.2.2. Lorena

La curva SWCC del suelo de Lorena se determinó a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 12 y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 15.

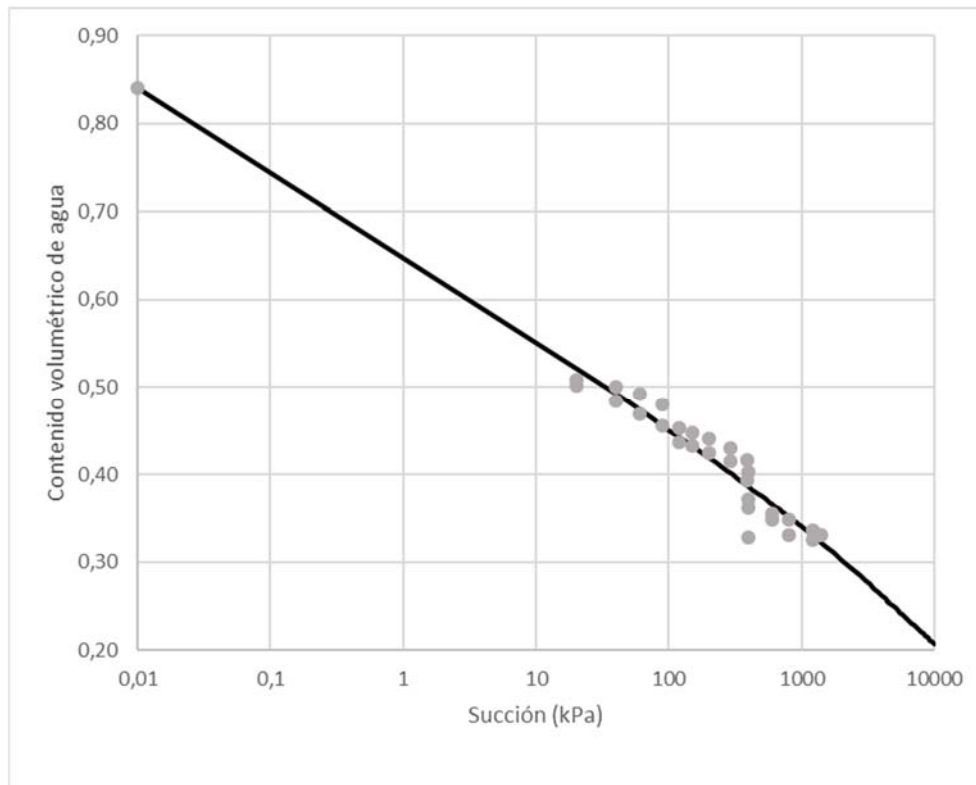
Tabla 12

Parámetros de regresión del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de Lorena

a	b	c
6,13113	0,251997	1,39129

Figura 15

Curva SWCC del suelo de Lorena



3.2.3. El Guapote

La curva SWCC del suelo de El Guapote se determinó a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 13 y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la



Figura 16.

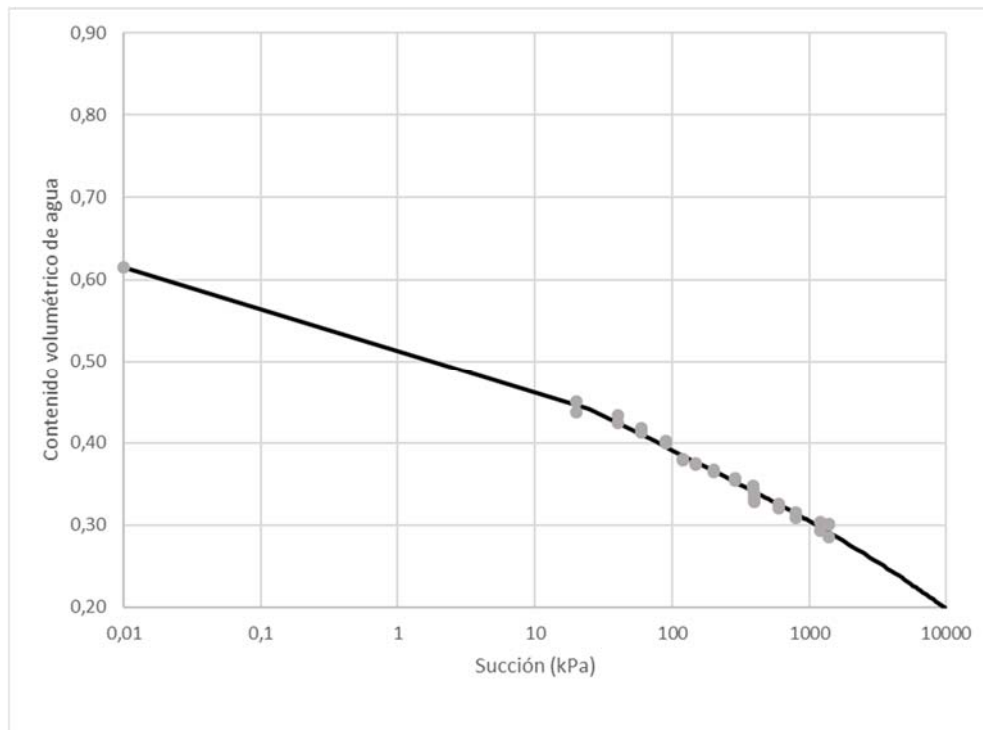
Tabla 13

Parámetros de regresión del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de El Guapote

a	b	c
7,03725	0,478920	0,651910

Figura 16

Curva SWCC del suelo de El Guapote



3.2.4. Río Claro

La curva SWCC del suelo de Río Claro se determinó a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 14 y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 17.

Tabla 14

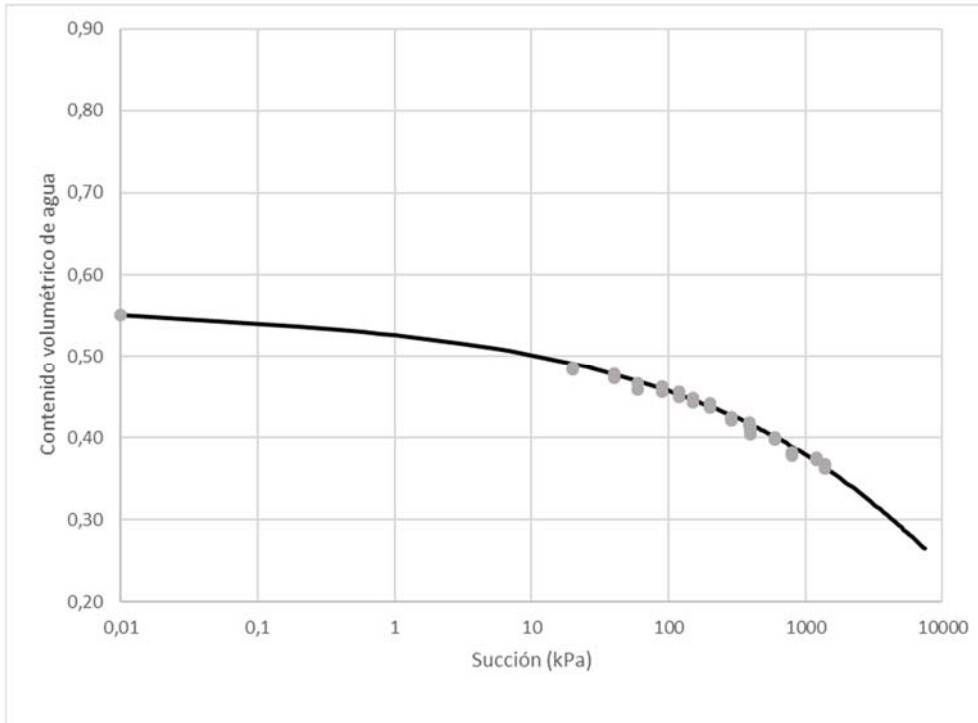
Parámetros de regresión del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de Río Claro

a	b	c
6,60902	0,549017	0,710441



Figura 17

Curva SWCC del suelo de Río Claro



3.2.5. *Villa Colón*

La curva SWCC del suelo de Villa Colón se determinó a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 15 y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 18.

Tabla 15

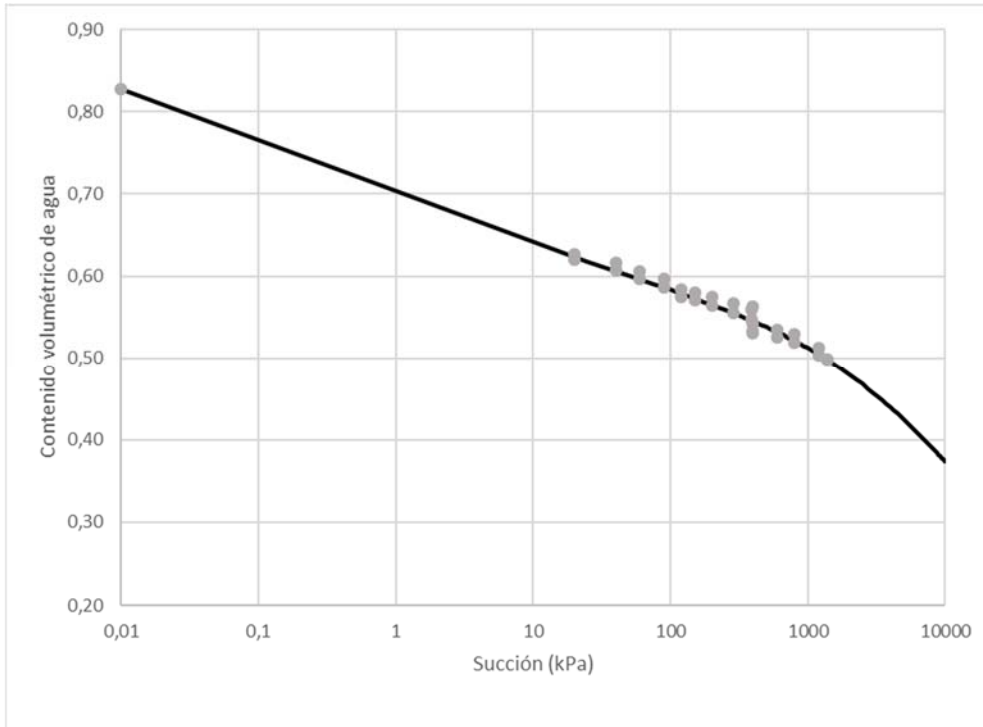
Parámetros de regresión del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de Villa Colón

a	b	c
1,18675	0,650174	0,168961



Figura 18

Curva SWCC del suelo de Villa Colón



3.2.6. *Barrigones*

La curva SWCC del suelo de Barrigones se determinó a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 16 y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 19.

Tabla 16

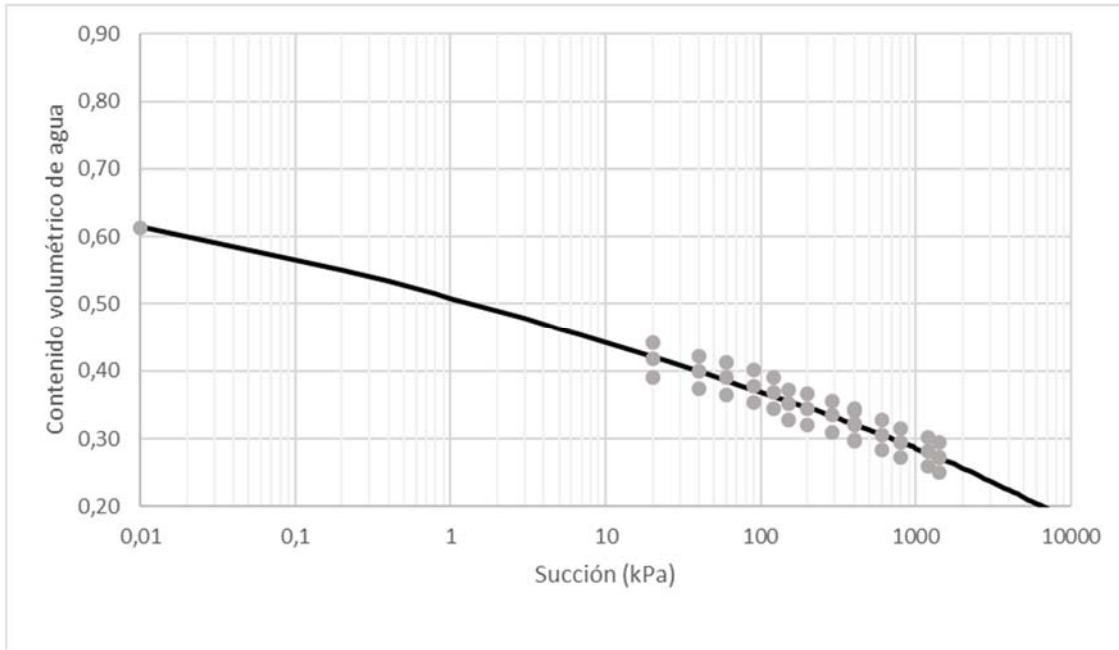
Parámetros de regresión del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de Barrigones

a	b	c
15,5577	0,175227	1,99850



Figura 19

Curva SWCC del suelo de Barrigones



3.2.7. San Cayetano

La curva SWCC del suelo de San Cayetano de Venecia se determinó a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 17 y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 20.

Tabla 17

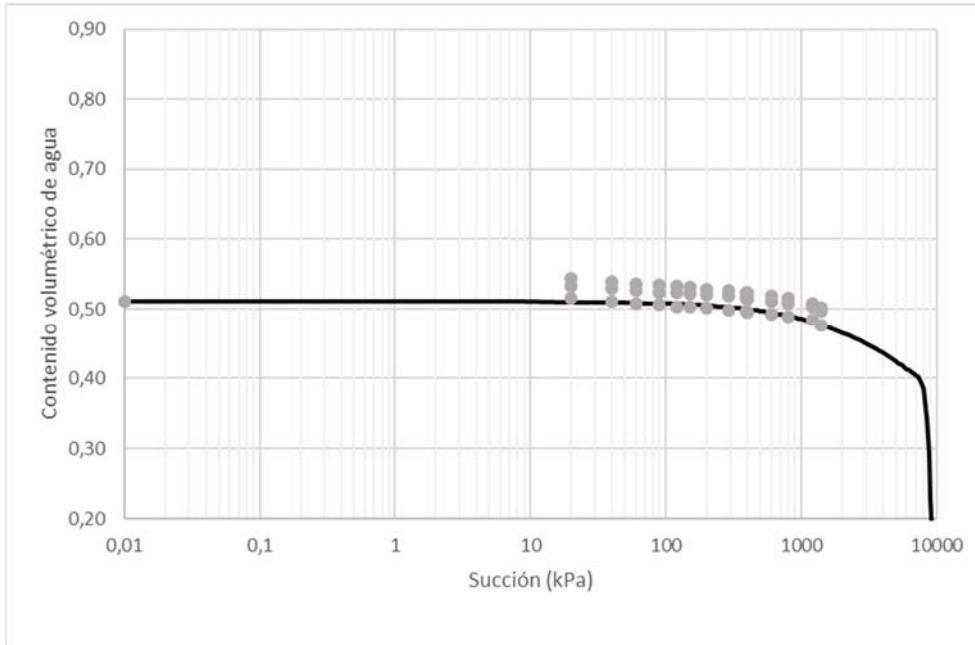
Parámetros de regresión del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de San Cayetano de Venecia

a	b	c
8920,16	27,4976	1,61028



Figura 20

Curva SWCC del suelo de San Cayetano de Venecia



3.2.8. *Bijagual*

La curva SWCC del suelo de Bijagual se determinó a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 18 y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 21.

Tabla 18

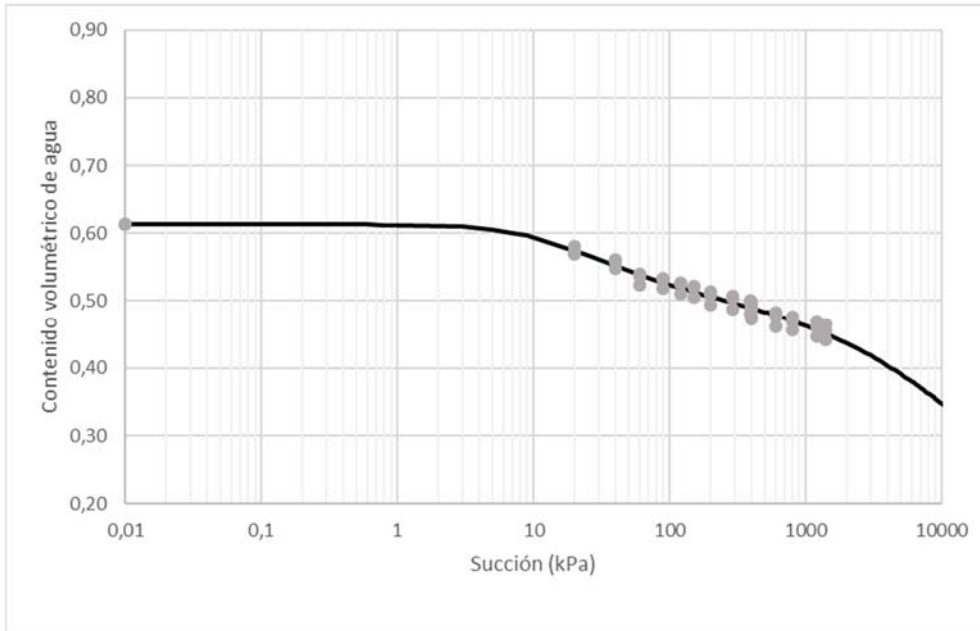
Parámetros de regresión del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de Bijagual

a	b	c
10,2251	1,56757	0,116566



Figura 21

Curva SWCC del suelo de Bijagual



3.2.9. San Rafael

La curva SWCC del suelo de San Rafael se determinó a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 19 y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 22.

Tabla 19

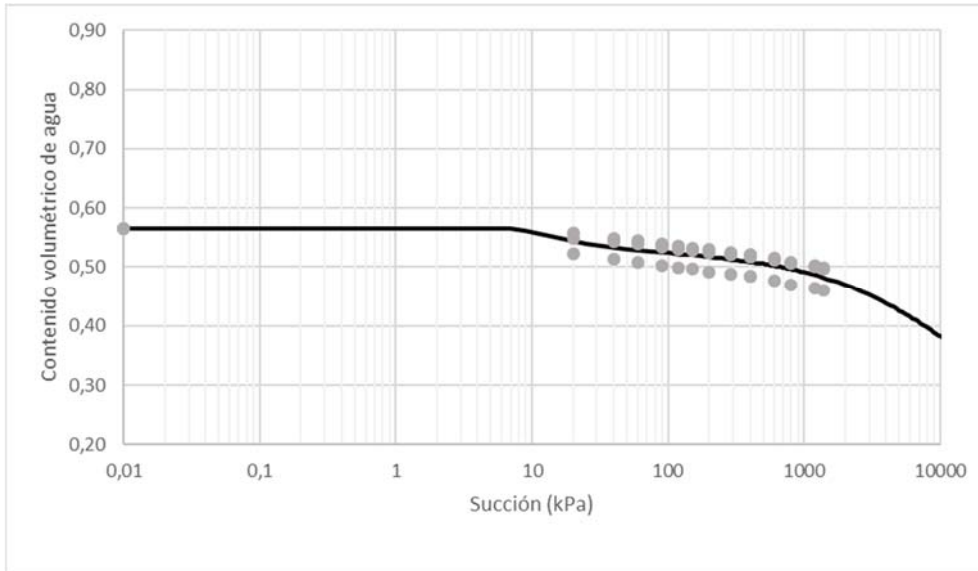
Parámetros de regresión del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de San Rafael

a	b	c
9,766004	5,22236	0,028312



Figura 22

Curva SWCC del suelo de San Rafael



3.2.10. Cinchona

La curva SWCC del suelo de Cinchona se determinó a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 20 y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 23.

Tabla 20

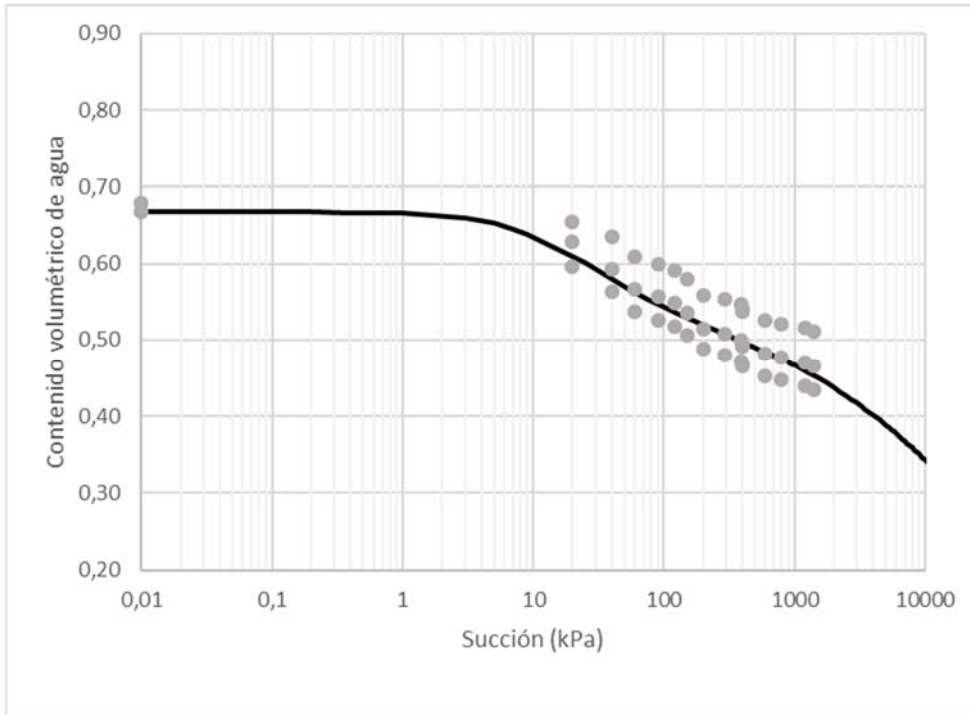
Parámetros de regresión del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de Cinchona

a	b	c
9,31832	1,37134	0,165721



Figura 23

Curva SWCC del suelo de Cinchona



3.2.11. Los Chiles

La curva SWCC del suelo de Los Chiles se determinó a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 21 y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 24.

Tabla 21

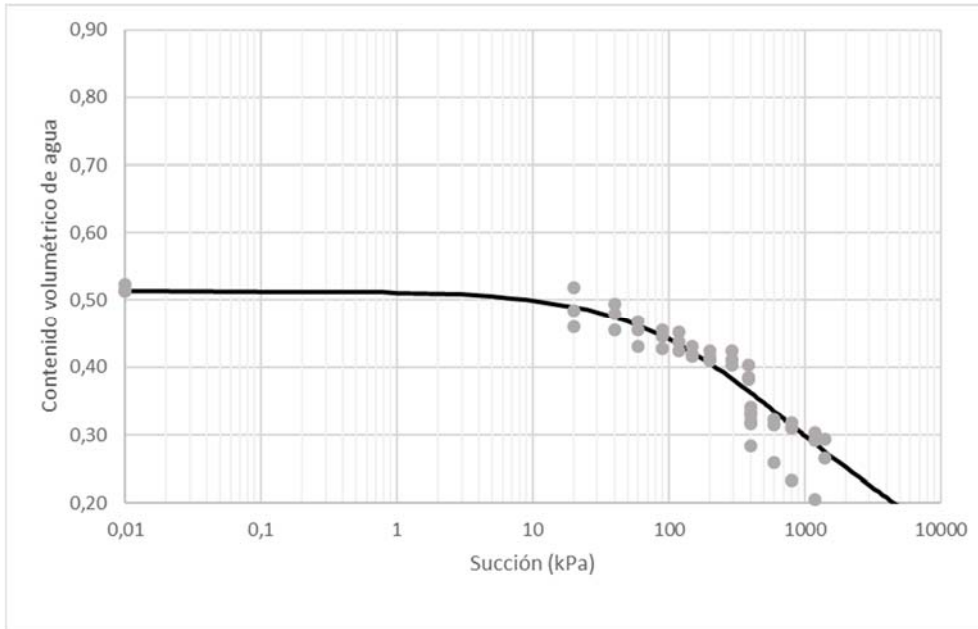
Parámetros de regresión del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de Los Chiles

a	b	c
161,888	0,814073	0,727081



Figura 24

Curva SWCC del suelo de Los Chiles



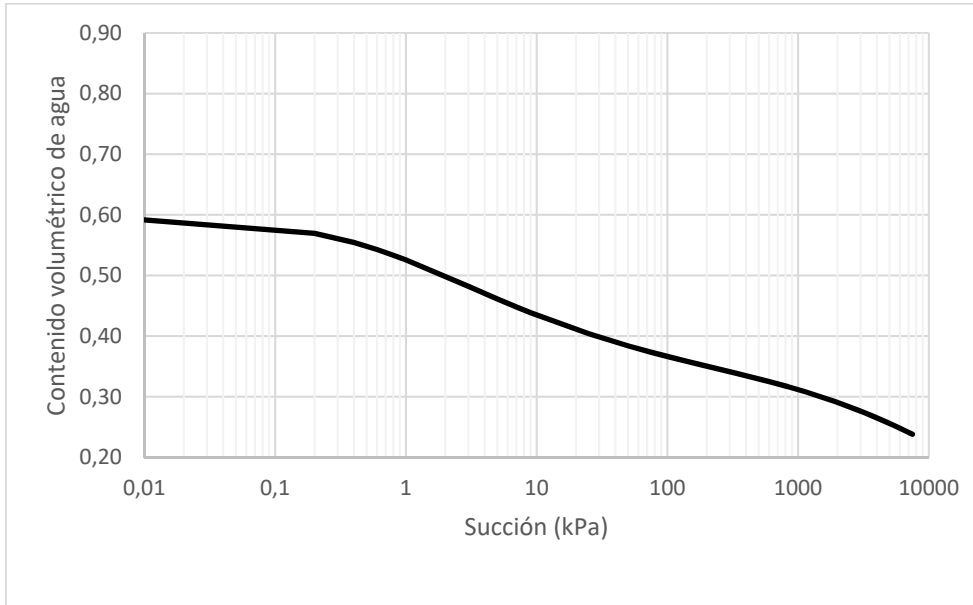
3.2.12. Cruce de Atenas

La curva SWCC del suelo de Cruce de Atenas fue generada por Alfaro (2021) a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de regresión para suelos limosos determinados por Chon kan (2017) (ver Tabla 2), un contenido de volumétrico de agua en condición saturada calculado a partir de la ecuación (10) y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 25.



Figura 25

Curva SWCC del suelo del Cruce de Atenas



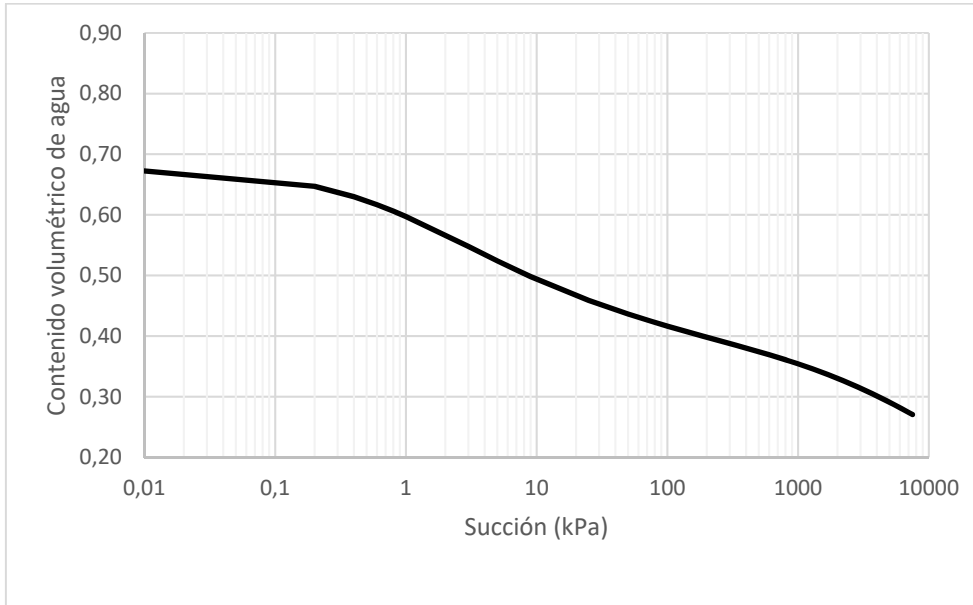
3.2.13. Guácimo

La curva SWCC del suelo de Guácimo fue generada por Alfaro (2021) a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de regresión para suelos limosos determinados por Chon kan (2017) (ver Tabla 2), un contenido de volumétrico de agua en condición saturada calculado a partir de la ecuación (10) y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 26.



Figura 26

Curva SWCC del suelo de Guácimo



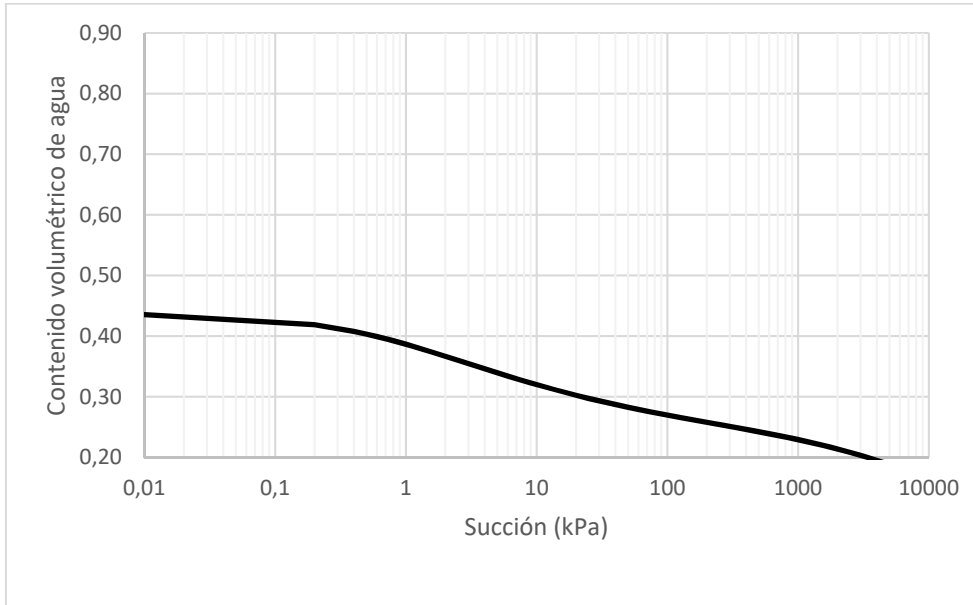
3.2.14. LanammeUCR sede Liberia

La curva SWCC del suelo del LanammeUCR sede Liberia fue generada por Alfaro (2021) a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de regresión para suelos limosos determinados por Chon kan (2017) (ver Tabla 2), un contenido de volumétrico de agua en condición saturada calculado a partir de la ecuación (10) y una succión residual de 3000 kPa. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 27.



Figura 27

Curva SWCC del suelo del LanammeUCR sede Liberia



3.2.15. Paquera

La curva SWCC del suelo de Paquera fue determinada por Ávila Esquivel (2017) en su tesis de maestría, esto a partir del modelo de Fredlund y Xing (ecuación (9)) utilizando los parámetros de la Tabla 22. Como resultado, se obtiene el gráfico de la Figura 28.

Tabla 22

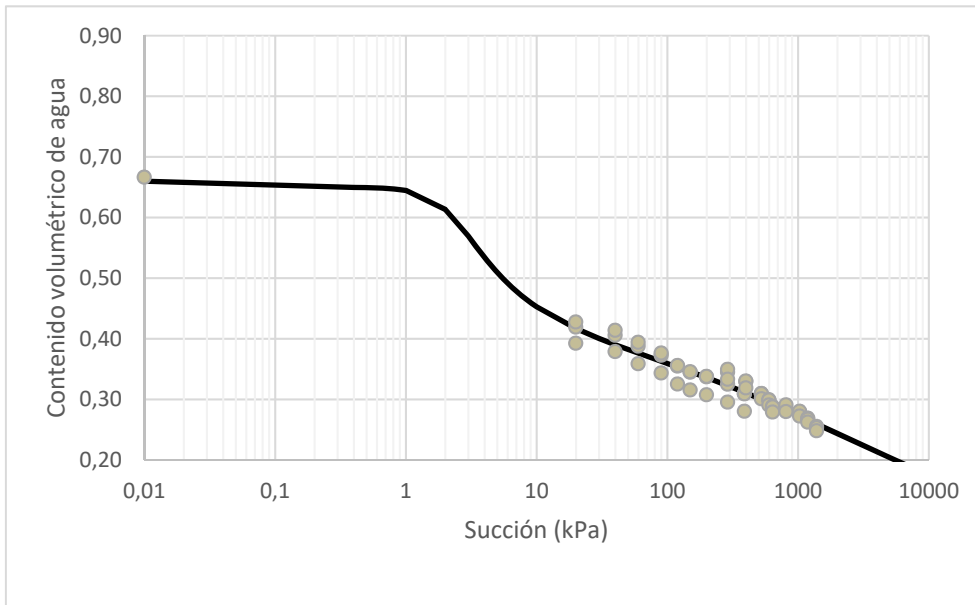
Parámetros del modelo de Fredlund y Xing para el suelo de Paquera

a	b	c	Ψ_r (kPa)
2,03535	3,19346	0,219056	259,433



Figura 28

Curva SWCC del suelo de Paquera



3.3. Módulo resiliente

El ensayo para la determinar el módulo resiliente de cada suelo se realizó acorde a la modificación de Ávila (2017) de la norma NCHRP 1-28A. Para el ensayo se tomaron varios puntos de humedad de prueba en cada suelo, la definición de estos se basó en el mapa de humedades (los puntos más secos y los más húmedos que la humedad óptima) y se calculó la succión matricial correspondiente de acuerdo con su curva característica de suelo-agua (SWCC). En los próximos resultados se muestran los resultados obtenidos para todas las secuencias de ensayo (estados de esfuerzo) definidas de acuerdo con la norma NCHRP 1-28A.

3.3.1. Hone Creek

Para el suelo de Hone Creek, se seleccionaron los puntos de muestra de la Tabla 23. Al realizar el ensayo del módulo resiliente, se obtiene el gráfico de la Figura 29 que muestra las tres réplicas a dos succiones distintas (Tabla 23).



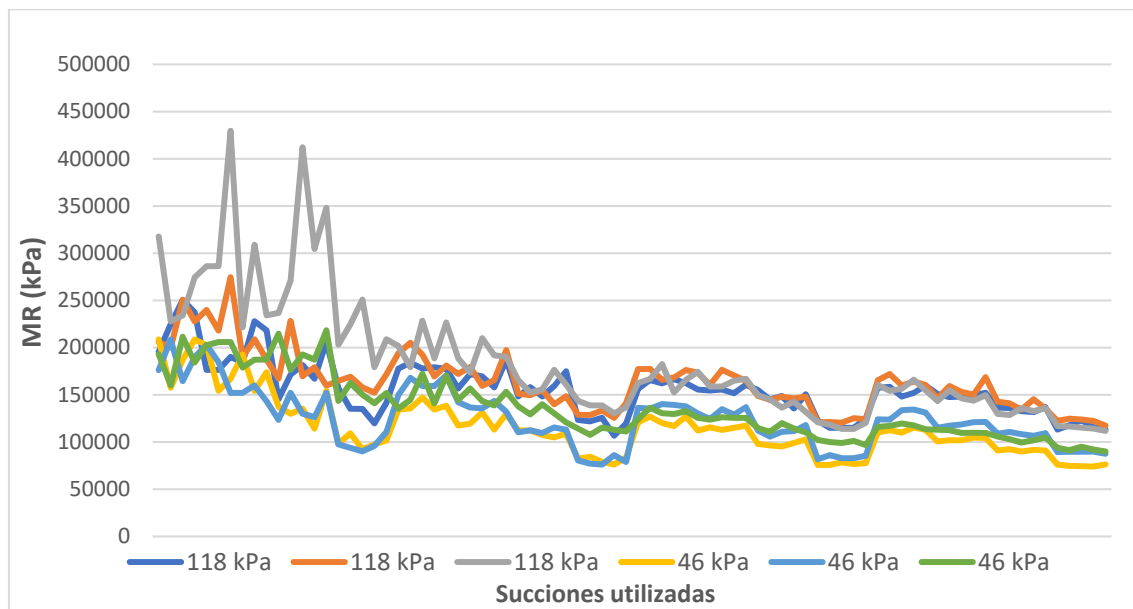
Tabla 23

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de Hone Creek

Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	71	16,70	0,31	118
2	86	20,30	0,33	46

Figura 29

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de Hone Creek



3.3.2. Lorena

Para el suelo de Lorena, se seleccionaron los puntos de muestra de la Tabla 24. Al realizar el ensayo del módulo resiliente, se obtiene el gráfico de la Figura 30 que muestra las dos réplicas a tres succiones distintas (Tabla 24).

Tabla 24

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de Lorena

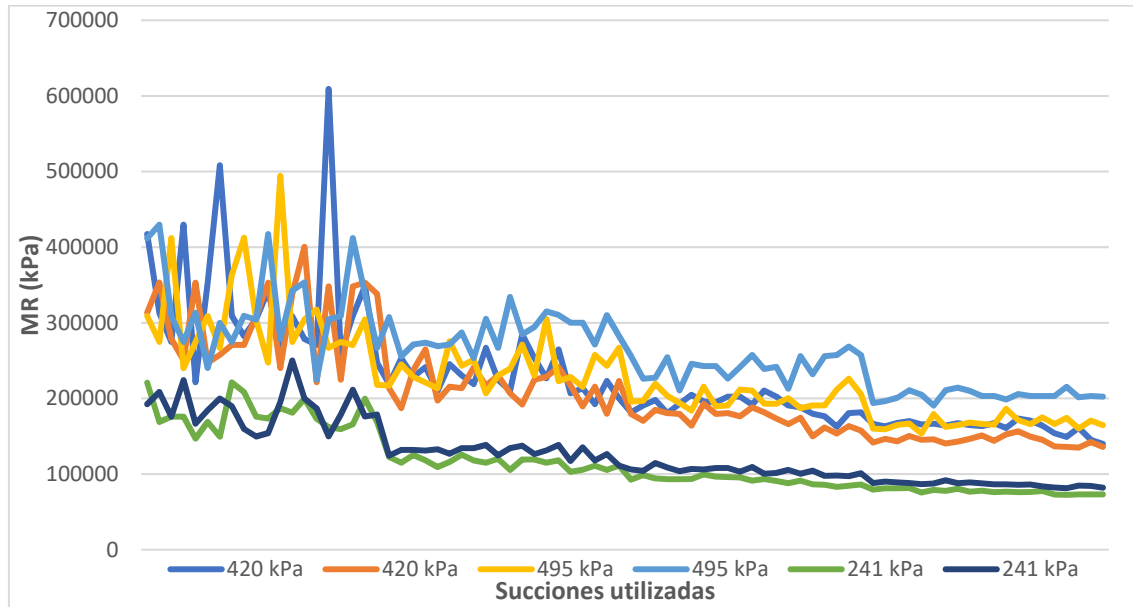
Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	87	24,87	0,376	495
2	89	25,40	0,38	420
3	95	27,16	0,41	241

Nota. El punto 2 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.



Figura 30

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de Lorena



3.3.3. El Guapote

Para el suelo de El Guapote, se seleccionaron los puntos de muestra de la Tabla 25. Al realizar el ensayo del módulo resiliente, se obtiene el gráfico de la Figura 31 que muestra las tres réplicas a dos succiones distintas (Tabla 25).

Tabla 25

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de El Guapote

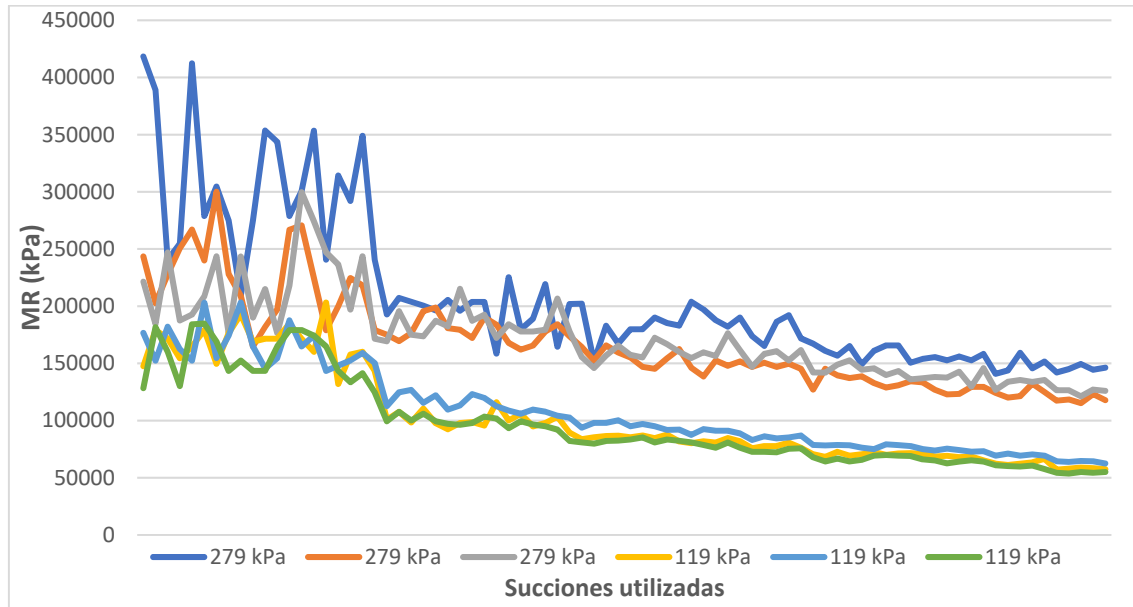
Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	82	22,10	0,35	279
2	90	24,30	0,38	119

Nota. El punto 1 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.



Figura 31

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de El Guapote



3.3.4. Río Claro

Para el suelo de Río Claro, se seleccionaron los puntos de muestra de la Tabla 26. Al realizar el ensayo del módulo resiliente, se obtiene el gráfico de la Figura 32 que muestra las dos réplicas a tres succiones distintas (Tabla 26).

Tabla 26

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de Río Claro

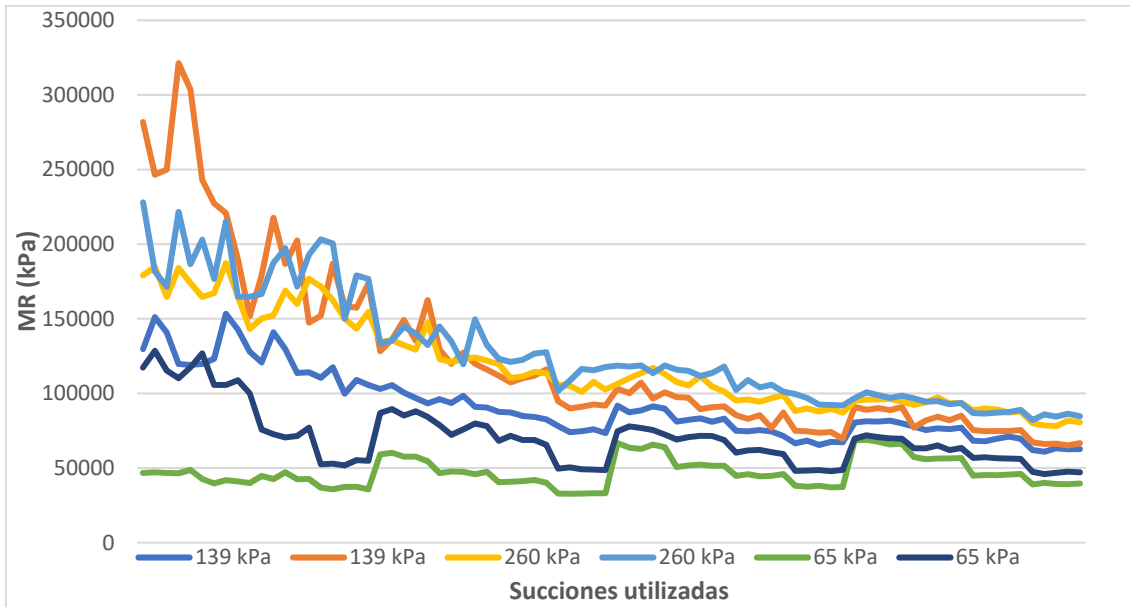
Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	70	19,31	0,30	260
2	76	21,00	0,32	139
3	84	23,17	0,35	65

Nota. El punto 2 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.



Figura 32

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de Río Claro



3.3.5. Villa Colón

Para el suelo de Villa Colón, se seleccionaron los puntos de muestra de la Tabla 27. Al realizar el ensayo del módulo resiliente, se obtiene el gráfico de la Figura 33 que muestra las tres réplicas a dos succiones distintas (Tabla 27).

Tabla 27

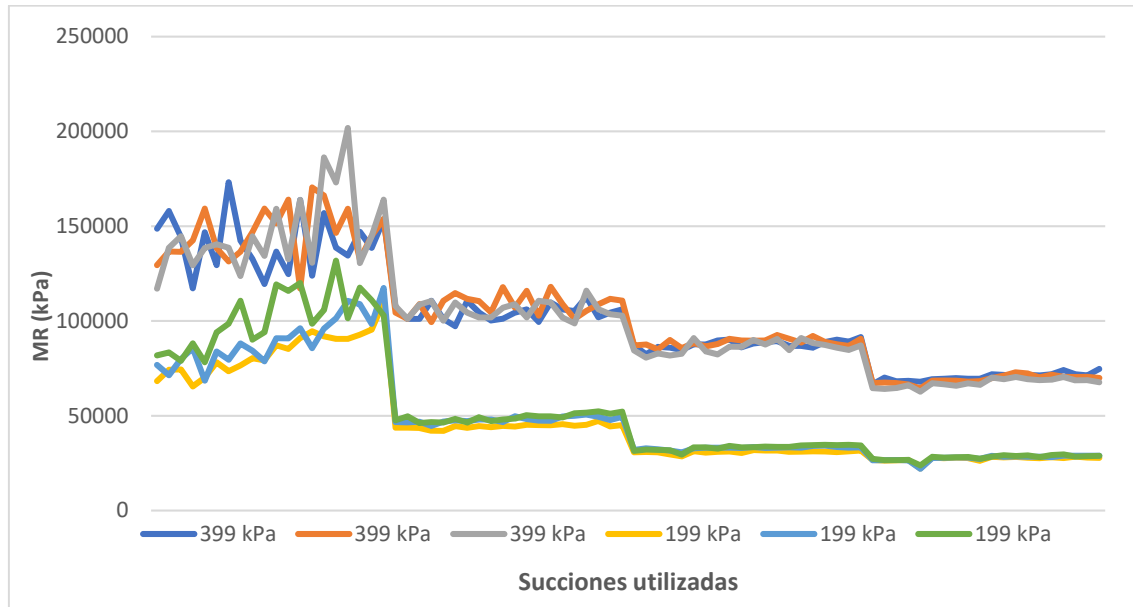
Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de Villa Colón

Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	88	59,30	0,55	399
2	85	57,20	0,57	199



Figura 33

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de Villa Colón



3.3.6. Barrigones

Para el suelo de Barrigones, se seleccionaron los puntos de muestra de la Tabla 28. Al realizar el ensayo del módulo resiliente, se obtiene el gráfico de la Figura 34 que muestra las dos réplicas a tres succiones distintas (Tabla 28).

Tabla 28

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de Barrigones

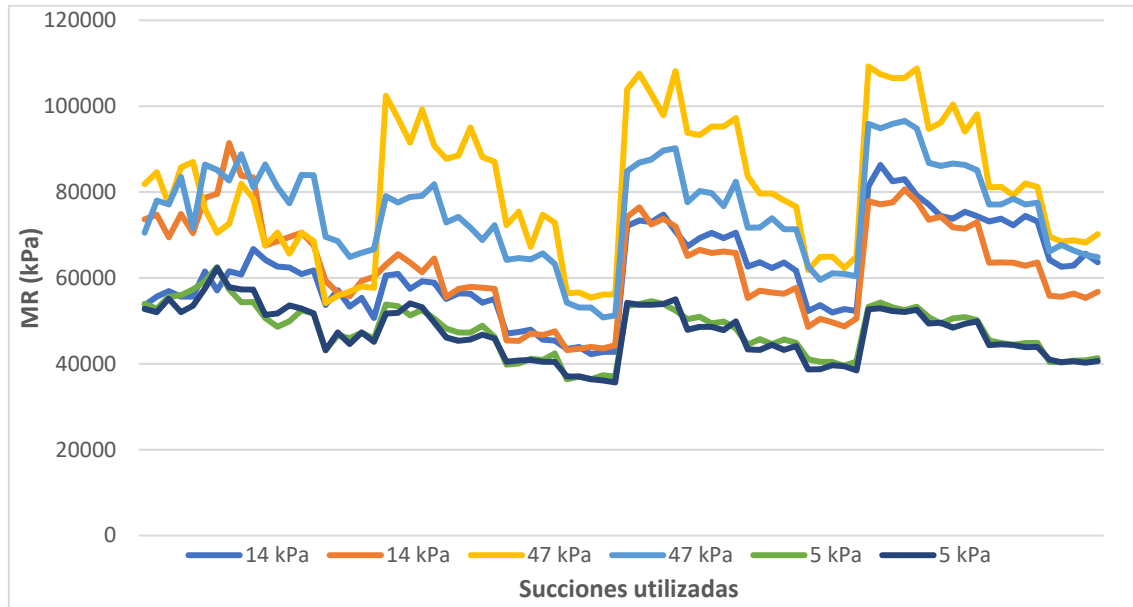
Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	70	33,16	0,39	47
2	77	36,50	0,43	14
3	83	39,31	0,47	5

Nota. El punto 2 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.



Figura 34

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de Barrigones



3.3.7. San Cayetano

Para el suelo de San Cayetano de Venecia, se seleccionaron los puntos de muestra de la Tabla 29. Al realizar el ensayo del módulo resiliente, se obtiene el gráfico de la Figura 35 que muestra las dos réplicas a tres succiones distintas (Tabla 29).

Tabla 29

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de San Cayetano

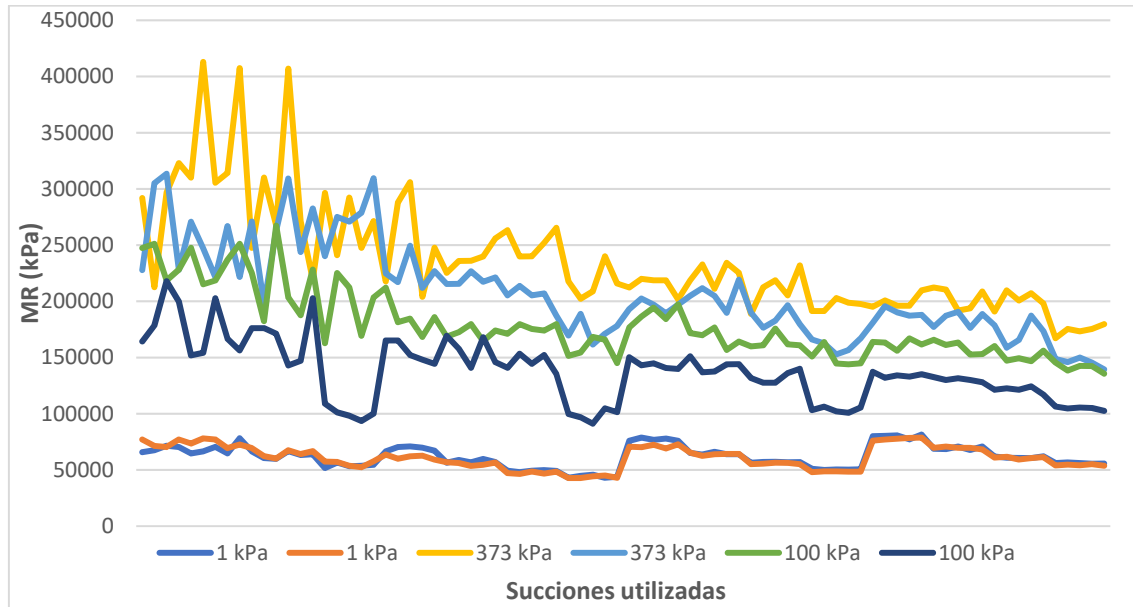
Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	88	42,04	0,50	373
2	89	42,67	0,51	100
3	93	44,60	0,53	1

Nota. El punto 3 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.



Figura 35

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de San Cayetano



3.3.8. Bijagual

Para el suelo de Bijagual, se seleccionaron los puntos de muestra de la Tabla 30.. Al realizar el ensayo del módulo resiliente, se obtiene el gráfico de la Figura 36 que muestra las dos réplicas a tres succiones distintas (Tabla 30).

Tabla 30

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de Bijagual

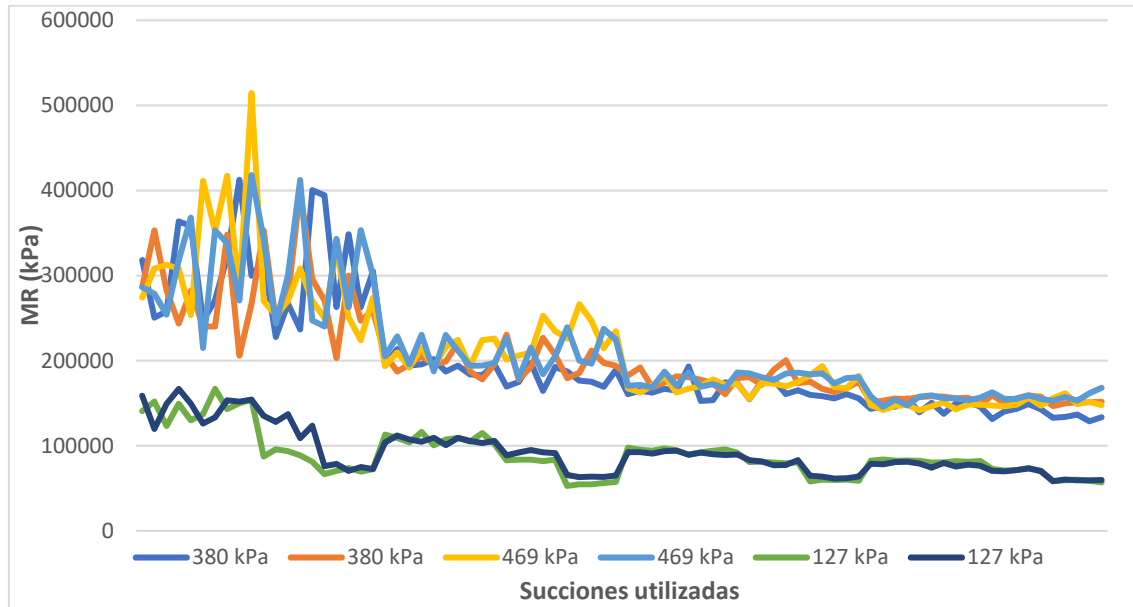
Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	89	38,97	0,48	469
2	90	39,40	0,49	380
3	95	41,60	0,52	127

Nota. El punto 2 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.



Figura 36

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de Bijagual



3.3.9. San Rafael

Para el suelo de San Rafael, se seleccionaron los puntos de muestra de la Tabla 31. Al realizar el ensayo del módulo resiliente, se obtiene el gráfico de la Figura 37 que muestra las dos réplicas a tres succiones distintas (Tabla 31).

Tabla 31

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de San Rafael

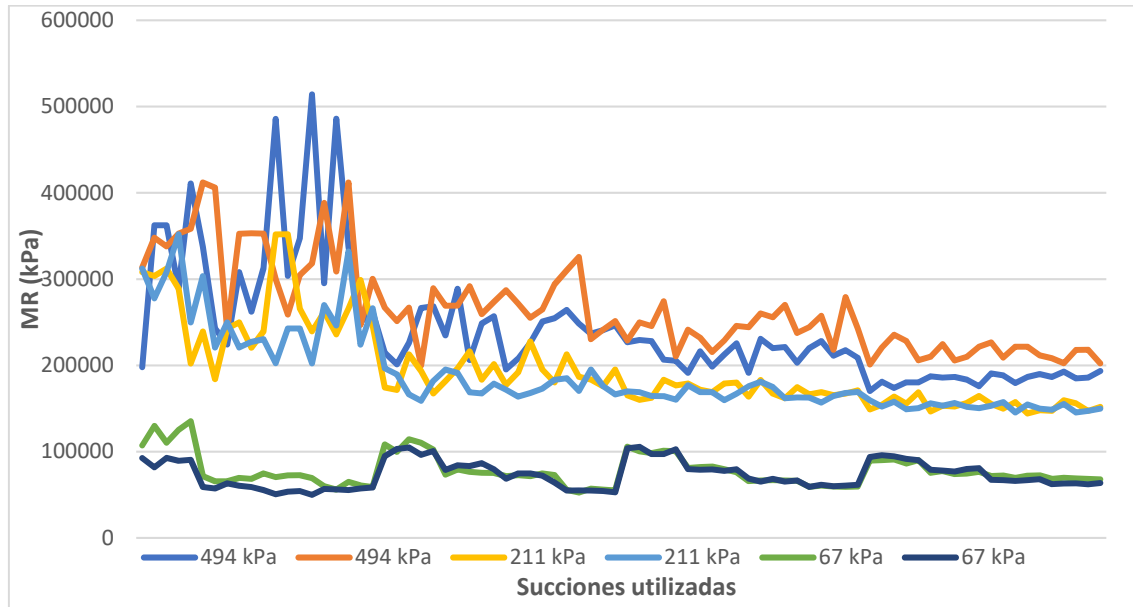
Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	91	41,04	0,51	494
2	93	41,94	0,52	211
3	95	42,84	0,53	67

Nota. El punto 1 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.



Figura 37

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de San Rafael



3.3.10. Cinchona

Para el suelo de Cinchona, se seleccionaron los puntos de muestra de la Tabla 32. Al realizar el ensayo del módulo resiliente, se obtiene el gráfico de la Figura 38 que muestra las dos réplicas a tres succiones distintas (Tabla 32).

Tabla 32

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de Cinchona

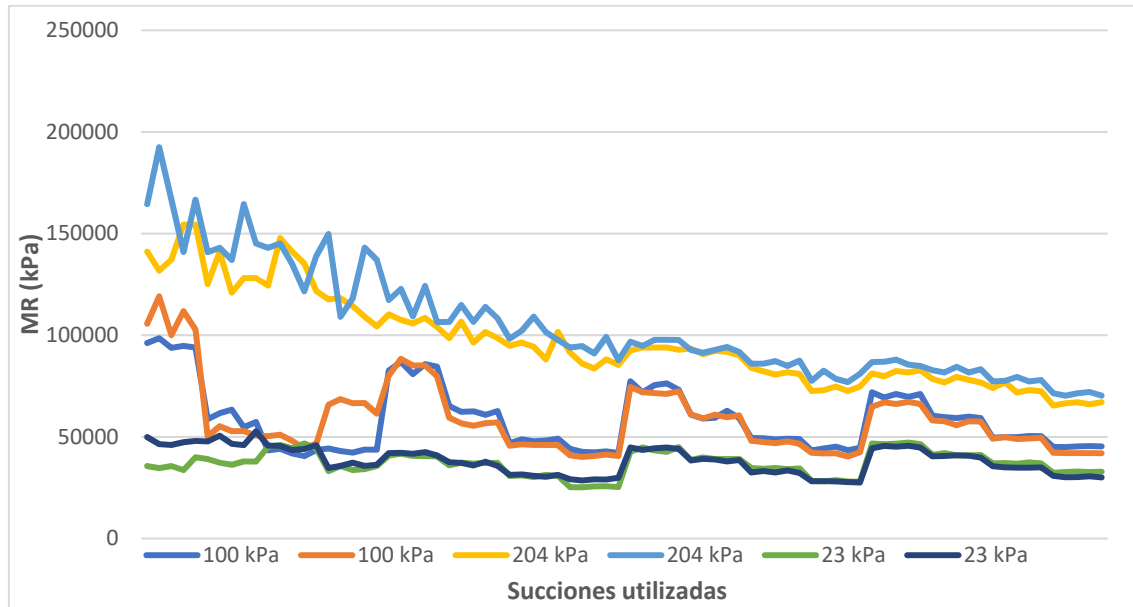
Punto	Saturación (100%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	79	62,11	0,53	204
2	83	65,00	0,55	100
3	92	72,33	0,61	23

Nota. El punto 2 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.



Figura 38

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de Cinchona



3.3.11. Los Chiles

Para el suelo de Los Chiles, se seleccionaron los puntos de muestra de la Tabla 33. Al realizar el ensayo del módulo resiliente, se obtiene el gráfico de la Figura 39 que muestra las dos réplicas a tres succiones distintas (Tabla 33).

Tabla 33

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de Los Chiles

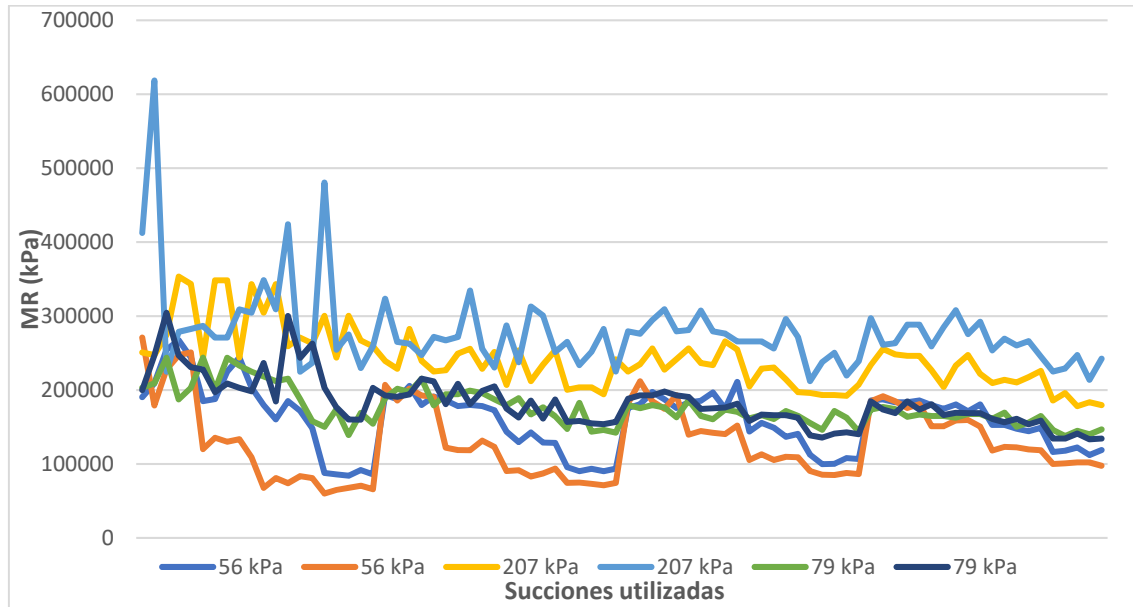
Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	76	31,72	0,40	207
2	85	35,48	0,45	79
3	87	36,50	0,46	56

Nota. El punto 3 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.



Figura 39

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de Los Chiles



3.3.12. Cruce de Atenas

El ensayo de módulo de resiliente del suelo del Cruce de Atenas fue realizado por Alfaro (2021). En este, se utilizaron los puntos de muestra de la Tabla 34. Además, los resultados de la prueba se pueden apreciar en la Figura 40 que muestra las cuatro succiones distintas utilizadas (Tabla 34).

Tabla 34

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo del Cruce de Atenas

Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	77	23,32	0,35	177
2	80	24,23	0,36	134
3	89	27,20	0,40	26
4	95	28,77	0,43	12

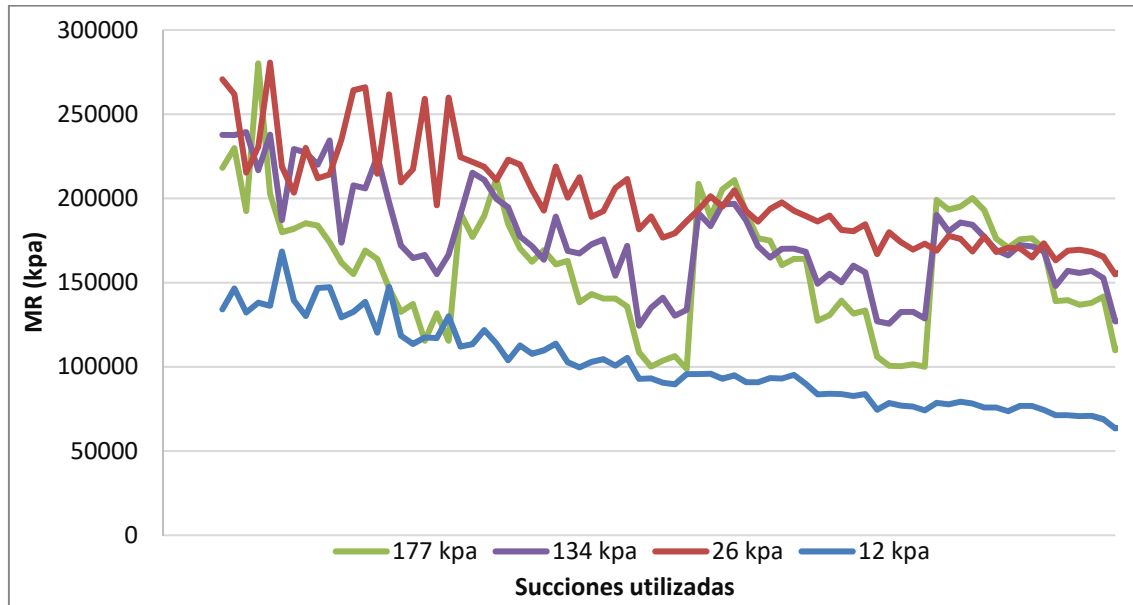
Nota. El punto 3 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.

Fuente. Adaptado a partir de Alfaro (2021).



Figura 40

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo del Cruce de Atenas



Fuente. Adaptado a partir de Alfaro (2021).

3.3.13. Guácimo

El ensayo de módulo de resiliente del suelo de Guácimo fue realizado por Alfaro (2021). En este, se utilizaron los puntos de muestra de la Tabla 35. Además, los resultados de la prueba se pueden apreciar en la Figura 41 que muestra las tres succiones distintas utilizadas (Tabla 35).

Tabla 35

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de Guácimo

Punto	Saturación	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	75	30,61	0,41	153
2	80	32,65	0,43	58
3	91	37,20	0,49	11

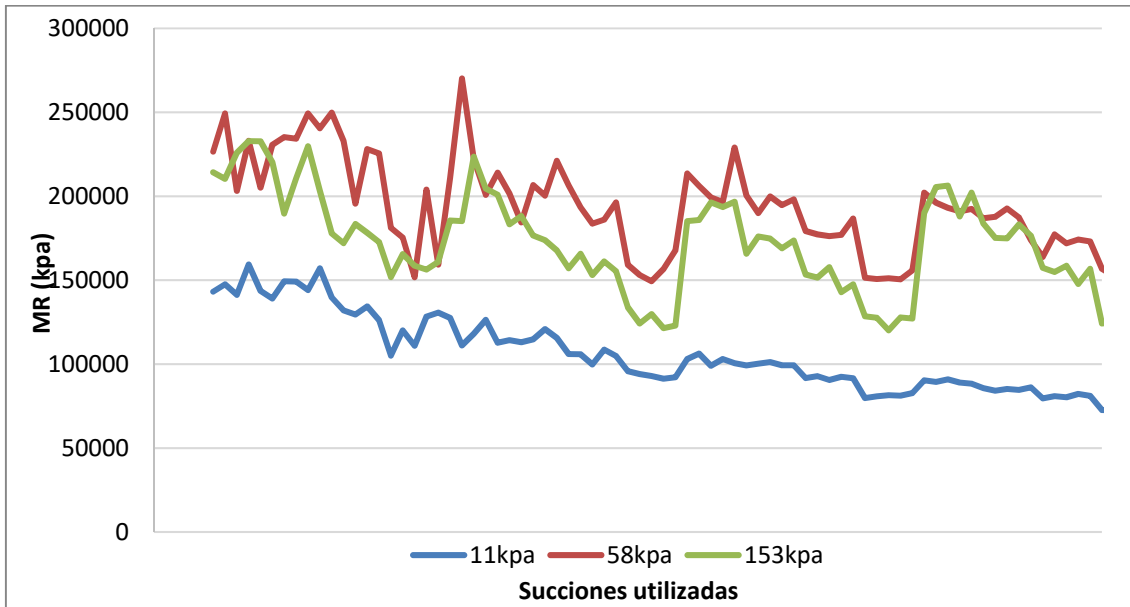
Nota. El punto 3 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.

Fuente. Adaptado a partir de Alfaro (2021).



Figura 41

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de Guácimo



Fuente. Adaptado a partir de Alfaro (2021).

3.3.14. LanammeUCR sede Liberia

El ensayo de módulo de resiliente del suelo del LanammeUCR en Liberia fue realizado por Alfaro (2021). En este, se utilizaron los puntos de muestra de la Tabla 36. Además, los resultados de la prueba se pueden apreciar en la Figura 42 que muestra las cuatro succiones distintas utilizadas (Tabla 36).

Tabla 36

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo del LanammeUCR sede Liberia

Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	73	15,70	0,26	177
2	80	17,32	0,29	41
3	88	19,30	0,32	12
4	95	20,57	0,34	5

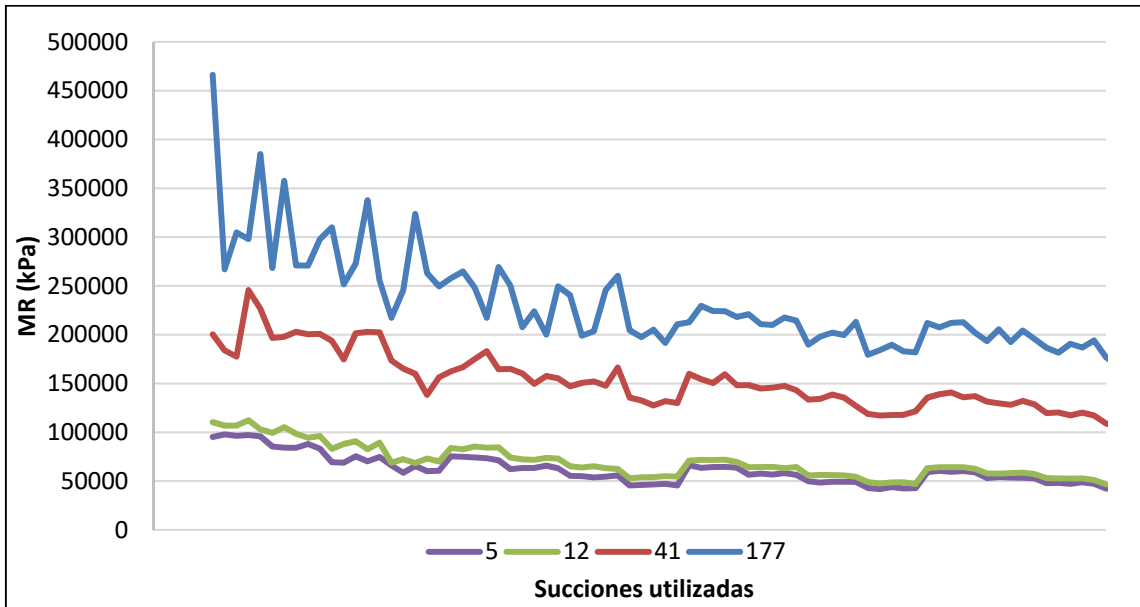
Nota. El punto 3 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.

Fuente. Adaptado a partir de Alfaro (2021).



Figura 42

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo del LanammeUCR sede Liberia



Fuente. Adaptado a partir de Alfaro (2021).

3.3.15. Paquera

El ensayo de módulo de resiliente del suelo de Paquera fue realizado por Ávila (2017). En este, se utilizaron los puntos de muestra de la Tabla 37. Además, los resultados de la prueba se pueden apreciar en la Figura 43 que muestra las siete succiones distintas utilizadas (Tabla 37).

Tabla 37

Puntos de muestra para el ensayo de módulo resiliente del suelo de Paquera

Punto	Saturación (%)	Humedad (%)	Contenido de humedad volumétrico	Succión (kPa)
1	98	24	0,51	5
2	88	21,50	0,45	10
3	78	19	0,39	35
4	75	18	0,37	70
5	70	17	0,35	140
6	65	16	0,33	250
7	63	15,50	0,31	400

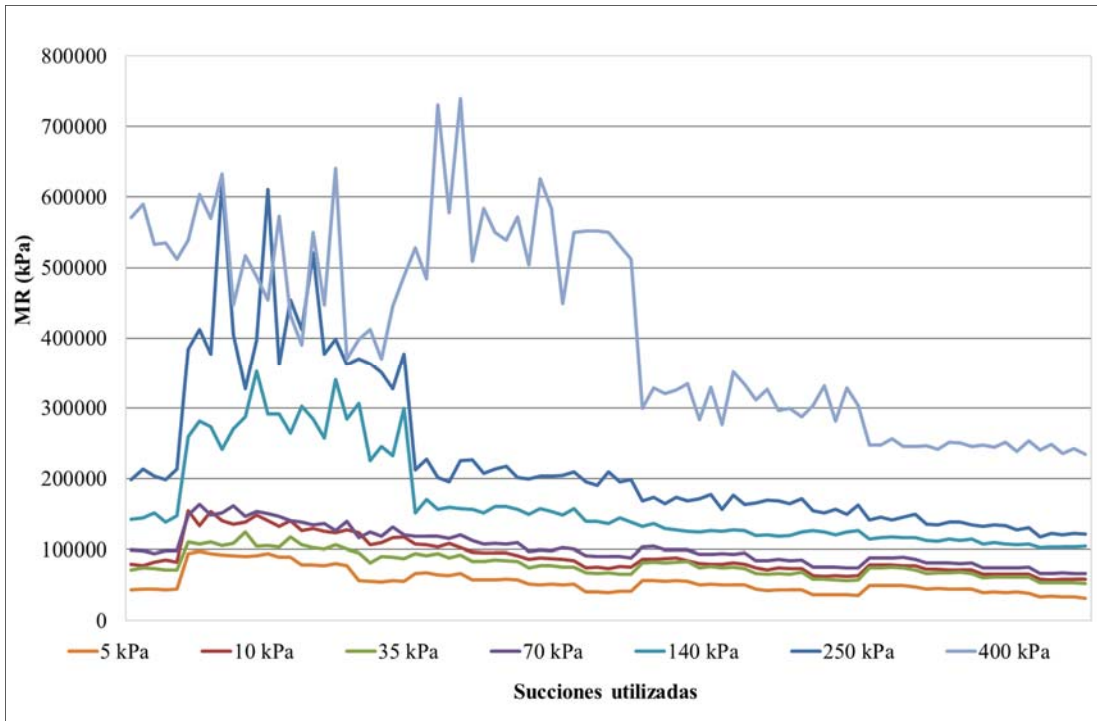
Nota. El punto 4 corresponde al de la humedad óptima según la prueba próctor estándar.

Fuente. Adaptado a partir de Ávila (2017).



Figura 43

Resultados del ensayo de módulo resiliente del suelo de Paquera



Fuente. Adaptado a partir de Ávila (2017).

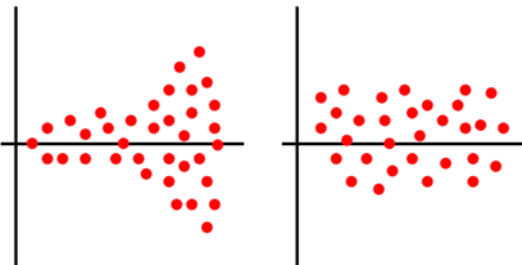


4. MODELACIÓN MATEMÁTICA

Para todos los modelos presentados en este apartado de acuerdo con lo concluido por Ávila (2017), se puede asegurar que la varianza de los datos obtenidos en esta investigación no es constate (Figura 44), lo que implica que uno de los supuestos principales de la regresión lineal no se cumple (homocedasticidad); es por esto por lo que los resultados de los estimadores aplicando mínimos cuadrados no es la más eficiente.

Figura 44

Observación de los datos para definir el tipo de varianza



(a)Heterocedasticidad (b) Homocedasticidad

Al ser los datos heterocedásticos es necesario realizar regresiones lineales generalizadas, que tomen en cuenta la diferencia que presentan los datos en la varianza.

Para todos los modelos analizados dado que no se cumple el supuesto de homocedasticidad, se calcula el coeficiente de Akaike (AIC) como medida de calidad de los modelos, de acuerdo con la ecuación (13). Para interpretar adecuadamente este parámetro es necesario comparar entre modelos y elegir el AIC que posea el menor valor.

$$AIC = 2k - 2Ln(L) \tag{13}$$

Donde:

k= número de parámetros en el modelo estadístico

L= máximo valor de la función de verosimilitud para el modelo estimado

A pesar de que no se recomienda usar el coeficiente de determinación corregido (\bar{R}^2) para valorar el ajuste de los datos, dado que los modelos no son lineales y por lo tanto el estimador no es consistente, se decide calcularlo utilizando la ecuación (14). Lo anterior debido a que se



busca presentar la información obtenida para todos los modelos, de manera que sea posible realizar una comparación comprensible para el lector.

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{N - 1}{N - k - 1} [1 - R^2] \quad (14)$$

Donde:

N= tamaño de la muestra

k= número de variables

Además, se utiliza el método de Máxima Verosimilitud para ajustar el modelo en lugar del método de Mínimos Cuadrados, dado que las observaciones son independientes y siguen una distribución normal con distinta varianza. Este método proporciona estimadores insesgados, consistentes, eficientes y normalmente distribuidos (Ximénez y García, 2005).

4.1. Modelo matemático para la predicción de la curva característica suelo-agua

Como aporte adicional de esta investigación, se propone a continuación un modelo matemático general, que permita obtener los datos de succión necesarios para la realización del ensayo de módulo resiliente. Dicho modelo tiene la finalidad de servir como insumo en caso de que no sea posible la obtención de resultados de ensayo.

Para la generación del modelo se utilizó la forma propuesta por Chon kan (2017), donde se consideró el modelo de Fredlund y Xing (1994) como base y se introdujo el cálculo del contenido volumétrico de agua a la saturación (θ_s), a través de una expresión obtenida con las características físicas de los materiales. Para realizar el modelado se utilizaron 24 datos provenientes del trabajo final de graduación de Chon kan (2017) y de esta investigación.

4.1.1. Modelo para la predicción del contenido volumétrico de agua a la saturación (θ_s)

Las variables consideradas para la predicción del contenido volumétrico de agua a la saturación (θ_s) son: el límite líquido, los porcentajes de material pasando por las mallas No.4 y No.200, el coeficiente de uniformidad, así como el de curvatura, el diámetro de los



porcentajes de material pasando el 10, 30 y 60%, la densidad seca máxima y la multiplicación del contenido de humedad óptimo por el índice de plasticidad relativa (wIP). Los datos utilizados se muestran en el Apéndice 6: Datos y resultados para modelo de θ_s .

La expresión obtenida se muestra en la ecuación (15). Los coeficientes de la regresión se muestran en la Tabla 38, los errores y parámetros estadísticos del modelo se muestran en el Apéndice 6: Datos y resultados para modelo de θ_s .

$$\theta_s = \beta_0 + \beta_1 LL + \beta_2 \#4 + \beta_3 \#200 + \beta_4 D_{10} + \beta_5 D_{30} + \beta_6 D_{60} + \beta_7 wIP + \beta_8 \gamma_{d \text{ máx.}} + \beta_9 LL^2 + \beta_{10} \#4^2 + \beta_{11} \#200^2 + \beta_{12} C_u^2 + \beta_{13} C_c^2 + \beta_{14} D_{10}^2 + \beta_{15} D_{30}^2 + \beta_{16} D_{60}^2 + \beta_{17} wIP^2 + \beta_{18} \gamma_{d \text{ máx.}}^2 \quad (15)$$

Donde:

β_x = Constantes de la regresión.

θ_s = Contenido volumétrico de agua a la saturación.

LL = Límite líquido.

#4 y #200= Porcentajes de material pasando la malla #4 y #200, respectivamente (tomados de la curva granulométrica).

D_{10} , D_{30} y D_{60} = Diámetros en milímetros de los porcentajes de material pasando el 10, 30 y 60 % (tomados de la curva granulométrica).

wIP= Contenido de agua óptimo multiplicado por el índice de plasticidad (ambos en %). (índice de plasticidad relativa) = $N^{\circ}200 \cdot IP$

$\gamma_{d \text{ máx.}}$ = Densidad seca máxima en kg/m^3 .

C_u y C_c = Coeficientes de uniformidad y curvatura, respectivamente (tomados de la curva granulométrica).

Tabla 38

Coeficientes obtenidos de la regresión lineal múltiple para el modelo de predicción del θ_s

Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor
β_0	144,38	β_7	-0,077566	β_{14}	25901
β_1	0,10887	β_8	-0,019158	β_{15}	-420,04
β_2	-362,75	β_9	-0,0007068	β_{16}	0,91770
β_3	-38,011	β_{10}	246,38	β_{17}	0,0016517
β_4	-959,76	β_{11}	21,483	β_{18}	6,85e-6
β_5	104,13	β_{12}	-0,0000414		
β_6	-8,3415	β_{13}	-0,031525		

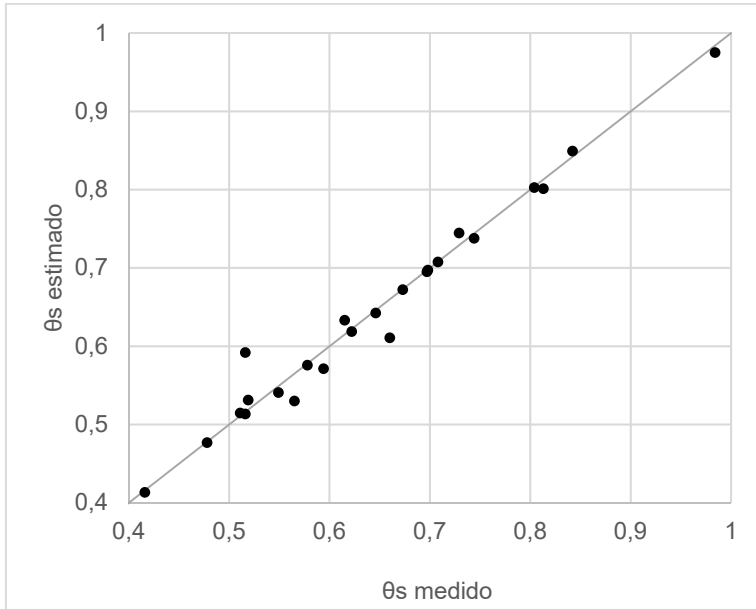
Los valores obtenidos de la regresión lineal se ajustan adecuadamente y tienen errores en todos los casos iguales o menores al 4% (exceptuando el caso de San Cayetano y Bijagual con errores del 15 y 8%, respectivamente), esto permite validar las estimaciones de dicho



modelo. El modelo posee un coeficiente de regresión ajustado (R^2 ajustado) del 0,87 para un 97% de confianza en la predicción. La bondad de ajuste se muestra en la Figura 45.

Figura 45

Línea de mejor ajuste para el θ_s estimado versus el valor medido



Por último, se debe reconocer que cada uno de los ensayos tiene una incertidumbre asociada y es arrastrada por el modelo. Asimismo, se observa que hay parámetros que normalmente no son representativos para ciertos tipos de suelo, como por ejemplo los coeficientes de uniformidad y curvatura (C_u y C_c , respectivamente y asociados a suelos granulares), a pesar de esto, se observó para la ecuación de predicción validez estadística, por lo que se decidió mantenerlos (Chon kan, 2017).

4.1.2. Modelo de predicción general para la curva característica suelo-agua (SWCC)

Para obtener el modelo de predicción general se ajustaron los datos a los modelos propuestos por Fredlund y Xing (1994) y van Genuchten (1980), mostrados en la Tabla 1. A continuación, se muestran en la Tabla 39 los resultados para los parámetros y sus respectivos parámetros estadísticos.



Tabla 39

Datos obtenidos del ajuste de los modelos para predicción de la SWCC

Parámetro	Fredlund y Xing	van Genuchten
	t-student	t-student
a	1,75	1,57
b	9,40	7,4e+5
c	16,57	-
R ² ajustado	0,88	0,85
AIC	-1226	-990

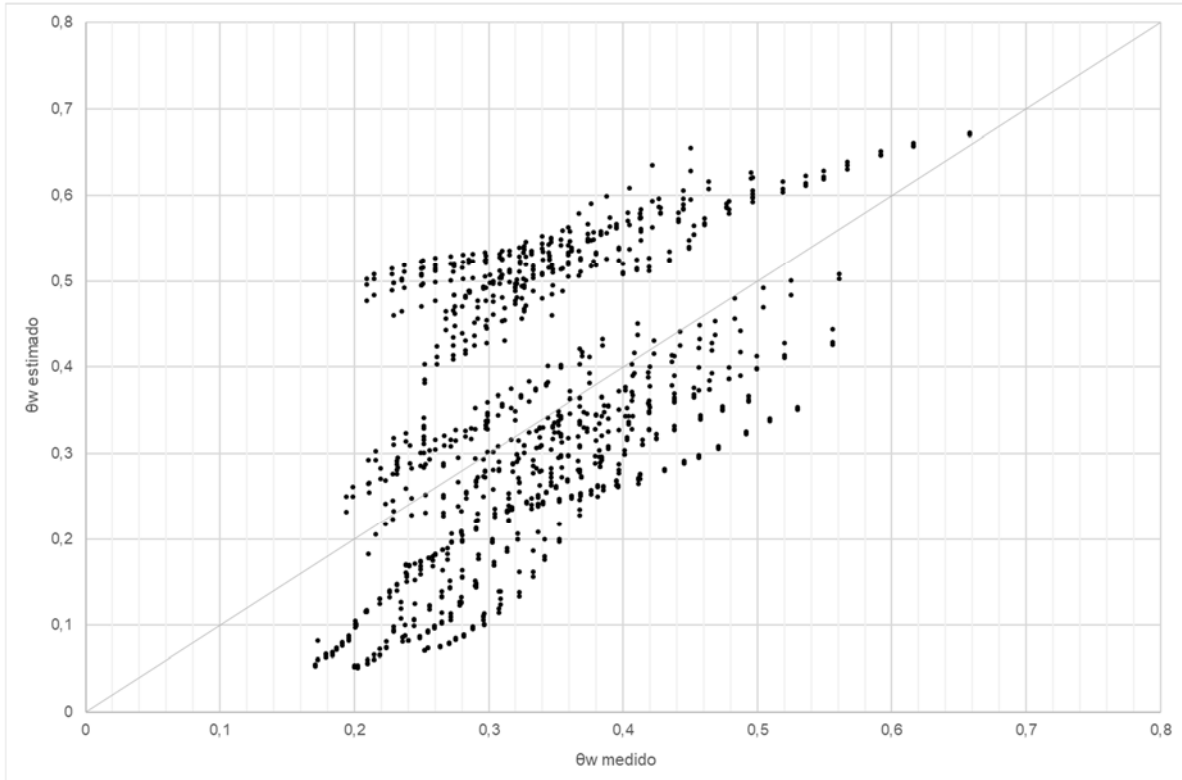
Los parámetros obtenidos son el mejor ajuste para los 24 suelos ensayados provenientes del trabajo final de graduación de Chon kan (2017) y de esta investigación. La dispersión de los datos genera una caída en el valor del estadístico asociado al coeficiente *a*, sin embargo, se debe tomar en cuenta que al utilizar todos los suelos muestreados la cantidad de observaciones aumenta y el valor límite para la prueba t-Student baja. El total de observaciones para generar el ajuste fue de 1020, de modo que si se toma de forma conservadora el valor límite para 500 observaciones (grados de libertad) se tiene un valor límite de 1,75 para un 92% de confianza, por lo que se puede afirmar que los parámetros cuentan con validez estadística para el caso del modelo de Fredlund y Xing. Para el caso del modelo de Van Genuchten, el parámetro *a* cuenta con un porcentaje de confianza de 87,5%, ya que el valor del estadístico *t* es de 1,57.

De acuerdo con los resultados obtenidos se selecciona el modelo de Fredlund y Xing como el mejor predictor para los datos analizados. La predicción de la expresión desarrollada se puede estimar comparando los valores arrojados por ésta con los valores reales tomados en laboratorio. La Figura 46 muestra la relación lineal de los resultados.



Figura 46

Línea de mejor ajuste para el contenido volumétrico estimado versus el valor medido (real)



Como se puede observar, los resultados se encuentran ubicados cercanos a la línea de igualdad, sin embargo, si se encuentra cierta dispersión en todo el espectro. La expresión del Modelo General encontrada para los 24 suelos se muestra en la ecuación (16).

$$\theta_w = \left[1 \frac{\ln(1 + \frac{h}{h_r})}{\ln(1 + \frac{10^6}{h_r})} \right] \left[\frac{\theta_s}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{h}{3,0139} \right)^{0,36111} \right] \right]^{0,91828}} \right] \quad (16)$$

Donde:

θ_w = contenido volumétrico de agua (%)

θ_s = contenido volumétrico de agua a la saturación (%)

h = Succión matricial kPa

h_r = parámetro función de la de la succión a la cual se establece el contenido residual de agua en kPa (generalmente 3000 kPa)



4.2. Modelo matemático para la predicción del módulo resiliente en condiciones de humedad variable

Como se mencionó en el apartado 1.6.8, actualmente existen distintos modelos mecanicistas que buscan predecir adecuadamente el M_r para diversas condiciones de entrada. Las variables más utilizadas dentro de dichos modelos son las mostradas en la Tabla 40.

Tabla 40

Variables más utilizadas para predecir el M_r

Símbolo	Variable	Definición
σ_3, σ_2	Esfuerzos de confinamiento	$\sigma_3 = \sigma_2$, se miden directamente
σ_d	Esfuerzo desviador	Se mide directamente
σ_1	Esfuerzo principal axial	$\sigma_1 = \sigma_d + \sigma_3$
θ	Invariante de esfuerzos	$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$
τ_{oct}	Esfuerzo cortante octaédrico	$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$
ψ_m	Succión matricial	$\psi_m = u_a - u_w$, la resta entre las presiones de poro de aire y agua

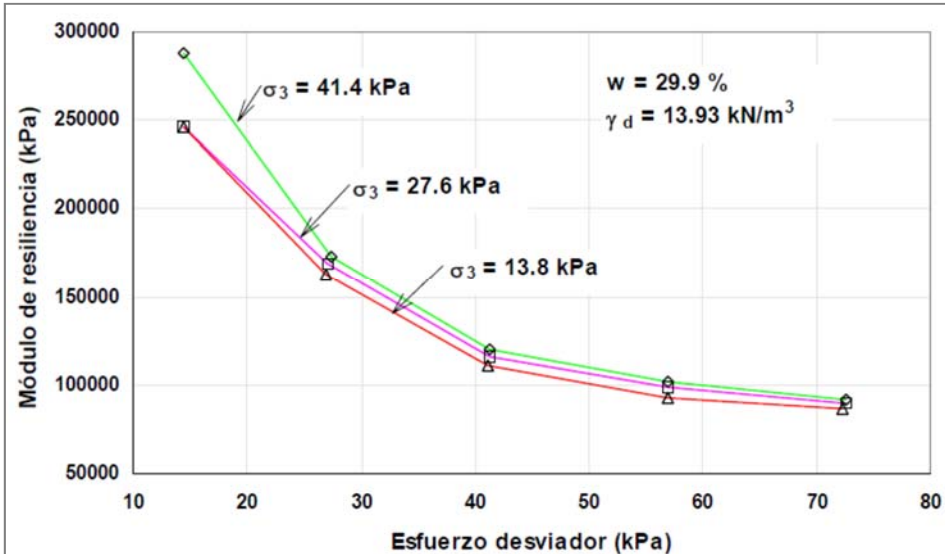
A continuación, se describe brevemente la influencia de dichas variables dentro de la predicción del M_r .

En el caso de los suelos de grano fino el módulo resiliente decrece con el incremento del esfuerzo desviador dinámico (σ_d), este efecto se asocia al contenido de humedad del material. Cuando el suelo está saturado y se aplica una carga, la presión de poro aumenta y no se disipa rápidamente, esto ocasiona que el esfuerzo efectivo disminuya generando una reducción del módulo resiliente; por lo tanto, se puede asegurar que existe una clara dependencia entre el M_r y el esfuerzo desviador aplicado. Además, se ha demostrado que hay poca influencia del esfuerzo de confinamiento en el módulo (Figura 47).



Figura 47

Efecto de la intensidad de los esfuerzos de confinamiento y desviador en el valor de módulo resiliente

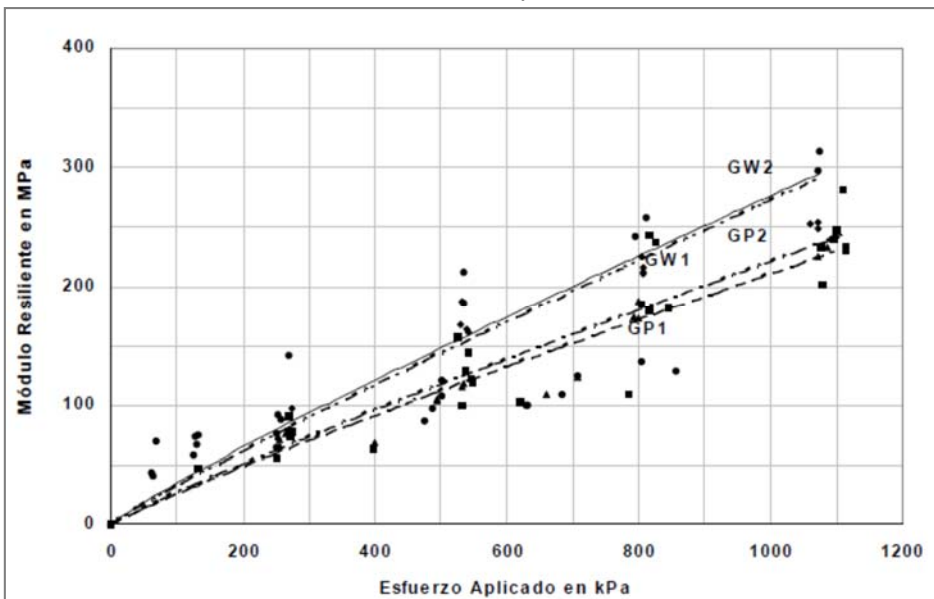


Fuente: Garnica et al. (2000)

Por el contrario, en el caso de los materiales granulares el módulo de resiliencia aumenta con el nivel de esfuerzos combinados (Figura 48).

Figura 48

Evolución del Mr con el nivel de esfuerzos aplicados combinados



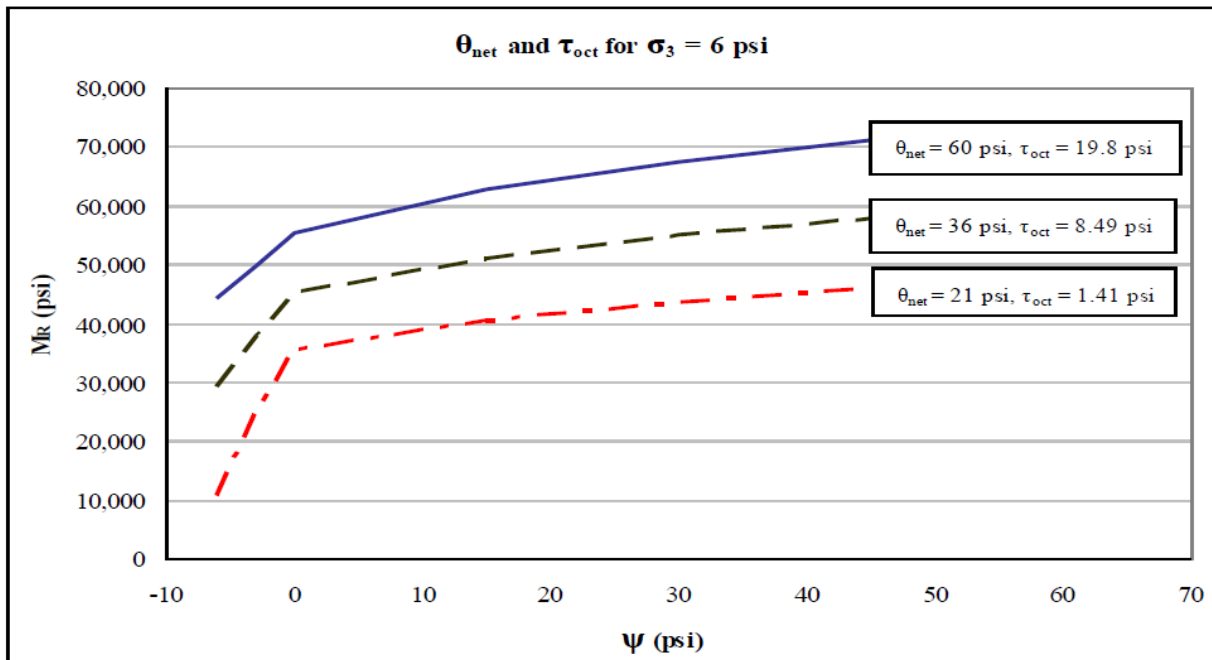
Fuente: Garnica et al. (2000)



Las invariantes de esfuerzos (θ y τ_{oct}) utilizadas en el Modelo Universal (Tabla 3), son función del esfuerzo desviador y del esfuerzo de confinamiento. Un incremento en alguna de los invariantes de esfuerzos (θ , suma de los esfuerzos principales), llevará a un aumento en el componente volumétrico del modelo (θ). Por otro lado, un incremento en el esfuerzo desviador se verá reflejado en el modelo con un incremento en el cortante octaédrico. Además, conforme aumenta la succión matricial existe un aumento del M_r (Cary, 2008), como se muestra en la Figura 49.

Figura 49

Incremento del M_r conforme aumenta la succión matricial



Fuente: Cary (2008)

Siendo consecuente con los resultados obtenidos por los diferentes autores y sus modelos mostrados en el apartado 1.6.8, es que se deciden utilizar las mismas variables de entrada mostradas en la Tabla 40. Es por esto que, obtenidos los datos, es necesario realizar un procesamiento de los mismos antes de iniciar con el análisis; con el fin de obtener el θ , τ_{oct} y la ψ_m . Para generar los modelos se utilizaron en total 6673 entradas de datos.



4.2.1. Análisis de la covarianza

Inicialmente se realiza un análisis del grado de variación conjunta de las variables (covarianza). Como se muestra en la Tabla 41, los valores de covarianza más próximos a la unidad representan la mayor dependencia de las variables entre sí.

Tabla 41
Análisis de covarianza de las variables

	<i>Mr</i>	ψ	<i>w_{opt}</i>	<i>%w</i>	<i>%S</i>	σ_3	σ_d	<i>IP</i>	<i>#200</i>
Mr	1,00								
ψ	0,51	1,00							
w_{opt}	-0,18	0,18	1,00						
%w	-0,26	0,13	0,98	1,00					
%S	-0,34	-0,13	0,10	0,24	1,00				
σ_3	0,14	0,01	0,01	0,01	0,00	1,00			
σ_d	-0,14	0,01	0,06	0,06	0,00	0,14	1,00		
IP	0,14	0,22	0,44	0,41	0,17	0,01	0,06	1,00	
#200	0,07	0,09	0,53	0,48	0,05	0,01	0,10	0,65	1,00

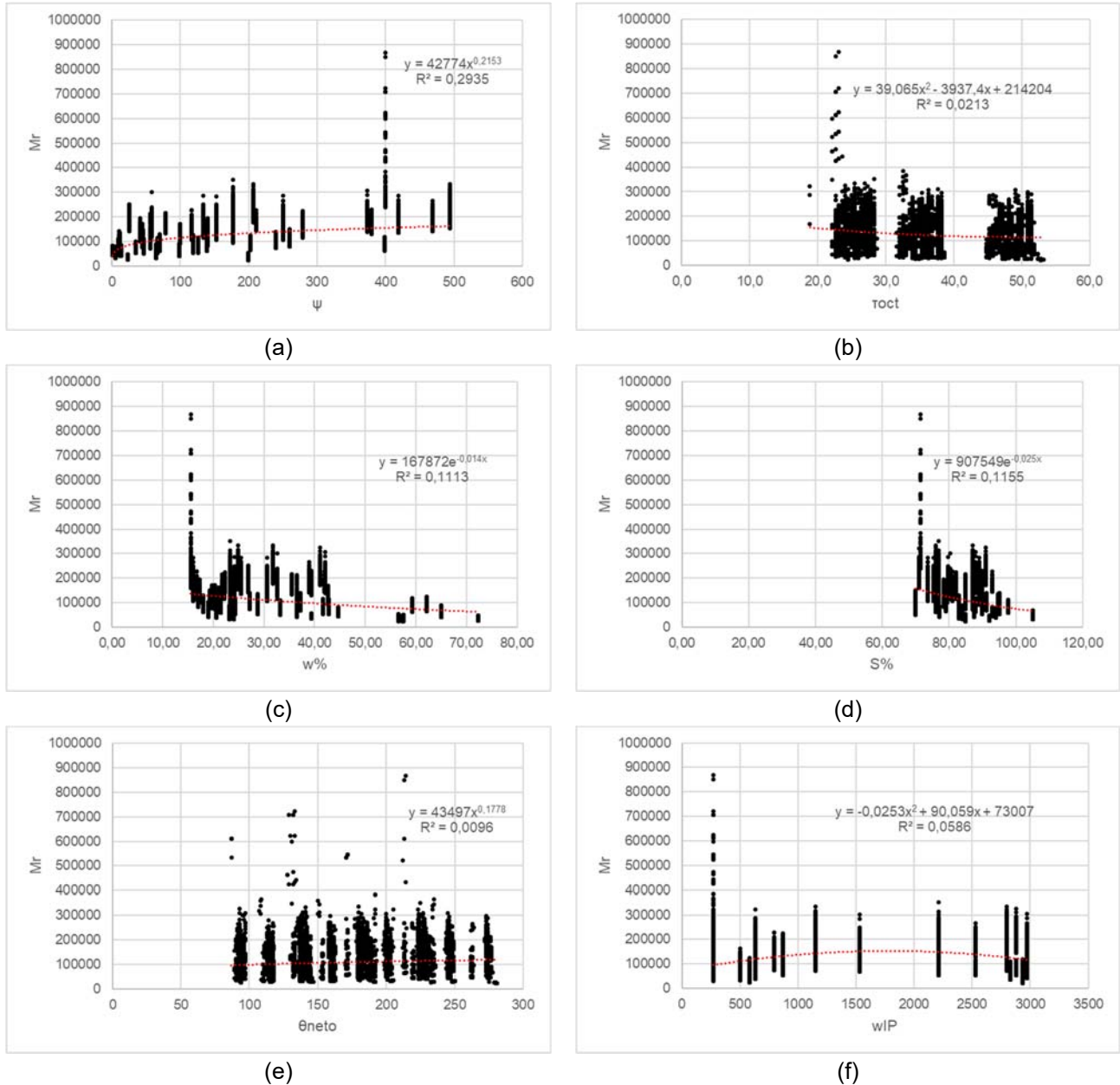
Como es de esperar el contenido de humedad está directamente relacionado con la humedad óptima. Además, se puede observar una relación importante entre el material pasando la malla #200 y el índice de plasticidad, lo que es esperable debido a que los finos son los responsables de la plasticidad. Finalmente, existe una correlación importante entre la succión y el módulo resiliente, y entre lo que pasa la malla #200 y la humedad óptima.

En la Figura 50 es posible observar la tendencia que tienen las variables analizadas en el módulo resiliente.



Figura 50

Efecto de las variables analizadas en el módulo resiliente (M_r)



Nota: ψ es la succión matricial en kPa, T_{oct} es el cortante octaédrico en kPa, w% es el contenido de agua, S% es la saturación, θ_{neto} es el invariante de esfuerzos en kPa, wIP es la multiplicación del índice de plasticidad y el contenido de material pasando la malla #200.

De acuerdo con lo mostrado en la Figura 50 se puede observar que conforme aumenta la succión (material más seco) aumenta el módulo resiliente. Además, se puede concluir que existe una disminución conforme aumenta el esfuerzo cortante, comportamiento esperado



conforme a la teoría; lo que también ocurre al aumentar los contenidos de agua (%w y %S). Con respecto a las otras variables, al ser la línea de ajuste más horizontal no existe tanta causalidad.

Otra interpretación importante del comportamiento de las variables mostrada en las gráficas, es el tipo de tendencia que poseen para predecir el módulo, lo que funciona como indicador para empezar a generar un modelo de predicción general del módulo resiliente.

4.2.2. Modelos de regresión lineal generalizada (RLG)

El primer modelo estimado corresponde con el Universal Modificado propuesto por Cary (2011) y modificado por Ávila (2017) al incluir el índice de plasticidad como parámetro adicional. Para esto se utiliza el programa STATA 12.1 y se realiza una regresión lineal basada en mínimos cuadrados, es necesario aplicar logaritmos en ambos lados de la ecuación para lograr linealizarla ecuación (17). Dado que los ensayos se realizaron en condición drenada se tiene que los términos $\Delta\psi_m$ y Δu_{w-sat} son cero.

$$\ln Mr = \ln(k_1 \times P_a) + k_2 \times \ln\left(\frac{\theta_{neto}}{P_a}\right) + k_3 \times \ln\left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right) + k_4 \times \ln\left(\frac{\psi_m}{P_a} + 1\right) + k_5 \times \ln\left(\frac{WIP}{P_a} + 1\right) \quad (17)$$

Se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 42. En la Figura 51 se puede ver el acomodo de los datos sobre la línea de mejor ajuste.

Tabla 42

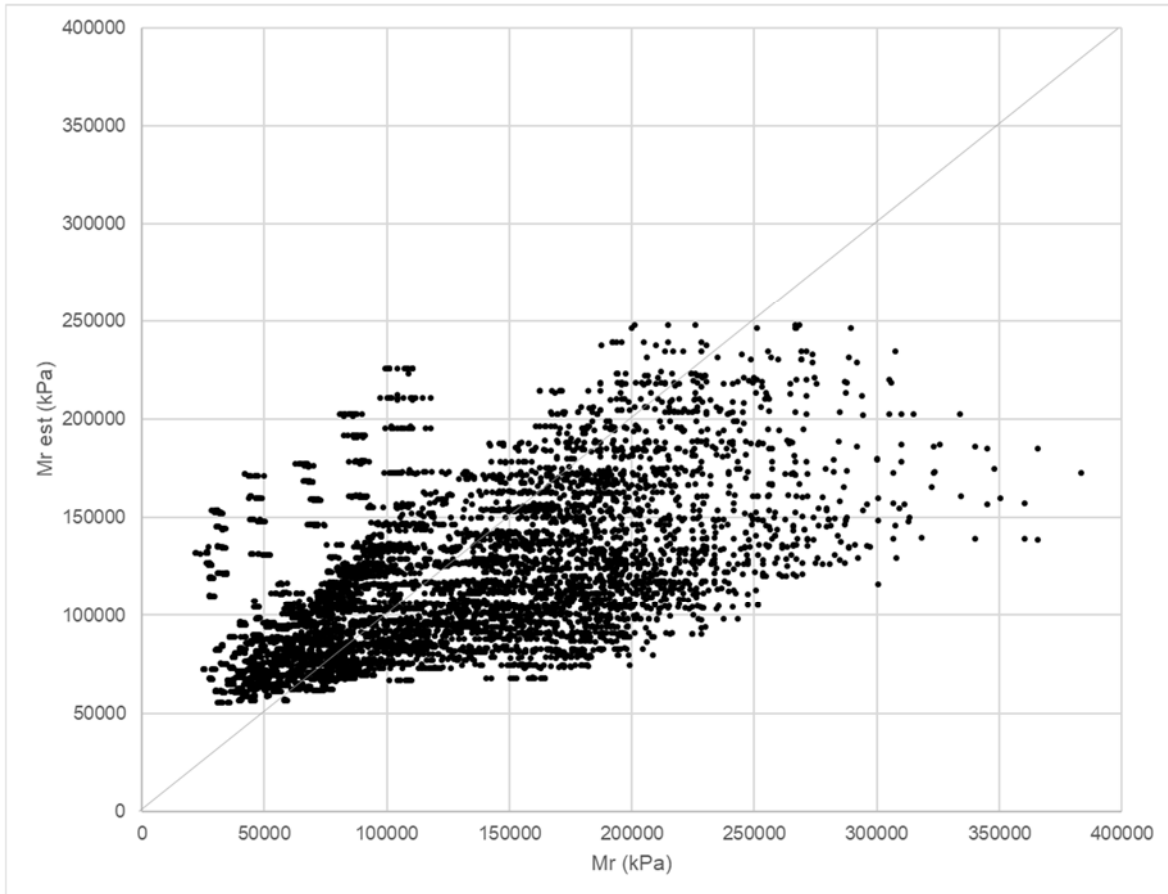
Regresión lineal generalizada del modelo universal modificado

Modelo universal modificado	Parámetros	Estadístico t	AIC	R ²
$Mr = k_1 \times P_a \times \left(\frac{\theta_{neto} - 3 \times \Delta u_{w-sat}}{P_a}\right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1\right)^{k_3} \times \left(\frac{(\psi_{m0} - \psi_m)}{P_a} + 1\right)^{k_4} \times \left(\frac{WIP}{P_a} + 1\right)^{k_5}$	K ₁	878,95	365	300000 0,33
	K ₂	0,377	18	
	K ₃	-1,900	-20	
	K ₄	0,540	50	
	K ₅	0,0644	8	



Figura 51

Ajuste de los datos medidos versus los calculados con el modelo universal modificado



De la Figura 51 es posible observar que existe mucha dispersión de los datos y una subestimación de los módulos por encima de los 150000 kPa.

El segundo modelo calibrado corresponde con una regresión gradual (por pasos) en donde se seleccionaron algunas variables independientes y se fueron descartando conforme su aporte al modelo. Este modelo posee una forma logarítmica tal como se muestra en la ecuación (18).

$$\begin{aligned} \text{Log}Mr = & \text{Log}(k_1) + k_2 \times \text{Log}(w_{opt}) + k_3 \times \text{Log}(\psi_m) + k_4 \times \text{Log}(\%w) + k_5 \times \text{Log}(\%S) + k_6 \times \\ & \text{Log}(wIP) + k_7 \times \text{Log}(\tau_{oct}^2) + k_8 \times \text{Log}(\theta_{neto}^2) \end{aligned} \quad (18)$$

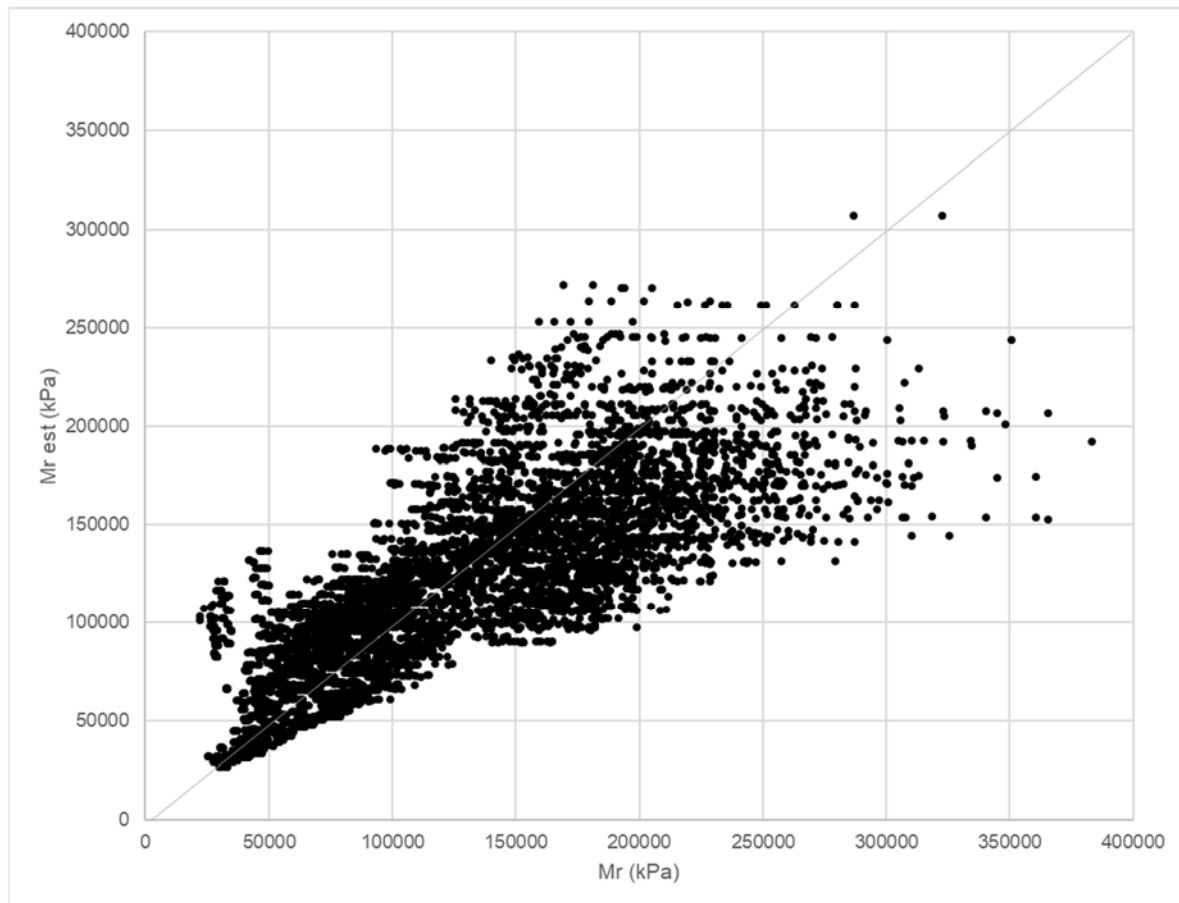
Se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 43. En la Figura 52 se puede ver el acomodo de los datos sobre la línea de mejor ajuste.



Tabla 43
Regresión lineal generalizada del modelo logarítmico

Modelo logarítmico	Parámetros	Estadístico t	AIC	R ²
$Mr = k_1 \times (w_{opt})^{k_2} \times (\psi_m)^{k_3} \times (\%w)^{k_4} \times (\%S)^{k_5} \times (wIP)^{k_6} \times (\tau_{oct}^2)^{k_7} \times (\theta_{neto}^2)^{k_8}$	K ₁	1,790	1	-6704 0,64
	K ₂	3,515	37	
	K ₃	0,1644	49	
	K ₄	-4,197	-45	
	K ₅	2,509	28	
	K ₆	0,167	22	
	K ₇	-0,2506	-28	
	K ₈	0,1948	25	

Figura 52
Ajuste de los datos medidos versus los calculados con el modelo logarítmico





En la Figura 52 es posible observar ciertos datos dispersos hacia el inicio de la gráfica, pero en general el ajuste se muestra adecuado. Los datos dispersos pueden deberse a que algún tipo de suelo no se ajusta adecuadamente a la forma del modelo que está buscando predecir. Al igual que en el modelo universal modificado existe subestimación de módulos por encima de los 200000 kPa.

4.2.3. Modelos de regresión no lineal (RNL)

De acuerdo con lo observado en el análisis de las variables independientes (Apartado 4.2.1), se pudo observar que la tendencia de algunas de éstas es no lineal, teniendo comportamientos exponenciales o potenciales, razón por la que se analizaron y propusieron los modelos que se describen a continuación.

Utilizando las mismas variables y aplicando el método gradual, se obtuvo el modelo exponencial mostrado en la Tabla 44, donde también se muestran los valores obtenidos de la regresión no lineal. En la Figura 53 se puede ver el acomodo de los datos sobre la línea de mejor ajuste.

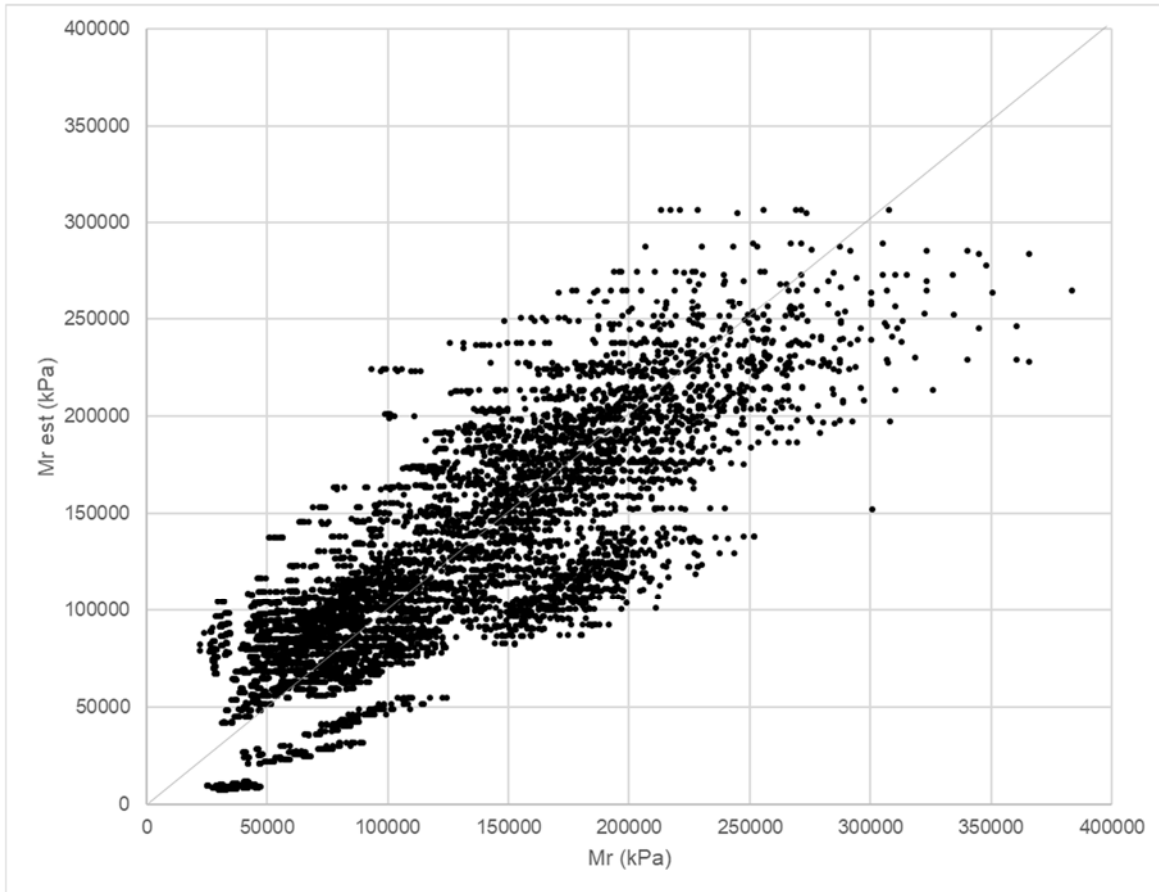
Tabla 44
Regresión no lineal del modelo exponencial

Modelo exponencial	Parámetros	Estadístico t	AIC	R ²
$Mr = k_1 \times e^{k_2 \times w_{opt} + k_3 \times \psi_m + k_4 \times \%w + k_5 \times \theta_{neto} + k_6 \times \tau_{oct} + k_7 \times \%S + k_8 \times wIP}$	K ₁ 90016,41	7	160967	0,92
	K ₂ 0,0971	28		
	K ₃ 0,001946	44		
	K ₄ -0,1292	-36		
	K ₅ 0,0017	15		
	K ₆ -0,0147	-22		
	K ₇ 0,0091	6		
	K ₈ 0,000206	25		



Figura 53

Ajuste de los datos medidos versus los calculados con el modelo exponencial

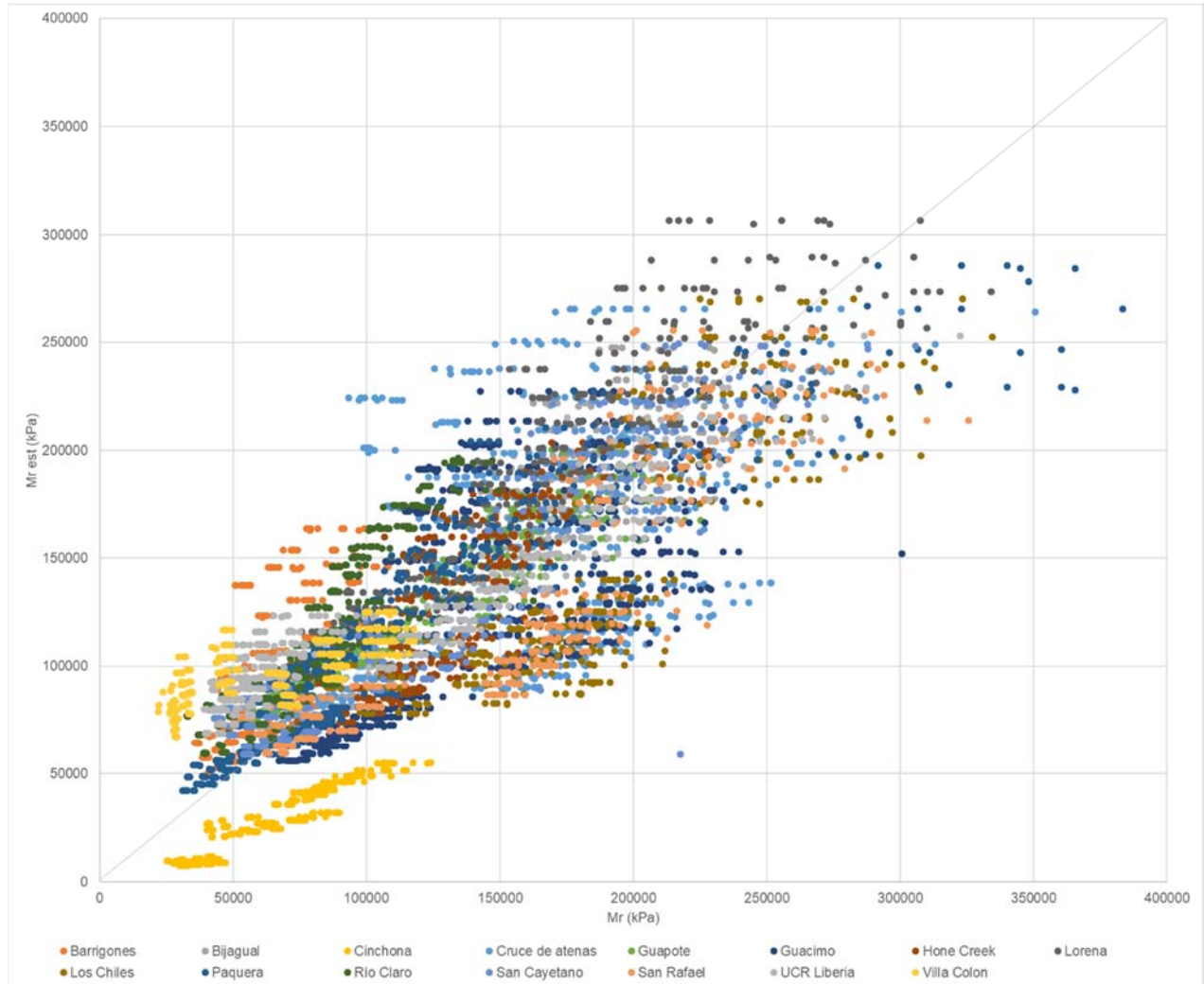


En la Figura 53 se puede observar un grupo de datos para módulos bajos que se aleja de la tendencia general, con el fin de identificarlo se genera la gráfica mostrada en la Figura 55, donde se puede observar que los datos corresponden con los resultados obtenidos del suelo muestreado en Cinchona. Para los demás puntos, en general, el ajuste se muestra adecuado y menos disperso que en los modelos anteriores.



Figura 54

Ajuste de los datos medidos versus los calculados con el modelo exponencial, para cada suelo



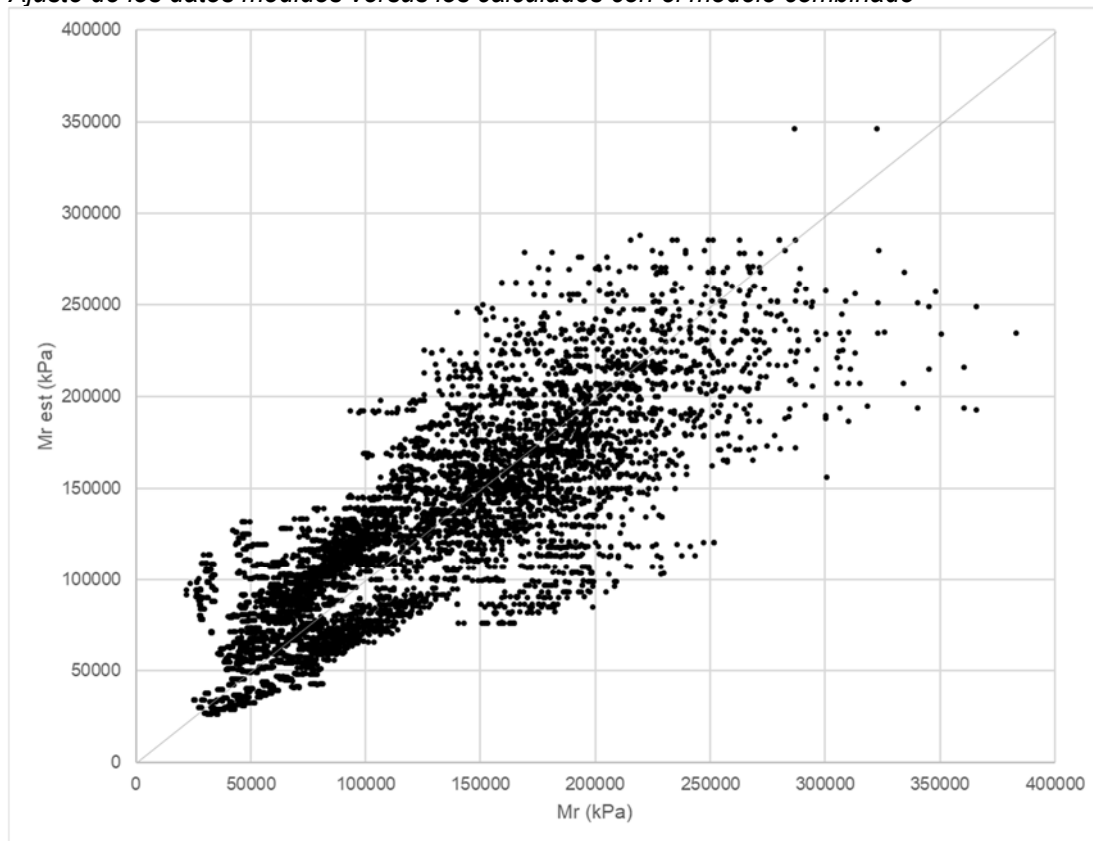
Finalmente, con la intención de mejorar el comportamiento del modelo exponencial, sobre todo para ajustar los datos del material proveniente de Cinchona, se presenta en la Tabla 45 y Figura 55 un modelo no lineal con tendencias combinadas que incorpora una variable Dummy (variable binaria que toma el valor de 0 o 1 para una condición específica), que logra mantener el R^2 en 0,9 y no desmejora el AIC, pero si modela la tendencia de los datos de forma que se mantienen sobre la línea de mejor ajuste.



Tabla 45
Regresión no lineal del modelo combinado

Modelo combinado	Parámetros	Estadístico t	AIC	R ²	
$Mr = k_1 \times \left(\frac{w_{opt}}{Pa} \right)^{k_2} \times \left(\frac{\psi_m}{Pa} \right)^{k_3} \times \left(\frac{\%w}{Pa} \right)^{k_4} \times \left(\frac{\theta_{net}}{Pa} \right)^{k_5} \times \left(\frac{\tau_{oct}^2}{Pa} \right)^{k_6} \times \left(\frac{\%S}{Pa} \right)^{k_7} \times \left(\frac{wIP}{Pa} \right)^{k_8} + d \times e^{k_9 \times \frac{w_{opt}}{pa} + k_{10} \times \frac{\psi_m}{Pa} + k_{11} \times \frac{\%w}{Pa} + k_{12} \times \frac{wIP}{Pa}}$	K ₁	105408,9	13	161137	0,91
	K ₂	3,713	30		
	K ₃	0,209	30		
	K ₄	-4,336	-35		
	K ₅	0,335	13		
	K ₆	-0,285	-20		
	K ₇	2,412	19		
	K ₈	0,06149	4		
	K ₉	-22,326	-10		
	K ₁₀	0,4485	19		
	K ₁₁	-5,250	-5		
	K ₁₂	0,3091	15		
<i>d</i>		0 si $w_{opt} < 36\%$, 1 si $w_{opt} \geq 36\%$			

Figura 55
Ajuste de los datos medidos versus los calculados con el modelo combinado





Al igual que en el caso del modelo lineal logarítmico, se muestra un pequeño grupo de datos por debajo de los 50000 kPa que se aleja de la línea de mejor ajuste (pertenecientes a la zona de Cinchona). En términos generales, el modelo presente un ajuste adecuado con un R^2 de 0,9 y un AIC de 161137.

4.2.4. *Resumen de los modelos*

Finalmente, en la Tabla 46 se muestran los modelos obtenidos y sus parámetros.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir que el modelo que ajusta mejor la información utilizando el criterio de predicción de Akaike (AIC menor) es el logarítmico y en términos de la correlación lineal ajustada (R^2 mayor) los modelos exponencial y combinado. Sin embargo, todos los modelos (a excepción del Universal Modificado) logran una predicción adecuada de la información para valores de módulo resiliente bajos (menores a los 200000 kPa), por encima de este valor los modelos lineales tienden a subestimar los datos de módulo, situación que se logró mejorar con los modelos no lineales al corregir cierta dispersión y agruparla más cerca de la línea de mejor ajuste.

En la Figura 56 se muestra el ajuste de los modelos logarítmico y combinado.



Tabla 46

Resumen de las regresiones lineales y no lineales para cada modelo presentado

Modelo	Parámetros	t	AIC	R ²	
Universal Modificado	$Mr = k_1 \times P_a \times \left(\frac{\theta_{neto} - 3 \times \Delta u_{w-sat}}{P_a} \right)^{k_2} \times \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \times \left(\frac{\psi_{mo} - \psi_m}{P_a} + 1 \right)^{k_4} \times \left(\frac{wIP}{P_a} + 1 \right)^{k_5}$	K ₁ 878,95	365	300000	0,33
		K ₂ 0,377	18		
		K ₃ -1,900	-20		
		K ₄ 0,540	50		
		K ₅ 0,0644	8		
Logarítmico	$Mr = k_1 \times (w_{opt})^{k_2} \times (\psi_m)^{k_3} \times (\%w)^{k_4} \times (\%S)^{k_5} \times (wIP)^{k_6} \times (\tau_{oct}^2)^{k_7} \times (\theta_{neto}^2)^{k_8}$	K ₁ 1,790	1	-6704	0,64
		K ₂ 3,515	37		
		K ₃ 0,1644	49		
		K ₄ -4,197	-45		
		K ₅ 2,509	28		
		K ₆ 0,167	22		
		K ₇ -0,2506	-28		
		K ₈ 0,1948	25		
Modelo Exponencial	$Mr = k_1 \times e^{k_2 \times w_{opt} + k_3 \times \psi_m + k_4 \times \%w + k_5 \times \theta_{neto} + k_6 \times \tau_{oct} + k_7 \times \%S + k_8 \times wIP}$	K ₁ 90016,41	7	160967	0,92
		K ₂ 0,0971	28		
		K ₃ 0,001946	44		
		K ₄ -0,1292	-36		
		K ₅ 0,0017	15		
		K ₆ -0,0147	-22		
		K ₇ 0,0091	6		
		K ₈ 0,000206	25		
Combinado	$Mr = k_1 \times \left(\frac{w_{opt}^{k_2}}{Pa} \times \frac{\psi_m^{k_3}}{Pa} \times \frac{\%w^{k_4}}{Pa} \times \frac{\theta_{net}^{k_5}}{Pa} \times \frac{\tau_{oct}^2}{Pa} \right)^{k_6} \times \frac{\%S^{k_7}}{Pa} \times \frac{wIP^{k_8}}{Pa} + d \times e^{k_9 \times \frac{w_{opt}}{pa} + k_{10} \times \frac{\psi_m}{Pa} + k_{11} \times \frac{\%w}{Pa} + k_{12} \times \frac{wIP}{Pa}}$	K ₁ 105408,9	13	161137	0,91
		K ₂ 3,713	30		
		K ₃ 0,209	30		
		K ₄ -4,336	-35		
		K ₅ 0,335	13		
		K ₆ -0,285	-20		
		K ₇ 2,412	19		
		K ₈ 0,06149	4		
		K ₉ -22,326	-10		
		K ₁₀ 0,4485	19		
		K ₁₁ -5,250	-5		
		K ₁₂ 0,3091	15		
d	0 si w _{opt} < 36%, 1 si w _{opt} ≥ 36%				



Figura 56

Ajuste de los datos para los modelos logarítmico y combinado





5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.1. Mapa de saturación

A través del muestreo de 56 puntos de subrasantes ubicados alrededor de la red vial nacional, ejecutados durante tres campañas (verano 2021, inviernos 2020 y 2021), fue posible proponer mapas de saturación (percentil 85 y promedios), con los que se establecieron los rangos de humedad en que los materiales estudiados estarían trabajando, dato fundamental para proponer las variables de entrada del ensayo de Mr.

5.1.2. Modelo matemático para la predicción de la curva característica suelo-agua

Se generaron modelos matemáticos de predicción para todos los suelos estudiados, el modelo calibrado para todos los casos corresponde con el propuesto por Fredlund y Xing (1994), a pesar de poseer una forma no lineal, se obtuvieron los R^2 ajustados con el fin de mostrar al lector la bondad de ajuste obtenida, la Tabla 47 muestra los valores obtenidos. Se obtuvieron coeficientes de determinación en el rango de 0,6-0,75 lo que se considera aceptable para un suelo.

Tabla 47

Coefficiente de determinación para el modelo de predicción SWCC de cada suelo estudiado

Suelo	R^2	Suelo	R^2	Suelo	R^2
Lorena	0,61	Villa Colón	0,75	Cinchona	0,62
El Guapote	0,68	Honey Creek	0,69	San Cayetano	0,65
Río Claro	0,58	Los Chiles	0,61	Bijagual	0,65
San Rafael	0,73	Barrigones	0,69		

Se construyó una expresión que permita conocer el contenido volumétrico de saturación a partir de las características físicas obtenidas del laboratorio. Se tomaron en cuenta inicialmente 15 variables, de las cuales se mantuvieron 11, dado su peso estadístico para la regresión lineal. Estas variables son: el Límite líquido, el porcentaje pasando por la malla No.4 y No.200, el Coeficiente de uniformidad y curvatura, el diámetro por el que pasa el 10%, 30% y 60% del material, la expresión wIP (multiplicación del índice de plasticidad y el porcentaje de material pasando la malla 200) y la densidad seca máxima según próctor estándar. El coeficiente de



determinación ajustado para la regresión fue de 0,87, por lo que se puede considerar que tiene un buen ajuste.

Además, se presentó un Modelo General para la determinación de la SWCC basado en lo propuesto por Fredlund y Xing (1994), este funciona incluyendo la regresión lineal para el contenido volumétrico de agua. En todos los casos se obtuvo una correlación en los valores predichos con peso estadístico para ser admitida como válida. El ajuste de dicho modelo fue de 0,88.

A pesar de que la relación obtenida y los resultados se limitan a una aplicación enmarcada a los suelos ensayados, constituye una primera aproximación de un modelo general que, eventualmente, puede ser incorporado dentro de la guía de diseño mecánica-empírica para pavimentos de Costa Rica. Por lo tanto, se recomienda continuar investigando otros tipos de suelos con el fin de robustecer el modelo y aumentar el espectro de acción que pueda tener. Su uso e interpretación queda circunscrito a criterios técnicos pertinentes.

5.1.3. *Modelo matemático para la predicción del módulo resiliente con humedad variable*

Para generar el modelo de predicción se analizaron variables como la succión, el cortante octaédrico, el porcentaje de humedad, el invariante de esfuerzos, plasticidad, entre otros. Al analizar el efecto de estas en el módulo resiliente, se logró comprobar que el comportamiento era el esperado conforme con la teoría (Sección 4.2), pues en el caso de los suelos de grano fino el módulo resiliente decrece con el incremento del esfuerzo desviador dinámico y disminuye conforme existe un aumento en el contenido de humedad (Garnica *et al.*, 2000), además; conforme aumenta la succión matricial existe un aumento del M_r (Cary, 2008).

Con respecto a los resultados obtenidos, se pudo observar que los M_r asociados al 85% de la saturación para cada material estudiado, posee un comportamiento muy similar al 100% de la saturación, resultados acordes con la teoría.

Es posible concluir que, al utilizar el material en una condición más seca, sometido a una succión más alta, se logra mejorar el módulo para cada tipo de material (el porcentaje de ganancia varía para cada tipo de material, ver Tabla 48). Por consiguiente, conseguir optimizar la forma en que se calcula actualmente el M_r para estas condiciones de humedad menores al



85% de saturación se podría ver reflejado en una disminución de los paquetes estructurales en los diseños de pavimento y, por ende, en una ganancia económica.

Tabla 48

Porcentaje de ganancia del Mr (menos húmedo a más húmedo) para cada material estudiado bajo una misma condición de esfuerzo

Suelo	Máx. Diferencia en humedad (%)	Ganancia Mr (%)
Hone Creek	3,6	67
Lorena	2,3	175
Guapote	2,2	75
Río Claro	4	52
Villa Colón	2	50
Barrigones	6,2	58
San Cayetano	2,6	300
Bijagual	2,6	233
San Rafael	1,8	400
Cinchona	10	260
Los Chiles	4,8	133
Cruce de Atenas	5,7	111
Guácimo	7	50
LanammeUCR	4,5	300
Paquera	8,5	500

Con base en la revisión bibliográfica realizada y los tres posibles enfoques con los que se trata de resolver la mecánica de suelos no saturada (Tabla 4, la Tabla 5 y Tabla 6), se seleccionó el modelo propuesto por Cary (2008) y modificado por Ávila (2017) el cual, se basa en el estado de esfuerzos establecido por Fredlund en 1987; el cual propone una modificación al Modelo Universal (MUM), al incorporar la succión y el IP como otras variables de estado dentro del modelo. Sin embargo, no fue posible obtener un ajuste adecuado al obtener un R^2 de 0,33 y el mayor valor de AIC.

En busca de obtener menor dispersión de la información para los Mr obtenidos, se proponen tres modelos adicionales.

Analizando los resultados obtenidos con los otros modelos, no fue posible eliminar la dispersión de valores de módulo por encima de los 200000 kPa, sin embargo, se logró mejorar la distribución de los datos alrededor de la línea de mejor ajuste. Al igual que se logró generar



una mejor predicción del módulo asociado al material del Cinchona, el cual por sus características físicas (IP y w_{opt}) tenía una tendencia que se alejaba de la línea de mejor ajuste.

Además, es importante recalcar, que los modelos fueron calibrados para rangos de Mr entre 0 kPa y 300000 kPa, por lo que; los resultados obtenidos solo aplican para materiales de grano fino con características similares a las de los suelos en estudio, mencionado lo anterior, los materiales seleccionados para este estudio pretendieron simular las posibles condiciones y características de las subrasantes alrededor de toda la red vial nacional con el fin de poder calibrar un modelo de uso general para Costa Rica.

Al analizar los resultados obtenidos y los modelos propuestos, se concluye que el modelo Combinado es el que mejor ajusta los datos para el rango en estudio (0-300000 kPa), a pesar de la desmejora en el valor de AIC, esto se puede observar en la Figura 55 y Figura 56. La posible razón de que el valor de Akaike sea mayor en el modelo Combinado versus el Logarítmico, es que, para la proyección de valores fuera del rango de estudio, se logre una menor dispersión. La forma final del modelo se presenta en la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

$$Mr = 105409 \times \left(\frac{w_{opt}}{Pa} \right)^{3,713} \times \frac{\psi_m}{Pa}^{0,209} \times \frac{\%w}{Pa}^{-4,336} \times \frac{\theta_{net}}{Pa}^{0,335} \times \frac{\tau_{oct}^2}{Pa}^{-0,285} \times \frac{\%S^{2,412}}{Pa} \times \frac{wIP^{0,06149}}{Pa} \quad (19)$$

$$+ d \times e^{-22,326 \times \frac{w_{opt}}{pa} + 0,4485 \times \frac{\psi_m}{Pa} - 5,250 \times \frac{\%w}{Pa} + 0,3091 \times \frac{wIP}{Pa}}$$

$$d=0 \text{ si } w_{opt} < 36\%, 1 \text{ si } w_{opt} \geq 36\%$$

Donde:

w_{opt} =Contenido de humedad óptimo (%)

ψ_m =Succión matricial (kPa)

$\%w$ = Contenido de humedad de la pastilla (%)

θ_{net} = Invariante de esfuerzos principales neto (kPa)

τ_{oct} = Cortante octaédrico (kPa)

$\%S$ = Saturación de la pastilla (%)

wIP = Multiplicación del índice de plasticidad con el contenido de material pasando la malla #200 (%)

Pa = Presión atmosférica (kPa)



Finalmente, se logró comprobar que la humedad posee un efecto importante en la capacidad mecánica de los suelos, razón por la que el estudio de este comportamiento es de vital importancia para el país, dadas las condiciones climáticas propias de Costa Rica y los efectos del cambio climático a nivel global.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Una vez finalizado el estudio se concluye lo siguiente:

- Se generó un mapa de saturación que permitió estimar los valores a incorporar en el ensayo de módulo resiliente para cada tipo de suelo, lo que significó un ahorro en los recursos utilizados para el desarrollo del estudio y la obtención de resultados. Sin embargo, es de suma importancia que se realicen más campañas para la obtención de datos de humedad y de esta manera mejorarlos.
- Fue posible proponer un modelo de predicción general de la SWCC basado en las características físicas de los suelos analizados, que podrá ser incorporado en próximas versiones de la guía de diseño mecánica-empírica de Costa Rica (GDP), además de un modelo para predecir el contenido de agua volumétrica a la saturación, que también podrá ser incluido en las guías de diseño.
- A través del análisis de los resultados (características físicas y mecánicas) y de la revisión bibliográfica realizada, se logró proponer modelos matemáticos capaces de predecir adecuadamente los valores de M_r menores de 200000 kPa (200 Mpa).
- Con respecto a las hipótesis planteadas y dado el cumplimiento de los objetivos, es factible asegurar que las suposiciones establecidas al inicio de esta investigación fueron satisfactorias.

6.2. Recomendaciones

Se propone dar continuidad a este estudio aumentando paulatinamente la base de datos, de tal forma que se permita mejorar la capacidad de predicción de los modelos propuestos.

También es importante monitorear los estados de saturación de los suelos dentro del territorio nacional y bajo la estructura de pavimento (mejorar el mapa de saturación), de tal forma que



se utilicen los datos de humedad apropiados para obtener el módulo de diseño para un proyecto de carretera específico.

Finalmente, debido a que se demuestra el efecto tan importante que posee la humedad en la reducción de la capacidad mecánica del suelo y debido a las condiciones de saturación tan elevadas a las que se encuentran sometidos en el país, se recomienda evaluar alternativas que permitan mitigar este efecto, tal como posibles estabilizaciones, uso de materiales alternativos, manejo adecuado de drenajes superficiales y subdrenajes, entre otros.



7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alfaro, P. (2021). *Efecto en el módulo resiliente producto del contenido de agua en subrasantes*. Tesis de grado inédita para obtener el título de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San Pedro, San José. Costa Rica.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). *Guía de Diseño AASHTO 93*. Estados Unidos.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice*. USA.

Araujo, W. (2014). *Ecuaciones de correlación del CBR con propiedades índice de suelos para la ciudad de Piura*. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de Piura. Piura, Perú.

Ávila, T. (2017). *Efecto del contenido de agua en el módulo resiliente de las subrasantes*. Tesis de posgrado en Ingeniería Civil para obtener el título de Maestría Académica en Ingeniería del Transporte y Vías. Universidad de Costa Rica. San Pedro, San José. Costa Rica.

Ávila, T. y Araya, Y. (2014). *Clasificación Físico-Química de suelos de Costa Rica: LM-PI-UMP-046-R1*. Unidad de Materiales y Pavimentos, Programa de Infraestructura del Transporte, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica

Black, W. (1962). *A method of estimating the California bearing ratio of cohesive soils from plasticity data*, *Geotechnique*, 12, pp. 271-282.

Bogantes, R., Laporte, G., Quesada, C. y Vásquez, A. (2002). *Zonificación geotécnica general de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos*. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Bravo, A. (2013). *Diseño probabilístico de cimentaciones superficiales cuantificando la incertidumbre asociada a los cambios en el grado de saturación de los suelos de*



Guanacaste, Puntarenas y Limón. Proyecto de Graduación para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.

Bustillos, W. (2010). *Estudio exploratorio del efecto de la saturación en el ensayo de California Bearing Ratios (CBR) de campo y laboratorio en el diseño de estructura de pavimento.* Proyecto de graduación para obtener el título de licenciatura en Ingeniería en Construcción. Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

Cary, C., y Zapata, C. (2008). *Ensayo de modulo resiliente para suelos no saturados.* Thesis (M.Sc.). Arizona State University. Arizona, Estados Unidos.

Cary, C., y Zapata, C. (2011). *Modelo de predicción del módulo resiliente para suelos no saturados.* Segundo Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 12 (1).

Chaves, S. y Camacho, E. (2017). *Comparación de valores de módulo resiliente en subrasante obtenidos por ensayos de campo y laboratorio.* Tesis de grado para obtener el título de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San Pedro, San José. Costa Rica.

Chon kan, P. y Ávila, T. (2017). *Modelado de curvas características suelo-agua para carreteras en Costa Rica.* Tesis de grado para obtener el título de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San Pedro, San José. Costa Rica.

Darter, M. (1991). *Evaluación de la guía AASHTO 1986 para el diseño de pavimentos.* Revista de ingeniería de construcción [artículo de revista] No. 11 (jul.-dic.1991), p. 51-62. Chile

Fredlund, DG., y Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils.* New York, John Wiley y Sons, Inc. 1993. p. 1-6. Estados Unidos

Garnica, P., Pérez, N. y Gómez, JA. (2000). *Módulos de resiliencia en suelos finos y materiales granulares.* Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica N.42. México.



Garnica, P., Gómez, J. y Sesma, JA. (2002). *Mecánica de materiales para pavimentos*. México: Instituto Mexicano del Transporte.

Guzmán, A. (2015). *La red vial es indispensable para el desarrollo y crecimiento de un país*. Recuperado de: <http://udep.edu.pe/hoy/2015/la-red-vial-es-imprescindible-para-el-desarrollo-y-crecimiento-de-un-pais/>

Herrera, V. (2007). *Valoración del módulo resiliente para un suelo utilizado como subrasante*. Tesis de grado para obtener el título de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San Pedro, San José. Costa Rica.

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (2009). *Atlas Climatológico de Costa Rica* [Versión Digital]. San José, Costa Rica.

Laporte, G. y Sáenz, S. (1985). *Métodos aproximados de cálculo por consolidación de limos compresibles aplicables a Costa Rica*. En: 3er Seminario Nacional de Geotecnia. San José, Costa Rica.

Lekarp, F., Isacsson, U., y Dawson, A. (2000). *State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates*. Journal of Transportation Engineering, 126(1): 66–75

Loría, L. (2013). *Desarrollo de la Guía de Diseño de Pavimentos de Costa Rica: CR_ME* [archivo en PDF]. Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/533>

Mena, W. (2013). *Implementación del Modelo Climático de la MEPDG "AASHTO 2008" en Colombia para tres condiciones climáticas*. Tesis de Maestría en Ingeniería, Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería, Medellín.

Orozco, E. (2007). *Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de infraestructura vial*. Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto CILA. La Habana, Cuba.

Perera, A. (2015). *Determinación y análisis de los factores climáticos críticos para el diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica*. Proyecto de Graduación para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica.



Seed, H. B., Chan, C. K., y Lee, C. E. (1962). *Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures*. Proc., Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, ASCE, Reston, VA, 611–636.

Sen, Z. (2009). *Spatial Modeling Principles in Earth Sciences*. London: Springer Science + Business Media.

Witczak, M. W., y J. Uzan. (1988). *The Universal Airport Design System, Report I of IV: Granular Material Characterization*. Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park.

Ximénez, M.C. y García, A.G. (2005). *Comparación de los métodos de estimación de máxima verosimilitud y mínimos cuadrados no ponderados en el análisis factorial confirmatorio mediante simulación Monte Carlo*. Psicothema. Vol. 17, n° 3, pp. 528-535. Universidad Autónoma de Madrid

Zapata, C., y Salim, R. (2012). *Impact of environmental site location and groundwater table depth on the thickness of flexible airfield pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.



8. APÉNDICES

8.1. Apéndice 1: Coordenadas de los puntos de muestreo

- Tramo A

Tabla A 1

Coordenadas de puntos de muestreo tramo A

ID	Descripción	Longitud	Latitud
1	Copey	-83,7599	9,5776
2	San Rafael	-83,7147	9,4045
3	San Carlos	-83,3110	9,1300
4	Jabillo	-83,0974	8,9375
5	Santa Rita	-82,9967	8,8261
6	Corredores	-82,9430	8,6800
7	Río Claro	-83,0581	8,6709
8	Villa Colón	-83,3313	8,8565
9	Barrigones	-83,4437	8,6151

- Tramo B

Tabla A 2

Coordenadas de puntos de muestreo tramo B

ID	Descripción	Longitud	Latitud
1	Pacuarito	-83,4522	10,1006
2	Batán	-83,2989	10,0459
3	Maravilla	-83,2097	10,1063
4	Río Bananito	-82,9629	9,8760
5	Cahuita	-82,8841	9,7583
6	Hone Creek	-82,7924	9,6503

- Tramo C

Tabla A 3

Coordenadas de puntos de muestreo tramo C

ID	Descripción	Longitud	Latitud
1	San Antonio	-84,6707	10,5724
2	San Rafael	-84,8185	10,6719
3	Upala	-84,9385	10,7954
4	Chimurria Arriba	-85,0235	10,8095
5	San José	-85,0909	10,9277
6	Los Chiles	-84,6594	10,9329
7	Santa Rosa de Pocosol	-84,5599	10,7313



- Tramo D

Tabla A 4

Coordenadas de puntos de muestreo tramo D

ID	Descripción	Longitud	Latitud
1	La Garita	-85,5751	11,0484
2	Pelón de la Altura	-85,5443	10,8146
3	Cañas Dulces	-85,5114	10,7319
4	Palmira	-85,5842	10,5268
5	Santa Ana	-85,6140	10,3860
6	Lorena	-85,7070	10,3570
7	El Guapote	-85,7381	10,2288

- Tramo 1

Tabla A 5

Coordenadas de puntos de muestreo tramo 1

ID	Descripción	Longitud	Latitud
1	Orotina	-84,4386	9,9307
2	Coyolar	-84,5636	9,8943
3	Uvita	-84,6530	9,8950
4	Cuatro Cruces	-84,7453	10,0381
5	Sardinal	-84,8517	10,1491
6	La Lindora	-84,8430	10,2799

- Tramo 2

Tabla A 6

Coordenadas de puntos de muestreo tramo 2

ID	Descripción	Longitud	Latitud
1	Grecia	-84,2914	10,0948
2	Naranjo	-84,3590	10,1003
3	Zarcero	-84,3782	10,1707
4	Ciudad Quesada	-84,4267	10,3064
5	San Cayetano de Venecia	-84,2883	10,3718
6	Río Cuarto	-84,1898	10,3179
7	Cinchona	-84,1672	10,2265
8	Fraijanes	-84,1792	10,1595



- Tramo 3

Tabla A 7

Coordenadas de puntos de muestreo tramo 3

ID	Descripción	Longitud	Latitud
1	Capellades	-83,7913	9,9217
2	Buena Vista	-83,5982	9,9210
3	Linda Vista	-83,5590	10,0242
4	Siquirres	-83,5297	10,1047
5	El Silencio	-83,5382	10,1853
6	Guácimo	-83,6665	10,1995
7	Jiménez	-83,7645	10,2041

- Tramo 4

Tabla A 8

Coordenadas de puntos de muestreo tramo 4

ID	Descripción	Longitud	Latitud
1	Puntarenas	-84,5980	9,8240
2	Bijagual	-84,5684	9,7311
3	Herradura	-84,6328	9,6517
4	Quebrada Amarilla	-84,5270	9,5593
5	Cuarenta y Cinco	-84,3997	9,5256
6	Quepos	-84,1728	9,4536

- Tramo 5

Tabla A 9

Coordenadas de puntos de muestreo tramo 5

ID	Descripción	Longitud	Latitud
1	Lanamme Liberia	-84,1118	10,0620



8.2. Apéndice 2: Resultados de laboratorio de los puntos muestreados

Tabla A 10

Resultados de laboratorio de los puntos muestreados

Lugar de muestreo	Invierno 2020		Verano 2021		Invierno 2021	
	Humedad (%)	Gs	Humedad (%)	Gs	Humedad (%)	Gs
Orotina	29,6	2,873	17,5	2,693	42,8	2,684
Coyolar	53,0	2,745	33,5	2,727	40,6	2,697
Uvita	31,6	2,675	18,6	2,723	33,9	2,114
Cuatro Cruces	45,2	2,710	23,5	2,703	38,5	2,738
Sardinal	48,1	2,670	17,9	2,628	43,8	2,723
La Lindora	43,5	-	36,5	2,767	41,1	2,834
Grecia	70,4	2,649	44,2	2,611	75,7	2,572
Naranjo	54,1	2,675	32,5	2,719	51,9	2,723
Zarcelero	47,0	2,732	40,2	2,666	59,4	2,748
San Cayetano de Venecia	50,0	2,751	50,9	2,743	56,1	2,818
Río Cuarto de Grecia	51,9	2,691	47,2	2,696	102,7	2,741
Cinchona	117,2	2,370	90,9	2,739	118,9	2,577
Fraijanes	194,7	2,556	195,1	2,430	195,4	2,549
Lanamme Liberia	17,3	2,540	23,5	2,591	20,3	2,556
Puntarenas	21,0	2,645	23,1	2,586	36,7	2,615
Bijagual	43,6	2,773	40,9	2,744	48,5	2,694
Herradura	17,8	2,697	18,2	2,734	27,8	2,719
Quebrada Amarilla	11,5	2,834	27,8	2,691	52,9	2,605
Cuarenta y Cinco	38,4	2,699	14,5	2,692	34,2	2,720
Quepos	58,8	2,675	28,8	2,648	37,9	2,600
Cepellades	32,3	2,595	30,8	2,589	48,2	2,635
Buena Vista	48,7	2,623	38,3	2,709	56,4	2,810
Linda Vista	49,8	2,745	30,1	2,665	70	2,621
Siquirres	54,5	2,760	15,9	2,700	29,3	2,762
El Silencio	44,5	2,762	45,0	2,719	38,3	2,781
Guácimo	53,5	2,769	48,4	2,701	51,3	2,848
Jiménez	92,3	2,690	88,2	2,460	99,1	2,475
Pacuarito	42,4	2,762	51,0	2,724	54,0	2,765
Batán	37,0	2,693	33,3	2,724		
Maravilla	35,4	2,650	44,0	2,670	44,1	2,645
Río Bananito	21,3	2,712	40,5	2,641	34,6	2,628
Cahuíta	38,0	2,751	40,2	2,633	30,5	2,656
Hone Creek	38,0	2,751	44,6	2,605	45,2	2,670
Hone Creek	28,5	2,726	33,8	*	28,1	2,66
San Rafael (Tramo A)	42,4	2,762	45,0	2,808	48,2	2,782
Copey	37,0	2,693	28,0	2,655	34,4	2,743
La Garita	32,7	2,690	22,6	2,654	29,3	2,689
Pelón de Altura	21,0	2,634	11,4	2,719	18	2,476
Cañas Dulces	30,4	2,597	26,5	2,509	30,9	2,57
Palmiras	36,7	2,583	39,0	2,679	38,7	2,562
Santa Ana	36,5	2,604	24,5	2,595	25,8	2,62
Lorena	28,1	2,657	23,3	2,637	35,9	2,677
El Guapote	29,8	2,768	29,1	2,715	39,3	2,658
San Antonio	38,0	2,780	42,7	2,708	47,9	2,74
San Rafael (Tramo C)	44,8	2,794	34,6	2,701	41,7	2,772
Upala	43,2	2,754	42,6	2,743	46,8	2,679



Lugar de muestreo	Invierno 2020		Verano 2021		Invierno 2021	
	Humedad (%)	Gs	Humedad (%)	Gs	Humedad (%)	Gs
Chimurría Arriba	74,4	2,767	78,9	2,877	87,8	2,737
San José	46,1	2,609	40,6	2,599	42,7	2,64
Los Chiles	34,6	2,753	31,8	2,782	38,4	2,712
Santa Rosa de Pocosol	35,2	2,706	40,3	2,747	48,7	2,677
San Carlos	33,6	2,736	34,8	2,732	54,7	2,731
Jabillo	69,6	2,628	71,7	2,717	28,7	2,721
Santa Rita	40,5	2,741	49,7	2,740	47,8	2,652
Corredores	14,8	2,655	41,9	2,690	33,8	2,599
Río Claro	41,3	2,588	26,4	2,786	20,9	2,641
Villa Colón	74,6	2,634	74,6	2,735	60,0	2,687
Barrigones	32,6	2,650	30,3	2,704	63,0	2,701

8.3. Apéndice 3: Valores de saturación de los suelos muestreados y clasificación por regiones

Tabla A 11

Saturación de los suelos muestreados y clasificación en regiones

Lugar de muestreo	Invierno 2020	Verano 2021	Invierno 2021	Región
Orotina	86,32	64,90	90,62	Pacífico Norte
Coyolar	97,91	85,49	89,71	Pacífico Norte
Uvita	82,23	67,55	66,53	Pacífico Norte
Cuatro Cruces	92,87	74,33	89,67	Pacífico Norte
Sardinal	92,99	64,02	92,53	Pacífico Norte
La Lindora	90,55	89,16	94,60	Pacífico Norte
Grecia	101,15	88,94	98,75	Valle Central
Naranjo	95,70	84,38	96,64	Valle Central
Zarcero	92,44	88,43	100,58	Zona Norte
San Cayetano de Venecia	93,90	96,98	101,85	Zona Norte
Río Cuarto de Grecia	94,76	93,44	110,41	Zona Norte
Cinchona	109,42	108,39	105,80	Zona Norte
Fraijanes	115,05	104,73	109,87	Zona Norte
Lanamme Liberia	63,98	71,25	66,00	Pacífico Norte
Puntarenas	69,99	70,61	84,40	Pacífico Central
Bijagual	90,61	91,47	94,03	Pacífico Central
Herradura	64,87	67,13	79,85	Pacífico Central
Quebrada Amarilla	51,36	79,03	92,88	Pacífico Central
Cuarenta y Cinco	87,37	58,96	85,85	Pacífico Central
Quepos	97,51	83,24	84,75	Pacífico Central
Cepellades	82,69	78,89	91,82	Caribe Sur
Buena Vista	93,29	88,58	101,68	Caribe Sur
Linda Vista	93,81	80,55	99,19	Caribe Sur
Siquirres	95,86	62,04	82,69	Caribe Norte
El Silencio	91,12	93,07	90,93	Caribe Norte
Guácimo	95,45	94,22	100,79	Caribe Norte
Jiménez	105,91	96,90	99,20	Caribe Norte



Lugar de muestreo	Invierno 2020	Verano 2021	Invierno 2021	Región
Pacuarito	89,91	85,23	99,06	Caribe Norte
Batán	86,39	90,84	90,04	Caribe Norte
Maravilla	85,21	87,79	83,26	Caribe Norte
Río Bananito	70,43	87,33	80,65	Caribe Norte
Cahuita	87,10	88,95	91,50	Caribe Norte
Hone Creek	79,13	85,71	78,43	Caribe Norte
San Rafael (Tramo A)	91,82	96,11	96,95	Pacífico Sur
Copey	71,69	78,18	86,74	Pacífico Sur
La Garita	83,66	71,80	80,50	Pacífico Norte
Pelón de Altura	69,05	52,04	60,48	Pacífico Norte
Cañas Dulces	78,77	72,36	78,40	Pacífico Norte
Palmiras	83,37	88,07	84,03	Pacífico Norte
Santa Ana	83,90	72,58	74,79	Pacífico Norte
Lorena	78,34	72,26	85,81	Pacífico Norte
El Guapote	90,69	81,08	87,58	Pacífico Norte
San Antonio	95,52	91,37	95,33	Zona Norte
San Rafael (Tramo C)	93,23	85,57	92,91	Zona Norte
Upala	105,91	92,49	92,65	Zona Norte
Chimurría Arriba	89,88	111,26	107,73	Zona Norte
San José	87,22	86,45	89,08	Zona Norte
Los Chiles	86,20	85,71	88,75	Zona Norte
Santa Rosa de Pocosol	90,69	40,30	93,53	Zona Norte
San Carlos	85,86	86,71	98,13	Pacífico Sur
Jabillo	99,35	103,29	80,85	Pacífico Sur
Santa Rita	91,11	96,22	92,22	Pacífico Sur
Corredores	58,30	90,29	81,72	Pacífico Sur
Río Claro	86,51	80,24	69,09	Pacífico Sur
Villa Colón	100,64	104,73	98,56	Pacífico Sur
Barrigones	82,33	81,92	100,10	Pacífico Sur

8.4. Apéndice 4: Rangos de saturación según región geográfica y época climática

Tabla A 12

Rangos de valores para mapa de saturación promedio

Región	Época lluviosa		Época seca	
	Rango* (%)	Promedio (%)	Rango* (%)	Promedio (%)
Pacífico Norte	53-98	80-85 (82)	48-100	80-85 (82)
Pacífico Central	48-100	75-80 (79)	62-100	80-85 (84)
Pacífico Sur	70-100	85-90 (89)	38-97	70-75 (74)
Zona Norte	86-99	90-95 (93)	75-100	90-95 (91)
Caribe Norte	75-99	90-95 (92)	85-100	90-95 (94)
Caribe Sur	70-100	85-90 (88)	86-99	90-95 (92)



Región	Época lluviosa		Época seca	
	Rango* (%)	Promedio (%)	Rango* (%)	Promedio (%)
Valle Central	73-100	90-95 (91)	62-100	85-90 (87)

Nota. *Rango de valores registrados en la base de datos para cada región

8.5. Apéndice 5: Caracterización física de las muestras de estudio

8.5.1. Hone Creek

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 1. La muestra proveniente de Hone Creek, corresponde a un suelo tipo SC “arena arcillosa” según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-2-7(6). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 2. Además, este suelo presenta un CBR de 15,7 % como se puede apreciar en la Figura A 3.



Figura A 1

Curva granulométrica del suelo de Hone Creek

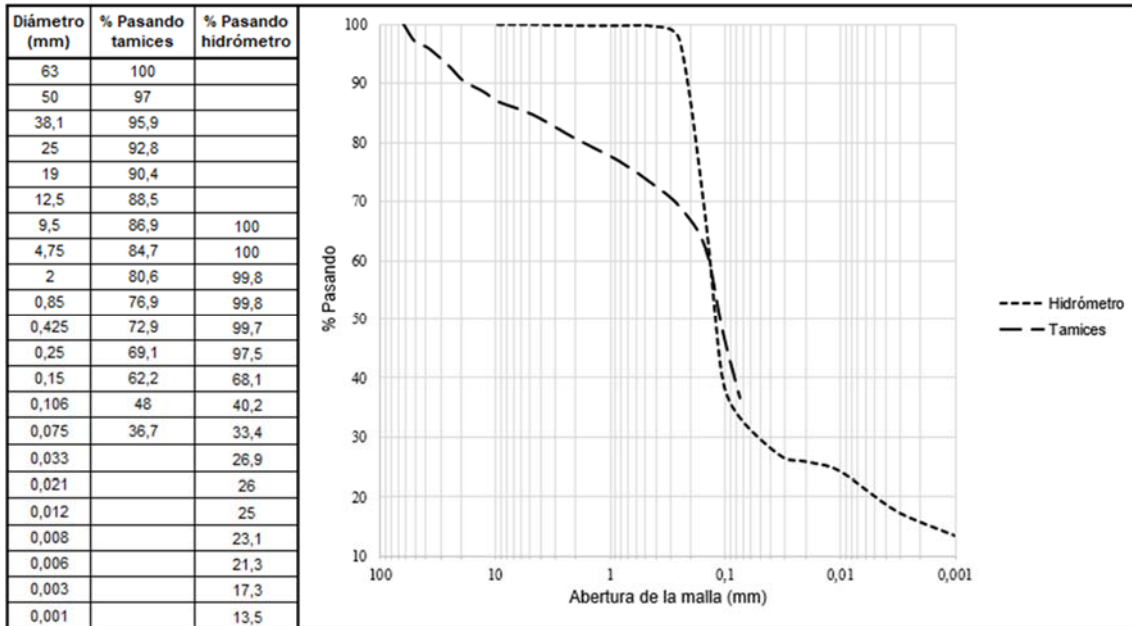


Figura A 2

Prueba próctor estándar para el suelo de Hone Creek

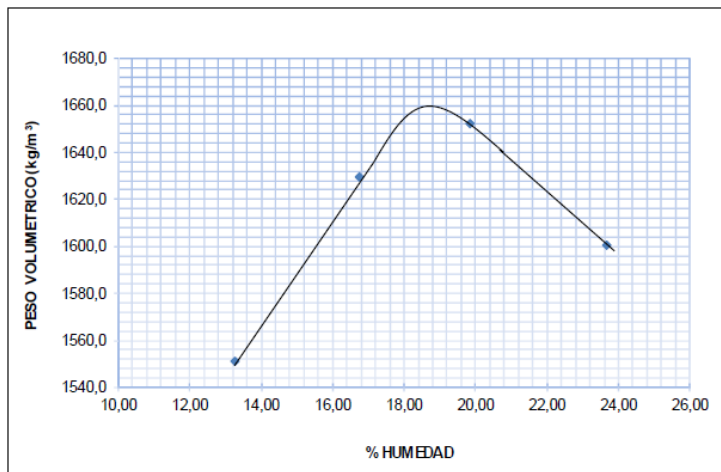
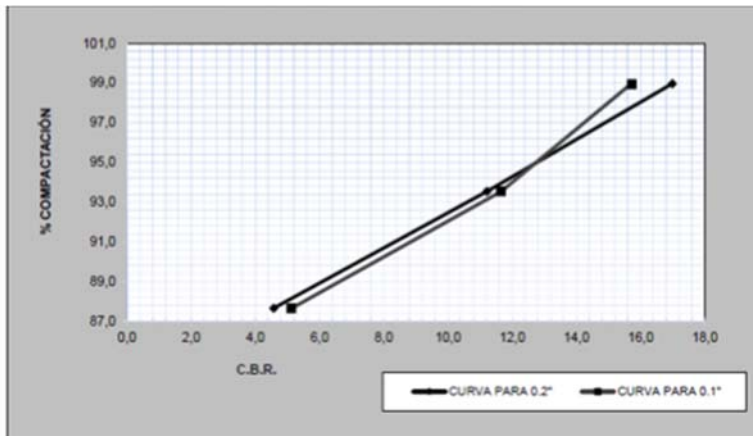




Figura A 3

Porcentaje de compactación contra CBR en el suelo de Hone Creek



8.5.2. Lorena

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 4. La muestra proveniente de Lorena, corresponde a un tipo SM "arena limosa" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(12). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 5. Además, este suelo presenta un CBR de 6,7 % como se puede apreciar en la Figura A 6.

Figura A 4

Curva granulométrica del suelo de Lorena

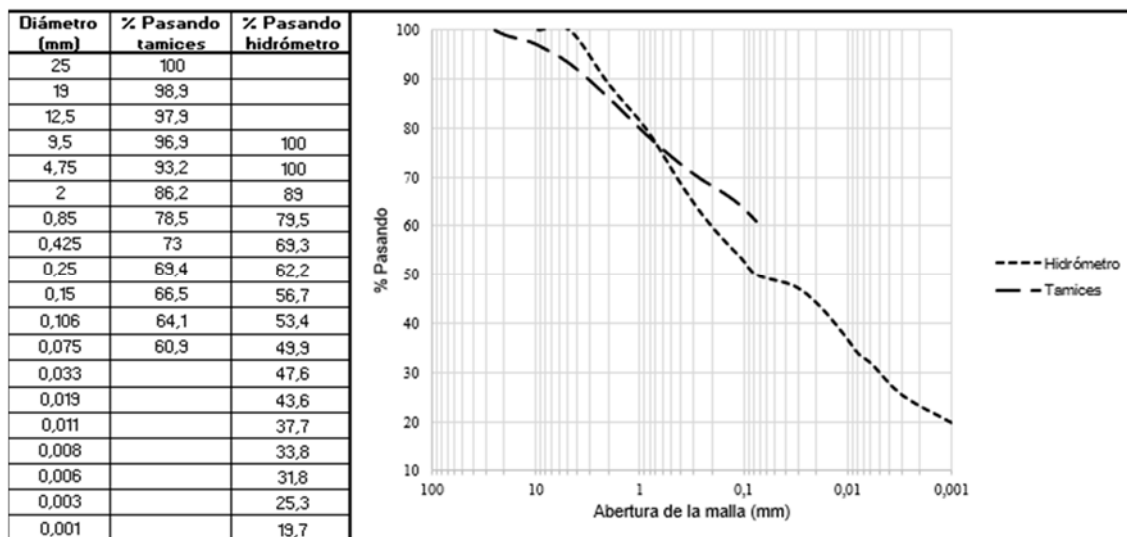




Figura A 5

Prueba próctor estándar para el suelo de Lorena

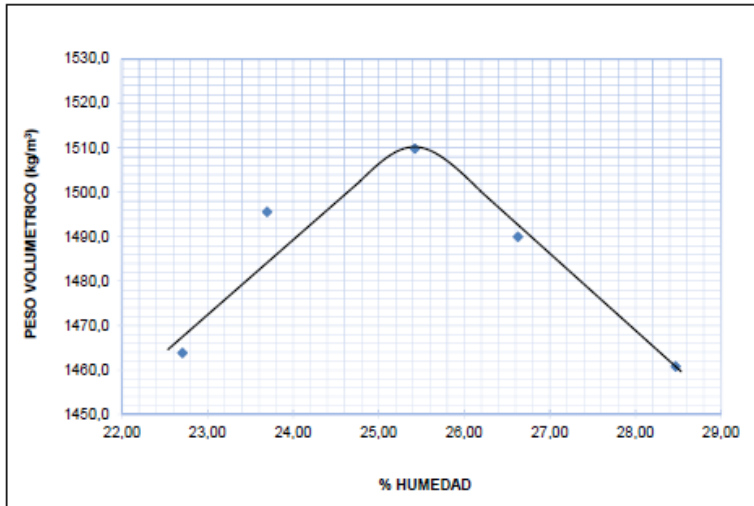
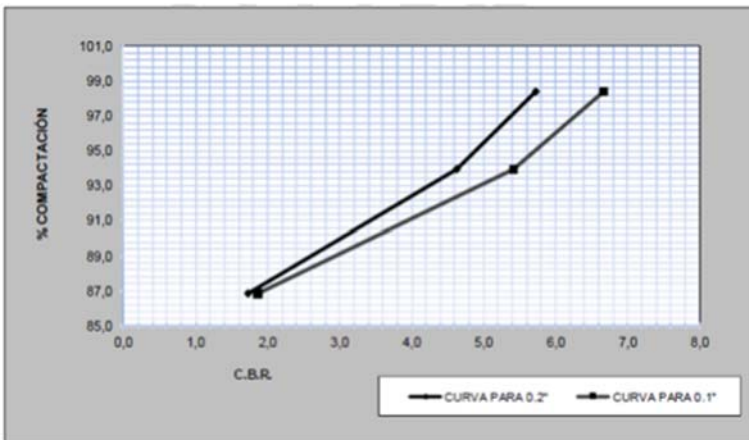


Figura A 6

Porcentaje de compactación contra CBR en el suelo de Lorena



8.5.3. El Guapote (M-0986-2020)

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 7. La muestra proveniente de El Guapote, corresponde a un suelo tipo ML "limo baja plasticidad" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(9). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 8. Además, este suelo presenta un CBR de 7,7 % como se puede apreciar en la Figura A 9.



Figura A 7

Curva granulométrica del suelo de El Guapote

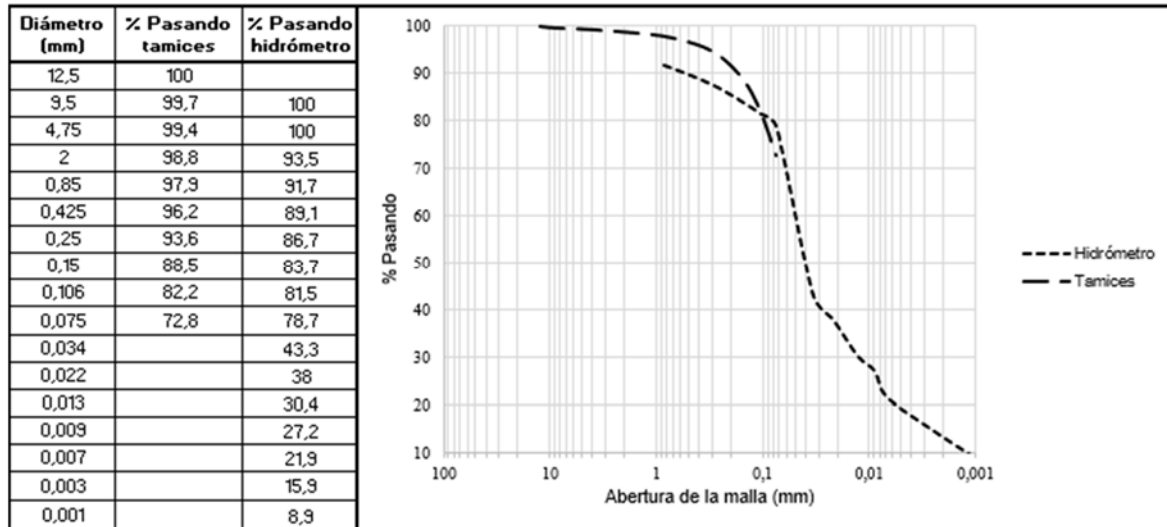


Figura A 8

Prueba próctor estándar para el suelo de El Guapote

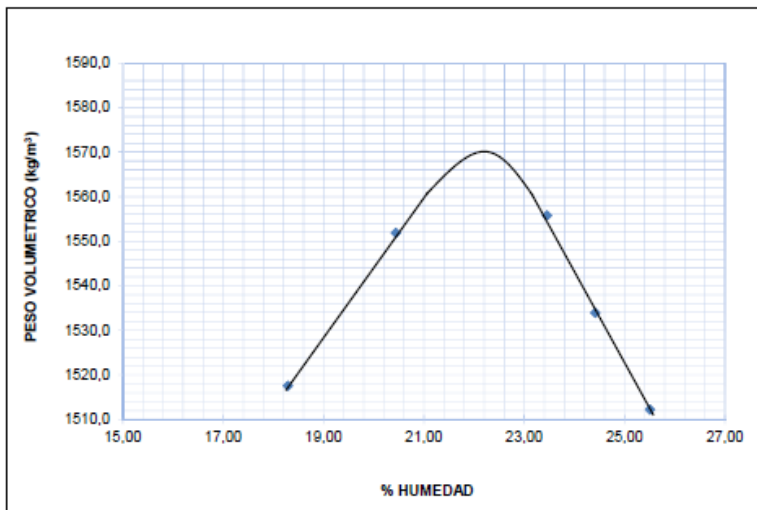
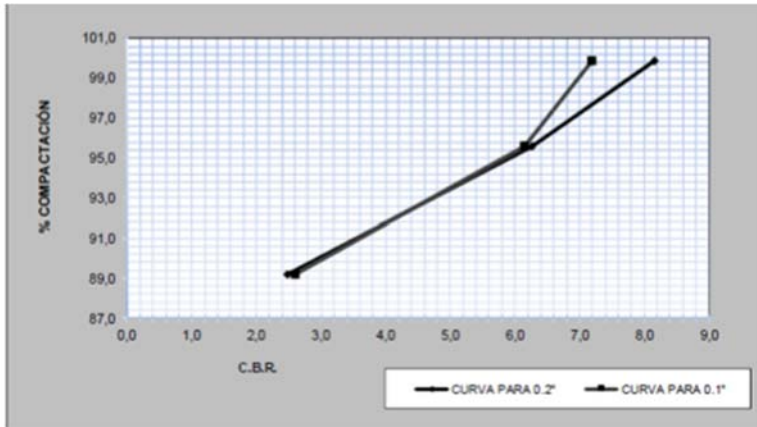




Figura A 9

Porcentaje de compactación contra CBR del suelo de El Guapote



8.5.4. Río Claro

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 10. La muestra proveniente de Río Claro, corresponde a uno tipo SM “arena limosa” según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-6(0). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 11. Además, este suelo presenta un CBR de 19,9 % como se puede apreciar en la Figura A 12.

Figura A 10

Curva granulométrica para el suelo de Río Claro

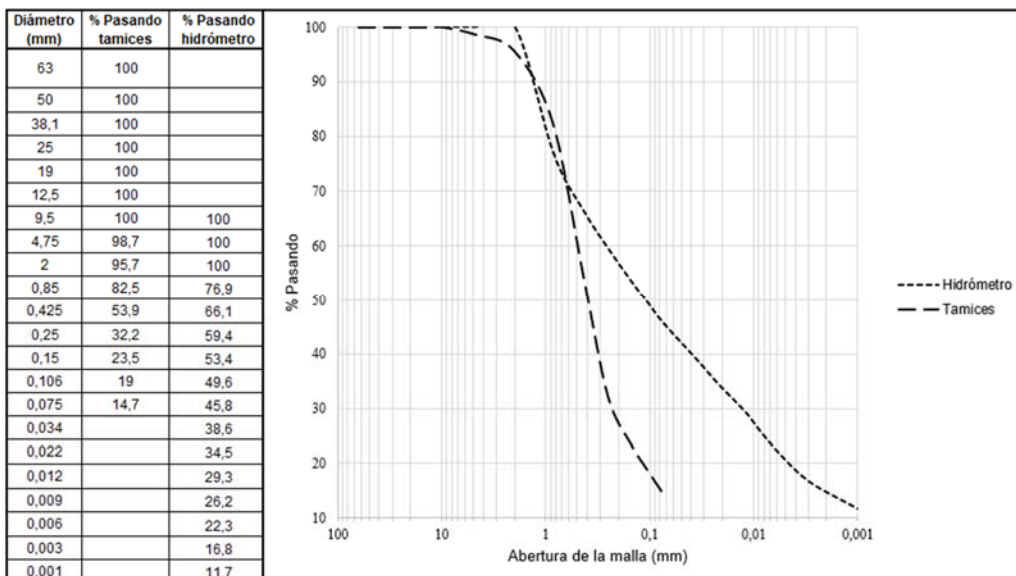




Figura A 11

Prueba próctor estándar del suelo de Río Claro

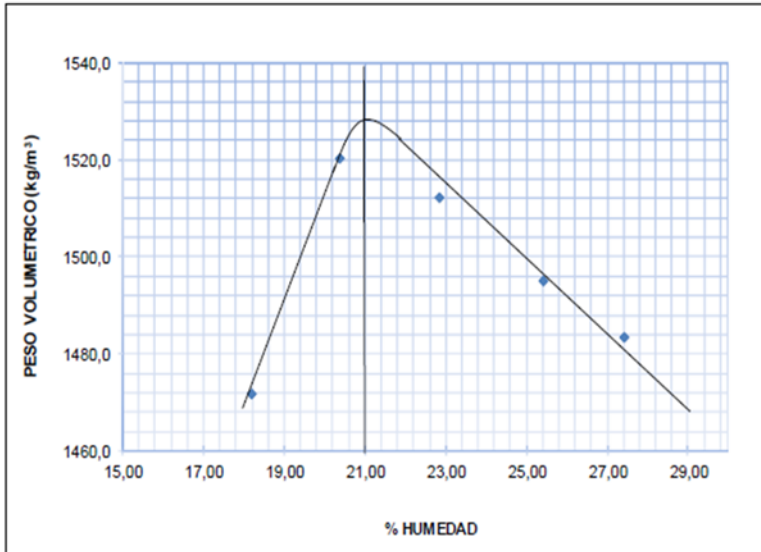
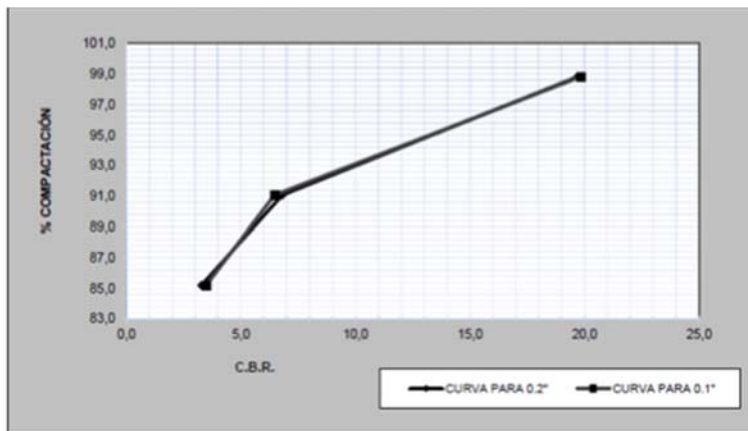


Figura A 12

Porcentaje de compactación contra CBR del suelo de Río Claro



8.5.5. Villa Colón

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 13. La muestra proveniente de Villa Colón, corresponde a un suelo tipo MH "limo alta plasticidad" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(43). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 14. Además, este suelo presenta un CBR de 9,5 % como se puede apreciar en la Figura A 15.



Figura A 13

Curva granulométrica para el suelo de Villa Colón

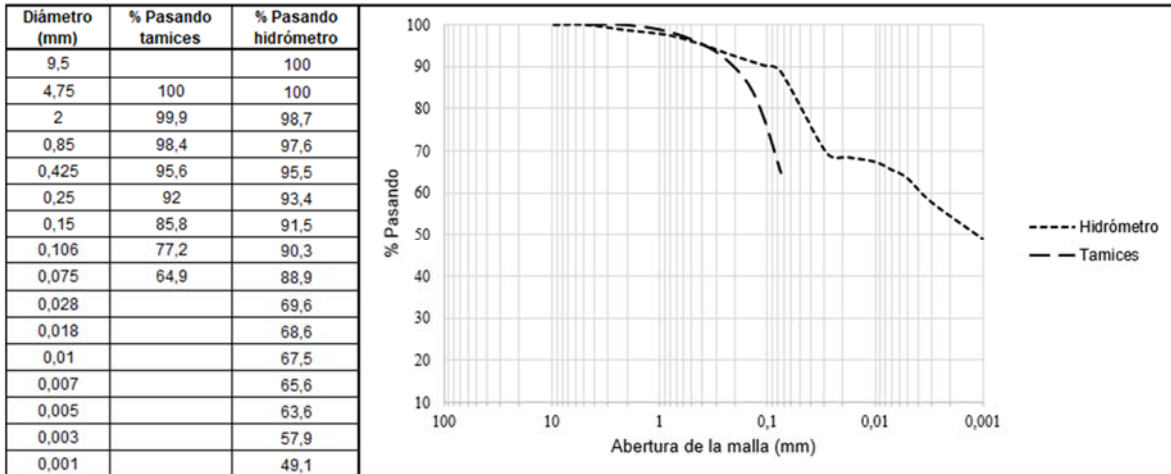


Figura A 14

Prueba próctor estándar del suelo de Villa Colón

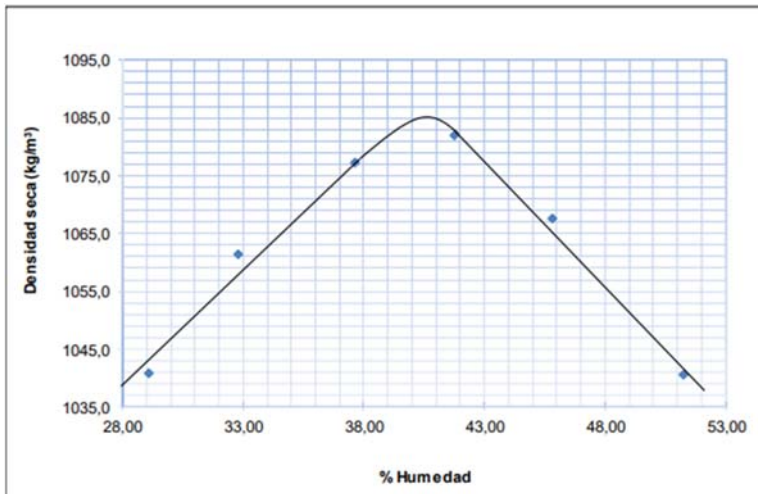
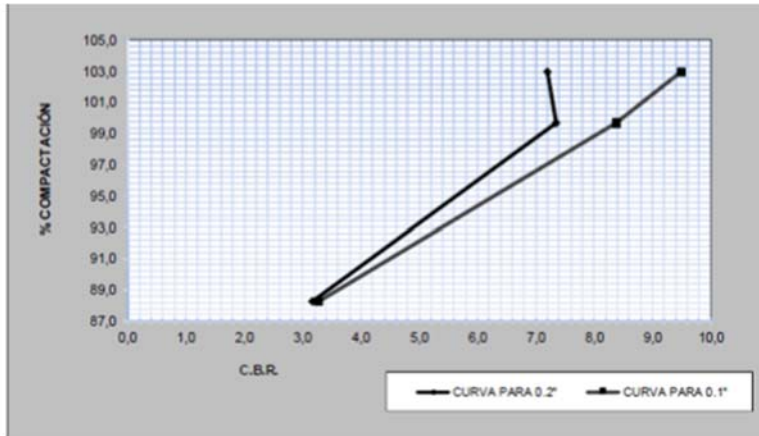




Figura A 15

Porcentaje de compactación contra CBR del suelo de Villa Colón



8.5.6. Barrigones

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 16. La muestra proveniente de Barrigones, corresponde a un tipo MH "limo alta plasticidad" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(34). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 17. Además, este suelo presenta un CBR de 4,8 % como se puede apreciar en la Figura A 18.

Figura A 16

Curva granulométrica para el suelo de Barrigones

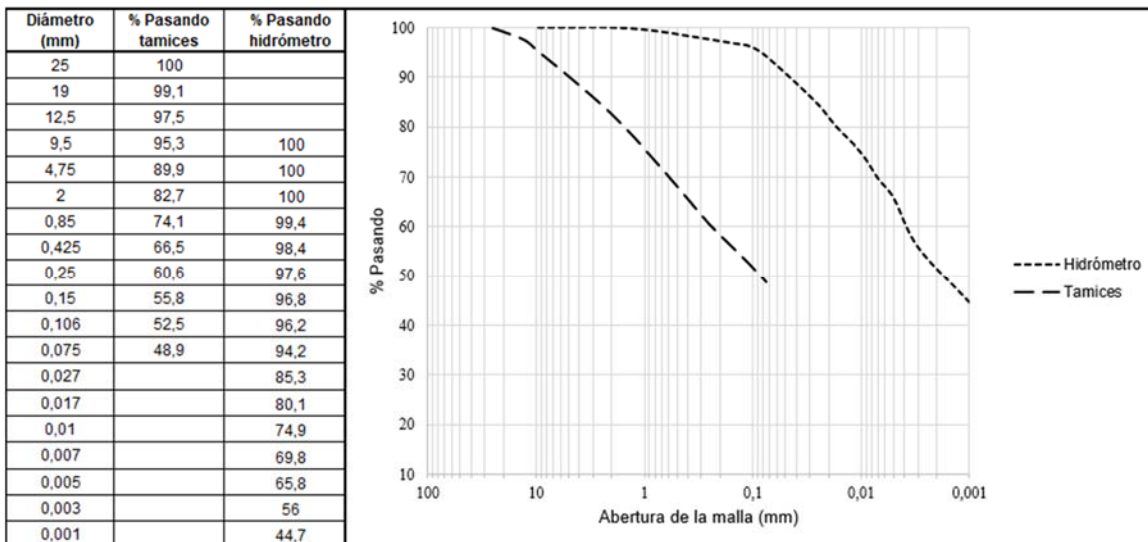




Figura A 17

Prueba próctor estándar del suelo de Barrigones

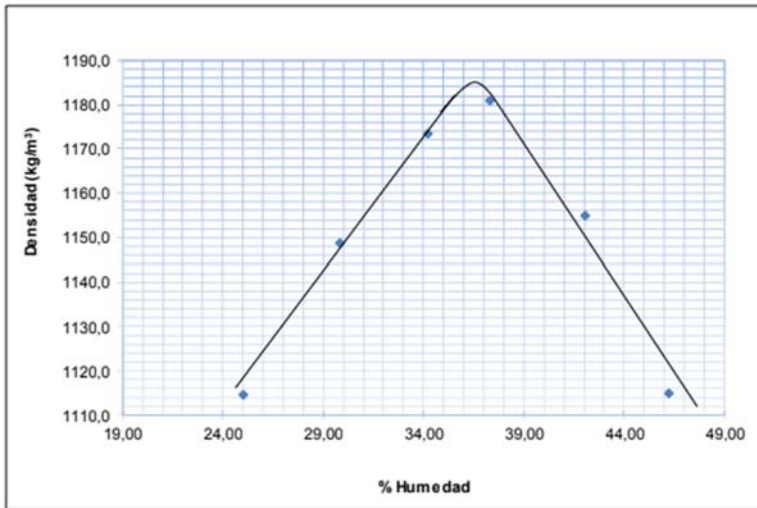
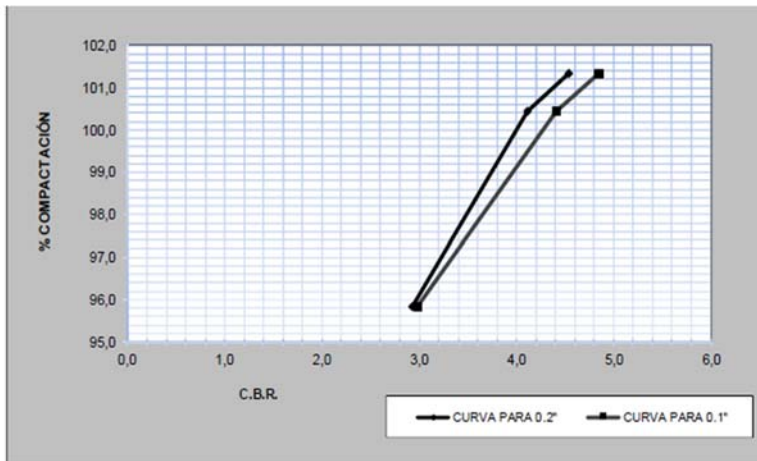


Figura A 18

Porcentaje de compactación contra CBR del suelo de Barrigones



8.5.7. San Cayetano de Venecia

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 19. La muestra proveniente de San Cayetano, corresponde a un suelo tipo MH "limo alta plasticidad" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo tipo A-7-5(0). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 20. Además, este suelo presenta un CBR de 16 % como se puede apreciar en la Figura A 21.



Figura A 19

Curva granulométrica para el suelo de San Cayetano de Venecia

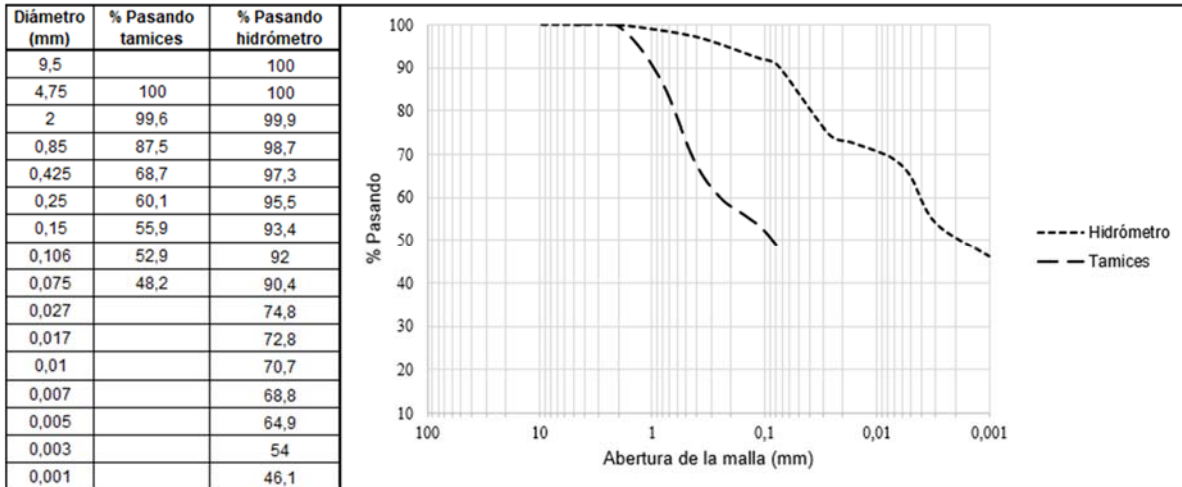


Figura A 20

Prueba próctor estándar del suelo de San Cayetano de Venecia

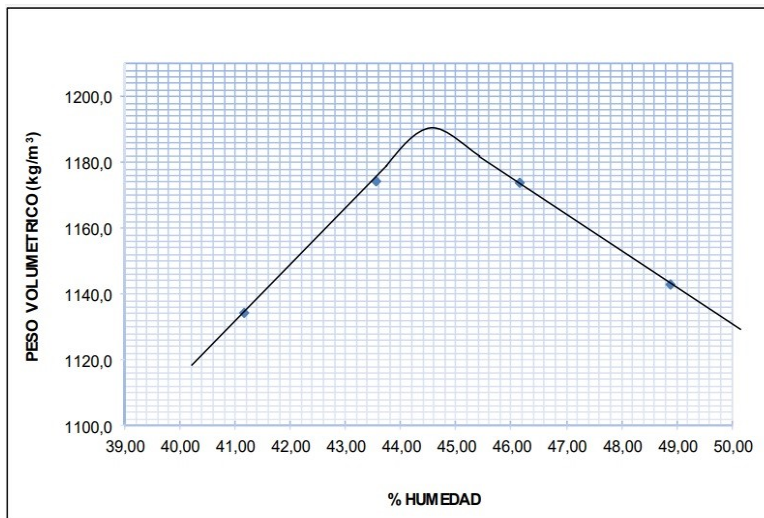
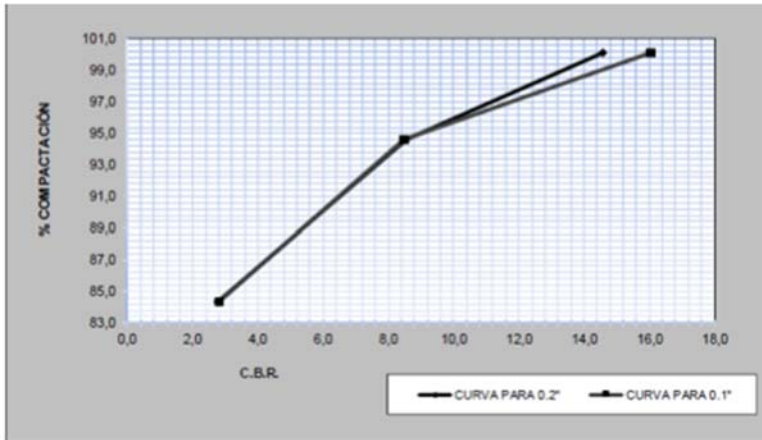




Figura A 21

Porcentaje de compactación contra CBR para el suelo de San Cayetano de Venecia



8.5.8. Bijagual

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 22. La muestra proveniente de Bijagual, corresponde a uno tipo MH "limo alta plasticidad" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(32). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 23. Además, este suelo presenta un CBR de 10,3 % como se puede apreciar en la Figura A 24.

Figura A 22

Curva granulométrica para el suelo de Bijagual

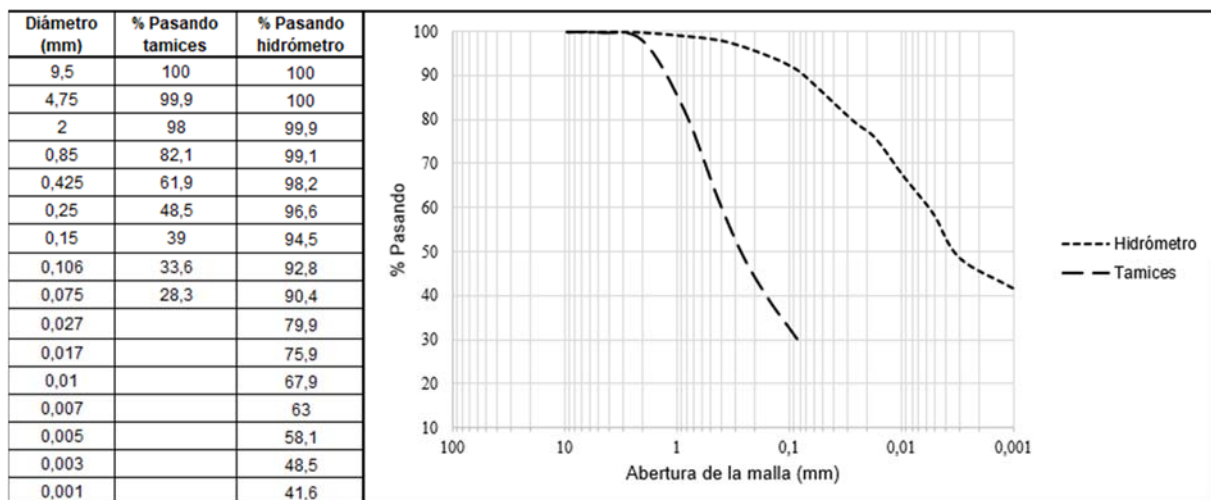




Figura A 23

Prueba próctor estándar del suelo de Bijagual

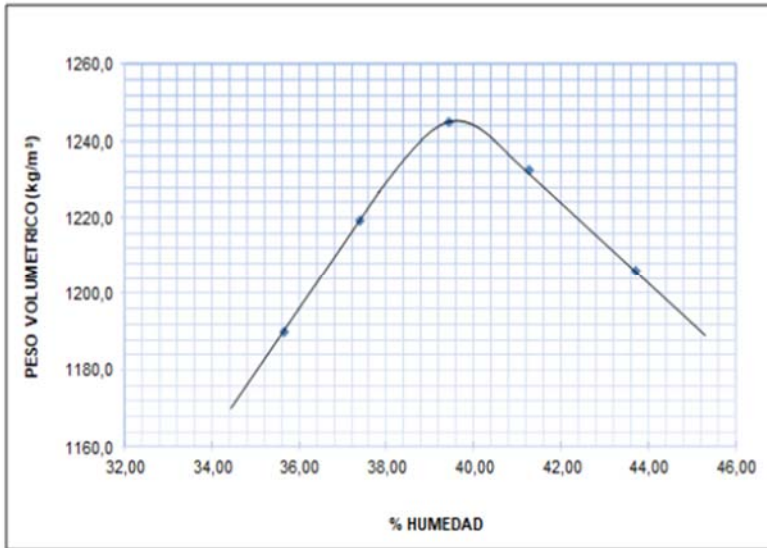
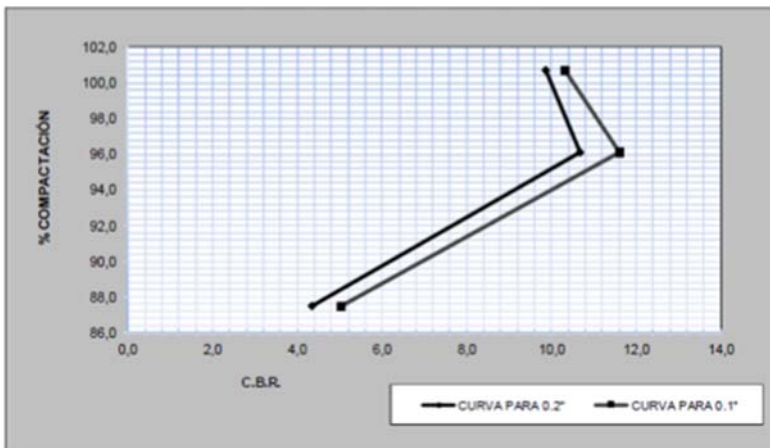


Figura A 24

Porcentaje de compactación contra CBR para el suelo de Bijagual



8.5.9. San Rafael de Alajuela

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 25. La muestra proveniente de San Rafael, corresponde a un suelo tipo MH "limo alta plasticidad" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(39). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 26. Además, este suelo presenta un CBR de 12,3 % como se puede apreciar en la Figura A 27.



Figura A 25

Curva granulométrica para el suelo de San Rafael de Alajuela

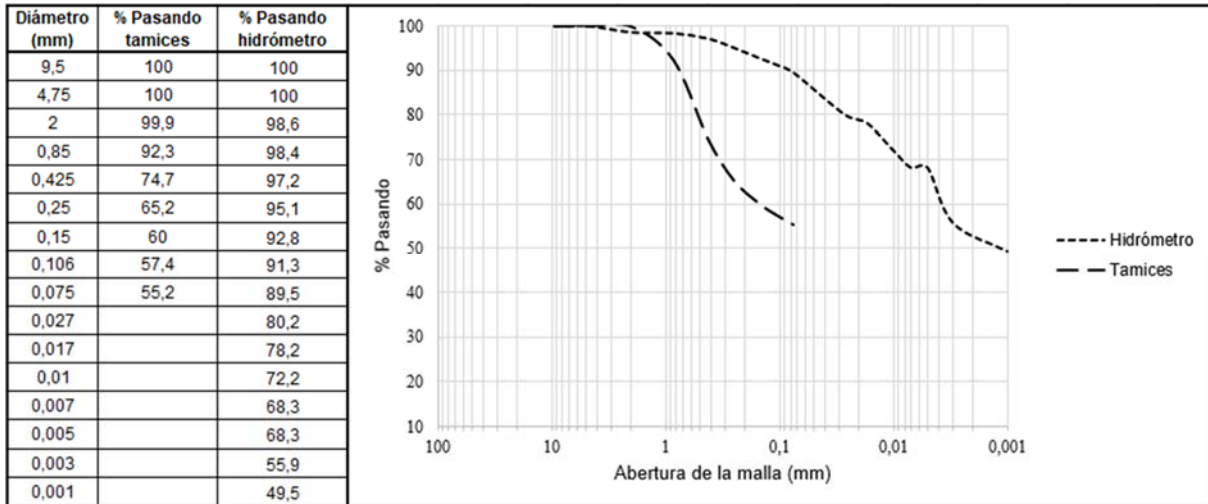


Figura A 26

Prueba próctor estándar del suelo de San Rafael de Alajuela

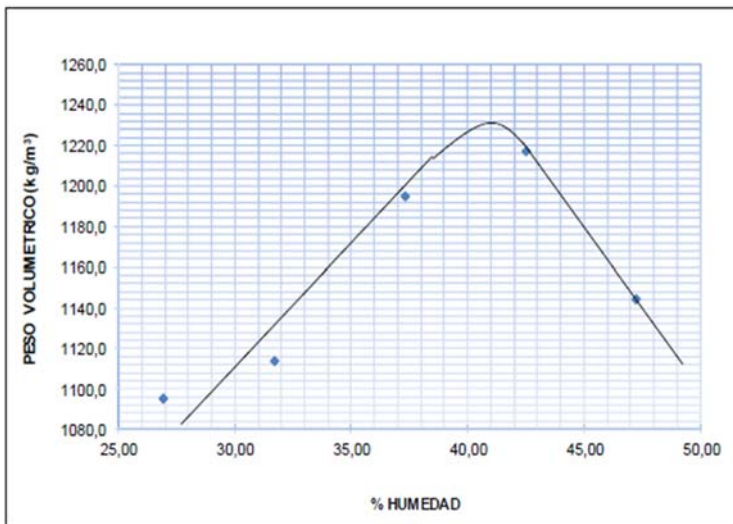
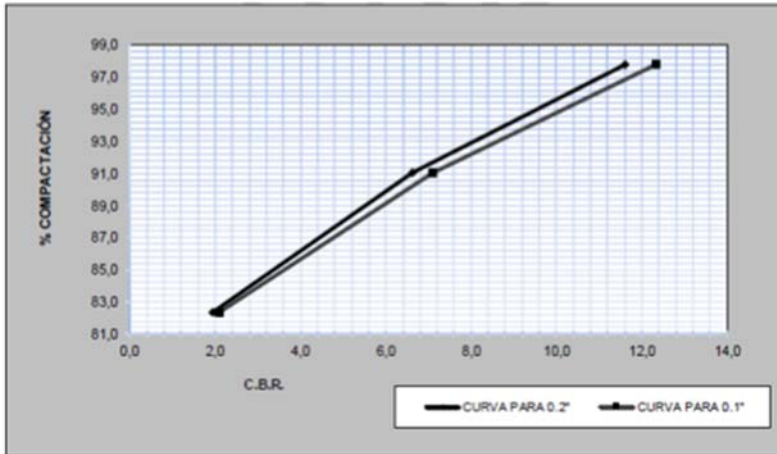




Figura A 27

Porcentaje de compactación contra CBR del suelo de San Rafael de Alajuela



8.5.10. Cinchona

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 28. La muestra proveniente de Cinchona, corresponde a uno tipo MH "limo alta plasticidad" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(6). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 29. Además, este suelo presenta un CBR de 14,8 % como se puede apreciar en la Figura A 30.

Figura A 28

Curva granulométrica para el suelo de Cinchona

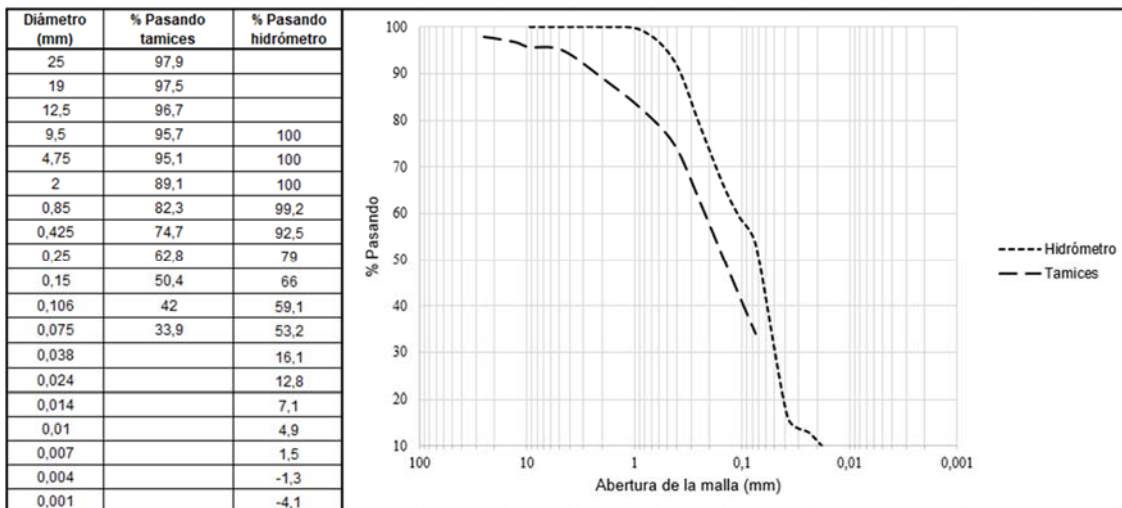




Figura A 29

Prueba próctor estándar del suelo de Cinchona

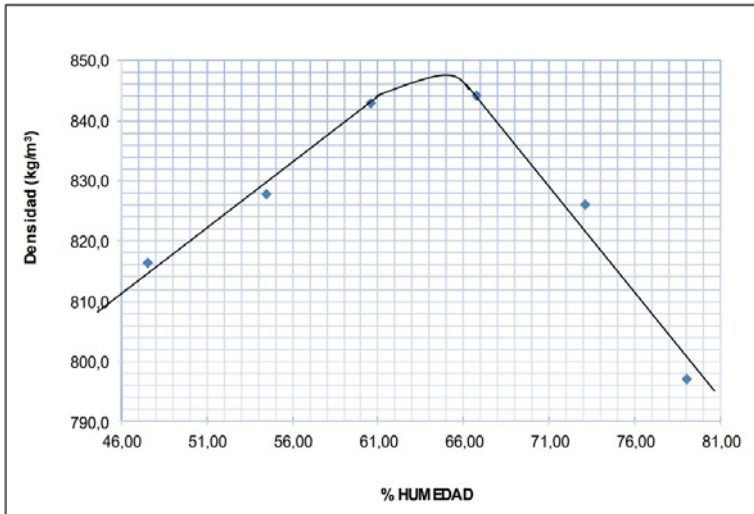
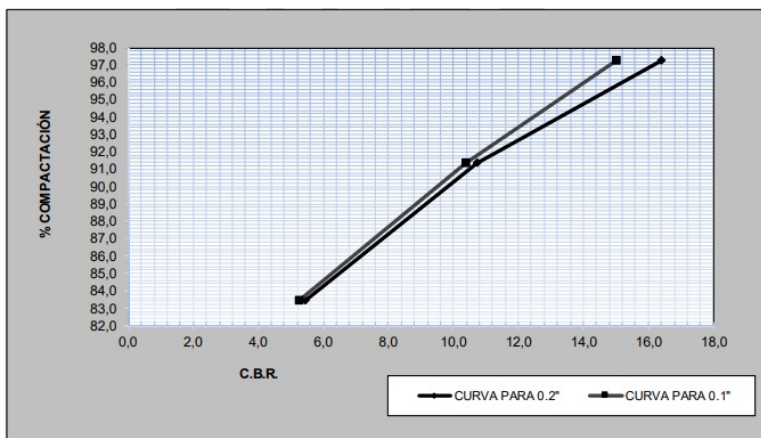


Figura A 30

Porcentaje de compactación contra CBR del suelo de Cinchona



8.5.11. Los Chiles

La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 31. La muestra proveniente de Los Chiles, corresponde a un suelo tipo MH "limo alta plasticidad" según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(35). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 32. Además, este suelo presenta un CBR de 10,6 % como se puede apreciar en la Figura A 33.



Figura A 31

Curva granulométrica para el suelo de Los Chiles

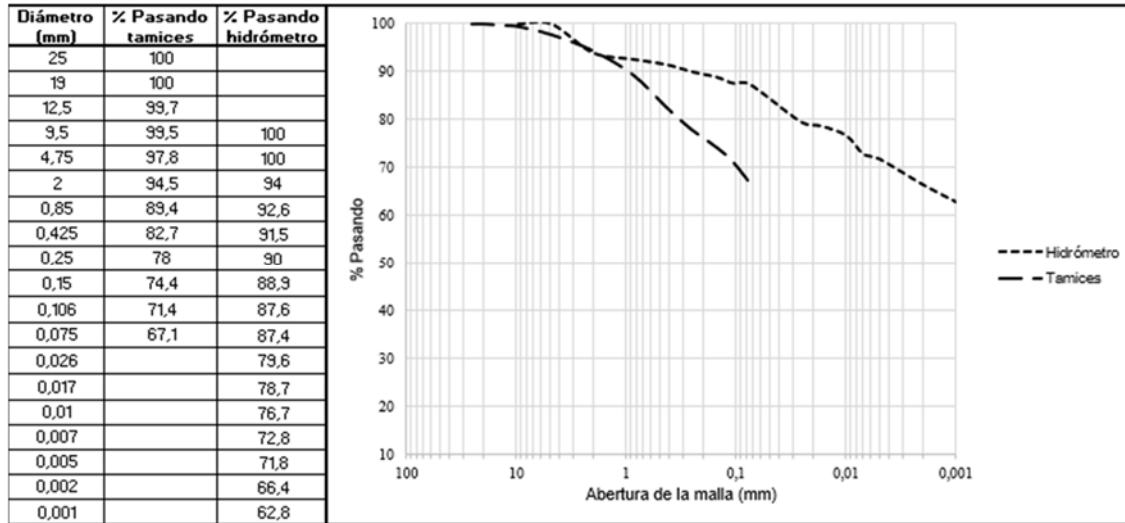


Figura A 32

Prueba próctor estándar del suelo de Los Chiles

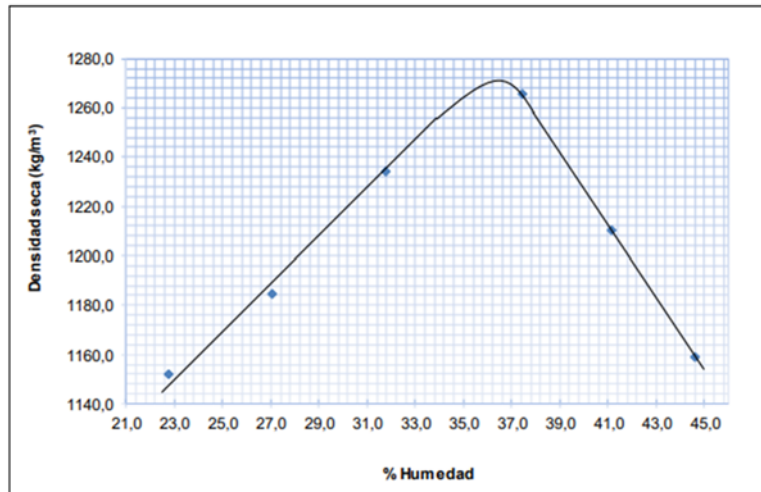
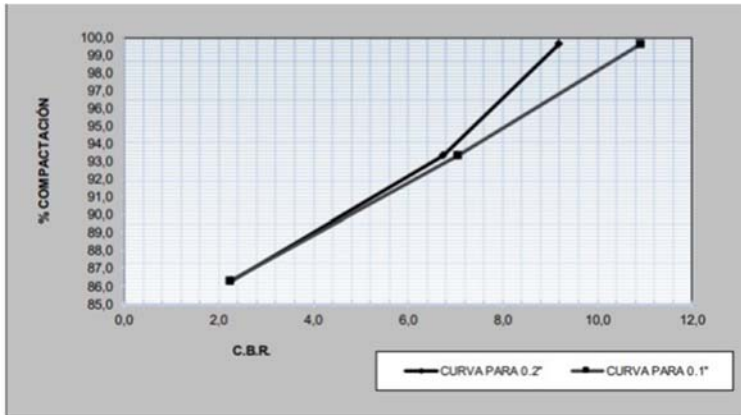




Figura A 33

Porcentaje contra CBR del suelo de Los Chiles

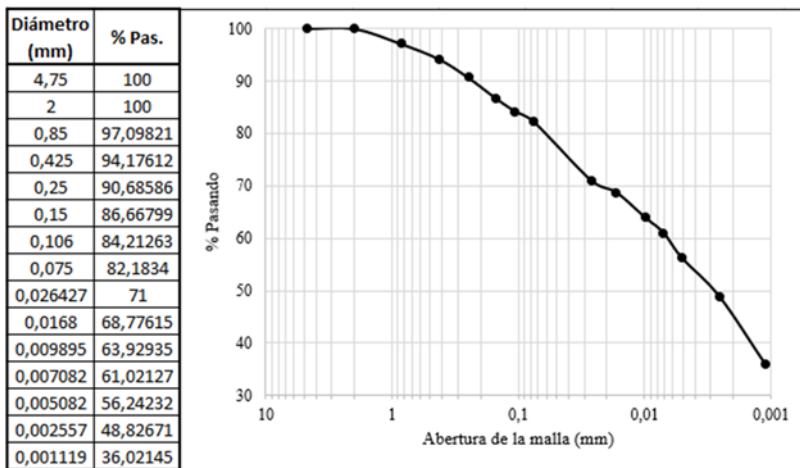


8.5.12. Cruce Atenas

La información referente a este punto fue tomada del trabajo realizado por Alfaro (2021). La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 34. La muestra proveniente del Cruce de Atenas, corresponde a un suelo tipo MH “limo alta plasticidad” según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(25). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 35.

Figura A 34

Curva granulométrica para el suelo del Cruce de Atenas

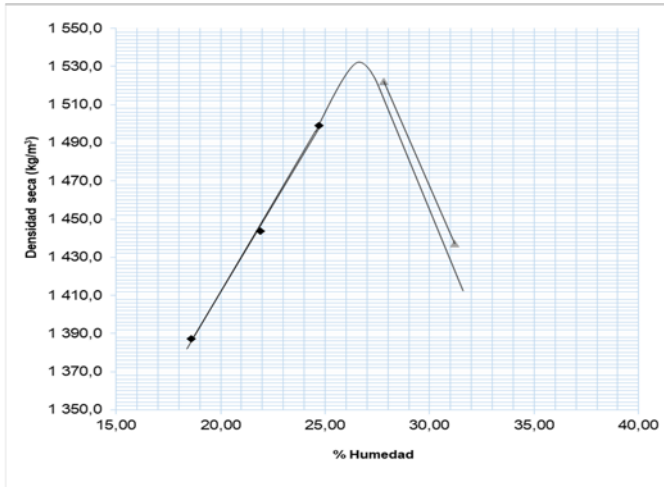


Nota. Editado a partir de Alfaro (2021).



Figura A 35

Prueba próctor estándar para el suelo del Cruce de Atenas



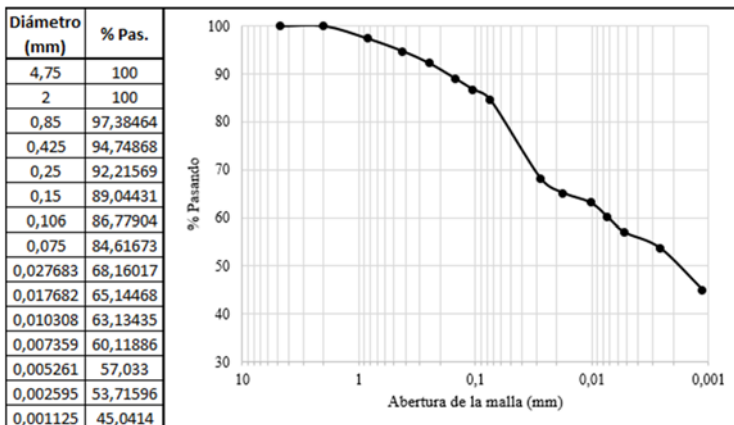
Nota. Editado a partir de Alfaro (2021).

8.5.13. *Guácimo*

La información referente a este punto fue tomada del trabajo realizado por Alfaro (2021). La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 36. La muestra proveniente de Guácimo, corresponde a un suelo tipo MH “limo alta plasticidad” según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-7-5(20). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 37.

Figura A 36

Curva granulométrica para el suelo de Guácimo

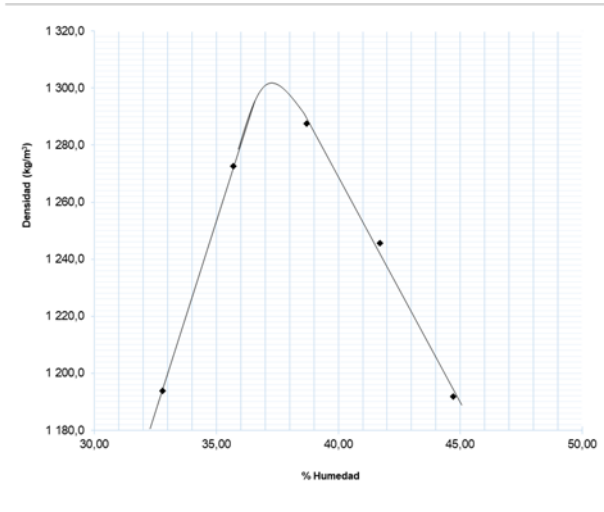


Nota. Editado a partir de Alfaro (2021).



Figura A 37

Prueba próctor estándar del suelo de Guácimo



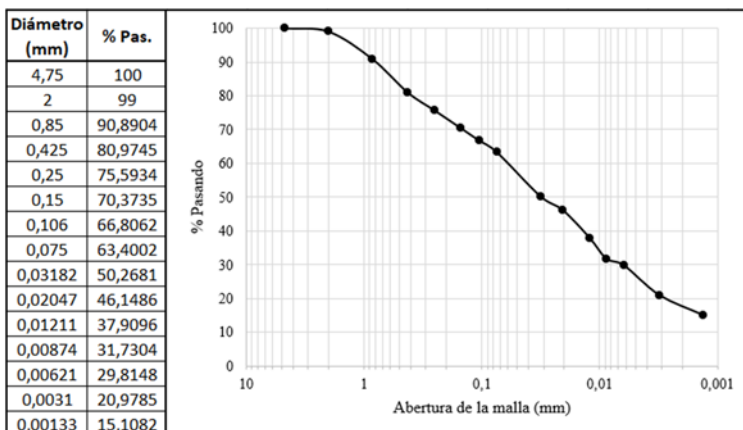
Nota. Editado a partir de Alfaro (2021).

8.5.14. Lanamme UCR Sede Liberia

La información referente a este punto fue tomada del trabajo realizado por Alfaro (2021). La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 38. La muestra proveniente de la sede de la UCR en Liberia, corresponde a un suelo tipo ML “limo baja plasticidad” según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-4(5). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 39.

Figura A 38

Curva granulométrica para el suelo para el LanammeUCR Sede Liberia

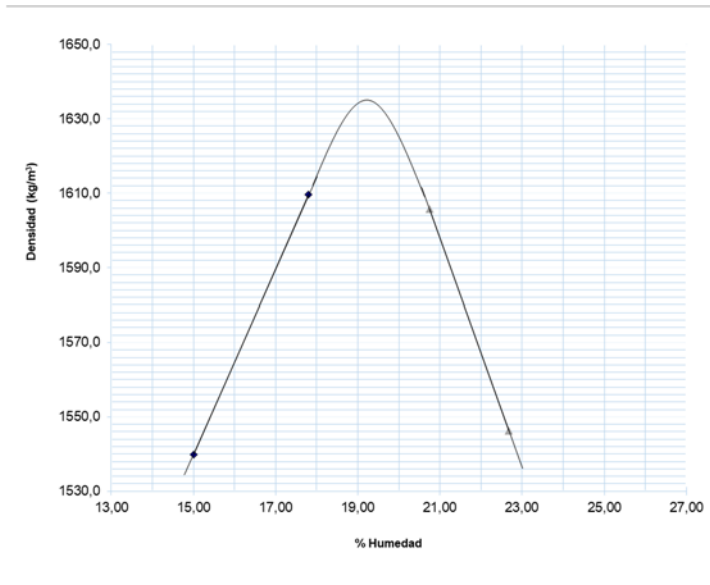




Nota. Editado a partir de Alfaro (2021).

Figura A 39

Prueba próctor estándar del suelo del LanammeUCR Sede Liberia



Nota. Editado a partir de Alfaro (2021).

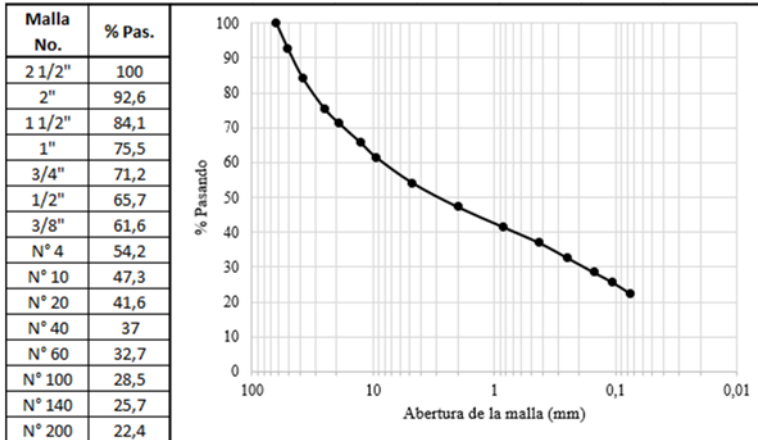
8.5.15. Paquera

La información referente a este punto fue tomada del trabajo realizado por Ávila Esquivel (2017). La granulometría de este suelo se observa en la Figura A 40. La muestra proveniente de Paquera, corresponde a un suelo tipo SM “arena limosa” según SUCS. Por el sistema de clasificación AASHTO corresponde a un suelo A-2-6(0). El gráfico de la prueba próctor estándar se puede apreciar en la Figura A 41.



Figura A 40

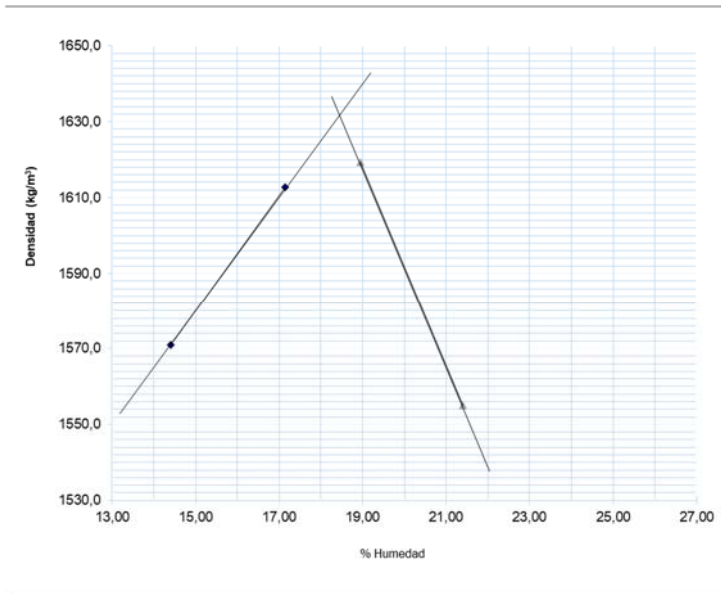
Curva granulométrica para el suelo de Paquera



Nota. Editado a partir de Ávila Esquivel (2017).

Figura A 41

Prueba próctor estándar del suelo de Paquera



Nota. Editado a partir de Ávila Esquivel (2017).



8.6. Apéndice 6: Datos y resultados para modelo de θ_s

A continuación, se muestran los datos utilizados para generar el modelo de predicción de θ_s y los resultados encontrados.

Tabla A 13

Datos utilizados para el modelo de predicción de la θ_s

Suelo	θ_s	LL	IP	#4	#200	Cu	Cc	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	wIP	γ_d máx. (kg/m ³)
Liberia	0,516	0	0	1	0,299	98	1,42	0,006	0,076	0,63	0	1480
Palmar sur	0,804	49	19	0,689	0,086	28	1,88	0,11	0,805	3,125	1,585	1562
Tempisque	0,416	19	6	0,582	0,224	97	0,33	0,056	0,317	5,404	1,232	2083
Jacó	0,578	36	7	0,943	0,32	42	3,3	0,006	0,067	0,238	2,24	1910
Paquera	0,697	39	12	0,542	0,224	153	0,07	0,001	0,002	0,031	2,688	1630
Sardinal	0,984	70	19	1	0,734	63	6,96	0,001	0,021	0,063	13,946	1143
Liberia UCR	0,646	36	10	1	0,665	34	0,73	0,001	0,004	0,027	6,65	1499
Orotina	0,622	83	38	1	0,966	4	0,61	0,001	0,001	0,002	36,708	1384
Zarcero	0,708	84	10	1	0,549	8	1,66	0,013	0,047	0,102	5,216	891
Guácimo	0,511	54	11	1	0,741	45	0,13	0,001	0,002	0,031	8,151	1308
San Pedro	0,813	56	16	1	0,94	18	0,12	0,001	0,001	0,012	15,04	1056
Liberia Centro	0,698	61	26	1	0,781	11	0,19	0,001	0,001	0,007	19,916	1142
Hone creek	0,478	51	24	1	0,334	150,00	16,67	0,001	0,05	0,15	4,464	1660
Lorena	0,842	60	23	1	0,499	200,00	0,08	0,001	0,004	0,2	5,842	1510
Guapote	0,615	41	11	1	0,787	33,33	3,00	0,0015	0,015	0,05	2,442	1570
Río Claro	0,549	36	11	1	0,458	250,00	0,90	0,001	0,015	0,25	2,31	1528
Villa Colón	0,744	98	33	1	0,889	4,00	0,25	0,001	0,001	0,004	13,299	1085
Barrigones	0,729	65	30	1	0,942	4,00	0,25	0,001	0,001	0,004	10,95	1185
San Cayetano	0,516	85	33	1	0,904	4,00	0,25	0,001	0,001	0,004	14,718	1190
Bijagual	0,66	79	28	1	0,904	6,00	0,17	0,001	0,001	0,006	11,032	1245
San Rafael	0,565	85	32	1	0,895	4,00	0,25	0,001	0,001	0,004	13,088	1232
Cinchona	0,673	72	11	1	0,532	5,00	1,25	0,02	0,05	0,1	7,15	850
Los Chiles	0,519	73	32	1	0,874	1,00	1,00	0,001	0,001	0,001	11,68	1272
Cruce Atenas	0,594	58	27	1	0,82	7,00	0,14	0,001	0,001	0,007	7,317	1534



Figura A 42

Salida del programa Stata con los resultados del modelo de regresión lineal múltiple

```
regress s LL E F D10mm D30mm D60mm wIP dmxkgm3 LL2 E2 F2 Cu2 Cc2 D102 D302 D602 wIP2 dmxkgm32
```

Source	SS	df	MS			
Model	.395102614	18	.021950145	Number of obs =	24	
Residual	.011060011	5	.002212002	F(18, 5) =	9.92	
Total	.406162625	23	.017659245	Prob > F =	0.0093	
				R-squared =	0.9728	
				Adj R-squared =	0.8747	
				Root MSE =	.04703	

s	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
LL	.1088704	.01552	7.01	0.001	.0689749	.1487659
E	-362.7516	57.69561	-6.29	0.001	-511.0629	-214.4404
F	-38.01188	6.968332	-5.45	0.003	-55.92455	-20.09922
D10mm	-959.7572	142.474	-6.74	0.001	-1325.998	-593.5162
D30mm	104.1275	17.78454	5.85	0.002	58.41092	149.8442
D60mm	-8.341501	2.030055	-4.11	0.009	-13.55992	-3.12308
wIP	-.0775657	.01991	-3.90	0.011	-.128746	-.0263855
dmxkgm3	-.0191582	.0023113	-8.29	0.000	-.0250997	-.0132168
LL2	-.0007068	.0001007	-7.02	0.001	-.0009657	-.0004479
E2	246.3755	39.3641	6.26	0.002	145.1869	347.5642
F2	21.48322	4.014687	5.35	0.003	11.16314	31.8033
Cu2	-.0000414	6.05e-06	-6.84	0.001	-.0000569	-.0000258
Cc2	-.0315249	.0052472	-6.01	0.002	-.0450131	-.0180366
D102	25901.25	3916.368	6.61	0.001	15833.9	35968.59
D302	-420.0424	64.72827	-6.49	0.001	-586.4317	-253.6531
D602	.9177023	.2745389	3.34	0.020	.2119776	1.623427
wIP2	.0016517	.0004362	3.79	0.013	.0005305	.0027729
dmxkgm32	6.85e-06	8.58e-07	7.98	0.000	4.64e-06	9.06e-06
_cons	144.375	22.08864	6.54	0.001	87.59437	201.1557

Nota: E y F son los porcentajes pasando la malla #4 y #200 respectivamente, dmxkgm3 es la densidad seca máxima.



9. ANEXOS

9.1. Anexo 1: Procedimiento de ensayo de módulo resiliente (Ávila, 2017)

El protocolo para la determinación del módulo resiliente de cada uno de los suelos es el propuesto por Ávila (2017). Dicho procedimiento parte de las modificaciones propuestas de Cary (2008) a la prueba estándar NCHRP 1-28A del Programa de Investigación de la Cooperativa Nacional de Carreteras de Estados Unidos (NCHRP, por sus siglas en inglés).

Previo al protocolo se deben realizar una serie de ensayos como el ASTM D422, ASTM D4318, ASTM D845, ASTM D698, ASTM C1699 y ASTM D1883 para la determinación de propiedades físicas como la granulometría, los límites de Attenberg, gravedad específica, humedad óptima, curva SWCC y CBR respectivamente. Luego, el ensayo propuesto por Ávila (2017) propone los siguientes pasos:

A. Preparación y moldeo del material

1. Se seca el material al aire y se tamiza por la malla #4 (4,76 mm), se almacena en recipientes que impidan que gane humedad.
2. Se toma una muestra de 250 g de material y se le realiza una prueba de humedad de acuerdo con la norma ASTM D 2216. Se obtiene el contenido de humedad actual del material.
3. Se deben preparar muestras de 1500 g de suelo para cada espécimen con base en la humedad que el material ya posee, se debe calcular la cantidad de agua a añadir al material para alcanzar la humedad óptima obtenida del ensayo de próctor estándar (ASTM D698).
4. Cada muestra preparada con la humedad óptima debe ser colocada en una bolsa plástica y dejada reposar por 24 horas.
5. Para realizar cada espécimen de 70 mm de diámetro y 140 mm de alto, se utiliza una bolsa de 1500 g de suelo previamente preparado, un molde de acero con collarín, una membrana de látex, un papel filtro de 70 mm de diámetro, un martillo de próctor estándar, una espátula, una bandeja metálica, una cuchara de pulpero, un recipiente metálico para tomar una muestra de humedad, una balanza, un enrasador, bolsas plásticas con cierre hermético y un horno.



- i. Se extiende la bolsa de suelo en la bandeja metálica y se separa en tres partes iguales.
 - ii. Se prepara el molde de acero colocándole un papel filtro al fondo para evitar que el suelo se pegue y se le coloca la membrana de látex.
 - iii. Se coloca la primera capa de suelo en el molde (1/3 del suelo en la bandeja) con la cuchara de pulpero y se le aplican 25 golpes con el mazo de próctor estándar. Se repite el procedimiento con dos capas más, hasta completar 3 capas de suelo con 25 golpes cada una.
 - iv. Se retira el collarín y se enrasa el espécimen procurando dejar la cara lo más plana posible. Se extrae la pastilla y se le retira la membrana de látex. Seguidamente se pesa la pastilla y se envuelve en una bolsa plástica con cierre hermético. El espécimen es colocado en una cámara a temperatura y humedad controlada por un periodo no menor a 24 horas.
 - v. Se pesa la cápsula metálica que se va a utilizar para determinar el contenido de humedad. Del material sobrante se obtiene una muestra y se coloca en la cápsula metálica para la muestra de humedad, se pesa.
 - vi. Se coloca la cápsula metálica en el horno por 24 horas a 110° C. Pasado ese tiempo de saca del horno y se deja enfriar para finalmente determinar el peso seco del suelo y calcular el contenido de agua del espécimen (ASTM D 2216).
6. Si el material a utilizar clasifica como de grano grueso (bases y subbases), se deberán modificar las dimensiones de los especímenes (100 mm de diámetro y 200 mm de alto), así como la cantidad, tamizaje y método de compactación del material (próctor modificado ASTM D 1557).
- B. Acondicionamiento de las pastillas a la humedad meta
1. Definir los contenidos de humedad a utilizar en los ensayos de Mr a partir de la curva SWCC y de la humedad óptima de la prueba próctor estándar.
 2. Se retira el espécimen de la cámara de humedad y temperatura controlada.
 3. Se le coloca una membrana de látex y se reporta el peso de la pastilla. Se dobla la membrana de ambos extremos hasta que las caras planas de la pastilla queden al descubierto.
 4. Para muestras del lado seco de la curva próctor estándar:



- i. Se coloca el espécimen sobre una superficie metálica al aire libre y se toma el peso de la misma cada cierto tiempo hasta que haya perdido la cantidad de agua que se desea, para alcanzar un contenido de humedad establecido.
5. Para muestras del lado húmedo de la curva próctor estándar:
 - i. Se coloca una cama de material poroso en una tina o palangana y se inunda hasta que el agua quede al mismo nivel que la cama. Se coloca la pastilla encima del material poroso. Se reporta el peso de la pastilla cada cierto tiempo, hasta que haya ganado la cantidad de agua que se desea, para alcanzar un contenido de humedad establecido.
 - ii. Se recomienda dar vuelta a la pastilla frecuentemente para que el agua que ingresa por capilaridad lo haga por ambos extremos.
6. Se coloca la pastilla ya acondicionada nuevamente en la bolsa plástica con cierre hermético y se introduce en la cámara de humedad y temperatura controlada por un período no menor a 24 horas.

C. Determinación de esfuerzos

1. Se determina el esfuerzo de confinamiento y el esfuerzo desviador a partir de la Tabla A14 propuesta por Cary (2008).

Tabla A 14

Presiones y esfuerzos para el ensayo modificado de módulo resiliente en suelos no saturados de grano fino

Secuencia	Presión de confinamiento (kPa)	Esfuerzo de contacto (kPa)	Esfuerzo cíclico (kPa)	Esfuerzo desviador (kPa)	Número de repeticiones
0	27,6 + u_a	5,5	48,3	53,8	1000
1	55,2 + u_a	11,0	27,6	38,6	100
2	41,4 + u_a	8,3	27,6	35,9	100
3	27,6 + u_a	5,5	27,6	33,1	100
4	13,8 + u_a	2,8	27,6	30,4	100
5	55,2 + u_a	11,0	48,3	59,3	100
6	41,4 + u_a	8,3	48,3	56,6	100
7	27,6 + u_a	5,5	48,3	53,8	100
8	13,8 + u_a	2,8	48,3	51,1	100
9	55,2 + u_a	11,0	69,0	80,0	100
10	41,4 + u_a	8,3	69,0	77,3	100
11	27,6 + u_a	5,5	69,0	74,5	100
12	13,8 + u_a	2,8	69,0	71,8	100
13	55,2 + u_a	11,0	96,6	107,6	100
14	41,4 + u_a	8,3	96,6	104,9	100
15	27,6 + u_a	5,5	96,6	102,1	100
16	13,8 + u_a	2,8	96,6	99,4	100



Nota. Adaptado a partir de Cary (en Ávila, 2017)

Donde u_a corresponde a la succión matricial para la humedad del espécimen según su curva SWCC.

D. Implementación del ensayo en el equipo *Triaxial Dinámico de GCTS*

1. Saturación del disco de cerámica de alto valor de entrada de aire (AVEA)

- i. Colocar el pedestal inferior con el disco de cerámica dentro de la cámara triaxial.
- ii. Ensamblar la cámara y llenarla con agua hasta quedar 5 cm por encima de la superficie del disco de cerámica.
- iii. Abrir la válvula de presión de poro de agua, con el fin de permitir el paso del agua a través del disco de cerámica.
- iv. Cerrar las demás válvulas y aplicar presión de cámara utilizando la válvula que se encuentra en la parte superior de la cámara. Se pueden aplicar unos 100 kPa. Dejar el sistema de esta manera por 24 horas.
- v. Una vez que salga agua a través de la válvula de presión de poro de agua, se podrá asegurar que el disco está saturado.
- vi. Reducir lentamente la presión y drenar el agua.
- vii. Limpiar el exceso de agua y la cámara triaxial.

2. Actividades previas

- i. Encender la bomba al menos una hora antes de iniciar el ensayo, dado que para que funcione adecuadamente debe calentarse el aceite hidráulico.
- ii. Si el ensayo se va a realizar con agua como medio confinante, es recomendable engrasar la cámara triaxial para evitar la formación de burbujas de aire.
- iii. Colocar grasa (vaselina) en los empaques de la cámara triaxial para evitar fugas de aire o agua.
- iv. La tapa de la cámara triaxial (anillo de acero) cuenta con 4 tornillos, es necesario socarlos en diagonal. Se recomienda el uso de un torquímetro para asegurar que cada tornillo quede ajustado con la misma presión.
- v. Si se va a realizar el ensayo en un suelo blando se recomienda el uso del LVDT que se encuentra instalado en el marco de carga (controla el movimiento del pistón), para



medir las deformaciones, dado que los LVDT's pequeños no cuentan con tanto rango de deformación como el que puede sufrir un suelo blando.

3. Ensayo

- i. Retirar la pastilla a utilizar de la cámara a humedad y temperatura controlada. Tomar el peso de la misma, corregir la succión a utilizar si es necesario.
- ii. Colocar doble membrana a la pastilla.
- iii. Montar la pastilla dentro de la cámara triaxial, colocarla en los pedestales y sujetarla utilizando o-rings.
- iv. Colocar el pistón y acomodarlo para que quede correctamente alineado.
- v. Cerrar adecuadamente la cámara triaxial ajustando los tornillos, asegurarse que no queden fugas de aire o agua.
- vi. Ajustar el pistón acercándolo el marco de carga a 2 mm del balín metálico, terminar de acercarlo aplicando un esfuerzo desviador de 5 kPa.
- vii. Si se utilizan los LVDT's pequeños, montarlos adecuadamente en el pedestal y ajustarlos.
- viii. Para ajustar las presiones se recomienda tener todas las válvulas que llegan a la cámara cerradas, ajustar las perillas en el controlador de presiones a *Servo Pressure*, con lo cual el software aplicará un esfuerzo de confinamiento, de presión de poro de agua y de aire, relativamente alto. Ir al software y reducir los esfuerzos aplicados por el software a cero. Abrir las válvulas de presión de confinamiento, presión de poro de aire y la de drenaje. Asegurarse que la presión de poro de agua se mantenga en cero.
- ix. Aplicar un esfuerzo de confinamiento inicial utilizando el valor que se empleará para la secuencia de acondicionamiento (los primeros 1000 ciclos).
- x. Aplicar la presión de poro de aire a la que se va a realizar el ensayo (succión matricial). Dejar la pastilla estabilizarse, estará lista (en equilibrio) para realizar el ensayo cuando no salga agua por la válvula de drenaje.
- xi. Poner en cero la lectura de la deformación.
- xii. Correr el ensayo utilizando el proyecto definido en el paso anterior.
- xiii. Es importante monitorear el valor de la tasa de desplazamiento vertical (R_v) ya que no debe superar el valor máximo permitido por la norma de 1.1. Si este requisito no se cumple se debe detener el ensayo y alinear adecuadamente la pastilla.



- xiv. Al finalizar el ensayo, reduzca la presión de poro de aire a cero y luego la presión de cámara (confinamiento). Abra las válvulas de drenaje para que se termine de eliminar la presión.
- xv. Eleve el pistón hasta que ya no esté en contacto con el espécimen.
- xvi. Retire el espécimen de la cámara, quite las membranas y tome una muestra de humedad.
- xvii. Exporte los datos (resultados) en formato que pueda ser leído por Microsoft Excel u otra hoja de cálculo.

A modo de ejemplo, se toma el caso del suelo de Hone Creek. Las propiedades físicas de este suelo se toman de la Tabla 10, siendo estas las siguientes:

- Gravedad específica: 2,702
- Humedad óptima: 18,6 %
- Densidad máxima seca: 1660 kg/m³
- Límite líquido: 51
- Límite plástico: 27
- Índice de plasticidad: 24

Se inicia por moldear el espécimen de acuerdo a la secuencia establecida en la parte A del procedimiento anterior. De este modo, al final se obtiene una muestra como la que se observa en la Figura A 43.

Figura A 43

Muestra de suelo moldeada dentro de bolsa hermética para el ensayo de módulo resiliente



Nota. Adaptado a partir de Ávila (2017).



Posteriormente se acondicionan las pastillas de acuerdo a la humedad de interés. Para este caso, se parte de la Tabla 23 para determinar la humedad de interés. Para el suelo de Hone Creek, la humedad óptima es de 16,7% por lo que para una humedad de 20% se debe utilizar el método para suelos del lado húmedo de la parte B del procedimiento de módulo resiliente. La configuración del sistema de humedecimiento se puede apreciar en la Figura A 44.

Figura A 44

Montaje de especímenes para acondicionamiento más húmedo que el óptimo



Nota. Adaptado a partir de Ávila (2017).

Para el cálculo de esfuerzos, se parte de la Tabla A 14. Para la secuencia 1, se tiene:

$$\sigma_d = 38,6 \text{ kPa} \qquad \sigma_{\text{confinamiento}} = 55,2 + \psi$$

De la Tabla 23 se tiene que $\psi = 46 \text{ kPa}$ por lo que se tiene:

$$\sigma_{\text{confinamiento}} = 55,2 + 46 = 101 \text{ kPa}$$

Otros esfuerzos se pueden calcular de la siguiente manera:

$$\theta_{\text{neto}} = 3\psi + \sigma_d \qquad \theta_{\text{neto}} = 3 \cdot 55,2 + 38,6 = 204 \text{ kPa}$$

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2(\sigma_d^2)}}{3} \qquad \tau_{\text{oct}} = \frac{\sqrt{2(38,6^2)}}{3} = 18,4 \text{ kPa}$$

Posteriormente se sigue el procedimiento del punto D del ensayo para la determinación del módulo resiliente, y el programa de computación determina el módulo para cada secuencia, así como la deformación del espécimen.