

Jordan Florencio Reyes Cruz

Desarrollo de un modelo del módulo de resiliencia en suelos no saturados bajo
variaciones climáticas utilizando el índice de Thornthwaite.

2026



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Desarrollo de un modelo del módulo de resiliencia en
suelos no saturados bajo variaciones climáticas utilizando
el índice de Thornthwaite.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el
Grado de

Maestro en Ciencias (Geotecnia)

Presenta

Ing. Jordan Florencio Reyes Cruz

Dirigido por:

M.I. Roberto Israel Hernández Domínguez

Querétaro, Qro. a: Febrero 2026

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Geotecnia)

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Geotecnia)

Presenta

Ing. Jordan Florencio Reyes Cruz

Dirigido por:

M.I. Roberto Israel Hernández Domínguez

M.I. Roberto Israel Hernández Domínguez
Presidente

Dr. Eduardo Rojas Gonzales
Secretario

Dra. Elda Montes Zarazúa
Vocal

Dra. Natalia Pérez García
Vocal

Dr. Hiram Arroyo Chávez
Vocal

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (Febrero 2026) México

Dedicatoria

A mis padres, con el amor que desborda la palabra y la vida.

Gracias por el don de su apoyo incondicional, por ser el faro en cada decisión y por la invaluable enseñanza de que la fortaleza verdadera nace del amor y la constancia.

A mi padre, por su carácter firme y su inmenso ejemplo. Él me enseñó a mantenerme recto y perseverante, incluso cuando el camino se torna incierto. Su amor es la raíz firme donde anida el valor.

A mi madre, por sus bendiciones que son armadura, por su fe inquebrantable que me ha protegido siempre, y por la ternura que viste de sentido a mi existencia. Su regazo es el puerto donde el alma encuentra la calma.

A mis hermanos, Daniela, Gaby y César: su apoyo inquebrantable en los momentos difíciles, sus palabras de aliento y la certeza de que la familia es el único lugar al que uno puede volver sin importar la distancia o el tiempo. Los lazos que nos unen son el nudo que ni el tiempo ni la lejanía logran desatar.

A mi sobrino Gamaliel, que con su mirada inocente y aquella vez que, con honestidad pura, me dijo que me admiraba, me concedió un impulso que jamás olvidaré. Su gesto sincero se convirtió en una poderosa razón más para esforzarme y ser mejor cada día.

Y a mi sobrina Dafne, la luz más pequeña de la casa, que con su alegría y dulzura ilumina cada rincón y siembra esperanza en todos los que la rodean. En su alma anida la pureza que restaura el mundo.

A mis amigos a mi segunda familia Fernando, Andrea y Gil, por las pláticas sinceras, las risas desbordadas, las noches interminables y por haber estado ahí cuando más necesité un sostén. Su compañía fue un verdadero abrigo, amistad y consuelo.

A mis amigos Marcos y Jimena, por las noches de estudio, los desvelos compartidos y todos esos momentos que se quedarán grabados a fuego en mi memoria. Gracias por demostrar que la amistad verdadera también se construye entre libros, café y sueños compartidos.

Y a ti, Erika, por caminar a mi lado en este viaje.

Por tu amor inquebrantable, tu paciencia infinita y esa sublime forma de dar calma cuando todo parecía incierto.

Gracias por recordarme, con un simple abrazo, que mientras estés conmigo, todo está bien.

A todos los que me acompañaron en este trayecto, que creyeron en mí y formaron parte de este sueño, gracias por ser un hermoso capítulo de mi historia.

Agradecimiento

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma de Querétaro, en especial a la Facultad de Ingeniería y al Posgrado, por brindarme la oportunidad de formarme profesional y académicamente en la Maestría en Ciencias con Línea Terminal en Geotecnia.

Agradezco profundamente a todos los profesores que me impartieron clases durante este periodo, por compartir sus conocimientos, experiencias y consejos, los cuales fueron fundamentales para mi desarrollo académico y personal.

Mi reconocimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico otorgado a través de la beca de estudios, sin el cual este trabajo de investigación no habría sido posible.

Extiendo mi gratitud al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro por facilitar el espacio y los recursos necesarios para el desarrollo de las actividades experimentales, así como a la Dra. Natalia del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) por su valioso apoyo y la provisión de datos esenciales para la realización de esta investigación.

A mi asesor, el M.I. Roberto Israel Hernández Domínguez, le agradezco su constante guía, disposición, apoyo académico y sus observaciones que contribuyeron de manera significativa al desarrollo y consolidación de este trabajo.

De igual forma, agradezco a mis sinodales, la Dra. Elda Montes Zarazúa y el Dr. Hiram Arroyo Chávez, por su participación, aportaciones y dedicación tanto en la revisión de este trabajo como en las clases que impartieron a lo largo del posgrado.

Finalmente, mi reconocimiento al Dr. Eduardo Rojas González, coordinador del Posgrado, por su apoyo y orientación durante todo el proceso académico.

Índice

1.	RESUMEN.....	1
2.	ABSTRACT	2
3.	INTRODUCCIÓN.	3
3.1.	JUSTIFICACIÓN.....	3
3.1.1.	MÓDULO DE RESILIENCIA: UNA HERRAMIENTA FUNDAMENTAL PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS.	4
3.1.2.	EL CAMBIO CLIMÁTICO COMO FACTOR DE RIESGO EN LA INFRAESTRUCTURA VIAL.	4
3.1.3.	LA INFLUENCIA DE LA SUCCIÓN EN EL MÓDULO DE RESILIENCIA.	6
3.1.4.	LA IMPORTANCIA ECONÓMICA EN LA INFRAESTRUCTURA VIAL. ...	6
4.	ANTECEDENTES.	7
4.1	DEFINICIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA.....	8
4.2	GUÍAS AASHTO.....	10
4.2.1.	GUÍA AASHTO 1961.	10
4.2.2.	GUÍA AASHTO 1972.	10
4.2.3.	GUÍA AASHTO 1986.	11
4.2.4.	GUÍA AASHTO 1993.	12
4.2.5.	GUÍA AASHTO 2002.	12
4.2.6.	GUÍA AASHTO 2008.	16
4.3	MÓDULO DE RESILIENCIA EN SUELOS NO SATURADOS.....	17
4.4	ELEMENTOS QUE INFLUYEN EN LA HUMEDAD DEL SUELO EN ÁREAS CUBIERTAS.....	21
4.5	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	23
4.6	MODELOS PARA PREDECIR LA VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA.	23
4.7	LA INFLUENCIA DE LAS VARIACIONES CLIMÁTICAS EN EL PAVIMENTO.	26
4.8	IMPORTANCIA DEL MODELO SIGMOIDAL.	26
4.9	IMT-PAVE.....	27
5.	HIPÓTESIS.....	30
6.	OBJETIVOS	30
6.1.	OBJETIVO GENERAL.....	30
6.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
7.	METODOLOGÍA.	30

7.1.	ÍNDICE DE THORNTHWAITE	31
7.1.1.	LATITUD Y LONGITUD.....	34
7.1.2.	CÁLCULO DEL EXCESO (EXC) Y DEL DÉFICIT (DEF).....	36
7.1.3.	CÁLCULO DEL ÍNDICE DE THORNTHWAITE (IT) EN RELACIÓN CON EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO.....	37
7.2.	RELACIÓN CON RESPECTO AL CONTENIDO DE AGUA OPTIMO.....	38
7.3.	DETERMINAR LA RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE AGUA (W%)Y EL ÍNDICE DE THORNTHWAITE (IT).	38
7.4.	CÁLCULO DE LA DIFERENCIA EN EL CONTENIDO DE AGUA ANTES Y DESPUÉS DE SER COMPACTADOS.	38
7.5.	CALCULAR EL PORCENTAJE RESPECTO AL CONTENIDO OPTIMO.	39
7.6.	ESTABLECIMIENTO DEL IT Y AJUSTE DE PARÁMETROS.	39
7.7.	SUCCIÓN Y HUMEDAD DEL SUELO.....	40
7.8.	DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO DE HUMEDAD EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS.	41
7.9.	ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES QUE PERMITEN EL ALMACENAMIENTO DE LA HUMEDAD EN ÁREAS PROTEGIDAS DE LA LLUVIA DIRECTA Y LA EVAPORACIÓN.....	43
7.10.	ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA MATERIALES COMPACTADOS.....	44
7.11.	CURVA CARACTERÍSTICA DEL SUELO (SWCC).....	45
7.12.	RELACIÓN ENTRE EL GRADO DE SATURACIÓN EN FUNCIÓN DE LA SUCCIÓN.....	48
7.13.	INTERPRETACIÓN MATEMÁTICA DE LA ECUACIÓN.....	52
7.14.	SUCCIÓN.	55
7.15.	CONSTRUCCIÓN DE UNA REPRESENTACIÓN FUNCIONAL QUE RELACIONE EL ÍNDICE DE HUMEDAD CON LAS CARACTERÍSTICAS DE SUELOS NO SATURADOS.	57
7.16.	CÁLCULO DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO (θ) EN FUNCIÓN DE F(IT).....	59
7.18.	INTERPRETACIÓN MATEMÁTICA DE LA ECUACIÓN.....	62
7.19.	OBTENCIÓN DEL GRADO DE SATURACIÓN (SR)AL MÓDULO DE RESILIENCIA (MR)	65
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	68
8.1.	PROPIEDADES ÍNDICE	68
8.2.	TRAYECTORIAS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO	69
8.3.	EL ÍNDICE DE THORNTHWAITE (IT) EN RELACIÓN CON EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO.	70

8.3.1. EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA DURANTE EL PROCESO DE COMPACTACIÓN	77
8.3.2. CÁLCULO DEL PORCENTAJE RESPECTO AL CONTENIDO OPTIMO.	78
8.3.3. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE THORNTHWAITE (IT) Y AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO.	80
8.3.4. VALOR DEL ÍNDICE DE THORNTHWAITE (IT) RESPECTO A SU CONTENIDO DE HUMEDAD CORREGIDO.	82
8.4. CONTENIDO VOLUMÉTRICO DEL AGUA (Θ).....	85
8.4.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA ENCONTRAR LAS VARIABLES K E ITO.....	89
8.4.2. FACTOR DE FORMA DE LA ECUACIÓN DE LA DRA. ZAPATA.	95
8.5. SUCCIÓN (ψ).....	101
8.6. GRADO DE SATURACIÓN (SR).	104
8.6.1. COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO DE VAN GENUCHTEN Y EL MODELO PROPUESTO PARA LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS, (SR VS Ψ).....	109
8.7. VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE THORNTHWAITE (IT) BAJO DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	112
8.8. MODELOS DE MÓDULO DE RESILIENCIA (MR) PARA SUELOS PUROS Y COMBINADOS: CH, ML Y SM.....	118
8.8.1. VALIDACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA.	124
8.9. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE MÓDULO DE RESILIENCIA PARA LA PISTA DE PRUEBAS DEL IMT.	128
8.9.1. ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE THORNTHWAITE, EN LA PISTA PRUEBAS DEL IMT.....	129
8.10. VARIACIÓN DEL MÓDULO DE RESILIENCIA (MR) EN FUNCIÓN DEL ÍNDICE DE THORNTHWAITE (IT): ANÁLISIS DE TENDENCIAS PARA EL PERIODO 2014-2024.	141
8.10.1. ANÁLISIS PARA EL SUELO: ARCILLA ALTAMENTE PLÁSTICO (CH).	142
8.10.2. ANÁLISIS PARA EL SUELO: LIMO DE BAJA COMPRESIBILIDAD (ML).....	147
8.10.3. ANÁLISIS PARA EL SUELO: ARENA LIMOSA (SM).	152
8.11. RELACIÓN DE LAS CAPAS DEL PAVIMENTO.....	157
8.11.1. MODELADO DEL AMBIENTE (ENTRADA CLIMÁTICA, PASO 1 Y 2)	158
8.11.2. MODELO DE PROPIEDADES HIDRÁULICAS (PASO 3)	160
8.11.3. MODELO DE ESFUERZOS (PASO 4).....	161

8.11.4. MODELO TÉRMICO DE SUELO (PASO 5)	163
8.11.5. MODELOS CONSTITUTIVOS DE MR (PASO 6)	165
8.13.1. POST-PROCESAMIENTO (PASO 7)	169
8.15. CÁLCULO MECÁNICO (MR), DE LA REGRESIÓN EMPÍRICA A LOS MODELOS EMPÍRICOS-MECANICISTAS.	172
8.15.1. FUNDAMENTO DE LA TRANSICIÓN (A→B).	173
8.15.2. CASO 1: SUELOS COHESIVOS/ FINOS (ARCILLA Y LIMO).	173
8.15.3. PARA EL CASO DE LOS SUELOS GRANULARES (BASE Y SUBBASE A).....	174
8. CONCLUSIONES.	177
9. BIBLIOGRAFÍA.....	181
ANEXO I: CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES ANTES Y DESPUÉS DE SER ENSAYADOS Y MÓDULOS DE RESILIENCIA DE CADA SUELO.	191
ANEXO II: DATOS METEOROLÓGICOS DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL (SMN), 2014 – 2024.	198
ANEXO III: METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE THORNTHWAITE. 213	
ANEXO IV: DATOS DEL CONSEJO NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA) PRECIPITACIÓN ANUAL (MM) Y TEMPERATURA MEDIA (°C) POR ESTACIÓN.....	235
ANEXO V: ELECCIÓN DE ESTACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE THORNTHWAITE.....	237
ANEXO VI: CODIGOS REALIZADOS EN MATLAB.	241

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Cantidad de eventos registrados entre 1970 y 2013.....	5
Tabla 3.2 Inversión realizada para riesgos de desastres naturales en carreteras, Fuente: (FONDEM, 2018)	7
Tabla 4.1 Factores que influyen en el comportamiento resiliente en suelos cohesivos y no cohesivos.	9
Tabla 4.2 Valores de R según la guía AASHTO, 1972	11
Tabla 4.3 Cálculo del módulo de resiliencia efectivo a partir de valores estacionales ...	11
Tabla 4.4 Modelos relacionando propiedades índices y de resistencia al MR de un material. (NCHRP, 2002).....	15
Tabla 4.5 Origen del suelo extraído.	25
Tabla 4.6 Variables climáticas en el pavimento.....	26

Tabla 4.7 Valores típicos del módulo de resiliencia, Mr, para suelos clasificados con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, S.U.C.S.....	29
Tabla 7.1 Clasificación del Índice de Thornthwaite (1948).....	32
Tabla 7.2 Número máximo de horas del sol, Fuente: Instituto Nacional de Vías (2018)	35
Tabla 7.3 Clasificación para este proyecto.	38
Tabla 7.4 Rango aproximado para el contenido de humedad en equilibrio.....	44
Tabla 8.1 Propiedades índice de los suelos a analizar	68
Tabla 8.2 Características de compactación	69
Tabla 8.3. Índice de humedad, Suelo CH	73
Tabla 8.4 Índice de humedad, Suelo ML	73
Tabla 8.5 Índice de humedad, Suelo SM.	74
Tabla 8.6 Resultados para el valor %Con respecto al optimo (CO), Suelo CH.....	78
Tabla 8.7 Resultados para el valor %Con respecto al optimo (CO), Suelo ML	79
Tabla 8.8 Resultados para el valor %Con respecto al optimo (CO), Suelo SM	79
Tabla 8.9 Establecimiento del IT y ajuste de parámetros, Suelo CH.....	80
Tabla 8.10 Establecimiento del IT y ajuste de parámetros, Suelo ML	81
Tabla 8.11 Establecimiento del IT y ajuste de parámetros, Suelo SM	81
Tabla 8.12 Valor del IT, Suelo CH	83
Tabla 8.13 Valor del IT, Suelo ML.....	83
Tabla 8.14 Valor del IT, Suelo SM.....	84
Tabla 8.15 Parámetros de k e IT0	85
Tabla 8.16 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo CH.....	86
Tabla 8.17 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo ML.	86
Tabla 8.18 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo SM.	87
Tabla 8.19 Contenido volumétrico θ R2.....	88
Tabla 8.20 Parámetros para la succión.....	101
Tabla 8.21 ψ Teórico Vs ψ Experimental, Suelo CH, ML y SM.	102
Tabla 8.22 Succión (ψ), R2.....	103
Tabla 8.23 Sr Teórico Vs Sr Experimental, Suelo CH, ML y SM.....	104
Tabla 8.24 Grado de saturación Sr. R2	106
Tabla 8.25 Relación entre el IT y Wopt y γ_{dmax}	113
Tabla 8.26 Resultados de las pruebas, CH.....	114
Tabla 8.27 Resultados de las pruebas, ML.	114

Tabla 8.28 Resultados de las pruebas, SM.....	115
Tabla 8.29 Modelos del Mr para los diferentes suelos.....	118
Tabla 8.30 Análisis de variancia, Suelo CH.	119
Tabla 8.31 Análisis de variancia, Suelo ML	119
Tabla 8.32 Análisis de variancia, Suelo SM	119
Tabla 8.33 Modelo General.....	123
Tabla 8.34 Análisis de variancia	123
Tabla 8.35 Características de las estaciones analizadas.....	130
Tabla 8.36 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2014.....	131
Tabla 8.37 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2015.....	131
Tabla 8.38 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2016.....	131
Tabla 8.39 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2017.....	132
Tabla 8.40 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2018.....	132
Tabla 8.41 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2019.....	132
Tabla 8.42 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2020.....	132
Tabla 8.43 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2021.....	133
Tabla 8.44 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2022.....	133
Tabla 8.45 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2023.....	133
Tabla 8.46 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2024.....	134
Tabla 8.47 Índice de Thornthwaite 2014 -2024 por meses.....	134
Tabla 8.48 Índice de Thornthwaite 2014 -2024 por año.....	135
Tabla 8.49 Datos CONAGUA mensual 2013 – 2024 Precipitación (mm).....	136
Tabla 8.50 Datos CONAGUA Temperatura mensual (°C) ,2013 – 2024.....	137
Tabla 8.51 Precipitación CONAGUA 2013-2024.	139
Tabla 8.52 Temperatura promedio CONAGUA 2013-2024.....	139
Tabla 8.53 Temperatura mínima CONAGUA 2013-2024.....	140
Tabla 8.54 Temperatura máxima CONAGUA 2013-2024.	141
Tabla 8.55 Combinación de esfuerzos desviadores (σ_d) y confinantes (σ_3), para los suelos CH, ML y SM.	142
Tabla 8.56 Análisis del módulo de resiliencia, año 2014, suelo CH.	142
Tabla 8.57 Análisis del módulo de resiliencia, año 2015, suelo CH.	142
Tabla 8.58 Análisis del módulo de resiliencia, año 2016, suelo CH.	143
Tabla 8.59 Análisis del módulo de resiliencia, año 2017, suelo CH.	143
Tabla 8.60 Análisis del módulo de resiliencia, año 2018, suelo CH.	143

Tabla 8.61 Análisis del módulo de resiliencia, año 2019, suelo CH.	144
Tabla 8.62 Análisis del módulo de resiliencia, año 2020, suelo CH.	144
Tabla 8.63 Análisis del módulo de resiliencia, año 2021, suelo CH.	145
Tabla 8.64 Análisis del módulo de resiliencia, año 2022, suelo CH.	145
Tabla 8.65 Análisis del módulo de resiliencia, año 2023, suelo CH.	145
Tabla 8.66 Análisis del módulo de resiliencia, año 2024, suelo CH.	146
Tabla 8.67 Análisis del módulo de resiliencia, año 2014, suelo ML.	147
Tabla 8.68 Análisis del módulo de resiliencia, año 2015, suelo ML.	147
Tabla 8.69 Análisis del módulo de resiliencia, año 2016, suelo ML.	148
Tabla 8.70 Análisis del módulo de resiliencia, año 2017, suelo ML.	148
Tabla 8.71 Análisis del módulo de resiliencia, año 2018, suelo ML.	148
Tabla 8.72 Análisis del módulo de resiliencia, año 2019, suelo ML.	149
Tabla 8.73 Análisis del módulo de resiliencia, año 2020, suelo ML.	149
Tabla 8.74 Análisis del módulo de resiliencia, año 2021, suelo ML.	150
Tabla 8.75 Análisis del módulo de resiliencia, año 2022, suelo ML.	150
Tabla 8.76 Análisis del módulo de resiliencia, año 2023, suelo ML.	151
Tabla 8.77 Análisis del módulo de resiliencia, año 2024, suelo ML.	151
Tabla 8.78 Análisis del módulo de resiliencia, año 2014, suelo SM.	152
Tabla 8.79 Análisis del módulo de resiliencia, año 2015, suelo ML.	153
Tabla 8.80 Análisis del módulo de resiliencia, año 2016, suelo ML.	153
Tabla 8.81 Análisis del módulo de resiliencia, año 2017, suelo ML.	153
Tabla 8.82 Análisis del módulo de resiliencia, año 2018, suelo ML.	154
Tabla 8.83 Análisis del módulo de resiliencia, año 2019, suelo ML.	154
Tabla 8.84 Análisis del módulo de resiliencia, año 2020, suelo ML.	155
Tabla 8.85 Análisis del módulo de resiliencia, año 2021, suelo ML.	155
Tabla 8.86 Análisis del módulo de resiliencia, año 2022, suelo ML.	156
Tabla 8.87 Análisis del módulo de resiliencia, año 2023, suelo ML.	156
Tabla 8.88 Análisis del módulo de resiliencia, año 2024, suelo ML.	156
Tabla 8.89. Proceso de las variables de entrada, así como su rol dentro del modelo físico.	159
Tabla 8.90. Proceso de cada suelo, para el proceso de un método empírico a un empírico mecanicista, así como sus variables y la justificación dentro del modelo.	172
Tabla 8.91. Variables y operaciones para llegar a la forma final (Forma B) del módulo de resiliencia,	173

Índice de figuras

Figura 4.1 Definición de la deformación elástica en los cálculos de elementos finitos (Brown, 1996).	8
Figura 4.2 Método de diseño empírico-mecanicista (Pérez García et al., 2012).	13
Figura 4.3 Factores que afectan las condiciones de la humedad del suelo.	21
Figura 4.4 Factores que afectan el pavimento, Fuente: (Garnica Anguas & Hernández Domínguez, 2013).....	28
Figura 7.1 representación del balance hídrico.....	32
Figura 7.2 Representación del balance hídrico, a) Evapotranspiración, b) Precipitación	32
Figura 7.3 a) Escorrentía, b) Exceso hídrico	33
Figura 7.4 a) Latitud, b) Longitud.....	35
Figura 7.5 Metodología INVIAS	47
Figura 7.6 Diagrama de flujo para obtener el Mr.....	66
Figura 8.1. Clasificación del Índice de Thornthwaite (1948)	71
Figura 8.2, Datos calculados en para los diferentes suelos.	76
Figura 8.3 Relación entre el Contenido de agua (w%) y el Índice de Thornthwaite (IT)	77
Figura 8.4 Contenido de humedad Vs el Índice de Thornthwaite.....	85
Figura 8.5 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo CH.	87
Figura 8.6 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo ML.....	88
Figura 8.7 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo SM.	88
Figura 8.8. Comparación de los valores experimentales del contenido volumétrico de agua (θ_{Exp}) Vs valores predichos por el modelo (θ_{pred}), para los tres suelos estudiados (CH, SM y ML).....	90
Figura 8.9. Análisis de las elasticidades locales respecto a k e ITo, para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).	92
Figura 8.10. Análisis de tipo tornado respecto a k e ITo, para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).....	93
Figura 8.11. Análisis del mapa global de sensibilidad de k e ITo, para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).	94
Figura 8.12. Análisis de la curva de retención del agua, de las dos graficas adaptada a los datos experimentales, para el suelo CH.	97

Figura 8.13. Análisis de la curva de retención del agua, de las dos graficas adaptada a los datos experimentales, para el suelo ML.	98
Figura 8.14. Análisis de la curva de retención del agua, de las dos graficas adaptada a los datos experimentales, para el suelo SM.	99
Figura 8.15. Diferencias entre modelos, (a) suelo CH, (b) suelo (ML) y (c) suelo (SM).	100
Figura 8.16 R2, ψ Teórico Vs ψ Experimental, Suelo CH.	102
Figura 8.17 R2, ψ Teórico Vs ψ Experimental, Suelo ML.	103
Figura 8.18 R2, ψ Teórico Vs ψ Experimental, Suelo SM.	103
Figura 8.19 Sr Experimental Vs Sr Teórico, Suelo CH.	105
Figura 8.20 Sr Experimental Vs Sr Teórico, Suelo ML.	105
Figura 8.21 Sr Experimental Vs Sr Teórico, Suelo SM.	105
Figura 8.22. Curva característica con datos de laboratorio, datos de laboratorio.	106
Figura 8.23. Curva característica con datos de laboratorio, datos teóricos.	107
Figura 8.24. Curva características con datos de laboratorio Vs datos experimentales suelo CH.	107
Figura 8.25. Curva características con datos de laboratorio Vs datos experimentales suelo ML.	108
Figura 8.26. Curva características con datos de laboratorio Vs datos experimentales suelo SM.	108
Figura 8.27. Curvas características suelo-agua (SWCC), para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).	110
Figura 8.28 Woptm Vs IT, Suelo CH.	113
Figura 8.29 Woptm Vs IT, Suelo ML.	114
Figura 8.30 Woptm Vs IT, Suelo SM.	114
Figura 8.31 θ Vs IT, Suelo CH.	116
Figura 8.32 θ Vs IT, Suelo ML.	116
Figura 8.33 θ Vs IT, Suelo SM.	117
Figura 8.34 ψ Vs IT, Suelo CH.	117
Figura 8.35 ψ Vs IT, Suelo ML.	117
Figura 8.36 ψ Vs IT, Suelo SM.	118
Figura 8.37 Graficas de residuos para Mr, Suelo CH.	120
Figura 8.38 Graficas de residuos para Mr, Suelo ML.	121
Figura 8.39 Graficas de residuos para Mr, Suelo SM.	121

Figura 8.40 Mr Teórico Vs Mr Experimental Suelo CH	122
Figura 8.41 Mr Teórico Vs Mr Experimental Suelo ML	122
Figura 8.42 Mr Teórico Vs Mr Experimental Suelo SM	122
Figura 8.43 Graficas de residuos para el Mr	123
Figura 8.44 Mr Teórico Vs Mr Experimental	124
Figura 8.45. Datos normalizados de 0 a 1, para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).	125
Figura 8.46. IT (Índice de Thornthwaite) vs MR Experimental y Teórico, para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).	127
Figura 8.47. Normalizado con R ² , para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).	128
Figura 8.48 Índice de Thornthwaite 2014 -2024 por meses.....	135
Figura 8.49 Índice de Thornthwaite 2014 -2024 por años.	135
Figura 8.50 Precipitación acumulada mensual 2013-2024	137
Figura 8.51 Temperatura mensual (C°) ,2013 – 2024.....	138
Figura 8.52 Precipitación anual 2013 - 2024	139
Figura 8.53 Temperatura promedio anual (°C), 2013 - 2024.....	140
Figura 8.54 Temperatura mínima (°C) anual 2013 -2024.....	140
Figura 8.55 Temperatura máxima anual (°C), 2013 - 2024.	141
Figura 8.56 Comportamiento del Índice de Thornthwaite, 2014 - 2024, Suelo CH.	146
Figura 8.57 Comportamiento del Índice de Thornthwaite, 2014 - 2024, Suelo ML. ...	152
Figura 8.58 Comportamiento del Índice de Thornthwaite, 2014 - 2024, Suelo SM.	157
Figura 8.59. Estructura de las capas del pavimento de la pista de pruebas del IMT, para el análisis de su comportamiento a diferentes capas.....	158
Figura 8.60. Distribución de temperatura Vs el tiempo, por capa.	164
Figura 8.61. Índice de Thornthwaite Vs tiempo.	164
Figura 8.62. Temperatura Vs profundidad y tiempo.....	165
Figura 8.63. (a) índice de Thornthwaite Vs el módulo de resiliencia (Arcilla, CH), (b) límites de confinamiento según la SCT, para un terraplén.	166
Figura 8.64. (a)índice de Thornthwaite Vs el módulo de resiliencia (Limo, ML), (b) límites de confinamiento según la SCT, para una subrasante.	166
Figura 8.65. (a) índice de Thornthwaite Vs el módulo de resiliencia (Arena, SM), (b) límites de confinamiento según la SCT, para una base granular.	167

Figura 8.66. (a) índice de Thornthwaite Vs el módulo de resiliencia (Arena, SM), (b) límites de confinamiento según la SCT, para una sub base.	168
Figura 8.67. (a) índice de Thornthwaite Vs el módulo de resiliencia de la carpeta asfáltica, (b) límites de confinamiento según la SCT, para una carpeta asfáltica.	169
Figura 8.68. Modulo resiliente Vs Tiempo, (a) Carpeta asfáltica, (b) base granular (SM), (c) Sub base (SM), (d) Subrasante (ML), (e) Terraplén (CH).	171
Figura 8.69. Módulo de resiliencia Vs Profundidad y Tiempo.....	176

Índice de ilustraciones.

Ilustración 8.1 Ubicación de la pista de pruebas del IMT, Fuente Google Maps, (2019).	129
Ilustración 8.2 Ubicación de las estaciones analizadas en el estado de Querétaro, Fuente: Google Earth, (2025).....	130

1. Resumen.

El módulo de resiliencia (MR) es un parámetro muy importante en el diseño de pavimentos, ya que describe la capacidad de los materiales para resistir y recuperarse de cargas repetidas (Seed et al., 1962). Sin embargo, la mayoría de los modelos existentes son empíricos por consiguiente se omiten ciertas variables. Este estudio propone un modelo predictivo que integra la succión del suelo y las condiciones climáticas regionales, a través del Índice de Thornthwaite para estimar los cambios en el MR de suelos compactados.

La investigación se basa en la Guía Empírico-Mecanística para el Diseño de Pavimentos (MEPDG), la cual resalta el impacto de factores climáticos, como el contenido de humedad, en el desempeño de los pavimentos (Zapata et al., 2007; Zapata y Houston, 2008). A diferencia de modelos tradicionales, como el de Witczak y Uzan (1988), que utilizan invariantes de esfuerzos (esfuerzo bulk θ y esfuerzo octaédrico τ_{oct}), este trabajo incorpora la succión, relacionada con el contenido de humedad a través de la curva de retención de agua (SWCC).

El modelo propuesto se desarrolló a partir de datos experimentales recopilados en la literatura bajo diferentes condiciones de humedad y temperatura (rama de humedecimiento y secado). Se utilizó un enfoque basado en la ecuación de Van Genuchten, considerando el esfuerzo de confinamiento neto ($\sigma_3 - u_a$), la succión (ψ), el esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$), el índice de Thornthwaite (IT), el contenido volumétrico (θ) y el grado de saturación (S_r). La validación del modelo demostró tener una buena predicción del MR, comparados con los datos experimentales recopilados.

Este estudio contribuye a la literatura al proporcionar un modelo predictivo que integra la succión y las condiciones climáticas. Además, ofrece una herramienta práctica para el diseño de pavimentos en diferentes condiciones ambientales, mejorando la comprensión del comportamiento mecánico de los suelos no saturados. Los resultados destacan la importancia de considerar las variaciones de humedad en la evaluación del MR, lo cual es esencial para garantizar la durabilidad y eficiencia de los pavimentos.

Palabras clave: Modulo de resiliencia, empírico mecanicista, succión, índice de Thornthwaite.

2. Abstract

The resilient modulus (MR) is a crucial parameter in pavement design, as it describes the ability of materials to withstand and recover from repeated loads (Seed et al., 1962). However, most existing models are empirical, and as a result, certain variables are omitted. This study proposes a predictive model that integrates soil suction and regional climatic conditions through the Thornthwaite Index to estimate changes in the MR of compacted soils.

The research is based on the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG), which highlights the impact of climatic factors, such as moisture content, on pavement performance (Zapata et al., 2007; Zapata and Houston, 2008). Unlike traditional models, such as that of Witczak and Uzan (1988), which use stress invariants (bulk stress θ and octahedral stress τ_{oct}), this work incorporates suction, related to moisture content through the soil-water characteristic curve (SWCC).

The proposed model was developed using experimental data collected from the literature under different moisture and temperature conditions (wetting and drying paths). A Van Genuchten equation-based approach was used, considering net confining stress ($\sigma_3 - u_a$), suction (ψ), deviator stress ($\sigma_1 - \sigma_3$), the Thornthwaite Index (IT), volumetric water content (θ), and degree of saturation (S_r). Model validation demonstrated good prediction of MR compared to the collected experimental data.

This study contributes to the literature by providing a predictive model that integrates suction and climatic conditions. Additionally, it offers a practical tool for pavement design under different environmental conditions, improving the understanding of the mechanical behavior of unsaturated soils. The results emphasize the importance of considering moisture variations in MR evaluation, which is essential to ensure the durability and efficiency of pavements.

Keywords: Resilient modulus, mechanistic-empirical, suction, Thornthwaite Index.

3. Introducción.

En el contexto actual, el diseño y la construcción de infraestructuras viales demandan un conocimiento preciso del comportamiento mecánico de los suelos utilizados en la base, sub-base y subrasante de pavimentos. La variabilidad climática y la complejidad inherente a los suelos no saturados representan desafíos importantes en el pronóstico de su desempeño a lo largo del tiempo. En este sentido, el módulo de resiliencia (M_r) se ha consolidado como un parámetro clave para evaluar la capacidad de respuesta de estos materiales ante cargas cíclicas, ya que permite cuantificar la rigidez y la durabilidad de los suelos sometidos a condiciones cambiantes de humedad.

La presente tesis se enfoca en analizar el comportamiento del módulo de resiliencia en suelos no saturados a través de variaciones climáticas, incorporando el Índice de Thornthwaite como indicador fundamental de las condiciones de humedad atmosférica. La elección de este índice se justifica por su capacidad para transformar datos climáticos en una medida representativa de la disponibilidad de agua en el medio ambiente, lo que resulta crucial para comprender la dinámica de retención de agua en los poros del suelo y, por ende, su influencia en la mecánica del material.

Mediante la integración de modelos empíricos y constitutivos, y apoyándose en metodologías estadísticas avanzadas, se pretende establecer una relación clara entre los cambios en el contenido de humedad derivados de las variaciones climáticas y la respuesta mecánica del suelo. Este enfoque permite no solo identificar tendencias estacionales y anuales, sino también evaluar el impacto de condiciones extremas, como sequías y excesos de humedad, en el rendimiento del módulo de resiliencia.

El objetivo de esta investigación es contribuir al desarrollo de estrategias de diseño y mantenimiento de pavimentos que sean más resilientes y adaptativos frente a los desafíos impuestos por el cambio climático, proporcionando además una herramienta que enlace la información climática con parámetros mecánicos de los suelos. En última instancia, se busca mejorar la predicción del comportamiento de los suelos no saturados y, en consecuencia, optimizar la ingeniería de pavimentos en un entorno de creciente incertidumbre climática.

3.1. Justificación.

Estudiar cómo el clima afecta las carreteras es crucial porque influye directamente en su durabilidad, seguridad, eficiencia y costo. Adaptar las carreteras a las condiciones

climáticas locales reduce los costos de mantenimiento y mejora la seguridad vial al prevenir problemas como épocas torrenciales o las inundaciones. Además, permite usar materiales y técnicas de construcción más adecuados, optimizando recursos y mejorando la eficiencia de los proyectos viales.

3.1.1. Módulo de resiliencia: una Herramienta Fundamental para el Diseño de Pavimentos.

El módulo de resiliencia ha ganado popularidad en el diseño de estructuras de pavimento desde su introducción en la guía de diseño AASHTO en 1986. Actualmente, las investigaciones en este campo abarcan desde la evaluación de la variabilidad del módulo de resiliencia utilizando nuevos materiales (Modarres y Hamedí, 2014), hasta el estudio de las propiedades de los materiales sometidos a ciclos de humedecimiento y secado (Pérez et al., 2012). Estos esfuerzos buscan mejorar la comprensión y aplicación del módulo de resiliencia en el diseño de pavimentos.

3.1.2. El cambio Climático como Factor de Riesgo en la Infraestructura Vial.

En las últimas décadas, las condiciones climáticas a nivel mundial han variado considerablemente y esto se ha visto reflejado en diferentes áreas impactando principalmente en el ecosistema y la infraestructura en general.

La infraestructura vial se diseña habitualmente teniendo en cuenta las condiciones climáticas locales y el clima histórico. Sin embargo, con el cambio climático, los datos climáticos históricos ya no son suficientes para prever los impactos futuros de manera confiable. Dado que la mayoría de la infraestructura vial se construye para durar 50 años o más, comprender cómo los cambios climáticos futuros pueden afectarla resulta crucial para proteger estas inversiones a largo plazo (Mendoza Sánchez et al., 2017)

Dentro de los efectos asociados a las variaciones climáticas sobre la infraestructura carretera podemos asociar altas temperaturas y olas de calor; ciclones tropicales, huracanes y marejadas; incremento de tormentas y precipitación; vendavales o vientos fuertes; alta presencia de agua, inundaciones y avenidas torrenciales; sequía e incendios; bajas temperaturas y olas frías, aumento de la temperatura y del nivel del mar; aluviones y deslizamientos.

Dicha información la podemos encontrar en los datos de UNDRR and UNDRR - LA RED (2015), la cual es un sistema de adquisición de datos sobre desastres naturales, con ayuda de fuentes hemerográficas, la cual se puede resumir en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Cantidad de eventos registrados entre 1970 y 2013

No	Evento	Cantidad de eventos registrados entre 1970 y 2013
1	Inundación	8105
2	Deslizamiento	1814
3	Lluvias	3590
4	Vendaval	1373
5	Tormenta	1928

Los registros enlistados en la tabla 3.1 corresponden a las afectaciones de carreteras, las cuales se espera que ocurran con mayor frecuencia en el futuro debido a los cambios climáticos. Estas afectaciones tendrán un impacto negativo en el diseño de estructuras, ya que será cada vez más difícil adaptar los modelos actuales de construcción para hacer frente a estas condiciones climáticas cambiantes.

De acuerdo a Hosseini et al. (2024), si existe un aumento al menos en 1 grado en la temperatura del aire esto se puede reflejar en un aumento de 7 grados en la temperatura del pavimento. Si analizamos este efecto sobre el pavimento, se deduce en primera estancia en la disminución del módulo del pavimento, que a su vez acorta su vida útil y esto lo podemos ver como el aumento del IRI en un 2%, aumento de la rodera en un 31%, y un agrietamiento por fatiga en un 35%.

Otros autores como Cui y Wang (2024) han encontrado que el clima tiene un impacto significativo en el IRI y la rodera, este último fue muy susceptible al aumentar en un 40% y teniendo en cuenta la incertidumbre esto podría aumentar en un 85.6%.

Todo esto nos conlleva a una restauración y mantenimiento más frecuente lo que provoca el aumento de las emisiones en CO₂ aumentando en un 27% en SSP2 y un 56% en SSP5 debido todo esto a las constantes reparaciones de mantenimiento (Hosseini et al., 2024).

Ahora si trasladamos estos datos a la red vial en México, según estudios realizados por CAF (Corporación Andina de Fomento), se tiene que en México existen 105 mil sitios en peligros de inundación, de los cuales 200 son con mayor riesgo se encuentran a Veracruz (84), Tabasco (27), San Luis Potosí (25), Chiapas (18) y Oaxaca (14), (Climate Change Affects Road Network in Mexico, 2018).

Pero dentro de los mayores peligros son los deslaves, en las cuales se consideran prioritarias Portezuelo-Cd. Valles (93 km), Pachuca-Tuxpan (65 km), Paso del Toro-Acayucan (56 km) y Villahermosa-Escopetazo (54 km), Lo que sugiere que el 99% de las

carreteras pueden ser afectadas directamente en agrietamientos y deformaciones. (Climate Change Affects Road Network in Mexico, 2018).

3.1.3. La influencia de la Succión en el Módulo de Resiliencia.

Los suelos completamente saturados tienen todos sus poros llenos de agua, lo que resulta en un comportamiento predecible del suelo basado en la tensión efectiva. Cuando las condiciones ambientales cambian, la desaturación comienza en los poros de mayor diámetro y progresa hacia los poros más pequeños. En su estado parcialmente o no saturado, estos suelos suelen ser más resistentes que en estado saturado. Este incremento en la resistencia al esfuerzo cortante se debe a la mayor tensión de contacto generada por la presión negativa del agua en los poros. (Sharanya et al., 2019)

En muchos estudios validados para probar la respuesta del pavimento en términos de sus propiedades mecánicas se ha centrado en las probetas de suelo preparadas cerca o con un contenido de humedad óptimo (Sharanya et al., 2019).

En el análisis del drenaje de capas de pavimento saturadas, es fundamental considerar tanto la tensión aplicada como la tensión interna, en lugar de limitarse a las tensiones externas tradicionales. El módulo de resiliencia (MR) de los materiales de pavimento en estado no saturado muestra variaciones que afectan la vida útil esperada. Por ello, es necesario ampliar el principio de tensión efectiva, integrando la influencia de la succión matricial para obtener una representación más precisa del comportamiento del material (Gupta et al., 2007, Yang et al., 2005, Auckpath Sawangsuriya et al., 2009, Nazarian & Yuang, 2008).

3.1.4. La importancia Económica en la Infraestructura Vial.

La cuantificación de los costos es necesaria en cuanto a la ayuda para la adaptación y la mitigación. De acuerdo con Stern (2006) sin medidas preventivas más de un par de siglos, los costos globales y los riesgos de SCH (Cambio Climático Sin Control) serán, en la actualidad y constantemente en el futuro, equivalentes a perder al menos el 5% del PIB (Producto Interno Bruto) mundial anual. En consecuencia, para México, Galindo (1999) citado por (Mendoza Sánchez et al., 2017) estima que el costo de SCH para el año 2050, será equivalente a aproximadamente 3.2% del PIB. Sin embargo, los estudios más avanzados pronostican que, a lo largo del siglo XXI, los costos acumulados de SCH para México totalizarán alrededor del 6% del PIB, independientemente del escenario de emisiones (Mendoza Sánchez et al., 2017)

En este trabajo se realizó un análisis que comprende, el gasto federal publicados por la Dirección General para la Gestión de Riesgos sobre las aportaciones FONDEN (Fondo de Desastres Naturales), lo cual desemboca en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Inversión realizada para riesgos de desastres naturales en carreteras,
Fuente: (FONDEM, 2018)

Año	Acumulado(\$millones)	Año	Acumulado(\$millones)
1999	3,079.62	2010	29,706.58
2000	277.04	2011	11,013.13
2001	550.08	2012	8,169.99
2002	295.32	2013	40,266.72
2003	1,426.22	2014	5,550.89
2004	247.82	2015	1,806.21
2005	7,955.28	2016	1,961.94
2006	1,761.36	2017	6,263.52
2007	12,444.60	2018	14,971.56
2008	5,144.58		
2009	8,246.00	Total	161,138.46

Estos gastos muestran cómo el cambio climático afecta la economía de manera importante. Para evitar que esto siga ocurriendo en el futuro, es fundamental tomar medidas preventivas que hagan que la infraestructura de transporte sea más resistente y adaptable, en este contexto, es posible proponer modelos que se adapten a los cambios climáticos y mejoren la predicción del comportamiento de las infraestructuras viales. Es importante reconocer que, frente a algunos embates de la naturaleza, nuestras acciones pueden ser limitadas. Sin embargo, en lo que respecta a fenómenos como precipitaciones y evapotranspiraciones, podemos ajustar los módulos de resiliencia para mejorar la gestión de las vías y su capacidad para hacer frente a tales condiciones climáticas.

Por eso, es importante invertir en acciones que nos ayuden a adaptarnos al cambio climático. Podemos construir carreteras más resistentes a las inundaciones.

Así que podemos crear, un modelo de predicción del módulo de resiliencia basado en variables climáticas regionales es una herramienta para mejorar el diseño de pavimentos, adaptarse al cambio climático, optimizar recursos y avanzar en la investigación en la ingeniería de pavimentos.

4. Antecedentes.

Hablar de resiliencia es hablar de una palabra que se puede utilizar en varias áreas del conocimiento, incluida la vida cotidiana. En el campo de la ingeniería se puede definir como “Capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial

cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido” (ASALE y RAE, 2024), aun así, es muy ambigua y resulta difícil comprender todo lo que conlleva y hace cuestionarnos las siguientes preguntas, ¿Cómo se obtiene?, ¿Cómo afecta en un pavimento?, ¿Se puede predecir?, todos estos aspectos se abordaran en esta investigación.

4.1 Definición del Módulo de Resiliencia.

El módulo de resiliencia (MR), es una propiedad esencial para comprender el comportamiento del suelo, (Hveem, 1955), (Steyn et al., 2021), ya que define el comportamiento de cada material cuando se somete a cargas cíclicas.

La Figura 4.1 muestra los componentes de las deformaciones permanentes y recuperables durante un ciclo de carga único. La deformación recuperable se conoce como deformación resiliente, mientras que la no recuperable se denomina deformación permanente. La deformación resiliente se emplea para calcular el Módulo de Resiliencia (MR) de los materiales, como se indica en la Ec.4.1. (Brown, 1996)

$$\text{Modulo de Resiliencia} = \frac{\text{Tensión desviadora}}{\text{Tensión Resistente}} \quad \text{Ec. (4.1)}$$

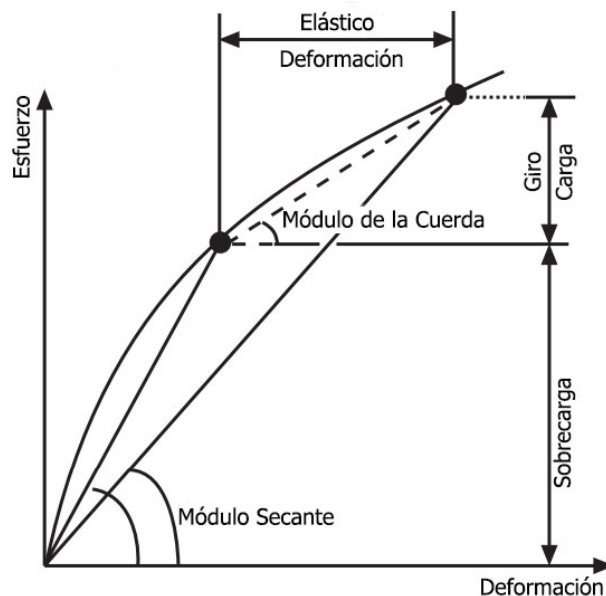


Figura 4.1 Definición de la deformación elástica en los cálculos de elementos finitos (Brown, 1996).

Investigaciones previas realizadas por Soderman et al. (1968), Thompson & Robnett (1976), Brown y Pappin (1981), Bandyopadhyay & Frantzen (1983), McVay & Taesiri (1985), Stewart (1986), Leshchinsky y Rawlings (1988) han demostrado que el comportamiento resiliente de los suelos cohesivos difiere significativamente del de los suelos no cohesivos (granulares). Sin embargo, se ha observado que este comportamiento

divergente tiende a manifestarse después de un cierto número de ciclos de carga, generalmente entre 100 y 200 ciclos (Barksdale, 1975).

En la Tabla 4.1, se resumen los principales factores que influyen en el comportamiento resiliente de ambos grupos de suelos.

Tabla 4.1 Factores que influyen en el comportamiento resiliente en suelos cohesivos y no cohesivos.

Tipo de suelo	Factor de influencia.
Suelos Cohesivos	• Esfuerzo desviador • Propiedades índices • Método de compactación • Contenido de humedad en compactación. • Densidad seca del suelo • Tixotropía • Grado de saturación • Ciclos de hielo y deshielo
Suelos no Cohesivos	• Densidad seca del suelo • Grado de saturación • Presión de confinamiento • Granulometría • Método de compactación • Esfuerzo desviador.

Las primeras investigaciones se realizaron en 1938 Francis Hveem del departamento de Carreteras de California (hoy, Caltrans), iniciando la evaluación de deflexiones transitorias en pavimentos, obteniendo correlaciones de deflexión medidos con viga Benkelman, complementándolas con mediciones de propiedades resilientes de los materiales extraídos de cada sección (Pérez García et al., 2016)

El objetivo principal de estas mediciones era definir los niveles máximos permitidos de deflexión para usarlos en el diseño de pavimentos. En el artículo “The effect of resilience-deflection relationship on the structure design of asphaltic pavements (Hveem et al., 1962)”

Se observo lo siguiente:

“Indudablemente los investigadores de deflexiones futuras en una gran variedad de pavimentos en los Estados Unidos, permitirá que el ingeniero en carreteras asigne niveles de deflexión seguros a las carreteras con razonable confianza de la tal manera que estas estructuras no se fatiguen durante su vida útil”

A partir de lo mencionado se empleaba un dispositivo denominado “resiliometro” para evaluar la resiliencia de un suelo, el cual cuantificaba el cambio volumétrico por la muestra debido a la aplicación de cargas cíclicas, destacando que la medición de la resiliencia se realizaba considerando únicamente el desplazamiento volumétrico después

de alcanzar un umbral específico, de modo que los datos obtenidos reflejaban de manera precisa la deformación de resiliente del espécimen.

4.2 Guías AASHTO.

Hasta este punto hemos definidos los principios del módulo de resiliencia y como se fue adaptando, pero falta mencionar quienes fueron los responsables de introducirlos de una manera correcta, para esto es necesario mencionar las normas AASHTO (American of State Highway and Transportation Officials por sus siglas en ingles), siendo esta una entidad reguladora que emite especificaciones, métodos de prueba y para nuestro interés de estudio las guías utilizadas en el diseño y la construcción de carreteras; donde daremos un breve repaso en el tiempo hasta nuestros días para observar la evolución del módulo de resiliencia.

4.2.1. Guía AASHTO 1961.

La primera guía fue basada en los resultados de la prueba AASHO localizada en Ottawa (Huang, 2009), donde se relaciona el número de ejes equivalentes con el numero estructural de servicio dando como resultado la Ec.4.2:

$$\log W_{18} = 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log[(4.2 - p_t)/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094/(SN + 1)^{5.19}} \quad Ec. (4.2)$$

Donde:

$\log W_{18}$: Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas

SN : Número estructural

p_t : Nivel de servicio final.

En esta ecuación no se incluye algún parámetro que tome en cuenta alguna condición de materiales diferentes a los utilizados en los tramos de prueba, esta ecuación se desarrolla exclusivamente para las condiciones de estudio y de un solo material que fue la subrasante (Schwartz P.E. et al., 2006).

4.2.2. Guía AASHTO 1972.

A partir de la primera guía (1961) se tiene una necesidad de introducir parámetros diferentes a los tramos de prueba.

En esta guía de 1972 (Provisional) se agrega un factor regional R, para considerar las condiciones ambientales de otras regiones quedando resumidos en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Valores de R según la guía AASHTO, 1972

Valores recomendados de R (AASHTO, 1972)	
Material de cimentación	Parámetro R
Congelamiento hasta 13 cm o más (invierno)	0.2 a 1.0
Seco (verano y otoño)	0.3 a 1.5
Húmedo (descongelamiento en primavera)	4.0 a 5.0

La Ec.4.3 fue modificada y tomo la siguiente forma:

$$\log W_{18} = 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log[(4.2 - p_t)/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094/(SN + 1)^{5.19}} + \log\left(\frac{1}{R}\right) + 0.372(S_i - 3) \text{ Ec. (4.3)}$$

En donde S_i es el valor de soporte del suelo y R es el factor regional. Los demás parámetros son los ya mencionados en la Ec.4.2.

4.2.3. Guía AASHTO 1986.

En este año es en donde se incluyeron el uso de los factores para considerar la confiabilidad y en cuanto al material que constituye la subrasante, se introdujo el módulo de resiliencia considerando su comportamiento no lineal; el valor efectivo fue determinado a partir de los valores estacionales como se describe a continuación:

Considerando la variación mensual como lo muestra la Tabla 4.3 y a partir de estos valores y utilizando la Ec.4.3, se determina el valor de daño relativo y una vez conociendo este dato se puede obtener el daño relativo promedio y a su vez el módulo de resiliencia efectiva (Pérez García et al., 2012).

$$lM_r = \left[\frac{1.18 \times 10^8}{\bar{u}_f} \right]^{-2.32} \text{ Ec. (4.3)}$$

Tabla 4.3 Cálculo del módulo de resiliencia efectivo a partir de valores estacionales

Mes	M_r (psi)	Daño relativo, u_f	
Enero	15900	0.02	Daño relativo promedio $\bar{u}_f = \frac{25.30}{12} = 2.11$
Febrero	27300	0.01	
Marzo	38700	0.00	
Abril	50000	0.00	
Mayo	900	16.52	Por tanto, el módulo de resiliencia efectivo es:
Junio	1620	4.22	
Julio	2340	1.80	

Agosto	3060	0.97	$M_r = \left[\frac{1.18 \times 10^8}{2.11} \right]^{-2.32} = 2185 \text{ psi}$
Septiembre	3780	0.59	
Octubre	4500	0.39	
Noviembre	4500	0.39	
Diciembre	4500	0.39	
$\sum u_f$		25.30	

La ecuación de diseño que apareció en la guía AASHTO de este año fue la Ec.4.4:

$$\log W_{18} = 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log[(4.2 - p_t)/(4.2 - 1.5)]}{0.4 + 1094/(SN + 1)^{5.19}} + 2.32 \log M_r - 8.07 \quad \text{Ec. (4.4)}$$

Donde:

M_r Módulo de resiliencia (valor calculado como se mostró en la Tabla 3)

Es en este momento donde aparece por primera vez el módulo de resiliencia, pero aquí las variaciones en el módulo de resiliencia solo son tomadas en cuenta para el material de la subrasante.

Por otro lado, para el caso de los materiales de base o subbase se hace uso de los coeficientes de capa (a_i) y los coeficientes de drenaje (m_i) con los cuales se considera la rigidez del material y su exposición a contenidos de agua cerca de la saturación (Pérez García et al., 2012).

4.2.4. Guía AASHTO 1993.

En esta guía de diseño, se enfoca exclusivamente en los ajustes relacionados con la rehabilitación de pavimentos rígidos y flexibles. Respecto a los parámetros geotécnicos establecidos en 1986, no se realizaron modificaciones; es decir, la ecuación de diseño permaneció inalterada como se indica en la Ec.4.4, (American Association Of State Highway And Transportation Officials, 1993).

4.2.5. Guía AASHTO 2002.

Esta guía es de tipo empírico-mecanicista y es aquí donde podemos definir este nuevo concepto, mecanicista, es un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita un análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento, es, un marco teórico en donde las propiedades fundamentales de los

materiales se conocen y se pueden determinar en laboratorio o en campo (Garnica Anguas & Correa, 2004)

El factor climático siempre ha sido una constante preocupación en el ámbito de la ingeniería de pavimentos pues se ha encontrado que un material expuesto al agua presenta un cambio en sus propiedades mecánicas, para poder incorporar la información climática en el diseño de pavimentos con métodos empírico-mecanicistas, se ha utilizado el Modelo Climático Integrado (ICM, por sus siglas en ingles de Integrated Climate Model), y después se actualizó y a su forma actual que es el EICM (Modelo Climático Integrado Mejorado por sus siglas en ingles), (Larson & Dempsey , 1997).

El EICM comprende de tres componentes principales

1. Modelo de Infiltración y Drenaje (ID Model)
2. Modelo Climático-Materiales-Estructural (CMS Model)
3. Modelo de asentamientos por Helada y Deshielo (CRREL Model)

Fueron creados por la Universidad de Texas A&M, Universidad de Illinois y por el Laboratorio de Ingeniería e Investigación de Regiones Frías del Ejército de los Estados Unidos mencionados en orden de acuerdo al modelo realizado.

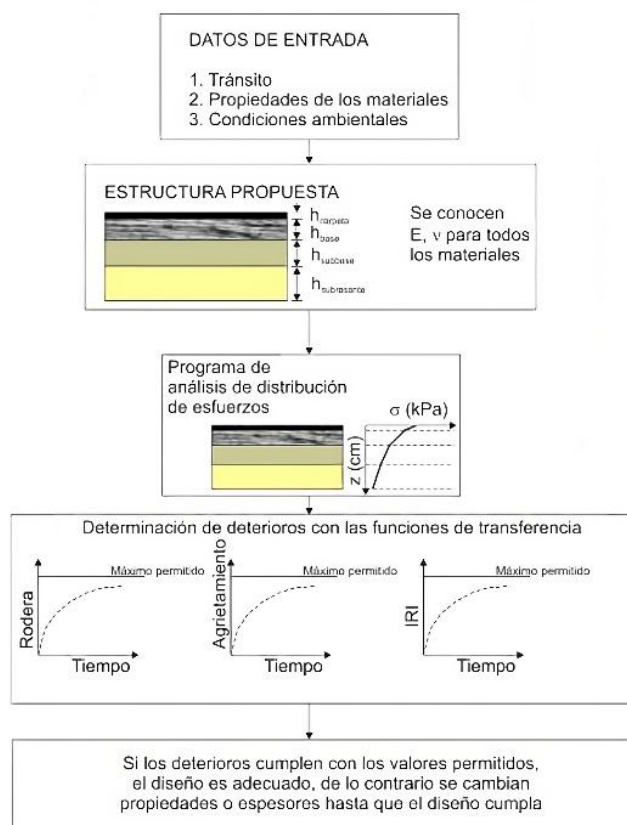


Figura 4.2 Método de diseño empírico-mecanicista (Pérez García et al., 2012).

El EICM es una herramienta que permite predecir con cómo se desarrollan las propiedades del pavimento y los materiales en diferentes condiciones ambientales y meteorológicas, lo que es importante para el diseño de pavimentos.

Como se observa en la Fig.4.2 se llevó a cabo el análisis de esfuerzos y deformaciones, se requieren los módulos de cada uno de los materiales en donde se consideró el EICM.

Una vez que se han determinado los perfiles de contenido de agua la guía hace uso del siguiente modelo para determinar el módulo de resiliencia en cualquier instante Ec.6:

$$lM_r = 10^{a + \frac{b-a}{1+EXP(\beta + k_m(S-S_{opt}))}} \cdot M_{ropt} \quad Ec. (4.5)$$

Donde:

a: *valor minimo de $\log \frac{M_r}{M_{opt}}$*

b: *valor maximo de $\log \frac{M_r}{M_{opt}}$*

k_m : *parametro de regresión*

$(S - S_{opt})$: *variación del grado de saturación con respecto al obtenido en condiciones óptimas*

Se utiliza un enfoque de tres niveles para determinar los parámetros de entrada, en donde el nivel 1 corresponde al más alto en cuanto a su precisión y el nivel 3 a el de más baja precisión. Esto se realiza con el fin de darle al diseñador la flexibilidad de elegir cualquiera de los niveles de entrada para el diseño, así como también se puede utilizar una combinación de ellos.

Los tres niveles de entrada en la guía de diseño para el módulo de resiliencia en materiales no estabilizados son:

- **Nivel 1:** Pruebas de laboratorio haciendo uso de las normas estandarizadas como la NCHRP 1-28A (NCHRP, 2004b) y AASHTO T307 (1999)
- **Nivel 2:** Correlaciones con propiedades del material como el CBR, el valor R, el coeficiente de capa de AASHTO, etc. Tabla 5.
- **Nivel 3:** Valores típicos basados en la calibración.

Tabla 4.4 Modelos relacionando propiedades índices y de resistencia al MR de un material.
(NCHRP, 2002)

Propiedad índice/resistencia	Modelo	Comentarios	Prueba estándar
CBR	$MR = 2555(CBR)^{0.64}(TRL)$ MR, psi	CBR: Relación de soporte California (%).	AASHTO T193, "Relación de soporte California"
Valor de R	$MR = 1155 + 555R(20)$ MR, psi	R: Valor R	AASHTO T190, "Valor R de resistencia y presión de expansión de suelos compactos"
Coefficiente de capa AASHTO	$MR = 30,000 \left(\frac{a_i}{0.14} \right) (20)$ MR, psi	a_i = Coeficiente de capa AASHTO	Guía de diseño de estructuras de pavimentos AASHTO.
IP y gradación	$CBR = \frac{75}{1 + 0.728(wIP)}$	$wIP = P200 * IP$ $P200$ = Porcentaje que pasa la malla No. 200 IP = Índice plástico (%)	AASHTO T27. "análisis granulométrico de agregados gruesos y finos" AASHTO T90, "Determinación del límite plástico e Índice de plástico de los suelos"
DCP (penetración de cono dinámico)	$CBR = \frac{292}{DCP^{1.12}}$	CBR = Relación de soporte California. DCP = Índice de penetración con cono dinámico (mm/golpe)	ASTM D 6951, "Método estándar de prueba para el uso del penetrómetro de cono dinámico en aplicaciones de pavimentos poco profundos."

La caracterización de los materiales de subrasante, sub-base y base se realiza mediante tres grupos de parámetros principales:

1. Modelo de respuesta del pavimento,
2. Modelo climático integrado y mejorado (EICM),
3. Parámetros adicionales de materiales.

El modelo de respuesta del pavimento utiliza el módulo de resiliencia (MR) y el coeficiente de Poisson (μ) para evaluar la rigidez de los materiales no estabilizados bajo cargas vehiculares.

El modelo EICM emplea parámetros como los límites de Atterberg, granulometría y conductividad hidráulica saturada para predecir las condiciones de temperatura y humedad dentro de la estructura del pavimento.

Además, se requieren otros parámetros de materiales, como el coeficiente de presión lateral (K), que son propiedades especiales necesarias para la solución del diseño.

4.2.6. Guía AASHTO 2008.

En el año 2008 se propone un nuevo enfoque para el diseño de pavimentos con una perspectiva empírico-mecanicista (MEPDG, por sus siglas en inglés de Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) (Mendoza Sánchez et al., 2023)

En la primera etapa 1 de evaluación es donde se establece un análisis climático/medioambiental donde se incluye la temperatura y la humedad como variables ambientales. En este momento se puede incluir el Modelo Climático Integrado que se abordó en el modelo 2002 y para poder incorporar el factor ambiental implementado dentro del Modelo Climático Integrado Mejorado (EICM), el cual se usa para calcular el módulo de resiliencia en equilibrio, (Rosenbalm, 2011).

El contenido volumétrico del agua (θ_w) es obtenido mediante la Ec.4.6.

$$\theta_w = S \left(1 - \frac{\gamma_d}{G_s \gamma_w} \right) \quad \text{Ec. (4.6)}$$

Donde:

- θ_w : Contenido volumétrico del agua
- S : Grado de saturación
- γ_d : Densidad seca (pcf)
- G_s : Gravedad específica
- γ_w : Densidad de agua

El contenido de gravimétrico de agua (w) se puede calcular a través de la Ec.4.7:

$$w = S \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_d} - \frac{1}{G_s} \right) \quad \text{Ec. (4.7)}$$

Las temperaturas de cada subcapa de HMA (Hot Mix Asphalt) se combinan en cinco quintiles (cinco grupos sucesivos, del 20% cada uno, de los valores calculados) para cada mes del período de análisis de los deterioros relacionados con la carga. Se supone que la distribución de frecuencias de las temperaturas de la HMA utilizando el ICM tiene una distribución normal. La temperatura media dentro de cada quintil de una subcapa para

cada mes se utiliza para determinar el módulo dinámico de esa subcapa (Mendoza Sánchez et al., 2023)

Sin embargo, Li et al. (2013) menciona que a través del uso del MEPDG la predicción del comportamiento del pavimento debido a los factores ambientales es muy limitada, ya que no incluye el efecto de la infiltración superficial en el modelado de la temperatura y la humedad, así como otros aspectos de la humedad como la expansión por congelamiento.

4.3 Módulo de Resiliencia en Suelos no Saturados.

Considerando que cualquier incremento en el contenido de humedad del suelo provoca la reducción del módulo de resiliencia (MR) y viceversa, y que la humedad del suelo está directamente relacionada con la succión matricial, esta última puede caracterizarse mediante la curva de retención de agua (SWCC, "Soil Water Characteristic Curve") (Cary & Zapata, 2012).

Dentro de la literatura podemos encontrar diferentes pensamientos y acercamientos para poder incorporar los efectos que ocasiona la succión matricial dentro del comportamiento de la resiliencia en los materiales sueltos. Dentro de las primeras intervenciones que podemos encontrar para suelos no saturados es de Bishop, (1959) donde se define al módulo de resiliencia como una función de la succión matricial trasladando el concepto de los esfuerzos efectivos. Después Fredlund y Rahardjo, (1987) basaron su concepto del MR como una función de tres variables ec. 1, siendo una de ellas la succión matricial. Para este caso en particular la succión es uno de los componentes del tensor de esfuerzos (Cary & Zapata, 2012). Los estudios más recientes tomaron en cuenta la contribución de la succión matricial en formas independientes como una aplicación externa de los esfuerzos al suelo (Fredlund et al. (1977), Perreira y F. Gonçalves (2000); Witczak MW et al. (2000); Yang et al. (2005), Liang et al. (2008); Khoury y Zaman (2004) y Auckpath Sawangsuriya, Edil, y Benson (2009), entre otros), como se explicará mediante los siguientes modelos.

Fredlund et al. (1977) intento hacer una relación del módulo de resiliencia de un material de subrasante con las variables del estado de esfuerzo para los suelos no saturados. En donde se relaciona con dos variables, el esfuerzo desviador y la succión matricial. Definieron la Ec 4.8.

$$\log M_R = c_{ld} - m_{ld}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad \text{Ec. (4.8)}$$

Donde:

M_R : Módulo de resiliencia.

c_{ld} y m_{ld} : Función de la succión matricial.

σ_1 y σ_3 : Esfuerzos principales.

Este modelo tiene la característica de que no está validada completamente con datos de laboratorio, pero incorpora la succión matricial como variable de esfuerzo fundamental.

Lytton et al. en 1995 desarrollaron un modelo constitutivo basándose en 8 lugares diferentes para su uso en materiales de base granular para desarrollar la Ec. 4.9.

$$M_R = k_1 P_a \left(\frac{\theta_b - f \theta_\psi 3}{P_r} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_r} \right)^{k_3} \quad Ec. (4.9)$$

Donde:

M_R : Módulo de resiliencia.

θ_b : Esfuerzo bulk.

τ_{oct} : Esfuerzo cortante octaédrico

k_1, k_2, k_3 : Parámetros del modelo.

Perreira y F. Gonçalves, (2000) describieron un modelo en donde la succión matricial tiene la influencia sobre el MR en una laterita en Brasil. En donde se encontró una correlación entre la succión matricial y los esfuerzos externos. Determinando la Ec 4.10..

$$M_R = 4.10 \sigma_d^{0.782} \psi_m^{0.076} \quad Ec. (4.10)$$

Donde:

M_R : Módulo de resiliencia.

σ_d : Esfuerzo desviador

ψ_m : Succión matricial

MW et al. (2000) desarrollaron un modelo que incorpora un factor ambiental, representando el cambio de humedad sobre el MR. Definiendo la Ec 4.11..

$$M_R = 10^{a + \frac{b-a}{1 + \exp(\beta + k_s(S - S_{opt}))}} \cdot k_1 \cdot P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad Ec. (4.11)$$

Donde:

- M_R : Módulo de resiliencia.
 S : Grado de saturación.
 S_{opt} : Grado de saturación optimo.
 θ : Esfuerzo bulk.
 τ_{oct} : Esfuerzo octaédrico.
 P_a : Presión atmosférica.
 k_1, k_2, k_3 : Parámetros de regresión.
 β : $\ln(-b/a)$
 ψ_m : Succión matricial

Doucet y Doré (2004) consideran la tensión interna para este modelo que se desarrolló en la provincia de Quebec para materiales granulares, parcialmente triturados como material de la base de pavimentos. Definiendo la Ec 4.12

$$M_R = 1060\theta_b - 8700\psi + 57000 \quad Ec. (4.12)$$

Donde:

- M_R : Módulo de resiliencia.
 θ : Esfuerzo bulk.
 ψ : Succión matricial

Yang et al. (2005) proponen un modelo en donde se desarrolla la succión matricial, mediante la teoría de suelos no saturados para la predicción del MR. Dicho modelo esta explícitamente relacionada por Moossazadeh y Witczak (1981), donde el parámetro de Bishop (1959) representa el contenido de humedad del suelo. Desarrollando la Ec.4.13.

$$M_R = k_1(\sigma_d + \chi_m\psi_m)^{k_2} \quad Ec. (4.13)$$

Donde:

- M_R : Módulo de resiliencia.
 k_1, k_2 : Parámetros de regresión.
 χ_m : Parámetros de esfuerzos efectivos de Bishop (1959).
 ψ_m : Succión matricial

Liang et al. (2008) realizó un modelo similar a los esfuerzos efectivos para suelos no saturados, viene de la variación del modelo universal (Witczak e Uzan, 1988). Determinaron la Ec 4.14.

$$lM_R = k_1 P_a \left[\frac{(\theta + \chi_m \psi_m)}{P_a} \right]^{k_2} \left[\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right]^{k_3} \quad Ec. (4.14)$$

Donde:

- M_R : Módulo de resiliencia.
 θ : Esfuerzo bulk.
 k_1, k_2, k_3 : Parámetros de regresión.
 χ_m : Parámetros de esfuerzos efectivos de Bishop (1959).

τ_{oct} : Esfuerzo octaédrico.
 P_a : Presión atmosférica.
 ψ_m : Succión matricial

Cary y Zapata (2012) proponen un modelo en donde incluyen la succión como estado de esfuerzo responsable de la variación del contenido de humedad. Estipularon la Ec.4.15.

$$M_R = k_1 \cdot P_a \left(\frac{\theta_{net} - 3 \cdot \Delta u_{w-sat}}{P_a} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \cdot \left(\frac{(\psi_{m0} - \Delta \psi_m)}{P_a} + 1 \right)^{k_4} \quad Ec. (4.15)$$

Donde:

M_R : Módulo de resiliencia.
 P_a : Presión atmosférica.
 $\theta_{net} = \theta - 3u_a$: Esfuerzo bulk neto, donde u_a es la presión de poro de aire.
 $k_1 \geq 0, k_2 \geq 0, k_3 \leq 0$ y $k_4 \geq 0$: Parámetros de regresión.
 Δu_{w-sat} : Aumento de la presión de poro de agua abajo condiciones saturadas, en este caso $\Delta \psi_m = 0$
 τ_{oct} : Esfuerzo octaédrico.
 ψ_{m0} : Succión matricial inicial del suelo.
Cambio relativo de la succión del suelo con respecto ψ_{m0} debido de la
 $\Delta \psi_m$: presión de poro de agua bajo condiciones no saturadas, en este caso
 $\Delta u_{w-sat} = 0$

Barbosa et al. (2020) proponen un modelo para establecer una relación entre la respuesta mecánica cíclica y las propiedades de retención de agua en los suelos compactados. En donde se proponen dos variables constitutivas como la tensión de Bishop (1959) y un parámetro de unión de partículas. Ver Ec.4.16.

$$M_R = \left(\frac{p^*}{p_r} \right)^{k_1} + \left(1 + \frac{q_{cyc}}{p_r} \right)^{-k_2} + M_0 \exp(k_3 \xi) \quad Ec. (4.16)$$

Donde:

M_R : Módulo de resiliencia.
 p_r : 1 (Kpa) la tensión media de referencia.
 ξ : Un parámetro de unión que contabiliza la fuerza normal que actúa en los contactos de las partículas del suelo debido a la presencia de meniscos de agua.
 k_1, k_2, k_3 y M_0 : Son parámetros del modelo.
 p^* : Tensión media de Bishop (1959).
 q_{cyc} : Efecto de la tensión desviadora cíclica

Abdollahi y Farshid Vahedifard (2022) presentan un modelo para suelos de subrasantes en suelos no saturados en donde se determina el MR bajo ocurrencias del agua y la temperatura en donde ofrecen analizar dos mecanismos diferentes para la retención del agua, la capilaridad y la adsorción. También incorporan explícitamente el efecto de la temperatura (Ec.4.17).

$$M_R = M_{R,C}(\theta) + M_{R,a}(\theta) \quad \text{Ec. (4.17)}$$

Donde:

M_R : Módulo de resiliencia.

$M_{R,C}(\theta)$ + Son las partes capilar y adsorbida, respectivamente, del
 $M_{R,a}(\theta)$: total del MR

4.4 Elementos que influyen en la humedad del suelo en áreas cubiertas.

Existen antecedentes de estudios que indican muchos factores en relación a la humedad en áreas cubiertas como por ejemplo Basma y Al-Suleiman (1991) que presentaron diferentes humedades en diferentes capas del pavimento. Otros de los estudios que también se presentaron fueron Eigenbrod and Kennepohl (1996) indicando que bajo ciertas circunstancias de temperatura el suelo que se localiza debajo del pavimento el agua llega a acumularse debido al enlace base-pavimento y estos factores los podemos traducir en la Figura 4.3, que se pueden utilizar estos parámetros para llegar a modelizar el impacto sobre los pavimentos en diferentes entornos (Michael y Philp, 2015).

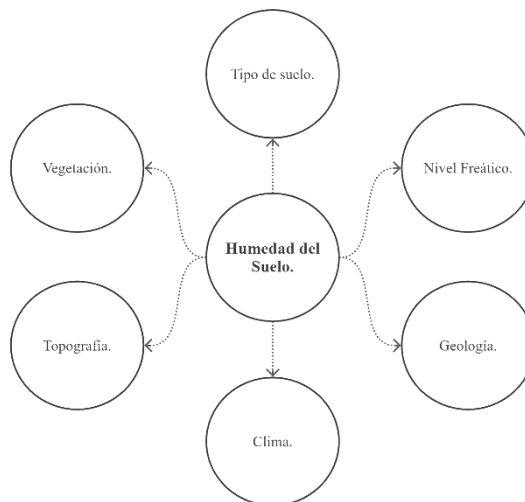


Figura 4.3 Factores que afectan las condiciones de la humedad del suelo.

Existen muchos factores que se encuentran unidos para dar una explicación acerca de la humedad del suelo, como se explicó anteriormente, pero como menciono Coleman (1965) la geología y el clima son responsables del tipo de suelo en una región, y el tipo de suelo y la vegetación combinados con la topografía son responsables de la distribución regional de la humedad.

Muchos estudios que se lograron realizar en los que se pudieron identificar dos grandes factores, el tipo de suelo y los factores ambientales que lograron influir en el control de

las condiciones de humedad en zonas cubiertas como el pavimento (Coleman 1965; De Bruijn 1965a, b; Fredlund y Rahardjo 1993; Klemunes J. 1995; Smetten y Gregory 1996).

Algunas propiedades pueden identificar el tipo de suelo y como estas influyen en las condiciones de humedad, como lo son la malla pasa #200, el límite líquido (LL), el límite plástico (LP), el índice de plasticidad (IP), y la conductividad hidráulica (Feng et al. 2023). Pero también se pueden asociar a condiciones ambientales como lo es la temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad del viento, radiación solar y la profundidad del nivel freático (Houston, M. et al. 2006)

Aitchison y Richards (1965 a,b,c,d) realizaron un estudio a gran escala analizando las condiciones de humedad que existen en la subrasante de algunos pavimentos en Australia. Se recolectaron mediciones de succión total y matricial de 17 subrasantes ubicadas en toda Australia utilizando bloques de yeso y haciendo uso de la experimentación. Los datos experimentales mostraron una relación muy estrecha entre el índice de Thornthwaite (IT), pero debemos de tener en cuenta que una estimación fiable del IT es importante para un desarrollo adecuado dentro de las características del pavimento (Michael y Philp, 2015)

y la succión del suelo en la zona de humedad es estable debajo del pavimento. También se demostró que el IT relaciona para analizar los efectos del cambio climático. y la succión es adecuada para regiones áridas o semiáridas donde la precipitación anual no excede las 0.25 m o la profundidad del agua subterránea es relativamente profunda (Russam y Coleman, 1961)

Como se indicó anteriormente, otro factor importante que durante mucho tiempo se creyó que afectaba las condiciones de humedad del suelo es la profundidad del agua subterránea. Russam y Coleman (1961) concluyeron que las succiones del suelo están en equilibrio estático con el nivel freático cuando la profundidad del agua subterránea es menor de 3.0 a 4.5 m o incluso de 6.0 a 9.14 m. Russam (1965) describió tres categorías de recomendaciones de diseño para predecir las condiciones de humedad de la subrasante basándose en estudios de humedad de la subrasante.

1. Cuando el nivel freático está a 6.0 m de la superficie del suelo, la succión depende sólo de la posición del nivel freático y presión de sobrecarga.
2. Cuando el nivel freático está a más de 6.0 m de la superficie y las precipitaciones estacionales exceden las 0.25 m, la succión final de la subrasante se puede estimar a partir del IT y textura del suelo. El índice de plasticidad se puede utilizar como

guía para la textura del suelo y, para un clima determinado, la relación entre el contenido de humedad final y el límite plástico tiende a ser constante.

3. Cuando el nivel freático está a más de 6.0 m de la superficie y la precipitación anual es menor que 0.25 m la succión del suelo está controlada por la humedad atmosférica.

4.5 Fundamentación teórica.

En las últimas décadas, los cambios climáticos han generado impactos significativos en sistemas naturales y humanos. La creciente frecuencia e intensidad de los fenómenos climáticos ha despertado una preocupación global por la necesidad de adaptación, con el fin de reducir la severidad de estos efectos del cambio climático (Mendoza Sánchez y Marcos Palomares, 2017).

Este fenómeno afecta directamente a diversas estructuras, lo que ha llevado a muchos investigadores a considerar diferentes factores climáticos en sus modelaciones.

Partiendo de la premisa sobre la significancia de las variables regionales, se ha observado un interés continuo a lo largo de los años en la formulación de modelos para pronosticar la variación del módulo de resiliencia.

4.6 Modelos para predecir la variación del módulo de resiliencia.

En esta sección se describen algunos modelos desarrollados mediante ensayos, así como aquellos basados en la literatura.

El modelo, desarrollado por (Seed et al., 1962) es un pionero en la predicción del módulo resiliente de suelos granulares. Este modelo establece una relación entre la deformabilidad del material y la suma de los esfuerzos principales (θ), así como con dos constantes empíricas (k_1 y k_2), como se ilustra en la Ec.4.18.

$$MR = k_1 \theta^{k_2} \quad Ec. (4.18)$$

Las investigaciones de Moossazadeh and Witczak (1981) llevaron al desarrollo de un modelo predictivo para el módulo resiliente de suelos cohesivos, conocido como $K-\sigma_d$. Este modelo se basa en la siguiente ecuación, que establece una relación entre el módulo resiliente y ciertos parámetros del suelo, Ec.4.19.

$$MR = k_1 \sigma_d^{k_2} \quad Ec. (4.19)$$

Donde:

σ_d Esfuerzo desviador

Por otra parte, Uzan (1985) propuso un modelo innovador que denominó "universal", el cual integra los parámetros clave de los modelos K- θ y K- σ_d . Este modelo, definido por la Ec.22, tiene la capacidad de predecir el comportamiento resiliente de una amplia gama de suelos, incluyendo tanto suelos cohesivos como granulares.

La universalidad de este modelo radica en su capacidad para adaptarse a diferentes tipos de suelos, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para la predicción del comportamiento resiliente de los suelos en diversas condiciones, Ec.4.20.

$$MR = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{p_a} \right)^{k_3} \quad Ec. (4.20)$$

Donde:

k_1, k_2, k_3 Coeficiente de regresión

θ Coeficiente de regresión

p_a Presión de referencia = 100 kpa $\approx$ 1kgf/cm² $\approx$ 2000 psf $\approx$ 14.50 psi

Basados en la Ec.22, la guía Empírico Mecanicista (MEDPG) de AASTHO (2008) presenta una ecuación similar, cuya expresión se define a continuación, Ec.4.21.

$$MR = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1 \right)^{k_3} \quad Ec. (4.21)$$

Donde:

MR Módulo de resiliencia.

θ Suma de esfuerzos ($\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

σ_1 Esfuerzo mayor principal.

σ_2 Esfuerzo intermedio principal (σ_3 para especímenes cilíndricos en pruebas Mr).

σ_3 Esfuerzo principal o de confinamiento.

τ_{oct} Esfuerzo cortante octaédrico $\left(\frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \right)$

p_a Presión atmosférica, $p_a = 101.4 \text{ kPa}$.

k_1, k_2, k_3 Coeficiente de regresión.

En México, a través del Instituto Mexicano del Transporte (Pérez García et al., 2016) desarrolló un modelo predictivo para estimar el módulo de resiliencia incluyendo todos los valores proporcionados en las pruebas realizadas (pruebas índices, compactación y módulo de resiliencia), a los diferentes materiales seleccionados (Tabla 4.5) pues comprendieron que todo dato es importante a la hora de proponer un método nuevo.

Tabla 4.5 Origen del suelo extraído.

Suelo	Origen del suelo extraído.
Arcilla negra	Banco Tlacote
Limo de baja compresibilidad	Banco Misha
Arena limosa	Banco los Cues
Arcilla roja	Carretera Zapotlanejo-Guadalajara
Arcilla negra	Predios del Instituto Mexicano del Transporte

Donde se propone la Ec.4.22.

$$M_r = 94.6e^{-0.165(w-w_{opt})} \times \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_3}\right)^{-0.25} \quad Ec. (4.22)$$

$$R^2 = 0.84$$

Donde:

- M_r Módulo de resiliencia (MPa)
- $(w - w_{opt})$ Variación del contenido de agua con respecto al optimo (%)
- σ_d Esfuerzo desviador (KPa)
- σ_3 Presión del confinamiento

En Brasil, un lugar donde predomina el clima tropical húmedo ha demostrado que la humedad en la subrasante es un factor importante y que afecta en gran medida la capacidad de soporte del pavimento. Cuando se produce un aumento a la saturación se produce una disminución del MR (Kern et al., 2021).

En donde Kern et al. (2021) propone la Ec. 4.23.

$$M_r = -0.18\sigma_d + 0.36S + 47.8(w - w_{opt}) + 0.15\sigma_3 - 0.69S \times (w - w_{opt}) \quad Ec. (4.23)$$

$$R^2 = 0.92 \text{ con un ajuste de } R^2 = 0.91$$

Donde:

- σ_d Esfuerzo desviador
- S Saturación
- $w - w_{opt}$ Variación del contenido de agua con respecto al optimo
- σ_3 Presión del confinamiento

El coeficiente k_1 es proporcional al módulo de resiliencia. Por lo tanto, los valores de k_1 deben ser positivos ya que el MR nunca puede ser negativo. Al aumentar el valor de la suma de esfuerzos (θ) aumenta la rigidez en el material de ensaye, ocasionando que el MR sea mayor. Por lo tanto, el exponente de k_2 también debe ser positivo. El coeficiente k_3 es el valor exponente del término del esfuerzo cortante octaédrico. Los valores de k_3 deben ser negativos ya que al aumentar el esfuerzo cortante produce un ablandamiento en el material de ensaye, resultando en un MR inferior (NCHRP, 2002).

4.7 La influencia de las variaciones climáticas en el pavimento.

Tradicionalmente, se consideran las condiciones climáticas locales para planificar la infraestructura, pero el cambio climático requiere considerar proyecciones futuras para garantizar la durabilidad de las inversiones. Es crucial entender cómo los cambios climáticos afectarán la infraestructura vial a largo plazo, especialmente considerando su exposición y la duración de los fenómenos climáticos extremos.

Los factores climáticos que influyen en la infraestructura vial incluyen:

Precipitación intensa: Aumenta el riesgo de inundaciones, reduce la capacidad de tráfico y disminuye la fricción entre los neumáticos y el pavimento.

Humedad del suelo: Altera la integridad estructural de los pavimentos y cimentaciones.

Temperaturas extremas: Afectan la expansión térmica, la resistencia y la durabilidad de los materiales de construcción.

Vientos intensos: Generan marejadas que aumentan la vulnerabilidad de las carreteras costeras a inundaciones y daños.

Como resumen de las variables climáticas, podemos encontrar las variables climáticas que se pueden incorporar adecuadamente el clima y su variación climática, prácticamente para cualquier enfoque de diseño de pavimento Tabla 4.6 (Mendoza Sánchez et al., 2023).

Tabla 4.6 Variables climáticas en el pavimento.

CAPA DEL PAVIMENTO	PROPIEDAD MECÁNICA	COMPONENTE AMBIENTAL
CARPETA	Módulo dinámico	• Temperatura
BASE	Módulo de resiliencia	• Contenido de agua/Humedad
SUB-BASE	Módulo de resiliencia	• Contenido de agua/Humedad
SUELO DE CIMENTACIÓN	Módulo de resiliencia	• Contenido de agua/Humedad • Grado de saturación • Succión

4.8 Importancia del modelo sigmoidal.

Para establecer una relación precisa entre el Índice de Thornthwaite (IT) y el módulo de resiliencia del suelo, se propone el uso de una curva sigmoidal. Este modelo es particularmente adecuado porque captura de manera efectiva la transición entre estados áridos y húmedos, lo que lo convierte en una herramienta ideal para representar comportamientos no lineales, como los asociados a las variaciones climáticas. La curva sigmoidal permite modelar cómo el suelo responde a cambios en el balance hídrico, lo

que es fundamental para entender su comportamiento bajo condiciones climáticas variables (Van Genuchten, 1980).

En este contexto, la curva sigmoideal puede aplicarse para analizar diversas propiedades del suelo, como el contenido de humedad describiendo el balance hídrico desde condiciones de sequía (valores negativos del IT) hasta condiciones de saturación (valores positivos del IT). Esta relación es puede predecir cómo el suelo se comporta bajo diferentes escenarios climáticos, lo que tiene implicaciones directas en su capacidad para soportar cargas y recuperarse de deformaciones.

Además, el modelo sigmoideal permite simular el módulo de resiliencia, el cual puede variar significativamente en función de las condiciones climáticas. Por ejemplo, en climas secos (IT negativo), el suelo tiende a ser más rígido, lo que puede aumentar su resiliencia, mientras que en climas húmedos (IT positivo), la pérdida de resistencia del suelo puede reducir su capacidad de recuperación. Esta capacidad predictiva del modelo es esencial para el diseño y mantenimiento de infraestructuras resilientes, especialmente en regiones con alta variabilidad climática.

4.9 IMT-PAVE.

El IMT-PAVE es una herramienta de diseño de pavimentos que emplea una metodología empírico-mecanicista, la cual prioriza el concepto de espectro de carga y su relación con el espectro de daño. Esta metodología analiza los esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento y su conexión con los principales tipos de deterioro que se presentan (SICT, 2023).

El propósito del IMT-PAVE es proporcionar una herramienta complementaria para la revisión y propuesta de secciones estructurales de pavimentos asfálticos y rígidos, con el objetivo de mejorar la eficiencia y durabilidad de las infraestructuras viales.

En la selección del diseño inicial, se realizan estimaciones preliminares de los componentes de entrada, incluyendo los espesores de cada capa, las propiedades de los materiales (especialmente los módulos dinámicos para la carpeta asfáltica y los módulos resilientes para las capas no asfálticas), y el nivel de tráfico vehicular determinado por su espectro de distribución de cargas.

Los factores que afectan el diseño de pavimentos se pueden clasificar en cuatro variables principales: tránsito vehicular, criterios de falla, estructura y propiedades de los materiales, y factores ambientales (Garnica Anguas & Hernández Domínguez, 2013).

Una característica destacada del IMT-PAVE es su consideración del clima, el cual afecta directamente a los materiales del pavimento Fig.4.4. Además, esta herramienta subraya la importancia de conocer los valores de resistencia estructural de los materiales propuestos para las diferentes capas del pavimento, lo que implica la necesidad de especificaciones de calidad adicionales al resultado del diseño.



Figura 4.4 Factores que afectan el pavimento,

Fuente: (Garnica Anguas & Hernández Domínguez, 2013)

La caracterización adecuada de los materiales es crucial en el diseño de pavimentos, y la determinación del módulo de resiliencia es una prueba fundamental, conforme a la normativa AASHTO T274. Aunque tradicionalmente se determina este módulo mediante ensayos de laboratorio, existen también otros métodos para su obtención, como la estimación a partir de la medición de otros parámetros más comunes. Sin embargo, para una buena práctica, es recomendable la ejecución directa del ensayo.

Es importante destacar que los ensayos de módulo de resiliencia deben llevarse a cabo bajo condiciones que reflejen fielmente la forma en que los materiales se colocarán en la obra, considerando aspectos como el peso volumétrico, el contenido de agua durante la compactación, el método utilizado para compactar y la granulometría, entre otros. La precisión en la reproducción de estas condiciones es crucial, ya que el resultado del ensayo es altamente sensible a estos factores (Garnica Anguas & Hernández Domínguez, 2013)

Además, es necesario conocer los valores correspondientes a la relación de Poisson para todos los materiales.

Para facilitar la comparación de los módulos de resiliencia, se puede recurrir al manual SCT M-MMP-1-02/03 (S.C.T., 2003), emitido por la Secretaría de Comunicaciones y

Transporte (SCT), el cual presenta los valores representativos del módulo de resiliencia (Mr) para suelos clasificados conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) Tabla 4.7

Tabla 4.7 Valores típicos del módulo de resiliencia, Mr, para suelos clasificados con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, S.U.C.S.

Clasificación del suelo	Rango de Mr (MPa)	Valores típicos de Mr (Mpa)
CH	34 - 90	55
CH + Cal	100-200	150
CH + Cemento	200-300	250
MH	55 - 120	80
CL	90 - 165	117
ML	50 – 100	75
SW	193 – 259	220
SP	166 – 228	193
SW-SC	148 - 214	176
SW-SM	166 – 228	193
SP-SC	148 - 214	176
SP-SM	166 -228	193
SC	148 - 193	166
SM	193 - 259	221
GW	273 – 350	310
GW + Cemento	750-2000	1500
GW + Asfalto	500-1500	1000
GP	245 -300	270
GW-GC	193 - 276	238
GW-GM	245 - 279	266
GP-GC	193 - 269	235
GP-GM	214 - 276	252
GC	166 - 259	214
GM	228 - 290	266

5. Hipótesis

"Los suelos que tienen un menor grado de saturación son más sensibles a cambios en la succión del suelo debido a variaciones climáticas extremas. Es posible desarrollar un modelo predictivo que estime el comportamiento del módulo de resiliencia en suelos no saturados bajo dichas condiciones climáticas."

6. Objetivos

6.1.Objetivo General.

Desarrollar un modelo para simular el comportamiento del módulo de resiliencia en suelos no saturados bajo variaciones climáticas, utilizando el Índice de Thornthwaite para relacionar parámetros climáticos con las propiedades mecánicas del suelo.

6.2.Objetivos Específicos

- Evaluar la relación entre el Índice de Thornthwaite y las condiciones de succión del suelo.
- Determinar el impacto del contenido de humedad y la succión matricial en el módulo de resiliencia.
- Modelar el comportamiento del módulo de resiliencia considerando variaciones climáticas.
- Validar el modelo propuesto mediante análisis de regresión y comparación con datos experimentales.

7. Metodología.

En este capítulo se presenta la metodología empleada para analizar la relación entre el Índice de Thornthwaite (IT) y el comportamiento hidráulico y mecánico de suelos compactados, integrando variables climáticas, de humedad y de succión bajo el enfoque de la mecánica de suelos no saturados.

Inicialmente, se describe el procedimiento para el cálculo del IT a partir de la latitud y longitud del sitio de estudio, así como la determinación del exceso y déficit hídrico. Posteriormente, se analiza su relación con el contenido de humedad del suelo y el contenido de agua óptimo, evaluando las variaciones de humedad antes y después de la compactación y su porcentaje respecto al óptimo. Como parte de este proceso, se realiza un análisis de sensibilidad para la determinación de las variables k e IT_0 , representativas del comportamiento del modelo propuesto.

Asimismo, se estudia la succión del suelo y el movimiento de la humedad en suelos parcialmente saturados, incorporando la estimación de parámetros hidráulicos necesarios para la construcción de la Curva Característica del Suelo (SWCC). En este contexto, se incluye el factor de forma de la ecuación propuesta por la Dra. Zapata y se lleva a cabo una comparación entre el modelo de Van Genuchten y el modelo propuesto para la representación de las curvas características ($S_r-\psi$).

Finalmente, se establece la relación entre el grado de saturación y el módulo de resiliencia (M_r), realizándose la validación del modelo de M_r . La interacción entre las capas del pavimento se analiza mediante el método de elementos finitos, utilizando MATLAB para el postprocesamiento de resultados y la generación de correlaciones, mientras que el contraste entre resultados experimentales y teóricos se efectúa mediante análisis estadístico en Minitab.

7.1. Índice de Thornthwaite

El índice de Thornthwaite (IT) puede describirse de una forma general como la correlación de la aridez, humedad del suelo y en relación al clima, calculados a partir de los efectos de la precipitación, la evapotranspiración, almacenamiento de agua, déficit de humedad y el escurrimiento del agua (Michael y Philp, 2015).

El sistema de categorización se basa en los resultados del balance hídrico del suelo y utiliza la evapotranspiración potencial anual la precipitación media anual el exceso de agua anual y el déficit de agua anual el índice de Thornthwaite (IT) es una combinación de humedad (I_h) y del índice de aridez (I_a), (Thornthwaite, 1948) calculados de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}I_h &= \frac{EXC}{ETP} \times 100 \\I_a &= \frac{DEF}{ETP} \times 100 \\IT &= I_h - 0.61I_a\end{aligned}\quad Ec. (7.1)$$

Utilizando la evapotranspiración potencial anual (mm): Es la suma de evapotranspiración de cada mes del año, por eso se acumula desde el mes 1 hasta el mes 12 (1 año) el exceso de agua también es un acumulado del exceso que ocurre en cada uno de los meses y el déficit de agua también es un acumulado de los déficits de cada uno de los meses (Thornthwaite, 1948).

Basadas en los resultados del balance hídrico del suelo.

$$ETP = \sum_{i=1}^{12} ETP(\text{corregida})_i$$

Exceso de agua anual (mm).

$$EXC = \sum_{i=1}^{12} EXC_i$$

Déficit de agua anual (mm).

$$DEF = \sum_{i=1}^{12} DEF_i$$

Este índice, entrega valores que van, entre -40 o incluso menores hasta los mayores de 100 y clasifica el clima desde árido hasta excesivamente húmedo como lo podemos ver en la siguiente Tabla 7.1 (Thornthwaite, 1948).

Tabla 7.1 Clasificación del Índice de Thornthwaite (1948)

IT	Símbolo	Tipo Climático
>100	A	Excesivamente Húmedo
80 a 100	B4	Muy Húmedo
60 a 80	B3	Húmedo
40 a 60	B2	Moderadamente Húmedo
20 a 40	B1	Ligeramente Húmedo
0 a 20	C2	Subhúmedo-Húmedo
-20 a 0	C1	Subhúmedo-Seco
-40 a -20	D	Semiárido
< - 40	E	Árido

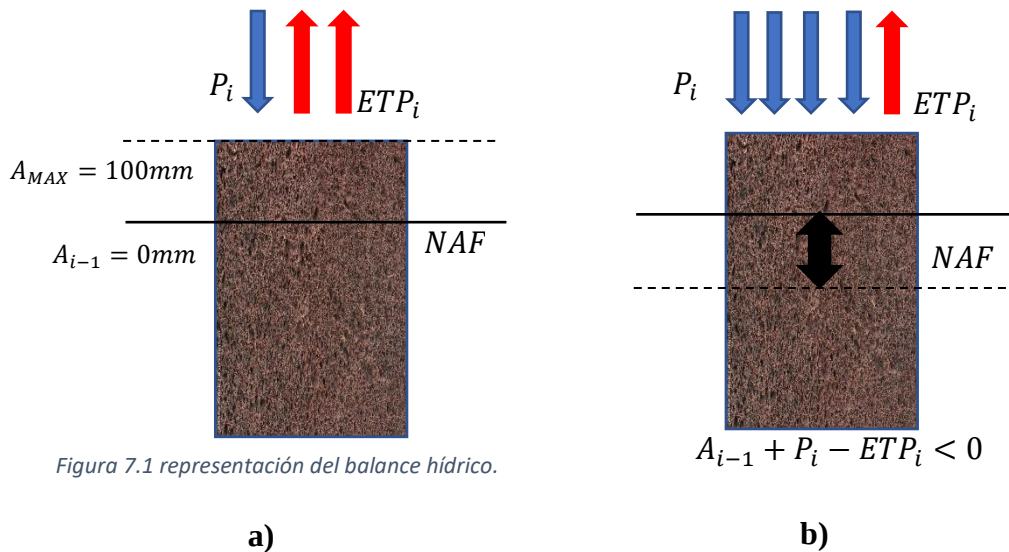


Figura 7.1 representación del balance hídrico.

Figura 7.2 Representación del balance hídrico, a) Evapotranspiración, b) Precipitación

Ahora es importante analizar el almacenamiento, déficit y exceso de humedad. La capa de suelo que estará en contacto con la estructura del pavimento, mide 100 milímetros, en caso de que el nivel freático este en la cota 0 de almacenamiento.

En la Fig. 7.1, es la representación del balance hídrico, el balance hídrico del suelo se ve afectado por la evapotranspiración y las precipitaciones, generando déficits y excesos. Esto influye en el nivel freático y la escorrentía del agua. Cuando hay poca lluvia y alta evapotranspiración, el suelo se reseca y el nivel freático disminuye, creando un déficit hídrico notable en la zona.

Si las precipitaciones son abundantes y la evapotranspiración baja, el nivel freático puede aumentar, llevando al almacenamiento de agua en el suelo, (Thornthwaite, 1948). Cuando el nivel freático supera la cota máxima de almacenamiento, se genera escorrentía, lo que se denomina exceso hídrico en el contexto del balance hídrico, Fig. 7.3

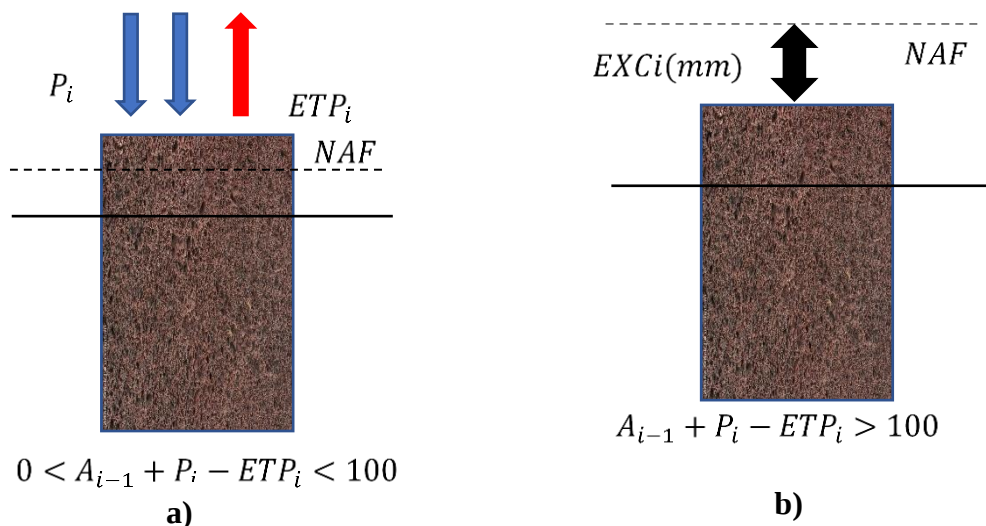


Figura 7.3 a) Escorrentía, b) Exceso hídrico

Una vez analizado los datos importantes para el cálculo del IT, podemos indicar de manera general como se obtiene el valor del índice (Thornthwaite, 1948).

Los cálculos de Thornthwaite (1948) se basan en determinar la evapotranspiración potencial en función de la latitud (representativa de la extensión de horas-sol por día) y la temperatura media. La relación entre la temperatura media mensual y el potencial de evapotranspiración potencial es determinada de la siguiente manera (Instituto Nacional De Vías, 2008).

- a) Se calcula un “índice de calor mensual” (i) a partir de la temperatura media mensual (TMM).

$$i = \left(\frac{TMM}{5} \right)^{1.514}$$

- b) Se calcula un “índice de calor anual” (I) sumando los 12 valores de i .

$$I = \sum_{1}^{12} i$$

- c) Se calcula la ETP mensual “sin corregir” mediante la fórmula, Ec.7.2.

$$ETP_{sin\ corregir} = 16 \times \left(\frac{10 \times TMM}{I} \right)^a \quad Ec. (7.2)$$

$ETP_{sin\ corregir}$: ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas)

TMM : Temperatura media mensual °C

I : Índice de calor anual, obtenido en el punto b

$$a = 675 \times 10^{-9} * I^3 - 771 \times 10^{-7} * I^2 + 1792 \times 10^{-5} * I + 0.49239$$

- d) Corrección para el número de días del mes y el número de horas del sol.

$$ETP_{corregida} = ETP_{sin\ corregir} * \frac{N}{12} * \frac{d}{30}$$

Donde:

N : Número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud (Tabla 2)

d : Número de días del mes

7.1.1. Latitud y longitud.

La latitud es la distancia desde un punto en la tierra hasta el ecuador, afectando el número de horas de sol. Este valor cambia dependiendo de qué tan al norte o sur Fig. 10 y 11, se

encuentre una región, y su definición se puede observar que es natural, pues está definido físicamente por el ecuador, (Ramirez Granados, 2011).

La longitud, en contraste, mide la distancia desde un punto en la tierra hasta el meridiano de Greenwich. No afecta directamente el número de horas de sol, (Ramirez Granados, 2011).

Por ejemplo, en Canadá en enero hay 8.8 horas de sol y en julio 15.6 horas. Esto muestra cómo la latitud influye en la duración de la luz solar. Tabla 7.4.

El índice de humedad y aridez se utilizan para clasificar el clima en relación con la evapotranspiración corregida. Esto permite entender mejor las condiciones climáticas de una región específica.

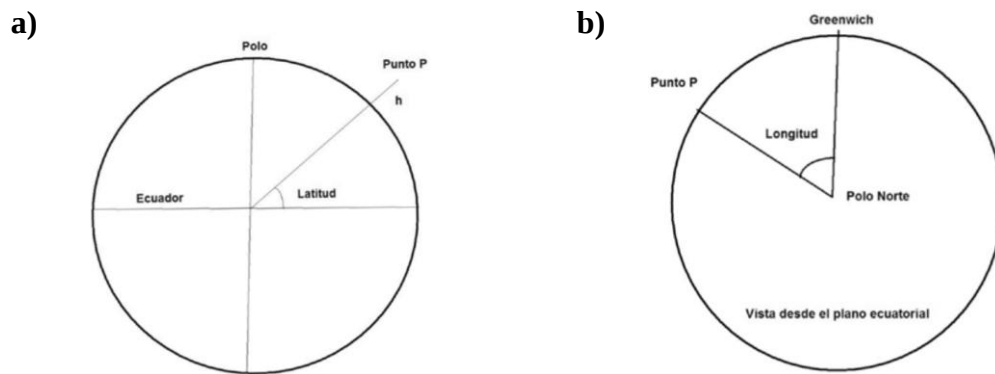


Figura 7.4 a) Latitud, b) Longitud

Tabla 7.2 Número máximo de horas del sol, Fuente: Instituto Nacional de Vías (2018)

Latitud Norte°	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
Latitud Sur°	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun
50	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.9	11.1	9.8	9.1
40	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3

Latitud Norte°	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
Latitud Sur°	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun
35	10.1	11	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20	11	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0° Ecuador	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

7.1.2. Cálculo del exceso (EXC) y del déficit (DEF)

Para el cálculo del exceso y déficit, es necesario introducir los términos de “reserva” y “reserva máxima” del suelo, variables de las cuales depende la determinación de estos.

La reserva es la capacidad de almacenamiento (A) que tienen los suelos. Cuando en un mes se produzcan más entradas que salidas ($Precipitación > ETP$) el agua sobrante se almacenará en el suelo; por el contrario, cuando las salidas sean mayores que las entradas la reserva del suelo se reducirá, (Instituto Nacional De Vías, 2008).

La capacidad de almacenamiento del suelo no es ilimitada y cuando se alcanza su capacidad de retención, el agua añadida en “exceso” escurrirá superficialmente o en profundidad. Por tanto, es importante conocer el concepto de “reserva máxima (A_{max})” o cantidad de agua por unidad de superficie (mm) que el suelo es capaz de almacenar en su perfil.

Se toma el valor de cien (100) mm (100 litros/m²) para reserva máxima como referencia climática. Así el Índice de Thornthwaite es útil para comparaciones climáticas entre distintas zonas (independientemente del tipo de suelo y vegetación).

El cálculo de la reserva o almacenamiento del suelo se realiza teniendo en cuenta la siguiente, Ec. 7.3, (Instituto Nacional De Vías, 2008):

$$A_i = \begin{cases} A_{i-1} + (P_i - ETP_i), & \text{Si } 0 < A_{i-1} + (P_i - ETP_i) < A_{m\acute{a}x} \\ A_{m\acute{a}x} & , \text{ Si } A_{i-1} + (P_i - ETP_i) \geq A_{m\acute{a}x} \\ 0 & , \text{ Si } A_{i-1} + (P_i - ETP_i) \leq 0 \end{cases} \quad \text{Ec. (7.3)}$$

Donde:

i : Mes para el cual se está efectuando el cálculo

A_i : Almacenamiento o reserva del mes i , mm.

A_{i-1} : Almacenamiento o reserva del mes anterior, mm

P_i : Precipitación del mes i , (se obtiene de las estaciones meteorológicas), mm

ETP_i : Evapotranspiración potencial mensual del mes i , ya calculada

$A_{m\acute{a}x}$: Reserva máxima del suelo = 100 mm (100 litros/m²)

$$EXC_i = \begin{cases} A_{i-1} + P_i - ETP_i - A_{m\acute{a}x} & , \text{ Si } A_{i-1} + P_i - ETP_i > A_{m\acute{a}x} \\ 0 & , \text{ Si } A_{i-1} + P_i - ETP_i \leq A_{m\acute{a}x} \end{cases} .$$

$$DEF_i = \begin{cases} A_{i-1} + P_i - ETP_i - A_{m\acute{a}x} & , \text{ Si } A_{i-1} + P_i - ETP_i < 0 \\ 0 & , \text{ Si } A_{i-1} + P_i - ETP_i \geq 0 \end{cases} .$$

El trabajo de Thornthwaite ha sentado las bases para una comprensión más completa del clima y su impacto en el medio ambiente. Su enfoque centrado en la evapotranspiración potencial.

7.1.3. Cálculo del Índice de Thornthwaite (IT) en relación con el contenido de humedad del suelo.

El Índice de Thornthwaite (IT) como se mencionó anteriormente es una herramienta que permite evaluar las condiciones climáticas y su impacto en el contenido de humedad de los suelos. En este estudio, se analizó la relación que existe entre el IT y el contenido de agua en muestras de suelo antes y después de ser compactadas, considerando el punto óptimo de humedad como referencia. Además, se clasificaron los suelos según su grado de humedad utilizando los rangos establecidos por el IT, lo que permitió entender cómo las variaciones en el contenido de agua afectan las propiedades del suelo durante los procesos de secado y humedecimiento.

7.2.Relación con respecto al contenido de agua optimo.

Se debe de definir el contenido de agua optimo al 45% (para efectos de parametrización se toma este valor), que corresponde a una condición, que respecto a la tabla del IT se clasifica como ligeramente húmedo el cual se encuentra en un rango entre 20 y 40. A partir de este valor, se establece una escala porcentual, que relacione el contenido de agua con las categorías establecidas de acuerdo al IT, como se muestra en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3 Clasificación para este proyecto.

Nomenclatura	IT	% Respecto al contenido de agua
Árido	>100	<10
Semiárido	80 a 100	10 a 20
Subhúmedo-Seco	60 a 80	20 a 30
Subhúmedo-Húmedo	40 a 60	30 a 40
Ligeramente Húmedo	20 a 40	40 a 50
Moderadamente Húmedo	0 a 20	50 a 60
Húmedo	-20 a 0	60 a 70
Muy Húmedo	-40 a -20	70 a 80
Excesivamente Húmedo	< -40	>80

7.3.Determinar la relación entre el contenido de agua (W%)y el Índice de Thornthwaite (IT).

Para lograr establecer esta relación, se hará a través de los datos experimentales una relación entre los días de secado y los de humedecimiento, en el cual se ajustará un modelo de regresión lineal para en donde $w(\%) = a \cdot IT \pm b$, en donde se calculará el nivel de confianza para los parámetros a y b , así como encontrar la relación lineal inversa entre el IT y el contenido de agua del suelo. Es decir, a mayor IT (Clima secos), el contenido de humedad del suelo es menor y viceversa.

7.4.Cálculo de la diferencia en el contenido de agua antes y después de ser compactados.

Para poder evaluar cómo puede variar el contenido de agua durante el proceso de compactación, referente a los días de secado y los días de humedecimiento se calcula diferencia (D) entre el contenido de agua antes de ser ensayados (AE) y después de ser compactados (DC), esta diferencia nos va a permitir conocer si el suelo aumento o tuvo una pérdida de humedad, Ec.7.4.

$$D = |AE - DC| \quad Ec. (7.4)$$

Donde:

D	Diferencia entre pruebas (%)
AE	Contenido de agua antes de ser ensayados (%)
DC	Contenido de agua después de ser compactados. (%)

7.5. Calcular el porcentaje respecto al contenido óptimo.

Utilizando una regla de tres, se determina el porcentaje de agua con respecto a su valor óptimo (CO)

$$\%CO = (D \times 100) / w_{optm} \quad .$$

Donde:

CO	Porcentaje de agua con respecto a su valor óptimo (%)
D	Diferencias entre pruebas (%)
w_{optm}	Contenido de agua óptimo del suelo. (%)

7.6. Establecimiento del IT y ajuste de parámetros.

Con base en un criterio adoptado, se asignó al contenido óptimo un IT de 30 con un porcentaje relativo del 45%. Posteriormente dependiendo de su clasificación si estuvo secándose o se humedeció se sumó o resto un valor de 45 para ajustar la relación entre el IT y la humedad del suelo:

- Si es suelo estuvo sometido a un secado, se resta 45 para ajustar la relación entre el IT y la humedad del suelo.
- Si el suelo estuvo sometido a un humedecimiento, se suma 45 para reflejar el aumento en la retención de agua.

Se eligió este valor porque al utilizar cualquier otro número distinto, el contenido de agua óptimo ya no quedaría en la clasificación de ligeramente húmedo, lo que se vería afectado y por ende la coherencia de la relación establecida. Es decir, un valor diferente haría que el contenido óptimo se desplazara a categorías que no corresponden a su clasificación real dentro de la escala de humedad del suelo.

De este análisis, se puede obtener el siguiente postulado.

"El contenido de humedad del suelo en función de su estado climático puede ser representado mediante una relación con el Índice de Thornthwaite, en donde el contenido de agua óptimo se define como el punto de referencia y las variaciones de humedad antes y después de la compactación determinan su clasificación climática. Esta relación permite ajustar empíricamente la influencia del clima en el comportamiento mecánico del suelo mediante un factor de corrección basado en el IT, que parametriza la tendencia de secado o humedecimiento respecto a su estado óptimo".

7.7. Succión y humedad del suelo.

El potencial total de humedad del suelo (ϕ) es una variable termodinámica. Para condiciones isotérmicas es idéntica a la energía libre relativa de la humedad del suelo. La retención de humedad en los suelos y el gradiente que provoca el flujo de humedad se pueden expresar cuantitativamente en términos de energía libre relativa de la humedad del suelo (Richards, 1965a).

Por conveniencia, la energía libre generalmente se cita como un potencial equivalente o succión a la misma temperatura (Richards, 1965).

Las siguientes ecuaciones muestran los componentes del potencial total.

$$\phi = z + \psi \quad .$$

Donde:

z : Potencial gravitacional

ψ : Succión total = $h_m + h_s$

Donde:

h_m : Matricial = $U_a + U_w$

h_s : Succión de soluto o presión osmótica debido a sales disueltas

U_a : Presión de poro (aire).

U_w : Presión de poro (agua).

Sustituyendo $U_a + U_w$ para h_m . En la última ecuación, y asumiendo que el potencial gravitacional es cero, el potencial total (Richards, 1965), se puede expresar como:

$$\phi = \psi = (U_a + U_w) + h_s.$$

Para fines prácticos, en la ingeniería comúnmente se supone que la succión es insignificante debido al contenido de humedad (Fredlund y Rahardjo, 1993). En esos casos, se puede omitir la succión y la última ecuación se puede describir en términos de succión matricial únicamente.

$$\psi = U_a + U_w \quad .$$

Muchas veces es común que la presión del aire de poro es igual a la presión atmosférica. Para tales casos $U_a = 0$ y el potencial total es simplemente igual a la presión negativa del agua de poro U_w (Fredlund y Rahardjo, 1993).

$$\psi = -U_w \quad .$$

7.8.Descripción del movimiento de humedad en suelos parcialmente saturados.

El flujo de humedad a través de suelos saturados y no saturados está impulsado por el gradiente de potencial o, en otras palabras, por el gradiente de carga hidráulica, (Fredlund y Rahardjo, 1993). El gradiente de carga hidráulica se compone de un gradiente de carga de presión y un gradiente de carga de elevación en condiciones isotérmicas, es decir, $d\phi/dx = d(z + \psi)/dx$. Cuando se omite el gradiente de elevación y el gradiente de presión del aire es cero, para los suelos, el gradiente de succión matricial es numéricamente igual al gradiente de carga hidráulica. Dado que estas condiciones son muy comunes en la naturaleza, la succión matricial ($h_m = U_a + U_w$) se usa ampliamente en ecuaciones de flujo, (Bishop, 1959). La succión matricial es una variable independiente del estado de tensión que también afecta la conductividad hidráulica.

La ley de Darcy gobierna el flujo de agua en suelos saturados:

$$v = -k \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad Ec. (7.5)$$

Donde:

v : Velocidad del agua

k : Conductividad hidráulica (una constante para un suelo saturado)

$\frac{\partial \phi}{\partial x}$: Gradiente de potencial o carga total en la dirección.

La ley de Darcy también es aplicable a suelos no saturados. En suelos no saturados la presencia de dos fluidos (agua y aire) da como resultado flujos asociados con agua, vapor

de agua y aire. La conductividad hidráulica, k , ya no es una constante y es función del contenido de agua o de la succión del suelo. Por tanto, la ley de Darcy se puede modificar de la siguiente manera:

$$v = -k(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial X}.$$

Donde:

θ : Contenido volumétrico de agua,

$k(\theta)$: Conductividad hidráulica en función de θ .

Nota: Por conveniencia, k normalmente se expresa en términos de h_m . El SWCC relaciona θ y h_m .

La ley de Darcy modificada se combina con la ley de continuidad para producir la ecuación de difusión. En tres dimensiones la ecuación de difusión dice:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial h}{\partial \theta} \nabla k(\theta) \cdot \nabla \phi.$$

Dónde:

h : Succión total, o succión matricial en suelos libres de sal

t : Tiempo

Asumiendo que $\frac{\partial h}{\partial \theta}$ es relativamente constante en todo el rango de succión considerado; la última ecuación puede reducirse a una forma conveniente como se muestra a continuación. Esta forma de ecuación es útil en el modelado numérico de flujo no saturado cuando se modela con métodos de elementos finitos (Fredlund y Rahardjo, 1993).

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla D \nabla \phi.$$

Donde:

D : Difusividad $= D(h) = \frac{\partial h}{\partial \theta} k(h)$

∇ : Operador matemático $= \left(\frac{\partial}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_3} \right)$

Houston et al. (2006), en el reporte NCHRP 09-23 (Part 2), resolvieron numéricamente la última ecuación o ecuaciones similares al modelar el flujo no saturado bajo áreas cubiertas (Barbour et al. 1996b; Richards, 1965a).

El valor de D en la ecuación depende del tipo de suelo, la humedad previa y el historial de estrés. Las condiciones de contorno de la ecuación son funciones de factores ambientales: temperatura, precipitación, evapotranspiración, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento. Richards, (1965a) realizó un análisis numérico de las condiciones de la subrasante de un sitio de carretera en Australia (Aitchison y Richards 1965a, b,c,d) utilizando una ecuación de difusión bidimensional similar a la última ecuación mostrada.

En la investigación de Aitchison y Richards (1965a, b,c,d), los valores medidos se compararon con la solución informática. En donde se tuvo un acuerdo razonable, especialmente debajo de la acera. Este experimento indicó que el movimiento vertical de la humedad controlaba el perfil de humedad debajo de la línea central de la carretera; la tasa de cambio de succión bajo el pavimento fue extremadamente lenta dando condiciones prácticamente estables. En contraste, los bordes del pavimento mostraron condiciones mucho más húmedas debido a una excesiva infiltración a través de los arcones, pero las variaciones estacionales parecieron insignificantes, en el cual no afectaba los resultados obtenidos.

7.9. Análisis de las condiciones que permiten el almacenamiento de la humedad en áreas protegidas de la lluvia directa y la evaporación.

Los estudios realizados sobre las condiciones de humedad bajo áreas cubiertas indicaron que el contenido de humedad debajo de los pavimentos tiende a aumentar con el tiempo, en comparación con los valores de colocación iniciales, y eventualmente alcanza una condición de equilibrio Aitchison y Richards (1965a, b,c,d).

Así como Janssen y Dempsey (1981) observaron que, en suelos que se ubican en la capa de la subrasante, hay una tendencia del agua a moverse verticalmente cuando hay un nivel freático hasta que se alcanza el equilibrio. Basma y Al-Suleiman (1991) conforme a sus investigaciones presentaron rangos aproximados de contenidos de humedad de equilibrio para diferentes suelos de carreteras.

Basma y Al-Suleiman (1991) basados en el trabajo de Janssen y Dempsey, (1986) como se muestra en la Tabla 7.4. Donde sugieren utilizar esta tabla para predecir el contenido de humedad debajo de los pavimentos con fines de diseño, pero no descarta la experimentación para establecer una mejor relación, con el suelo a estudiar.

Tabla 7.4 Rango aproximado para el contenido de humedad en equilibrio.

Tipo de suelo	Densidad seca máxima (pcf)	Contenido de humedad optimo (%)	Contenido de humedad en equilibrio (%).
Arena gruesa	120-135	8-13	10-15
Arena media	110-125	10-14	13-17
Arena fina	105-120	12-16	15-20
Limo	100-120	14-21	20-30
Arcilla	85-110	16-30	25-35

Los estudios realizados en regiones frías indicaron que se producen variaciones estacionales del contenido de humedad en bases granulares y subrasantes, especialmente debido a las condiciones de deshielo primaveral. Con base en pruebas de laboratorio y mediciones de campo realizadas en Canadá, Eigenbrod y Kennepohl (1996) indicaron que bajo ciertas condiciones de temperatura en el suelo debajo del pavimento, el agua se acumula debido a la condensación en la interfaz base-pavimento. Si la temperatura en la interfaz era de -1 a -2°C , esta temperatura era suficientemente alta para proporcionar cantidades significativas de agua de condensación, pero lo suficientemente baja como para permitir la congelación del agua condensada. La acumulación de agua condensada que posteriormente se congela puede provocar una sobresaturación de la subbase.

7.10. Estimación de los parámetros para materiales compactados.

Para poder entender los parámetros del suelo en condiciones saturadas necesitamos 3 parámetros importantes como lo es la densidad máxima seca (γ_{dmax}), la gravedad específica (G_s) y el contenido de humedad gravimétrico optimo (W_{opt}).

Y a partir de estos 3 parámetros es posible llegar a calcular el contenido de humedad optimo volumétrico (θ_{opt}), la saturación optima (S_{opt}) y el contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas (θ_{sat}) de acuerdo a las siguientes ecuaciones, Ec.7.6

$$\theta_{opt} = \frac{W_{opt} \times \gamma_{dmax}}{\gamma_w} \quad \text{Ec. (7.6)}$$

Donde:

θ_{opt} : Contenido de humedad optimo volumétrico adimensional.

γ_w : Densidad o masa unitaria del agua (aproximadamente 1000 kg/m³).

W_{opt} : Contenido de humedad óptimo adimensional.

γ_{dmax} : Densidad o masa unitaria máxima (kg/m³).

$$S_{opt} = \frac{\theta_{opt}}{1 - \frac{\gamma_{dmax}}{\gamma_w \times G_s}} \quad Ec. (7.7)$$

Donde:

S_{opt} : Saturación optima adimensional.

G_s : Gravedad específica, adimensional.

$$\theta_{sat} = \frac{\theta_{opt}}{\theta_{sat}} \quad Ec. (7.8)$$

Donde:

θ_{sat} : Contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas, adimensional.

El contenido de humedad volumétricos son relaciones volumen a volumen, en este sentido podemos entender esta relación al definir el contenido de humedad volumétrico (θ_w) que por definición es:

$$\theta_w = \frac{V_w}{V_T} \quad .$$

Donde:

V_w : Volumen de agua en los vacíos.

V_T : Volumen total de la muestra.

7.11. Curva característica del suelo (SWCC)

La relación entre la succión del suelo y el grado de saturación, se le conoce como curva característica (SWCC), esta se determina a través del ensayo de laboratorio, como por ejemplo el más común el papel filtro.

Si bien la rama seca es diferente a la rama húmeda, conocida como la histéresis de la SWCC, en este estudio, se utilizará únicamente la curva de seca de la SWCC, omitiendo

el fenómeno de histéresis, con el fin de simplificar el modelo y enfocarse en la relación general entre succión y contenido de humedad. Además, en aplicaciones prácticas de pavimentos, es común usar solo la curva seca, ya que representa adecuadamente el comportamiento del suelo bajo condiciones típicas de campo.

Después de obtener la succión matricial de cada una de las capas del pavimento en el periodo de diseño y con la curva características del suelo (SWCC) en particular, conocer el grado de saturación de cada una de las capas del pavimento en el periodo de diseño. El comportamiento de la SWCC a cada capa del pavimento, está relacionada al tipo de suelo, la cantidad de finos y su índice de plasticidad. Para poder relacionar matemáticamente podemos utilizar las ecuaciones de (Fredlund y Xing 1994).

$$\theta_w = c(h) \times \left[\frac{\theta_{sat}}{\left[\ln \left[\exp + \left(\frac{h}{a_f} \right)^{b_f} \right] \right]^{c_f}} \right]$$

De donde $c(h)$

$$c(h) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{h_r} \right)} \right]$$

Donde:

- h : Succión matricial anual, (kPa).
- θ_w : Contenido de humedad volumétrico anual, (%).
- θ_{sat} : Contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas, (%).
- a_f : Parámetro de ajuste de la SWCC, el cual es principalmente una función del valor de entrada de aire en el suelo, (kPa).
- b_f : Parámetro de ajuste de la SWCC, el cual es principalmente una función de la velocidad de extracción de agua desde el suelo una vez el valor de entrada de aire ha sido excedido.
- c_f : Parámetro de ajuste de la SWCC, el cual es principalmente una función del contenido de agua residual
- h_r : Parámetro de ajuste de la SWCC, el cual es principalmente una función de la succión cuando el contenido de agua residual es alcanzado, (kPa).

En este sentido los parámetros de ajuste de la SWCC pueden ser obtenidos mediante experimentos directos o partir de correlaciones con otros parámetros del suelo, como la

granulometría del material y el índice de plasticidad ponderado (wPI), como se muestra en el siguiente Fig. 7.5.

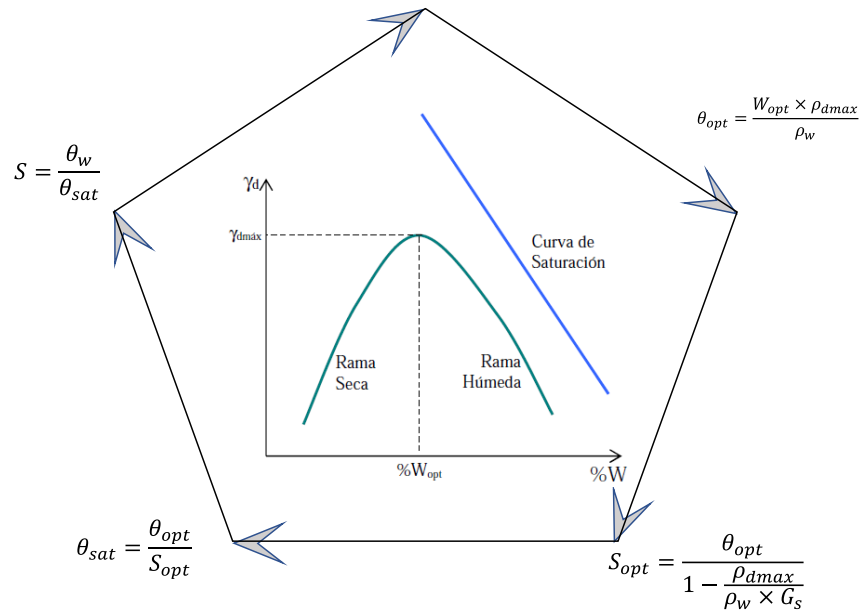


Figura 7.5 Metodología INVIAS

Finalmente, el grado de saturación (Sr), se define como la relación.:

$$Sr = \frac{\theta_w}{\theta_{sat}}.$$

Donde:

Sr : Grado de saturación anual, adimensional.

θ_w : Contenido de humedad volumétrico (%)

θ_{sat} : Contenido de humedad volumétrico en condiciones saturadas (%)

Así como Fredlund & Xing (1994) propusieron una formulación para describir la relación entre el contenido de agua como se explicó anteriormente y la succión en suelos no saturados, Zapata (2006) desarrolló su propio modelo a partir de una adaptación de dicha ecuación. Por esta razón, en la presente investigación se realiza una comparación entre la formulación propuesta por Zapata (2006) y el modelo de Fredlund & Xing (1994), con el objetivo de representar la relación entre el contenido de agua y la succión en suelos no saturados.

La comparación se lleva a cabo mediante el ajuste de ambas ecuaciones a los datos disponibles, evaluando su capacidad para reproducir la curva característica del suelo (SWCC) en términos de grado de saturación y succión. El análisis considera el

comportamiento de cada modelo en distintos rangos de succión y condiciones de saturación, así como la sensibilidad de sus parámetros.

Los resultados permiten identificar las diferencias en el desempeño de ambas formulaciones y determinar su aplicabilidad en la representación del comportamiento hidráulico del suelo dentro del contexto del presente estudio. La selección de estas ecuaciones se fundamenta en que el modelo de Fredlund & Xing es una formulación clásica ampliamente utilizada, mientras que el modelo de Zapata es empleado en el EICM, descrito en capítulos anteriores

7.12. Relación entre el grado de saturación en función de la succión.

La relación que existe entre el grado de saturación (S_r) y la succión del suelo (ψ) representa un punto importante en este estudio, pues se puede describir mediante modelos matemáticos (ecuación de Van Genuchten) y relaciones gravimétricas del suelo, esto con el objetivo de poder entender como el suelo se retiene o libera agua en función de la succión, y lo podemos establecer mediante la siguiente conexión.

Primero definamos a la ecuación de Van Genuchten Ec.7.9, la cual podemos relacionarla con el contenido de agua volumétrica normalizada θ , y la succión ψ .

$$\theta = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m \quad \text{Ec. (7.9)}$$

Podemos reescribirlo como.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) = [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}$$

Donde:

θ : Contenido de agua volumétrica del suelo

θ_r : Contenido de agua residual.

θ_s : Contenido de agua a saturación (capacidad de campo)

Ψ : Succión del suelo (Presión negativa en Pa)

α : Parámetro de ajuste que controla la posición de la curva relacionado con la inversa con la succión de entrada de aire.

n : Parámetro de forma que controla la pendiente de curva.

m : Parámetro de ajuste definido como $m = 1 - \frac{1}{n}$

Teniendo en cuenta esto, calculamos el grado de saturación en función de la succión del suelo. Para esto debemos de tener en cuenta los términos del grado de saturación (S_r), el contenido de agua volumétrica (θ) y la porosidad del suelo (η)

El grado de saturación la definimos como, Ec.7.10:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad Ec. (7.10)$$

Donde:

S_r : Grado de saturación.

V_w : Volumen de agua en el suelo.

V_v : Volumen de vacíos en el suelo.

Contenido de agua volumétrica, Ec.7.11.

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad Ec. (7.11)$$

Donde:

θ : Contenido de agua volumétrica

V_w : Volumen de agua en el suelo.

V_t : Volumen total del suelo.

Porosidad, Ec.7.12.

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} \quad Ec. (7.12)$$

η : Porosidad del suelo.

V_v : Volumen de vacíos.

V_t : Volumen total del suelo.

Relaciónanos el grado de saturación y contenido de agua:

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} \therefore V_v = \eta \cdot V_t$$

Relación del grado de saturación con el volumen de agua:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}, V_v = \eta \cdot V_t \therefore S_r = \frac{V_w}{\eta \cdot V_t}$$

Expresamos V_w en términos de θ .

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \therefore V_w = V_t \cdot \theta$$

Sustituimos en la ecuación de S_r .

$$S_r = \frac{V_t \cdot \theta}{\eta \cdot V_t} = \frac{\theta}{\eta}$$

En este sentido, logramos introducir la porosidad, pero para poder establecer una relación directa con el contenido de agua a saturación empezamos definiendo la porosidad.

La porosidad es una propiedad geométrica del suelo que describe la fracción del volumen total que está ocupada por vacíos (espacios porosos). Estos vacíos pueden contener agua y/o aire. La porosidad se define matemáticamente como, Ec.58. Entonces podemos decir que la porosidad es el porcentaje del volumen total que está disponible para ser ocupado por fluidos (agua o aire).

Ahora podemos definir el contenido de agua a uno completamente saturado.

El contenido de agua saturado (θ_s) es el contenido de agua volumétrico del suelo cuando todos los poros están llenos de agua. En esta condición, no hay aire en los poros, y la fracción del volumen total ocupada por agua es igual a la fracción de vacíos. Matemáticamente, el contenido de agua saturado se define como:

$$\theta_s = \frac{V_w}{V_t} \text{ Cuando } V_w = V_v$$

Donde

V_w : Volumen de agua en el suelo (que en condiciones de saturación es igual al volumen de vacíos, V_v).

Por lo tanto, cuando el suelo está completamente saturado, el volumen de vacíos es igual al volumen de agua ($V_w = V_v$), y el contenido de agua saturada representa la misma fracción volumétrica que la porosidad.

Esto implica que la porosidad, que es la fracción del volumen total ocupada por vacíos, se vuelve a la fracción del volumen total ocupada por agua:

$$\theta_s = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_v}{V_t} = \eta$$

Donde la porosidad (η) y el contenido de agua saturado (θ_s) son iguales cuando el suelo está completamente saturado.

En este caso, la porosidad es igual a la máxima cantidad de agua que el suelo puede almacenar en sus vacíos, lo que se refleja en el contenido de agua a saturación.

Para poder explicarlo de mejor manera, tomamos la ecuación antes explicada. donde obtenemos.

$$\theta_s = \frac{V_v}{V_t} = \eta$$

Por lo tanto: $\theta_s = \eta$

Es importante destacar que la igualdad anterior solo se cumple en suelos completamente saturados. Cuando el suelo no está saturado, θ (el contenido de agua volumétrico) será menor que η (porosidad), porque el volumen de vacíos estará parcialmente lleno de agua y parcialmente lleno de aire. Entonces tendremos $\theta < \theta_s = \eta$

Por lo que podemos decir que en condiciones de saturación $\theta_s = \eta$ y esta igualdad se debe a que un suelo completamente saturado, todos los vacíos están llenos de agua, y por lo tanto la fracción del volumen total ocupada por agua es igual a la fracción del volumen total ocupada por vacíos y es qui donde podemos decir que $S_r = \frac{\theta}{\theta_s}$.

Teniendo ya establecida esta relación podemos tomar la ecuación de Van Genuchten para el contenido de agua, tomamos la ecuación decimos que:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}$$

Y sabemos que:

$$S_r = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)$$

Entonces sustituimos S_r en la ecuación de Van Genuchten,

$$S_r = \frac{[\theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}] - \theta_r}{(\theta_s - \theta_r)}$$

Simplificando obtenemos, Ec.7.13

$$S_r = [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \quad \text{Ec. (7.13)}$$

Esta ecuación muestra cómo el grado de saturación cambia con la succión. Los términos en la ecuación tienen el siguiente significado:

- Cuando la succión (ψ) es muy baja (cercana a cero), el grado de saturación es alto y se aproxima a 1, indicando un suelo completamente saturado.

- Cuando la succión aumenta, el valor de $(\alpha \cdot \psi)^n$ se incrementa y el grado de saturación disminuye, reflejando un desecamiento del suelo. A valores altos de succión, S tiende a un valor cercano a cero, indicando un suelo prácticamente seco.

Entonces podemos establecer que el grado de saturación depende directamente de la succión del suelo (ψ), y esta relación se controla por los parámetros α , n y m y podemos decir que:

- A baja succión (ψ pequeña), $S_r \approx 1$, indicando que el suelo está saturado.
- A medida que la succión aumenta, el grado de saturación disminuye.
- Para succión muy alta, $S_r \approx 0$, reflejando un suelo casi seco.

7.13. Interpretación matemática de la ecuación.

Para poder comprobar esta solución es necesario analizarla desde una forma matemática, pero para esto debemos tomar la Ec.7.13, en función de la succión y tomamos el logaritmo natural de ambos lados y en donde se obtiene:

$$\ln S_r = -m \ln[1 + (\alpha\psi)^n]$$

Con esto se logra facilitar la diferenciación, después derivamos ambos lados con respecto a la ψ . En este punto debemos recordar que $\frac{d}{d\psi} \ln S_r = \frac{1}{S_r} \frac{dS_r}{d\psi}$, de la cual obtenemos:

$$\frac{1}{S_r} \frac{dS_r}{d\psi} = -m \cdot \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \cdot n(\alpha + \psi)^{n-1}$$

Multiplicamos ambos lados por el S_r llegando a lo siguiente:

$$\frac{dS_r}{d\psi} = -mn(\alpha + \psi)^{n-1} \cdot \frac{S_r}{1 + (\alpha\psi)^n}$$

Ahora para poder expresar la función en términos de $1 + (\alpha\psi)^n$ la función original las podemos reescribir como:

$$S_r = [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \Rightarrow 1 + (\alpha\psi)^n = S_r^{-1/m}$$

Por lo que podemos sustituir en la ecuación derivada.

$$\frac{dS_r}{d\psi} = -mn(\alpha\psi)^{n-1} S_r \cdot S_r^{-1/m} = -mn(\alpha\psi)^{n-1} S_r^{1+\frac{1}{m}}$$

En este sentido se nos muestra que $S_r(\psi)$ satisface la siguiente ecuación diferencial,

$$\frac{dS_r}{d\psi} = -mn(\alpha\psi)^{n-1}S_r^{1+\frac{1}{m}}$$

Ahora para poder confirmar que la función dada es la solución, podemos partir de la ecuación diferencial establecida y poder demostrar que su integración conduce a la forma original de $S_r(\psi)$.

Primero iniciamos con la separación de las variables y escribimos la ecuación diferencial de forma separable.

$$\frac{dS_r}{S_r^{1+\frac{1}{m}}} = -mn(\alpha\psi)^{n-1}d\psi$$

Considerando la integral, integramos del lado izquierdo.

$$\int S_r^{1-\frac{1}{m}} dS_r$$

Ahora se ve que podemos utilizar la regla de integración para potencias, donde obtenemos la siguiente ecuación.

$$\int S_r^{1-\frac{1}{m}} dS_r = \frac{S_r^{-\frac{1}{m}}}{-\frac{1}{m}} = -mS_r^{-\frac{1}{m}} + C_1$$

Ahora integraremos del lado derecho, con el cambio de variable donde $u = \alpha + \psi$, de donde $du = d\psi$. La integral se convierte en:

$$-mn \int u^{n-1} du = -mn \frac{u^n}{n} + C_2 = -m(\alpha\psi)^n + C_2$$

Después de igualar las integrales y de determinar la constante igualamos ambas expresiones de lo que resulta en:

$$-mS_r^{-\frac{1}{m}} = -m(\alpha\psi)^n + C$$

Donde C absorbe la diferencia de las constantes C_1 y C_2 ahora dividiendo entre -m (asumiendo $m \neq 0$) de la cual obtenemos, Ec.7.58:

$$S_r^{-\frac{1}{m}} = (\alpha\psi)^n - \frac{C}{m}$$

Detonamos que $K = \frac{C}{m}$, donde se puede reescribir:

$$S_r^{-\frac{1}{m}} = (\alpha\psi)^n - K$$

En este punto se considera una imposición de condición inicial, donde se considera una condición típica es que cuando $\psi = -\alpha$, de la cual obtenemos:

$$S_r(-\alpha) = [1 + (\alpha - \alpha)^n]^{-m} = [1 + 0]^{-m} = 1$$

Sustituyendo en la ecuación integrada obtenemos:

$$1^{-1/m} = 1 = (0)^n - K \Rightarrow K = -1$$

Por lo tanto, la relación quedaría de la siguiente manera:

$$S_r^{-\frac{1}{m}} = (\alpha\psi)^n + 1$$

Finalmente, elevando a la potencia $-m$ en ambos lados en la cual se obtiene la siguiente ecuación, Ec.7.14:

$$S_r = [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \quad \text{Ec. (7.14)}$$

Lo que coincide exactamente con la función original.

Ahora se explica la imposición que se tomó y su propia justificación de la misma, en la $K = \frac{C}{m}$ donde K como se explicó anteriormente es la combinación de las integrales, C_1 y C_2 . Para elegir el valor de K, se necesita una condición inicial, para este caso se elige de manera que la función $S_r(\psi)$ tenga un valor conocido en un punto específico. Esto es muy común en las ecuaciones diferenciales, donde las condiciones iniciales permiten determinar las constantes de integración.

Para esto se elige evaluar la función $S_r(\psi)$ en $\psi = -\alpha$. Esto es una elección natural por los siguientes dos puntos.

1. Se simplifica la expresión $(\alpha + \psi)$ a 0.
2. Se puede calcular $S_r(-\alpha)$ de manera explícita.

Ahora calculamos $S_r(-\alpha)$, ahora sustituimos $\psi = -\alpha$ en la función original:

$$S_r(-\alpha) = [1 + (\alpha + \psi)^n]^{-m} = [1 + 0^n]^{-m} = [1 + 0]^{-m} = 1^{-m} = 1$$

Por lo tanto, se sabe que:

$$S_r(-\alpha) = 1$$

En donde podemos justificar, que la elección de la condición inicial $\psi = -\alpha$ es apropiada, por los siguientes puntos:

1. Se simplifica la expresión $(\alpha + \psi)$ a 0, lo que facilita el cálculo de $S_r(-\alpha)$.
2. Se puede determinar la constante de integración K de manera explícita.

Lo cual se puede determinar que $K=-1$, es consistente con la función original y asegura que la solución integrada coincida con la forma inicial de $S_r(\psi)$.

7.14. Succión.

La succión del suelo es la energía con la que el agua esta retenida en los poros del suelo. En suelos no saturados, esta succión la podemos comprender como dos factores principales la succión matricial (ψ_m) y la succión osmótica (ψ_o), la primera es originada por la atracción entre las partículas del suelo y agua y la segunda se relaciona con la concentración de solutos que habitan en el agua.

Para poder interpretar como funciona el agua o cuál es su comportamiento en los suelos no saturados, se utilizan ecuaciones empíricas como lo es la ecuación de Van Genuchten, que relaciona la succión (ψ) con el contenido volumétrico del agua (θ), la ecuación general mostrada anteriormente Ec.7.9, esto con el objetivo de despejar la succión, entonces partimos de la siguiente ecuación, Ec.7.15.

$$[1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} = \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \quad \text{Ec. (7.15)}$$

Elevamos de los dos lados a la $1/m$

$$([1 + (\alpha\psi)^n]^{-m})^{\frac{1}{m}} = \left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{\frac{1}{m}}$$

$$[1 + (\alpha\psi)^n] = \left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{\frac{1}{m}}$$

Llegando a:

$$[(\alpha\psi)^n] = \left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{\frac{1}{m}} - 1$$

Elevamos de los dos lados a la $1/n$

$$[(\alpha\psi)^n]^{\frac{1}{n}} = \left(\left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}}$$

$$(\alpha\psi) = \left(\left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}}$$

Quedando la succión de la siguiente manera:

$$\psi = \frac{1}{\alpha} \left(\left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}}$$

Ahora esta ecuación la sustituiremos en la ecuación, resultando en:

$$S_r = \left[1 + \left(\alpha \left(\frac{1}{\alpha} \left(\left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \right) \right)^n \right]^{-m}$$

$$S_r = \left[1 + \left(\left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{\frac{1}{m}} - 1 \right) \right]^{-m}$$

$$S_r = \left[\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right]^{-m/m}$$

Terminamos en la Ec.7.16.

$$S_r = \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \quad \text{Ec. (7.16)}$$

Para poder simplificar el termino dentro del corchete y con esto podemos comprobar que la sustitución es válida, puesto que se obtiene una expresión coherente con la definición efectiva en términos de contenido de humedad. Un punto importante para poder corroborar una ecuación son el dominio, así como sus unidades lo que explicaremos a continuación.

Para el dominio la succión (ψ) en suelos completamente saturados ($\theta = \theta_s$), la succión es muy baja ($\psi \rightarrow 0$), y $S_r = 1$. Mientras que para valores bajos de humedad ($\theta \rightarrow \theta_r$), la succión se volvió muy grande, lo que implica que S_r se aproxima a un valor residual, pero nunca llega a 0.

Para el dominio de S_r este, esta cotado entre 0 y 1, lo que es coherente con su definición de saturación efectiva. Si la sustitución en algún punto alterara este rango se indica que es un problema en la coherencia matemática, pero como se demostró anteriormente, el resultado final sigue dentro del intervalo valido.

Un punto importante son las unidades pues con ellas podemos verificar exista coherencia entre las ecuaciones para la succión se establece que tiene unidades de presión (KPa o Mpa, dependiendo de la escala de análisis), α tiene unidades inversas de ψ (Pa^{-1} o kPa^{-1}), por lo que el termino $\alpha\psi$ es adimensional, mientras que θ , θ_s y θ_r son

fracciones volumétricas de agua (m^3/m^3), lo que hace que S_r sea una cantidad adimensional.

Una vez establecida la metodología para estimar la succión a partir del Índice de Thornthwaite, se realiza una comparación con el modelo de Van Genuchten, con el objetivo de representar la relación entre el grado de saturación de (S_r) y la succión (ψ) en suelos no saturados.

En primer término, se ajusta la ecuación de Van Genuchten a los datos experimentales de S_r - ψ , mediante la estimación de sus parámetros α , n y m , obteniendo una curva de referencia que represente de manera óptima el comportamiento hidráulico del suelo. Este ajuste se realiza mediante un procedimiento de optimización implementado en MATLAB.

Posteriormente, el modelo basado en el Índice de Thornthwaite se formula utilizando parámetros k e IT_0 para cada tipo de suelo. Dicho modelo es alineado con la curva obtenida por Van Genuchten mediante el ajuste de sus parámetros de mapeo, con el objetivo de lograr una superposición funcional y visual entre ambas curvas y transferir la precisión del ajuste experimental al modelo IT.

Finalmente, se comparan ambas metodologías evaluando su capacidad para reproducir la forma de la SWCC en distintos rangos de succión y condiciones de saturación, para su aplicación en la caracterización hidráulica de suelos CH, ML y SM dentro del contexto del presente estudio.

7.15. Construcción de una representación funcional que relacione el índice de humedad con las características de suelos no saturados.

Para poder establecer una relación, podemos hacer una relación inicial, con el contenido de humedad (θ) en función del IT, El índice de Thornthwaite (IT) se relaciona con el balance hídrico del suelo (precipitación P y evapotranspiración potencial PET).

Esta ecuación representa el cambio en el contenido de humedad ($\Delta\theta$) como una función directa del índice de Thornthwaite. Cuando $IT < 1$, hay un balance positivo y el contenido de humedad aumenta. Si $IT > 1$, hay déficit y θ disminuye.

A continuación, haremos una relación entre la succión con el contenido de humedad con la ecuación de Van Genuchten, ya que esta ecuación establece una relación entre la

succión del suelo (ψ) y el contenido de humedad (θ). Pero para esto debemos de comprender el fenómeno hidrológico.

El índice de Thornthwaite (IT) se define como la diferencia normalizada entre la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (PET) en una escala mensual o anual. Su efecto sobre el contenido volumétrico de agua (θ) se puede resumir en dos escenarios principales como el exceso hídrico ($IT > 0$), nos muestra que hay más agua disponible de la que se pierde por evapotranspiración. En este caso, el suelo tiende a alcanzar o acercarse a su contenido de humedad de saturación (θ_s) y el déficit hídrico ($IT < 0$) indica una mayor pérdida de agua que ingreso, reduciendo el contenido de agua en el suelo hacia valores más bajos, posiblemente cercanos al contenido residual (θ_r).

Para lograr esto se requiere una función matemática que capture este comportamiento de transición suave entre estos dos extremos, pero antes de pasar a este concepto se necesita comprender las propiedades requeridas para la función en función del IT .

La función $f(IT)$ debe cumplir con las siguientes propiedades:

- Asintótica: Para $IT \rightarrow \infty$, $f(IT)$ (condición de saturación).
- Transición suave: Para valores intermedios de IT , debe describir una transición gradual entre exceso y déficit hídrico.
- Simetría no obligatoria: Puede tener pendientes diferentes para exceso ($IT > 0$) y déficit ($IT < 0$).
- Escalabilidad: Debe permitir ajuste para diferentes suelos y climas mediante parámetros.

Teniendo esto en cuenta podemos elegir una forma funcional y está la podemos encontrar en una curva sigmoide es adecuada. Las curvas sigmoideas son ampliamente utilizadas en hidrología y mecánica de suelos para describir transiciones no lineales. Una forma sigmoide común es la función logística, Ec.7.17.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-k(x-x_0)}} \quad Ec. (7.17)$$

Donde:

x : La variable independiente (IT en este caso).

x_0 : El valor crítico donde la transición ocurre (IT_0).

k : Controla la pendiente de la transición.

Adaptando al contexto del balance hídrico.

$$f(IT) = \frac{1}{1 + e^{-k(IT-IT_0)}}$$

Para interpretar cada variable en la nueva ecuación la podemos explicar de la siguiente manera:

Valor crítico del índice de Thornthwaite (IT_0) el cual representa el punto de inflexión de la función, donde el balance hídrico cambia de déficit a exceso, entonces podemos comprender que para $IT < IT_0$, el suelo experimenta déficit hídrico (baja humedad) y para $IT > IT_0$ el suelo entra en exceso hídrico (mayor humedad).

Para la pendiente o sensibilidad (k) es la que controla la rapidez con la que $f(IT)$ pasa de valores bajos a altos y para valores altos de k representan una transición abrupta a su inversa los valores bajos de k indican una transición más gradual, útil para suelos con alta capacidad de almacenamiento.

7.16. Cálculo del contenido volumétrico (θ) en función de $f(IT)$

Tenemos que considerar el contenido volumétrico de humedad (θ) se vincula con parámetros gravimétricos fáciles de medir en laboratorio, Ec.7.18.

Si bien para poder encontrar los valores del contenido volumétrico o hacer una relación, podemos hacerlo desde pruebas fáciles de laboratorio, relacionándolo con el contenido de agua.

$$w = \frac{W_h - W_s}{W_s} \quad \text{Ec. (7.18)}$$

Donde:

w : Contenido de agua.

W_h : Peso de la muestra húmeda.

W_s : Peso de la muestra seca.

También podemos relacionarlo con la densidad seca del suelo.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t}$$

Ahora el contenido de agua gravimétrico es, Ec.7.75.

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

W_w : Peso del agua en el suelo.

W_s : Peso de los sólidos del suelo (Materia seca).

Ahora podemos relacionarlo entre la masa, densidad y el volumen.

$$\gamma = \frac{m}{V}$$

Por lo tanto, el volumen del agua (V_w) se relaciona con su masa y densidad.

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w}$$

Donde:

γ_w : Densidad del agua generalmente es de $\approx 1 \text{ g/cm}^3$.

Teniendo todos los elementos necesarios podemos relacionarlo de la siguiente manera.

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{\frac{W_w}{\gamma_w}}{\frac{W_s}{\gamma_d}} = \frac{W_w \times \gamma_d}{W_s \times \gamma_w}$$

Y podemos relacionar el contenido de agua gravimétrico (w) lo podemos definir como

$w = \frac{W_w}{W_s}$ entonces podemos reescribir la ecuación como:

$$\theta = w \times \frac{\gamma_d}{\gamma_w} = w \times \gamma_d$$

Podemos hacer una relación entre el contenido gravimétrico del agua (w) y el índice de Thornthwaite (IT), este se ve afectado por el balance hídrico, cuando w aumenta con $IT > 0$ (Suelos más húmedo) y cuando w aumenta con $IT < 0$ (Suelos más seco)

Basándonos en esta dependencia, podemos postular que w es una función del IT , entonces $w = f(IT)$. Sustituyendo w en la ecuación experimental.

$$\theta = f(IT) \times \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$$

Como habíamos descrito anteriormente se eligió la función sigmoide y para poder modelar w (y por ende θ) cambia con el índice de Thornthwaite debido a que para cuando se da un comportamiento extremo: la función debe de aproximar $w \rightarrow 0$ cuando $IT \rightarrow -\infty$ y $w \rightarrow \max$. Cuando $IT \rightarrow \infty$.

La forma general de una función sigmoide es:

$$f(IT) = \frac{w_s}{1 + e^{-k(IT - IT_0)}}$$

Donde:

w_s : Valor máximo de w .

k : Controla la pendiente de la transición.

IT_0 : Valor crítico de IT donde ocurre el cambio.

Si sustituimos $f(IT)$ en θ :

$$\theta = \frac{w_s}{1 + e^{-k(IT - IT_0)}} \times \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$$

Si lo llevamos a su estado crítico, es decir en condiciones saturadas podemos decir que:

$$\theta = \theta_s$$

$$w = w_s$$

Por definición, el contenido volumétrico de agua se relaciona con el contenido gravimétrico en saturación (w_s):

$$\theta_s = w_s \times \frac{\gamma_d}{\gamma_w}$$

Sustituyendo w_s en la ecuación sigmoide, Ec.7.19.

$$\theta = \left(\theta_s \times \frac{1}{1 + e^{-k(IT - IT_0)}} \right) \quad \text{Ec. (7.19)}$$

Con esta ecuación se puede utilizar para poder modelar los procesos de transición o el crecimiento donde θ representa una variable que aumenta de manera sigmoide hasta alcanzar un valor máximo de θ_s , esta ecuación tiene la ventaja que modela transiciones suaves y asintóticas, lo que me permite representar proceso en los que el cambio inicial es lento, se acelera cerca del punto medio y se estabiliza al final.

7.17. Análisis de sensibilidad para las variables k e IT_0

Una vez obtenida la ecuación basada en el modelo sigmoide, se realizó un análisis de sensibilidad con el objetivo de evaluar la influencia de los parámetros k e IT_0 en la estimación del contenido volumétrico de agua (θ), en función del Índice de Thornthwaite. Dichos parámetros fueron seleccionados debido a que no se obtienen directamente a partir de mediciones físicas, sino que corresponden a constantes de calibración del modelo, tal como se evidenció en el desarrollo previo

Como primer paso, se llevó a cabo el ajuste de los parámetros k e IT_0 mediante regresión no lineal, de forma que el modelo reprodujera adecuadamente los datos experimentales de θ . La calidad del ajuste se evaluó utilizando el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2), estableciendo así una condición base para el análisis de sensibilidad.

Posteriormente, se aplicó un análisis de sensibilidad local mediante el cálculo de elasticidades, con el fin de cuantificar la variación relativa de θ ante cambios porcentuales en cada parámetro alrededor de los valores óptimos. Este procedimiento permitió identificar el parámetro con mayor influencia inmediata en la respuesta del modelo.

De manera complementaria, se realizó un análisis tipo tornado, considerando variaciones de $\pm 10\%$ en los parámetros k e IT_0 , evaluando el efecto de dichas perturbaciones sobre el RMSE. Este enfoque permitió comparar de forma directa la importancia relativa de cada parámetro para los diferentes tipos de suelo analizados.

Finalmente, se desarrolló un análisis de sensibilidad global mediante la construcción de un mapa de contornos del RMSE en función de ambos parámetros. Para ello, se evaluó el comportamiento del modelo en una malla bidimensional (k , IT_0), identificando regiones de estabilidad y zonas críticas dentro del espacio paramétrico.

El conjunto de estos análisis permitió determinar la relevancia relativa de los parámetros k e IT_0 , así como su dependencia del tipo de suelo, aportando criterios objetivos para una calibración más robusta y confiable del modelo.

7.18. Interpretación matemática de la ecuación.

Analizaremos la Ec.7.19 en función del IT .

$$\theta(IT) = \left(\theta_s \times \frac{1}{1 + e^{-k(IT - IT_0)}} \right) \quad \text{Ec. (7.20)}$$

Ahora vamos a definir la variable adimensional e (IT) como la fracción del contenido máximo.

$$y(IT) = \frac{\theta(IT)}{\theta_s} = \frac{1}{1 + e^{-k(IT - IT_0)}}$$

Esto es una manera clásica de la función logística, donde: k es la constante de crecimiento (con unidades inversas de IT), IT_0 es el valor de IT en el que la función alcanza su punto de inflexión. A continuación, derivamos $y(IT)$ respecto a IT , recordando que:

$$y(IT) = \frac{1}{1 + e^{-k(IT - IT_0)}}$$

Detonando que $u = e^{-k(IT-IT_0)}$; de modo que $y = \frac{1}{1+u}$. La derivada de u es:

$$\frac{dy}{dIT} = -ke^{-k(IT-IT_0)} = -ku$$

Ahora, utilizando la regla de la derivada de una función inversa obtenemos:

$$\frac{dy}{dIT} = -\frac{1}{(1+u)^2} \frac{du}{dIT} = \frac{ku}{(1+u)^2}$$

Pero debemos de notar que:

$$y = \frac{1}{1+u}$$

$$1 - y = \frac{u}{1+u}$$

Multiplicando estas expresiones obtenemos:

$$y(1-y) = \frac{1}{1+u} \cdot \frac{u}{1+u} = \frac{u}{(1+u)^2}$$

Por lo tanto.

$$\frac{dy}{dIT} = ky(1-y)$$

Ahora pasamos a obtener la ecuación diferencial para θ , dado que $\theta(IT) = \theta_s y(IT)$, derivamos

$$\frac{d\theta}{dIT} = \theta_s \frac{dy}{dIT} = \theta_s ky(1-y)$$

Sustituyendo $y = \frac{\theta}{\theta_s}$ y $1-y = 1 - \frac{\theta}{\theta_s}$, de la cual obtenemos:

$$\frac{d\theta}{dIT} = k\theta_s \frac{\theta}{\theta_s} \left(1 - \frac{\theta}{\theta_s}\right) = k\theta \left(1 - \frac{\theta}{\theta_s}\right)$$

Y a partir de aquí encontramos la ecuación diferencial logística clásica:

$$\frac{d\theta}{dIT} = k\theta \left(1 - \frac{\theta}{\theta_s}\right)$$

Ahora realizaremos una integración de lado diferencia esto con el objetivo de hacer un análisis inverso.

$$\frac{d\theta}{\left(1 - \frac{\theta}{\theta_s}\right)} = kdIT$$

Es conveniente en este punto escribir la fracción en el lado izquierdo utilizando las fracciones parciales de las cuales definimos.

$$\frac{1}{\theta \left(1 - \frac{\theta}{\theta_s}\right)} = \frac{1}{\theta \left(\frac{\theta_s - \theta}{\theta_s}\right)} = \frac{\theta_s}{\theta(\theta_s - \theta)}$$

Separamos en fracciones parciales.

$$\frac{\theta_s}{\theta(\theta_s - \theta)} = \frac{A}{\theta} + \frac{B}{\theta_s - \theta}$$

Resolviendo para A y B y multiplicando por $\theta(\theta_s - \theta)$.

$$\theta_s = A(\theta_s - \theta) + B\theta$$

Para $\theta = 0$.

$$\theta_s = A\theta_s \Rightarrow A = 1$$

Para $\theta = \theta_s$.

$$\theta_s = B\theta_s \Rightarrow B = 1$$

Por lo tanto:

$$\frac{\theta_s}{\theta(\theta_s - \theta)} = \frac{1}{\theta} + \frac{1}{\theta_s - \theta}$$

La integral la podemos convertir en:

$$\int \left(\frac{1}{\theta} + \frac{1}{\theta_s - \theta} \right) d\theta = k \int dIT$$

Integrando ambos lados.

$$\ln|\theta| - \ln|\theta_s - \theta| = kIT + C$$

Exponiendo ambos lados:

$$\frac{\theta_s}{\theta_s - \theta} = Ae^{kIT} \text{ donde } A = e^C$$

Resolviendo para θ :

$$\theta = \frac{A\theta_s e^{kIT}}{1 + Ae^{kIT}}$$

Si definimos Ae^{kIT} (determinándose mediante la condición inicial).

$$\theta = \frac{\theta_s e^{k(IT-IT_0)}}{1 + e^{k(IT-IT_0)}}$$

Multiplicando numerador y denominador por $e^{-k(IT-IT_0)}$, llegamos a la Ec.7.20. su forma original lo que comprueba que se realizó la diferenciación y que su derivada coincide con la forma del problema.

Otro punto importante es obtener los dominios y las unidades de cada parámetro, para su correcta evaluación.

Para el dominio de la función logística $\frac{1}{1+e^{-k(IT-IT_0)}}$ que varía entre 0 y 1 conforme IT varia de $-\infty$ a $+\infty$, esto nos puede garantizar que θ oscile entre 0 y θ_s lo cual es coherente con la interpretación física del contenido de agua, debido a los siguientes puntos:

1. Cuando $IT \rightarrow -\infty$, $e^{-k(IT-IT_0)} \rightarrow +\infty$ y $\theta \rightarrow 0$
2. Cuando $IT \rightarrow +\infty$, $e^{-k(IT-IT_0)} \rightarrow 0$ y $\theta \rightarrow \theta_s$

Ahora pasamos a explicar las unidades que sean consistentes con el modelo, para θ y θ_s al ser contenidos volumétricos (usualmente expresados en m^3/m^3), por lo que son adimensionales, mientras que para IT e IT_0 es una representación de la variable, que, dependiendo del contexto, pueden tener unidades de tiempo u otra magnitud pero para el modelo establecido se tratan como adimensionales luego de establecer una transformación y por último la constante k tiene unidades inversas a las IT para que el argumento de la exponencial sea adimensional.

7.19. Obtención del grado de saturación (S_r) al módulo de resiliencia (M_r)

Como se explicó anteriormente para obtener el grado de saturación debemos de seguir ciertos pasos, según la metodología establecida, para ellos a continuación se simplifica en un diagrama de flujo y los pasos a seguir, con todos los componentes para obtener el módulo de resiliencia con cada parámetro encontrado, Fig.7.6.

Una vez obtenido el modelo del módulo de resiliencia para los diferentes tipos de suelo estudiados, con base en fundamentos físicos y mecanicistas, se procedió a su análisis y validación, la validación del modelo que relaciona el Módulo Resiliente (MR) con el Índice de Thornthwaite (IT) se realizó mediante técnicas de validación cruzada, con el objetivo de evaluar su capacidad predictiva, estabilidad y robustez ante variaciones en los

datos. Se emplearon los métodos Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) y k-Fold Cross-Validation ($k = 5$), seleccionados por su uso extendido en modelos empíricos.

El método LOOCV permite evaluar el desempeño del modelo utilizando prácticamente la totalidad de la base de datos, identificando puntos con alto error individual, lo cual es especialmente adecuado considerando el tamaño limitado de la muestra. Por su parte, el método k-Fold proporciona una estimación balanceada entre sesgo y varianza, permitiendo analizar la consistencia global del modelo para cada tipo de suelo.

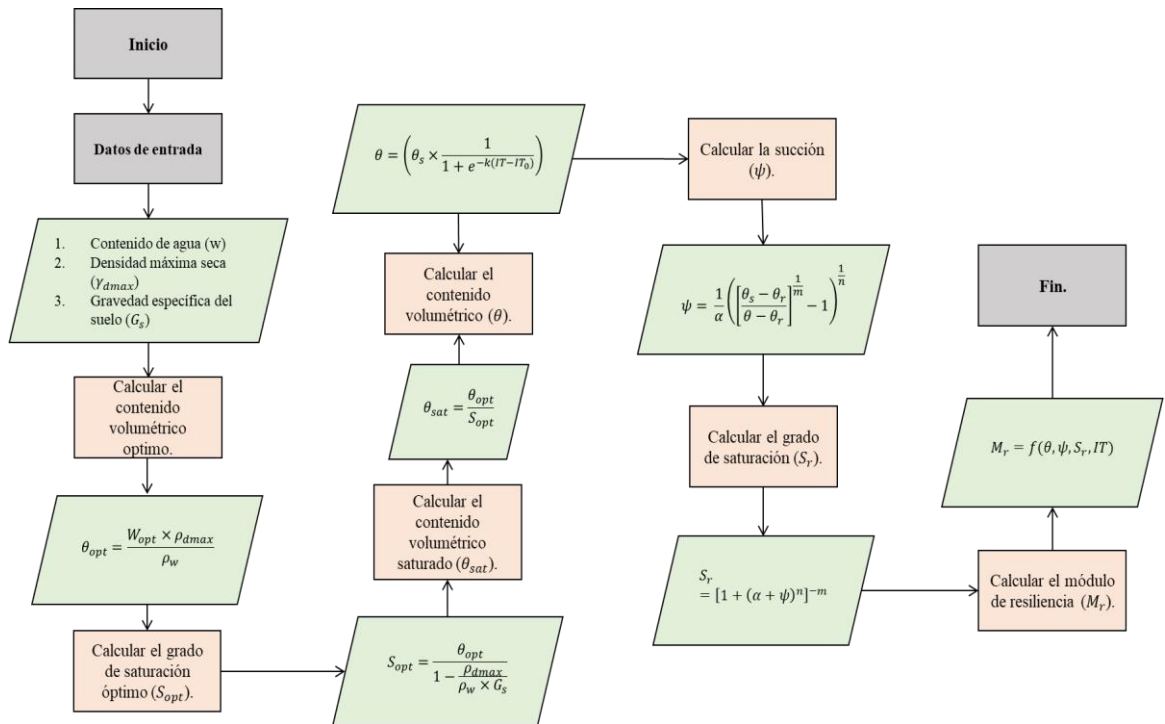


Figura 7.6 Diagrama de flujo para obtener el Mr.

Como parte del proceso de validación, los valores de MR experimental y teórico se normalizaron en un rango relativo de 0 a 1, con el fin de eliminar sesgos asociados a diferencias de magnitud entre materiales y facilitar la comparación directa entre capas. Esta normalización permitió evaluar de forma objetiva el ajuste del modelo mediante gráficos de dispersión, líneas de referencia 1:1 y el cálculo del coeficiente de determinación (R^2).

Una vez validado el modelo mediante diferentes técnicas, se procedió a establecer su relación con una estratigrafía real, tomando como referencia el diseño de la pista de pruebas del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Esta etapa correspondió a la validación física del modelo, la cual se realizó mediante la integración del Módulo de Resiliencia (MR) dentro de una estructura de pavimento estratificada, siguiendo el marco

conceptual del diseño Empírico-Mecanicista (MEPDG/AASHTO). El objetivo fue verificar que la evolución temporal y espacial del MR en cada una de las capas fuese coherente con los principios fundamentales de la mecánica de suelos y de pavimentos..

Para ello, se modelaron explícitamente los efectos ambientales (humedad y temperatura) y mecánicos (esfuerzos confinantes y desviadores), y se incorporaron modelos constitutivos específicos para cada tipo de material:

Suelos finos (arcilla y limo): El MR se modeló como una función no lineal dominada por la condición hídrica, representada por el IT y la succión del suelo (ψ), calculada mediante la ecuación de Van Genuchten. Este enfoque reproduce el comportamiento típico de estos materiales, donde la rigidez es máxima en condiciones hídricas óptimas y disminuye bajo estados extremos de sequedad o saturación.

Materiales granulares (base y subbase): El MR se determinó principalmente en función del estado de esfuerzos, utilizando una formulación tipo K-Theta modificada. La influencia de la humedad se incorporó mediante un Factor de Condición Hídrica (FHI), que penaliza el MR cuando el IT se aleja del rango óptimo, manteniendo la coherencia con modelos mecanicistas aceptados.

Carpeta asfáltica: el módulo de resiliencia (MR) se evaluó como una función dependiente de la temperatura del suelo, reconociendo el comportamiento viscoelástico característico de este material. En esta etapa, el análisis se realizó únicamente con la información disponible; sin embargo, la validación no puede efectuarse bajo los mismos criterios que para los suelos, ya que los datos experimentales utilizados corresponden exclusivamente a materiales del tipo suelo y no incluyen propiedades reológicas específicas de mezclas asfálticas.

La coherencia del modelo se verificó analizando la distribución del MR con la profundidad y el tiempo.

8. Resultados y Discusión.

A continuación, se explicará los resultados obtenidos, a partir de la metodología descrita anteriormente, así como los datos utilizados del Instituto Mexicano del Transporte (Pérez García et al., 2012), en su publicación Técnica N°355, titulada “Evaluación del módulo de resiliencia en trayectorias de humedecimiento y secado”. Esta publicación resulta importante, ya que proporciona información detallada sobre el comportamiento mecánico de los suelos en respuesta a variaciones de humedad, un factor clave en la modelación de la resiliencia estructural de los pavimentos.

La relación de estos datos con el Índice de Thornthwaite radica en que este índice permite estimar la evapotranspiración potencial, lo que a su vez influye en el balance hídrico del suelo, de los cuales se pueden estimar en relación a la investigación central que es los días de humedecimiento y secado. Comprender la interacción entre la humedad del suelo y el módulo de resiliencia es de suma importancia para predecir el desempeño de los materiales geotécnicos bajo distintas condiciones climáticas.

Los materiales que se tienen de referencia son materiales que se utilizaron como terraplén y subrasante en la pista de pruebas del IMT (Limo de baja compresibilidad y arena limosa) y una arcilla que usualmente se encuentran en el Estado de Querétaro.

8.1. Propiedades Índice

Como se mencionó anteriormente este estudio contiene los datos de tres suelos diferentes, en la Tabla 8.1 describe las propiedades índices del suelo, así como su lugar de muestreo.

Tabla 8.1 Propiedades índice de los suelos a analizar

Lugar de muestreo	Clasificación SUCS	Límites de consistencia			Gs	% de finos	% de arena
		LL (%)	LP (%)	IP (%)			
Salida a Tlacote, Querétaro.	CH	72	72.0	46.0	2.59	92.9	7.10
Banco Misha (San Fandila, Pedro Escobedo)	ML	44	44.0	33.0	2.74	87.0	13.0.
Banco Lucio Fajardo (Los Cues)	SM	NP	NP	NP	2.52	37.0	63.0

Otra de las pruebas que se les realizaron a los 3 suelos, fueron las curvas de compactación, puesto que en este punto se describe la humedad óptima y el peso volumétrico seco

(w_{opt} , γ_{dmax}), el cual se puede considerar como la base para preparación de los especímenes. En la Tabla 8.2 se resume el comportamiento de los tres suelos.

Tabla 8.2 Características de compactación

Tipo de suelo	Características de compactación	
	w_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
Arcilla de alta compresibilidad, CH	33.0	12.56
Limo de baja compresibilidad, ML	32.0	12.98
Arena limosa, SM	24.3	14.18

8.2. Trayectorias de humedecimiento y secado

Debido a que el material fue compactado en su punto óptimo y, a partir de este estado, se analizaron las trayectorias de humedecimiento y secado (Pérez García et al., 2012), replicando las condiciones a las que un pavimento está expuesto en la realidad. Estos ciclos de variación de humedad son muy interesantes e importantes, ya que reflejan los efectos de la precipitación, la evaporación y la infiltración, factores que influyen directamente en el comportamiento mecánico del suelo.

En este contexto, la relación con el Índice de Thornthwaite adquiere relevancia, dado que este índice permite estimar la evapotranspiración potencial, un parámetro importante en el balance hídrico del suelo. Al analizarlo junto con el módulo de resiliencia y observar su variación en función de los cambios en la humedad, se establece un vínculo directo con las condiciones climáticas y su impacto en la estructura de los pavimentos.

El estudio de referencia no solo ofrece un análisis evolutivo a través de trayectorias de humedecimiento y secado del material, sino que también proporciona una base experimental para predecir su desempeño bajo diferentes escenarios climáticos. En este sentido, se pueden asociar estos escenarios a datos reales, ya que se simulan temporadas de lluvias y sequías. Es importante señalar que los ciclos de lluvia y secado no siempre siguen un patrón lineal, lo que refuerza aún más la relevancia del Índice de Thornthwaite para estos casos.

En el Anexo I, se presentan los datos experimentales (Pérez García et al., 2012), después y antes de ser ensayados, así como los valores del módulo de resiliencia obtenidos de cada suelo.

En los datos analizados, se observa una variación en el tiempo de secado y humedecimiento que oscila entre 1 y 30 días. Esta variación temporal influye directamente en el grado de saturación de los suelos estudiados. Para los suelos SM (limo

arenoso) y ML (limo de baja plasticidad), el grado de saturación presenta un rango aproximado de 65% a 90%. En contraste, el suelo CH (arcilla de alta plasticidad) muestra una menor variabilidad, manteniendo su grado de saturación entre 80% y 90%. Esta diferencia sugiere que los suelos con mayor contenido de arcilla tienden a retener mejor la humedad, lo que limita las fluctuaciones en su grado de saturación.

Además, se observa que los suelos con límites de consistencia más altos, como el CH, experimentan cambios más significativos en su peso volumétrico seco ante variaciones en el contenido de agua. Este comportamiento podría atribuirse a los cambios de volumen que caracterizan a los materiales arcillosos, los cuales se expanden y contraen en respuesta a la humedad. Por otro lado, el suelo SM muestra una respuesta diferente: aunque su contenido de agua varía, el cambio en su peso volumétrico seco es mínimo. Esto indica que los suelos limo-arenosos son menos sensibles a las variaciones de humedad en términos de densidad seca.

El suelo ML, por su parte, presenta un comportamiento intermedio entre los suelos CH y SM. Mientras que su grado de saturación y contenido de agua varían de manera más pronunciada que en el SM, los cambios en su peso volumétrico seco no son tan drásticos como en el CH. Esto sugiere que el ML tiene una capacidad moderada para absorber y liberar agua sin alterar significativamente su estructura o densidad.

Los resultados reflejan que el tipo de suelo y sus propiedades intrínsecas, como los límites de consistencia y la composición granulométrica, juegan un papel crucial en su respuesta ante cambios en el contenido de agua. Mientras que los suelos arcillosos (CH) experimentan cambios volumétricos más notorios, los suelos limo-arenosos (SM) muestran una mayor estabilidad en su peso volumétrico seco, a pesar de las variaciones en su humedad. El suelo ML, por su parte, se posiciona en un punto intermedio, mostrando una respuesta equilibrada entre ambos extremos.

8.3.El Índice de Thornthwaite (IT) en relación con el contenido de humedad del suelo.

Thornthwaite (1948) propuso el Índice de Humedad (I_m) como un criterio para clasificar el clima, considerando la relación entre la precipitación y la evapotranspiración. Este índice permite identificar distintos tipos de clima en función del balance hídrico, estableciendo categorías según el grado de humedad o aridez presentes en una región (ver Fig.8.1)

$$I_m = \frac{100(S - D)}{N} \quad Ec. (8.1)$$

Donde:

S : superávit de agua (% que necesita el agua)

D : déficit de agua (% que necesita el agua)

D : necesidad total de agua ($=S + D +$ uso efectivo de agua)

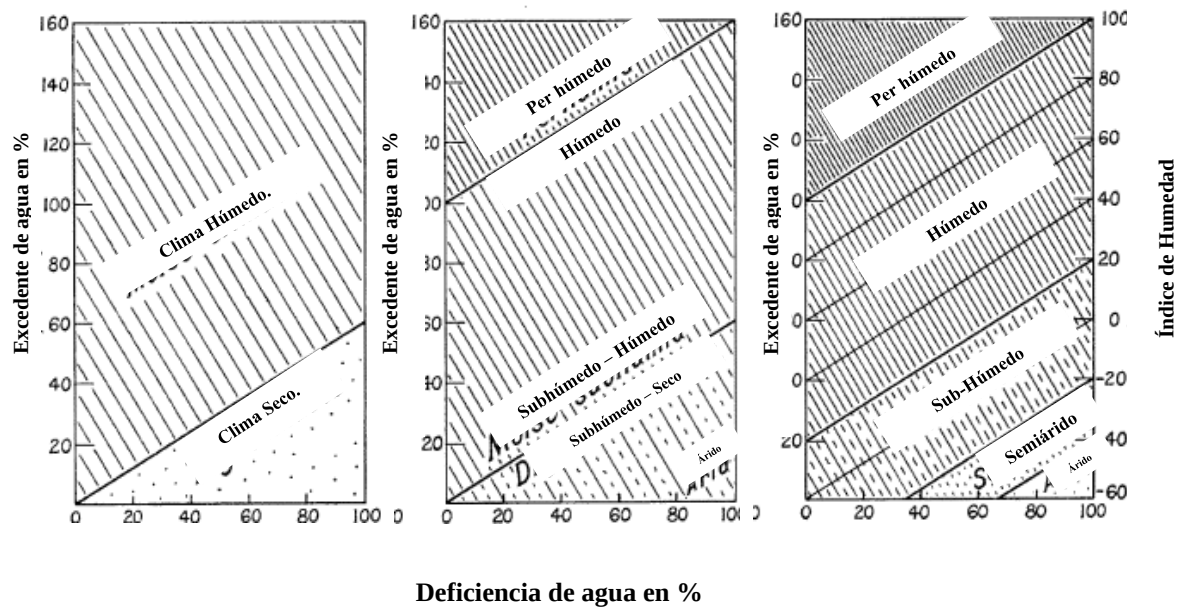


Figura 8.1. Clasificación del Índice de Thornthwaite (1948)

Pero también podemos estimar el índice de humedad como $I_m = I_h - 0.61I_a$ en donde I_h : es el índice de humedad y I_a : él es índice de aridez. Esta ecuación es importante ya que, al tener datos, de humedecimiento y secado se puede obtener el índice de aridez y el índice de humedad, para poder llegar a vincular el índice hídrico del suelo experimental, debemos de necesitar comparar el contenido de agua, delimitando la zona útil de agua. Para el agua útil lo podemos ver cómo $\text{Agua útil} = CCA - PMP$, y el déficit lo podemos delimitar como, $\text{Déficit} = CC - CCA$ si $CCA < CC$ donde CCA : contenido de agua actual, PMP : punto de marchitez permanente y CC : capacidad de campo. Teniendo esto en cuenta podemos estimar el superávit o déficit relativo.

Adaptándolo al contexto de las pruebas de compactación y en la rama de humedecimiento y secado, podemos adaptar el superávit o el déficit comparándolos contra una humedad de referencia, en este caso las pruebas obtenidas al óptimo, simulando las condiciones de

humedad natural, para poder ajustarlo a la experimentación necesitamos los siguientes datos:

w_t : humedad del suelo en el día t (%).

w_{opt} : Humedad optima de compactación del Proctor (%).

D_t : déficit de humedad si $w_t < w_{opt}$

S_t : superávit de humedad si $w_t > w_{opt}$

N : Total, de días del experimento.

Para poder adaptar las ecuaciones a la experimentación de los días de secado y humedecimiento, podemos decir que:

$$D_t = \max(0, w_{opt} - w_t)$$

$$S_t = \max(0, w_t - w_{opt})$$

Luego, terminamos teniendo las ecuaciones 8.2 y 8.3

$$I_a: \frac{100 \sum D_t}{\sum w_{opt}} \text{ (Índice de aridez)} \quad Ec. (8.2)$$

$$I_h: \frac{100 \sum S_t}{\sum w_{opt}} \text{ (Índice de humedad)} \quad Ec. (8.3)$$

En esta ocasión en lugar de PET (Evapotranspiración potencial mensual) como en meteorología, en el experimento podemos utilizar $\sum w_{opt}$ como una referencia base.

Para poder entender este índice podemos decir que $I_a > 0$ el suelo estuvo más seco de lo óptimo en varios días (desección) y $I_h > 0$ el suelo tuvo un exceso de humedad respecto al óptimo (saturación parcial o total), ambos índices permiten cuantificar el comportamiento del suelo respecto al Proctor.

Al aplicar las ecuaciones del índice de aridez y del índice de humedad (Ec.8.2 y 8.3), se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 8.3-8.5). Es importante destacar que, para el cálculo del déficit y superávit de humedad, se consideró la diferencia con respecto al contenido óptimo de humedad. En este sentido, durante los días de secado se realizó una resta, mientras que en los días de humedecimiento se efectuó una suma. Esta metodología permitió evaluar el incremento o disminución de la humedad en relación con el contenido óptimo, el cual se estableció como punto de referencia.

Tabla 8.3. Índice de humedad, Suelo CH

	Proceso	W(%)*	W(%)**	Diferencia Respecto al Óptimo	Dt	St	Ia	Ih	Im
2	días de secado	32.7	28.3	0.31	-0.02	-	-6.06	0.00	3.64
2	días de secado	32.6	28.7	0.30	-0.03	-	-9.09	0.00	5.45
5	días de secado	32.6	30.3	0.24	-0.09	-	-27.27	0.00	16.36
5	días de secado	33.1	29.8	0.28	-0.05	-	-15.15	0.00	9.09
10	días de secado	32.7	30.8	0.23	-0.10	-	-30.30	0.00	18.18
10	días de secado	32.7	30.4	0.24	-0.09	-	-27.27	0.00	16.36
20	días de secado	33.9	28.5	0.35	0.02	-	6.06	0.00	-3.64
20	días de secado	33.7	29.5	0.31	-0.02	-	-6.06	0.00	3.64
1	día de humedecimiento	33.3	35.3	0.47	-	0.14	0.00	42.42	42.42
1	día de humedecimiento	32.9	35.18	0.48	-	0.15	0.00	45.45	45.45
5	día de humedecimiento	33.1	36.2	0.49	-	0.16	0.00	48.48	48.48
5	día de humedecimiento	33.3	35.78	0.48	-	0.15	0.00	45.45	45.45
7	día de humedecimiento	32.1	37.96	0.55	-	0.22	0.00	66.67	66.67
7	día de humedecimiento	33	36.35	0.50	-	0.17	0.00	51.52	51.52
10	día de humedecimiento	32	37.95	0.55	-	0.22	0.00	66.67	66.67
10	día de humedecimiento	31.6	38.4	0.57	-	0.24	0.00	72.73	72.73
20	día de humedecimiento	32.9	40.69	0.59	-	0.26	0.00	78.79	78.79
20	día de humedecimiento	32.9	40.15	0.58	-	0.25	0.00	75.76	75.76
30	día de humedecimiento	32.6	43.63	0.65	-	0.32	0.00	96.97	96.97
30	día de humedecimiento	32.8	42.28	0.62	-	0.29	0.00	87.88	87.88
30	día de humedecimiento	32.9	41.76	0.61	-	0.28	0.00	84.85	84.85
En	el óptimo	32.3	32.3	0.43	-	0.10	0.00	30.30	30.30
En	el óptimo	32.9	32.9	0.43	-	0.10	0.00	30.30	30.30

Tabla 8.4 Índice de humedad, Suelo ML

	Proceso	W(%)*	W(%)**	Diferencia Respecto al Óptimo	Dt	St	Ia	Ih	Im
En	el óptimo	30.71	30.71	0.30	-0.02	-	-6.25	0.00	3.75
En	el óptimo	30.94	30.94	0.29	-0.03	-	-9.38	0.00	5.63
3	días de secado	32.53	30.87	0.24	-0.08	-	-25.00	0.00	15.00

	Proceso	W(%)*	W(%)**	Diferencia Respecto al Óptimo	Dt	St	Ia	Ih	Im
3	días de secado	32.72	31.04	0.27	-0.05	-	-15.63	0.00	9.38
8	días de secado	30.97	27.8	0.22	-0.10	-	-31.25	0.00	18.75
15	días de secado	32.4	28.32	0.24	-0.08	-	-25.00	0.00	15.00
15	días de secado	32.14	28.78	0.34	0.02	-	6.25	0.00	-3.75
15	días de secado	32.25	29.22	0.30	-0.02	-	-6.25	0.00	3.75
20	días de secado	31.76	26.38	0.46	-	0.14	0.00	43.75	43.75
20	días de secado	31.27	27.69	0.46	-	0.14	0.00	43.75	43.75
30	días de secado	32.2	26.2	0.48	-	0.16	0.00	50.00	50.00
30	días de secado	31.7	25.11	0.46	-	0.14	0.00	43.75	43.75
1	día de humedecimiento	31.21	33.24	0.53	-	0.21	0.00	65.63	65.63
1	día de humedecimiento	31.78	33.73	0.48	-	0.16	0.00	50.00	50.00
1	día de humedecimiento	31.05	33.19	0.53	-	0.21	0.00	65.63	65.63
1	día de humedecimiento	31.26	33.08	0.55	-	0.23	0.00	71.88	71.88
1.1	días de humedecimiento	31.12	33.07	0.57	-	0.25	0.00	78.13	78.13
1.1	días de humedecimiento	30.88	32.69	0.56	-	0.24	0.00	75.00	75.00
3	días de humedecimiento	30.74	35.09	0.63	-	0.31	0.00	96.88	96.88
3	días de humedecimiento	30.44	34.94	0.60	-	0.28	0.00	87.50	87.50
3	días de humedecimiento	30.49	34.57	0.59	-	0.27	0.00	84.38	84.38
7	días de humedecimiento	30.98	36.16	0.48	-	0.16	50.00	50.00	20.00
7	días de humedecimiento	29.7	36.04	0.48	-	0.16	50.00	50.00	20.00

Tabla 8.5 Índice de humedad, Suelo SM.

	Proceso	W(%)*	W(%)**	Diferencia Respecto al Óptimo	Dt	St	Ia	Ih	Im
1	día de secado	23.8	22.8	0.16	-0.08	-	-34.16	0.00	20.49
1	día de secado	23.8	22.5	0.17	-0.07	-	-30.04	0.00	18.02
2	días de secado	23.9	22.1	0.18	-0.06	-	-25.93	0.00	15.56
2	días de secado	24	22.24	0.18	-0.06	-	-25.93	0.00	15.56
2	días de secado	24	21.86	0.19	-0.05	-	-21.81	0.00	13.09
5	días de secado	24.8	22.05	0.21	-0.03	-	-13.58	0.00	8.15
5	días de secado	24.8	22.3	0.21	-0.03	-	-13.58	0.00	8.15

	Proceso	W(%)*	W(%)**	Diferencia Respecto al Óptimo	Dt	St	Ia	Ih	Im
10	días de secado	24.4	21.5	0.22	-0.02	-	-9.47	0.00	5.68
10	días de secado	24.2	21.7	0.21	-0.03	-	-13.58	0.00	8.15
10	días de secado	24.3	22.3	0.19	-0.05	-	-21.81	0.00	13.09
20	días de secado	24.8	19.91	0.29	0.05	-	19.34	0.00	-11.60
20	días de secado	24.6	20.51	0.26	0.02	-	7.00	0.00	-4.20
30	días de secado	24.4	19.5	0.29	0.05	-	19.34	0.00	-11.60
30	días de secado	24.4	20.7	0.25	0.01	-	2.88	0.00	-1.73
1	día de humedecimiento	24.5	24.83	0.32	-	0.08	0.00	31.69	31.69
1	día de humedecimiento	24.1	24.86	0.33	-	0.09	0.00	35.80	35.80
1	día de humedecimiento	24.3	25.13	0.33	-	0.09	0.00	35.80	35.80
2	días de humedecimiento	24.6	25.61	0.34	-	0.10	0.00	39.92	39.92
2	días de humedecimiento	24.7	25.6	0.33	-	0.09	0.00	35.80	35.80
5	días de humedecimiento	25	25.17	0.32	-	0.08	0.00	31.69	31.69
5	días de humedecimiento	24.9	26.2	0.34	-	0.10	0.00	39.92	39.92
10	días de humedecimiento	24	26.3	0.36	-	0.12	0.00	48.15	48.15
10	días de humedecimiento	24.2	26.6	0.36	-	0.12	0.00	48.15	48.15
10	días de humedecimiento	24.1	25.7	0.35	-	0.11	0.00	44.03	44.03
20	días de humedecimiento	24.6	26.59	0.36	-	0.12	0.00	48.15	48.15
20	días de humedecimiento	24.5	26.45	0.36	-	0.12	0.00	48.15	48.15
20	días de humedecimiento	24.4	25.6	0.34	-	0.10	0.00	39.92	39.92
30	días de humedecimiento	24.4	26.78	0.36	-	0.12	0.00	48.15	48.15
30	días de humedecimiento	24.6	27.81	0.38	-	0.14	0.00	56.38	56.38
En	el óptimo	23.98	23.74	0.32	-	0.08	0.00	31.69	31.69
En	el óptimo	24.08	23.92	0.32	-	0.08	0.00	31.69	31.69
En	el óptimo	24.26	24.11	0.32	-	0.08	0.00	31.69	31.69

La Fig.8.2, representa la relación entre el Índice de Humedad (IT) y el balance hídrico, expresado en términos de excedente y deficiencia de agua, para distintos tipos de suelo (arcilla CH, limo ML y arena limosa SM). Se observa una clara tendencia creciente del IT conforme aumenta el excedente de agua, lo cual es coherente con la clasificación

climática representada (árido a pérhúmedo). Los datos de arcilla CH se concentran en las zonas pérhúmeda y húmeda, reflejando su alta capacidad de retención de agua. El limo ML se sitúa en zonas húmedas y subhúmedas, mostrando un comportamiento intermedio, mientras que la arena limosa SM se ubica principalmente en zonas subhúmedas y semiáridas, debido a su menor capacidad de retención. En conjunto, el gráfico es coherente desde un punto de vista edafológico e hidrológico, ya que refleja adecuadamente el comportamiento hídrico característico de cada tipo de suelo en función del clima.

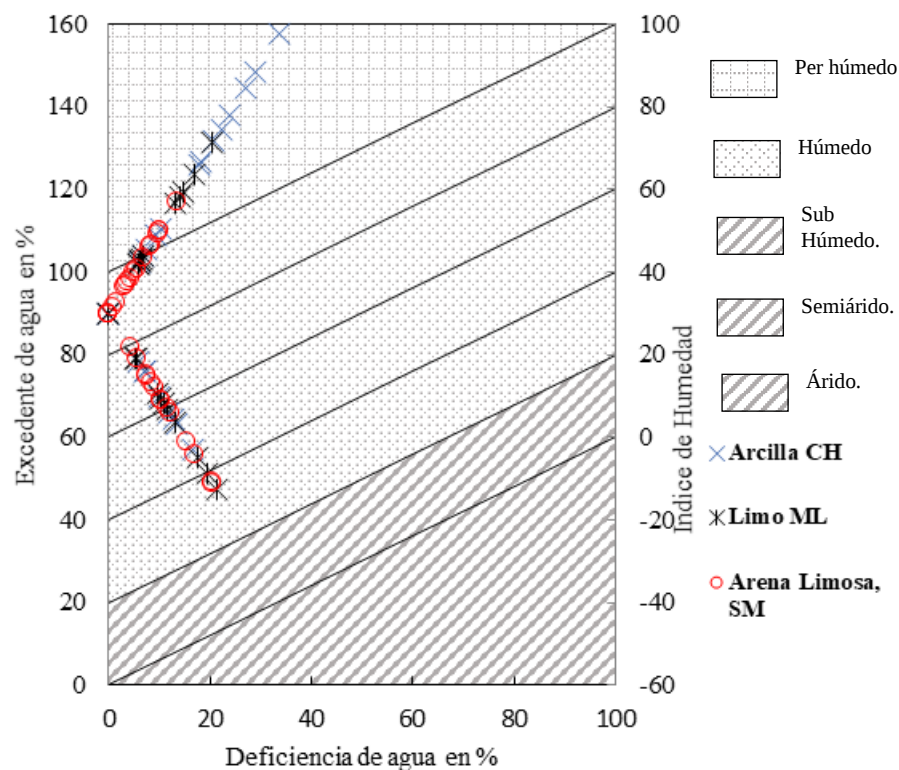


Figura 8.2, Datos calculados en para los diferentes suelos.

A partir de las relaciones previamente establecidas, se desarrolló un método complementario de carácter más empírico, con el objetivo de explorar nuevas correlaciones. Este enfoque se basa en los datos experimentales obtenidos y en la metodología seguida conforme a la tabla del Índice de Thornthwaite (IT). Como resultado, se identificó una relación lineal entre el contenido de humedad ($w\%$) y el IT, la cual se representa en la Fig. 8.3

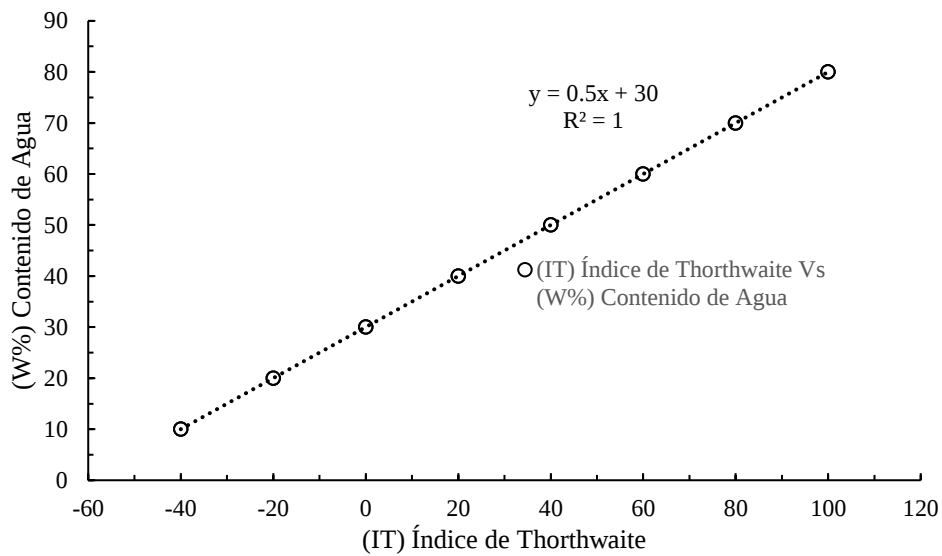


Figura 8.3 Relación entre el Contenido de agua (w%) y el Índice de Thornthwaite (IT)

De la cual se obtuvo la siguiente

$$W(\%) = 0.5IT + 30$$

Donde:

$W(\%)$ Contenido de agua

IT Índice de Thornthwaite

Esta ecuación muestra una relación lineal inversa entre el IT y el contenido de agua del suelo. Es decir, a mayor IT (Clima secos), el contenido de humedad del suelo es menor y viceversa.

8.3.1. Evolución del contenido de agua durante el proceso de compactación

Para poder evaluar cómo puede variar el contenido de agua durante el proceso de compactación, referente a los días de secado y los días de humedecimiento se calcula diferencia (D) entre el contenido de agua antes de ser ensayados (AE) y después de ser compactados (DC), esta diferencia nos va a permitir conocer si el suelo aumento o tuvo una pérdida de humedad, Ec. 8.4

$$D = |AE - DC| \quad \text{Ec. (8.4)}$$

Donde:

D Diferencia entre pruebas (%)

AE Contenido de agua antes de ser ensayados (%)

DC Contenido de agua después de ser compactados. (%)

8.3.2. Cálculo del porcentaje respecto al contenido optimo.

Utilizando una regla de tres, se determina el porcentaje de agua con respecto a su valor optimo (*CO*), Ec. 8.5.

$$\%CO = (D \times 100)/w_{optm} \quad Ec.(1)$$

Donde:

CO Porcentaje de agua con respecto a su valor optimo (%)

D Diferencias entre pruebas (%)

w_{optm} Contenido de agua optimo del suelo. (%)

A continuación, se encuentran los resultados Tablas (8.6-8.8) de los tres suelos estudiados.

Tabla 8.6 Resultados para el valor %Con respecto al optimo (CO), Suelo CH

DC (%)	AE (%)	D	%Con respecto al optimo (CO)
32.7	28.3	4.4	13.497
32.6	28.7	3.9	11.963
32.6	30.3	2.3	7.055
33.1	29.8	3.3	10.123
32.7	30.8	1.9	5.828
32.7	30.4	2.3	7.055
33.9	28.5	5.4	16.564
33.7	29.5	4.2	12.883
33.3	35.3	2	6.135
32.9	35.18	2.28	6.994
33.1	36.2	3.1	9.509
33.3	35.78	2.48	7.607
32.1	37.96	5.86	17.975
33	36.35	3.35	10.276
32	37.95	5.95	18.252
31.6	38.4	6.8	20.859
32.9	40.69	7.79	23.896
32.9	40.15	7.25	22.239
32.6	43.63	11.03	33.834
32.8	42.28	9.48	29.080
32.9	41.76	8.86	27.178
32.3	32.3	0	0.000
32.9	32.9	0	0.000

Tabla 8.7 Resultados para el valor %Con respecto al optimo (CO), Suelo ML

DC (%)	AE (%)	D	%Con respecto al optimo (CO)
30.71	30.71	0	0.000
30.71	30.71	0	0.000
30.94	30.94	0	0.000
32.53	30.87	1.66	5.385
32.72	31.04	1.68	5.450
30.97	27.8	3.17	10.284
32.4	28.32	4.08	13.236
32.14	28.78	3.36	10.900
32.25	29.22	3.03	9.830
31.76	26.38	5.38	17.453
31.27	27.69	3.58	11.614
32.2	26.2	6	19.465
31.7	25.11	6.59	21.379
31.21	33.24	2.03	6.586
31.78	33.73	1.95	6.326
31.05	33.19	2.14	6.942
31.26	33.08	1.82	5.904
31.12	33.07	1.95	6.326
30.88	32.69	1.81	5.872
30.74	35.09	4.35	14.112
30.44	34.94	4.5	14.599
30.49	34.57	4.08	13.236
30.98	36.16	5.18	16.805
29.7	36.04	6.34	20.568

Tabla 8.8 Resultados para el valor %Con respecto al optimo (CO), Suelo SM

DC (%)	AE (%)	D	%Con respecto al optimo (CO)
23.8	22.80	1	4.180
23.8	22.50	1.3	5.434
23.9	22.10	1.8	7.524
24	22.24	1.76	7.357
24	21.86	2.14	8.945
24.8	22.05	2.75	11.495
24.8	22.30	2.5	10.450
24.4	21.50	2.9	12.122
24.2	21.70	2.5	10.450
24.3	22.30	2	8.360
24.8	19.91	4.89	20.440
24.6	20.51	4.09	17.096
24.4	19.50	4.9	20.482
24.4	20.70	3.7	15.466
24.5	24.83	0.33	1.379
24.1	24.86	0.76	3.177
24.3	25.13	0.83	3.469
24.6	25.61	1.01	4.222
24.7	25.60	0.9	3.762
25	25.17	0.17	0.711
24.9	26.20	1.3	5.434
24	26.30	2.3	9.614
24.2	26.60	2.4	10.032
24.1	25.70	1.6	6.688
24.6	26.59	1.99	8.318

DC (%)	AE (%)	D	%Con respecto al optimo (CO)
24.5	26.45	1.95	8.151
24.4	25.60	1.2	5.016
24.4	26.78	2.38	9.948
24.6	27.81	3.21	13.418
23.98	23.74	0.00	0.000
24.08	23.92	0.00	0.000
24.26	24.11	0.00	0.000

8.3.3. Cálculo del Índice de Thornthwaite (IT) y ajuste de los parámetros del modelo.

Con base en un criterio adoptado, se asignó al contenido optimo un IT de 30, por lo que se vio en el análisis anterior que todos los datos caían en dicho parámetro con un porcentaje relativo del 45%. Posteriormente dependiendo de su clasificación si estuvo secándose o se humedeció se sumó o resto un valor de 45 para ajustar la relación entre el IT y la humedad del suelo:

- Si es suelo estuvo sometido a un secado, se resta 45 para ajustar la relación entre el IT y la humedad del suelo.
- Si el suelo estuvo sometido a un humedecimiento, se suma 45 para reflejar el aumento en la retención de agua.

Se eligió este valor porque al utilizar cualquier otro número distinto, el contenido de agua óptimo ya no quedaría en la clasificación de ligeramente húmedo, lo que se vería afectado y por ende la coherencia de la relación establecida. Es decir, un valor diferente haría que el contenido óptimo se desplazara a categorías que no corresponden a su clasificación real dentro de la escala de humedad del suelo. Tablas (8.9-8.11).

Tabla 8.9 Establecimiento del IT y ajuste de parámetros, Suelo CH.

Proceso	Ajuste	Con respecto al optimo corregido (%)	Categoría IT
2 días	Secado (-45)	31.50	Subhúmedo-Húmedo
2 días		33.04	Subhúmedo-Húmedo
5 días		37.94	Subhúmedo-Húmedo
5 días		34.88	Subhúmedo-Húmedo
10 días		39.17	Subhúmedo-Húmedo
10 días		37.94	Subhúmedo-Húmedo
20 días		28.44	Subhúmedo-Seco
20 días		32.12	Subhúmedo-Húmedo
1 día	Humedecimiento (+45)	51.13	Moderadamente Húmedo
1 día		51.99	Moderadamente Húmedo
5 días		54.51	Moderadamente Húmedo
5 días		52.61	Moderadamente Húmedo
7 días		62.98	Húmedo

Proceso	Ajuste	Con respecto al óptimo corregido (%)	Categoría IT
7 días		55.28	Moderadamente Húmedo
10 días		63.25	Húmedo
10 días		65.86	Húmedo
20 días		68.90	Húmedo
20 días		67.24	Húmedo
30 días		78.83	Muy Húmedo
30 días		74.08	Muy Húmedo
30 días		72.18	Muy Húmedo
En el óptimo	Óptimo	45.00	Ligeramente Húmedo
En el óptimo	(45)	45.00	Ligeramente Húmedo

Tabla 8.10 Establecimiento del IT y ajuste de parámetros, Suelo ML

Proceso	Ajuste	Con respecto al óptimo corregido (%)	Categoría IT
En el óptimo	Óptimo	45.00	Ligeramente Húmedo
En el óptimo	(45)	45.00	Ligeramente Húmedo
3 días	Secado (-45)	39.61	Subhúmedo-Húmedo
3 días		39.55	Subhúmedo-Húmedo
8 días		34.72	Subhúmedo-Húmedo
15 días		31.76	Subhúmedo-Húmedo
15 días		34.10	Subhúmedo-Húmedo
15 días		35.17	Subhúmedo-Húmedo
20 días		27.55	Subhúmedo-Seco
20 días		33.39	Subhúmedo-Húmedo
30 días		25.54	Subhúmedo-Seco
30 días		23.62	Subhúmedo-Seco
1 día	Humedecimiento (45)	51.59	Moderadamente Húmedo
1 día		51.33	Moderadamente Húmedo
1 día		51.94	Moderadamente Húmedo
1 día		50.90	Moderadamente Húmedo
1.1 día		51.33	Moderadamente Húmedo
1.1 día		50.87	Moderadamente Húmedo
3 días		59.11	Moderadamente Húmedo
3 días		59.60	Moderadamente Húmedo
3 días		58.24	Moderadamente Húmedo
7 días		61.80	Húmedo
7 días		65.57	Húmedo

Tabla 8.11 Establecimiento del IT y ajuste de parámetros, Suelo SM

Proceso	Ajuste	Con respecto al óptimo corregido (%)	Categoría IT
1 día	Secado (-45)	40.82	Ligeramente Húmedo
1 día		39.57	Subhúmedo-Húmedo
2 días		37.48	Subhúmedo-Húmedo
2 días		37.64	Subhúmedo-Húmedo
2 días		36.05	Subhúmedo-Húmedo
5 días		33.50	Subhúmedo-Húmedo
5 días		34.55	Subhúmedo-Húmedo
10 días		32.88	Subhúmedo-Húmedo
10 días		34.55	Subhúmedo-Húmedo
10 días		36.64	Subhúmedo-Húmedo
20 días		24.56	Subhúmedo-Seco
20 días		27.90	Subhúmedo-Seco
30 días		24.52	Subhúmedo-Seco

Proceso	Ajuste	Con respecto al óptimo corregido (%)	Categoría IT
30 días		29.53	Subhúmedo-Seco
1 día	Humedecimiento (45)	46.38	Ligeramente Húmedo
1 día		48.18	Ligeramente Húmedo
1 día		48.47	Ligeramente Húmedo
2 días		49.22	Ligeramente Húmedo
2 días		48.76	Ligeramente Húmedo
5 días		45.71	Ligeramente Húmedo
5 días		50.43	Moderadamente Húmedo
10 días		54.61	Moderadamente Húmedo
10 días		55.03	Moderadamente Húmedo
10 días		51.69	Moderadamente Húmedo
20 días		53.32	Moderadamente Húmedo
20 días		53.15	Moderadamente Húmedo
20 días		50.02	Moderadamente Húmedo
30 días		54.95	Moderadamente Húmedo
30 días		58.42	Moderadamente Húmedo
En el óptimo	Óptimo (45)	45.00	Ligeramente Húmedo
En el óptimo		45.00	Ligeramente Húmedo
En el óptimo		45.00	Ligeramente Húmedo

De este análisis, se puede obtener el siguiente postulado.

"El contenido de humedad del suelo en función de su estado climático puede ser representado mediante una relación lineal con el Índice de Thornthwaite, en donde el contenido de agua óptimo se define como el punto de referencia y las variaciones de humedad antes y después de la compactación determinan su clasificación climática. Esta relación permite ajustar empíricamente la influencia del clima en el comportamiento mecánico del suelo mediante un factor de corrección basado en el IT, que parametriza la tendencia de secado o humedecimiento respecto a su estado óptimo".

8.3.4. Valor del índice de Thornthwaite (IT) respecto a su contenido de humedad corregido.

Una vez determinado el contenido de humedad con respecto al óptimo, se procede a utilizar la Ec.8.1 Para calcular el IT a partir del contenido de agua, se despeja la ecuación original, obteniendo la siguiente Ec.8.6.

$$IT = W(\%) - 30/0.5 \quad \text{Ec. (8.6)}$$

Donde:

$W(\%)$ Contenido de agua

IT Índice de Thornthwaite

A partir de esta ecuación, se generaron las siguientes Tablas (8.12 – 8.14) con los valores resultantes, permitiendo analizar la relación entre el contenido de humedad y el IT bajo los escenarios de secado y humedecimiento.

Tabla 8.12 Valor del IT, Suelo CH

Categoría IT	Valor IT
Subhúmedo-Húmedo	3.01
Subhúmedo-Húmedo	6.07
Subhúmedo-Húmedo	15.89
Subhúmedo-Húmedo	9.75
Subhúmedo-Húmedo	18.34
Subhúmedo-Húmedo	15.89
Subhúmedo-Seco	-3.13
Subhúmedo-Húmedo	4.23
Moderadamente Húmedo	42.27
Moderadamente Húmedo	43.99
Moderadamente Húmedo	49.02
Moderadamente Húmedo	45.21
Húmedo	65.95
Moderadamente Húmedo	50.55
Húmedo	66.50
Húmedo	71.72
Húmedo	77.79
Húmedo	74.48
Muy Húmedo	97.67
Muy Húmedo	88.16
Muy Húmedo	84.36
Ligeramente Húmedo	30.00
Ligeramente Húmedo	30.00

Tabla 8.13 Valor del IT, Suelo ML

Categoría IT	Valor IT
Ligeramente Húmedo	30.00
Ligeramente Húmedo	30.00
Subhúmedo-Húmedo	19.23
Subhúmedo-Húmedo	19.10
Subhúmedo-Húmedo	9.43
Subhúmedo-Húmedo	3.53
Subhúmedo-Húmedo	8.20
Subhúmedo-Húmedo	10.34
Subhúmedo-Seco	-4.91
Subhúmedo-Húmedo	6.77
Subhúmedo-Seco	-8.93
Subhúmedo-Seco	-12.76
Moderadamente Húmedo	43.17
Moderadamente Húmedo	42.65
Moderadamente Húmedo	43.88
Moderadamente Húmedo	41.81
Moderadamente Húmedo	42.65
Moderadamente Húmedo	41.74
Moderadamente Húmedo	58.22
Moderadamente Húmedo	59.20

Categoría IT	Valor IT
Moderadamente Húmedo	56.47
Húmedo	63.61
Húmedo	71.14

Tabla 8.14 Valor del IT, Suelo SM

Categoría IT	Valor IT
Ligeramente Húmedo	21.64
Subhúmedo-Húmedo	19.13
Subhúmedo-Húmedo	14.95
Subhúmedo-Húmedo	15.29
Subhúmedo-Húmedo	12.11
Subhúmedo-Húmedo	7.01
Subhúmedo-Húmedo	9.10
Subhúmedo-Húmedo	5.76
Subhúmedo-Húmedo	9.10
Subhúmedo-Húmedo	13.28
Subhúmedo-Seco	-10.88
Subhúmedo-Seco	-4.19
Subhúmedo-Seco	-10.96
Subhúmedo-Seco	-0.93
Ligeramente Húmedo	32.76
Ligeramente Húmedo	36.35
Ligeramente Húmedo	36.94
Ligeramente Húmedo	38.44
Ligeramente Húmedo	37.52
Ligeramente Húmedo	31.42
Moderadamente Húmedo	40.87
Moderadamente Húmedo	49.23
Moderadamente Húmedo	50.06
Moderadamente Húmedo	43.38
Moderadamente Húmedo	46.64
Moderadamente Húmedo	46.30
Moderadamente Húmedo	40.03
Moderadamente Húmedo	49.90
Moderadamente Húmedo	56.84
Ligeramente Húmedo	30.00
Ligeramente Húmedo	30.00
Ligeramente Húmedo	30.00

Para poder ejemplificar mejor los resultados, se graficaron, los diferentes suelos con respecto al IT, dando muy buenas regresiones, por lo que es válida la asignación inicial.

Como se puede observar en la Figura 8.4, existe una relación coherente y bien definida entre el contenido de humedad y el IT. La tendencia mostrada valida la correspondencia entre ambas variables, evidenciando que el IT es un indicador adecuado para estimar la disponibilidad de agua en el suelo en función de su contenido de humedad.

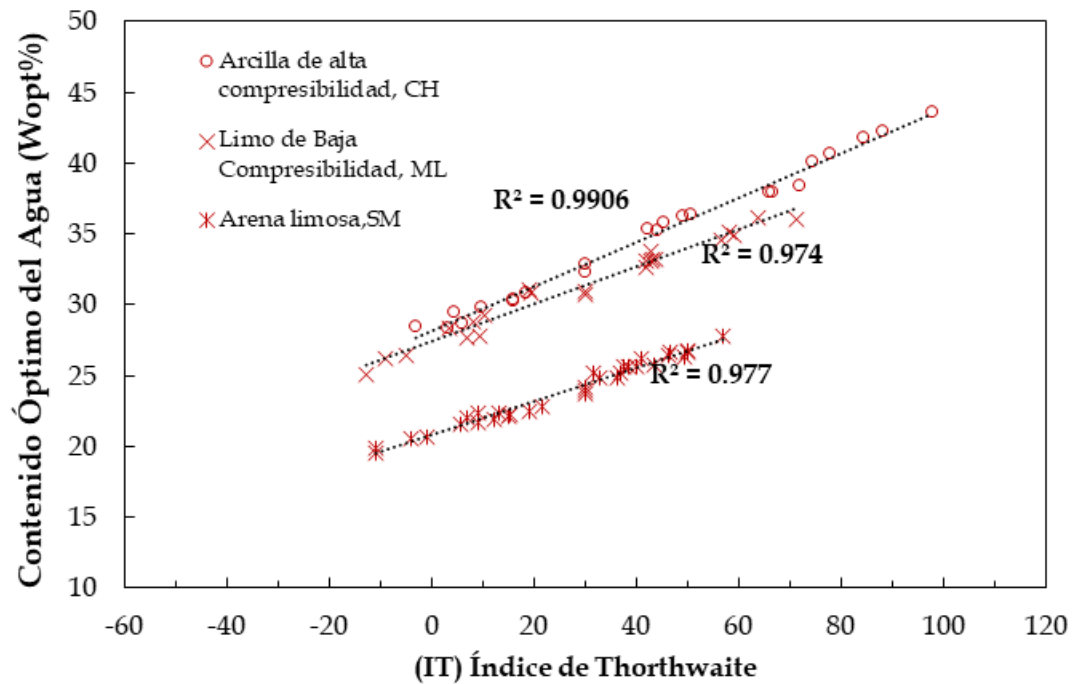


Figura 8.4 Contenido de humedad Vs el Índice de Thornthwaite

8.4.Contenido volumétrico del agua (θ).

El cálculo del contenido volumétrico del agua (θ) es un paso importante para poder entender el comportamiento de los suelos en diferentes condiciones de humedad. A continuación, se presentan los resultados utilizando la ecuación de la curva sigmoideal (Ec.103), que relaciona el contenido de agua con el Índice de IT. Esta metodología se basa en datos experimentales y en la aplicación de relaciones volumétricas y ecuaciones matemáticas, como se demostró en la metodología.

Una vez obtenidos el θ_{sat} , k e IT_0 se utiliza la ecuación sigmoideal para calcular θ en función del Índice de Thornthwaite (IT).

Tabla 8.15 Parámetros de k e IT_0

Tipo de suelo	Parámetros	
	k	IT_0
Arcilla de alta compresibilidad, CH	0.0082	-168.918
Limo de baja compresibilidad, ML	0.0149	-63.3398
Arena limosa, SM	0.0226	-38.5505

Para poder determinar k e IT_0 , se utilizó el método de mínimos cuadrados, con este método se ajusta la curva sigmoideal a los datos experimentales, minimizando el error entre valores observados y los predichos por el modelo, para poder realizar esta

aproximación se utilizó el programa de Excel con la herramienta de SOLVER, en donde se obtuvieron los siguientes valores, Tabla 8.15.

Una vez encontrado estos valores se obtuvieron los siguientes datos mostrados en las Tablas (8.16 -8.18), en donde se aprecia la relación entre el contenido volumétrico experimental y teórico.

Tabla 8.16 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo CH.

N0	IT	θ Sat	θ Experimental	θ Teórico
141	3.01	0.478	0.382	0.385
143	6.07	0.478	0.388	0.386
136	15.89	0.487	0.402	0.400
138	9.75	0.493	0.392	0.400
130	18.34	0.493	0.405	0.405
131	15.89	0.492	0.400	0.404
125	-3.13	0.472	0.390	0.375
126	4.23	0.480	0.397	0.387
181	42.27	0.521	0.438	0.443
182	43.99	0.521	0.437	0.444
178	49.02	0.526	0.445	0.450
179	45.21	0.522	0.443	0.445
174	65.95	0.532	0.460	0.465
176	50.55	0.526	0.446	0.452
169	66.50	0.530	0.462	0.463
171	71.72	0.529	0.468	0.465
165	77.79	0.544	0.480	0.481
166	74.48	0.538	0.480	0.474
132	97.67	0.554	0.504	0.498
133	88.16	0.550	0.493	0.491
134	84.36	0.544	0.494	0.483
115	30.00	0.503	0.416	0.421
116	30.00	0.507	0.420	0.424

Tabla 8.17 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo ML.

N0	IT	θ Sat	θ Experimental	θ Teórico
81	30.00	0.5184	0.4050	0.4158
82	30.00	0.5192	0.4076	0.4164
25	19.23	0.5184	0.4073	0.4018
26	19.10	0.5195	0.4086	0.4025
29	9.43	0.5076	0.3749	0.3800
32	3.53	0.5091	0.3808	0.3724
34	8.20	0.5102	0.3862	0.3801
35	10.34	0.5151	0.3882	0.3869
37	-4.91	0.5047	0.3578	0.3563
38	6.77	0.5091	0.3722	0.3772
41	-8.93	0.5069	0.3539	0.3514
43	-12.76	0.5065	0.3394	0.3449
48	43.17	0.5240	0.4333	0.4357
49	42.65	0.5266	0.4375	0.4373
50	43.88	0.5221	0.4343	0.4349
51	41.81	0.5221	0.4330	0.4327
53	42.65	0.5214	0.4336	0.4330
54	41.74	0.5229	0.4272	0.4332
56	58.22	0.5259	0.4559	0.4527
57	59.20	0.5255	0.4542	0.4533
58	56.47	0.5248	0.4500	0.4500
61	63.61	0.5292	0.4663	0.4605
63	71.14	0.5266	0.4673	0.4647

Tabla 8.18 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo SM.

N0	IT	θ Sat	θ Experimental	θ Teórico
23	21.64	0.427	0.328	0.340
24	19.13	0.430	0.324	0.338
20	14.95	0.423	0.322	0.326
21	15.29	0.425	0.325	0.328
22	12.11	0.426	0.316	0.323
16	7.01	0.425	0.321	0.314
18	9.10	0.425	0.322	0.317
7	5.76	0.427	0.312	0.313
8	9.10	0.431	0.313	0.322
9	13.28	0.430	0.321	0.328
4	-10.88	0.426	0.291	0.278
6	-4.19	0.427	0.296	0.293
2	-10.96	0.432	0.281	0.282
3	-0.93	0.426	0.301	0.298
35	32.76	0.431	0.357	0.360
35	36.35	0.426	0.358	0.360
37	36.94	0.430	0.360	0.364
32	38.44	0.425	0.366	0.362
33	37.52	0.425	0.366	0.360
29	31.42	0.420	0.365	0.348
30	40.87	0.428	0.374	0.367
26	49.23	0.428	0.373	0.377
27	50.06	0.426	0.379	0.375
28	43.38	0.425	0.368	0.367
13	46.64	0.427	0.379	0.373
14	46.30	0.427	0.371	0.372
15	40.03	0.427	0.367	0.365
10	49.90	0.431	0.383	0.380
12	56.84	0.431	0.394	0.386
38	30.00	0.425	0.345	0.351
39	30.00	0.425	0.347	0.351
40	30.00	0.422	0.351	0.348

De las cuales resultaron en las siguientes relaciones, Fig. (8.5 -8.7).

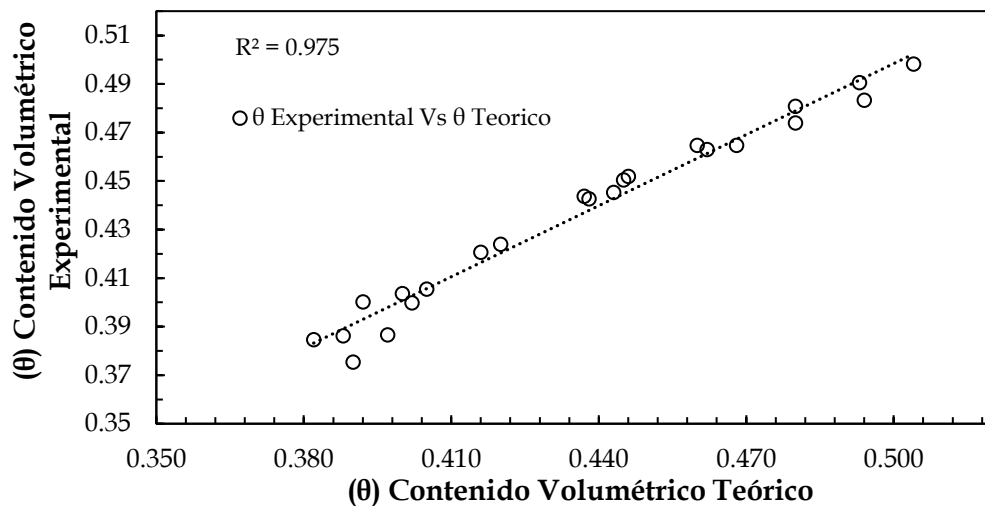


Figura 8.5 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo CH.

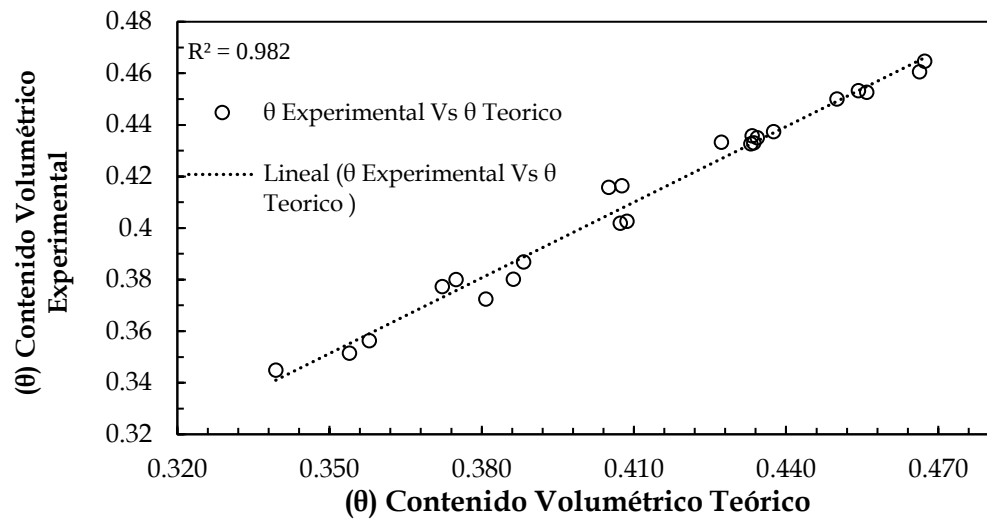


Figura 8.6 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo ML.

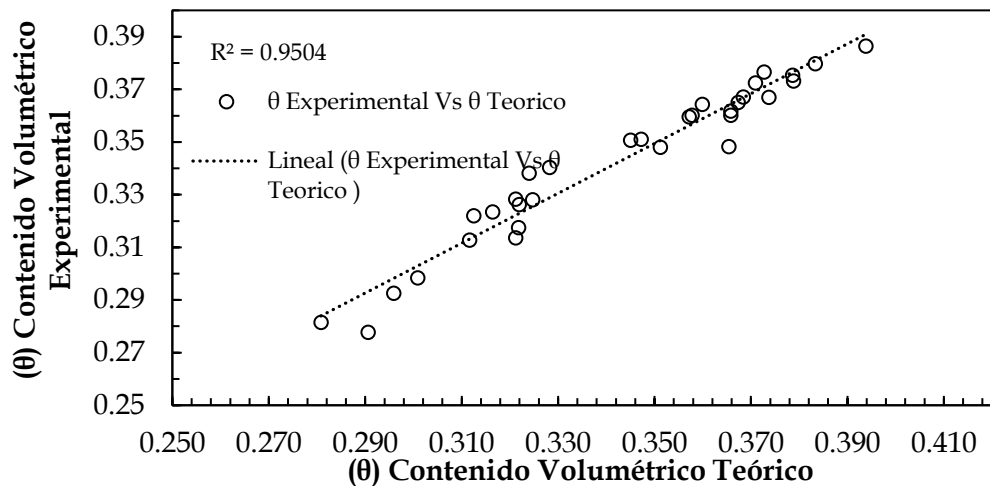


Figura 8.7 θ Experimental Vs θ Teórico, Suelo SM.

Se puede observar que los resultados obtenidos presentan una alta correlación entre los valores pronosticados por el modelo propuesto y los datos experimentales. Esto indica que el ajuste del modelo es válido y que las predicciones se alinean estrechamente con los valores reales medidos en laboratorio Tabla 8.19.

Tabla 8.19 Contenido volumétrico θ R2

Contenido volumétrico (θ)	
Tipo de suelo	R^2
Arcilla de alta compresibilidad, CH	0.975
Limo de baja compresibilidad, ML	0.982
Arena limosa, SM	0.950

La cercanía entre los valores teóricos y experimentales valida la efectividad de la metodología explicada anteriormente y refuerza la confiabilidad de este modelo y la

confiabilidad de las curvas sigmoidales para predecir el comportamiento del suelo bajo las condiciones analizadas.

8.4.1. Análisis de sensibilidad para encontrar las variables k e ITo.

En modelos geotécnicos y en general en cualquier modelo, la calibración de parámetros es un paso fundamental para garantizar que las predicciones sean consistentes con los datos experimentales. Sin embargo, una vez obtenidos los valores óptimos, es igualmente importante conocer qué tan sensibles son los resultados a variaciones en dichos parámetros. Este tipo de análisis permite identificar cuáles parámetros son más importantes o cuales requieren mayor precisión en la estimación, y cuáles ejercen menor influencia en la respuesta del modelo.

Para esta formulación se decidió evaluar la sensibilidad de los parámetros k e ITo, dado que corresponden a constantes de la ecuación logística empleada para estimar el contenido volumétrico de agua (θ). La elección de dichos parámetros se justifica en que, a diferencia de otras variables que dependen de propiedades volumétricas o gravimétricas del suelo, k e ITo no se derivan directamente de mediciones físicas, sino que representan factores de calibración y ajuste del modelo. Por lo tanto, comprender su influencia resulta esencial para garantizar la robustez y confiabilidad de las estimaciones de θ .

La metodología adoptada se fundamenta en enfoques de análisis de sensibilidad local y global, (Saltelli et al., 2008; Hamby, 1994; Pianosi et al., 2016). El análisis de sensibilidad local permite identificar cómo pequeñas variaciones en cada parámetro impactan en el modelo, mientras que el análisis de sensibilidad global ofrece una visión más completa al considerar interacciones entre parámetros y su efecto en todo el rango de variación posible.

La ecuación logística empleada puede expresarse como:

$$\theta = \left(\theta_s \times \frac{1}{1 + e^{-k(IT - IT_0)}} \right),$$

donde θ_s representa el contenido volumétrico de agua en saturación, IT corresponde al índice de Thornthwaite, y k e ITo son los parámetros objeto de estudio.

Evaluar la sensibilidad de k e ITo permite identificar su grado de influencia en la forma de la curva y en el punto de inflexión de la función logística, lo cual es crucial para ajustar el modelo con datos experimentales y mejorar la capacidad predictiva. Así, los parámetros

no solo se ajustan empíricamente, sino que se comprende el peso relativo de cada uno en la respuesta hidrológica del suelo.

En el Anexo V.I se presenta el código desarrollado en MATLAB, en el cual se implementaron ambas metodologías de análisis de sensibilidad y los procedimientos de ajuste paramétrico, con el propósito de validar la adecuación del modelo y cuantificar la influencia de los parámetros en las simulaciones.

➤ Ajuste de las variables k e IT_0

Para poder ajustar las variables se requiere como paso número uno estimar los valores óptimos de los parámetros k e IT_0 , de manera que las predicciones de θ reproduzcan adecuadamente los datos experimentales. La validación mediante indicadores estadísticos no lineales como el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2) permite cuantificar la calidad del ajuste. Este paso es indispensable, ya que establece la línea base sobre la cual se evalúa posteriormente la sensibilidad. La ecuación, $\theta = \left(\theta_s \frac{1}{1 + e^{-k(IT - IT_0)}} \right)$ se ajustó a los datos experimentales mediante regresión no lineal.

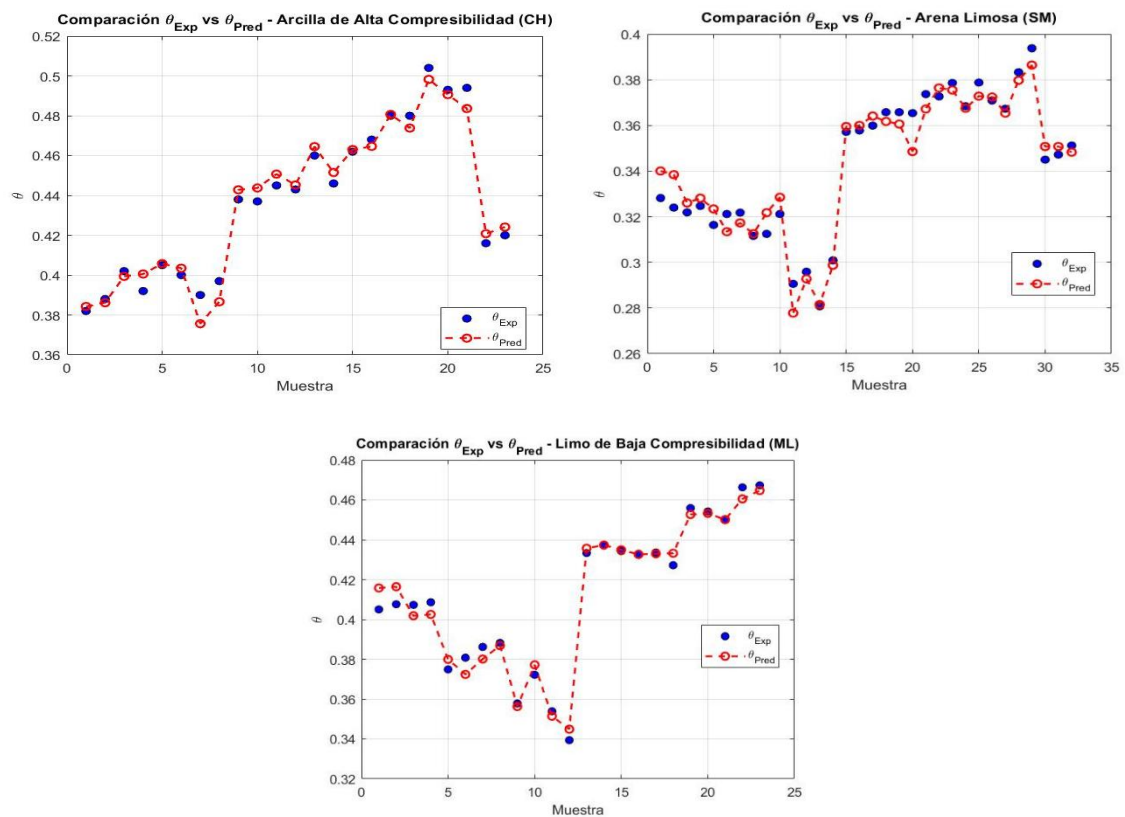


Figura 8.8. Comparación de los valores experimentales del contenido volumétrico de agua (θ_{Exp}) Vs valores predichos por el modelo (θ_{pred}), para los tres suelos estudiados (CH, SM y ML).

Al realizar el análisis estadístico en los programas Minitab y MATLAB, se obtuvo que los resultados de la regresión presentan una coincidencia entre los valores obtenidos, lo cual respalda la consistencia de los cálculos y la validez del modelo propuesto. Dichos resultados se muestran de manera numérica en la Tabla 8.15, donde se presentan los coeficientes de ajuste y de las figuras del 8.5 al 8.7, se encuentran el valor de R^2 , para cada tipo de suelo.

De forma complementaria, en la Figura 8.8 se reproduce visualmente el comportamiento observado en cada tipo de suelo. En este gráfico se comparan los valores experimentales del contenido volumétrico de agua (θ_{Exp}) con los valores predichos por el modelo (θ_{Pred}). Esta representación gráfica permite identificar de manera clara el grado de ajuste alcanzado por la regresión, evidenciando la proximidad entre los datos medidos en laboratorio y los valores estimados. Asimismo, la comparación visual facilita distinguir posibles desviaciones, tendencias de sobrestimación o subestimación, y en general el nivel de representatividad del modelo respecto a los diferentes tipos de suelo analizados.

➤ Elasticidades locales

Las elasticidades permiten medir la respuesta relativa de la variable dependiente (θ) frente a cambios porcentuales en los parámetros. Este enfoque local es útil para identificar qué parámetro ejerce mayor influencia inmediata sobre el modelo alrededor de los valores óptimos. En la práctica, esto informa sobre qué parámetros requieren una calibración más precisa y cuáles tienen un efecto menor en la predicción.

Se calcularon las elasticidades promedio de k y ITo :

$$E_k = \frac{\partial \theta}{\partial k} \cdot \frac{k}{\theta}, E_{ITo} = \frac{\partial \theta}{\partial ITo} \cdot \frac{ITo}{\theta}$$

Estas métricas expresan el cambio porcentual en θ producido por un cambio porcentual en el parámetro.

Entonces si $|E_k| > |E_{ITo}|$, entonces k es el parámetro dominante.

El análisis de las elasticidades locales permitió identificar la influencia relativa de los parámetros k e ITo sobre el contenido volumétrico de agua (θ). En los histogramas se observa que los valores de elasticidad respecto a k presentan una distribución más concentrada y consistente, principalmente en el rango de 0.25 a 0.28, lo cual indica que pequeñas variaciones en este parámetro generan cambios significativos en la respuesta del modelo. En contraste, las elasticidades asociadas a ITo muestran una mayor dispersión

y valores menos uniformes, generalmente entre 0.15 y 0.30, reflejando que su efecto depende de las condiciones específicas del suelo y no se manifiesta de manera dominante.

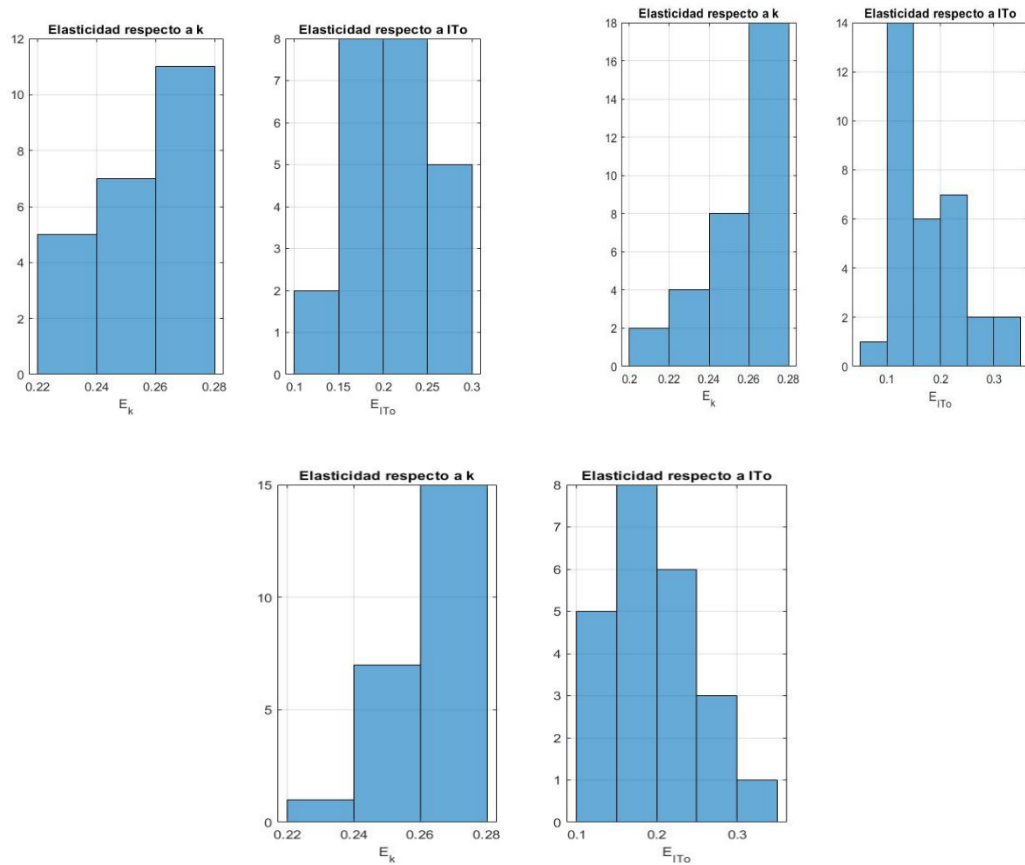


Figura 8.9. Análisis de las elasticidades locales respecto a k e IT_0 , para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).

En conjunto, estos resultados confirman que, dado que, $|E_k| > |E_{IT_0}|$, el parámetro k constituye el factor de mayor sensibilidad dentro de la ecuación, mientras que IT_0 ejerce un papel secundario en la predicción del comportamiento de θ .

➤ Análisis tipo tornado ($\pm 10\%$)

El análisis tornado evalúa la robustez del ajuste frente a pequeñas perturbaciones en los parámetros, modificándolos en $\pm 10\%$ y observando el impacto en el RMSE (Cambio en la Raíz del Error Cuadrático Medio). Este método es comúnmente empleado en ingeniería y análisis de riesgos porque proporciona una representación visual clara de la variable más crítica.

Su objetivo es clasificar y visualizar la importancia relativa de las diferentes variables de entrada (incertidumbres) de un modelo sobre una variable de salida específica, cada barra horizontal muestra el rango de variación de la salida cuando cada parámetro de entrada

varía dentro de su rango de incertidumbre, manteniendo todos los demás parámetros en sus valores base (usualmente el valor medio). Las barras se ordenan de mayor a menor impacto, creando la forma característica de un tornado.

En la figura 8.10 se muestra que el suelo CH, el parámetro k es, con diferencia, el que tiene la mayor influencia en el error del modelo. La variación de k causa el mayor rango de cambio en el RMSE (desde aproximadamente 0 hasta casi 0.014). El parámetro IT_o tiene una influencia significativamente menor, casi despreciable en comparación con k .

En el caso del suelo SM, el gráfico muestra que ambos parámetros (k y IT_o) tienen una influencia muy similar y significativa en el error del modelo. Los rangos de variación del RMSE para ambos parámetros son casi idénticos (de 0 a 0.01). Para el suelo ML, la situación es radicalmente diferente. Aquí, el parámetro IT_o se convierte en el más influyente, con un impacto en el RMSE que va de 0 a 0.015. El parámetro k , que era el más importante en las arcillas, pasa a tener una influencia mucho menor (rango de 0 a 0.005) en los limos.

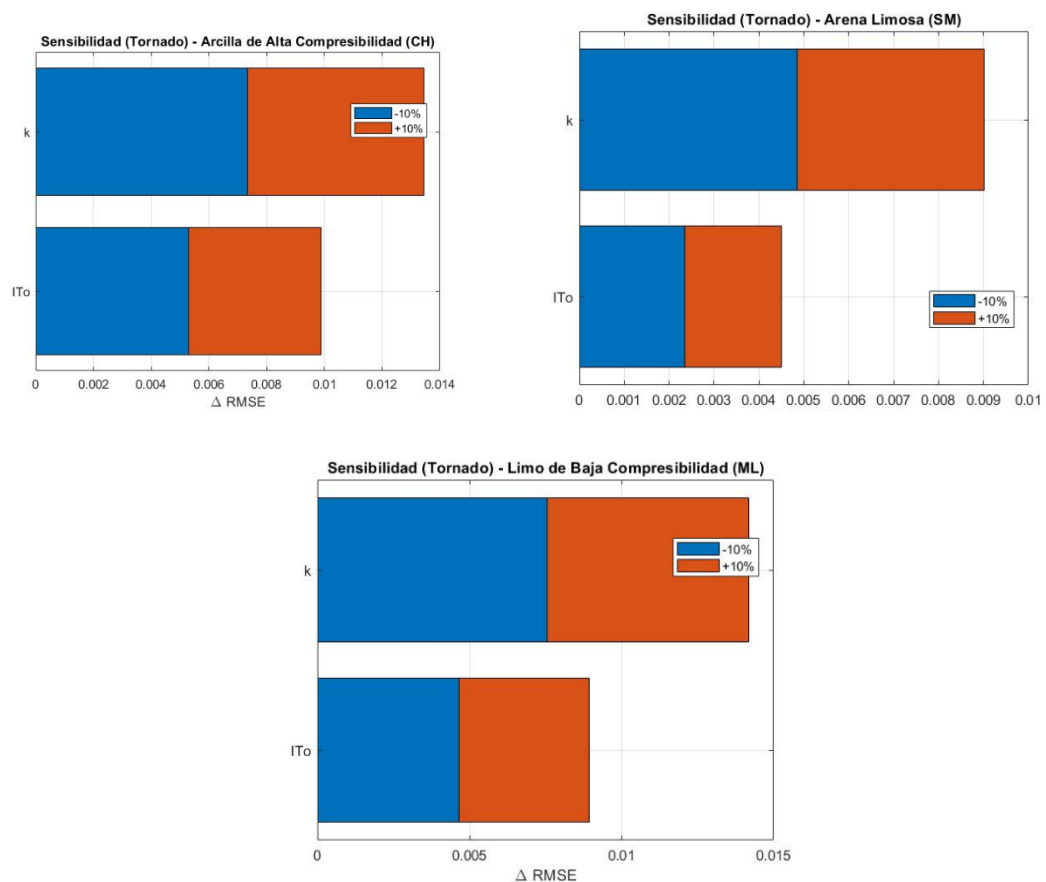


Figura 8.10. Análisis de tipo tornado respecto a k e IT_o , para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).

No existe un parámetro universalmente más importante. La estrategia para este caso fue reducir la incertidumbre en las predicciones y poder adaptarse al tipo de suelo en cuestión. Un análisis de sensibilidad como este es esencial para optimizar recursos, guiar campañas de exploración y laboratorio, y priorizar esfuerzos en la calibración de modelos, asegurando así predicciones más confiables.

➤ Mapa global de sensibilidad

Mientras que los métodos anteriores son locales, el análisis global explora un rango más amplio de valores posibles para k e IT_o , construyendo un mapa del RMSE en función de ambos parámetros. Este procedimiento permite identificar zonas de estabilidad y regiones críticas en el espacio paramétrico, lo que resulta factible en este estudio, donde la variabilidad natural puede generar condiciones alejadas de las calibradas.

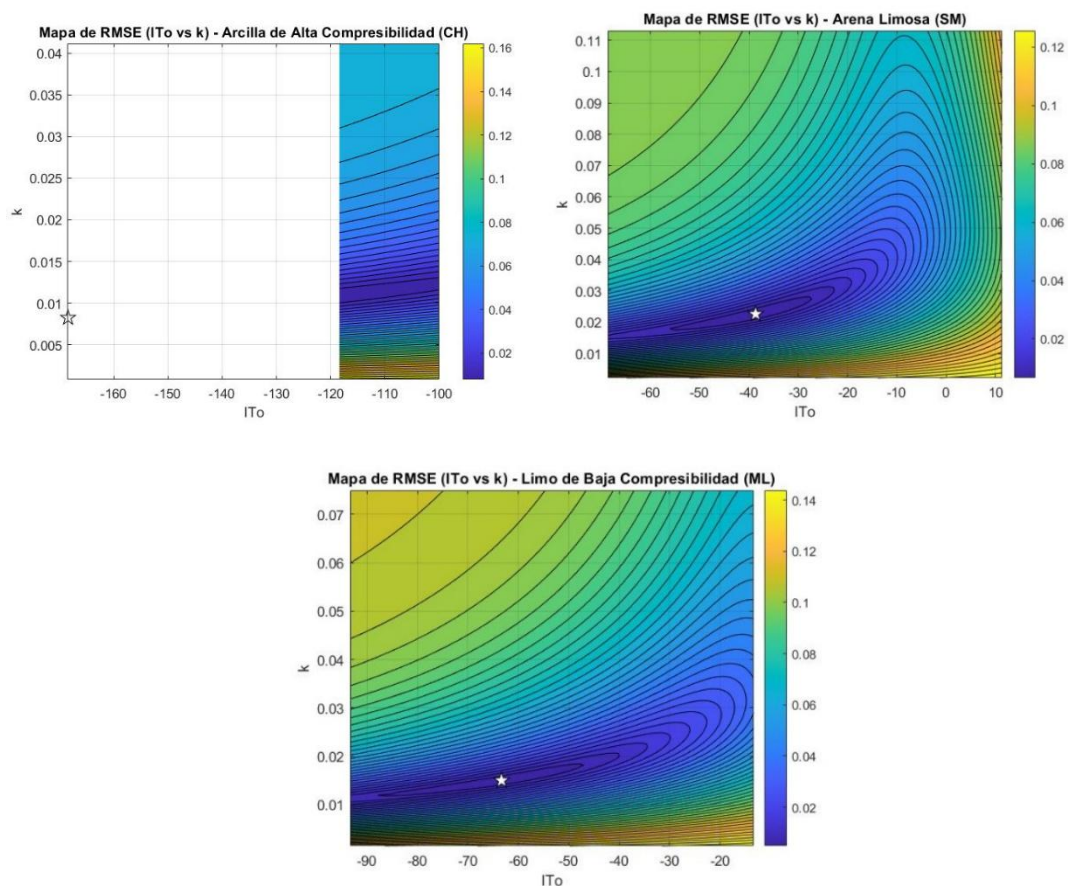


Figura 8.11. Análisis del mapa global de sensibilidad de k e IT_o , para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).

En este sentido, se puede explorar en un espacio bidimensional del espacio paramétrico (IT_o , k) para identificar regiones de estabilidad en el modelo. Para este caso, se construyó una malla de valores (IT_o , k) y se calculó el RMSE en cada punto. El resultado se

representa en un mapa de contornos, donde nos permite visualizar regiones de baja sensibilidad, es decir donde se establece la estabilidad y zonas críticas donde pequeñas variaciones alteran fuertemente el error.

Para el suelo CH, el modelo exhibe una sensibilidad predominante y casi exclusiva al parámetro k . El mapa de calor revela que las variaciones en el parámetro IT_0 tienen una influencia despreciable en el error del modelo dentro del rango de estudio, como lo demuestran las franjas de color verticales uniformes. La combinación de parámetros que minimiza el error se localiza exclusivamente en la región de valores bajos de k , lo que constituye la zona óptima para la calibración. Este hallazgo corrobora de manera contundente la conclusión del gráfico de tornado, que identificaba a k como el parámetro crítico Fig. 8.11

En el caso del suelo SM, el análisis revela un comportamiento acoplado entre ambos parámetros. La incertidumbre del modelo no depende de manera aislada de IT_0 o k , sino de su combinación específica. El mapa evidencia una clara diagonal de alto error, indicando que las combinaciones desfavorables de ambos parámetros son las que generan la mayor imprecisión. Por lo tanto, la minimización del error no se logra optimizando los parámetros de forma independiente, sino identificando la pareja de valores (IT_0 , k) que se sitúe dentro del "valle" de baja sensibilidad. Esta interacción explica perfectamente por qué el análisis de tornado adjudicaba una importancia similar a ambos: su impacto en el modelo es inherentemente conjunto, Fig. 8.11

Para el suelo ML, el parámetro IT_0 emerge como la principal incertidumbre, dominando completamente la respuesta del modelo. La influencia del parámetro k es secundaria, como se desprende de las franjas de color horizontales que muestran una mínima variación al modificar su valor. La región de menor error se concentra en los valores más negativos de IT_0 , lo que define el criterio clave para una calibración exitosa. Este resultado valida inequívocamente la prelación establecida por el gráfico de tornado para este tipo de suelo, Fig. 8.11

8.4.2. Factor de forma de la ecuación de la Dra. Zapata.

Existen diversas formulaciones para representar la relación entre el contenido de agua y la succión en suelos no saturados. Entre las más utilizadas se encuentran el modelo propuesto por Zapata (2006), desarrollado a partir de la calibración empírica del modelo EICM del MEPDG, y la formulación de Fredlund & Xing (1994), basada en principios

teóricos de la mecánica de suelos no saturados. La principal diferencia entre ambos enfoques radica en su fundamento: mientras el modelo de Zapata busca una aproximación práctica y calibrada para predecir el efecto de la humedad en el módulo resiliente dentro de modelos empírico-mecanicistas de pavimento, el modelo de Fredlund & Xing se enfoca en describir de manera más precisa la curva característica de succión del suelo (SWCC), ajustándose a un mayor rango de succiones y condiciones de saturación.

Para este caso se analizarán las dos fórmulas para ver como varían de acuerdo a nuestros datos, experimentales.

$$c(h) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_r}\right)} \right] \quad (8.7), \quad c(h) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1.45 \times 10^5}{h_r}\right)} \right] \quad (8.8)$$

Las ecuaciones (8.7) y 8.8) representan dos versiones del término de corrección $c(h)$ del modelo de Fredlund & Xing (1994). La diferencia principal radica en el valor máximo de succión considerado en el denominador del logaritmo.

La Ecuación (8.7), con un límite de 10^6 kPa, se ajusta mejor a suelos con alta capacidad de retención de agua (por ejemplo, arcillas expansivas), permitiendo una transición más gradual hacia el estado seco. En cambio, la Ecuación (8.8), con un límite de 1.45×10^5 kPa, describe suelos de menor potencial de succión, como limos o arenas finas, mostrando una caída más rápida en la parte seca de la curva.

En términos prácticos, el uso de una u otra ecuación depende del tipo de suelo y del rango de succión observado experimentalmente, siendo la versión con 10^6 kPa más general y la de 1.45×10^5 kPa más específica para suelos de baja plasticidad.

¿Qué significa la constante en el denominador?

El denominador $\ln\left(1 + \frac{\text{constante}}{h_r}\right)$ fija el valor de referencia (succión límite) al que se normaliza la función de corrección, si la constante es mayor como lo propone Fredlung y Xing (1994), (10^6), el denominador es más grande y el cociente $\frac{\ln\left(1 + \frac{h}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\text{constante}}{h_r}\right)}$ crece más lentamente con h (succión). Por tanto, $c(h)$ disminuye más despacio y alcanza cero sólo a succiones muy altas.

Si la constante es menor como lo propone Zapata et. al. (2006), (1.45×10^5), el denominador es menor y el cociente crece más rápido en $c(h)$ cae a cero a succiones

menores (la corrección “apaga” la curva antes). Entonces esto se puede entender como la constante fija a qué succión consideras “completamente seco” y por tanto dónde la corrección fuerza la curva hacia cero contenidos de agua.

En la literatura aparece comúnmente como 1×10^6 como Fredlund & Xing (1994) proponen una corrección que dirige la curva hacia un valor de sequedad correspondiente a 1×10^6 kPa siendo este un valor límite teórico usado en su formulación, para poder representar condiciones prácticamente secas (límite termodinámico usado en su modelo). Esa elección es la usada en la formulación original y en muchas implementaciones posteriores. (Tran y Fredlund, 2021)

Años posteriores se adaptaron los modelos de Fredlund y Xing en donde autores diferentes utilizaron constantes distintas esto por un motivo práctico/ empírico ajustando mejor sus datos experimentales para cierto tipo de suelos y así evitar extrapolar datos que no se pudieran representar de manera fidedigna, y así como para evitar errores en zonas que no se tengan datos experimentales.

En algunos estudios se propone además suprimir o modificar la corrección $C(\psi)$ cuando la succión residual del suelo es relativamente baja por ejemplo en algunos estudios se recomienda usar $C(\psi) = 1$ si la succión residual es menor a ciertos valores, esto con el objetivo de evitar que la corrección puede empeorar el ajuste si no se usa con cuidado. (Equation for SWCC | *Unsaturated Soil Mechanics for Sustainable Urban Living*, 2016).

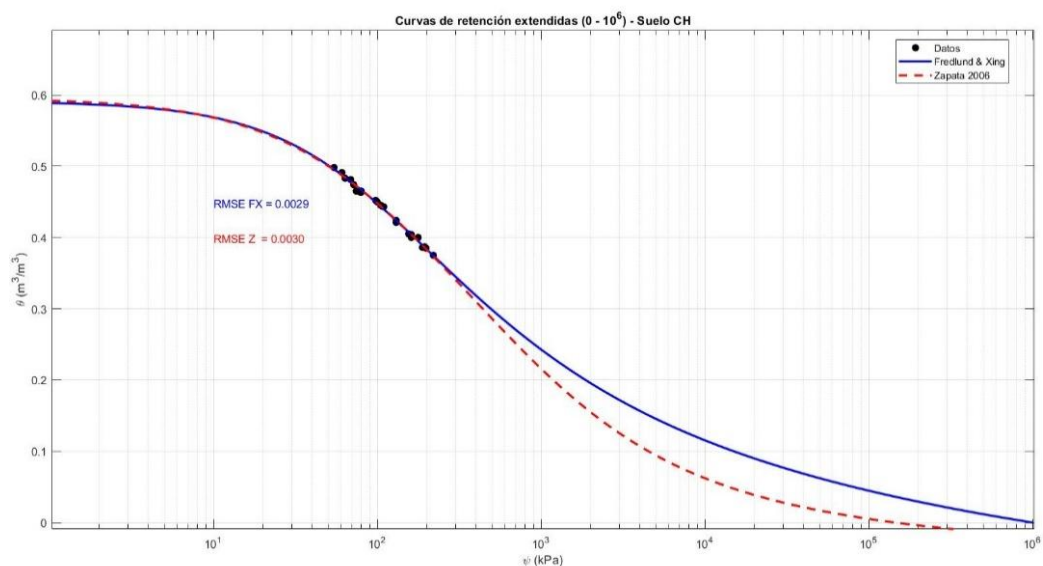


Figura 8.12. Análisis de la curva de retención del agua, de las dos graficas adaptada a los datos experimentales, para el suelo CH.

Existen varios puntos para poder entender que corrección se puede utilizar, y tampoco existe una manera de decir cuál es mejor, todo dependerá del propósito y de los datos que tengamos a la mano, si se quiere reproducir la formulación original y garantizar que la SWCC tienda a cero en el límite teórico de sequedad se recomienda utilizar la constante 10^6 tal como en Fredlund y Xing (1994). Esta es una opción estándar y físicamente justificada.

Si, se tienen datos experimentales y no se llegan a succiones extremas y al aplicar la corrección con 10^6 se obtienen extrapolaciones extrañas o parámetros no físicos, muchos autores llegan a utilizar una constante menor (ajustada empíricamente) o simplemente omiten o simplifican $C(\psi)$ (por ejemplo, fijándola a 1) cuando la succión residual observada es baja, lo que a menudo mejora el ajuste práctico. Esto es por motivos empíricos de mejor ajuste y estabilidad numérica.

Para el caso de nuestro estudio analizaremos nuestros datos teóricos obtenidos a través del método antes descrito, para este fin se realizó un código en Matlab (**Anexo V.II**) para poder entender el comportamiento de cada suelo estudiado, así como la diferencia que existe entre cada curva.

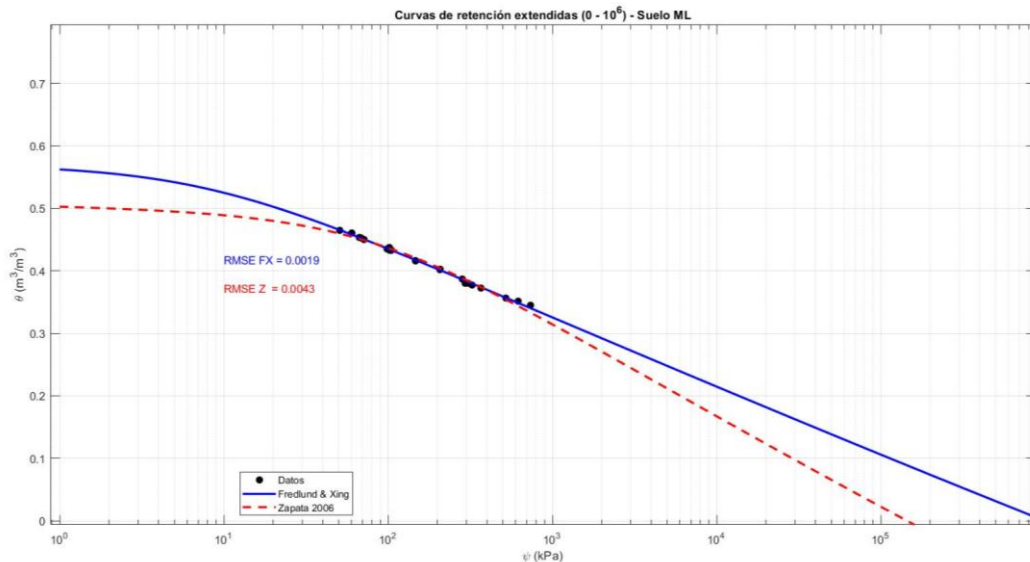


Figura 8.13. Análisis de la curva de retención del agua, de las dos graficas adaptada a los datos experimentales, para el suelo ML.

El análisis comparativo entre los modelos de Fredlund & Xing (1994) y Zapata (2006), aplicado a los diferentes tipos de suelo, mostró variaciones en la capacidad de ajuste evaluada a través del Error Cuadrático Medio (RMSE). Para el suelo CH (Ver. Fig.8.12), ambos modelos presentaron un desempeño muy similar, con valores prácticamente

iguales de RMSE (0.00295 para Fredlund & Xing y 0.00301 para Zapata), lo que indica que cualquiera de los dos puede describir adecuadamente la curva característica de humedad. En el caso del suelo ML (limos de baja plasticidad), el modelo de Fredlund & Xing presentó un ajuste significativamente mejor (RMSE = 0.00193) en comparación con el modelo de Zapata (RMSE = 0.00426), evidenciando una mayor precisión en la representación de la relación succión–contenido de agua para este tipo de suelo, (Ver. Fig.8.13). Finalmente, en el suelo SM, ambos modelos tuvieron un desempeño prácticamente equivalente (RMSE de 0.00218 y 0.00217, respectivamente), lo cual sugiere que, para materiales granulares con finos, la elección del modelo no representa una diferencia significativa, (Ver. Fig.8.14)

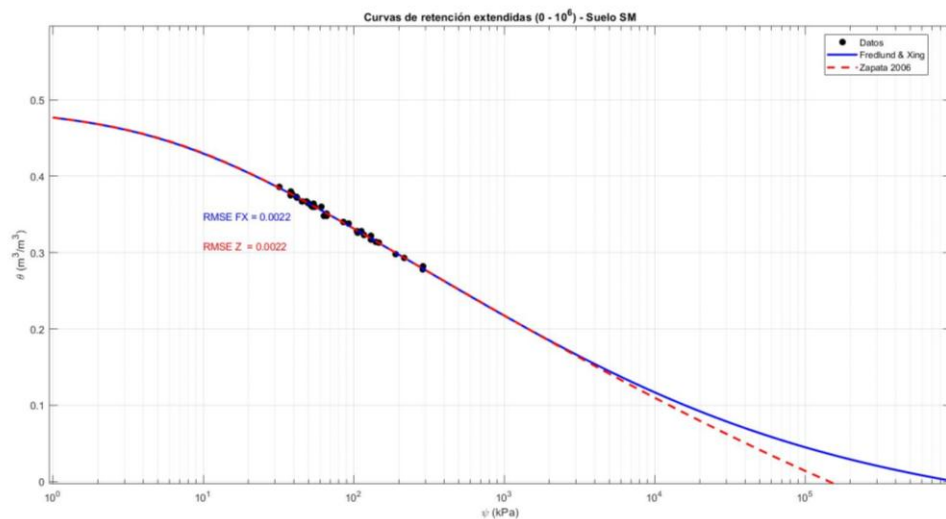


Figura 8.14. Análisis de la curva de retención del agua, de las dos graficas adaptada a los datos experimentales, para el suelo SM.

En síntesis, el modelo de Fredlund & Xing mostró un comportamiento más robusto en suelos finos (CH y ML), destacando especialmente en el suelo ML, mientras que en suelos granulares (SM) ambos métodos resultaron igualmente confiables.

El eje vertical representa la magnitud de la diferencia (error) entre las predicciones de ambos modelos, con valores comprendidos entre 0.01 y 0.06. El eje horizontal, en escala logarítmica base 10, corresponde a la succión matricial (ψ), lo que permite explorar un rango extremadamente amplio, desde condiciones cercanas a la saturación hasta estados de succión muy elevados.

En el caso del suelo CH, la diferencia entre modelos es mínima (0.01) en los extremos del rango de succión, lo cual indica que las predicciones convergen tanto en condiciones cercanas a la saturación ($\psi \rightarrow 0$) como en condiciones de sequedad extrema ($\psi \rightarrow \infty$).

Sin embargo, en el rango intermedio de succión, el error aumenta de manera considerable, alcanzando un valor máximo cercano a 0.06 en la zona central de la gráfica. Esto evidencia que las discrepancias entre los modelos son críticas en este intervalo, donde la retención de agua es altamente sensible a cambios en la succión, (Ver. Fig.8.15 (a))

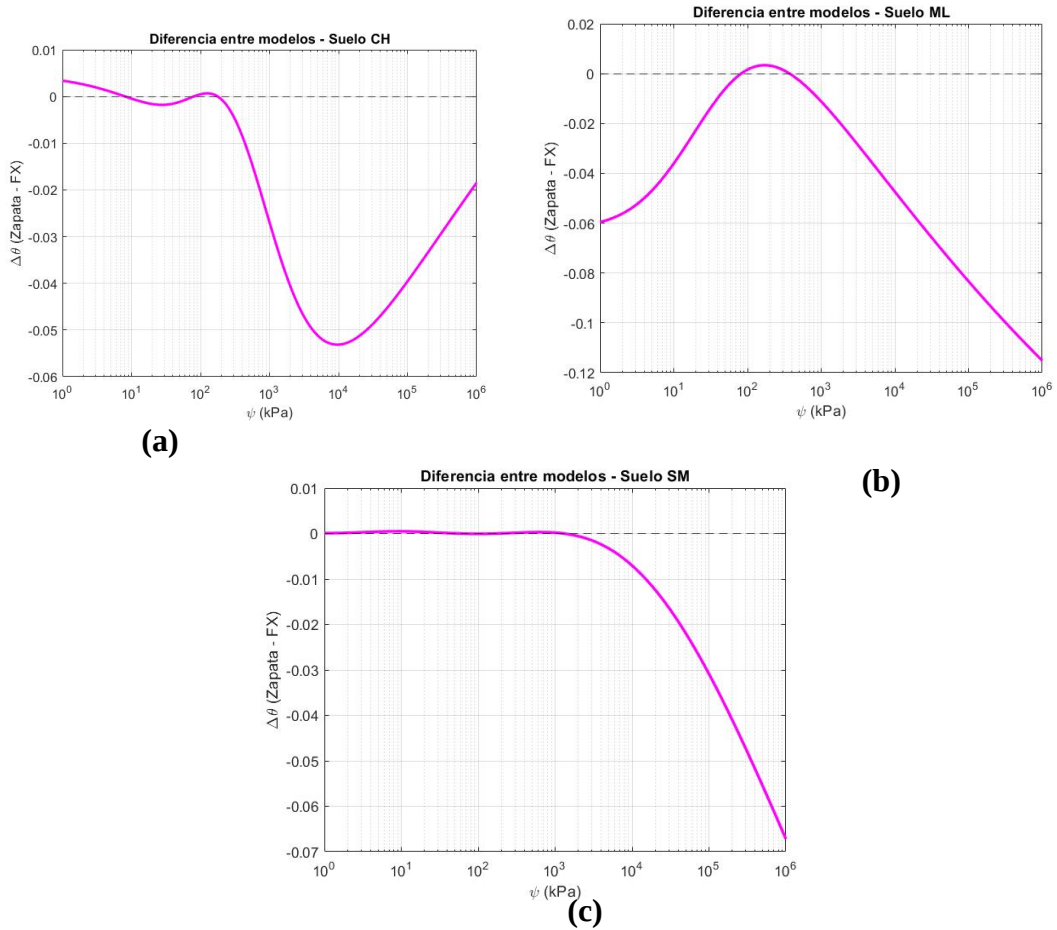


Figura 8.15. Diferencias entre modelos, (a) suelo CH, (b) suelo (ML) y (c) suelo (SM).

Para el suelo ML, también se observa que la mayor diferencia entre modelos ocurre en succiones intermedias, aunque en un rango menor en comparación con el suelo CH. Esto se debe a que los limos poseen una menor capacidad de retención de agua. El error máximo se sitúa alrededor de 0.04–0.05, coincidiendo con la zona de transición estructural del material, como la succión de entrada de aire, (Ver. Fig.8.15 (b)).

En el caso del suelo SM), la diferencia entre modelos es menos pronunciada que en CH y ML. El error se mantiene en un nivel moderado (0.02–0.03), sin un pico agudo definido, sino más bien como una meseta. Esto responde a la naturaleza granular del material, cuya curva característica de retención de agua presenta transiciones más suaves y menos abruptas que las de los suelos finos, (Ver. Fig.8.15(c)).

En términos generales, ambos modelos coinciden mejor en condiciones de saturación y sequedad extrema, siendo las discrepancias más notorias en los rangos intermedios de succión. Las diferencias entre los métodos son máximas en arcillas (CH), moderadas en limos (ML) y más suaves pero extendidas en arenas limosas (SM), reflejando la influencia de la textura y estructura del suelo en la capacidad predictiva de cada modelo.

8.5.Succión (ψ).

El siguiente paso consiste en calcular la succión del suelo, un parámetro clave para entender el comportamiento de los suelos no saturados. La succión se determina a partir de la ecuación de Van Genuchten Ec. 7.9.

En esta ecuación los únicos parámetros que faltan determinar son los parámetros de forma (m y n) y el contenido volumétrico residual (θ_r). Sin embargo, podemos ver en la publicación técnica de Pérez García et al., (2012) se encuentran las gráficas de succiones y que por las que podemos asumir que θ_r se considera a 0 pues en las gráficas de succión presentadas en la publicación técnica, se observa que, a medida que la succión aumenta, el contenido de agua (θ) tiende a un valor muy cercano a 0. Esto sugiere que el suelo prácticamente no retiene agua en condiciones extremadamente secas, lo que justifica asumir $\theta_r = 0$. De igual manera se utilizó el método de mínimos cuadrados para poder ajustar la curva, y se utilizó el programa de SOLVER para encontrar los valores correspondientes para cada suelo, resultando en la Tabla 8.20.

Tabla 8.20 Parámetros para la succión.

Tipo de suelo	Parámetros			
	θ_r	α	n	m
Arcilla de alta compresibilidad, CH	0.0000	0.0331	1.1096	0.0988
Limo de baja compresibilidad, ML	0.0654	0.0441	1.1304	0.1154
Arena limosa, SM	0.0000	0.0030	1.1922	0.1612

Como podemos observar el programa mismo se ajustó para θ_r se aproxime a 0 validando lo dicho anterior. Se observa que el programa se ajustó de manera que el valor de θ_r tienda a 0, lo que valida la suposición planteada anteriormente. Este ajuste confirma que, en las condiciones analizadas, el contenido volumétrico residual es prácticamente despreciable. Esta validación es consistente con las observaciones experimentales y respalda la decisión de considerar $\theta_r = 0$, en el análisis, lo que permite un enfoque más eficiente y confiable en la aplicación del modelo. Todo esto resultó en la Tabla 8.21.

Tabla 8.21 ψ Teórico Vs ψ Experimental, Suelo CH, ML y SM.

CH		ML		SM	
ψ Teórico	ψ Experimental	ψ Teórico	ψ Experimental	ψ Teórico	ψ Experimental
198.11	200.00	147.06	200.00	85.49	110.00
188.41	180.00	146.98	200.00	92.65	120.00
161.18	150.00	207.10	200.00	106.40	110.00
177.56	190.00	207.81	200.00	105.20	110.00
155.18	150.00	294.78	300.00	117.26	150.00
161.18	170.00	368.20	300.00	140.57	120.00
219.52	190.00	307.78	300.00	130.35	130.00
194.16	210.00	283.16	300.00	147.19	170.00
109.34	120.00	521.90	500.00	130.35	170.00
106.77	130.00	325.07	400.00	112.62	140.00
99.66	110.00	619.89	550.00	288.17	230.00
104.98	110.00	737.41	800.00	216.79	230.00
79.80	90.00	100.56	100.00	289.24	310.00
97.62	120.00	101.83	100.00	190.09	200.00
79.24	70.00	98.75	90.00	61.05	50.00
74.21	60.00	104.47	100.00	55.09	50.00
68.85	60.00	102.14	90.00	54.19	50.00
71.71	50.00	104.61	120.00	51.97	35.00
54.43	35.00	68.46	45.00	53.31	35.00
60.79	50.00	66.89	50.00	63.47	30.00
63.60	40.00	71.46	55.00	48.61	30.00
130.27	140.00	60.19	30.00	38.94	35.00
130.27	140.00	50.84	25.00	38.10	25.00
198.11	200.00			45.42	30.00
188.41	180.00			41.66	25.00
				42.02	40.00
				49.74	40.00
				38.27	15.00
				32.12	15.00
				66.18	60.00
				66.18	60.00
				66.18	50.00

Los cuales resultaron en el siguiente ajuste.

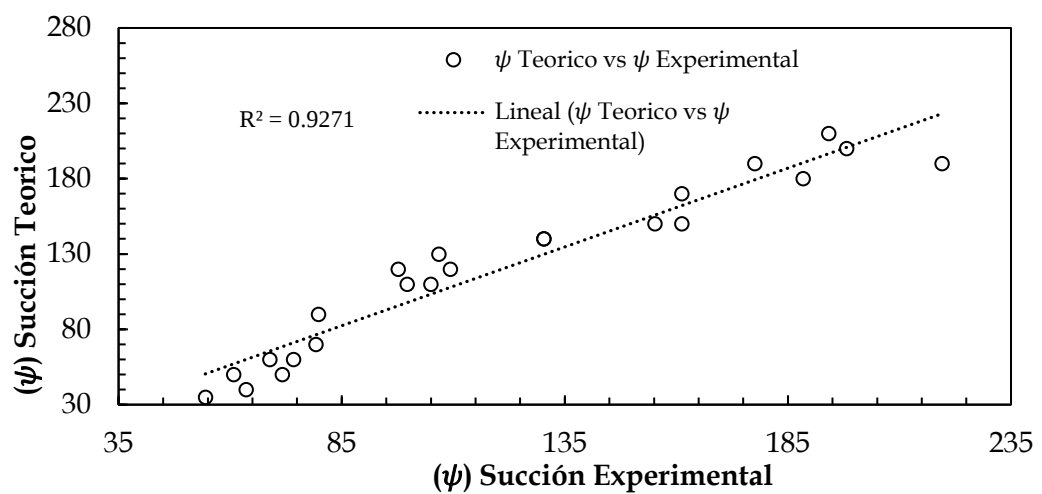


Figura 8.16 R2, ψ Teórico Vs ψ Experimental, Suelo CH.

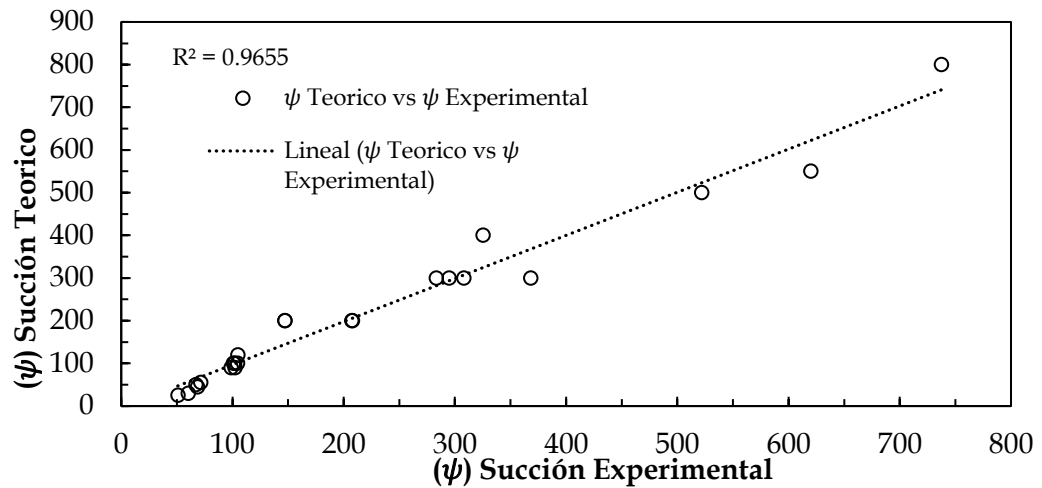


Figura 8.17 R2, ψ Teórico Vs ψ Experimental, Suelo ML.

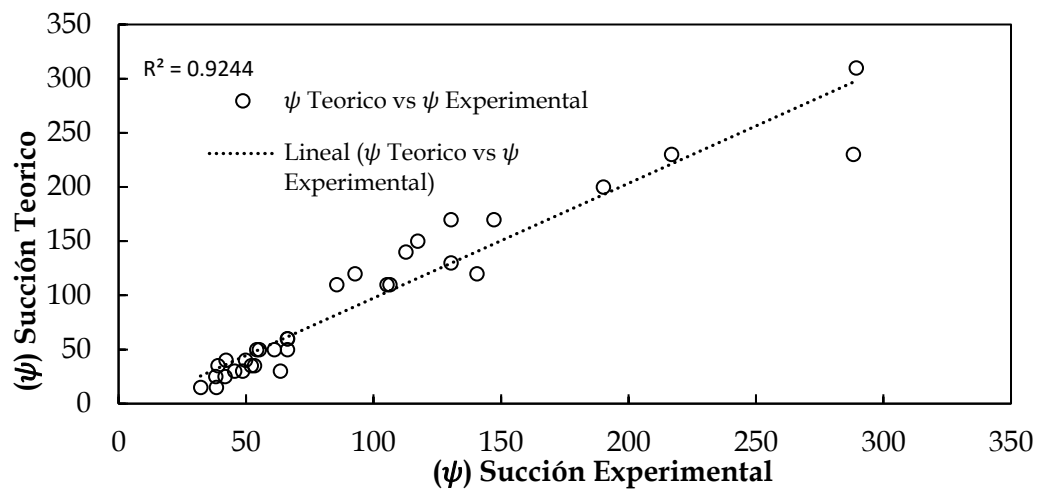


Figura 8.18 R2, ψ Teórico Vs ψ Experimental, Suelo SM.

Se puede observar que los resultados obtenidos de la succión presentan una alta correlación entre los valores pronosticados por el modelo propuesto y los datos experimentales. Esto indica las predicciones se alinean estrechamente con los valores reales medidos en laboratorio Tabla.8.22.

Tabla 8.22 Succión (ψ), R2

Succión (ψ)	
Tipo de suelo	R^2
Arcilla de alta compresibilidad, CH	0.927
Limo de baja compresibilidad, ML	0.966
Arena limosa, SM	0.924

8.6. Grado de saturación (S_r).

El último paso es el análisis del comportamiento del suelo no saturado es determinar el grado de saturación (S_r), que representa la proporción de los poros del suelo que están llenos de agua. Este parámetro nos permite entender cómo el suelo retiene o libera agua en función de la succión (ψ) y otros factores. La ecuación utilizada para calcular el grado de saturación fue la Ec.7.14

Para determinar los valores de los parámetros m , n y α se utilizó el método de mínimos cuadrados, buscando minimizar la diferencia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo, lo que permite encontrar los parámetros que mejor se ajustan a la curva de agua del suelo.

Además, se utilizó la herramienta de SOLVER, para automatizar el proceso de búsqueda de los valores óptimos de m , n y α , en donde se ajustó iterativamente estos parámetros hasta encontrar la combinación que minimizó el error entre los datos experimentales y los valores predichos por el modelo. Tabla 8.23.

Tabla 8.23 S_r Teórico Vs S_r Experimental, Suelo CH, ML y SM.

CH		ML		SM	
Sr Experimental	Sr Teórico	Sr Experimental	Sr Teórico	Sr Experimental	Sr Teórico
0.80	0.83	0.78	0.79	0.80	0.80
0.81	0.83	0.79	0.79	0.80	0.79
0.82	0.84	0.79	0.78	0.82	0.82
0.80	0.83	0.79	0.78	0.82	0.82
0.82	0.84	0.74	0.77	0.81	0.82
0.81	0.84	0.75	0.76	0.84	0.84
0.83	0.83	0.76	0.77	0.84	0.84
0.83	0.83	0.75	0.77	0.82	0.82
0.84	0.85	0.71	0.75	0.80	0.80
0.84	0.85	0.73	0.77	0.81	0.81
0.85	0.85	0.70	0.74	0.84	0.84
0.85	0.85	0.67	0.74	0.83	0.83
0.86	0.86	0.83	0.81	0.81	0.81
0.85	0.85	0.83	0.81	0.83	0.83
0.87	0.86	0.83	0.81	0.82	0.82
0.88	0.86	0.83	0.81	0.82	0.82
0.88	0.86	0.83	0.81	0.81	0.81
0.89	0.86	0.82	0.81	0.84	0.85
0.91	0.87	0.87	0.82	0.84	0.85
0.90	0.86	0.86	0.82	0.87	0.87
0.91	0.86	0.86	0.82	0.84	0.85
0.83	0.84	0.88	0.83	0.81	0.81
0.83	0.84	0.89	0.83	0.82	0.83
0.80	0.83			0.82	0.83
0.81	0.83			0.83	0.83
				0.83	0.83
				0.83	0.83
				0.81	0.81
				0.82	0.82
				0.82	0.82
				0.82	0.82
				0.84	0.84

De las cuales se obtuvieron las siguientes relaciones. Fig. (8.19– 8.21)

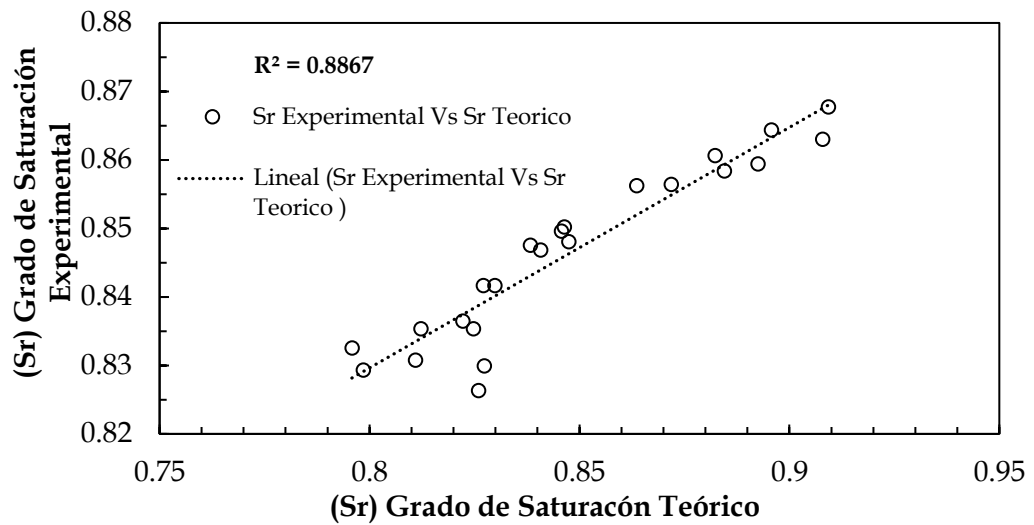


Figura 8.19 Sr Experimental Vs Sr Teórico, Suelo CH.

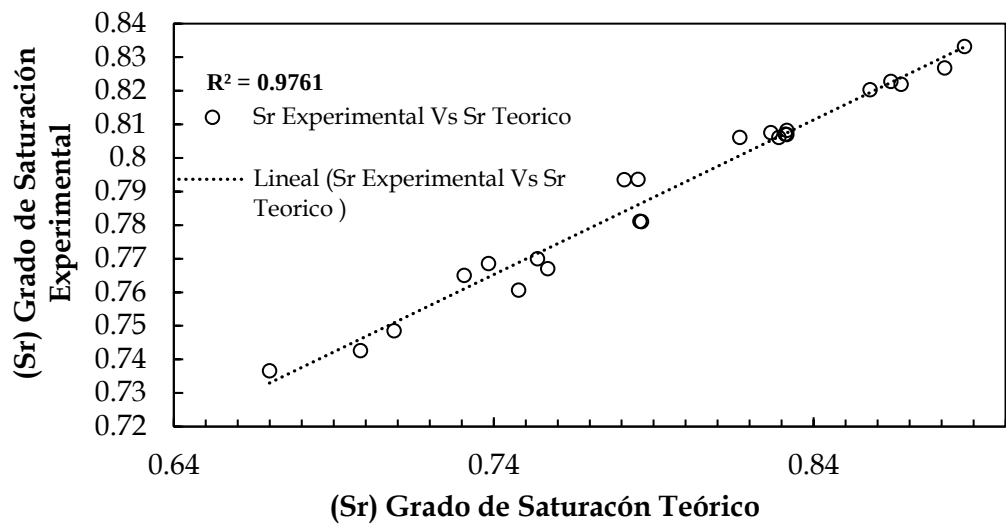


Figura 8.20 Sr Experimental Vs Sr Teórico, Suelo ML.

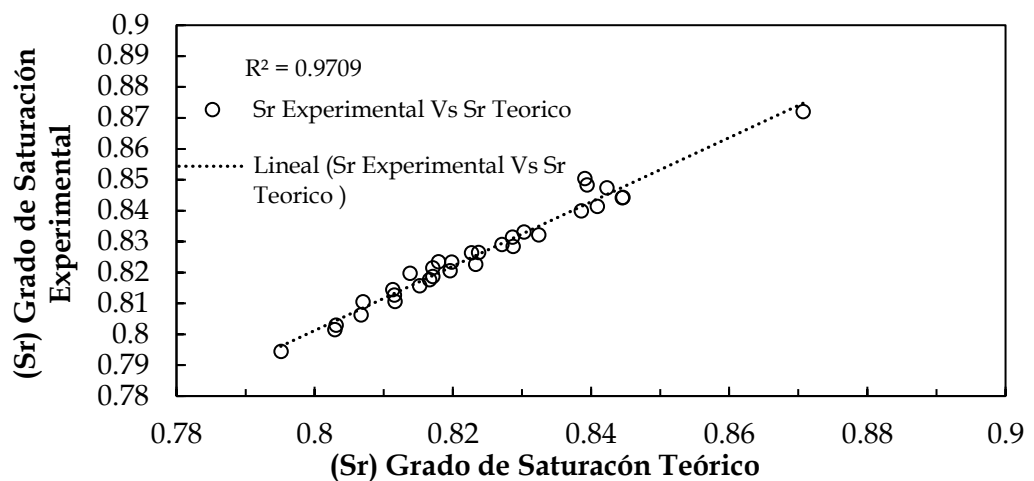


Figura 8.21 Sr Experimental Vs Sr Teórico, Suelo SM

Los valores de R^2 que se presentan en la tabla reflejan la calidad del ajuste del modelo con los datos experimentales para cada tipo de suelo, Tabla 8.24.

Tabla 8.24 Grado de saturación Sr. R2

Grado de saturación (S_r)	
Tipo de suelo	R^2
Arcilla de alta compresibilidad, CH	0.887
Limo de baja compresibilidad, ML	0.976
Arena limosa, SM	0.971

A partir de los datos disponibles, se procedió a graficar el grado de saturación en función de la succión utilizando el modelo de proporcionalidad natural, propuesto por Pérez García et al. (2013) en la Publicación Técnica No. 361. Este modelo permite estimar el comportamiento hidráulico de los suelos no saturados a través de una formulación teórica que facilita la generación de curvas características.

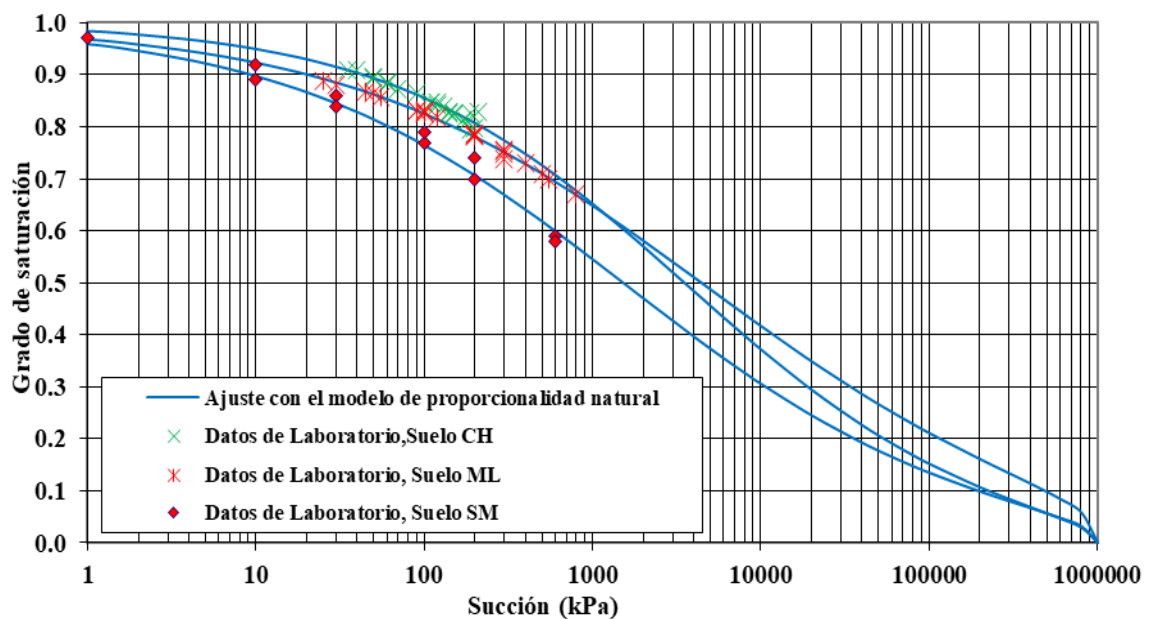


Figura 8.22. Curva característica con datos de laboratorio, datos de laboratorio.

El propósito principal de esta representación fue contrastar los resultados experimentales obtenidos en laboratorio con los valores teóricos generados mediante dicho modelo (Fig. 8.22 y 8.23), con el fin de evaluar la validez y precisión del ajuste teórico en relación con los datos reales. Además, se realizó un análisis detallado y comparativo para cada tipo de suelo por separado, considerando sus propias curvas características (Fig. 8.24 a 8.26), lo que permitió identificar con mayor claridad el grado de concordancia entre el modelo propuesto y el comportamiento observado en cada material.

Esta comparación individual permitió observar cómo varía la retención de humedad en función de la succión para distintos tipos de suelos (CH, ML, SM), proporcionando una visión más completa del ajuste del modelo teórico en diferentes condiciones texturales y de estructura del suelo.

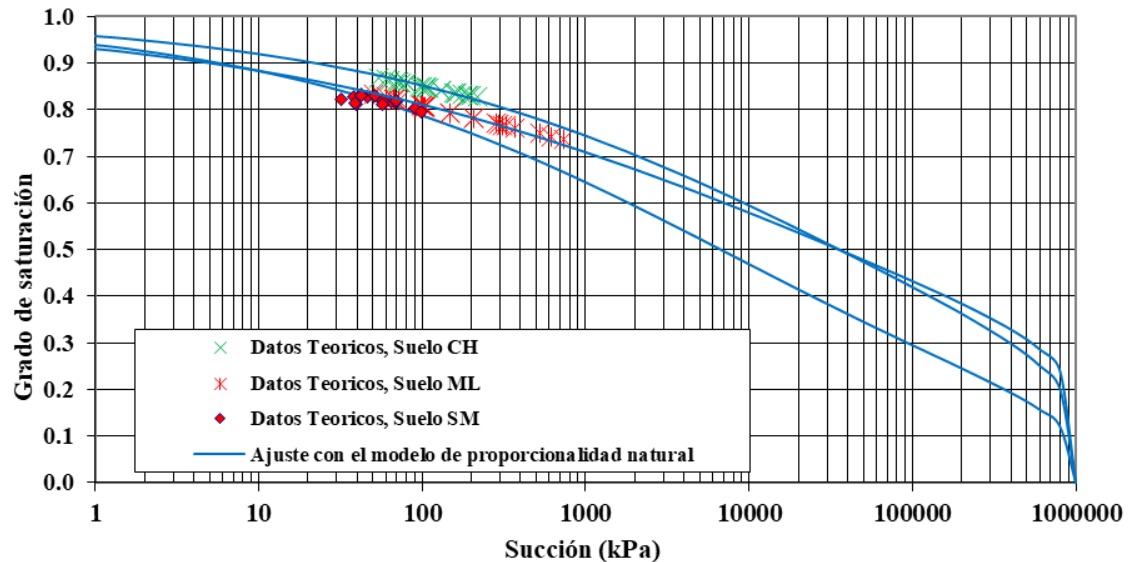


Figura 8.23. Curva característica con datos de laboratorio, datos teóricos.

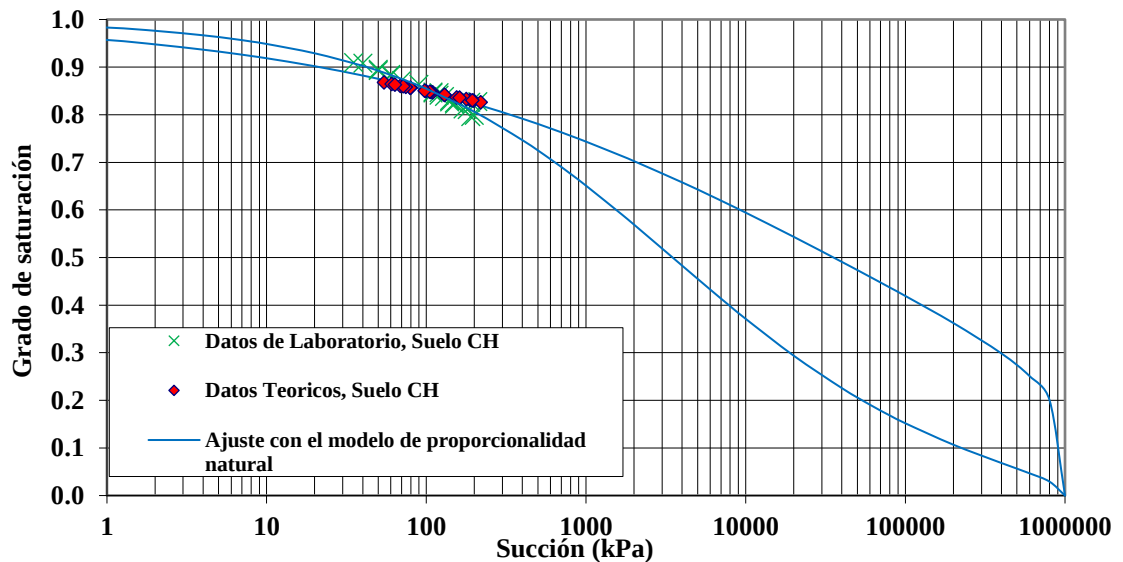


Figura 8.24. Curva características con datos de laboratorio Vs datos experimentales suelo CH.

Y a partir de las figuras anteriormente vistas podemos comparar las curvas características obtenidas experimentalmente y los ajustes teóricos mediante el modelo de proporcionalidad natural evidencia una correlación funcional adecuada entre ambas representaciones. Los puntos experimentales para los tres tipos de suelo (CH, ML y SM)

se alinean razonablemente con las respectivas curvas teóricas, aunque se observan ciertas desviaciones específicas en rangos definidos de succión.

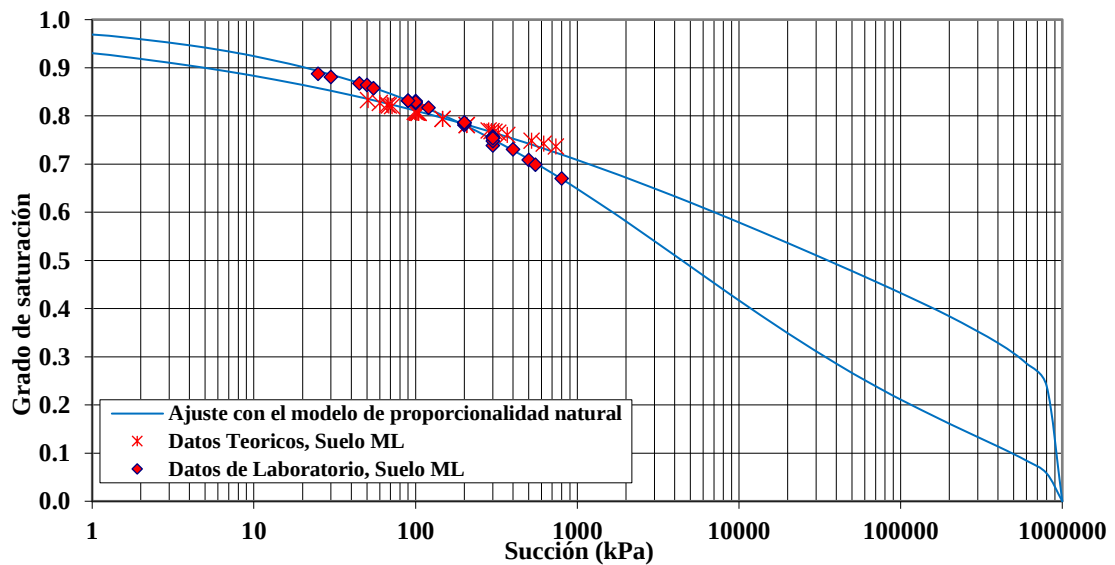


Figura 8.25. Curva características con datos de laboratorio Vs datos experimentales suelo ML.

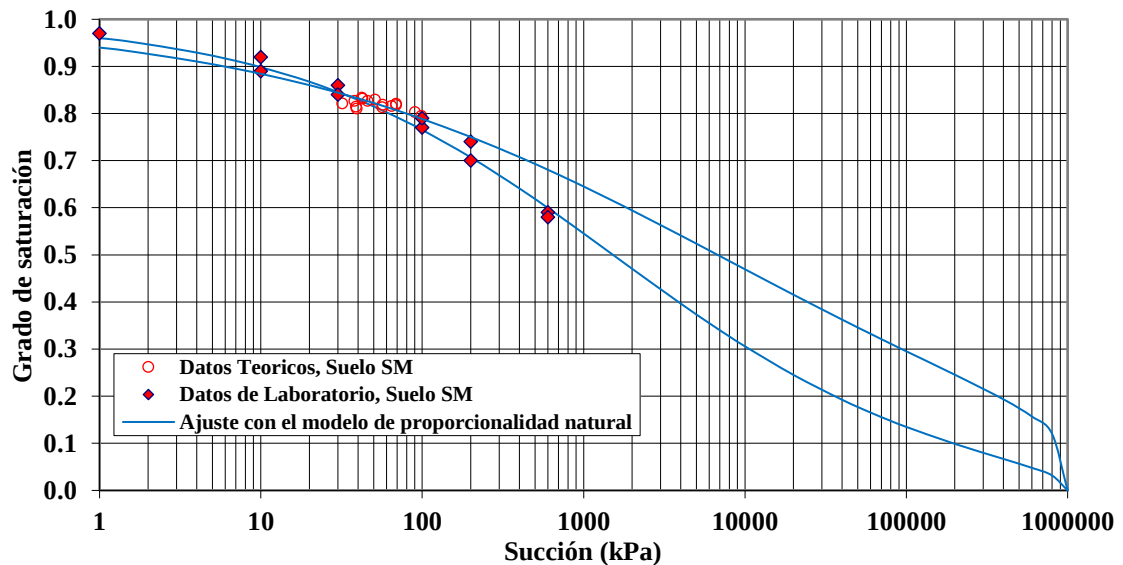


Figura 8.26. Curva características con datos de laboratorio Vs datos experimentales suelo SM.

En general, el modelo teórico logra describir correctamente la tendencia de reducción del grado de saturación conforme aumenta la succión, especialmente en suelos finos de alta plasticidad como el CH, donde la concordancia es más estrecha. Para este tipo de suelo, los datos experimentales se mantienen alineados con la curva teórica hasta succiones del orden de 300–500 kPa, antes de presentar una dispersión moderada.

En suelos de tipo ML, se observa una ligera subestimación del modelo en el intervalo de succión entre 100 y 800 kPa, donde el descenso experimental del grado de saturación

ocurre a una velocidad mayor que la prevista teóricamente. Por otro lado, el suelo SM, de naturaleza más granular, presenta la mayor dispersión relativa entre los datos de laboratorio y la curva teórica, especialmente a partir de succiones cercanas a los 200–400 kPa, donde el contenido de agua disminuye de forma más abrupta que la predicha por el modelo.

La succión umbral a partir de la cual se evidencia una mayor variabilidad entre lo teórico y lo experimental depende de la textura y estructura del suelo. De manera general, para suelos CH, la variación se acentúa después de 500 kPa, para suelos ML, a partir de 300–400 kPa y para suelos SM, desde 200–300 kPa.

Estas observaciones sugieren que, aunque el modelo de proporcionalidad natural es útil como representación base del comportamiento hidromecánico no saturado, su fidelidad disminuye conforme cuando aumenta la succión, particularmente en suelos con menor capacidad de retención de agua. La relación entre las curvas y los puntos indica una representación aceptable en rangos bajos y medios de succión, pero se recomienda realizar ajustes específicos por tipo de suelo para mejorar la predicción del comportamiento hídrico a succión elevada.

8.6.1. Comparación entre el método de Van Genuchten y el modelo propuesto para las curvas características, (S_r vs ψ).

La modelización de la curva característica del suelo-agua (SWCC) es fundamental en mecánica de suelos no saturados para relacionar el Grado de Saturación (S_r) con la Succión Matricial (ψ). Análogamente en este estudio, se comparan dos metodologías principales: el modelo Teórico base, derivado de la correlación con el Índice de Thornthwaite (IT), y el método de la función de Van Genuchten (VG) como modelo de ajuste primario, a comparación del método del modelo de proporcionalidad.

Para el método basado en la metodología del índice de Thornthwaite se basa en la ecuación de Thornthwaite, comúnmente basado en balances hídricos para estimar la evapotranspiración potencial y a partir de datos climáticos Thornthwaite, (1948). En su aplicación a la curva característica, el modelo IT utiliza parámetros fijos (k e IT_0) para cada tipo de suelo, asumiendo una correlación preestablecida entre el índice climático (IT) y el potencial hídrico del suelo. La metodología de van Genuchten consiste en medir la curva de retención de agua, normalizarla al grado de saturación, y ajustar los

parámetros α , n y m en la ecuación de Van Genuchten, (1980), para representar el comportamiento hídrico y mecánico del suelo no saturado.

La principal ventaja al utilizar el Índice de Thornthwaite es su simplicidad y bajo costo computacional, siendo fácil de implementar a través de una fórmula directa. Sin embargo, su limitación reside en la falta de adaptabilidad a las mediciones de laboratorio. Al emplear parámetros fijos, la curva teórica puede no coincidir con precisión con los datos experimentales obtenidos, especialmente en el rango de bajas succiones, resultando en una precisión limitada para caracterizaciones específicas de suelos.

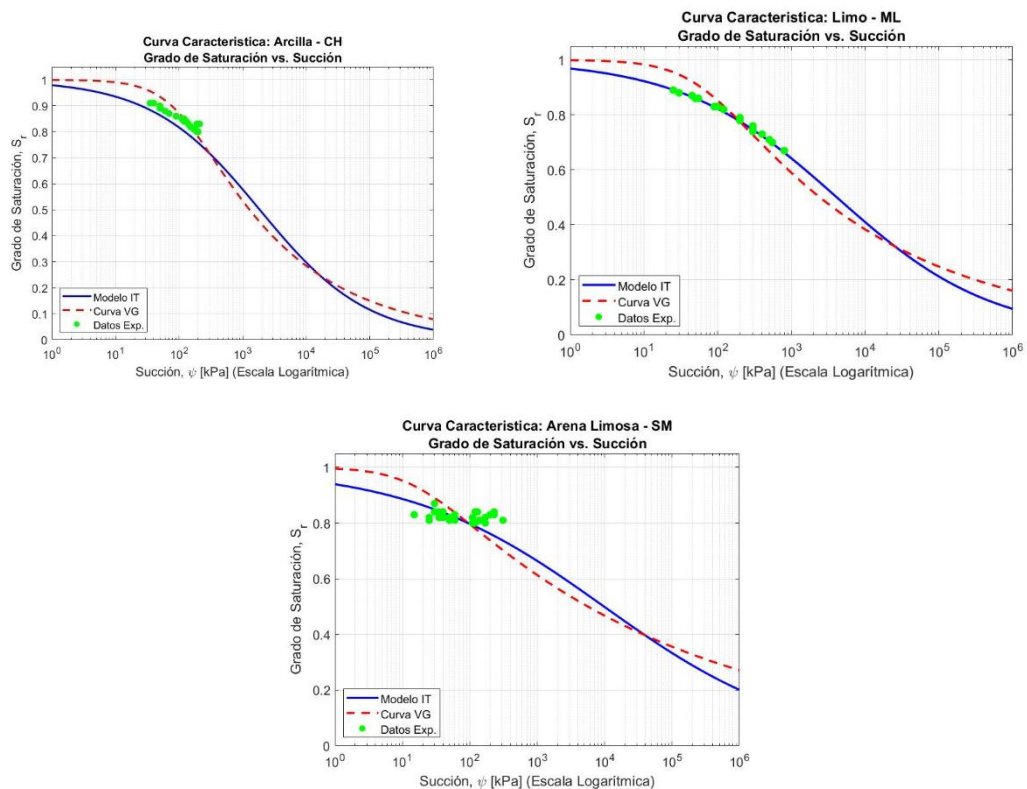


Figura 8.27. Curvas características suelo-agua (SWCC), para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).

Ambas metodologías producen curvas con la forma sigmoideal característica de la curva característica, que describe la liberación de agua del suelo al aumentar la succión. La mejora crucial del enfoque reside en la optimización del ajuste. En lugar de depender de parámetros teóricos predefinidos, la curva de Van Genuchten se ajusta directamente a los datos experimentales de S_r vs ψ . Esto garantiza que el modelo resultante sea la representación analítica más cercana posible al comportamiento real del suelo, esto se realizó con un código de Matlab (**Anexo V.III**).

Posteriormente, la ecuación del modelo IT sea aliena con la curva de Van Genuchten mediante el ajuste de sus propios parámetros de mapeo, garantizando una superposición visual y funcional, y transfiriendo la precisión del modelo.

Una de las ventajas al realizar este ajuste optimiza y asegura que la curva pasa sobre la nube de puntos experimentales con la mejor fidelidad posible,

La mayor desventaja es que los coeficientes dejan de ser estrictamente una correlación directa del balance hídrico de Thornthwaite y se convierten en coeficientes empíricos de ajuste numérico. Además, el proceso requiere el uso de software y algoritmos de optimización, aumentando la complejidad computacional respecto al cálculo directo del método IT.

Se presentan las curvas características suelo-agua (SWCC) obtenidas para tres tipos de suelo: arcilla de alta plasticidad (CH), limo de baja plasticidad (ML) y arena limosa (SM), Figura 8.27. Dichas curvas relacionan el grado de saturación (S_r) con la succión (ψ).

El modelo desarrollado para esta investigación (línea azul) basada en el Índice de Thornthwaite (IT) y la curva de Van Genuchten (línea roja) que es el modelo clásico ampliamente utilizado como referencia y los datos experimentales (puntos verdes) son los resultados obtenidos en laboratorio para cada tipo de suelo.

Para la arcilla de alta plasticidad (CH) se presenta una marcada capacidad de retención de agua incluso en succiones elevadas, lo cual se asocia con su alta proporción de microporos. El modelo IT reproduce adecuadamente el comportamiento observado en los datos experimentales, mostrando un mejor ajuste que la curva de Van Genuchten en el rango de succiones intermedias y altas, donde esta última tiende a sobreestimar el grado de saturación.

Para el limo de baja plasticidad (ML), se observa una transición más definida entre la saturación y la desaturación del suelo. Tanto el modelo IT como el de Van Genuchten se aproximan a los resultados experimentales; sin embargo, el modelo IT mantiene un seguimiento más preciso en la zona intermedia de succiones. Este comportamiento confirma que los limos poseen una capacidad de almacenamiento hídrico menor que las arcillas, pero aún relevante para procesos de flujo no saturado.

Para la arena limosa (SM), evidencia una rápida pérdida de saturación conforme la succión se incrementa, lo cual es característico de materiales macroporosos. En este suelo, el modelo IT logra representar de mejor manera los datos experimentales, en contraste

con el modelo de Van Genuchten que sobreestima el grado de saturación en las succiones iniciales.

Los resultados demuestran que el modelo IT presenta un ajuste más robusto que el modelo de Van Genuchten en la zona intermedia de succiones, donde ocurre la mayor variabilidad del grado de saturación. Este comportamiento se refleja con mayor claridad en los suelos finos (CH y ML), mientras que en suelos más gruesos (SM) la diferencia entre ambos modelos sigue siendo significativa en el rango inicial de desaturación. Por lo que se puede entender que la formulación propuesta basada en el Índice de Thornthwaite ofrece un desempeño competitivo frente al modelo clásico de Van Genuchten, y constituye una alternativa viable para describir el comportamiento hidro-mecánico de distintos tipos de suelo.

8.7. Variación del Índice de Thornthwaite (IT) bajo diferentes condiciones climáticas.

Para adaptar el análisis, se establecieron condiciones extremas en la escala del IT, abarcando desde un estado de lluvias intensas hasta temporadas en un estado crítico de sequía, con valores que oscilan entre -110 y 110 respectivamente.

Aunque la escala del IT clasifica un clima como árido cuando su valor supera los 100 y como excesivamente húmedo cuando es superior a los -40, en este estudio se amplió el rango a valores entre -110 y 110. Esta ampliación permite evaluar condiciones más extremas, representando escenarios de sequía severa y de precipitaciones excesivas que podrían no estar contemplados en la clasificación estándar, pero que son relevantes para el análisis de la respuesta del suelo en condiciones límite.

Para llevar a cabo el estudio, previamente se requieren los datos de la compactación de cada prueba (los secados y los humedecidos) para obtener el W_{opt} y γ_{dmax} . Estos parámetros se analizaron siguiendo la metodología previamente establecida:

$$W_{opt} \text{ y } \gamma_{dmax} \rightarrow \theta_{opt} \rightarrow S_{opt} \rightarrow \theta_{sat} \rightarrow \theta \rightarrow \psi \rightarrow S_r$$

Para este caso, se estableció una relación directa entre el IT y los parámetros de compactación W_{opt} y γ_{dmax} , obteniendo las siguientes ecuaciones. Tabla 8.25.

Tabla 8.25 Relación entre el IT y W_{opt} y γ_{dmax} .

Tipo de suelo	Relación entre el IT y W_{opt} y ρ_{dmax}			
	W_{opt}		ρ_{dmax}	
	Ecuación	R^2	Ecuación	R^2
Arcilla de alta compresibilidad, CH	$W_{opt} = 0.1566IT + 28.19$	0.9906	$\rho_{dmax} = -0.0206IT + 13.233$	0.9669
Limo de baja compresibilidad, ML	$W_{opt} = 0.1318IT + 27.39$	0.974	$\rho_{dmax} = 0.008IT + 13.183$	0.9032
Arena limosa, SM	$W_{opt} = 0.1189IT + 20.77$	0.977	$\rho_{dmax} = 0.0105IT + 17.218$	0.9999

Como se puede observar, existe una fuerte correlación entre W_{opt} y γ_{dmax} , con coeficientes de determinación (R^2) elevados, lo que valida el uso de estas ecuaciones en el análisis se ilustran en las gráficas correspondientes Fig. 8.28-8.30.

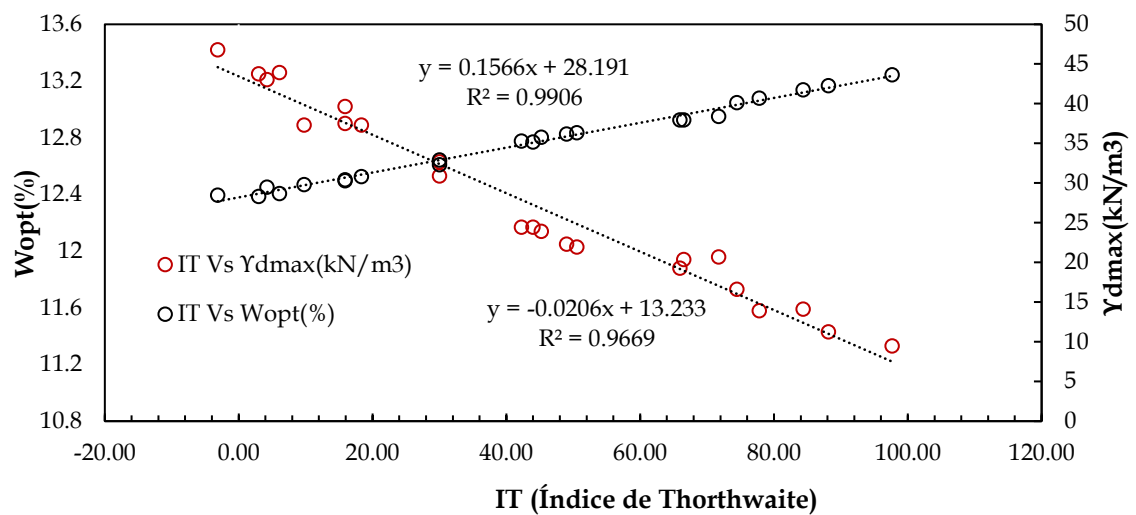


Figura 8.28 W_{optm} Vs IT, Suelo CH.

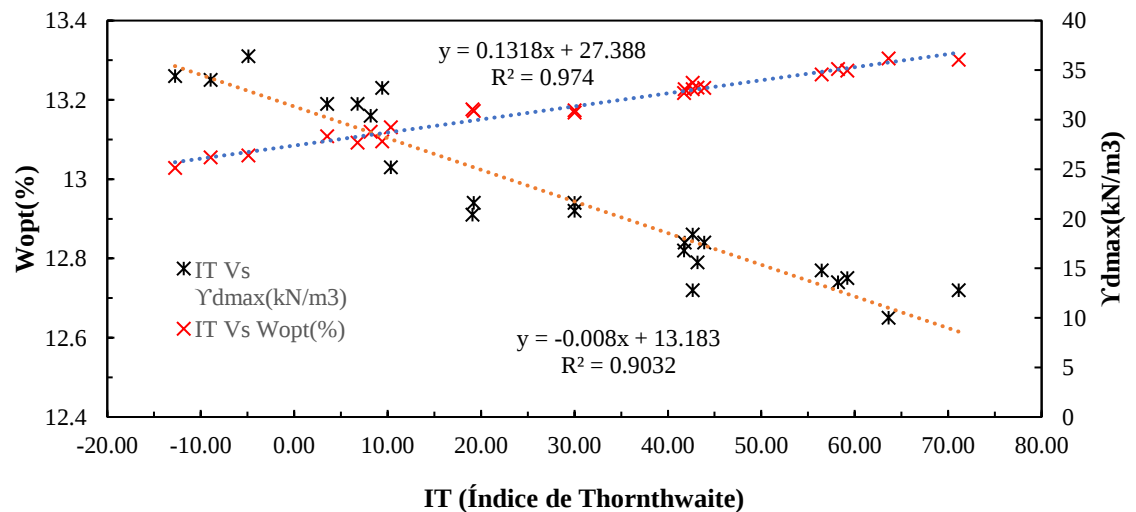


Figura 8.29 Woptm Vs IT, Suelo ML.

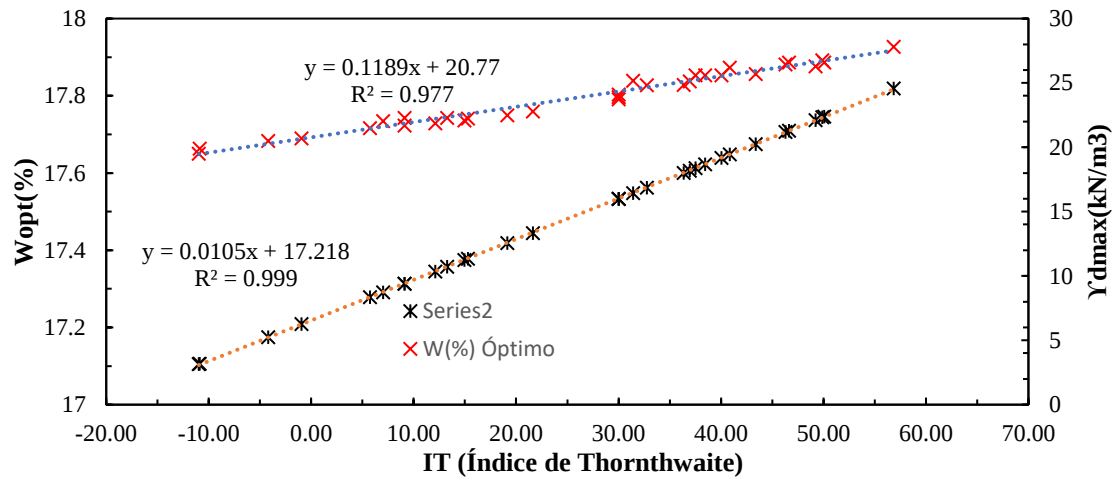


Figura 8.30 Woptm Vs IT, Suelo SM.

Con estos datos de entrada, se procede a seguir la metodología establecida, obteniendo los siguientes resultados. Tabla 8.26 – 8.28.

Tabla 8.26 Resultados de las pruebas, CH.

IT	W Opt	Ydmax	θ Opt	S Opt	θ Sat	θ Teórico	ψ Teórico	Sr Teórico
-100	0.125	15.293	0.019	0.048	0.398	0.398	0.3910	0.9682
-90	0.141	15.087	0.021	0.052	0.406	0.406	0.4728	0.9627
-80	0.157	14.881	0.023	0.056	0.414	0.414	0.5718	0.9562
-70	0.172	14.675	0.025	0.060	0.422	0.422	0.6917	0.9489
-60	0.188	14.469	0.027	0.063	0.430	0.430	0.8370	0.9406
-50	0.204	14.263	0.029	0.066	0.438	0.437	1.0132	0.9314
-40	0.219	14.057	0.031	0.069	0.447	0.445	1.2270	0.9213
-30	0.235	13.851	0.033	0.072	0.455	0.453	1.4866	0.9102
-20	0.251	13.645	0.034	0.074	0.463	0.461	1.8022	0.8982
-10	0.266	13.439	0.036	0.076	0.471	0.468	2.1867	0.8855
0	0.282	13.233	0.037	0.078	0.479	0.476	2.6556	0.8720
10	0.298	13.027	0.039	0.080	0.487	0.483	3.2290	0.8579
20	0.313	12.821	0.040	0.081	0.495	0.490	3.9320	0.8432
30	0.329	12.615	0.041	0.082	0.503	0.497	4.7967	0.8281
40	0.345	12.409	0.043	0.084	0.511	0.504	5.8648	0.8126
50	0.360	12.203	0.044	0.085	0.520	0.510	7.1908	0.7966
60	0.376	11.997	0.045	0.085	0.528	0.516	8.8471	0.7804
70	0.392	11.791	0.046	0.086	0.536	0.521	10.9320	0.7639
80	0.407	11.585	0.047	0.087	0.544	0.526	13.5805	0.7470
90	0.423	11.379	0.048	0.087	0.552	0.529	16.9833	0.7297
100	0.439	11.173	0.049	0.087	0.560	0.532	21.4154	0.7121

Tabla 8.27 Resultados de las pruebas, ML.

IT	W Opt	Ydmax	θ Opt	S Opt	θ Sat	θ Teórico	ψ Teórico	Sr Teórico
-100	0.142	15.293	0.022	0.050	0.431	0.158	866445.209	0.531
-90	0.155	15.087	0.023	0.053	0.439	0.176	253222.518	0.562
-80	0.168	14.881	0.025	0.056	0.446	0.195	85989.131	0.591
-70	0.182	14.675	0.027	0.059	0.454	0.216	33058.503	0.618
-60	0.195	14.469	0.028	0.061	0.462	0.237	14125.842	0.643
-50	0.208	14.263	0.030	0.063	0.469	0.258	6616.575	0.666
-40	0.221	14.057	0.031	0.065	0.477	0.280	3360.338	0.687
-30	0.234	13.851	0.032	0.067	0.485	0.302	1833.529	0.706
-20	0.248	13.645	0.034	0.069	0.492	0.323	1066.273	0.724
-10	0.261	13.439	0.035	0.070	0.500	0.345	656.110	0.741
0	0.274	13.233	0.036	0.071	0.508	0.366	424.336	0.756
10	0.287	13.027	0.037	0.073	0.515	0.386	286.672	0.770
20	0.300	12.821	0.038	0.074	0.523	0.406	201.154	0.782
30	0.313	12.615	0.040	0.075	0.531	0.425	145.847	0.794
40	0.327	12.409	0.041	0.075	0.538	0.444	108.761	0.805
50	0.340	12.203	0.041	0.076	0.546	0.461	83.076	0.815
60	0.353	11.997	0.042	0.077	0.554	0.478	64.767	0.824
70	0.366	11.791	0.043	0.077	0.561	0.494	51.376	0.833
80	0.379	11.585	0.044	0.077	0.569	0.509	41.357	0.841
90	0.393	11.379	0.045	0.077	0.577	0.524	33.709	0.849
100	0.406	11.173	0.045	0.078	0.584	0.538	27.767	0.856

Tabla 8.28 Resultados de las pruebas, SM.

IT	W Opt	Ydmax	θ Opt	S Opt	θ Sat	θ Teórico	ψ Teórico	Sr Teórico
-100	0.089	14.151	0.013	0.029	0.427	0.085	146350.381	0.610
-90	0.101	14.152	0.014	0.033	0.427	0.102	58232.798	0.634
-80	0.113	14.153	0.016	0.037	0.427	0.120	24315.261	0.657
-70	0.124	14.153	0.018	0.041	0.427	0.141	10711.553	0.680
-60	0.136	14.154	0.019	0.045	0.427	0.163	5001.082	0.702
-50	0.148	14.155	0.021	0.049	0.427	0.186	2482.628	0.722
-40	0.160	14.155	0.023	0.053	0.427	0.210	1312.204	0.742
-30	0.172	14.156	0.024	0.057	0.427	0.234	737.912	0.760
-20	0.184	14.157	0.026	0.061	0.427	0.258	440.198	0.776
-10	0.196	14.157	0.028	0.065	0.427	0.280	277.240	0.791
0	0.208	14.158	0.029	0.069	0.427	0.301	183.233	0.805
10	0.220	14.159	0.031	0.073	0.427	0.320	126.249	0.818
20	0.231	14.159	0.033	0.077	0.427	0.337	90.091	0.829
30	0.243	14.160	0.034	0.081	0.427	0.352	66.181	0.840
40	0.255	14.161	0.036	0.085	0.427	0.365	49.781	0.849
50	0.267	14.161	0.038	0.089	0.427	0.376	38.168	0.859

60	0.279	14.162	0.040	0.093	0.427	0.386	29.717	0.867
70	0.291	14.163	0.041	0.097	0.427	0.393	23.423	0.876
80	0.303	14.163	0.043	0.100	0.427	0.400	18.643	0.884
90	0.315	14.164	0.045	0.104	0.427	0.405	14.955	0.891
100	0.327	14.164	0.046	0.108	0.427	0.409	12.072	0.899

Después se analizó el comportamiento del θ , ψ y S_r dentro del rango de -110 a 110 en la escala del IT, esto para comparar los datos experimentales con la tendencia teórica.

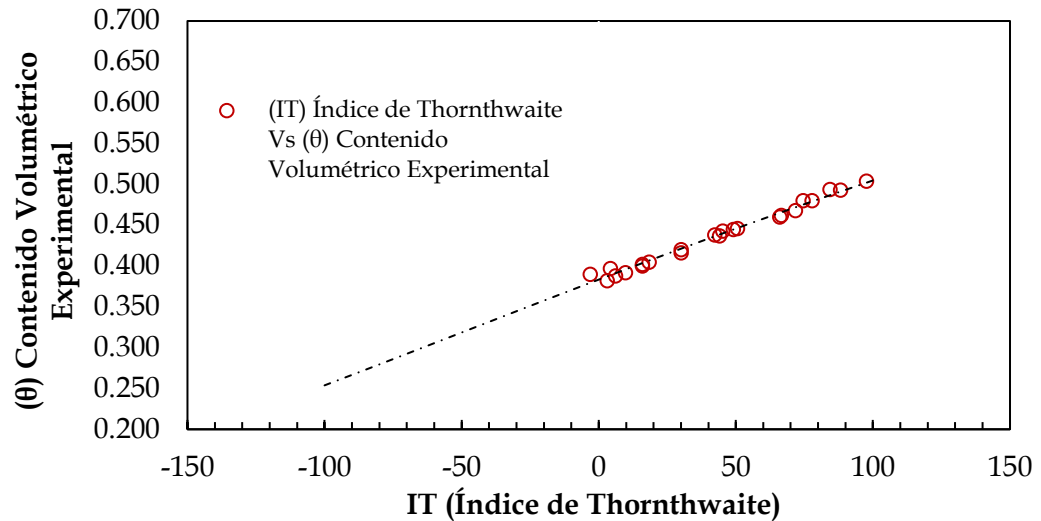


Figura 8.31 θ Vs IT, Suelo CH.

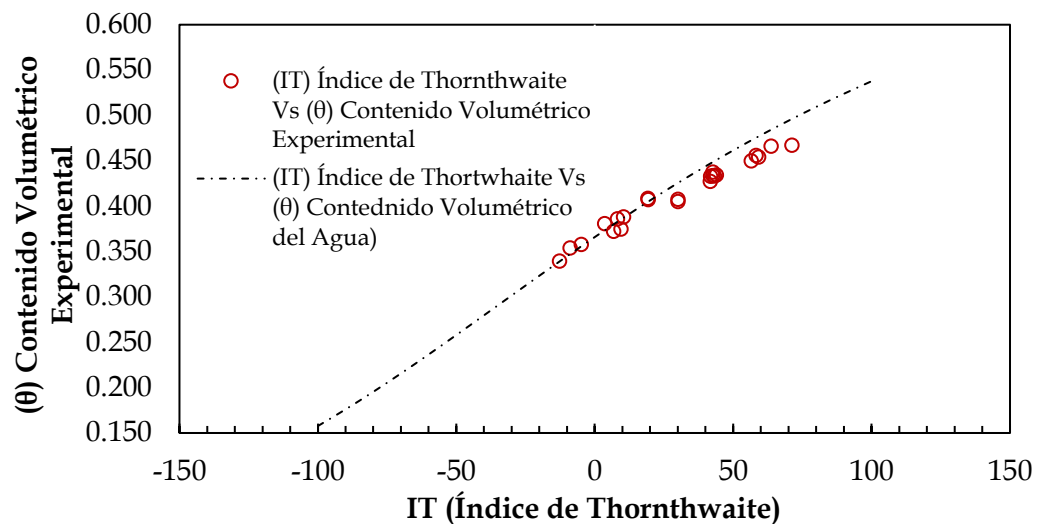


Figura 8.32 θ Vs IT, Suelo ML.

Este análisis nos permitió evaluar que tan preciso puede llegar a ser el modelo propuesto, identificando el grado de ajuste entre la realidad y lo pronosticado.

Comenzamos analizando el comportamiento del θ , el cual sigue una tendencia sigmoideal. Para ajustar la curva de manera eficaz, se utilizaron los datos correspondientes, permitiendo una representación más fiel de su variación. Fig. 8.31 – 8.33.

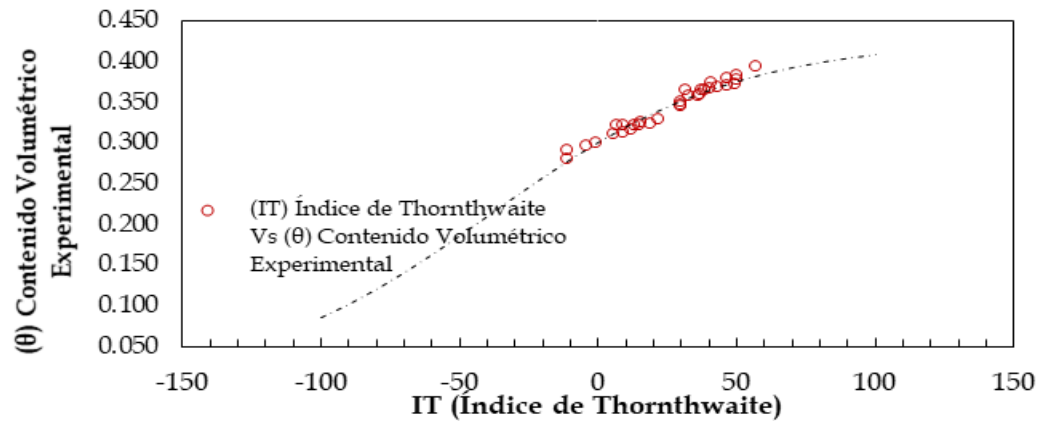


Figura 8.33 θ Vs IT, Suelo SM.

Como se puede observar los datos experimentales se ajustan a las curvas establecidas para cada suelo. Ahora pasamos a lo analizado entre la ψ y el IT con los datos anteriormente calculados. Fig. 8.34 – 8.36.

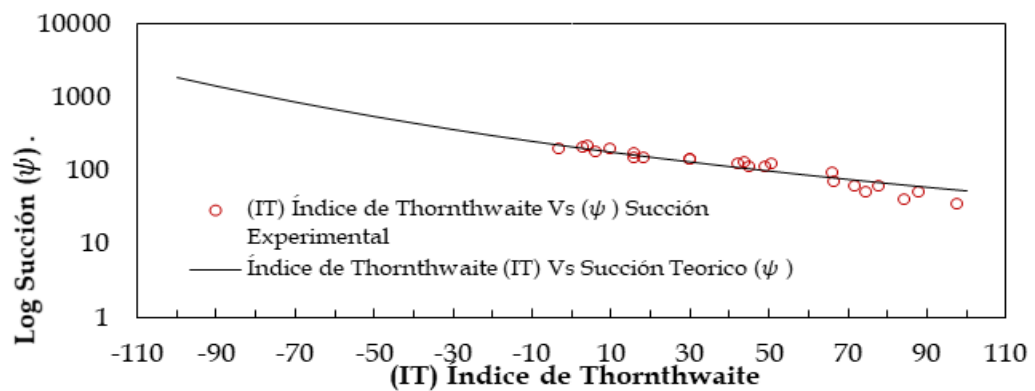


Figura 8.34 ψ Vs IT, Suelo CH.

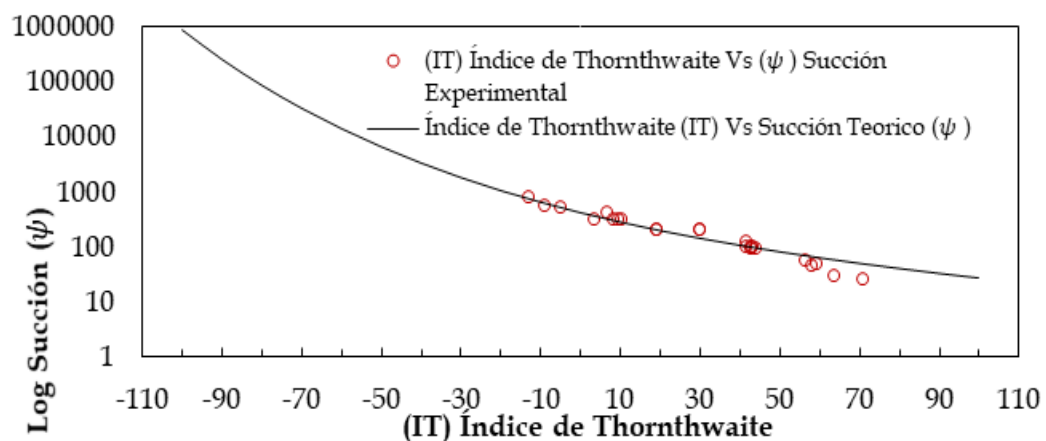


Figura 8.35 ψ Vs IT, Suelo ML

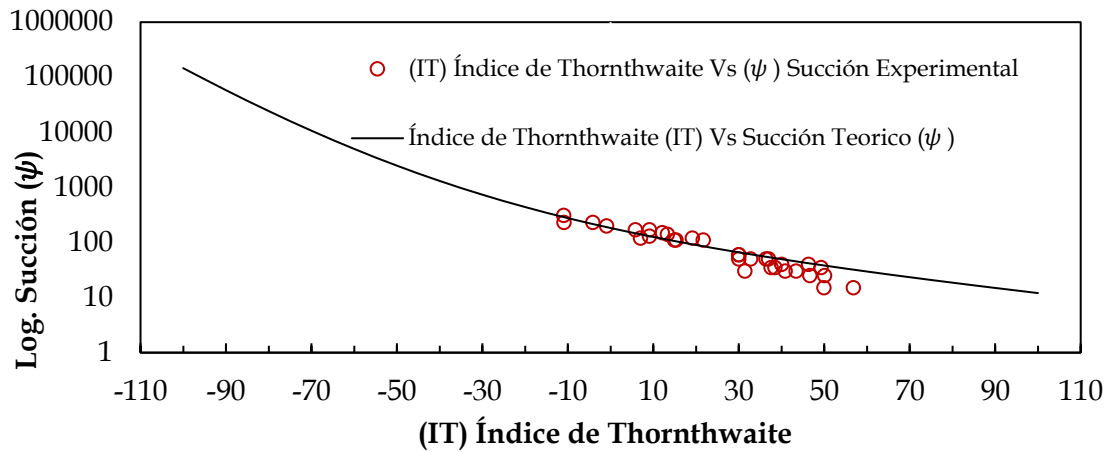


Figura 8.36 ψ Vs IT, Suelo SM.

8.8. Modelos de módulo de resiliencia (M_R) para suelos puros y combinados: CH, ML y SM.

Para poder evaluar el módulo de resiliencia, los datos se estuvieron trabajando en MINITAB, para encontrar el modelo que mejor se ajuste y represente el comportamiento de los datos. De este estudio y para el caso de los tres suelos, los que mejores se ajustaron fueron, Tabla 8.29.

Tabla 8.29 Modelos del M_r para los diferentes suelos.

Tipo de suelo	$M_R = f(IT, \theta, \psi, S_r, \sigma_d, \sigma_3)$	
	Modelo	R^2
Arcilla de alta compresibilidad, CH	$M_R = e^{-41.13\theta_T - 0.00269IT_T - 0.00961\psi_T - 27.63S_{rT} - 0.005804\sigma_d + 0.008469\sigma_3}$	0.9423
Limo de baja compresibilidad, ML	$M_R = e^{-72.618\theta_T + 0.03294IT_T + 0.000007\psi_T + 41.58S_{rT} - 0.00368\sigma_d + 0.01551\sigma_3}$	0.9086
Arena limosa, SM	$M_R = e^{16.78\theta_T - 0.02944IT_T + 0.002636\psi_T - 1.32S_{rT} - 0.003108\sigma_d + 0.0202056\sigma_3}$	0.8301

Donde:

M_R	Módulo de resiliencia
e	Constante de Euler
IT	Índice de Thornthwaite
θ	Contenido volumétrico del agua
ψ	Succión
S_r	Grado de saturación
σ_d	Esfuerzo de confinamiento
σ_3	Esfuerzo desviador

Tabla 8.30 Análisis de variancia, Suelo CH.

Predictor	Coef.	SE Coef.	t	P
θ	-41.13	3.19	-1.10	0.272
IT	-0.00269	0.00244	-12.88	0.0
ψ	-0.00961	0.00116	-8.26	0.0
S_r	27.63	1.67	16.50	0.0
σ_d	-0.005804	0.000356	-16.33	0.0
σ_3	0.008469	0.000846	10.02	0.0
S= 0.180984				

Tabla 8.31 Análisis de variancia, Suelo ML

Predictor	Coef.	SE Coef.	t	P
θ	-72.61	4.88	8.66	0.0
IT	0.03294	0.00380	-14.98	0.0
ψ	0.000007	0.000173	0.04	0.968
S_r	41.58	2.44	17.05	0.0
σ_d	-0.003680	0.000401	-9.18	0.0
σ_3	0.015451	0.000953	16.21	0.0
S = 0.204058				

Tabla 8.32 Análisis de variancia, Suelo SM

Predictor	Coef.	SE Coef.	t	P
θ	16.78	3.03	5.54	0.0
IT	-0.02944	0.00270	-10.90	0.0
ψ	0.002636	0.000383	6.89	0.0
S_r	-1.32	1.21	-1.09	0.276
σ_d	-0.003108	0.000249	-12.50	0.0
σ_3	0.020205	0.000591	34.18	0.0
S= 0.149257				

De los modelos propuestos y de los resultados arrojados por el programa de MINITAB se tiene el análisis de la significancia de cada uno de los parámetros encontrados para cada tipo de suelo estudiado, así como se hizo el análisis de variancia de cada modelo, las Tablas (8.30 – 8.32) muestran el resumen de dichos resultados. De igual manera las Figuras (8.37-8.39) muestran las gráficas de los valores residuales.

De acuerdo con los resultados presentados en las tablas anteriores, todas las variables independientes propuestas aportan una importancia dentro del modelo, ya que los valores de “p” son muy pequeños, así mismo, el valor de “p” de la regresión es muy pequeña o nula, por lo que se indica que el modelo es adecuado para describir los datos del módulo de resiliencia.

En otro sentido las gráficas (mencionar las gráficas residuales), son otro indicador importante de lo adecuado que llega a ser el modelo. Las primeras gráficas mostradas de

los datos de MINITAB indican que los residuales caen una línea recta o en su mayoría de los datos adoptan este comportamiento, lo que se sugiere que los residuales se comportan de manera normal, y esto se puede ver también en las gráficas de frecuencia. En este mismo sentido se puede observar que en las gráficas de observación contra residuales indica una mayor disposición aleatoria, que es un buen parámetro para indicar que no se incumplieron las suposiciones contempladas en el método de análisis.

Finalmente, en las Figuras (8.40-8.42) se muestra una relación entre los datos experimentales con los datos calculados de los diferentes modelos y para cada suelo, de estas graficas se pueden observar que los modelos predicen de manera adecuada el módulo de resiliencia, cuando los valores son menores a 50 MPa esto para el caso de la arcilla y el limo a comparación de cuando sucede con la arena que abarca un mejor rango de 50 a 100 MPa en donde se presenta menor dispersión.

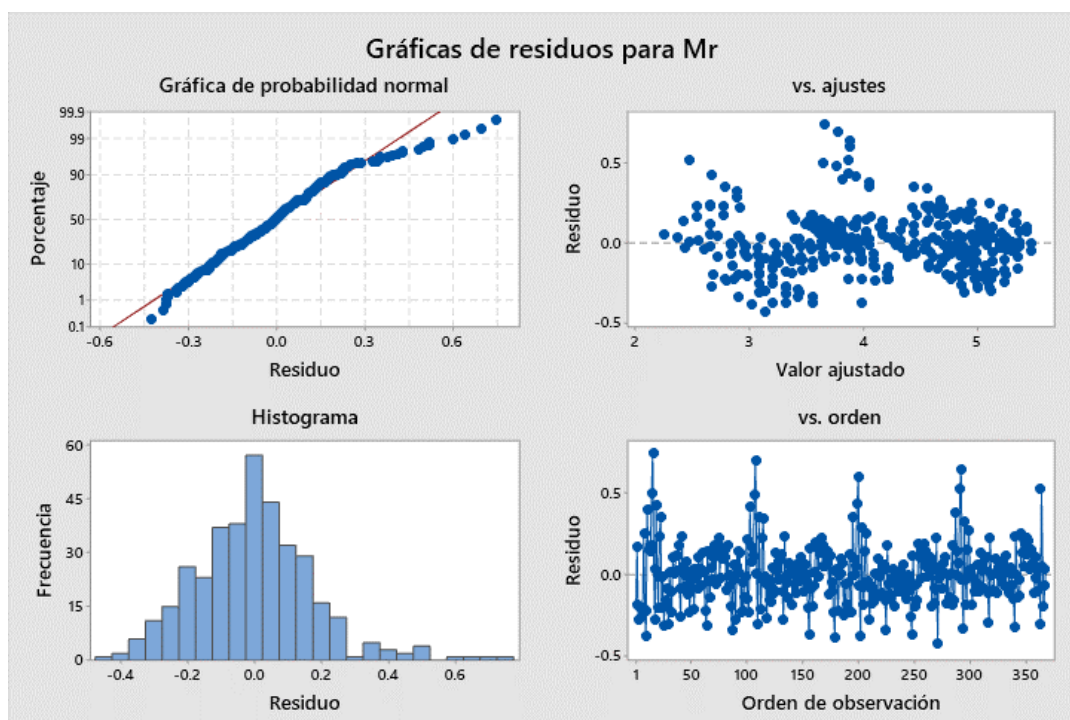


Figura 8.37 Graficas de residuos para Mr, Suelo CH

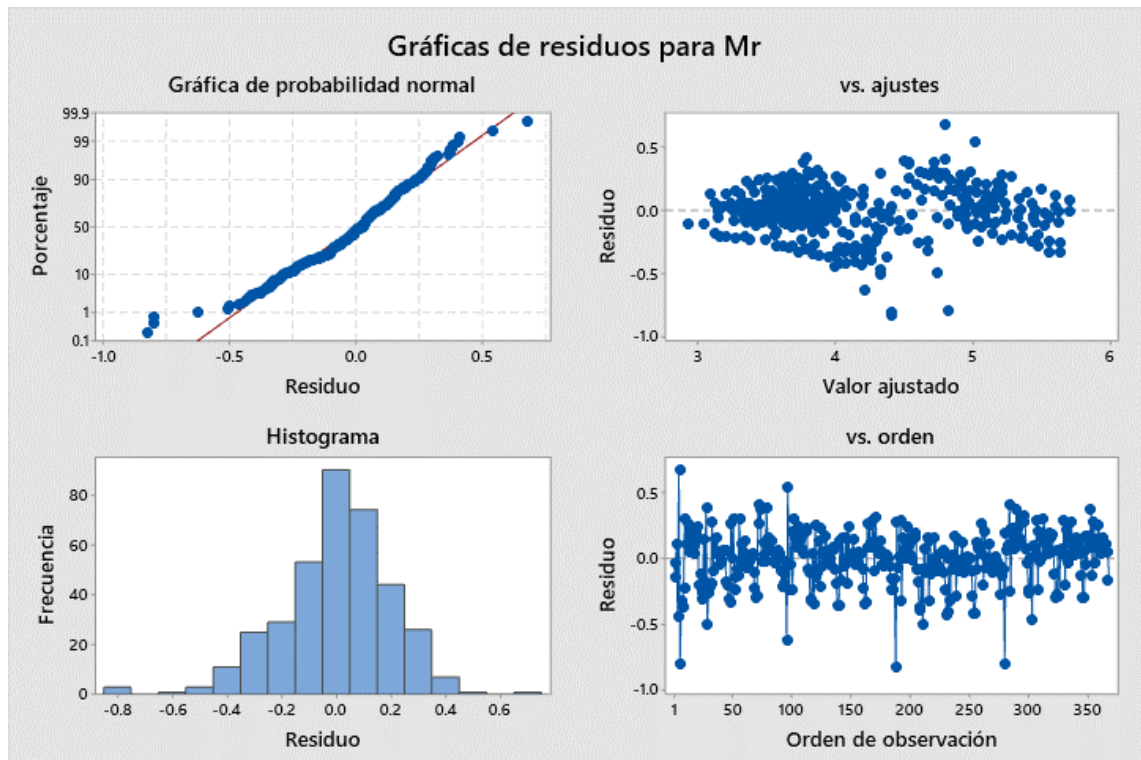


Figura 8.38 Graficas de residuos para Mr, Suelo ML

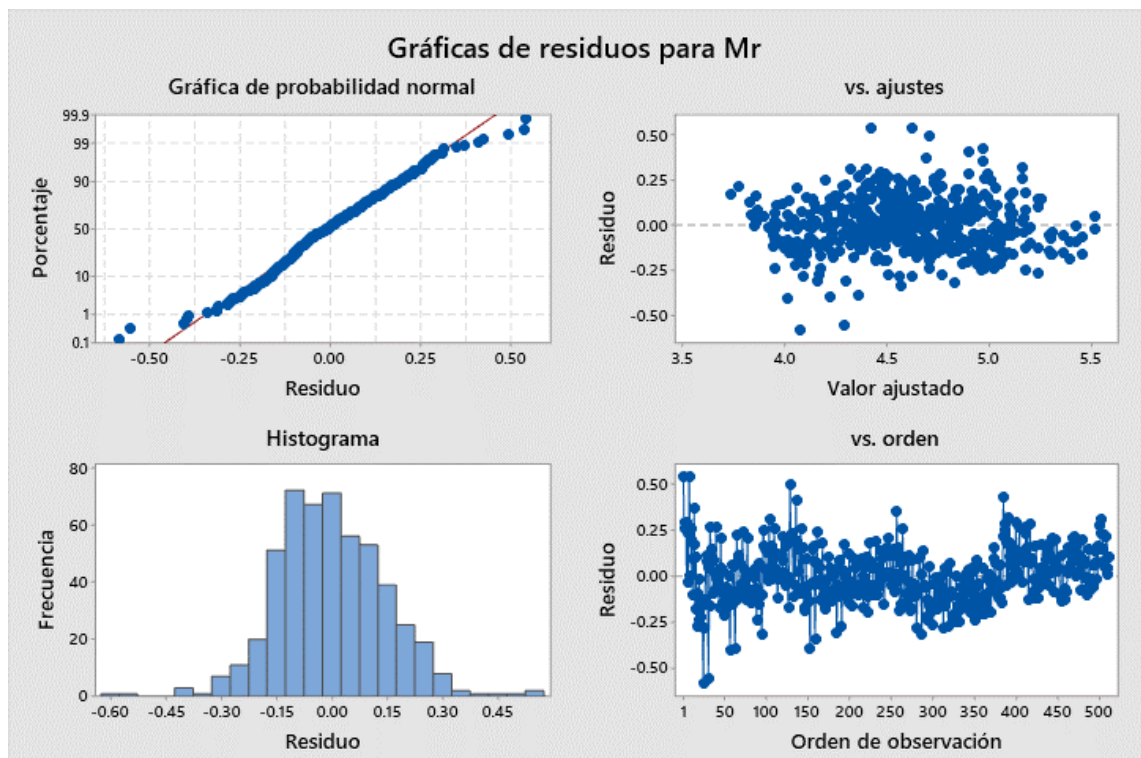


Figura 8.39 Graficas de residuos para Mr, Suelo SM

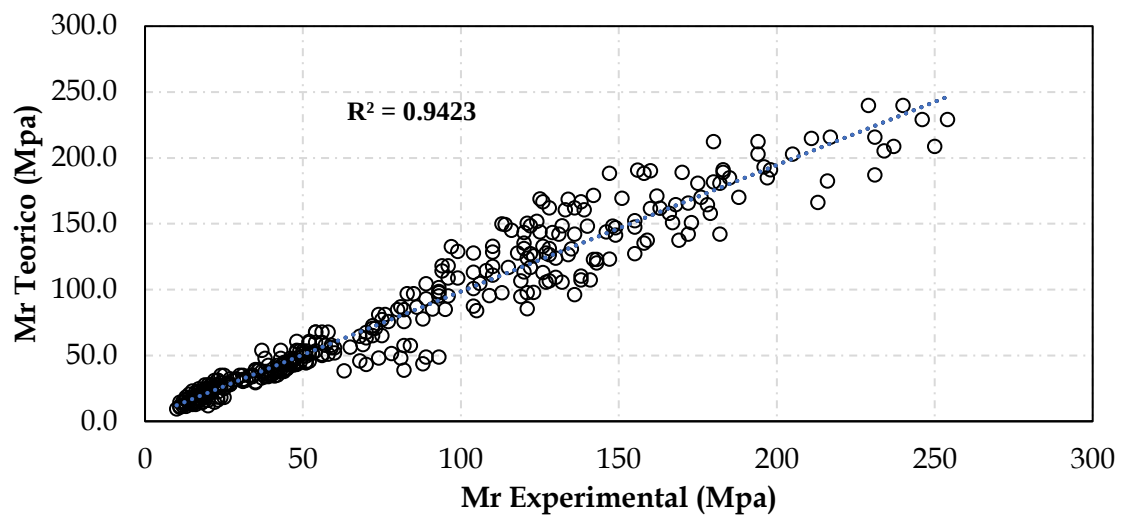


Figura 8.40 Mr Teórico Vs Mr Experimental Suelo CH

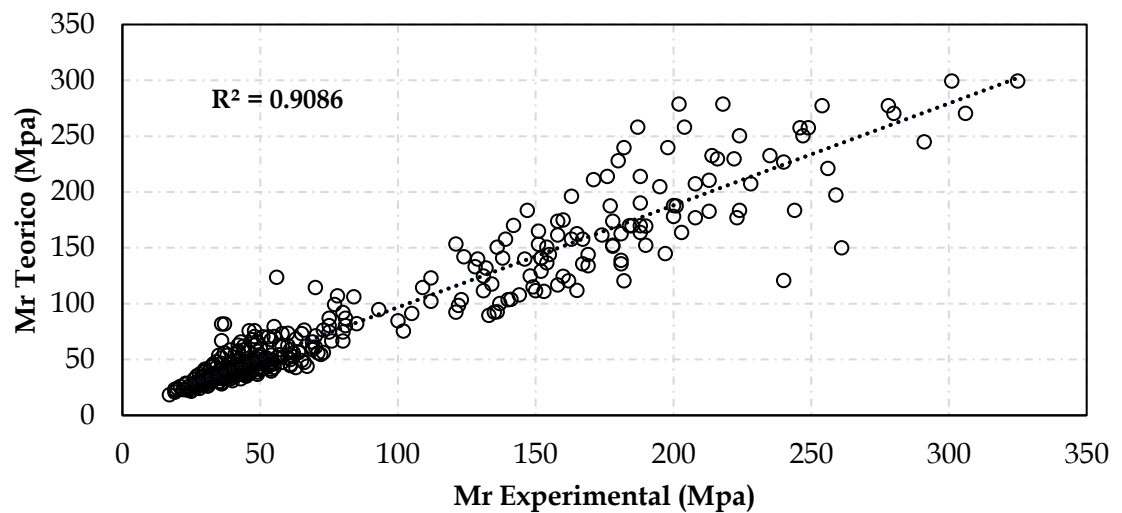


Figura 8.41 Mr Teórico Vs Mr Experimental Suelo ML

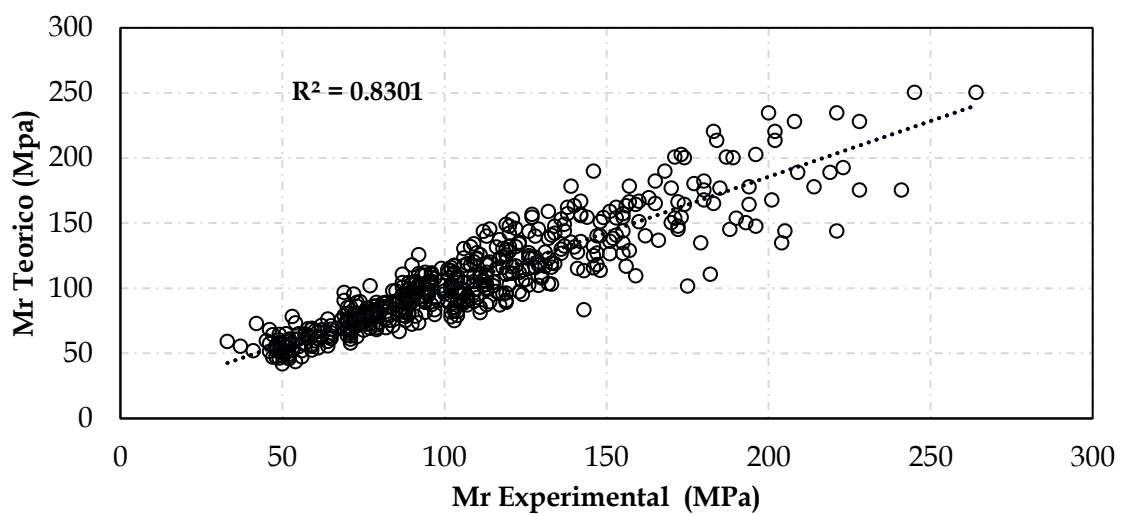


Figura 8.42 Mr Teórico Vs Mr Experimental Suelo SM

Además, se realizó una experimentación en la que se consideraron los tres tipos de suelo (arcilla, limo y arena) como un conjunto homogéneo. Para ello, se consolidaron todos los datos experimentales y se importaron a MINITAB, lo que permitió realizar un análisis estadístico integral del comportamiento del módulo de resiliencia bajo las mismas condiciones de humedad y esfuerzos, resultando en el modelo general (Tabla 8.33). Este enfoque permitió evaluar la influencia global de los parámetros medidos, revelando tendencias y relaciones que aportan información complementaria al análisis individual de cada tipo de suelo. Los resultados obtenidos en MINITAB ofrecen una visión global y unificada del comportamiento mecánico de los suelos no saturados, facilitando la comparación con los modelos teóricos y empíricos presentados en la literatura.

Tabla 8.33 Modelo General

Modelo	R^2
$M_R = e^{-3.776\theta_T - 0.019468IT_T + 0.001279\psi_T + 7.3166S_{rT} - 0.004098\sigma_d + 0.015265\sigma_3}$	0.8197

Tabla 8.34 Análisis de variancia

Predictor	Coef.	SE Coef.	t	P
θ	-3.776	0.233	-16.18	0.0
IT	-0.019468	0.000619	-31.47	0.0
ψ	0.001279	0.000089	14.38	0.0
S_r	7.3166	0.0909	80.51	0.0
σ_d	-0.004098	0.000254	-16.11	0.0
σ_3	0.015265	0.000605	25.24	0.0
S= 0.238715				

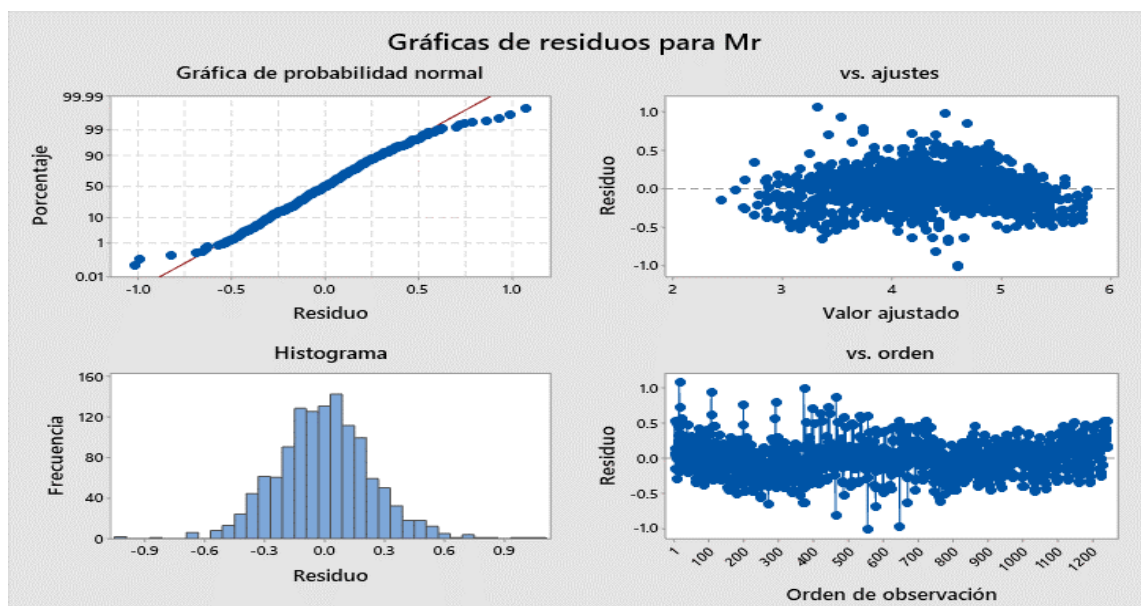


Figura 8.43 Graficas de residuos para el Mr

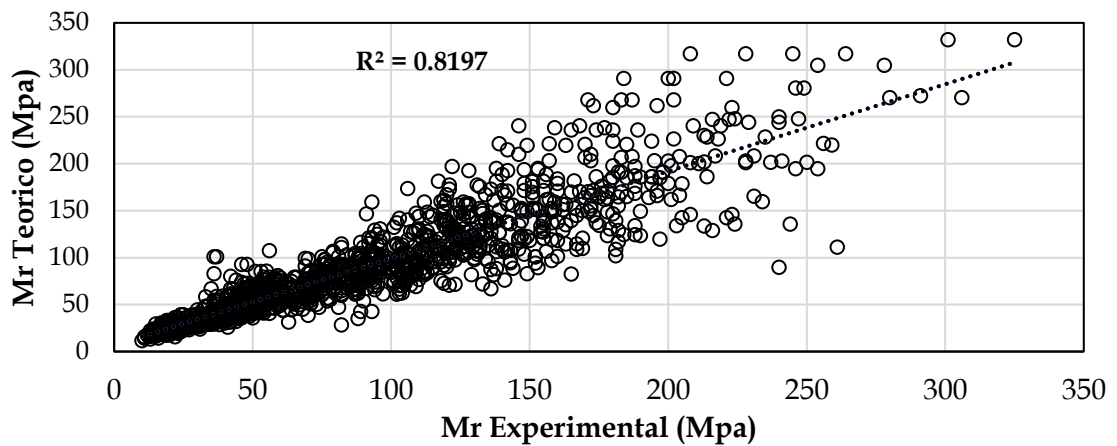


Figura 8.44 Mr Teórico Vs Mr Experimental

8.8.1. Validación del módulo de resiliencia.

El módulo resiliente (MR) es un parámetro para el diseño de pavimentos, y representa la capacidad del suelo para recuperar su forma después de la aplicación de cargas repetidas. Para garantizar que un modelo que relaciona MR con el índice de Thornthwaite (IT) sea confiable, se requiere validación cruzada. Para este trabajo, se aplicaron Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) y k-Fold Cross-Validation, metodologías ampliamente utilizadas en ciencias aplicadas para evaluar la capacidad predictiva y la robustez de modelos (Arlot & Celisse, 2010).

La metodología de LOOCV consiste en entrenar el modelo con todos los datos excepto uno, usando el dato excluido como prueba. Este proceso se repite para cada punto, generando una evaluación casi completa del desempeño del modelo. Se seleccionó este método debido al tamaño limitado de la base de datos y su capacidad para identificar casos donde el modelo predice incorrectamente.

La metodología k-Fold, los datos se dividen en k subconjuntos. Cada subconjunto se utiliza como prueba mientras que los restantes k-1 forman el conjunto de entrenamiento. Se seleccionó $k = 5$ para equilibrar la varianza y el sesgo de la estimación. Por ejemplo, para el suelo CH, El error promedio k-Fold fue de 41.47%, confirmando la tendencia observada en LOOCV y evidenciando que el modelo no es robusto bajo los datos actuales.

A partir de esta metodología se pudo desarrollar un código en Matlab (**Anexo V.IV**) y se siguieron los siguientes pasos:

1. Primero se carga los datos desde un archivo Excel y definición de variables (IT, $MR_{Experimental}$, $MR_{Teorico}$).

2. Se hace el cálculo de validaciones cruzadas mediante bucles y funciones de ajuste lineal (polyfit y polyval), es decir utilizar una herramienta para ajustar datos experimentales a una curva polinómica y luego evaluar esa curva.
3. Se realiza la normalización de MR entre 0 y 1 para facilitar la comparación relativa y la representación gráfica.
4. Visualización gráfica, incluyendo tres figuras principales con explicación de colores, puntos y líneas de referencia.

La figura 8.45 muestran que los datos se normalizaron de 0 a 1 para que la comparación fuera relativa y no dependiera de la magnitud absoluta de MR, los colores representan el error relativo entre MR experimental y teórico. También se colocó una línea 1:1 donde indica correspondencia perfecta; los puntos más cercanos a esta línea muestran predicciones más precisas. Esta visualización permite identificar rápidamente los datos donde el modelo falla más.

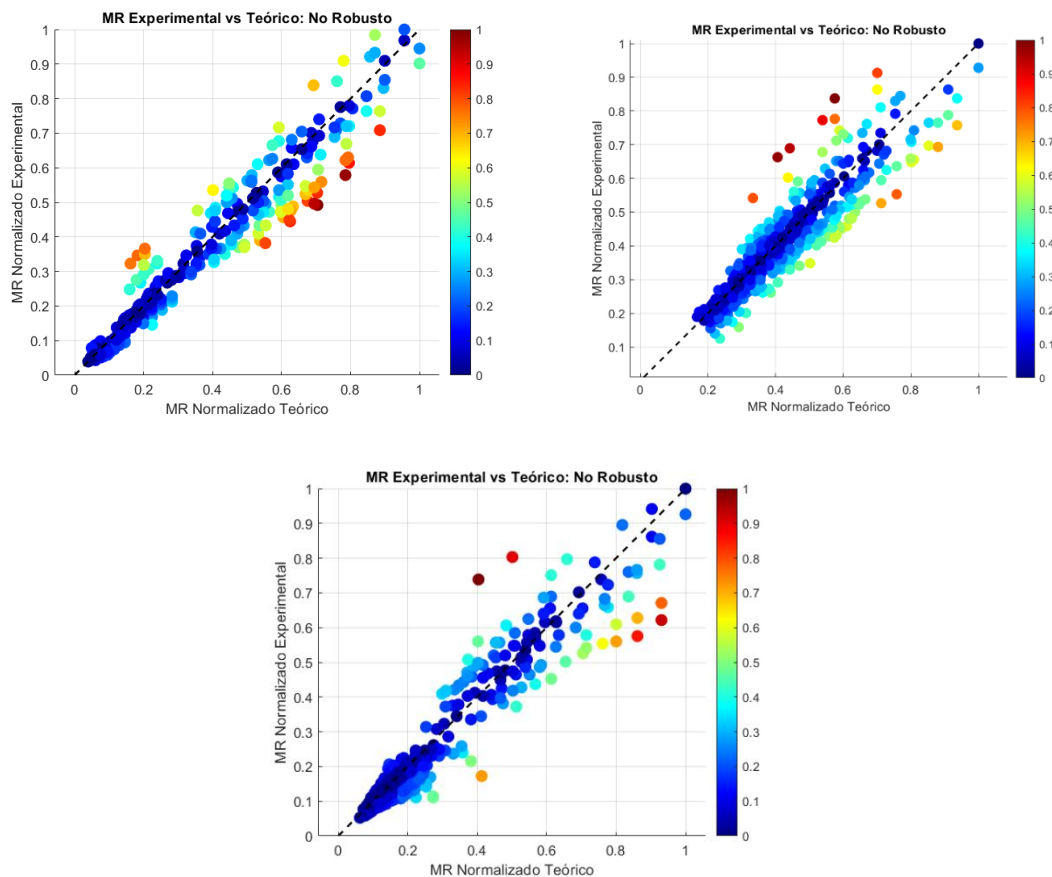


Figura 8.45. Datos normalizados de 0 a 1, para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).

Para poder normalizarlo se estableció un rango de 0 a 1 con el objetivo de evitar sesgos por diferencias de magnitud en el MR, de esta forma, los datos se transforman a una escala

relativa previamente establecida y con esto resaltar errores relativos mediante gradientes de color facilitando el cálculo de R^2 y la comparación con la línea 1:1 en escala relativa.

Con el fin de eliminar sesgos asociados a las diferencias de magnitud entre los valores del MR y facilitar su análisis comparativo, se aplicó un proceso de normalización en un rango relativo de 0 a 1.

El procedimiento se basa en la transformación lineal de cada dato mediante la siguiente expresión:

$$M_R^* = \frac{M_R - M_R^{min}}{M_R^{max} - M_R^{min}}$$

Donde:

- M_R^* = valor normalizado (adimensional, en el rango [0,1])
- M_R = valor original del módulo de resiliencia
- M_R^{min} = valor mínimo observado de M_R en el conjunto de datos
- M_R^{max} = valor máximo observado de M_R en el conjunto de datos

De esta forma:

- Cuando $M_R = M_R^{min}$ se cumple que $M_R^* = 0$.
- Cuando $M_R = M_R^{max}$, se cumple que $M_R^* = 1$
- Los valores intermedios de M_R quedan distribuidos proporcionalmente en el intervalo [0,1].

Esta normalización permitió representar los errores relativos de forma más clara, apoyándose en gradientes de color para identificar tendencias. Además, la comparación entre valores experimentales y teóricos en la gráfica de la línea de referencia 1:1 se realiza en términos relativos, lo que favorece una evaluación objetiva y coherente del ajuste del modelo, especialmente al calcular indicadores estadísticos como el coeficiente de determinación (R^2).

La Fig. 8.46, representa la dispersión de MR en función del IT para ambos conjuntos de datos, donde se facilita la identificación de tendencias y desviaciones, mostrando cómo el modelo teórico se ajusta o se aleja de los datos experimentales.

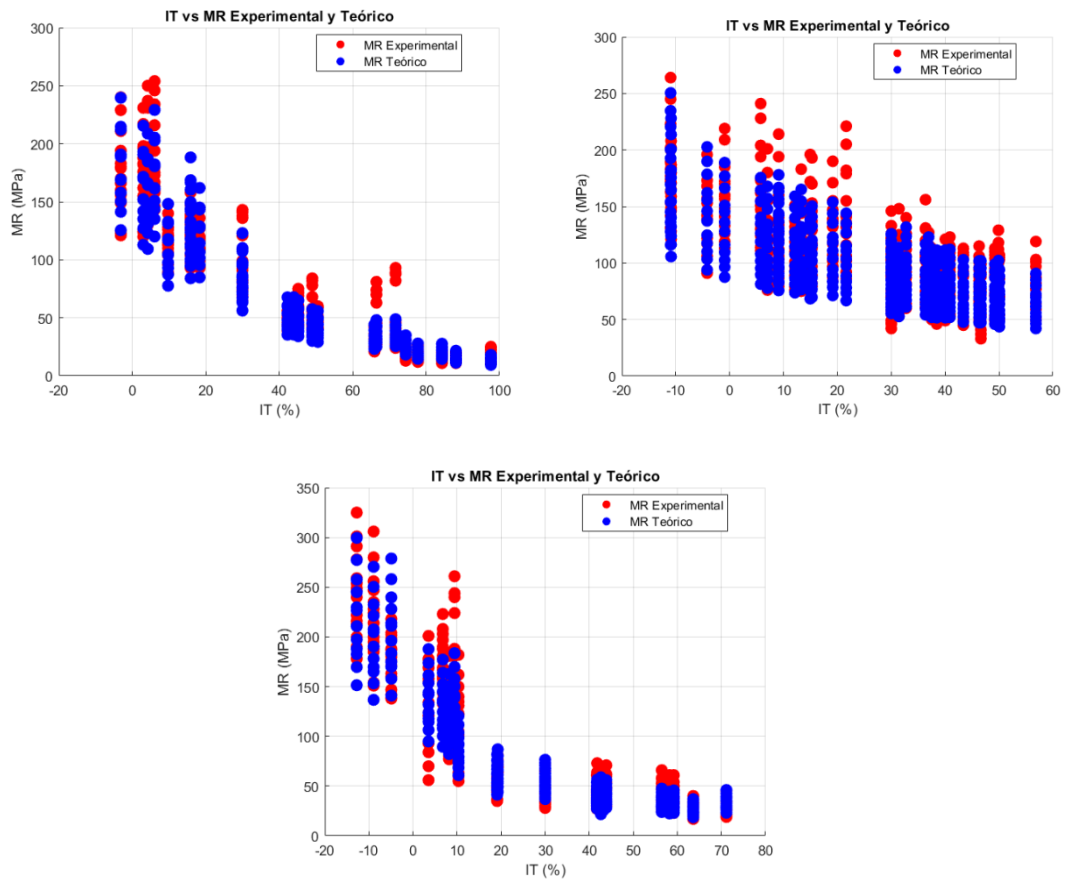


Figura 8.46. IT (Índice de Thornthwaite) vs MR Experimental y Teórico, para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).

En la Fig. 8.47. Se realizó un ajuste lineal entre MR experimental y MR teórico normalizado, en donde se incluye el R^2 , que cuantifica la relación lineal entre ambos conjuntos de datos.

La normalización permite analizar la relación relativa, independiente de la escala absoluta de MR, y facilita la interpretación visual.

Si bien los modelos actuales no son robustos, dado que los errores de predicción superan el 40%. Para mejorar la confiabilidad, se sugieren implementar modelos que se ajusten mejor a la relación MR vs IT, así como aumentar la cantidad de datos experimentales para mejorar la representatividad del modelo y reducir la influencia de valores extremos y refinar la normalización o aplicar transformaciones logarítmicas para mitigar el impacto de puntos atípicos.

El análisis confirma que, aunque existe una correlación entre MR experimental y teórico ($R^2 = 0.939$), los altos errores de predicción reflejan que el modelo no es robusto. Las técnicas LOOCV y k-Fold fueron fundamentales para evaluar su desempeño, y las

gráficas normalizadas permiten visualizar claramente la distancia relativa entre los datos. Futuras investigaciones deben enfocarse en la ampliación de la base de datos y el desarrollo de modelos más complejos para mejorar la precisión y la confiabilidad del MR estimado.

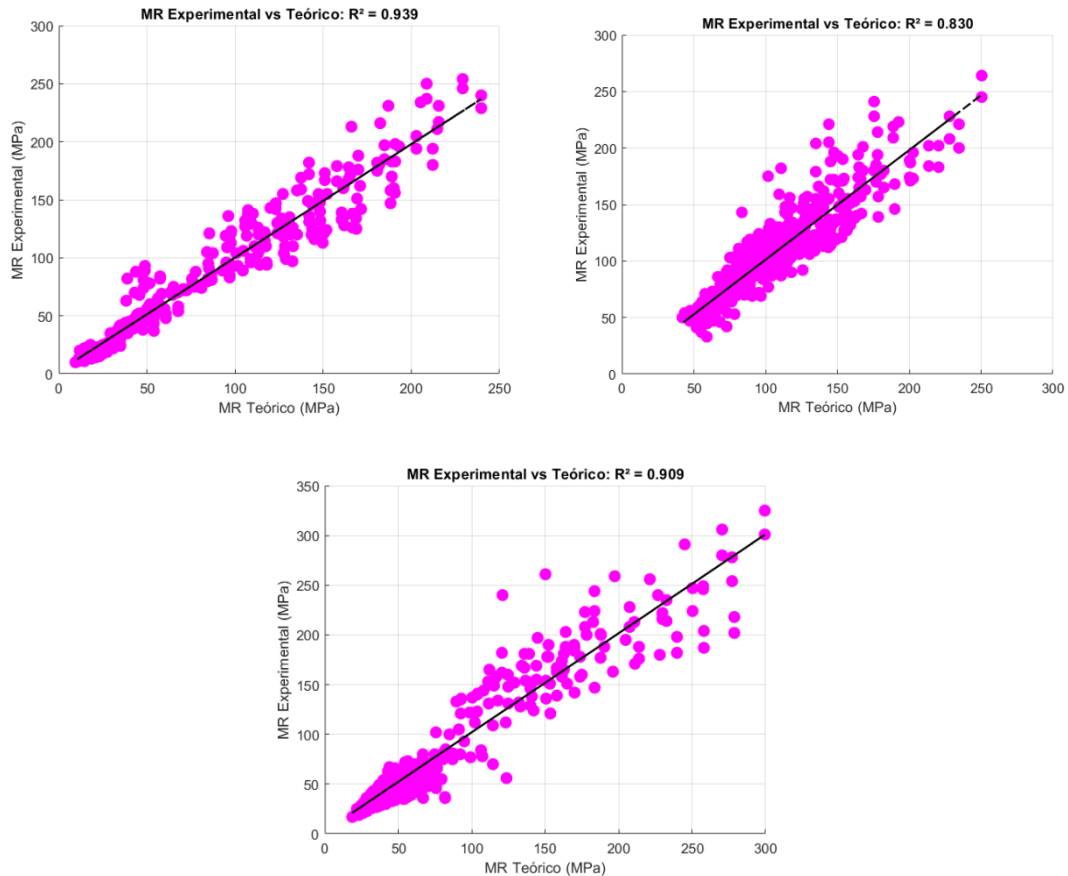


Figura 8.47. Normalizado con R^2 , para los diferentes tipos de suelos, (CH, SM y ML).

8.9. Implementación de los modelos de módulo de resiliencia para la pista de pruebas del IMT.

El presente análisis se desarrolló utilizando datos experimentales obtenidos en el estado de Querétaro, específicamente en la pista de pruebas del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Esta infraestructura fue inaugurada en 2013 con el objetivo de realizar ensayos tanto ordinarios como especializados. Se encuentra localizada en el municipio de Pedro Escobedo, a aproximadamente 25 km de la ciudad de Querétaro, a una altitud media de 1915 metros sobre el nivel del mar (Ver Ilustración 8.1).

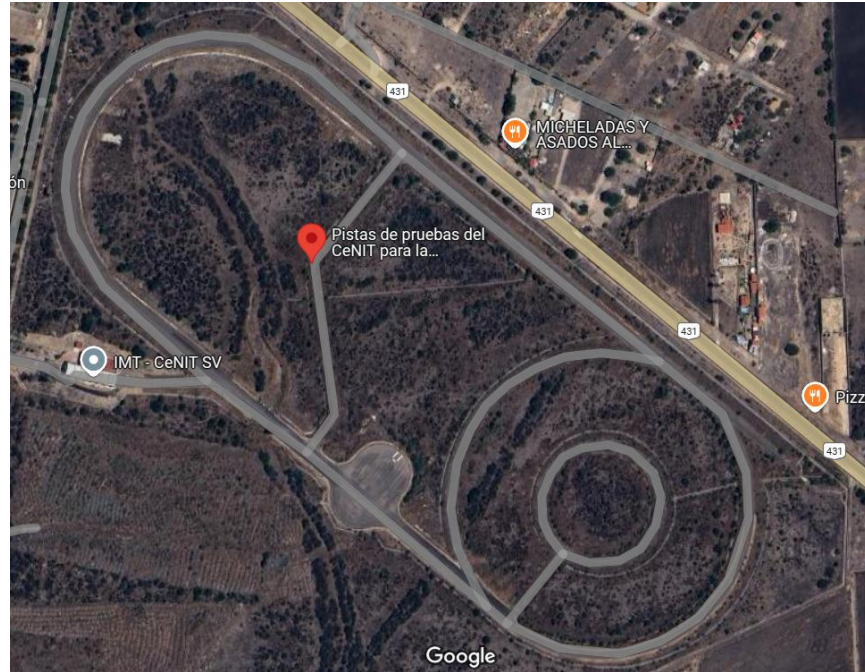


Ilustración 8.1 Ubicación de la pista de pruebas del IMT, Fuente Google Maps, (2019).

8.9.1. Análisis del Índice de Thornthwaite, en la pista pruebas del IMT.

Para la estimación del Índice de Humedad de Thornthwaite, uno de los aspectos fundamentales consiste en la adecuada selección de estaciones meteorológicas representativas de la zona de estudio. Aunque el método original propuesto por Thornthwaite (1948) no especifica un número mínimo o máximo de estaciones, diversas investigaciones y guías técnicas sugieren criterios prácticos para mejorar la representatividad espacial y climática del análisis.

De acuerdo con la FAO (Allen et al., 1998) y recomendaciones utilizadas por organismos como el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2025) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2025), se recomienda utilizar al menos tres a cinco estaciones meteorológicas para un análisis climático regional, siempre que estas se encuentren dentro de un radio máximo de entre 50 y 100 km, dependiendo de la variabilidad topográfica y climática de la zona. En áreas con fuerte gradiente altitudinal o climáticamente heterogéneas, es preferible limitar las distancias a menos de 50 km. En este estudio se consideraron ambos criterios:

- La proximidad geográfica entre las estaciones y el sitio de interés,
- La homogeneidad topográfica, evitando estaciones ubicadas en zonas con altitudes o regímenes climáticos significativamente diferentes.

Como resultado, se seleccionaron las estaciones meteorológicas más próximas al sitio de estudio, las cuales se presentan en la Tabla 8.35. La distribución espacial de dichas estaciones, en relación con la pista del IMT, se muestra en la Ilustración 8.2.

Tabla 8.35 Características de las estaciones analizadas.

Estación	Nombre	Municipio	Estado	Elev.	longitud	Latitud
22067	La Venta	P. Escobedo	Querétaro	1906	100°11'15.15"	20°29'10.10"
22058	Santa Teresa	Humilpan	Querétaro	2092	100°18'12.12"	20°29'31.31"
22029	Humilpan	Humilpan	Querétaro	2271	100°16'50.50"	20°23'02.2"
22028	Galindo	San Juan del Rio	Querétaro	1937	100°05'39.39"	20°23'35.35"

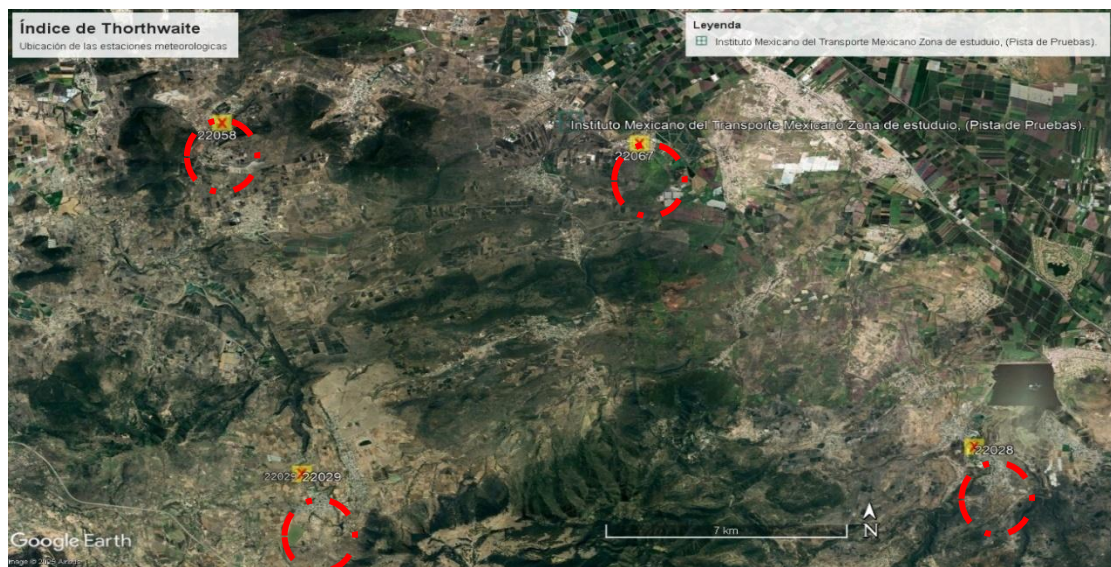


Ilustración 8.2 Ubicación de las estaciones analizadas en el estado de Querétaro, Fuente: Google Earth, (2025)

Las estaciones meteorológicas La Venta, Santa Teresa, Huimilpan y San Juan del Río se encuentran localizadas a distancias de 2.13 km, 10.18 km, 14.21 km y 16 km respectivamente, tomando como punto de referencia la pista de pruebas del Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

A partir de estas estaciones se obtuvieron los datos necesarios del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (véase Anexo II) para llevar a cabo el cálculo del Índice de Humedad de Thornthwaite (IT). Los registros utilizados corresponden al periodo comprendido entre los años 2014 y 2024, y aunque la pista fue inaugurada en 2013, no se encontraron registros meteorológicos completos desde ese año. Por ello, el análisis climático comenzó formalmente a partir de 2014.

Siguiendo la metodología propuesta por Thornthwaite (1948) (ver Anexo III), se calcularon los parámetros climáticos mensuales y anuales eligiendo la estación adecuada (ver Anexo VI) que incluyen: evapotranspiración potencial, exceso hídrico, déficit hídrico, así como los índices de humedad (I_h) y de aridez (I_a). Los resultados derivados de este análisis se presentan en las Tablas 8.36-8.46

Tabla 8.36 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2014.

2014													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Evapotranspiración	35.03	52.14	72.97	82.33	70.65	73.58	73.31	69.03	64.74	54.66	48.44	45.05	741.91
Exceso de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.21	16.77	35.66	40.34	0.00	0.00	145.98
Déficit de agua	14.01	52.14	60.47	58.33	15.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	200.40
I_h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	72.59	24.29	55.08	73.81	0.00	0.00	19.68
I_a	39.99	100.00	82.87	70.85	21.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.01
IT	-24.40	-61.00	-50.55	-43.22	-13.34	0.00	72.59	24.29	55.08	73.81	0.00	0.00	3.20

Tabla 8.37 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2015.

2015													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Evapotranspiración	46.76	52.74	72.45	87.56	90.78	81.75	76.70	84.36	70.87	46.84	35.98	29.91	776.70
Exceso de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.41	0.00	0.00	10.41
Déficit de agua	0.00	8.69	0.00	21.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.31
I_h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.22	0.00	0.00	1.34
I_a	0.00	16.48	0.00	24.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.90
IT	0.00	-10.05	0.00	-15.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.22	0.00	0.00	-1.04

Tabla 8.38 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2016.

2016													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Evapotranspiración	28.71	51.62	67.34	77.11	91.04	79.89	76.81	75.69	68.11	61.30	52.12	50.60	780.33
Exceso de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.50	49.61	1.19	0.00	0.00	0.00	57.30
Déficit de agua	28.71	48.32	39.14	51.11	19.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	186.61
I_h	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.47	65.55	1.75	0.00	0.00	0.00	7.34
I_a	100.00	93.61	58.12	66.28	21.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.91
IT	-61.00	-57.10	-35.45	-40.43	-12.96	0.00	8.47	65.55	1.75	0.00	0.00	0.00	-7.24

Tabla 8.39 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2017.

2017													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Evapotranspiración	24.39	50.16	64.49	88.43	112.42	99.66	82.07	83.02	64.81	62.49	56.13	38.40	826.46
Excesos de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.20	4.91	0.00	0.00	43.11
Déficit de agua	15.12	48.16	43.59	70.73	82.82	16.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	276.88
Ih	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	58.95	7.85	0.00	0.00	5.22
Ia	61.99	96.01	67.59	79.98	73.67	16.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	33.50
IT	-37.81	-58.57	-41.23	-48.79	-44.94	-10.08	0.00	0.00	58.95	7.85	0.00	0.00	-15.22

Tabla 8.40 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2018.

2018													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Evapotranspiración	31.32	49.38	76.19	85.35	99.93	90.24	83.96	85.36	69.64	64.13	49.90	48.60	833.99
Excesos de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Déficit de agua	22.12	39.38	73.39	61.25	60.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.22	279.79
Ih	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ia	70.63	79.75	96.32	71.76	60.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47.78	33.55
IT	-43.08	-48.65	-58.76	-43.78	-36.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-29.15	-20.46

Tabla 8.41 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2019.

2019													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Evapotranspiración	52.28	59.14	73.20	80.83	113.50	104.60	68.00	77.38	65.02	65.08	57.81	40.86	857.70
Excesos de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Déficit de agua	49.28	57.14	73.20	76.30	111.49	21.68	68.00	31.14	5.61	1.56	42.80	23.86	562.06
Ih	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ia	94.26	96.62	100.00	94.40	98.23	20.73	100.00	40.24	8.63	2.40	74.04	58.40	65.53
IT	-57.50	-58.94	-61.00	-57.58	-59.92	-12.65	-61.00	-24.55	-5.27	-1.47	-45.16	-35.62	-39.97

Tabla 8.42 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2020.

2020													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Evapotranspiración	22.46	28.22	80.42	104.25	100.52	91.20	91.99	83.87	70.62	66.43	55.42	49.09	844.48
Excesos de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

2020													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Déficit de agua	0.00	14.48	61.12	87.05	66.12	24.80	8.69	25.27	0.32	53.03	48.82	47.79	437.48
Ih	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ia	0.00	51.31	76.00	83.50	65.78	27.20	9.45	30.13	0.45	79.83	88.09	97.35	51.80
IT	0.00	-31.30	-46.36	-50.94	-40.12	-16.59	-5.76	-18.38	-0.27	-48.69	-53.74	-59.38	-31.60

Tabla 8.43 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2021.

2021													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Evapotranspiración	45.75	51.64	79.49	86.31	94.29	88.76	83.26	83.08	70.77	65.02	43.99	44.78	837.14
Exceso de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.35	29.98	0.00	0.00	74.33
Déficit de agua	0.00	31.86	79.49	78.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	190.07
Ih	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	62.66	46.11	0.00	0.00	8.88
Ia	0.00	61.70	100.00	91.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.70
IT	0.00	-37.64	-61.00	-55.63	0.00	0.00	0.00	0.00	62.66	46.11	0.00	0.00	-4.97

Tabla 8.44 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2022.

2022													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Evapotranspiración	54.47	46.40	69.43	94.34	111.80	89.80	72.98	80.21	65.52	62.66	57.19	41.16	845.93
Exceso de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Déficit de agua	50.67	40.60	68.73	75.24	107.10	42.00	15.88	13.11	0.00	0.00	24.36	33.46	471.13
Ih	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ia	93.02	87.50	98.99	79.75	95.80	46.77	21.76	16.34	0.00	0.00	42.60	81.29	55.69
IT	-56.74	-53.37	-60.38	-48.65	-58.44	-28.53	-13.27	-9.97	0.00	0.00	-25.99	-49.59	-33.97

Tabla 8.45 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2023.

2023													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Evapotranspiración	39.19	46.09	76.55	91.45	101.79	122.50	94.96	83.00	81.43	65.57	50.58	34.97	888.09
Exceso de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Déficit de agua	35.99	43.69	68.35	79.15	55.49	110.90	28.56	11.20	65.33	13.17	32.98	11.17	555.99
Ih	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ia	91.83	94.79	89.29	86.55	54.51	90.53	30.08	13.49	80.23	20.09	65.21	31.94	62.61
IT	-56.02	-57.82	-54.47	-52.80	-33.25	-55.22	-18.35	-8.23	-48.94	-12.25	-39.78	-19.48	-38.19

Tabla 8.46 Análisis del Índice de Thornthwaite, año 2024.

2024													
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
Evapotranspiración	68.87	72.99	103.49	119.79	90.11	74.64	24.87	24.73	21.93	17.60	17.29	14.10	650.41
Excesos de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Déficit de agua	68.87	72.99	103.49	119.79	90.11	9.54	0.00	0.00	15.83	17.60	17.29	14.10	529.61
Ih	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ia	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	12.78	0.00	0.00	72.18	100.00	100.00	100.00	81.43
IT	-61.00	-61.00	-61.00	-61.00	-61.00	-7.80	0.00	0.00	-44.03	-61.00	-61.00	-61.00	-49.67

A partir de la Tabla 8.47, se analizó la variación del Índice de Thornthwaite (IT) entre los años 2014 y 2024, lo cual permitió observar tendencias climáticas relevantes en la región de estudio. Tal como se representa en la Figura 8.48, los valores del IT presentan un comportamiento estacional marcado.

Durante los primeros meses del año (enero a mayo), se identifican valores predominantemente negativos, lo cual es indicativo de condiciones entre áridas y subhúmedas, resultado de la limitada precipitación en ese periodo. A partir de junio hasta octubre, se registra un aumento considerable en el IT, alcanzando valores positivos que corresponden a una fase húmeda, congruente con la temporada de lluvias en la región.

Sin embargo, a partir del año 2018, se observa una tendencia hacia valores más bajos del IT, lo cual sugiere una posible disminución en la humedad climática anual. Aunque estos valores aún se encuentran dentro del rango esperado para el clima de Querétaro, evidencian cierta variabilidad interanual que podría asociarse a cambios en los patrones de precipitación o temperatura en la zona. Esta fluctuación es relevante para el análisis del comportamiento del suelo y sus propiedades mecánicas, especialmente al considerar fenómenos como la succión y la humedad gravimétrica, directamente influenciados por el régimen hídrico.

Tabla 8.47 Índice de Thornthwaite 2014 -2024 por meses.

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2014	-24.40	-61.00	-50.55	-43.22	-13.34	0.00	72.59	24.29	55.08	73.81	0.00	0.00
2015	0.00	-10.05	0.00	-15.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.22	0.00	0.00
2016	-61.00	-57.10	-35.45	-40.43	-12.96	0.00	8.47	65.55	1.75	0.00	0.00	0.00
2017	-37.81	-58.57	-41.23	-48.79	-44.94	-10.08	0.00	0.00	58.95	7.85	0.00	0.00
2018	-43.08	-48.65	-58.76	-43.78	-36.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-29.15
2019	-57.50	-58.94	-61.00	-57.58	-59.92	-12.65	-61.00	-24.55	-5.27	-1.47	-45.16	-35.62

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2020	0.00	-31.30	-46.36	-50.94	-40.12	-16.59	-5.76	-18.38	-0.27	-48.69	-53.74	-59.38
2021	0.00	-37.64	-61.00	-55.63	0.00	0.00	0.00	0.00	62.66	46.11	0.00	0.00
2022	-56.74	-53.37	-60.38	-48.65	-58.44	-28.53	-13.27	-9.97	0.00	0.00	-25.99	-49.59
2023	-56.02	-57.82	-54.47	-52.80	-33.25	-55.22	-18.35	-8.23	-48.94	-12.25	-39.78	-19.48
2024	-61.00	-61.00	-61.00	-61.00	-61.00	-7.80	0.00	0.00	-44.03	-61.00	-61.00	-61.00

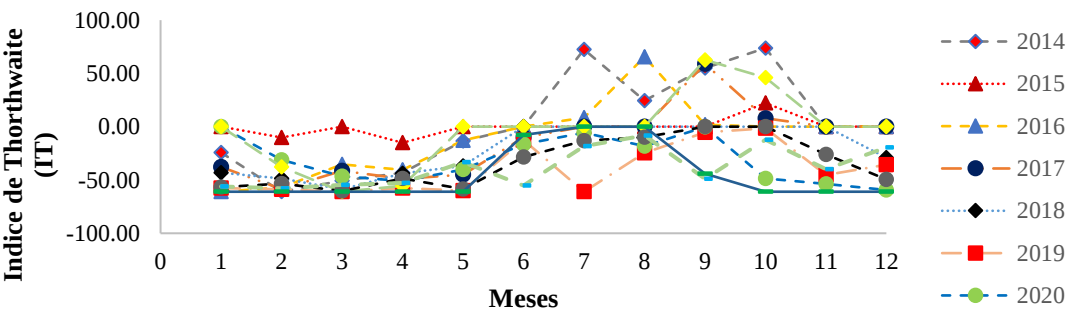


Figura 8.48 Índice de Thornthwaite 2014 -2024 por meses.

Tabla 8.48 Índice de Thornthwaite 2014 -2024 por año.

Año	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
IT	3.20	-1.04	-7.24	-15.22	-20.46	-39.97	-31.60	-4.97	-33.97	-38.19	-49.67

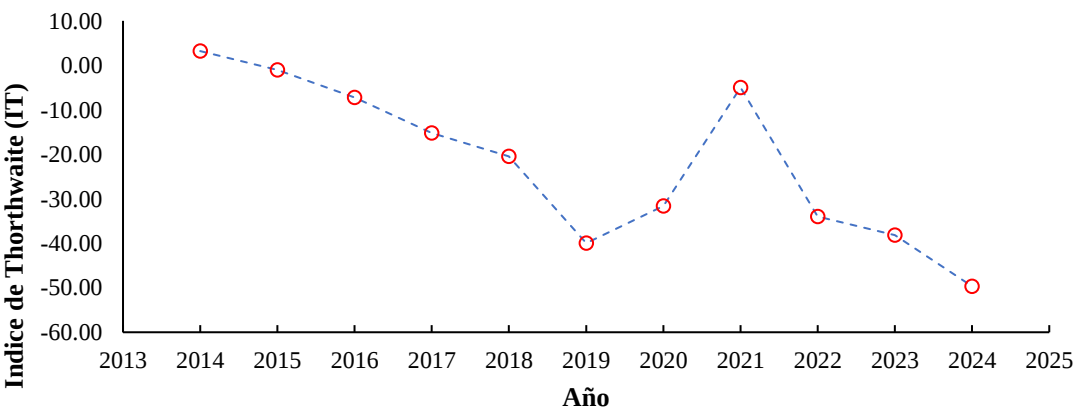


Figura 8.49 Índice de Thornthwaite 2014 -2024 por años.

Como ya se ha explicado en apartados anteriores, al observar el comportamiento del IT a lo largo de los años (Fig. 8.49), se empieza a notar una tendencia constante hacia condiciones más secas. En los registros más recientes, los valores del índice reflejan una reducción paulatina de humedad, lo que indica que el clima en la región está cambiando

gradualmente hacia un entorno más subhúmedo seco o incluso árido en ciertas temporadas.

Esta interpretación no se queda solo en el IT. Para reforzar este hallazgo, se recurrió a los datos disponibles de las estaciones meteorológicas que opera la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). A diferencia de otros registros, en este caso sí se cuenta con información desde el año 2013, lo cual permite tener una mejor perspectiva del comportamiento climático durante más de una década. Estos datos se incluyen en el Anexo IV, y contemplan variables como la precipitación mensual, así como las temperaturas media, mínima y máxima, que son clave para entender la dinámica hídrica de la zona, que se encontraran en Tablas 8.49 y 8.50 y Figuras 8.50 y 8.51.

Al analizar estos valores, se confirma que, particularmente a partir del año 2018, las lluvias han sido más escasas, sobre todo durante los meses donde tradicionalmente se esperaban precipitaciones importantes. Este comportamiento coincide directamente con la caída de los valores del IT, lo que da mayor certeza a la observación inicial: el clima en la zona de estudio (específicamente en la pista del IMT), en el municipio de Pedro Escobedo ha ido mostrando una reducción en la disponibilidad de agua. Este contexto es fundamental, ya que influye de manera directa en las propiedades del suelo, especialmente en aspectos como la succión, humedad y comportamiento mecánico, que son parte esencial del análisis en este trabajo.

Tabla 8.49 Datos CONAGUA mensual 2013 – 2024 Precipitación (mm).

Mes	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Ene	2.57	0.42	2.95	2.86	0.00	0.45	2.09	16.63	1.88	0.20	3.44	3.67
Feb	0.44	0.10	13.39	0.27	0.35	5.76	0.27	9.20	0.00	6.47	0.11	9.93
Mar	6.41	6.34	108.25	27.11	19.40	0.28	0.10	33.78	4.20	0.00	1.48	1.40
Abr	5.94	18.84	27.02	19.69	19.25	9.72	3.80	14.26	11.02	12.25	14.06	2.74
May	36.47	63.03	79.45	57.27	55.60	36.47	9.84	23.05	90.52	4.34	31.98	14.85
Jun	80.46	196.34	119.48	119.31	86.95	185.28	121.15	83.22	120.79	32.00	9.17	110.77
Jul	138.00	86.97	113.12	125.33	131.20	35.61	65.85	140.28	67.57	78.69	95.08	162.08
Agos	74.94	102.34	70.27	206.59	108.65	84.18	50.51	81.66	163.48	70.00	106.32	53.07
Sept	131.02	95.21	77.91	45.53	153.00	103.70	71.07	49.00	225.33	53.36	28.95	106.06
Oct	35.35	51.28	47.57	17.28	14.55	39.51	48.65	18.09	55.93	59.40	68.29	4.56
Nov	37.34	7.50	11.43	29.94	0.35	37.37	7.66	0.93	4.49	17.23	21.16	4.03
Dic	19.95	3.40	6.37	1.47	0.00	3.73	3.42	5.97	1.10	4.70	24.04	1.40

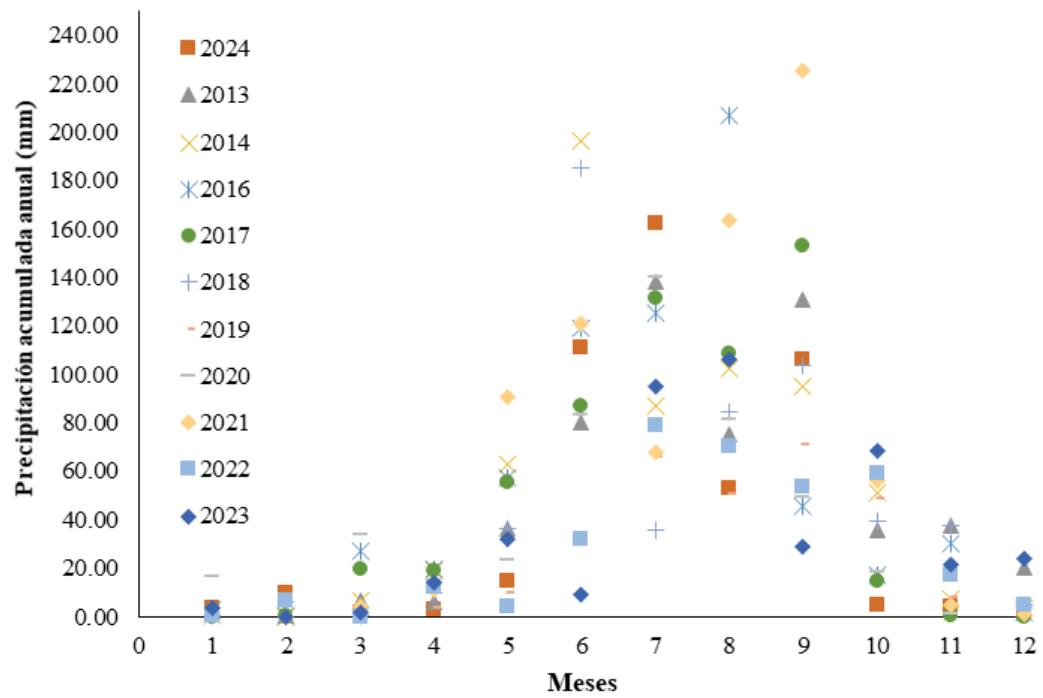


Figura 8.50 Precipitación acumulada mensual 2013-2024

Tabla 8.50 Datos CONAGUA Temperatura mensual (°C) ,2013 – 2024.

Mes	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Ene	14.20	14.23	15.44	14.88	16.03	13.38	0.00	15.89	16.27	16.49	16.35	16.96
Feb	18.24	18.12	16.55	16.04	17.85	18.51	19.42	18.87	17.72	17.14	17.65	18.36
Mar	17.60	19.95	17.69	18.68	19.21	21.06	20.79	21.99	21.03	20.03	21.41	21.88
Abr	22.12	20.67	21.44	22.09	21.41	22.32	0.00	24.10	22.91	22.21	23.20	23.38
May	22.61	21.42	22.04	24.57	24.56	23.68	25.11	23.80	23.09	24.65	23.92	27.88
Jun	22.56	22.29	21.44	22.13	23.38	22.02	23.20	23.26	21.92	22.59	25.47	24.82
Jul	21.32	21.04	21.03	21.78	21.34	22.21	21.79	22.69	21.63	22.21	23.69	22.18
Ago	20.94	21.42	21.36	21.54	22.03	22.08	22.75	21.86	21.71	22.36	22.15	22.26
Sep	20.75	20.87	21.34	20.94	20.42	21.62	21.77	20.95	21.31	19.92	22.21	22.30
Oct	19.00	19.18	19.90	19.54	18.90	20.39	20.80	19.35	20.60	19.81	20.35	18.84
Nov	14.20	16.68	19.10	16.98	17.48	17.61	19.75	18.03	17.33	19.11	18.33	20.06
Dic	14.20	23.00	22.04	24.25	22.95	15.67	16.22	15.33	17.39	15.64	14.17	17.02

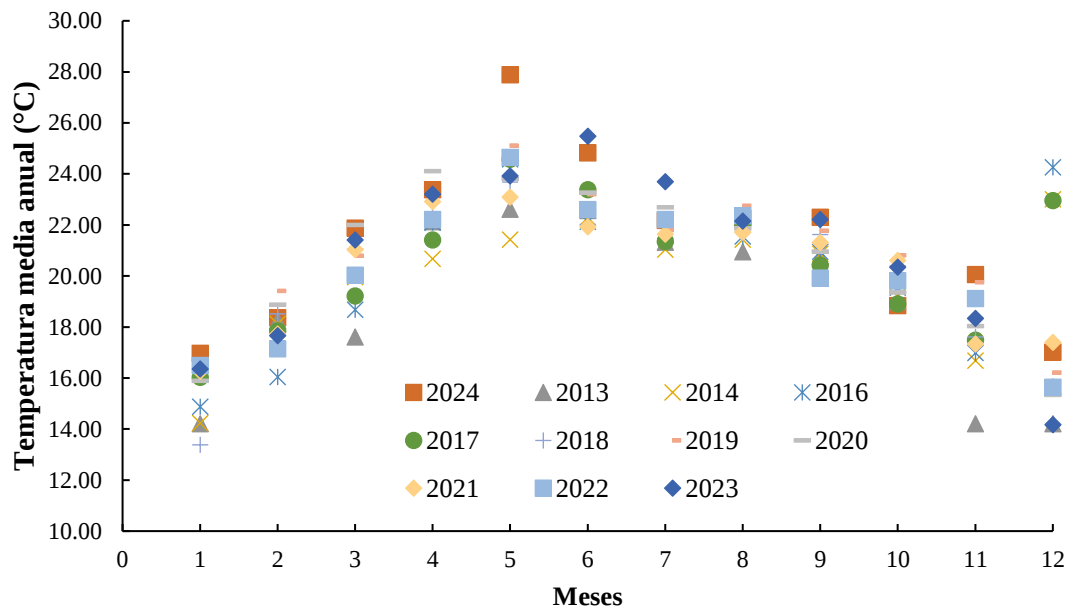


Figura 8.51 Temperatura mensual (C°) ,2013 – 2024.

Con base en la información encontrada en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se recopilaron los datos anuales de precipitación, así como de temperatura media, mínima y máxima correspondientes al periodo 2013–2024, siendo este último año el más reciente con datos disponibles. El objetivo de esta recopilación fue verificar la consistencia de los resultados obtenidos con el cálculo del Índice de Humedad de Thornthwaite (IT).

Al comparar la evolución del IT con los registros anuales de precipitación, se observa una relación directa entre ambos: los años con menores valores de precipitación coinciden con disminuciones marcadas del índice, reflejando una transición hacia condiciones más secas o áridas. Esta correlación se visualiza claramente en las Figuras 8.52 – 8.55, donde la tendencia decreciente en la precipitación anual se acompaña de un descenso en el valor del IT.

De igual forma, el incremento gradual en la temperatura (especialmente en los valores máximos y medios) podría estar contribuyendo a una mayor demanda evaporativa (Tabla 8.51 – 8.54), lo cual también influye en el comportamiento del IT. Esta coincidencia entre las tendencias observadas en los registros climáticos y los resultados del índice permite afirmar que el cálculo del IT fue realizado de forma adecuada, ya que logra reflejar fielmente las condiciones de humedad y sequía que han caracterizado la región en los últimos años.

La representación gráfica facilita la identificación de patrones de cambio climático locales, ayudándonos a entender cuáles son especialmente relevantes en el contexto de la

caracterización hídrica del suelo y el análisis de la disponibilidad de humedad en la región.

Tabla 8.51 Precipitación CONAGUA 2013-2024.

Precipitación (mm)												
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2013	4.9	3.8	5.9	7.4	41.2	89.2	159.3	116.6	203	64.3	55.4	29.3
2014	6.2	1.6	11.3	17.2	71.7	202	114.5	96.5	154.6	77.2	10.2	10.3
2015	9	14.9	110.1	28.3	94.1	128.9	96.9	85	96.3	60.5	25.9	6.9
2016	5.8	3.3	28.2	26	71.7	132.1	131.1	207	69.3	38.8	30.3	6.5
2017	0.7	2	20.9	17.7	29.6	83.2	107.9	92.2	168	67.4	1.3	1.8
2018	9.2	10	2.8	24.1	39.5	161.8	31.4	71.7	110.2	58.6	31.1	3.8
2019	7.5	2.3	4.6	2.7	11.9	104	57.3	57.2	66	78.1	9.7	10.2
2020	23.7	12.5	19.3	17.2	34.4	66.4	83.3	58.6	70.3	13.4	6.6	1.3
2021	3.8	1.2	1.6	10.5	62.9	125.2	84.4	131.3	158.6	58.9	7.7	2.4
2022	3.8	5.8	0.7	19.1	4.7	47.8	57.1	67.1	98.3	40.3	22.4	7.7
2023	3.2	2.4	8.2	12.3	46.3	11.6	66.4	71.8	16.1	52.4	17.6	23.8
2024	3.1	9.5	1.4	4.5	13.6	136	165.1	55.7	88.3	11.9	3.1	9.2

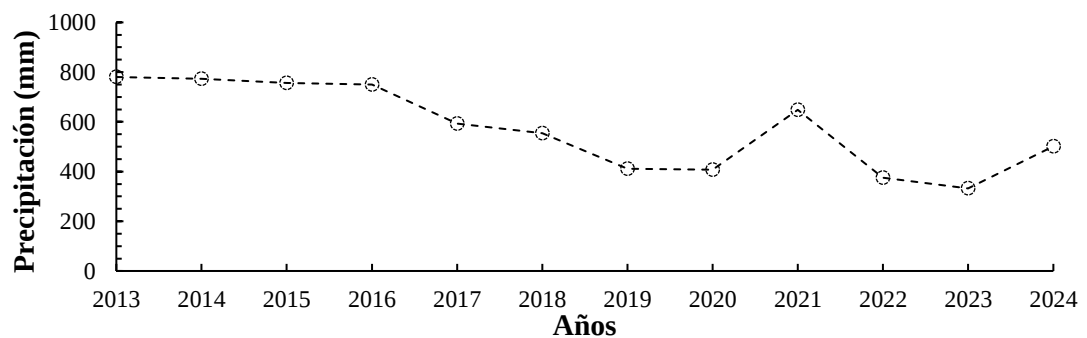


Figura 8.52 Precipitación anual 2013 - 2024

Tabla 8.52 Temperatura promedio CONAGUA 2013-2024.

Temperatura promedio (°C)												
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2013	16	18.3	17.6	22	22.6	22.5	21.4	20.9	20.7	19.6	17.1	15.1
2014	14.2	17.9	19.8	20.8	21.2	21.2	21.2	21.4	21	19.5	17	16.5
2015	15.6	16.9	18.3	21.9	22.5	21.8	21.4	21.9	21.7	20.3	19.5	16.6
2016	15	16.2	18.8	22.3	24.7	22.3	21.7	21.7	21.1	19.7	17.4	17.4
2017	16.7	18.2	19.5	21.6	24.7	23.6	21.5	22.2	20.5	19.1	17.4	15.1
2018	14.1	18.6	21.1	22.3	23.8	22.2	22	21.9	21.6	20.4	17.5	15.9
2019	16.6	19.2	20.8	22.3	25.1	23.3	21.8	22.8	21.8	20.8	19.4	16.2
2020	15.8	18.7	22	24.1	23.8	22.9	22.7	21.9	21	19.3	18	15.3
2021	16.5	17.7	20.7	23	23	21.8	21.5	21.5	21.2	20.4	17.1	17.2
2022	16.4	16.9	19.9	22.5	24.5	22.5	22.5	22.3	20.1	19.7	18.9	15.7
2023	16.3	17.6	21.3	22.8	23.8	25.4	23.5	22.1	22.5	20.2	18.2	14
2024	16.8	18.6	21.7	23.3	27.8	24.7	22	22.2	22.2	18.9	19.6	16.7

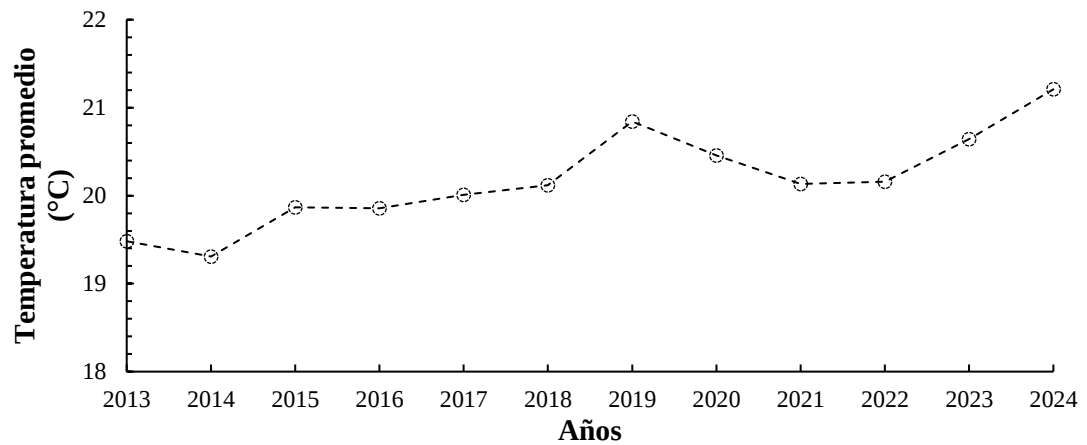


Figura 8.53 Temperatura promedio anual (°C), 2013 - 2024.

Tabla 8.53 Temperatura mínima CONAGUA 2013-2024.

Temperatura mínima (°C)												
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2013	7.8	8.4	8.5	12.5	14.1	15	14.6	14.2	14.9	12.5	10.6	7.4
2014	5.6	8.4	10.9	12.3	14	14	15	14.6	15.3	12.8	9.9	9.6
2015	8.1	8.9	10.8	14.1	15.2	15.5	15	14.7	15.4	13.6	12.6	9.3
2016	6.9	7.1	10.8	13.5	16.7	15.8	15.5	15.4	15.1	13.1	11.1	10.8
2017	7.5	9.1	11.1	12.8	16.7	16.3	15.5	15.6	14.8	12.9	8.8	6.9
2018	5.7	10.7	12.1	13.8	15.7	15.6	14.8	15.5	15.5	14.7	10.4	7.7
2019	8.4	10.3	11.8	13.5	16.9	16.6	14.8	15.5	14.9	14.2	12.2	7.8
2020	7.8	10	13.1	15.5	15.7	15.7	15.8	15.8	14.8	10.9	10.3	7.5
2021	8.4	8.1	11.4	14	15.5	15.9	15.6	15.1	15.4	13.7	9.1	8.2
2022	8.1	8.3	10.4	13.8	15.9	15.7	15.2	15.5	14.7	12.6	11.6	8.5
2023	7.4	8.7	12.4	14.7	15.8	17.2	16.7	15.7	14.9	14	10.8	8.1
2024	8.7	9.2	12.3	14.6	19.2	17.9	16.6	16	16.7	12.4	11.2	9.2

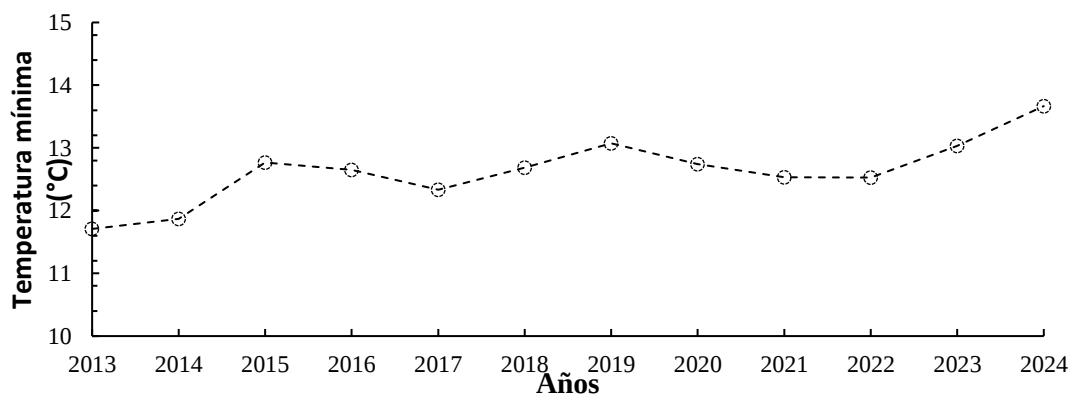


Figura 8.54 Temperatura mínima (°C) anual 2013 -2024.

Tabla 8.54 Temperatura máxima CONAGUA 2013-2024.

Temperatura máxima (°C)												
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2013	24.2	28.1	26.7	31.4	31.1	30	28.1	27.6	26.6	26.7	23.7	22.7
2014	22.8	27.3	28.6	29.3	28.5	28.5	27.4	28.2	26.8	26.1	24	23.4
2015	23.2	24.9	25.8	29.7	29.7	28.2	27.8	29	28	26.9	26.3	23.9
2016	23.1	25.4	26.8	31	32.8	28.7	28	27.9	27.1	26.4	23.7	24
2017	25.9	27.2	27.9	30.5	32.7	31	27.5	28.7	26.3	25.3	26	23.3
2018	22.5	26.4	30.2	30.8	31.8	28.8	29.3	28.3	27.7	26.1	24.7	24.1
2019	24.8	28.2	29.7	31.1	33.3	30.1	28.8	30.1	28.7	27.4	26.5	24.6
2020	23.9	27.3	30.9	32.7	31.8	30.1	29.7	28	27.1	27.7	25.7	23.1
2021	24.5	27.2	30.1	31.9	30.6	27.7	27.5	28	27	27.1	25.1	26.2
2022	24.6	25.5	29.3	31.2	33.2	29.4	29.7	29	25.5	26.7	26.3	22.9
2023	25.1	26.6	30.1	30.9	31.8	33.6	30.4	28.6	30.1	26.5	25.6	19.9
2024	24.9	28	31.1	32.1	36.5	31.6	27.3	28.4	27.7	25.4	28	24.2

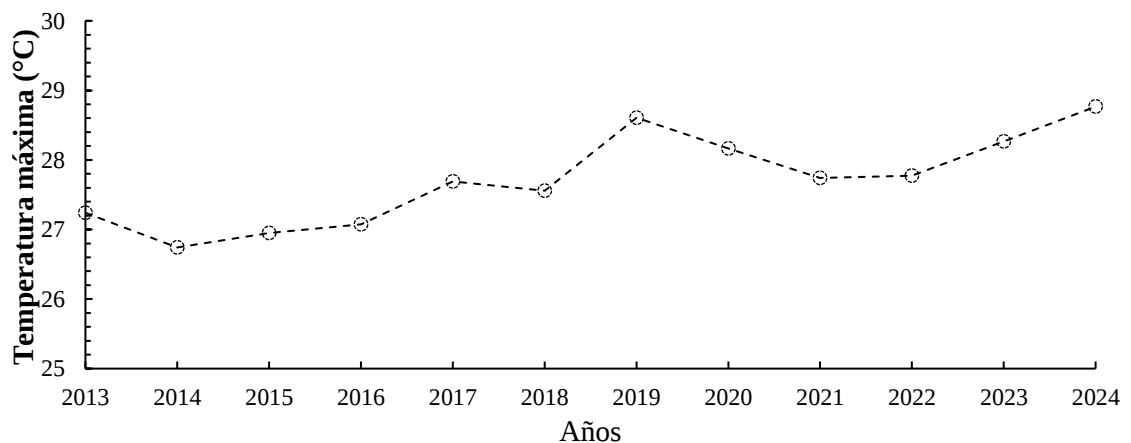


Figura 8.55 Temperatura máxima anual (°C), 2013 - 2024.

8.10. Variación del módulo de resiliencia (Mr) en función del Índice de Thornthwaite (IT): Análisis de tendencias para el periodo 2014-2024.

Una vez obtenidos los valores mensuales y anuales del Índice de Thornthwaite (IT) para el periodo 2014–2024, estos fueron incorporados como variables independientes clave en el análisis del módulo de resiliencia (Mr) de diferentes tipos de suelo: arcilla, limo y arena. Esta integración permitió explorar cómo la variación climática, expresada a través del IT, influye directamente en la respuesta mecánica del suelo bajo distintas condiciones de carga, representadas por combinaciones de esfuerzos desviadores (σ_d) y confinantes (σ_3), Tabla 8.55. En donde esta combinación de esfuerzos se aplicó a los tres tipos de suelos estudiados (Tablas 8.56 – 8.66).

Tabla 8.55 Combinación de esfuerzos desviadores (σ_d) y confinantes (σ_3), para los suelos CH, ML y SM.

σ_d	27	48	68	99	27	48	68	99	27	48	68	99
σ_3	14	14	14	14	28	28	28	28	41	41	41	41

8.10.1. Análisis para el suelo: Arcilla altamente plástico (CH).

Tabla 8.56 Análisis del módulo de resiliencia, año 2014, suelo CH.

2014													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-24.40	109.60	95.40	83.60	68.11	121.88	106.09	92.96	75.74	134.51	117.08	102.59	83.59
Feb	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Ma	-50.55	29.52	25.70	22.52	18.35	32.83	28.58	25.04	20.40	36.23	31.54	27.63	22.52
Abril	-43.22	50.08	43.59	38.19	31.12	55.68	48.47	42.47	34.61	61.45	53.49	46.87	38.19
May	-13.34	132.53	115.36	101.08	82.36	147.37	128.28	112.40	91.58	162.64	141.57	124.05	101.07
Junio	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Jul	72.59	37.96	33.04	28.95	23.59	42.21	36.74	32.19	26.23	46.58	40.55	35.53	28.95
Ago	24.29	110.82	96.46	84.52	68.87	123.23	107.27	93.99	76.58	136.00	118.38	103.73	84.52
Sep	55.08	59.11	51.45	45.08	36.73	65.73	57.21	50.13	40.85	72.54	63.14	55.33	45.08
Oct	73.81	36.75	31.99	28.03	22.84	40.86	35.57	31.17	25.39	45.10	39.25	34.40	28.03
Nov	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Dic	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Anual	3.20	138.21	120.31	105.41	85.89	153.69	133.78	117.22	95.51	169.62	147.64	129.37	105.41

Tabla 8.57 Análisis del módulo de resiliencia, año 2015, suelo CH.

2015													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Feb	-10.05	136.36	118.69	104.00	84.74	151.63	131.99	115.65	94.23	167.34	145.66	127.63	103.99
Ma	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Abril	-15.06	129.96	113.12	99.12	80.76	144.52	125.79	110.22	89.81	159.49	138.83	121.64	99.12
May	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Junio	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Jul	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Ago	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Sep	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Oct	22.22	114.36	99.55	87.23	71.07	127.17	110.70	97.00	79.03	140.35	122.17	107.05	87.22
Nov	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Dic	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Anual	-1.04	139.81	121.69	106.63	86.88	155.46	135.32	118.57	96.61	171.57	149.35	130.86	106.62

Tabla 8.58 Análisis del módulo de resiliencia, año 2016, suelo CH.

2016													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Feb	-57.10	15.93	13.87	12.15	9.90	17.71	15.42	13.51	11.01	19.55	17.02	14.91	12.15
Ma	-35.45	75.37	65.61	57.49	46.84	83.82	72.96	63.93	52.09	92.50	80.52	70.55	57.49
Abril	-40.43	58.94	51.30	44.95	36.63	65.54	57.05	49.99	40.73	72.33	62.96	55.16	44.95
May	-12.96	133.04	115.81	101.47	82.68	147.95	128.78	112.84	91.94	163.28	142.12	124.53	101.47
Junio	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Jul	8.47	133.89	116.55	102.12	83.21	148.89	129.60	113.56	92.53	164.32	143.03	125.32	102.11
Ago	65.55	45.57	39.67	34.76	28.32	50.68	44.11	38.65	31.49	55.93	48.68	42.66	34.76
Sep	1.75	138.96	120.96	105.99	86.36	154.53	134.51	117.86	96.03	170.54	148.45	130.07	105.98
Oct	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Nov	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Dic	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Anual	-7.24	138.51	120.57	105.64	86.08	154.03	134.07	117.48	95.72	169.98	147.96	129.65	105.64

Tabla 8.59 Análisis del módulo de resiliencia, año 2017, suelo CH.

2017													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-37.81	67.53	58.78	51.51	41.97	75.10	65.37	57.28	46.67	82.88	72.14	63.21	51.51
Feb	-58.57	13.57	11.82	10.35	8.44	15.09	13.14	11.51	9.38	16.66	14.50	12.71	10.35
Ma	-41.23	56.36	49.06	42.98	35.02	62.67	54.55	47.80	38.95	69.16	60.20	52.75	42.98
Abril	-48.79	34.00	29.60	25.93	21.13	37.81	32.91	28.84	23.50	41.73	36.32	31.83	25.93
May	-44.94	44.84	39.03	34.20	27.87	49.86	43.40	38.03	30.99	55.03	47.90	41.97	34.20
Junio	-10.08	136.33	118.67	103.98	84.73	151.61	131.97	115.63	94.22	167.31	145.64	127.61	103.98
Jul	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Ago	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Sep	58.95	53.79	46.82	41.02	33.43	59.81	52.06	45.62	37.17	66.01	57.46	50.35	41.02
Oct	7.85	134.51	117.09	102.59	83.59	149.58	130.20	114.08	92.96	165.08	143.69	125.90	102.59
Nov	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Dic	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Anual	-15.22	129.70	112.90	98.92	80.60	144.23	125.54	110.00	89.63	159.17	138.55	121.40	98.92

Tabla 8.60 Análisis del módulo de resiliencia, año 2018, suelo CH.

2018													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-43.08	50.50	43.96	38.51	31.38	56.15	48.88	42.83	34.90	61.97	53.94	47.27	38.51
Feb	-48.65	34.38	29.93	26.22	21.37	38.23	33.28	29.16	23.76	42.19	36.73	32.18	26.22
Ma	-58.76	13.29	11.57	10.13	8.26	14.77	12.86	11.27	9.18	16.31	14.19	12.44	10.13
Abril	-43.78	48.36	42.10	36.89	30.05	53.78	46.81	41.02	33.42	59.35	51.66	45.27	36.88
May	-36.89	70.60	61.46	53.85	43.88	78.51	68.34	59.88	48.79	86.64	75.42	66.08	53.85
Junio	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46

Jul	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Ago	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Sep	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Oct	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Nov	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Dic	-29.15	95.78	83.37	73.05	59.52	106.50	92.71	81.23	66.19	117.54	102.31	89.65	73.05
Anual	-20.46	119.42	103.95	91.08	74.21	132.80	115.59	101.28	82.53	146.56	127.57	111.78	91.08

Tabla 8.61 Análisis del módulo de resiliencia, año 2019, suelo CH.

2019													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-57.50	15.27	13.29	11.64	9.49	16.98	14.78	12.95	10.55	18.73	16.31	14.29	11.64
Feb	-58.94	13.02	11.33	9.93	8.09	14.48	12.60	11.04	9.00	15.98	13.91	12.19	9.93
Ma	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Abril	-57.58	15.13	13.17	11.54	9.40	16.83	14.65	12.83	10.46	18.57	16.16	14.16	11.54
May	-59.92	11.62	10.12	8.86	7.22	12.92	11.25	9.86	8.03	14.26	12.42	10.88	8.86
Junio	-12.65	133.45	116.17	101.79	82.94	148.40	129.18	113.19	92.23	163.78	142.56	124.91	101.78
Jul	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Ago	-24.55	109.19	95.05	83.28	67.86	121.42	105.69	92.61	75.46	134.01	116.65	102.21	83.28
Sep	-5.27	139.43	121.36	106.34	86.65	155.04	134.96	118.25	96.35	171.11	148.94	130.51	106.34
Oct	-1.47	139.86	121.74	106.67	86.92	155.53	135.38	118.62	96.65	171.64	149.40	130.91	106.67
Nov	-45.16	44.18	38.45	33.69	27.45	49.12	42.76	37.47	30.53	54.21	47.19	41.35	33.69
Dic	-35.62	74.82	65.12	57.06	46.50	83.20	72.42	63.46	51.70	91.82	79.92	70.03	57.06
Anual	-39.97	60.42	52.59	46.08	37.55	67.19	58.48	51.25	41.75	74.15	64.54	56.56	46.08

Tabla 8.62 Análisis del módulo de resiliencia, año 2020, suelo CH.

2020													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Feb	-31.30	89.00	77.47	67.88	55.31	98.97	86.15	75.48	61.50	109.22	95.07	83.31	67.88
Ma	-46.36	40.69	35.42	31.03	25.29	45.25	39.38	34.51	28.12	49.93	43.46	38.08	31.03
Abril	-50.94	28.59	24.88	21.80	17.77	31.79	27.67	24.25	19.76	35.08	30.54	26.76	21.80
May	-40.12	59.93	52.17	45.71	37.24	66.64	58.01	50.83	41.42	73.55	64.02	56.10	45.71
Junio	-16.59	127.35	110.85	97.13	79.14	141.61	123.26	108.01	88.00	156.28	136.04	119.20	97.12
Jul	-5.76	139.24	121.20	106.20	86.53	154.84	134.78	118.10	96.23	170.88	148.74	130.33	106.20
Ago	-18.38	123.92	107.86	94.51	77.01	137.80	119.95	105.10	85.64	152.08	132.37	115.99	94.51
Sep	-0.27	139.66	121.56	106.52	86.79	155.30	135.18	118.45	96.51	171.39	149.19	130.72	106.51
Oct	-48.69	34.25	29.82	26.12	21.29	38.09	33.15	29.05	23.67	42.04	36.59	32.06	26.12
Nov	-53.74	22.29	19.40	17.00	13.85	24.79	21.58	18.91	15.40	27.36	23.81	20.86	17.00
Dic	-59.38	12.37	10.77	9.43	7.69	13.76	11.97	10.49	8.55	15.18	13.21	11.58	9.43
Anual	-31.60	88.02	76.62	67.14	54.70	97.88	85.20	74.66	60.83	108.02	94.03	82.39	67.13

Tabla 8.63 Análisis del módulo de resiliencia, año 2021, suelo CH.

2021													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Feb	-37.64	68.12	59.29	51.95	42.33	75.75	65.94	57.77	47.07	83.60	72.77	63.76	51.95
Ma	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Abril	-55.63	18.55	16.14	14.15	11.53	20.62	17.95	15.73	12.82	22.76	19.81	17.36	14.15
May	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Junio	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Jul	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Ago	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Sep	62.66	49.04	42.69	37.40	30.47	54.53	47.47	41.59	33.89	60.18	52.38	45.90	37.40
Oct	46.11	72.77	63.34	55.50	45.22	80.92	70.43	61.72	50.29	89.30	77.73	68.11	55.50
Nov	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Dic	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Anual	-4.97	139.52	121.45	106.41	86.71	155.15	135.05	118.33	96.42	171.22	149.04	130.59	106.41

Tabla 8.64 Análisis del módulo de resiliencia, año 2022, suelo CH.

2022													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-56.74	16.54	14.40	12.62	10.28	18.39	16.01	14.03	11.43	20.30	17.67	15.48	12.62
Feb	-53.37	23.05	20.07	17.58	14.33	25.63	22.31	19.55	15.93	28.29	24.62	21.58	17.58
Ma	-60.38	11.00	9.57	8.39	6.83	12.23	10.65	9.33	7.60	13.50	11.75	10.29	8.39
Abril	-48.65	34.37	29.92	26.22	21.36	38.22	33.27	29.15	23.75	42.18	36.72	32.17	26.21
May	-58.44	13.78	11.99	10.51	8.56	15.32	13.33	11.68	9.52	16.91	14.72	12.89	10.51
Junio	-28.53	97.68	85.02	74.50	60.70	108.62	94.55	82.84	67.50	119.87	104.34	91.43	74.49
Jul	-13.27	132.62	115.44	101.15	82.42	147.48	128.37	112.48	91.65	162.76	141.67	124.14	101.15
Ago	-9.97	136.44	118.76	104.06	84.79	151.72	132.06	115.72	94.29	167.44	145.75	127.71	104.05
Sep	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Oct	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Nov	-25.99	105.18	91.55	80.22	65.36	116.96	101.81	89.21	72.69	129.08	112.36	98.45	80.22
Dic	-49.59	31.93	27.79	24.35	19.84	35.51	30.91	27.08	22.07	39.19	34.11	29.89	24.35
Anual	-33.97	80.28	69.88	61.23	49.89	89.27	77.70	68.09	55.48	98.52	85.76	75.14	61.23

Tabla 8.65 Análisis del módulo de resiliencia, año 2023, suelo CH.

2023													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-56.02	17.83	15.52	13.60	11.08	19.83	17.26	15.12	12.32	21.88	19.05	16.69	13.60
Feb	-57.82	14.74	12.83	11.24	9.16	16.39	14.27	12.50	10.18	18.09	15.74	13.79	11.24
Ma	-54.47	20.80	18.10	15.86	12.92	23.13	20.13	17.64	14.37	25.52	22.22	19.47	15.86
Abril	-52.80	24.30	21.16	18.54	15.10	27.03	23.53	20.61	16.80	29.83	25.96	22.75	18.54
May	-33.25	82.64	71.94	63.03	51.36	91.90	80.00	70.09	57.11	101.42	88.28	77.36	63.03

Junio	-55.22	19.31	16.81	14.73	12.00	21.48	18.69	16.38	13.35	23.70	20.63	18.08	14.73
Jul	-18.35	123.98	107.92	94.56	77.05	137.87	120.01	105.15	85.68	152.15	132.44	116.05	94.55
Ago	-8.23	137.87	120.01	105.15	85.68	153.31	133.45	116.93	95.28	169.20	147.28	129.05	105.15
Sep	-48.94	33.61	29.25	25.63	20.89	37.37	32.53	28.50	23.22	41.24	35.90	31.46	25.63
Oct	-12.25	133.95	116.59	102.16	83.24	148.95	129.65	113.61	92.57	164.38	143.09	125.38	102.16
Nov	-39.78	61.07	53.16	46.58	37.95	67.91	59.11	51.79	42.20	74.95	65.24	57.16	46.57
Dic	-19.48	121.60	105.85	92.75	75.57	135.22	117.71	103.14	84.04	149.23	129.90	113.82	92.74
Anual	-38.19	66.29	57.70	50.56	41.20	73.71	64.16	56.22	45.81	81.35	70.81	62.05	50.56

Tabla 8.66 Análisis del módulo de resiliencia, año 2024, suelo CH.

2024													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Feb	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Ma	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Abril	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
May	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Junio	-7.80	138.17	120.27	105.38	85.86	153.64	133.74	117.18	95.48	169.56	147.59	129.33	105.37
Jul	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Ago	0.00	139.59	121.50	106.46	86.75	155.22	135.11	118.39	96.46	171.31	149.11	130.66	106.46
Sep	-44.03	47.58	41.42	36.29	29.57	52.91	46.06	40.36	32.88	58.39	50.83	44.54	36.29
Oct	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Nov	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Dic	-61.00	10.21	8.89	7.79	6.34	11.35	9.88	8.66	7.05	12.53	10.91	9.56	7.79
Anual	-49.67	31.72	27.61	24.19	19.71	35.27	30.70	26.90	21.92	38.93	33.89	29.69	24.19

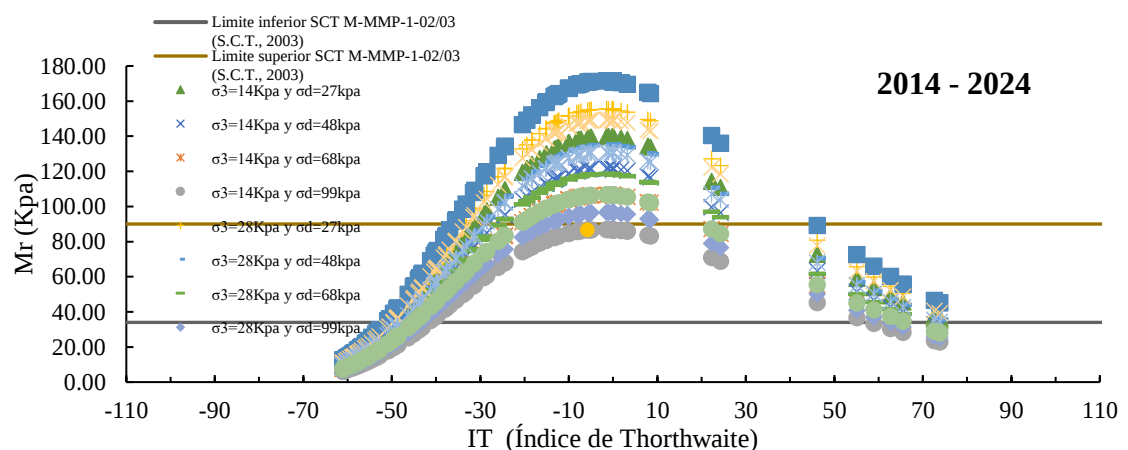


Figura 8.56 Comportamiento del Índice de Thornthwaite, 2014 - 2024, Suelo CH.

Se observa que en los meses donde el IT es más negativo (por ejemplo, enero y febrero de 2014, 2016 y 2019), el módulo de resiliencia disminuye significativamente, alcanzando valores tan bajos como 10–30 kPa para combinaciones de esfuerzo bajas.

En cambio, durante meses donde el IT es cercano a cero o positivo (como mayo a octubre), el Mr aumenta considerablemente, llegando a superar los 130–170 kPa en condiciones de $\sigma_3 = 41$ kPa y $\sigma_d = 27$ –48 kPa.

Esto indica que la arcilla es particularmente sensible al cambio en la humedad, Fig. 8.56, lo cual es coherente con su comportamiento como material cohesivo afectado por la succión.

8.10.2. Análisis para el suelo: Limo de baja compresibilidad (ML).

Tabla 8.67 Análisis del módulo de resiliencia, año 2014, suelo ML.

2014													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-24.40	561.69	519.91	483.02	430.95	697.33	645.47	599.67	535.02	852.46	789.06	733.07	654.04
Feb	-61.00	2471.2	2287.4	2125.1	1896.0	3067.9	2839.8	2638.3	2353.8	3750.4	3471.5	3225.2 2	2877.5
Ma	-50.55	1767.7	1636.2	1520.1	1356.2	2194.6	2031.4	1887.3	1683.8	2682.8	2483.3	2307.1	2058.4
Abril	-43.22	1340.1	1240.5	1152.5	1028.2	1663.8	1540.0	1430.8	1276.5	2033.9	1882.7	1749.1	1560.5
May	-13.34	310.22	287.15	266.77	238.01	385.13	356.49	331.20	295.49	470.81	435.79	404.87	361.22
Junio	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Jul	72.59	2.86	2.64	2.46	2.19	3.55	3.28	3.05	2.72	4.34	4.01	3.73	3.33
Ago	24.29	34.74	32.16	29.88	26.66	43.13	39.93	37.09	33.09	52.73	48.81	45.34	40.46
Sep	55.08	6.52	6.03	5.60	5.00	8.09	7.49	6.96	6.21	9.89	9.16	8.51	7.59
Oct	73.81	2.71	2.51	2.33	2.08	3.36	3.11	2.89	2.58	4.11	3.80	3.53	3.15
Nov	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Dic	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Anual	3.20	119.76	110.86	102.99	91.89	148.69	137.63	127.86	114.08	181.76	168.25	156.31	139.46

Tabla 8.68 Análisis del módulo de resiliencia, año 2015, suelo ML.

2015													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Feb	-10.05	257.95	238.77	221.82	197.91	320.24	296.43	275.39	245.70	391.48	362.37	336.65	300.36
Ma	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Abril	-15.06	341.21	315.83	293.42	261.79	423.61	392.10	364.28	325.01	517.84	479.33	445.32	397.31
May	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Junio	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Jul	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Ago	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Sep	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Oct	22.22	39.17	36.26	33.69	30.05	48.63	45.01	41.82	37.31	59.45	55.03	51.12	45.61
Nov	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Dic	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Anual	-1.04	153.53	142.11	132.03	117.80	190.61	176.43	163.91	146.24	233.01	215.68	200.38	178.77

Tabla 8.69 Análisis del módulo de resiliencia, año 2016, suelo ML.

2016													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
Feb	-57.10	2196.3 7	2033.0 2	1888.7 7	1685.1 3	2726.7 7	2523.9 8	2344.8 9	2092.0 8	3333.3 6	3085.4 6	2866.5 3	2557.4 8
Ma	-35.45	960.62	889.18	826.08	737.02	1192.6 0	1103.9 1	1025.5 8	915.01	1457.9 0	1349.4 8	1253.7 3	1118.5 6
Abril	-40.43	1194.6 1	1105.7 7	1027.3 1	916.55	1483.1 0	1372.8 1	1275.4 0	1137.8 9	1813.0 3	1678.2 0	1559.1 2	1391.0 2
May	-12.96	303.69	281.11	261.16	233.00	377.03	348.99	324.23	289.27	460.90	426.63	396.35	353.62
Junio	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Jul	8.47	87.82	81.29	75.52	67.38	109.03	100.92	93.76	83.65	133.28	123.37	114.62	102.26
Ago	65.55	3.93	3.64	3.38	3.02	4.88	4.52	4.20	3.74	5.96	5.52	5.13	4.58
Sep	1.75	130.44	120.74	112.17	100.08	161.94	149.90	139.26	124.25	197.97	183.25	170.24	151.89
Oct	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Nov	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Dic	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Anual	-7.24	219.81	203.47	189.03	168.65	272.90	252.60	234.68	209.38	333.61	308.80	286.88	255.95

Tabla 8.70 Análisis del módulo de resiliencia, año 2017, suelo ML.

2017													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-37.81	1067.3 3	987.95	917.85	818.90	1325.0 8	1226.5 4	1139.5 1	1016.6 5	1619.8 6	1499.3 9	1393.0 0	1242.8 1
Feb	-58.57	2297.9 0	2127.0 0	1976.0 8	1763.0 3	2852.8 2	2640.6 6	2453.2 9	2188.7 9	3487.4 5	3228.0 9	2999.0 4	2675.7 0
Ma	-41.23	1235.3 0	1143.4 3	1062.3 0	947.77	1533.6 2	1419.5 6	1318.8 4	1176.6 5	1874.7 8	1735.3 6	1612.2 2	1438.4 0
Abril	-48.79	1659.6 4	1536.2 2	1427.2 1	1273.3 4	2060.4 3	1907.2 0	1771.8 7	1580.8 4	2518.7 9	2331.4 7	2166.0 4	1932.5 1
May	-44.94	1434.9 4	1328.2 3	1233.9 8	1100.9 4	1781.4 7	1648.9 8	1531.9 8	1366.8 1	2177.7 7	2015.8 1	1872.7 8	1670.8 7
Junio	-10.08	258.27	239.06	222.10	198.15	320.64	296.79	275.73	246.01	391.97	362.82	337.07	300.73
Jul	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Ago	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Sep	58.95	5.38	4.98	4.63	4.13	6.68	6.18	5.75	5.13	8.17	7.56	7.02	6.27
Oct	7.85	91.05	84.28	78.30	69.86	113.04	104.63	97.21	86.73	138.19	127.91	118.84	106.02
Nov	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Dic	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Anual	-15.22	344.27	318.66	296.05	264.13	427.40	395.62	367.55	327.92	522.48	483.62	449.31	400.87

Tabla 8.71 Análisis del módulo de resiliencia, año 2018, suelo ML.

2018													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-43.08	1332.8 6	1233.7 4	1146.2 0	1022.6 2	1654.7 4	1531.6 8	1423.0 0	1269.5 8	2022.8 5	1872.4 1	1739.5 5	1552.0 0
Feb	-48.65	1651.0 0	1528.2 1	1419.7 7	1266.7 0	2049.7 0	1897.2 6	1762.6 4	1572.6 0	2505.6 7	2319.3 2	2154.7 5	1922.4 4
Ma	-58.76	2311.2 3	2139.3 5	1987.5 4	1773.2 6	2869.3 7	2655.9 8	2467.5 2	2201.4 9	3507.6 9	3246.8 2	3016.4 4	2691.2 3
Abril	-43.78	1370.4 2	1268.5 0	1178.4 9	1051.4 3	1701.3 6	1574.8 3	1463.0 9	1305.3 5	2079.8 4	1925.1 7	1788.5 6	1595.7 3

May	-36.89	1024.6 2	948.42	881.12	786.13	1272.0 6	1177.4 6	1093.9 1	975.97	1555.0 4	1439.3 9	1337.2 6	1193.0 8
Junio	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Jul	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Ago	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Sep	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Oct	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Nov	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Dic	-29.15	713.16	660.13	613.29	547.17	885.39	819.54	761.39	679.30	1082.3 5	1001.8 6	930.77	830.42
Anual	-20.46	457.34	423.32	393.29	350.88	567.78	525.55	488.26	435.62	694.09	642.47	596.88	532.53

Tabla 8.72 Análisis del módulo de resiliencia, año 2019, suelo ML.

2019													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-57.50	2223.7 6	2058.3 8	1912.3 3	1706.1 5	2760.7 8	2555.4 6	2374.1 4	2118.1 7	3374.9 4	3123.9 5	2902.2 8	2589.3 8
Feb	-58.94	2323.7 9	2150.9 7	1998.3 5	1782.9 0	2884.9 7	2670.4 2	2480.9 3	2213.4 6	3526.7 5	3264.4 7	3032.8 4	2705.8 5
Ma	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
Abril	-57.58	2229.4 0	2063.6 0	1917.1 7	1710.4 7	2767.7 8	2561.9 4	2380.1 5	2123.5 4	3383.4 9	3131.8 6	2909.6 4	2595.9 4
May	-59.92	2393.4 0	2215.4 0	2058.2 0	1836.3 0	2971.3 8	2750.4 0	2555.2 4	2279.7 5	3632.3 9	3362.2 5	3123.6 8	2786.9 0
Junio	-12.65	298.44	276.25	256.64	228.97	370.51	342.96	318.62	284.27	452.93	419.25	389.50	347.51
Jul	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
Ago	-24.55	566.06	523.97	486.79	434.31	702.76	650.50	604.34	539.19	859.10	795.21	738.78	659.13
Sep	-5.27	196.19	181.60	168.71	150.52	243.56	225.45	209.45	186.87	297.75	275.60	256.05	228.44
Oct	-1.47	157.40	145.69	135.35	120.76	195.41	180.87	168.04	149.92	238.87	221.11	205.42	183.27
Nov	-45.16	1447.5 3	1339.8 8	1244.8 0	1110.6 0	1797.0 9	1663.4 4	1545.4 1	1378.8 0	2196.8 7	2033.4 9	1889.2 0	1685.5 2
Dic	-35.62	967.96	895.97	832.40	742.65	1201.7 1	1112.3 4	1033.4 1	922.00	1469.0 4	1359.7 9	1263.3 0	1127.1 0
Anual	-39.97	1171.7 5	1084.6 1	1007.6 5	899.01	1454.7 2	1346.5 3	1250.9 8	1116.1 1	1778.3 3	1646.0 7	1529.2 7	1364.4 0

Tabla 8.73 Análisis del módulo de resiliencia, año 2020, suelo ML.

2020													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Feb	-31.30	791.41	732.55	680.58	607.20	982.53	909.46	844.93	753.83	1201.1 0	1111.7 8	1032.8 9	921.53
Ma	-46.36	1515.8 9	1403.1 6	1303.5 9	1163.0 5	1881.9 7	1742.0 1	1618.4 0	1443.9 2	2300.6 3	2129.5 3	1978.4 3	1765.1 3
Abril	-50.94	1791.8 7	1658.6 1	1540.9 2	1374.7 9	2224.6 0	2059.1 6	1913.0 5	1706.7 9	2719.4 8	2517.2 3	2338.6 2	2086.4 8
May	-40.12	1179.2 6	1091.5 6	1014.1 1	904.77	1464.0 4	1355.1 6	1259.0 1	1123.2 7	1789.7 3	1656.6 3	1539.0 8	1373.1 5
Junio	-16.59	371.15	343.55	319.17	284.76	460.78	426.51	396.24	353.52	563.28	521.39	484.39	432.17
Jul	-5.76	201.88	186.86	173.61	154.89	250.63	231.99	215.53	192.29	306.39	283.60	263.48	235.07
Ago	-18.38	408.98	378.57	351.71	313.79	507.75	469.99	436.64	389.56	620.70	574.54	533.77	476.23
Sep	-0.27	146.82	135.90	126.26	112.65	182.28	168.72	156.75	139.85	222.83	206.26	191.62	170.96
Oct	-48.69	1653.8 9	1530.8 9	1422.2 6	1268.9 2	2053.2 9	1900.5 9	1765.7 3	1575.3 6	2510.0 6	2323.3 9	2158.5 3	1925.8 1

2020													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Nov	-53.74	1971.1 6	1824.5 6	1695.1 0	1512.3 4	2447.1 7	2265.1 8	2104.4 5	1877.5 6	2991.5 7	2769.0 9	2572.6 0	2295.2 4
Dic	-59.38	2355.3 6	2180.1 9	2025.4 9	1807.1 1	2924.1 6	2706.6 9	2514.6 3	2243.5 2	3574.6 5	3308.8 1	3074.0 3	2742.6 1
Anual	-31.60	802.97	743.25	690.51	616.07	996.88	922.74	857.27	764.84	1218.6 4	1128.0 1	1047.9 7	934.99

Tabla 8.74 Análisis del módulo de resiliencia, año 2021, suelo ML.

2021													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Feb	-37.64	1059.0 9	980.32	910.76	812.57	1314.8 5	1217.0 6	1130.7 1	1008.8 0	1607.3 5	1487.8 1	1382.2 4	1233.2 2
Ma	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
Abril	-55.63	2096.6 1	1940.6 8	1802.9 8	1608.5 9	2602.9 2	2409.3 4	2238.3 8	1997.0 6	3181.9 6	2945.3 2	2736.3 3	2441.3 2
May	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Junio	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Jul	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Ago	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Sep	62.66	4.50	4.17	3.87	3.45	5.59	5.17	4.81	4.29	6.83	6.32	5.88	5.24
Oct	46.11	10.34	9.57	8.89	7.93	12.83	11.88	11.04	9.85	15.69	14.52	13.49	12.04
Nov	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Dic	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Anual	-4.97	192.88	178.54	165.87	147.99	239.46	221.65	205.93	183.72	292.73	270.96	251.74	224.60

Tabla 8.75 Análisis del módulo de resiliencia, año 2022, suelo ML.

2022													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-56.74	2172.0 2	2010.4 9	1867.8 3	1666.4 5	2696.5 5	2496.0 1	2318.9 0	2068.8 9	3296.4 1	3051.2 6	2834.7 5	2529.1 3
Feb	-53.37	1947.6 3	1802.7 8	1674.8 6	1494.2 9	2417.9 6	2238.1 4	2079.3 3	1855.1 5	2955.8 6	2736.0 3	2541.8 9	2267.8 4
Ma	-60.38	2426.7 3	2246.2 6	2086.8 7	1861.8 8	3012.7 7	2788.7 1	2590.8 3	2311.5 1	3682.9 8	3409.0 8	3167.1 8	2825.7 2
Abril	-48.65	1651.1 9	1528.3 9	1419.9 4	1266.8 5	2049.9 3	1897.4 8	1762.8 4	1572.7 8	2505.9 6	2319.5 9	2155.0 0	1922.6 6
May	-58.44	2288.6 6	2118.4 5	1968.1 3	1755.9 4	2841.3 5	2630.0 4	2443.4 2	2179.9 9	3473.4 3	3215.1 1	2986.9 8	2664.9 4
Junio	-28.53	691.78	640.33	594.90	530.76	858.84	794.97	738.56	658.93	1049.8 9	971.81	902.86	805.52
Jul	-13.27	309.04	286.06	265.76	237.11	383.68	355.14	329.94	294.37	469.03	434.15	403.34	359.86
Ago	-9.97	256.71	237.62	220.76	196.96	318.71	295.00	274.07	244.52	389.60	360.63	335.04	298.92
Sep	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Oct	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Nov	-25.99	609.24	563.93	523.92	467.43	756.37	700.12	650.44	580.31	924.63	855.86	795.13	709.41
Dic	-49.59	1708.2 9	1581.2 5	1469.0 5	1310.6 7	2120.8 3	1963.1 1	1823.8 1	1627.1 8	2592.6 3	2399.8 2	2229.5 3	1989.1 6
Anual	-33.97	897.62	830.87	771.91	688.69	1114.3 9	1031.5 1	958.32	855.00	1362.2 9	1260.9 8	1171.5 1	1045.2 0

Tabla 8.76 Análisis del módulo de resiliencia, año 2023, suelo ML.

2023													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-56.02	2122.8 3	1964.9 6	1825.5 3	1628.7 2	2635.4 8	2439.4 8	2266.3 8	2022.0 4	3221.7 6	2982.1 6	2770.5 6	2471.8 5
Feb	-57.82	2246.1 4	2079.1 0	1931.5 7	1723.3 2	2788.5 7	2581.1 9	2398.0 3	2139.4 9	3408.9 1	3155.3 9	2931.4 9	2615.4 4
Ma	-54.47	2019.1 4	1868.9 8	1736.3 6	1549.1 6	2506.7 5	2320.3 2	2155.6 8	1923.2 7	3064.3 9	2836.5 0	2635.2 3	2351.1 2
Abril	-52.80	1910.1 3	1768.0 8	1642.6 2	1465.5 2	2371.4 1	2195.0 5	2039.3 0	1819.4 3	2898.9 5	2683.3 6	2492.9 6	2224.1 8
May	-33.25	868.12	803.56	746.54	666.05	1077.7 6	997.61	926.82	826.90	1317.5 2	1219.5 3	1133.0 0	1010.8 5
Junio	-55.22	2069.4 9	1915.5 9	1779.6 6	1587.7 9	2569.2 6	2378.1 9	2209.4 4	1971.2 3	3140.8 1	2907.2 3	2700.9 4	2409.7 5
Jul	-18.35	408.32	377.95	351.13	313.28	506.92	469.22	435.93	388.93	619.69	573.61	532.91	475.45
Ago	-8.23	232.57	215.27	200.00	178.44	288.73	267.26	248.30	221.53	352.96	326.71	303.53	270.81
Sep	-48.94	1668.7 4	1544.6 3	1435.0 3	1280.3 2	2071.7 2	1917.6 5	1781.5 8	1589.5 0	2532.5 9	2344.2 5	2177.9 1	1943.1 0
Oct	-12.25	291.99	270.28	251.10	224.03	362.51	335.55	311.74	278.13	443.15	410.19	381.09	340.00
Nov	-39.78	1161.9 0	1075.4 9	999.18	891.45	1442.4 9	1335.2 1	1240.4 7	1106.7 3	1763.3 8	1632.2 4	1516.4 2	1352.9 3
Dic	-19.48	433.99	401.71	373.21	332.97	538.79	498.72	463.34	413.38	658.65	609.67	566.41	505.34
Anual	-38.19	1085.0 5	1004.3 5	933.09	832.49	1347.0 8	1246.8 9	1158.4 2	1033.5 3	1646.7 4	1524.2 8	1416.1 2	1263.4 4

Tabla 8.77 Análisis del módulo de resiliencia, año 2024, suelo ML.

2024													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
Feb	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
Ma	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
Abril	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
May	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
Junio	-7.80	226.89	210.02	195.11	174.08	281.68	260.73	242.23	216.12	344.34	318.73	296.12	264.19
Jul	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Ago	0.00	144.48	133.74	124.25	110.85	179.37	166.03	154.25	137.62	219.27	202.97	188.56	168.23
Sep	-44.03	1384.4 0	1281.4 4	1190.5 1	1062.1 6	1718.7 2	1590.9 0	1478.0 1	1318.6 6	2101.0 6	1944.8 0	1806.8 1	1612.0 1
Oct	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
Nov	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
Dic	-61.00	2471.2 0	2287.4 2	2125.1 1	1896.0 0	3067.9 8	2839.8 2	2638.3 1	2353.8 7	3750.4 7	3471.5 5	3225.2 2	2877.5 0
Anual	-49.67	1713.3 3	1585.9 1	1473.3 8	1314.5 3	2127.0 9	1968.9 0	1829.1 9	1631.9 8	2600.2 8	2406.9 0	2236.1 1	1995.0 3

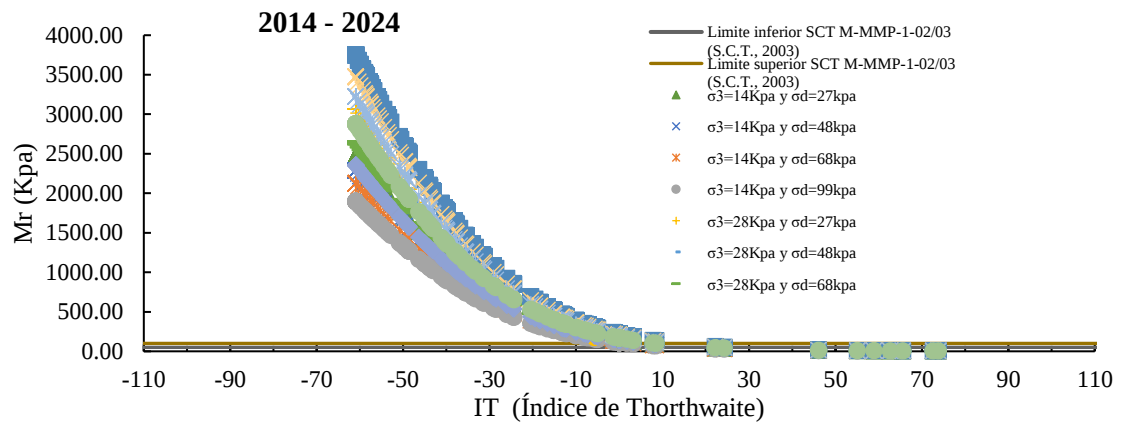


Figura 8.57 Comportamiento del Índice de Thornthwaite, 2014 - 2024, Suelo ML.

El comportamiento es similar a la arcilla, aunque con una magnitud mucho mayor en el módulo de resiliencia. Durante periodos secos (IT muy negativos), el Mr alcanza valores extremos que van desde los 500 hasta más de 3000 kPa, dependiendo de los esfuerzos aplicados.

No obstante, el limo muestra una respuesta menos lineal que la arcilla: en algunos casos, incluso cuando el IT mejora (por ejemplo, en junio o septiembre), el Mr no se incrementa de forma proporcional (Fig. 8.57).

Esto puede deberse a una mayor variabilidad en su estructura interna o al hecho de que su comportamiento depende no solo de la humedad, sino también de su densificación y nivel de compactación.

8.10.3. Análisis para el suelo: Arena Limosa (SM).

Tabla 8.78 Análisis del módulo de resiliencia, año 2014, suelo SM.

2014													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-24.40	106.86	100.11	94.08	85.44	141.80	132.84	124.83	113.37	184.39	172.74	162.33	147.42
Feb	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Ma	-50.55	125.94	117.98	110.87	100.69	167.11	156.56	147.12	133.61	217.31	203.58	191.31	173.74
Abril	-43.22	116.55	109.19	102.61	93.18	154.66	144.89	136.16	123.65	201.12	188.41	177.06	160.79
May	-13.34	104.74	98.12	92.21	83.74	138.98	130.20	122.35	111.12	180.73	169.31	159.11	144.49
Junio	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Jul	72.59	41.87	39.23	36.86	33.48	55.56	52.05	48.91	44.42	72.25	67.68	63.61	57.76
Ago	24.29	87.92	82.36	77.40	70.29	116.66	109.29	102.70	93.27	151.70	142.12	133.55	121.29
Sep	55.08	58.51	54.82	51.51	46.78	77.65	72.74	68.36	62.08	100.97	94.59	88.89	80.72
Oct	73.81	40.81	38.23	35.92	32.62	54.15	50.73	47.67	43.29	70.41	65.96	61.99	56.29
Nov	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08

2014													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Dic	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Anual	3.20	100.41	94.06	88.39	80.27	133.23	124.82	117.29	106.52	173.26	162.31	152.53	138.52

Tabla 8.79 Análisis del módulo de resiliencia, año 2015, suelo ML.

2015													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Feb	-10.05	104.12	97.54	91.66	83.24	138.16	129.43	121.63	110.46	179.66	168.31	158.16	143.64
Ma	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Abril	-15.06	105.05	98.41	92.48	83.98	139.39	130.58	122.71	111.44	181.26	169.81	159.58	144.92
May	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Junio	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Jul	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Ago	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Sep	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Oct	22.22	89.52	83.87	78.81	71.57	118.79	111.29	104.58	94.97	154.48	144.72	136.00	123.50
Nov	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Dic	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Anual	-1.04	101.88	95.44	89.69	81.45	135.18	126.64	119.01	108.08	175.79	164.68	154.76	140.54

Tabla 8.80 Análisis del módulo de resiliencia, año 2016, suelo ML.

2016													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Feb	-57.10	139.68	130.86	122.97	111.67	185.35	173.64	163.17	148.18	241.02	225.80	212.19	192.70
Ma	-35.45	110.86	103.85	97.59	88.63	147.10	137.81	129.50	117.61	191.29	179.20	168.40	152.93
Abril	-40.43	114.12	106.91	100.46	91.23	151.42	141.86	133.31	121.06	196.91	184.47	173.35	157.43
May	-12.96	104.67	98.06	92.15	83.68	138.89	130.12	122.27	111.04	180.61	169.20	159.00	144.40
Junio	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Jul	8.47	98.12	91.92	86.38	78.45	130.20	121.97	114.62	104.09	169.31	158.61	149.05	135.36
Ago	65.55	48.27	45.22	42.50	38.60	64.06	60.01	56.39	51.21	83.30	78.04	73.33	66.60
Sep	1.75	100.95	94.57	88.87	80.71	133.95	125.49	117.92	107.09	174.19	163.18	153.35	139.26
Oct	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Nov	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Dic	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Anual	-7.24	103.52	96.98	91.14	82.76	137.37	128.69	120.93	109.82	178.63	167.34	157.26	142.81

Tabla 8.81 Análisis del módulo de resiliencia, año 2017, suelo ML.

2017													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-37.81	112.25	105.16	98.82	89.74	148.95	139.53	131.13	119.08	193.69	181.45	170.51	154.85

2017													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Feb	-58.57	143.74	134.66	126.54	114.92	190.74	178.68	167.91	152.49	248.03	232.36	218.36	198.30
Ma	-41.23	114.76	107.51	101.03	91.75	152.28	142.66	134.06	121.75	198.03	185.52	174.33	158.32
Abril	-48.79	123.22	115.43	108.47	98.51	163.50	153.17	143.94	130.72	212.61	199.18	187.18	169.98
May	-44.94	118.33	110.86	104.17	94.61	157.02	147.10	138.23	125.54	204.19	191.28	179.76	163.24
Junio	-10.08	104.12	97.54	91.66	83.24	138.16	129.43	121.63	110.46	179.67	168.31	158.17	143.64
Jul	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Ago	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Sep	58.95	54.65	51.20	48.11	43.69	72.52	67.94	63.84	57.98	94.30	88.34	83.02	75.39
Oct	7.85	98.41	92.20	86.64	78.68	130.59	122.34	114.96	104.40	169.82	159.09	149.50	135.77
Nov	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Dic	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Anual	-15.22	105.08	98.44	92.50	84.01	139.43	130.62	122.75	111.47	181.31	169.86	159.62	144.96

Tabla 8.82 Análisis del módulo de resiliencia, año 2018, suelo ML.

2018													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-43.08	116.42	109.07	102.49	93.08	154.49	144.73	136.00	123.51	200.89	188.20	176.86	160.61
Feb	-48.65	123.01	115.24	108.29	98.35	163.22	152.91	143.70	130.50	212.26	198.84	186.86	169.70
Ma	-58.76	144.30	135.18	127.04	115.37	191.48	179.38	168.57	153.08	248.99	233.26	219.20	199.07
Abril	-43.78	117.10	109.71	103.09	93.62	155.39	145.57	136.80	124.23	202.07	189.30	177.89	161.55
May	-36.89	111.67	104.62	98.31	89.28	148.18	138.82	130.45	118.47	192.70	180.52	169.64	154.06
Junio	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Jul	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Ago	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Sep	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Oct	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Nov	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Dic	-29.15	108.19	101.35	95.24	86.49	143.55	134.48	126.38	114.77	186.68	174.88	164.34	149.25
Anual	-20.46	106.03	99.33	93.34	84.77	140.69	131.80	123.86	112.48	182.95	171.39	161.07	146.27

Tabla 8.83 Análisis del módulo de resiliencia, año 2019, suelo ML.

2019													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-57.50	140.74	131.85	123.90	112.52	186.76	174.96	164.41	149.31	242.86	227.51	213.80	194.16
Feb	-58.94	144.83	135.68	127.50	115.79	192.18	180.04	169.19	153.65	249.91	234.12	220.01	199.80
Ma	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Abril	-57.58	140.96	132.06	124.10	112.70	187.05	175.23	164.67	149.55	243.24	227.87	214.14	194.47
May	-59.92	147.88	138.54	130.19	118.23	196.23	183.83	172.75	156.88	255.17	239.05	224.64	204.01
Junio	-12.65	104.61	98.00	92.10	83.64	138.81	130.04	122.21	110.98	180.51	169.11	158.92	144.32
Jul	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Ago	-24.55	106.90	100.14	94.11	85.46	141.85	132.88	124.88	113.41	184.46	172.80	162.39	147.47

Sep	-5.27	103.05	96.54	90.72	82.39	136.74	128.10	120.38	109.33	177.82	166.58	156.54	142.17
Oct	-1.47	102.01	95.56	89.80	81.55	135.36	126.80	119.16	108.22	176.01	164.89	154.96	140.72
Nov	-45.16	118.58	111.09	104.39	94.80	157.35	147.41	138.52	125.80	204.61	191.68	180.13	163.59
Dic	-35.62	110.95	103.94	97.67	88.70	147.22	137.92	129.61	117.70	191.45	179.35	168.54	153.06
Anual	-39.97	113.76	106.57	100.15	90.95	150.95	141.42	132.89	120.69	196.30	183.90	172.81	156.94

Tabla 8.84 Análisis del módulo de resiliencia, año 2020, suelo ML.

2020													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Feb	-31.30	108.95	102.07	95.92	87.11	144.57	135.44	127.28	115.59	188.00	176.12	165.51	150.31
Ma	-46.36	119.98	112.40	105.62	95.92	159.20	149.14	140.16	127.28	207.03	193.95	182.26	165.52
Abril	-50.94	126.59	118.59	111.44	101.20	167.97	157.36	147.87	134.29	218.43	204.63	192.29	174.63
May	-40.12	113.88	106.68	100.25	91.04	151.11	141.56	133.03	120.81	196.50	184.08	172.99	157.10
Junio	-16.59	105.32	98.66	92.72	84.20	139.75	130.92	123.03	111.73	181.73	170.25	159.99	145.29
Jul	-5.76	103.17	96.66	90.83	82.49	136.90	128.25	120.53	109.45	178.03	166.78	156.73	142.33
Ago	-18.38	105.64	98.96	93.00	84.46	140.18	131.32	123.40	112.07	182.28	170.77	160.47	145.73
Sep	-0.27	101.63	95.21	89.47	81.25	134.86	126.34	118.72	107.82	175.37	164.29	154.39	140.21
Oct	-48.69	123.08	115.30	108.35	98.40	163.32	153.00	143.78	130.57	212.38	198.96	186.97	169.79
Nov	-53.74	131.83	123.50	116.06	105.40	174.93	163.87	154.00	139.85	227.47	213.10	200.26	181.86
Dic	-59.38	146.19	136.96	128.70	116.88	193.99	181.73	170.78	155.09	252.26	236.32	222.08	201.68
Anual	-31.60	109.07	102.18	96.02	87.20	144.73	135.59	127.42	115.71	188.21	176.32	165.69	150.47

Tabla 8.85 Análisis del módulo de resiliencia, año 2021, suelo ML.

2021													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Feb	-37.64	112.14	105.05	98.72	89.65	148.80	139.39	130.99	118.96	193.49	181.27	170.34	154.70
Ma	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Abril	-55.63	136.02	127.42	119.74	108.74	180.48	169.08	158.89	144.30	234.70	219.87	206.62	187.64
May	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Junio	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Jul	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Ago	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Sep	62.66	51.03	47.80	44.92	40.80	67.71	63.43	59.61	54.13	88.05	82.49	77.51	70.39
Oct	46.11	67.60	63.33	59.51	54.05	89.70	84.03	78.97	71.72	116.65	109.28	102.69	93.26
Nov	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Dic	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Anual	-4.97	102.98	96.47	90.66	82.33	136.64	128.01	120.30	109.25	177.69	166.46	156.43	142.06

Tabla 8.86 Análisis del módulo de resiliencia, año 2022, suelo ML.

2022													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-56.74	138.76	129.99	122.16	110.94	184.12	172.49	162.09	147.20	239.43	224.30	210.78	191.42
Feb	-53.37	131.09	122.81	115.41	104.81	173.95	162.96	153.14	139.07	226.20	211.91	199.14	180.85
Ma	-60.38	149.40	139.96	131.53	119.45	198.25	185.72	174.53	158.50	257.80	241.51	226.95	206.11
Abril	-48.65	123.01	115.24	108.30	98.35	163.23	152.92	143.70	130.50	212.26	198.85	186.87	169.70
May	-58.44	143.36	134.30	126.21	114.61	190.23	178.21	167.47	152.08	247.37	231.74	217.77	197.77
Junio	-28.53	107.99	101.16	95.07	86.33	143.29	134.24	126.15	114.56	186.33	174.56	164.04	148.97
Jul	-13.27	104.73	98.11	92.20	83.73	138.97	130.19	122.34	111.10	180.71	169.29	159.09	144.48
Ago	-9.97	104.10	97.52	91.65	83.23	138.13	129.41	121.61	110.44	179.63	168.28	158.14	143.61
Sep	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Oct	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Nov	-25.99	107.26	100.48	94.42	85.75	142.32	133.33	125.30	113.79	185.08	173.38	162.93	147.97
Dic	-49.59	124.41	116.55	109.52	99.46	165.08	154.65	145.33	131.98	214.67	201.11	188.99	171.63
Anual	-33.97	110.11	103.15	96.93	88.03	146.11	136.87	128.63	116.81	189.99	177.99	167.26	151.90

Tabla 8.87 Análisis del módulo de resiliencia, año 2023, suelo ML.

2023													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-56.02	136.95	128.30	120.56	109.49	181.72	170.24	159.98	145.29	236.31	221.38	208.04	188.93
Feb	-57.82	141.63	132.68	124.68	113.23	187.93	176.06	165.45	150.25	244.39	228.94	215.15	195.38
Ma	-54.47	133.38	124.95	117.42	106.63	176.98	165.80	155.81	141.50	230.14	215.60	202.61	184.00
Abril	-52.80	129.95	121.74	114.40	103.89	172.44	161.54	151.80	137.86	224.23	210.07	197.41	179.27
May	-33.25	109.77	102.84	96.64	87.76	145.66	136.46	128.23	116.46	189.42	177.45	166.76	151.44
Junio	-55.22	135.07	126.54	118.91	107.99	179.23	167.91	157.79	143.29	233.07	218.34	205.18	186.34
Jul	-18.35	105.63	98.96	92.99	84.45	140.17	131.31	123.40	112.06	182.27	170.76	160.47	145.73
Ago	-8.23	103.74	97.18	91.33	82.94	137.65	128.96	121.19	110.05	179.01	167.69	157.59	143.11
Sep	-48.94	123.44	115.64	108.67	98.69	163.79	153.44	144.19	130.95	212.99	199.53	187.51	170.29
Oct	-12.25	104.54	97.94	92.03	83.58	138.72	129.95	122.12	110.91	180.39	168.99	158.81	144.22
Nov	-39.78	113.61	106.43	100.02	90.83	150.76	141.23	132.72	120.53	196.04	183.66	172.59	156.73
Dic	-19.48	105.84	99.15	93.18	84.62	140.44	131.57	123.64	112.28	182.63	171.09	160.78	146.01
Anual	-38.19	112.49	105.39	99.03	89.94	149.27	139.84	131.41	119.34	194.11	181.85	170.89	155.19

Tabla 8.88 Análisis del módulo de resiliencia, año 2024, suelo ML.

2024													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Ene	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Feb	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Ma	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Abril	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
May	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Junio	-7.80	103.64	97.10	91.24	82.86	137.53	128.84	121.08	109.95	178.84	167.54	157.45	142.98

2024													
Mes	It	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr	Mr
Jul	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Ago	0.00	101.54	95.13	89.39	81.18	134.74	126.23	118.62	107.73	175.22	164.15	154.25	140.08
Sep	-44.03	117.36	109.95	103.32	93.83	155.73	145.89	137.10	124.51	202.52	189.72	178.29	161.91
Oct	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Nov	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Dic	-61.00	151.49	141.92	133.37	121.12	201.02	188.32	176.97	160.71	261.40	244.89	230.13	208.99
Anual	-49.67	124.54	116.67	109.64	99.57	165.25	154.81	145.48	132.12	214.89	201.31	189.18	171.80

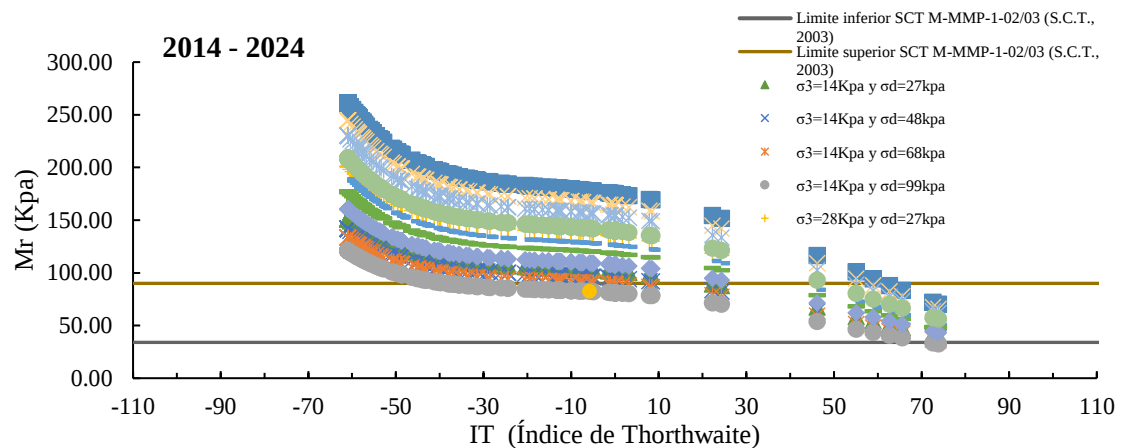


Figura 8.58 Comportamiento del Índice de Thornthwaite, 2014 - 2024, Suelo SM.

Aunque el análisis completo de arena, se puede anticipar que, al ser un suelo granular, el Mr se ve menos influenciado por el IT, aunque no está completamente exento de variaciones.

Se espera que el Mr en arenas esté más correlacionado con la densidad relativa y la presión de confinamiento que con el índice climático, pero aun así los datos permiten evaluar esta interacción en condiciones reales.

En general se puede identificar una relación directa entre el valor del IT y el módulo de resiliencia: a mayores valores de IT (es decir, condiciones más húmedas), el Mr tiende a disminuir, reflejando suelos más blandos o saturados (Fig. 8.58).

Sin embargo, esta relación varía según el tipo de suelo y el estado de carga. En suelos finos, como arcillas y limos, la sensibilidad al IT es más marcada, mientras que en suelos granulares (arena), esta correlación es menos evidente.

8.11. Relación de las capas del pavimento

El objetivo de este modelo es simular la variación temporal y espacial, por capas, del Módulo Resiliente (MR) en una estructura de pavimento. Para ello se integran los efectos

de las condiciones hídricas y la temperatura, siguiendo el marco conceptual del diseño Empírico Mecanicista (MEPDG/AASHTO). Con este propósito se estableció una serie de pasos metodológicos y se implementó el modelo en el lenguaje de programación *MATLAB*, elegido por su facilidad de uso y capacidad de procesos no lineales (Anexo V.V).

La estructura del pavimento se tomó de la pista de pruebas del IMT, utilizando los datos de suelo obtenidos experimentalmente (Fig. 8.59)

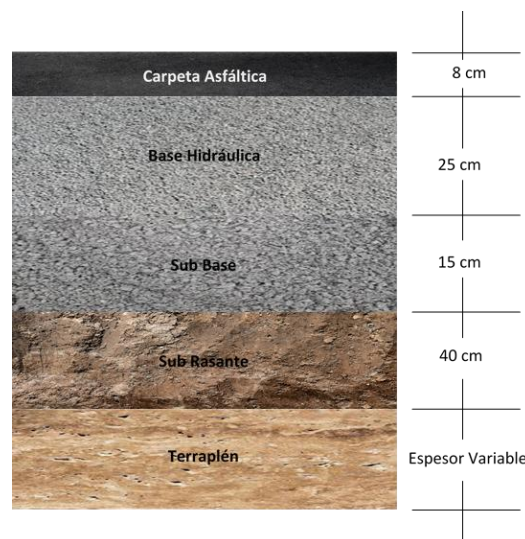


Figura 8.59. Estructura de las capas del pavimento de la pista de pruebas del IMT, para el análisis de su comportamiento a diferentes capas.

8.11.1. Modelado del ambiente (entrada climática, paso 1 y 2)

Esta fase traduce los datos climáticos de entrada a las variables ambientales que realmente afectan el comportamiento del suelo y el asfalto. Esto se logró con una correlación hídrica con el índice de Thornthwaite que se utiliza como la variable climática proxy (una variable como recurso externo) para el contenido de agua de la subrasante, una práctica común en modelos empíricos de pavimento. Después se correlaciona con el contenido de agua (θ) y aplicando una función sigmoideal logística calibrada por tipo de suelo para correlacionar el IT con el contenido de agua volumétrico (θ). Esta curva establece los límites superior e inferior de humedad que el suelo puede alcanzar en función del índice climático.

El uso de índices climáticos sencillos es un método de primera aproximación para simular el balance hídrico sin la complejidad de un modelo de flujo de agua por elementos finitos. La succión (ψ) es la variable clave en suelos finos, y se transforma mediante la ecuación

de Van Genuchten (1980), pues es el parámetro físico real que define la rigidez del suelo fino. Este modelo es estándar en la mecánica de suelos no saturados. Van Genuchten (1980), Fredlund y Xing, (1994).

$$\psi = f(\theta, \alpha, n, m, \theta_r) \text{ Van Genuchten}$$

En este punto se hace la carga de datos climáticos es la etapa de especificación de entradas ambientales, la cual es fundamental porque el comportamiento del Módulo Resiliente (MR) en el diseño Mecanicista-Empírico (MEPDG) es inherentemente dependiente de las condiciones atmosféricas y subterráneas.

Este paso establece las dos variables de entrada principales que controlan la simulación en las fases subsiguientes (Modelado Térmico e Hidráulico), en la tabla 1, se detalla cómo se carga y valida la entrada climática y su funcionalidad del código.

La función “*cargar_datos_climaticos*” realiza una tarea de Input/Output (I/O, entrada o salida de datos) y validación. Su propósito es asegurar que la serie de tiempo climática requerida por el modelo esté disponible y en el formato correcto.

Tabla 8.89. Proceso de las variables de entrada, así como su rol dentro del modelo físico.

Variable Requerida	Propósito en el Código	Rol en el Modelo Físico
TmeanC	Temperatura Media Mensual (°C)	Entrada al modelo de Transferencia de Calor (Paso 5).
IT	Índice de Thornthwaite	Entrada al modelo de Balance Hídrico (Paso 3).
año, mes	Variables de Control Temporal	Necesarias para la estructuración de la serie de tiempo y para aplicar el offset estocástico anual (variabilidad inter-anual).

La elección de la Temperatura Media y el Índice de Thornthwaite como las únicas entradas ambientales se basa en la necesidad de alimentar los dos principales modelos de respuesta del pavimento, que son el modelo térmico y el modelo hídrico.

Para el fundamento de la Temperatura Media (T_{mean} °C), debemos de considerar que el MR de los materiales asfálticos y la respuesta del suelo están dominados por la temperatura, especialmente en la capa superior.

La temperatura del aire es la principal fuerza impulsora del flujo de calor hacia el interior del pavimento conocida como (Modelo Térmico). El MEPDG (AASHTO) utiliza la temperatura del aire como entrada para su algoritmo de transferencia de calor, el cual

simula la distribución de temperatura con la profundidad y el tiempo. También debemos de considerar que la rigidez del concreto asfáltico (AC) está inversamente relacionada con su temperatura. Un aumento de la temperatura reduce drásticamente el MRAC (aumentando la deformación). La temperatura del aire debe cargarse para calcular la temperatura en el centro de la capa asfáltica. (Huang, 2004).

Uno de los efectos secundarios es que la temperatura también influye en la migración de humedad y es crítica para modelar los ciclos de congelación o descongelación en climas fríos.

Después pasamos con el Índice de Thornthwaite (IT) el cual es un índice de humedad empírico basado en el balance entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, ajustada por la temperatura. Se ha adoptado como una variable de entrada sustituta (surrogate variable) para caracterizar la severidad hídrica de una región.

En el modelo hídrico (Humedad/Succión), el MR de los suelos finos y granulares es altamente sensible al cambio en el contenido de humedad. El IT funciona como un indicador simplificado del estado hídrico de la subrasante a lo largo del tiempo, es decir que un IT Alto (Clima Húmedo) implica un alto contenido de agua, lo que reduce la succión (ψ) y, por lo tanto, reduce el MR de los suelos finos. Y para un IT bajo (Clima Seco) implica sequedad o condiciones semiáridas, lo que lleva a un contenido de agua muy bajo y a un alto potencial de succión, resultando en un MR elevado.

A partir de esto se hicieron unas correlaciones empíricas esto principalmente para usar el IT es su integración que relacionan el índice directamente con el MR o con el grado de saturación/humedad, especialmente también se han desarrollado modelos para Norteamérica y México. Y para calibrar el modelo sigmoideal y de Factor de Condición Hídrica (FCI) en el Paso 3 y Paso 6, respectivamente. (Titus-Glover et al., 2025).

8.11.2. Modelo de Propiedades Hidráulicas (Paso 3)

El contenido de agua volumétrico (θ) se correlacionó con el índice climático mediante una función sigmoideal modificada. Esta función, limitada por la porosidad del suelo (θ_{sat}), permite definir la capacidad máxima de retención hídrica para cada tipo de suelo. Posteriormente, el contenido de agua se transformó en succión (ψ) utilizando el modelo de Van Genuchten, el cual describe la relación entre humedad y energía de retención del agua en el suelo (Van Genuchten, 1980).

1.1. Contenido de Agua Volumétrico (θ)

Se utiliza una función sigmoideal (logística) modificada para correlacionar el índice climático con el estado de humedad del suelo, limitada por la porosidad (θ_{sat}).

$$\theta(IT, Ruido) = \theta_{sat} \cdot \left[\frac{1}{1 + e^{-k \cdot (IT + Ruido - IT_0)}} \right]$$

Donde:

θ_{sat} =Porosidad (Límite superior de θ).

k, IT_0 : Parámetros de ajuste calibrados empíricamente según el tipo de suelo.

Ruido: Perturbación estocástica aleatoria añadida al IT:

$$Ruido \sim N(0, \sigma IT)$$

(σIT es la desviación estándar del ruido de IT).

1.2. Succión (ψ)

El θ se convierte a succión (ψ) utilizando la ecuación de Van Genuchten (VG), el cual describe la curva de retención de agua del suelo.

$$\psi(\theta) = \frac{1}{\alpha_{VG}} \cdot \left[\left(\frac{1}{S_e} \right)^{1/m} - 1 \right]^{1/n}$$

Donde:

S_e : Saturación efectiva (Grado de saturación de agua disponible).

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r}$$

θ_r : Contenido de agua residual.

α_{VG} : Parámetros de ajuste de Van Genuchten por tipo de suelo.

$m=1-1/n$: Relación de parámetros (según Van Genuchten).

8.11.3. Modelo de Esfuerzos (Paso 4)

Los esfuerzos se calcularon en el centro de cada capa, considerando el esfuerzo confinante (σ_3) como la presión litostática de las capas superiores, y el esfuerzo desviador (σ_d) como la diferencia entre el esfuerzo vertical máximo bajo carga y el confinante. La formulación se basó en las aproximaciones de Boussinesq y Burmister, ampliamente utilizadas en modelado de pavimentos (Witczak et al., 2002).

Los esfuerzos se calculan en el centro de cada capa i , definiendo el Parámetro de Esfuerzos (Θ) que se usa en el MR.

8.11.3.1. Esfuerzo Confinante (σ_3)

El esfuerzo confinante es aproximadamente igual a la presión litostática (peso propio) de las capas superiores y la mitad de la capa analizada, con un límite mínimo de confinamiento ($\sigma_3, \min$) para simular un confinamiento mínimo en las pruebas triaxiales.

$$\sigma_3(z_i) = \max \left(\sigma_3, \min, \sum_{j=1}^{i-1} (\gamma_j \cdot h_j) + \gamma_i \cdot \frac{h_i}{2} \right)$$

Donde:

z_i : Profundidad central de la capa i .

γ_j, h_j : Peso volumétrico y espesor de la capa j .

$\sigma_3, \min$: Esfuerzo confinante mínimo (ejemplo, 21 kPa).

8.11.3.2. Esfuerzo Desviador (σ_d)

El esfuerzo desviador es la diferencia entre el esfuerzo vertical máximo bajo la carga (σ_v) y el esfuerzo confinante. Se utiliza una simplificación de la distribución de Boussinesq/Burmister.

$$\sigma_d(z_i) = \max(21 \text{ kPa}, \sigma_v(\text{Carga}) - \sigma_h(\text{Carga}))$$

En el código, σ_d se calcula a partir de la presión vertical simplificada ($\sigma_v \approx P/A_{eff}$), donde A_{eff} depende de la profundidad, y un factor de reducción:

$$\sigma_d(z_i) \approx \left(\frac{P}{\pi r_{eff}^2(z_i)} \right) 0.65$$

P : Carga de la rueda equivalente (40 kN).

r_{eff} : Radio efectivo de la huella de carga, que aumenta con la profundidad z .

8.11.3.3. Parámetro de Esfuerzos de Masa (Θ)

$$\Theta = 3\sigma_3 + \sigma_d$$

8.11.4. Modelo Térmico de Suelo (Paso 5)

El modelo utiliza la solución de la Ecuación de Fourier para la transferencia de calor en un semi-espacio.

8.11.4.1. Componentes de Temperatura

La temperatura del suelo T_{suelo} a una profundidad z en el tiempo t se compone de tres términos:

$$T_{suelo}(z, t) = T_{media\ anual} + \Delta T_{fluctuacion}(z, t) + \Delta T_{ajuste}(z)$$

$T_{media\ anual}$: Temperatura media anual de la serie histórica de T_{aire}

8.11.4.2. Fluctuación Estacional Atenuada

Esta componente captura el efecto de la onda de calor que se propaga desde la superficie, atenuándose exponencialmente con la profundidad z .

$$\Delta T_{fluctuacion}(z, t) = (T'_{aire}(t) - T_{media\ anual}) \cdot e^{-z \cdot \delta}$$

Donde:

$T'_{aire}(t) = T_{aire}(t) + Offset\ Anual$ (Se añade un offset estocástico anual para variabilidad inter-anual).

δ : Coeficiente de atenuación térmica (o "amortiguamiento"), que depende de las propiedades del material (α_{term}) y del periodo P (1 año).

$$\delta = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{term} \cdot P}} \cdot FactordeAtenuación$$

($\alpha_{term} \approx 1.16 \times 10^{-6} m^2/s$ es la difusividad térmica).

8.11.4.3. Ajuste Superficial

Un término empírico (tipo Hosseini, adaptado del MEPDG) ajusta la temperatura cerca de la superficie, donde la absorción solar es máxima.

$$\Delta T_{ajuste}(z) = \Delta T_{MPDG} \cdot e^{-z \cdot k_{ajuste}}$$

(ΔT_{MPDG} es la corrección empírica de temperatura, k_{ajuste} es el coeficiente de profundidad).

Todo este procedimiento se refleja en las siguientes figuras (Ver Fig. 8.60 a Fig. 8.62).

Se muestra cómo varía la temperatura en las distintas capas a lo largo de varios años, lo que concuerda con los datos climáticos registrados y con la recuperación de información correspondiente a esos mismos periodos.

La Fig. 8.60 presenta el resultado de la recopilación de datos meteorológicos y muestra claramente la evolución de la temperatura a lo largo de los años registrados (2013-2024), evidenciando su coherencia con la información recopilada

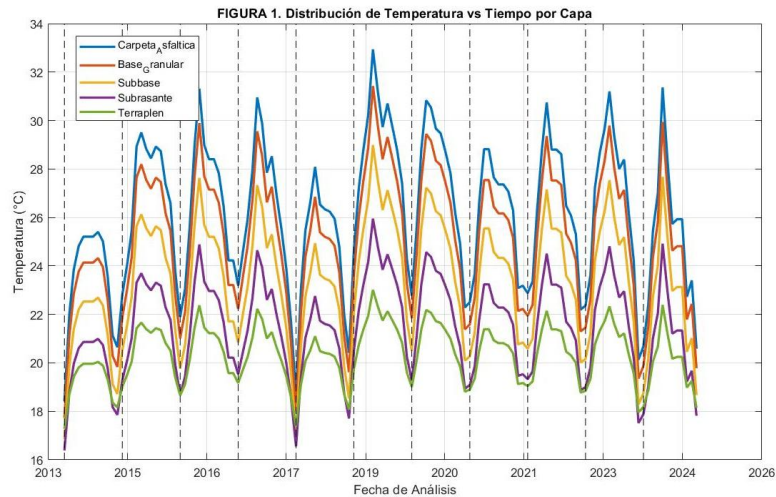


Figura 8.60. Distribución de temperatura Vs el tiempo, por capa.

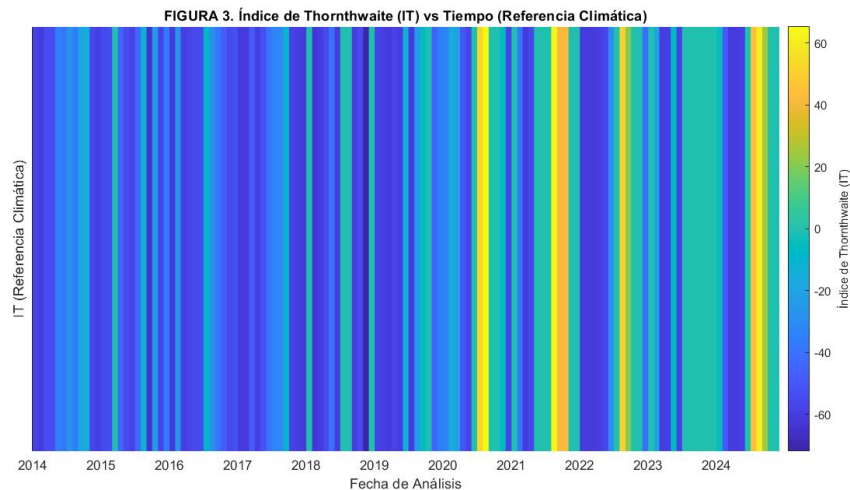


Figura 8.61. Índice de Thornthwaite Vs tiempo.

La fig. 8.61 muestra la relación entre temperatura, profundidad y tiempo, evidenciando de manera clara cómo varía la temperatura a distintas profundidades a lo largo de los años, lo que confirma la viabilidad y realismo del modelo desarrollado., dado que la temperatura es más alta en las primeras capas y se va difuminando a las capas inferiores,

todos los análisis se realizaron a la mitad de las capas, simulando el análisis de esfuerzo de cada capa

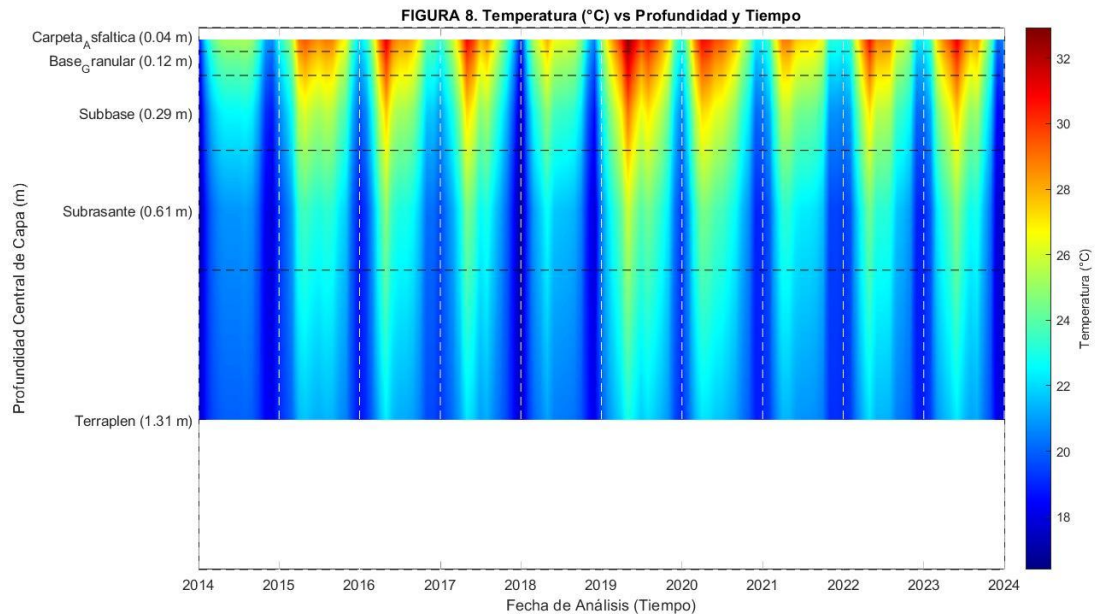


Figura 8.62. Temperatura Vs profundidad y tiempo.

8.11.5. Modelos Constitutivos de MR (Paso 6)

El Módulo Resiliente se determinó según el tipo de material. Para suelos finos (arcillas y limos), el MR se modeló como una función de campana centrada en el IT de referencia, variando entre MR_{min} y MR_{max} . Este comportamiento no lineal refleja la sensibilidad del MR a la humedad: en condiciones óptimas de humedad, el MR es máximo; en condiciones extremas (muy secas o muy húmedas), el MR disminuye considerablemente (Rahim y George, 2003).

En suelos granulares (bases y subbases), el MR depende del esfuerzo confinante y se ajusta mediante un Factor de Condición Hídrica (FHI) que penaliza el valor cuando el IT se desvía del rango óptimo. La formulación utilizada corresponde a una versión modificada del modelo K-Theta (Uzan, 2004).

Para la carpeta asfáltica, el MR está dominado por la temperatura. Se utilizó una función log-lineal inversa que representa la relación entre rigidez y temperatura, ya que la viscosidad del ligante asfáltico disminuye exponencialmente con el incremento térmico (Kim, 2009).

El MR_{final} se calcula según el tipo de material, ajustando el valor base por la temperatura T_{suelo} y las propiedades hídricas (θ, ψ).

8.11.5.1. Modelo para Materiales Cohesivos/Finos (Arcilla y Limo)

El MR está dominado por las condiciones hídricas (IT). El modelo usa una función de campana (decay) para normalizar el MR entre un MR_{min} y MR_{max} en función del IT.

$$MR_{IT} = MR_{min} + (MR_{max} - MR_{min}) \cdot e^{-k_{decay}(IT + Ruido - IT_{ref})^2}$$

$$MR_{base} = e^{(1+C2 \cdot \log_{10}(\psi))} e^{(C1 + C2 \cdot \log_{10}(\psi) + C3 \cdot \log_{10}(\theta) + C4 \cdot \theta)}$$

$$MR_{Finos} = (0.85 \cdot MR_{IT}) + (0.15 \cdot MR_{base})$$

Donde C_i son coeficientes de regresión por tipo de suelo; k_{decay} es el coeficiente de caída de rigidez; ψ y θ están corregidos por temperatura (ver Paso de Corrección T).

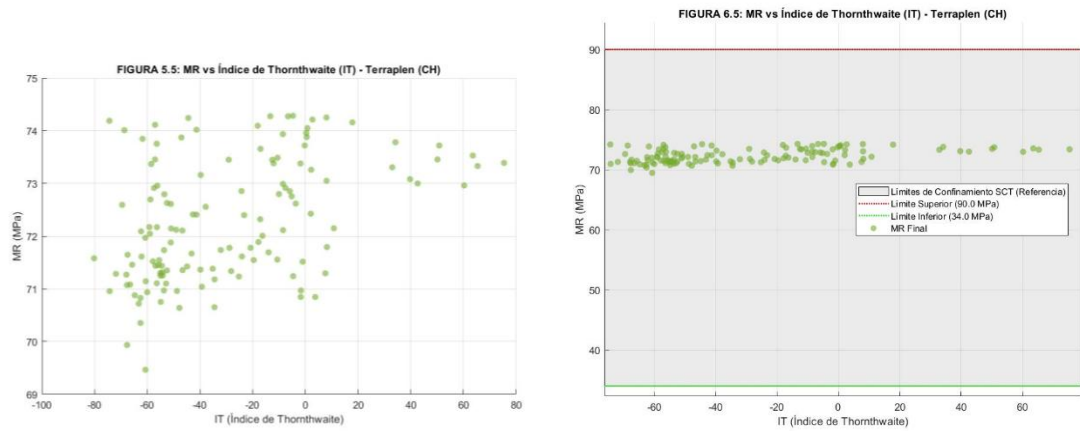


Figura 8.63. (a) índice de Thornthwaite Vs el módulo de resiliencia (Arcilla, CH), (b) límites de confinamiento según la SCT, para un terraplén.

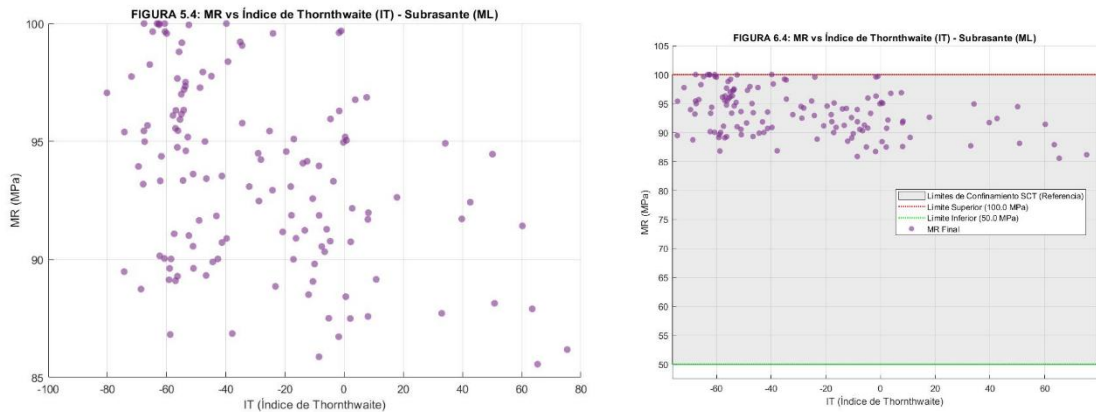


Figura 8.64. (a) índice de Thornthwaite Vs el módulo de resiliencia (Limo, ML), (b) límites de confinamiento según la SCT, para una subrasante.

De este análisis se obtuvo primeramente el parámetro del índice de Thornthwaite Vs el módulo de resiliencia, después se graficó si estaba dentro del rango para el tipo de suelo que se está analizando. (Ver, Fig. 8.63), se observa cómo se alinea los parámetros dentro

del rango establecido para cada tipo de suelo, en este caso para la arcilla (CH) y para el limo (ML), Fig.8.64.

8.12. Modelo para Materiales Granulares (Base y Subbase)

El MR está dominado por el esfuerzo θ , pero corregido por un Factor de Condición Hídrica (FHI).

$$MR_{Granular} = (MR_{FCI} \cdot FPD) + T_{Conf}$$

Factor de Condición Hídrica (MR_{FCI}): Normaliza el MR base entre MR_{min} y MR_{max} en función del IT.

$$MR_{FCI} = MR_{min,conf} + (MR_{max,conf} - MR_{min,conf}) \cdot FHI$$

Donde:

$$FHI = \max \left(0.05, \min(1.0, 1 - k_{sens}) \cdot \left(\frac{IT - IT_{optimo}}{IT_{rango}} \right)^2 \right)$$

(El MR se penaliza cuando IT se aleja del óptimo IT_{optimo}).

Factor de Profundidad (FPD): Modula por la profundidad.

$$FPD = 1 - k_{prof} \cdot e^{-1/2}$$

Término de Confinamiento (T_{conf}): Aporta la dependencia directa con el esfuerzo θ .

$$T_{conf} = C_{conf} \cdot \log_{10}(\theta)$$

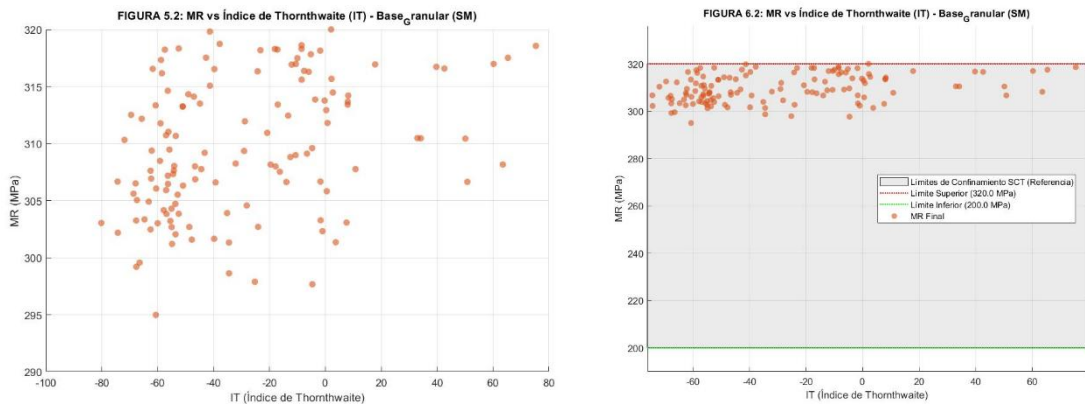


Figura 8.65. (a) índice de Thornthwaite Vs el módulo de resiliencia (Arena, SM), (b) límites de confinamiento según la SCT, para una base granular.

La Fig. 8.65 y 8.66, representa como se alinean los datos meteorológicos dentro del rango establecido para su tipo de suelo en este caso para la capa base granular, utilizando los datos de la arena limosa (SM).

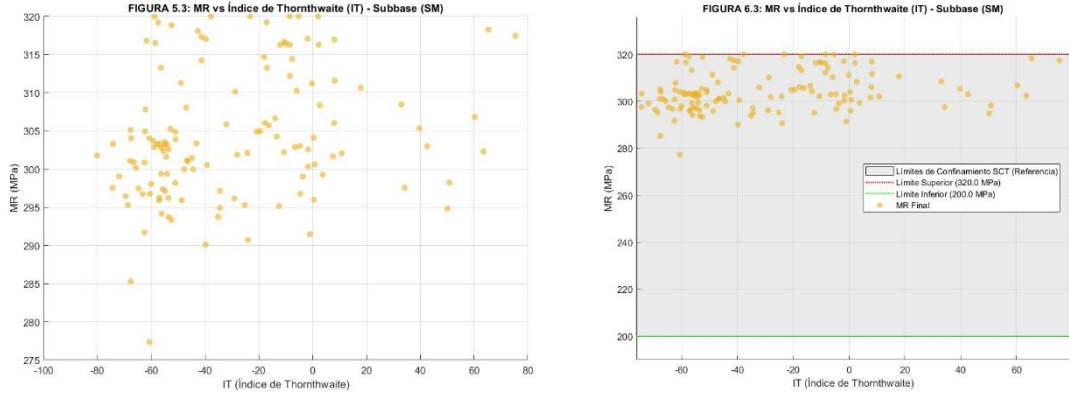


Figura 8.66. (a) índice de Thornthwaite Vs el módulo de resiliencia (Arena, SM), (b) límites de confinamiento según la SCT, para una sub base.

8.13. Modelo para Carpeta Asfáltica (AC)

El MR está dominado por la temperatura (T_{suelo}). Se utiliza una relación log-lineal (exponencial) típica de los modelos de rigidez del AC.

$$MR_{asflato} = e^{ExpArg}$$

$$ExpArg = C_5 - C_6 \cdot (IT \cdot T_{suelo}) + C_7 \cdot \log_{10}(\psi) + C_8 \cdot \log_{10}(\theta) + C_9 \cdot \theta$$

(El término $C_6 \cdot IT \cdot T_{suelo}$ indica la alta sensibilidad a la temperatura).

En el caso particular de la carpeta asfáltica, debido a la falta de información experimental específica sobre sus propiedades reológicas, se procedió a ajustar su módulo como si se tratara de un material tipo suelo. Sin embargo, este enfoque generó valores fuera del rango esperado para mezclas asfálticas, ya que su comportamiento viscoelástico no puede representarse adecuadamente mediante las mismas funciones empíricas utilizadas en materiales granulares o finos.

Aun cuando se introdujo ruido estocástico y se aplicaron filtros de suavizado para mejorar la calibración, el modelo no logró converger hacia un ajuste físico realista, lo cual confirma que el módulo del asfalto requiere una modelación independiente basada en su dependencia con la temperatura y la frecuencia de carga, tal como lo establecen los modelos viscoelásticos propuestos por Witczak et al. (2002) y Kim (2009).

El resultado de este procedimiento se refleja en Fig. 8.67.

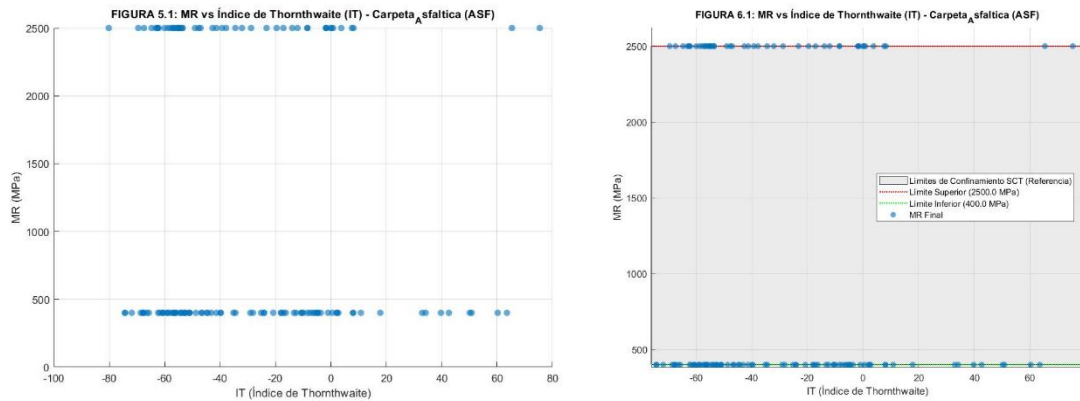


Figura 8.67. (a) índice de Thornthwaite Vs el módulo de resiliencia de la carpeta asfáltica, (b) límites de confinamiento según la SCT, para una carpeta asfáltica.

De acuerdo a la Fig.8.67 la carpeta asfáltica no se ajustó de manera adecuada, en donde se ve que los resultados solo se ajustan de arriba y abajo en los límites permitidos, por lo que no es representativo para este modelo.

8.13.1. Post-Procesamiento (Paso 7)

Para reflejar la heterogeneidad natural y la estabilidad física del modelo, se aplicó un proceso de post-filtrado de tres etapas: (1) adición de ruido gaussiano proporcional al valor medio del MR, (2) filtro de inercia mínima (IIR) para simular la respuesta retardada del material ante cambios climáticos, y (3) suavizado Savitzky–Golay para preservar la forma general de la curva, reduciendo picos de alta frecuencia (Saltelli et al., 2008).

Stochasticidad (Ruido Gaussiano): en este punto se añade una pequeña perturbación aleatoria (Ruido) al valor de MR calculado. El ruido es proporcional al valor promedio del MR de la capa. Esto con el fin de simular la heterogeneidad intrínseca de los materiales de construcción (compactación variable, muestreo, etc.), asegurando que el modelo sea estocástico.

Después se realiza el filtro de inercia mínima (Filtro IIR): Se aplica un filtro de respuesta al impulso infinito (IIR) para que el MR del mes actual (MR_t) sea una combinación del valor calculado (MR_{calc}) y el valor del mes anterior (MR_{t-1}). Para que el suelo y el pavimento tengan una inercia térmica e hídrica. No responden instantáneamente a un cambio de un día para otro, sino que presentan un retraso.

Se continua con un suavizado de estabilidad (Savitzky-Golay): Se aplica un filtro Savitzky-Golay (o Media Móvil de emergencia) al resultado final. Esto para que el filtro

de Savitzky-Golay suaviza los picos de alta frecuencia resultantes de la variabilidad estocástica, pero a diferencia de una media móvil simple, preserva la forma de la curva (picos y valles). Esto garantiza que la curva sea numéricamente estable para su uso en análisis de diseño, manteniendo la fidelidad física de las variaciones estacionales.

8.13.1.1. Ruido Controlado

Se añade una perturbación aleatoria ($Ruido_{MR}$) al valor calculado (MR_{cal}) para simular la heterogeneidad del material.

$$Ruido_{MR} \sim N(0, \sigma_{MR})$$

$$\sigma_{MR} = MR_{promedio} \cdot Std_{relativo}$$

$$MR_{t'} = MR_{calc, t} + Ruido_{MR}$$

8.14.1.2. Filtro de Inercia Mínima (Filtro IIR)

Se implementa un filtro de Respuesta al Impulso Infinito (IIR) de primer orden para simular la inercia del sistema (respuesta lenta a los cambios climáticos).

$$MR''_t = (1 - \alpha_{inercia}) \cdot MR'_t + \alpha_{inercia} \cdot MR''_{t-1}$$

Donde:

MR''_t : Valor de MR filtrado en el tiempo t.

MR'_t : Valor de MR ruidoso en el tiempo t.

$\alpha_{inercia}$: Factor de inercia ($0 < \alpha_{inercia} < 1$). Un $\alpha_{inercia}$ más alto implica mayor inercia (respuesta más lenta).

8.14.1.3. Suavizado de Estabilidad (Savitzky-Golay)

Se aplica un filtro Savitzky-Golay al resultado MR''_t para eliminar el ruido de alta frecuencia, preservando la forma general de la curva (picos estacionales).

$$MR_{Final, t} = Savitzky - Golay(MR''_t, Ventana, GradoPolinomial)$$

(Este es un operador matricial de convolución: el valor filtrado es una combinación lineal de los valores de la ventana, donde los coeficientes se derivan de la regresión polinomial local).

A través de este proceso se pudo refinar el módulo de resiliencia Vs del tiempo como se muestra en las Fig. 8.68

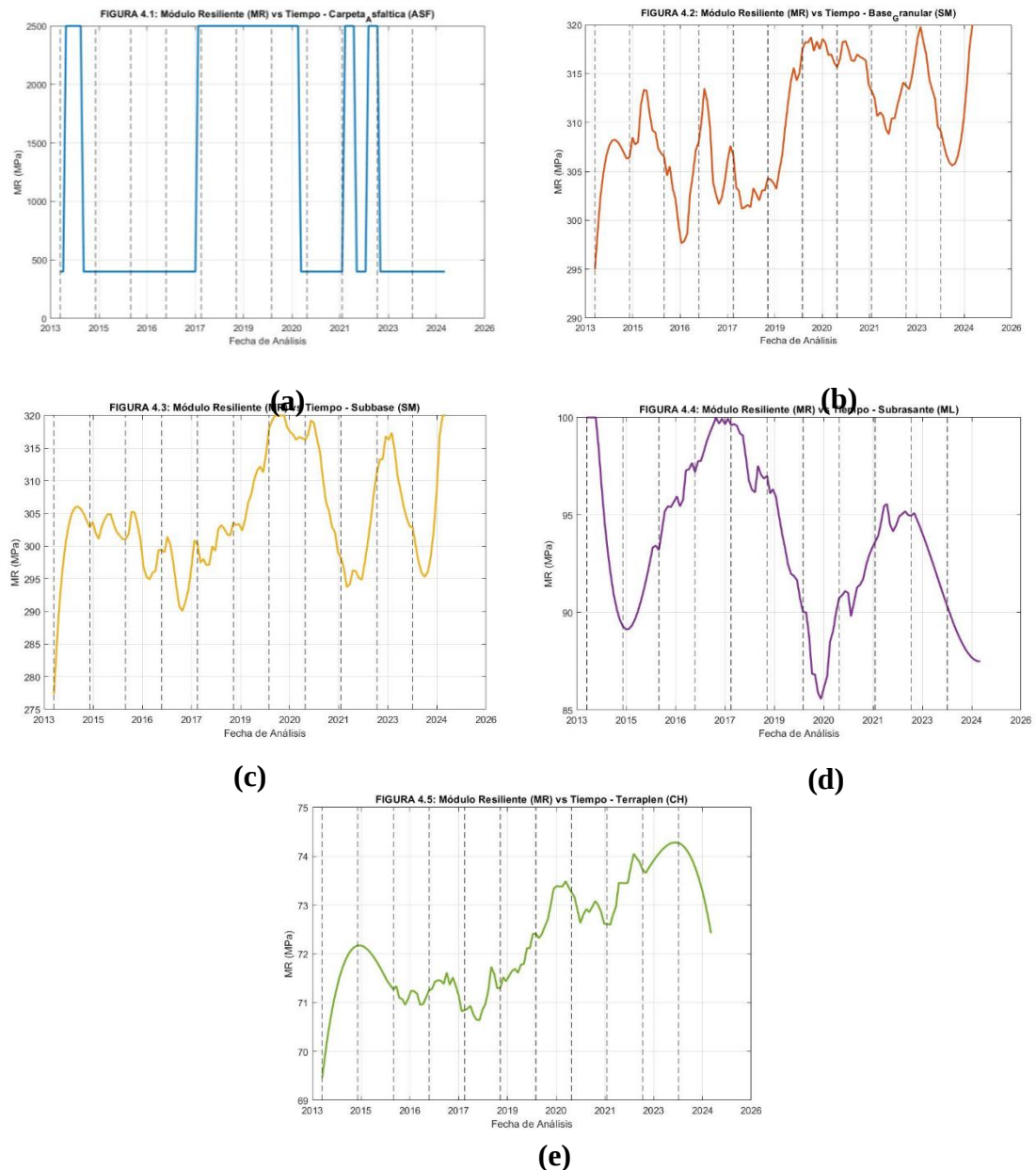


Figura 8.68. Módulo resiliente Vs Tiempo, (a) Carpeta asfáltica, (b) base granular (SM), (c) Sub base (SM), (d) Subrasante (ML), (e) Terraplén (CH).

Como se aprecia, todas las capas del pavimento presentan un comportamiento coherente y físicamente lógico, reflejando de manera realista la variación del módulo de resiliencia (MR) a lo largo del tiempo. Este resultado es consistente con el análisis del Índice de Thornthwaite (IT), cuya evolución temporal sigue una frecuencia climática real, evidenciando la sensibilidad hídrica de las capas granulares y de la subrasante.

La única excepción corresponde a la carpeta asfáltica, la cual, como se explicó previamente, no puede modelarse adecuadamente mediante las mismas relaciones empíricas aplicadas a suelos, debido a su naturaleza viscoelástica y su alta dependencia con la temperatura.

8.15. Cálculo mecánico (MR), de la regresión empírica a los modelos empíricos-mecanicistas.

La transición del modelo empírico (Forma A) al empírico-mecanicista (Forma B) se realizó mediante la separación de efectos ambientales y mecánicos, y la alineación con las ecuaciones estructurales del MEPDG. Esto permite conservar la estructura física de las variables fundamentales y reducir la dependencia de calibraciones locales (Witczak et al., 2002; NCHRP, 2004).

Los nuevos modelos presentan una representación más realista del comportamiento hídrico-térmico-mecánico, con una capacidad predictiva mejorada para condiciones no observadas en la calibración inicial. Se utilizaron las ecuaciones del Módulo Resiliente (MR), previamente calculados para cada tipo de suelo, adaptados al comportamiento físico de cada material, (Ver. Tabla.8.90)

Tabla 8.90. Proceso de cada suelo, para el proceso de un método empírico a un empírico mecanicista, así como sus variables y la justificación dentro del modelo.

Material	Variable Dominante	Ecuación / Modelo Conceptual.	Justificación
Suelos Finos (Arcilla/Limo)	Succión (ψ) / IT	MR varía entre MR_{min} y MR_{max} mediante una función de campana (Gaussiana) centrada en el IT de referencia. Este valor se modula ligeramente por θ .	El MR de los finos es altamente sensible al cambio de humedad (IT) y tiene límites físicos bien definidos, (Huang, 2004).
Suelos Granulares (Base/Subbase)	Esfuerzo (θ)	Modelo K-Theta modificado. El MR depende de θ y se aplica un Factor de Condición Hídrica (FCI), que penaliza el MR si el IT se desvía de un rango óptimo.	El MR es predominantemente dependiente del confinamiento (σ_3) en granulares, pero la humedad excesiva o la sequía extrema reducen su rigidez. (Akhtar et al., 2016).
Carpeta Asfáltica (Asfalto)	Temperatura (T)	Relación Exponencial Inversa (función log-lineal). El MR disminuye drásticamente al aumentar la temperatura.	La rigidez del asfalto es controlada por la viscosidad del ligante, que es altamente sensible a la temperatura. (Witczak MW et al., 2000).

8.15.1. Fundamento de la transición (A→B).

Algo que no se ha establecido es como pasamos de una ecuación de regresión empírica a un modelo empírico mecanicista, comenzaremos llamando a mis ecuaciones con regresión forma A, que provienen de una regresión lineal multivariable sobre la transformación logarítmica del MR ($\log(MR) = \sum C_i \cdot Var_i$), por lo que estas formulas son altamente sensibles a los datos de calibración y sufren de:

1. **Multicolinealidad:** Las variables hídricas ($\theta_T, IT_T, \psi_T, S_{rT}$) están fuertemente correlacionadas entre sí, haciendo inestables a los coeficientes.
2. **Falta de Estructura Mecanicista:** No se alinean con los modelos constitutivos aceptados (K-Theta).

Ahora la forma final la llamaremos la forma B, se resolvió mediante la separación de efectos, la consolidación de variables y la alineación con los modelos MEPDG, Tabla 8.91

Tabla 8.91. Variables y operaciones para llegar a la forma final (Forma B) del módulo de resiliencia,

Variable Original (Forma A)	Operación Matemática/ Conceptual	Variable Final (Forma B)
σ_3, σ_d	Consolidación Logarítmica: Uso del esfuerzo volumétrico total.	$\log_{10}(\theta)$ (donde $\theta = 3\sigma_3 + \sigma_d$)
θ_T, S_{rT}, IT_T	Separación de efectos: IT se mueve a un término de penalización externo.	FHI (Factor de Condición Hídrica) y IT
$e^{(...)}$	Sustitución estructural: Se reemplaza por $\log_{10}(\theta)$ (Granulares) o e Ponderado (Finos).	MR Final Estructurado

8.15.2. Caso 1: Suelos cohesivos/ finos (Arcilla y Limo).

La ecuación de regresión inicial que tenemos inicialmente es:

$$MR = e^{(-41.13\theta_T - 0.00269IT_T - 0.00961\psi_T - 27.63S_{rT} - 0.005804\sigma_d + 0.008469\sigma_3)}$$

Para la transición matemática y conceptual para pasar a la forma empírico mecanicista (Forma B), primero se hace la separación de efectos (Ponderación): El gran coeficiente negativo de θ_T indica que el clima es dominante. Para estabilizar el modelo, se separa el MR en un promedio ponderado (85% ambiental, 15% mecánico).

Modelado Ambiental (85%): El efecto del IT (variable ambiental) se saca del exponente y se modela con una función de campana (no-exponencial) que impone límites rígidos (MR_{min} , MR_{max}), utilizada para modelar la variación de la rigidez del suelo en función de su condición hídrica, la cual está representada por el índice de Thornthwaite. Lo que ocasiona esta fórmula es normalizar y limitar la respuesta del módulo de resiliencia entre un límite inferior (MR_{min}), y un límite superior (MR_{max}).

Como el MR de un suelo fino no sigue una línea recta con la humedad, si no una curva con forma de campana, es decir que cuando la humedad es óptima ($IT \approx IT_{ref}$), la rigidez (MR) es máxima y cuando el suelo está muy seco (IT muy bajo), el suelo se contrae y agrieta, lo que reduce el MR hacia MR_{min} , ahora cuando el suelo es muy húmedo (IT muy alto), el suelo pierde succión y capacidad de carga lo que reduce el MR hacia MR_{min} .

Como la fórmula siempre funciona entre MR_{min} y MR_{max} , la condición óptima es si el $IT = IT_{ref}$ (Ideal), el término de entre paréntesis es cero $e^0 = 1$, podemos decir que:

$$MR_{Normalizado} = MR_{min} + (MR_{max} - MR_{min}) \cdot 1 = MR_{max}$$

Y para la condición extrema es decir si el IT está muy alejado de la Consolidación del IT_{ref} el término negativo en el exponente se hace muy grande $e^{-(grande)}$ se aproxima a 0.

$$MR_{Normalizado} = MR_{min} + (MR_{max} - MR_{min}) \cdot 0 = MR_{min}$$

Esfuerzo (15%): Los términos σ_d y σ_3 se consolidan en la variable mecanicista $\log_{10}(\theta)$, manteniendo la estructura exponencial base:

$$MR_{base} = e^{(C_1 + C_2 \cdot \log_{10}(\psi) + C_3 \cdot \log_{10}(\theta) - C_4 \cdot \theta)}$$

Al final podemos pasar al modelo empírico mecanicista (Forma B)

$$MR_{Final} = (0.85 \cdot MR_{Normalizado}) + (0.15 \cdot MR_{base})$$

8.15.3. Para el caso de los suelos granulares (Base y Subbase A)

Tenemos la ecuación de regresión inicial (Forma A):

$$MR = e^{(-72.618\theta_T + 0.03294IT_T + 0.000007\psi_T + 41.58S_{rT} - 0.00368\sigma_d + 0.01551\sigma_3)}$$

Para la transición matemática y conceptual a la forma final (Forma B):

Alineación mecanicista (Sustitución Exponencial): Los términos de esfuerzo (σ_d , σ_3) se reemplazan por la forma $\log_{10}(\theta)$. Esto implica abandonar la función exponencial $e^{\dots}$ y

adoptar la estructura logarítmica lineal del modelo K-Theta (Uzan), que es el estándar para granulares.

$$\text{Término de Esfuerzo} \rightarrow 10.0 \cdot \log_{10}(\theta)$$

Después se hizo la corrección externa por humedad: Los términos de humedad (θ_T, IT_T, S_{rT}) se extraen del modelo de esfuerzo. En su lugar, se utilizan para calibrar el Factor de Condición Hídrica (FHI), que es una función de penalización cuadrática del IT:

$$\text{Términos Hídricos} \rightarrow FHI = \max\left(0.05, \min(1.0, 1 - k_{sens}) \cdot \left(\frac{IT - IT_{optimo}}{IT_{rango}}\right)^2\right)$$

Para finalizar incorporamos todo sumando el término de confinamiento al módulo base (MR_{FCI}) ya penalizado por FHI, en donde se encuentra el MR final (forma B)

$$MR_{final} = (MR_{FCI} \cdot FPD) + (10.0 \cdot \log_{10}(\theta))$$

Para el caso de los suelos granulares (Base y subbase), iniciamos con la ecuación planteada, de acuerdo a las regresiones:

$$MR = e^{(16.780\theta_T - 0.02944IT_T + 0.002636\psi_T - 1.32S_{rT} - 0.003108\sigma_d + 0.0202056\sigma_3)}$$

Para poder llegar a realizar la transición a una forma empírico mecanicista (Forma B), seguimos bajo la restricción de que esta fórmula se aplique a la Base o Subbase, la transición mantiene la forma exponencial, pero introduce la sensibilidad térmica (T_{suelo}) para modelar la rigidez de una capa superior granular (por ejemplo, para una base tratada o suelo cemento) que podría experimentar mayor estrés térmico y dilatación o contracción que la subrasante.

Aplicamos la introducción de la interacción térmica, es decir que los múltiples términos climáticos se consolidan en un término de interacción que incluye la temperatura del suelo, T_{suelo} . Este es el cambio clave para cualquier capa cerca de la superficie, ya que el confinamiento del granular puede ser sensible a los cambios volumétricos inducidos por la temperatura.

$$\text{Términos Hídricos/Climáticos} \rightarrow -C_6 \cdot (IT \cdot T_{suelo})$$

Se realizó el mismo método de la consolidación de esfuerzos, como las anteriores capas σ_d , y σ_3 replazándolos por la forma más robusta $\log_{10}(\theta)$.

Por lo que se obtiene un modelo termo-sensible, manteniendo la notación exponencial de la regresión inicial, el cual llegamos a la ecuación empírico mecanicista, (Forma B).

$$MR_{final} = e^{(C_5 - C_6 \cdot (IT \cdot T_{suelo}) + C_7 \cdot \log_{10}(\psi) + C_8 \cdot \log_{10}(\theta) - C_9 \cdot \theta)}$$

Finalmente, el desarrollo de este modelo permite establecer una relación temporal coherente del módulo de resiliencia (MR), la cual reproduce de forma realista la respuesta del suelo frente a las condiciones ambientales cambiantes.

Tal comportamiento se valida visualmente en la Figura 8.69, donde se observa la correspondencia entre la evolución del MR y la dinámica climática representada por el índice de Thornthwaite.

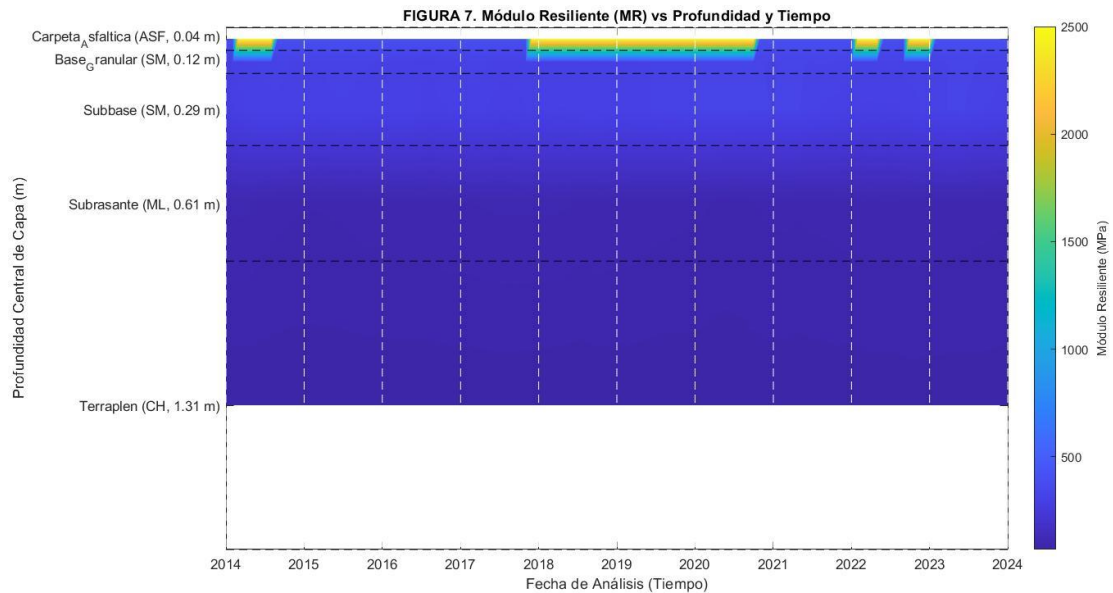


Figura 8.69. Módulo de resiliencia Vs Profundidad y Tiempo

En la Figura 8.69 se observa la evolución del módulo resiliencia (MR) con la profundidad y el tiempo, evidenciando el efecto combinado de las condiciones climáticas sobre cada una de las capas del pavimento. El modelo muestra que las capas superficiales (principalmente la carpeta asfáltica y la base granular) presentan mayores variaciones en el MR debido a su sensibilidad frente a los cambios térmicos y de humedad estacional. Estas variaciones son coherentes con los ciclos anuales representados por el índice de Thornthwaite, lo que demuestra que el modelo captura correctamente la respuesta climática del sistema. En contraste, las capas más profundas (subbase, subrasante y terraplén) mantienen valores relativamente estables de MR a lo largo del tiempo, lo que indica una atenuación de los efectos climáticos con la profundidad y una mayor

estabilidad estructural del sistema suelo-pavimento. Se aprecia además que los valores máximos del MR, cercanos a 2500 MPa, corresponden a la carpeta asfáltica, mientras que las capas inferiores mantienen valores significativamente menores, en concordancia con su naturaleza granular o cohesiva.

En conjunto, la distribución temporal y vertical del MR demuestra que el modelo desarrollado reproduce de forma física y realista el comportamiento del pavimento frente a las variaciones climáticas. La respuesta simulada valida la coherencia entre los cambios en el índice de Thornthwaite y la rigidez estructural de las capas, confirmando que la influencia ambiental se concentra principalmente en los primeros centímetros del sistema.

8. Conclusiones.

- La presente investigación tuvo como objetivo general desarrollar un modelo integral para estimar el módulo de resiliencia (M_r) en suelos no saturados, incorporando de manera simultánea variables climáticas, hidráulicas y mecánicas bajo un enfoque empírico-mecanicista estructurado. A partir del desarrollo teórico, la implementación computacional y la validación estadística realizada, se concluye que el objetivo general fue plenamente cumplido.
- Los objetivos específicos planteados fueron alcanzados de manera satisfactoria. En primer lugar, se logró establecer una relación funcional entre el Índice de Thornthwaite (IT) y el contenido de humedad del suelo, permitiendo traducir condiciones climáticas regionales en variaciones hidráulicas internas. En segundo lugar, se vinculó el contenido de humedad con la succión matricial mediante la ecuación de Van Genuchten, representando dicha relación a través de curvas sigmoidales que capturan adecuadamente la transición entre estados secos y saturados. En tercer lugar, se integró el grado de saturación dentro de la formulación mecánica del modelo, incorporando además los efectos del esfuerzo desviador (σ_d) y del esfuerzo confinante (σ_3). Finalmente, el modelo fue implementado y validado mediante herramientas computacionales, utilizando datos registrados entre 2014 y 2024 en la pista experimental del Instituto Mexicano del Transporte.
- Cada uno de estos objetivos se cumplió mediante la construcción de una cadena funcional coherente que integra clima, hidráulica y mecánica bajo la secuencia:
 - Clima (IT) $\rightarrow$ Contenido de humedad (θ) $\rightarrow$ Succión (ψ) $\rightarrow$ Grado de saturación (S_r) $\rightarrow$ Módulo de resiliencia (M_r).

- La hipótesis planteada establecía que la incorporación explícita del Índice de Thornthwaite y de la succión matricial dentro de un modelo empírico–mecanicista estructurado permitiría mejorar la estabilidad numérica, la coherencia física y la capacidad predictiva del módulo de resiliencia en comparación con modelos puramente empíricos. Con base en los resultados obtenidos, se confirma que la hipótesis fue cumplida.
- La mejora del modelo se logró al sustituir regresiones directas aisladas por una estructura integrada donde los efectos climáticos y mecánicos fueron desacoplados y posteriormente articulados mediante variables intermedias físicamente significativas. Esta transición permitió eliminar inconsistencias observadas en formulaciones preliminares, reducir comportamientos no físicos bajo condiciones extremas y garantizar que el M_r permaneciera dentro de límites razonables para cada tipo de suelo.
- El estudio se fundamentó en información hidrológica correspondiente al periodo 2014–2024, recopilada en la pista experimental del Instituto Mexicano del Transporte, considerando suelos representativos de comportamiento arcilloso (CH), limo arenoso (ML) y una arena limosa (SM). Esta base permitió analizar la interacción entre la variabilidad climática regional y la respuesta mecánica del suelo bajo diferentes estados de humedad y condiciones de confinamiento.
- La incorporación del Índice de Thornthwaite (IT) como variable climática sustituta permitió traducir condiciones atmosféricas regionales en variaciones hidráulicas internas del suelo. La relación no lineal entre succión y contenido de humedad fue modelada mediante curvas sigmoidales derivadas de la ecuación de Van Genuchten, lo cual permitió capturar de manera progresiva la transición entre estados secos, intermedios y saturados. Esta formulación evitó discontinuidades matemáticas, redujo inestabilidades numéricas y mejoró la fidelidad física del modelo en condiciones límite.
- La mejora más significativa respecto a los modelos preliminares radicó en la transición desde ecuaciones de regresión puramente empíricas hacia un modelo estructurado empírico–mecanicista. En versiones iniciales, las correlaciones directas entre M_r y variables climáticas generaban dispersiones elevadas y comportamientos no físicos bajo condiciones extremas. Al integrar explícitamente la succión y el grado de saturación como variables intermedias, se logró desacoplar los efectos climáticos

de los mecánicos, garantizando que el M_r permaneciera dentro de límites físicamente razonables para cada tipo de suelo.

- Dentro del desarrollo del modelo se realizaron diversos análisis de sensibilidad con el objetivo de evaluar la estabilidad, robustez y jerarquía de influencia de los parámetros involucrados. Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad local variando individualmente los parámetros principales del modelo, particularmente el coeficiente de pendiente sigmoideal (k) y el parámetro de referencia IT_0 , observando su efecto directo sobre la variación del módulo de resiliencia (M_r). Asimismo, se implementó un análisis tipo tornado para comparar de manera gráfica y cuantitativa la magnitud del impacto relativo de cada parámetro sobre el error del modelo (RMSE) y sobre los valores finales de M_r , confirmando que el parámetro k ejerce mayor influencia que IT_0 en los tres tipos de suelo evaluados.
- Esta optimización produjo mejoras claras en la estabilidad y consistencia de los resultados. En suelos arcillosos (CH), el modelo ajustado permitió estabilizar los valores mínimos bajo sequía extrema ($IT \approx -61$), obteniendo un M_r aproximado de 10.21 MPa bajo bajos esfuerzos, evitando valores irreales inferiores observados en formulaciones preliminares. En condiciones cercanas al equilibrio hídrico ($IT \approx 0$), el M_r alcanzó valores de hasta 139.59 MPa, mostrando coherencia con la mayor rigidez esperada en estados parcialmente saturados.
- En suelos limosos (ML), el modelo mejorado permitió capturar adecuadamente la alta sensibilidad hidráulica del material. Bajo condiciones secas y elevados esfuerzos confinantes, se alcanzaron valores máximos de 2471.20 MPa, mientras que en escenarios de humedad elevada ($IT \approx 72.59$) el M_r descendió hasta aproximadamente 2.86 MPa. Esta variabilidad extrema fue representada sin generar discontinuidades, evidenciando que la integración de la función sigmoideal mejoró significativamente la continuidad de la curva M_r - IT y redujo la dispersión observada en el modelo inicial.
- En el caso de suelos arenosos (SM), los resultados confirmaron una menor dependencia respecto a variaciones climáticas. Incluso bajo condiciones de IT negativo extremo, el M_r se mantuvo cercano a 151.49 MPa, y durante episodios de humedad excesiva no se registraron reducciones críticas comparables a las observadas en suelos finos. Este comportamiento es consistente con la menor influencia de la succión en materiales granulares y valida la coherencia física del modelo propuesto.

- El análisis de eventos extremos permitió corroborar tendencias generales del sistema. Se confirmó que valores intermedios del IT favorecen mayores valores de Mr, mientras que condiciones muy secas o excesivamente húmedas generan reducciones significativas en suelos finos. Asimismo, se observó que, para un mismo IT, el incremento del esfuerzo confinante (σ_3) incrementa sistemáticamente el Mr, efecto más pronunciado en materiales granulares que en cohesivos bajo condiciones críticas de humedad.
- Desde el punto de vista computacional, la implementación en MATLAB permitió automatizar el cálculo del Mr para múltiples escenarios climáticos y mecánicos, generar curvas sigmoidales dinámicas, realizar análisis de sensibilidad paramétrica y controlar problemas numéricos asociados a valores complejos o extrapolaciones fuera de rango. La capacidad de ajustar visualizaciones hasta rangos de 2500 MPa permitió representar adecuadamente los máximos obtenidos en suelos limosos bajo alto confinamiento, mejorando la interpretación gráfica del comportamiento del modelo.
- La validación estadística realizada en Minitab, mediante regresiones multivariantes y análisis de correlación, confirmó que la versión estructurada del modelo presentó mejor ajuste respecto a la formulación empírica inicial, mostrando menor dispersión residual y mayor coherencia entre valores experimentales y predichos. La combinación de ambas herramientas fortaleció la reproducibilidad, robustez y trazabilidad del sistema desarrollado.
- Es importante reconocer que el análisis enfrentó limitaciones asociadas a la disponibilidad y continuidad de datos climáticos, particularmente en periodos coincidentes con contextos operativos nacionales que afectan la actualización sistemática de registros. Asimismo, el modelado de la carpeta asfáltica no alcanzó la misma consistencia debido a la ausencia de datos reales detallados del diseño estructural, por lo que dicha parte debe interpretarse como exploratoria y fuera del alcance central del estudio.
- En términos científicos, el principal aporte de esta investigación radica en la formalización de un modelo integral que combina variables climáticas, hidráulicas y mecánicas dentro de una estructura matemática coherente y reproducible. Este enfoque supera la limitación de modelos puramente empíricos y se alinea con filosofías de diseño mecanicista como las promovidas por AASHTO, permitiendo incorporar variabilidad climática dentro del análisis estructural del pavimento.

9. Bibliografía

- Abdollahi, M., & Farshid Vahedifard. (2022). Modeling Resilient Modulus of Unsaturated Subgrade Soils under Concurrent Changes in Water Content and Temperature. *Geo-Congress* 2019, 374–384. <https://doi.org/10.1061/9780784484036.037>
- Aitchison, G. D., & Richards, B. G. (1965). A Broad Scale Study of Moisture Conditions in Pavement Subgrades throughout Australia – Factors in Planning a Regional Study of Moisture Variation in Pavement Subgrades. *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath Covered Areas, a Symposium in Print, Australia Butterworths*, pp.184-190.
- Aitchison, G. D., & Richards., B. G. (1965a). A Broad Scale Study of Moisture Conditions in Pavement Subgrades throughout Australia – Techniques Adopted for the Measurements of Moisture Variables. *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath Covered Areas, a Symposium in Print, Australia Butterworths*, pp. 191 - 204.
- Aitchison, G. D., & Richards., B. G. (1965b). A Broad Scale Study of Moisture Conditions in Pavement Subgrades throughout Australia – The Selection of Design Values for Soil Suction Equilibria and Soil Suction Changes in Pavement Subgrades. *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath Covered Areas, a Symposium in Print, Australia Butterworths*, pp. 226-232.
- Aitchison, G. D., & Richards., B. G. (1965c). Broad Scale Study of Moisture Conditions in Pavement Subgrades throughout Australia – Field Studies. *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath Covered Areas, a Symposium in Print, Australia Butterworths*, pp. 205-225.
- Akhtar, M. N., Sulong, A. B., Radzi, M. K. F., Ismail, N. F., Raza, M. R., Muhamad, N., & Khan, M. A. (2016). Influence of alkaline treatment and fiber loading on the physical and mechanical properties of kenaf/polypropylene composites for variety of applications. *Progress in Natural Science: Materials International*, 26(6), 657–664. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2016.12.004>
- ASALE, R. -, & RAE. (2024). *resiliencia | Diccionario de la lengua española*. “Diccionario de La Lengua Española” - Edición Del Tricentenario. <https://dle.rae.es/resiliencia>
- Auckpath Sawangsuriya, Edil, T. B., & Bosscher, P. J. (2009). Modulus-Suction-Moisture Relationship for Compacted Soils in Postcompaction State. *Can*

- Geotech J*, 135(10), 1390–1403. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000108](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000108)
- Bandyopadhyay, S. S., & Frantzen, J. A. (1983). INVESTIGATION OF MOISTURE-INDUCED VARIATION IN SUBGRADE MODULUS BY CROSS-CORRELATION METHOD. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 945(0361-1981), 10–15. <https://doi.org/0361-1981>
- Barbosa, J., Ribeiro, L., & Gilson. (2020). Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. *Engineering Geology*, 270, 105580–105580. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105580>
- Barbour , S. L., Fredlund, D. G., Gan, J. K-M., & Wilson , G. W. (1996). Prediction of Moisture Movement in Highway Subgrade Soils. *Proceedings of the 45th Canadian Geotechnical Conference: Innovation, Conservation, and Rehabilitation, Paper N° 41A*, pp. 41A-1 - 41A-13.
- Barksdale, R. D. (1975). Test Procedures for Characterizing Dynamic Stress-Strain Properties of Pavement Materials. *Transportation Research , Special Report 162*(0-309-02468-4).
- Basma, A. A., & Al-Suleiman, T. I. (1991). Climatic Considerations in New AASHTO Flexible Pavement Design. *Journal of Transportation Engineering*, 117(2), 210–223. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(1991\)117:2\(210\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(1991)117:2(210))
- Bishop, A. W. (1959). The Principle of Effective Stress. *Tecknisk Ukeflad*, 39, 859–863.
- Brown , S. F., & Pappin, J. W. (1981). ANALYSIS OF PAVEMENTS WITH GRANULAR BASES. *Transportation Research Board*, 810(1), 17–23. <https://doi.org/0361-1981>
- Brown, S. F. (1996). Soil mechanics in pavement engineering. *Géotechnique*, 46(3), 383–426. <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.3.383>
- Cary, C. E., & Zapata, C. E. (2012). Modelo de predicción del módulo resiliente para suelos no saturados. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes E Infraestructura Civil*, 12(1).
- Christopher, B. R., Schwartz, C. W., & Boudreaux, R. R. (2006). Geotechnical Aspects of Pavements. *Office of Infrastructure Research and Development*.
- Chu, X. (2020). A Review on the Resilient Response of Unsaturated Subgrade Soils. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/7367484>

- Climate Change Affects Road Network in Mexico*. (2018, March 21). Caf.com.
<https://www.caf.com/en/currently/news/climate-change-affects-road-network-in-mexico/>
- Coleman , J. D. (1965). Geology, Climate and Vegetation as Factors Affecting Soil Moisture. Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath Covered Areas. *A Symposium in Print, Australia Butterworths*, pp. 93 - 99.
- CONAGUA. (2025). *Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia*. Smn.conagua.gob.mx.<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- Cui, B., & Wang, H. (2024). Predicting Asphalt Pavement Deterioration Under Climate Change Uncertainty Using Bayesian Neural Network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1, 1–13.
<https://doi.org/10.1109/tits.2024.3505237>
- De Bruijn , C. M. A. (1965a). Annual Redistribution of Soil Moisture Suction and Soil Moisture Density beneath Two Different Surface Covers and the Associated Heaves at the Onderstepoort Test Site near Pretoria. *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath Covered Areas, a Symposium in Print, Australia Butterworths*, pp. 122 - 134.
- De Bruijn , C. M. A. (1965b). Some Observations on Soil Moisture beneath and Adjacent to Tarred Roads and Other Surface Treatments in South Africa. *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath Covered Areas, a Symposium in Print, Australia Butterworths*, pp.135-142.
- Doucet F, & Doré G. (2004). Resilient modulus and resilient Poisson coefficient of the C-LTTP granular materials. In: *Proceedings of the Annual Conference of the Canadian Geotechnical Society*. Canadian Geotechnical Society, Quebec City, Que.
- Drnevich, V., Leshchinsky, D., & Rawlings, D. (1988). Stress Path and Permanent Deformations in Sand Subjected to Repeated Load. *Geotechnical Testing Journal*, 11(1), 36. <https://doi.org/10.1520/gtj10642j>
- Eigenbrod, K. D., & G. J. A. Kennepohl. (1996). Moisture Accumulation and Pore Water Pressures at Base of Pavements. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1546(1), 151–161.
<https://doi.org/10.1177/0361198196154600117>

- Equation for SWCC | *Unsaturated Soil Mechanics for Sustainable Urban Living*. (2016).
Ntu.edu.sg. https://blogs.ntu.edu.sg/usmsul/soil-water-characteristic-curve/equation-for-swcc/?utm_source
- Feng, S., Ibraim, E., & Vardanega, P. J. (2023). Hydraulic conductivity of fine-grained soils subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 213, 103902. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103902>
- FONDEM . (2018). *Recursos destinados a desastres por Estado - Gobernación*.
Gobernacion.gob.mx.
[http://www.gobernacion.gob.mx/es/SEGOB/Recursos destinados a desastres p
or Estado#:~:text=%2D03%2DXII%2D2010\)%2C%20el%20Fondo%20de%20
Desastres%20Naturales%20\(FONDEN\)](http://www.gobernacion.gob.mx/es/SEGOB/Recursos_destinados_a_desastres_por_estado#:~:text=%2D03%2DXII%2D2010)%2C%20el%20Fondo%20de%20Desastres%20Naturales%20(FONDEN))
- Fredlund, D. G., & H Rahardjo. (1987). SOIL MECHANICS PRINCIPLES FOR
HIGHWAY ENGINEERING IN ARID REGIONS. *Transportation Research
Record Journal of the Transportation Research Board*, 1137.
- Fredlund, D. G., & Morgenstern, N. R. (1977). Stress State Variables for Unsaturated
Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(5), 447–466.
<https://doi.org/10.1061/ajgeb6.0000423>
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John
Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>
- Garnica Anguas , P., & Hernández Domínguez, R. (2013). Manual de Usuario IMT PAVE
1.1. *Instituto Mexicano Del Transporte , Documento Técnica No.53(0188-7297)*.
- Garnica Anguas, P., & Correa, A. (2004). CONCEPTOS MECANICISTAS EN
PAVIMENTOS . *Instituto Mexicano Del Transporte , Publicación Técnica
No.258(0188-7297)*.
- Gonzáles Salazar, A., Loza Ramírez, L., Quezada Chico, G., & Torres Leos, R. (2022).
La clasificación climática de Thornthwaite y su aplicación en la cuenca de
Cajititlán, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. *REVISTAESTUDIOSDELACIENEGA*,
2, 65–24.
- Google Earth. (2025). Google.com.
<https://earth.google.com/web/search/Mexican+Institute+of+Transportation>
- Google Maps. (2019). Google Maps. Google Maps.
[https://www.google.com/maps/place/Pistas+de+pruebas+del+CeNIT+para+la+s
eguridad+vehicular+IMT+-+SICT/@20.4938957](https://www.google.com/maps/place/Pistas+de+pruebas+del+CeNIT+para+la+s+eguridad+vehicular+IMT+-+SICT/@20.4938957)

- Gupta, S. C., Andry Ranaivoson, Edil, T. B., Benson, C. H., & Auckpath Sawangsuriya. (2007). *Pavement Design Using Unsaturated Soil Technology*.
- Hosseini, F., Nasimifar, M., Sivanesarwan, N., & Golalipour, A. (2024). Mutual impacts of changing climate and flexible pavement performance considering resilience and sustainable aspects. *Journal of Cleaner Production*, 460, 142594. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142594>
- Houston, M., W. N., Mirza, W., & Zapata, C. E. (2006). Environmental Effects in Pavement Mix and Structural Design Systems. In *Transportation Research Board eBooks*. <https://doi.org/10.17226/23244>
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement analysis and design* (2nd ed.). Prentice Hall ; London.
- Hveem, F. N., Zube, E., Bridges, R., & Forsyth, R. (1962). THE EFFECT OF RESILIENCE-DEFLECTION RELATIONSHIP ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALTIC PAVEMENTS. *Asphalt Concrete Pavements; Deflection; Pavement Performance; Resilience (Materials); Structural Design*, 203(1).
- Instituto Nacional De Vías. (2008). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito. Segunda Versión 2018*. Ministerio De Transporte. Instituto Nacional De Vías.
- Instituto Nacional de Vías , I. (2018). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos volúmenes de transito, Segunda Versión 2018* (2nd ed.). Editorial Universidad del Cauca , Gobierno de Colombia .
- Janssen, D. J., & Dempsey, B. J. (1986). THE EFFECT OF AC OVERLAYS ON D-CRACKING IN PCC PAVEMENTS. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1062.
- Kern, C., Ying, W., & Washington Peres Núñez. (2021). Analysis of the resilience modulus of a subgrade soil front of humidity variations. *MATEC Web of Conferences*, 337, 03013–03013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133703013>
- Khoury, N. N., & Zaman, M. M. (2004). Correlation Between Resilient Modulus, Moisture Variation, and Soil Suction for Subgrade Soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1874(1), 99–107. <https://doi.org/10.3141/1874-11>
- Kim, S., Ceylan, H., Ma, D., & Gopalakrishnan, K. (2014). Calibration of Pavement ME Design and Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide Performance

- Prediction Models for Iowa Pavement Systems. *Journal of Transportation Engineering*, 140(10), 04014052. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000704](https://doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000704)
- Klemunes Jr., J. A. (1995). *Determining Soil Volumetric Moisture Using Time Domain Reflectometry* [MS Thesis].
- Larson, G., & Dempsey, B. J. (1997). Enhanced Integrated Climatic Model Version 2.0. In *Department of Civil and Environmental Engineering*. <http://hdl.handle.net/2142/95718>
- Li, Q. J., Mills, L., McNeil, S., & Attoh-Okine, N. O. (2013). Integrating potential climate change into the mechanistic–empirical based pavement design. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(12), 1173–1183. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0465>
- Liang, R. Y., Rabab'ah, S., & Khasawneh, M. (2008). Predicting Moisture-Dependent Resilient Modulus of Cohesive Soils Using Soil Suction Concept. *Journal of Transportation Engineering*, 134(1), 34–40. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2008\)134:1\(34\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2008)134:1(34))
- McVay, M., & Yongyuth Taesiri. (1985). Cyclic Behavior of Pavement Base Materials. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(1), 1–17. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1985\)111:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1985)111:1(1))
- Md Rajibul Karim, Bikash Devkota, Md Mizanur Rahman, & Khoi, B. (2023). Thornthwaite moisture index and depth of suction change under current and future climate – An Australian study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering/Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(1674-7755). <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.09.009>
- Mendoza Sánchez, J. F., Alonso Guzmán, E. M., Soto Espita, R., Martínez Molina, W., & Chávez García, H. L. (2023). Influencia del clima en los métodos de diseño de pavimentos flexibles. *Instituto Mexicano Del Transporte, Publicación Técnica No.744*(0188-7297).
- Mendoza Sanchez, J. F., Alonso Guzman, E. M., Martinez Molina, W., Chavez Garcia, H. L., Soto Espita, R., Delgado Alamilla, H., & Obregon Biosca, S. A. (2024). A Critical Review of Pavement Design Methods Based on a Climate Approach. *Sustainability* 2024, 16(7211). 16, 7211. <https://doi.org/10.3390/su16167211>
- Mendoza Sánchez, J. F., & Marcos Palomares, O. A. (2017). PANORAMA INTERNACIONAL DE LA ADAPTACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA

- CARRETERA ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO. *Instituto Mexicano Del Transporte , Publicación Técnica No.488*(0188-7297).
- Mendoza Sánchez, J. F., Marcos Palomares, O. A., Mobayed Vega, N. J., & Orantes Olvera, H. (2017). EL CLIMA Y LAS CARRETERAS EN MÉXICO. *Instituto Mexicano Del Transporte , Publicación Técnica No.498*(0188-7297).
- Michael, & Philp, M. L. (2015). Beyond agriculture: A review of the Thornthwaite Moisture Index with respect to road pavements and other infrastructure applications. *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(6), 528–540. <https://doi.org/10.1080/15568318.2014.997408>
- Moossazadeh, J., & Witczak, M. W. (1981). PREDICTION OF SUBGRADE MODULI FOR SOIL THAT EXHIBITS NONLINEAR BEHAVIOR. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 810.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES- NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING. (1974). *AASHTO interim guide for design of pavement structures*.
- National Cooperative Highway Research Program. (2002). *Summary of Progress - National Cooperative Highway Research Program*.
- Nazarian, S., & Yuan, D. (2008). Variation in Moduli of Base and Subgrade with Moisture. *GeoCongress 2008*. [https://doi.org/10.1061/40971\(310\)71](https://doi.org/10.1061/40971(310)71)
- Pereira, L. S., Raes, Di., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Water Resources, Development and Management Service .
- Pérez García, N., Garnica Anguas, P., Gonzáles Rufino , J. L., Curiel Iñiguez, N. P. C. I., & Ruiz Sanginez, M. J. (2016). Modelo para estimar el modulo de resiliencia de suelos finos compactados en la condición optima de compactación. *Instituto Mexicano Del Transporte , Publicación Técnica No.475*(0188-7297).
- Pérez García, N., Garnica Anguas, P., & Mestas Martínez , N. (2016). EL MÓDULO DE RESILIENCIA: Cómo fluctúa después de la construcción del pavimento y cómo estimar estas fluctuaciones. *Instituto Mexicano Del Transporte , Publicación Técnica No.478*(0188-7297).
- Pérez García, N., Garnica Anguas, P., Nute Vargas, H., & Gudiño Espino, M. (2012). Evaluación del módulo de resiliencia, en trayectorias de humedecimiento y secado . *Instituto Mexicano Del Transporte, Publicación Técnica , 0188-7297*.

- Pérez García, N., Garnica Anguas, P., & Pola Velázquez, J. C. (2013). *Predicción de la curva característica con el modelo de proporcionalidad natural*, *Publicación Técnica N° 361* (pp. 33–35). Instituto Mexicano del Transporte .
- Perreira, A. B., & F. Gonçalves, R. F. (2000). The Influence Of Moisture Content And Soil Suction On The Resilient Modulus Of A Lateritic Subgrade Soil. *ISRM International Symposium, Melbourne, Australia, ISRM-IS-2000-397*.
- Qiao, Y., Flintsch, G. W., Dawson, A. R., & Parry, T. (2013). Examining Effects of Climatic Factors on Flexible Pavement Performance and Service Life. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2349(1), 100–107. <https://doi.org/10.3141/2349-12>
- Ramirez Granados, P. (2011). Elementos de cartografía matemática y su aplicación en la elaboración de las cartas geográficas. *Revista Geográfica de América Central* , 46, 15–36.
- Richards, B. G. (1965a). An Analysis of Subgrade Conditions at the Horsham Experiment Road Site using the Two-Dimensional Diffusion Equation on a High-speed Digital Computer. *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath Covered Areas, a Symposium in Print, Australia Butterworths*, pp. 243 - 258.
- Richards, B. G. (1965b). Measurement of the Free Energy of Soil Moisture by the Psychrometric Technique Using Thermistors. *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath Covered Areas, a Symposium in Print, Australia Butterworths*, P.P. 39-46.
- Rosenbalm, D. (2011). *Reliability Associated with the Estimation of Soil Resilient Modulus at Different Hierarchical Levels of Pavement Design*. Arizona State University .
- Russam , K. (1965). The Prediction of Subgrade Moisture Conditions for Design Purposes. *Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils beneath Covered Areas, a Symposium in Print, Australia Butterworths*, pp. 233 - 236.
- Russam, K., & Coleman, J. D. (1961). The Effect of Climatic Factors on Subgrade Moisture Conditions. *Géotechnique*, 11(1), 22–28. <https://doi.org/10.1680/geot.1961.11.1.22>
- S.C.T., S. de C. y T. (2003, November 12). *SCT M-MMP-1-02/03 SUELOS Y MATERIALES PARA TERRACERIA* .
- Seed, H. B., Chan, C. K., & Lee, C. E. (1962). RESILIENCE CHARACTERISTICS OF SUBGRADE SOILS AND THEIR RELATION TO FATIGUE FAILURES IN

- ASPHALT PAVEMENTS. *The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, 00822982, 77–113.
- Sharanya, A. G., Lal, M. H., & Kurre, P. (2019). Resilient Modulus of Unsaturated Soil – A Comprehensive Review. *Learning and Analytics in Intelligent Systems*, 141–148. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24314-2_19
- SICT. (2023, May 15). *Resumen boletines - Instituto Mexicano del Transporte*. Imt.mx. <https://imt.mx/resumenboletines.html?IdArticulo=427&IdBoletin=159#:~:text=El%20IMT%20PAVE%20es%20una>
- Smettem, K. R. J., & Gregory, P. J. (1996). The Relation Between Soil Water Retention and Particle Size Distribution Parameters for Some Predominantly Sandy Western Australian Soils. *Australian Journal of Soil Research*, Volume 5, N°38, pp. 695 - 708.
- SMN. (2025). *Servicio Meteorológico Nacional | Gobierno | gob.mx*. Wwww.gob.mx. <https://www.gob.mx/smn>
- Soderman, L. G., Kim, Y. D., & Milligan. (1968). FIELD AND LABORATORY STUDIES OF MODULUS OF ELASTICITY OF A CLAY TILL. *Highway Research Record*, 243(243).
- Stern, N. (2006). The Stern review report on the economics of climate change. In *ESRC Centre for Climate Change Economics and Policy and the Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment at the London School of Economics and Political Science* (1st ed., Issues 0-521-70080-9). Cambridge University.
- Stewart, H. E. (1986). Permanent Strains from Cyclic Variable-Amplitude Loadings. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(6), 646–660. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1986\)112:6\(646\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1986)112:6(646))
- Steyn, W. J., Wang, Z., & Holleran, G. (2021). *Transportation infrastructure engineering, materials, behavior and performance : proceedings of the 6th GeoChina International Conference on Civil & Transportation Infrastructures: From Engineering to Smart & Green Life Cycle Solutions -- Nanchang, China, 2021*. Springer.
- Thompson, M. R., & Robnett, Q. L. (1976). *Resilient Properties of Subgrade Soils*.
- THORNTHWAITE, C. W. (1948). An Approach Toward a Rational Classification of Climate. *Soil Science*, 66(1), 77. <https://doi.org/10.1097/00010694-194807000-00007>

- Titus-Glover, L., Darter, M., Rao, C., & Mallela, J. (2025). Restoration of Concrete Pavement Using the NCHRP 1-37A Design Guide. *Proceedings of the International Conference on Concrete Pavements*. <https://doi.org/10.33593/iccp.v8i1.595>
- Tran, T. P. A., & Fredlund, D. G. (2021). Verification of the Fredlund (2019) Unsaturated Shear Strength Function. *Geosciences*, 11(4), 151. <https://doi.org/10.3390/geosciences11040151>
- UNDRR, & UNDRR - LA RED. (2015). *United Nations DesInventar Open Source Initiative - Official Website*. Desinventar.net. <https://www.desinventar.net/>
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- W, T. C. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Witczak M.W., & Uzan J. (1988). *The Universal Airport Design System, Report I of IV: Granular Material Characterization*. Department of Civil Engineering, University of Maryland, College Park, Maryland.
- Witczak MW, Andrei D , & Houston WN. (2000). *Resilient modulus as function of soil moisture – summary of predictive models*. Development of the 2002 guide for the development of new and rehabilitated pavement structures, NCHRP 1-37 A, Inter team technical report (seasonal 1).
- Yang, S.-R., Huang, W.-H., & Tai, Y.-T. (2005). Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils. *Transportation Research Record*, 1913, 99–106. <https://doi.org/10.3141/1913-10>
- Zapata, C. E., Andrei, D., Witczak, M. W., & Houston, W. N. (2007). Incorporation of Environmental Effects in Pavement Design. *Road Materials and Pavement Design*, 8(4), 667–693. <https://doi.org/10.1080/14680629.2007.9690094>
- Zapata, C. E., & Houston, W. N. (2008). *Calibration and Validation of the Enhanced Integrated Climatic Model for Pavement Design*.
- Zapata, C., & Cary, C. (2009). A New Generation of Resilient Modulus Characterization of Unbound Materials. *Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support, Geotechnical Special , Publication 187*, 377–384. [https://doi.org/10.1061/41023\(337\)48](https://doi.org/10.1061/41023(337)48)

**ANEXO I: CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECÍMENES ANTES Y DESPUÉS
DE SER ENSAYADOS Y MÓDULOS DE RESILIENCIA DE CADA SUELO.**

Características de los especímenes después de haber sido compactados (Arcilla CH)

N°	Proceso	d(cm)	h (cm)	Peso (g)	W(%)	Ym(kN/m2)	Yd(kN/m3)	Sr (%)	θ (%)
141	2 días de secado	7.073	14.351	964.34	32.7	16.777	12.643	0.839	0.421
143	2 días de secado	7.62	14.367	972.36	32.6	16.951	12.783	0.855	0.425
136	5 días de secado	7.076	14.354	972.35	32.6	16.899	12.744	0.85	0.424
138	5 días de secado	7.086	14.353	961.83	33.1	16.67	12.524	0.833	0.423
130	10 días de secado	7.093	14.375	970.24	32.7	16.757	12.628	0.837	0.421
131	10 días de secado	7.099	14.371	969.78	32.7	16.725	12.604	0.834	0.42
125	20 días de secado	7.093	14.356	970.77	33.9	16.788	12.538	0.855	0.433
126	20 días de secado	7.088	14.245	967.44	33.7	16.767	12.541	0.851	0.431
181	1 día de humedecimiento	7.059	14.361	962.5	33.3	16.80	12.603	0.849	0.428
182	1 día de humedecimiento	7.078	14.37	961.98	32.9	16.69	12.559	0.833	0.421
178	5 día de humedecimiento	7.083	14.359	968.22	33.1	16.788	12.613	0.845	0.426
179	5 día de humedecimiento	7.074	14.373	965.47	33.3	16.766	12.578	0.846	0.427
174	7 día de humedecimiento	7.081	14.356	969.63	32.1	16.825	12.641	0.849	0.427
176	7 día de humedecimiento	7.073	14.371	965.18	33.0	16.768	12.608	0.842	0.424
169	10 día de humedecimiento	7.071	14.337	971.91	32.0	16.935	12.83	0.845	0.418
171	10 día de humedecimiento	7.061	14.347	968.63	31.6	16.914	12.852	0.838	0.414
165	20 día de humedecimiento	7.084	14.348	968.51	32.9	16.801	12.642	0.844	0.424
166	20 día de humedecimiento	7.066	14.357	968.42	32.9	16.874	12.697	0.851	0.426
132	30 día de humedecimiento	7.077	14.369	962.48	32.6	16.705	12.598	0.83	0.419
133	30 día de humedecimiento	7.085	14.359	972.49	32.8	16.852	12.69	0.848	0.424
134	30 día de humedecimiento	7.089	14.368	971.79	32.9	16.811	12.649	0.845	0.424
115	En el óptimo	7.087	14.383	966.53	32.3	16.712	12.632	0.827	0.416
116	En el óptimo	7.099	14.375	966.25	32.9	16.66	12.535	0.83	0.42

Nota: El significado de los símbolos de la tabla son: d = Diámetro, h = Altura, w = contenido de agua, Ym = peso volumétrico de la muestra, Yd = peso volumétrico seco, Sr = Grado de saturación y θ= contenido de agua volumétrico.

Características de los especímenes antes de ser ensayados (Arcilla CH)

N°	d(cm)	h (cm)	Peso (g)	W (%)	Yd(kN/m3)	Sr (%)	θ (%)	Ψ kPa	(w-wopt) %	(Sr-Sropt) %	(Ψ-Ψopt) kPa	(θ-θopt) kPa
141	6.967	14.149	934.55	28.3	13.25	79.85	38.2	200	-4.7	-3	60	-3.6
143	6.995	14.168	946.91	28.7	13.26	81.09	38.8	180	-4.3	-1.7	40	-3
136	7.037	14.287	960.91	30.3	13.02	82.47	40.2	150	-2.7	-0.4	10	-1.6
138	7.037	14.287	948.34	29.8	12.89	79.58	39.2	190	-3.2	-3.3	50	-2.6
130	7.045	14.265	956.13	30.8	12.89	82.22	40.5	150	-2.2	-0.6	10	-1.3
131	7.054	14.23	953.7	30.4	12.9	81.22	40	170	-2.6	-1.6	30	-1.8
125	6.948	13.992	932.37	28.5	13.42	82.59	39	140	-4.5	-0.2	0	-2.8
126	6.969	14.094	937.44	29.5	13.21	82.73	39.7	140	-3.5	-0.1	0	-2.1
181	7.149	14.557	980.91	35.3	12.17	84.07	43.8	120	2.3	1.2	-20	2
182	7.144	14.535	977.46	35.18	12.17	83.83	43.7	130	2.2	1	-10	1.9
178	7.181	14.657	993.05	36.2	12.05	84.57	44.5	110	3.2	1.7	-30	2.7
179	7.152	14.614	986.22	35.78	12.14	84.74	44.3	110	2.78	1.9	-30	2.5
174	7.214	14.777	1009.2	37.96	11.88	86.36	46	90	4.96	3.5	-50	4.2
176	7.19	14.655	994.77	36.35	12.03	84.64	44.6	120	3.35	1.8	-20	2.8
169	7.222	14.714	1012.31	37.95	11.94	87.18	46.2	70	4.96	4.3	-70	4.4
171	7.212	14.716	1014.37	38.4	11.96	88.45	46.8	60	5.4	5.6	-80	5
165	7.287	14.98	1037.38	40.69	11.58	88.23	48	60	7.69	5.4	-80	6.2
166	7.254	14.889	1031.6	40.15	11.73	89.25	48	50	7.15	6.4	-90	6.2
132	7.314	15.077	1050.74	43.63	11.33	90.93	50.4	35	10.63	8.1	-105	8.6
133	7.331	15.051	1053.33	42.28	11.43	89.57	49.3	50	9.28	6.7	-90	7.5
134	7.29	14.999	1048.98	41.76	11.59	90.79	49.4	40	8.76	8	-100	7.6
115	7.087	14.383	966.53	32.3	12.63	82.71	41.6	140	-0.7	-0.1	0	-0.2
116	7.099	14.375	966.25	32.9	12.53	82.98	42	140	-0.1	0.1	0	0.2

Nota: El significado de los símbolos de la tabla son: Ψ = Succión mátrica, (w-wopt) = variación del contenido de agua con respecto al óptimo, (Sr-Sropt) = Variación del grado de saturación con respecto al óptimo, (Ψ-Ψopt) = Variación de la succión con respecto a la succión en la condición óptima y (θ-θopt) = Variación del contenido de agua volumétrico con respecto al que se tiene en la condición óptima.

Valores de módulo de resiliencia (Arcilla CH)

N°	σ3=14(kPa)				28(kPa)				41(kPa)				41(kPa)			
	σd= 27(kPa)	48	68	99	27	48	68	99	27	48	68	99	27	48	68	99
141	142	124	120	126	196	162	155	155	217	183	176	172	231	198	188	182
143	216	160	146	143	234	180	163	158	246	194	175	167	254	205	182	173
136	113	97	94	93	134	114	110	110	147	126	122	121	158	138	132	130
138	96	89	89	88	126	110	106	104	140	120	115	113	148	128	122	121
130	99	94	93	95	116	110	108	109	128	120	118	119	136	129	127	128
131	104	104	104	105	125	122	120	119	133	131	128	127	139	136	134	132
125	156	125	121	123	211	160	151	149	229	180	170	166	240	194	183	179
126	213	149	135	130	231	172	155	147	237	185	168	159	250	197	178	169
181	43	43	42	39	52	49	46	42	54	52	48	44	56	54	50	46
182	37	38	39	39	48	48	47	45	54	52	51	49	58	56	54	51
178	68	45	40	35	78	52	45	39	82	56	48	42	84	58	51	44
179	60	46	42	38	69	53	47	41	72	57	50	44	75	59	52	46
174	42	32	26	21	43	34	28	23	44	35	30	24	44	36	31	26
176	51	44	40	35	56	48	42	37	59	50	44	39	60	51	46	41
169	63	38	31	25	70	42	34	27	74	45	37	29	81	47	38	31
171	82	41	31	24	88	44	33	26	89	46	35	27	93	48	36	29
165	23	18	14	12	25	20	16	13	26	21	17	23	27	22	19	19
166	21	19	16	13	23	21	17	14	24	22	19	15	25	23	20	17
132	22	16	13	10	23	18	15	11	24	19	16	12	25	20	18	20
133	17	16	13	11	19	17	14	13	20	18	16	14	21	19	17	15
134	18	18	15	11	20	19	16	13	23	21	18	19	23	22	19	15
115	123	86	75	68	138	93	81	72	142	96	83	74	143	99	85	76
116	121	82	70	65	136	91	77	70	138	93	80	72	141	96	82	73

Nota: El significado de los símbolos de la tabla son: σ3 = Presión de confinamiento y σd = Esfuerzo desviador.

Características de los especímenes después de haber sido compactados (Limo de Baja Compresibilidad, ML)

N°	Proceso	d(cm)	h (cm)	Peso (g)	W (%)	Ym(kN/m2)	Yd(kN/m3)	Sr (%)	θ (%)
81	En el óptimo	7.093	14.387	979.94	30.71	16.91	12.94	78.08	40.49
82	En el óptimo	7.093	14.374	979.8	30.94	16.92	12.92	78.51	40.76
25	3 días de secado	7.07	14.417	984.47	32.53	17.06	12.88	81.94	42.69
26	3 días de secado	7.08	14.378	983.4	32.72	17.04	12.84	82	42.83
29	8 días de secado	7.076	14.405	984.53	30.97	17.05	13.02	79.69	41.09
32	15 días de secado	7.079	14.411	985.79	32.4	17.05	12.88	81.65	42.53
34	15 días de secado	7.059	14.412	982.05	32.14	17.08	12.92	81.58	42.34
35	15 días de secado	7.088	14.41	980.72	32.25	16.92	12.79	80.27	42.06
37	20 días de secado	7.078	14.383	984.85	31.76	17.07	12.96	80.98	41.94
38	20 días de secado	7.086	14.401	986.71	31.27	17.04	12.98	80.06	41.38
41	30 días de secado	7.07	14.415	980.65	32.2	16.99	12.85	80.92	42.2
43	30 días de secado	7.066	14.395	976.6	31.7	16.97	12.88	79.99	41.64
48	1 día de humedecimiento	7.078	14.398	980.57	31.21	16.97	12.94	79.39	41.17
49	1 día de humedecimiento	7.069	14.41	978.24	31.78	16.96	12.87	80.07	41.71
50	1 día de humedecimiento	7.076	14.398	979.87	31.05	16.97	12.95	79.15	41
51	1 día de humedecimiento	7.085	14.427	977.47	31.26	16.86	12.84	78.38	40.92
53	1.1 días de humedecimiento	7.076	14.413	980.73	31.12	16.97	12.94	79.22	41.07
54	1.1 días de humedecimiento	7.101	14.4	978.13	30.88	16.82	12.86	77.56	40.47
56	3 días de humedecimiento	7.077	14.412	979.16	30.74	16.94	12.96	78.42	40.61
57	3 días de humedecimiento	7.071	14.416	978.13	30.44	16.94	12.99	78.06	40.32
58	3 días de humedecimiento	7.084	14.438	981.69	30.49	16.92	12.97	77.89	40.31
61	7 días de humedecimiento	7.063	14.347	980.84	30.98	17.11	13.07	80.32	41.27
63	7 días de humedecimiento	7.061	14.406	980.24	29.7	17.05	13.14	77.86	39.79

Características de los especímenes antes de ser ensayados (Limo de Baja Compresibilidad, ML)

N°	d(cm)	h (cm)	Peso (g)	W (%)	Yd(k N/m3)	Sr (%)	θ (%)	Ψ kPa	(w-wopt) %	(Sr-Sropt) %	(Ψ-Ψopt) kPa	(θ-θopt) kPa
81	7.093	14.387	979.94	30.71	12.94	78.08	40.5	200	-1.29	-4.39	0	-0.151
82	7.093	14.374	979.8	30.94	12.92	78.51	40.76	200	-1.06	-3.96	0	0.112
25	7.063	14.375	972.6	30.87	12.94	78.57	40.73	200	-1.13	-3.89	0	0.084
26	7.076	14.385	975.7	31.04	12.91	78.62	40.86	200	-0.96	-3.84	0	0.206
29	7.039	14.339	961.74	27.8	13.23	73.83	37.49	300	-4.2	-8.64	100	-3.158
32	7.027	14.287	956.02	28.32	13.19	74.77	38.08	300	-3.68	-7.69	100	-2.57
34	7.032	14.234	955.28	28.78	13.16	75.68	38.62	300	-3.22	-6.78	100	-2.031
35	7.047	14.306	957.91	29.22	13.03	75.36	38.82	300	-2.78	-7.1	100	-1.83
37	7.016	14.268	945.72	26.38	13.31	70.88	35.78	500	-5.62	-11.58	300	-4.863
38	7.044	14.327	958.32	27.69	13.19	73.07	37.22	400	-4.31	-9.4	200	-3.429
41	7.018	14.267	940.98	26.2	13.25	69.83	35.39	550	-5.8	-12.64	350	-5.253
43	7.017	14.246	931.68	25.11	13.26	66.99	33.94	800	-6.89	-15.48	600	-6.708
48	7.124	14.463	1001.3	33.24	12.79	82.66	43.33	100	1.24	0.18	-100	2.682
49	7.118	14.475	999.3	33.73	12.72	83.11	43.75	100	1.73	0.64	-100	3.109
50	7.107	14.482	1001.4	33.19	12.84	83.16	43.43	90	1.19	0.69	-110	2.788
51	7.106	14.488	1000.9	33.08	12.84	82.91	43.3	100	1.08	0.44	-100	2.651
53	7.114	14.491	1005.0	33.07	12.86	83.16	43.36	90	1.07	0.69	-110	2.712
54	7.122	14.456	998.7	32.69	12.82	81.69	42.72	120	0.69	-0.78	-80	2.074
56	7.139	14.543	1021.8	35.09	12.74	86.73	45.59	45	3.09	4.26	-155	4.947
57	7.139	14.528	1020.0	34.94	12.75	86.41	45.42	50	2.94	3.94	-150	4.767
58	7.139	14.545	1020.0	34.57	12.77	85.76	45	55	2.57	3.29	-145	4.359
61	7.133	14.492	1016.8	36.16	12.65	88.09	46.63	30	4.16	5.62	-170	5.981
63	7.151	14.566	1031.9	36.04	12.72	88.71	46.73	25	4.04	6.23	-175	6.079

Valores de módulo de resiliencia (Limo de Baja Compresibilidad, ML)

N°	σ3=14(kPa)				σ3=28(kPa)				σ3=41(kPa)				σ3=41(kPa)			
	σd=27	48	68	99	27	48	68	99	27	48	68	99	27	48	68	99
81	49	36	32	29	57	42	38	34	66	48	43	39	73	55	49	44
82	42	33	30	28	50	41	36	33	58	47	42	37	65	54	48	42
25	64	62	65	67	70	69	70	72	75	75	75	76	81	81	80	80
26	35	42	47	54	36	44	49	56	36	46	51	58	37	48	53	60
29	240	165	141	136	261	181	152	149	244	184	163	152	224	188	167	152
32	56	70	84	93	121	124	132	134	177	158	158	155	201	178	174	169
34	78	77	80	85	128	112	109	112	165	136	129	131	181	154	146	148

N°	$\sigma_3=14(\text{kPa})$				$\sigma_3=28(\text{kPa})$				$\sigma_3=41(\text{kPa})$				$\sigma_3=41(\text{kPa})$			
	$\sigma_d=27$	48	68	99	27	48	68	99	27	48	68	99	27	48	68	99
35	55	60	63	69	122	105	100	102	162	131	123	121	182	150	140	135
37	147	142	139	138	180	171	163	160	202	187	182	176	218	204	198	188
38	158	144	137	133	197	169	160	153	208	188	178	167	223	203	190	181
41	200	151	151	154	256	195	188	185	280	224	214	208	306	247	235	228
43	259	213	190	178	291	240	213	200	301	254	246	216	325	278	249	222
48	35	32	30	27	45	40	37	33	53	47	43	39	61	54	50	45
49	36	31	28	25	45	39	35	31	55	47	42	37	63	54	49	43
50	43	36	33	30	53	45	41	37	62	52	47	43	71	60	54	49
51	45	33	30	28	55	43	38	34	64	50	44	40	73	58	51	46
53	43	35	32	29	52	43	40	35	61	50	47	41	69	57	52	47
54	37	33	30	27	46	41	37	33	54	47	43	39	61	54	50	45
56	36	29	26	24	45	36	33	29	53	43	39	35	61	50	45	40
57	35	30	26	23	46	38	33	29	54	44	39	34	61	50	44	39
58	40	31	28	25	49	39	35	30	58	47	41	36	66	53	47	41
61	20	19	19	17	28	26	24	22	34	31	29	26	40	36	33	30
63	27	23	21	19	34	29	26	23	39	34	30	27	45	38	35	30

Características de los especímenes después de haber sido compactados (Arena limosa, SM)

N°	Proceso	d(cm)	h (cm)	Peso (g)	W(%)	$\gamma_m(\text{kN/m}^2)$	$\gamma_d(\text{kN/m}^3)$	Sr (%)	θ (%)
23	1 día de secado	7.085	14.314	1007.91	23.8	17.52	14.15	80.31	34.33
24	1 día de secado	7.085	14.33	1004.69	23.8	17.44	14.09	79.51	34.19
20	2 días de secado	7.069	14.326	1012.05	23.9	17.65	14.25	81.98	34.72
21	2 días de secado	7.067	14.335	1010.14	24	17.62	14.21	81.79	34.77
22	2 días de secado	7.066	14.329	1007.29	24	17.58	14.18	81.38	34.69
16	5 días de secado	7.071	14.338	1017.7	24.8	17.73	14.2	84.45	35.92
18	5 días de secado	7.057	14.317	1012.19	24.8	17.73	14.2	84.46	35.92
7	10 días de secado	7.072	14.34	1010.89	24.4	17.6	14.15	82.33	35.2
8	10 días de secado	7.085	14.361	1007.16	24.2	17.45	14.05	80.29	34.66
9	10 días de secado	7.083	14.328	1007.97	24.3	17.51	14.09	81.16	34.9
4	20 días de secado	7.061	14.32	1011.7	24.8	17.69	14.18	84.09	35.85
6	20 días de secado	7.064	14.331	1010.77	24.6	17.65	14.16	83.24	35.53
2	30 días de secado	7.067	14.328	999.84	24.4	17.45	14.03	80.67	34.89
3	30 días de secado	7.077	14.317	1013.49	24.4	17.65	14.19	82.87	35.29
35	1 día de humedecimiento	7.09	14.335	1010.37	24.5	17.51	14.06	81.52	35.13
36	1 día de humedecimiento	7.071	14.356	1011.35	24.1	17.59	14.18	81.71	34.84
37	1 día de humedecimiento	7.096	14.321	1011.1	24.3	17.51	14.08	81.15	34.9
32	2 días de humedecimiento	7.057	14.344	1013.32	24.6	17.72	14.21	83.94	35.65
33	2 días de humedecimiento	7.065	14.326	1015.18	24.7	17.73	14.22	84.23	35.77
29	5 días de humedecimiento	7.059	14.226	1017.56	25	17.92	14.34	87.07	36.55
30	5 días de humedecimiento	7.048	14.307	1005.18	24.9	17.66	14.14	83.91	35.9
26	10 días de humedecimiento	7.074	14.319	1005.22	24	17.52	14.13	80.7	34.57
27	10 días de humedecimiento	7.071	14.321	1010.85	24.2	17.63	14.19	82.27	35.02
28	10 días de humedecimiento	7.063	14.358	1012.67	24.1	17.65	14.22	82.37	34.95
13	20 días de humedecimiento	7.065	14.336	1010.35	24.6	17.63	14.15	83.03	35.49
14	20 días de humedecimiento	7.071	14.317	1010.81	24.5	17.63	14.16	82.86	35.38
15	20 días de humedecimiento	7.064	14.329	1009.77	24.4	17.63	14.17	82.71	35.26
10	30 días de humedecimiento	7.086	14.375	1011	24.4	17.49	14.06	81.13	34.97
12	30 días de humedecimiento	7.056	14.343	1001.38	24.6	17.51	14.06	81.71	35.25
38	En el óptimo	7.083	14.338	1014.44	23.98	17.61	14.21	81.66	34.73
39	En el óptimo	7.084	14.352	1016.31	24.08	17.62	14.2	81.96	34.86
40	En el óptimo	7.075	14.322	1019.72	24.26	17.77	14.29	83.86	35.35

Características de los especímenes antes de ser ensayados Arena limosa,SM)

N°	d(cm)	h (cm)	Peso (g)	W(%)	Yd(k N/m3)	Sr (%)	θ (%)	Ψ kPa	(w-wopt) %	(Sr-Sropt) %	(Ψ-Ψopt) kPa	(θ-θopt) kPa
23	7.083	14.328	998.13	22.8	17.34	14.12	32.82	110	-1.5	-7.29	50	-1.94
24	7.073	14.338	993.82	22.5	17.3	14.12	32.4	120	-1.8	-8.25	60	-2.37
20	7.067	14.366	1002.1	22.1	17.44	14.29	32.19	110	-2.2	-7.58	50	-2.58
21	7.075	14.373	1008.5	22.24	17.51	14.32	32.47	110	-2.06	-6.64	50	-2.29
22	7.072	14.37	995.6	21.86	17.3	14.2	31.64	150	-2.44	-9.52	90	-3.13
16	7.064	14.379	1001.8	22.05	17.44	14.29	32.12	120	-2.25	-7.74	60	-2.65
18	7.078	14.367	997.79	22.3	17.31	14.15	32.18	130	-2	-8.54	70	-2.59
7	7.066	14.341	990.31	21.5	17.27	14.21	31.16	170	-2.8	-10.51	110	-3.61
8	7.078	14.349	989.44	21.7	17.19	14.12	31.25	170	-2.6	-10.94	110	-3.52
9	7.076	14.354	994.58	22.3	17.28	14.13	32.12	140	-2	-8.84	80	-2.64
4	7.038	14.35	977.17	19.91	17.17	14.31	29.06	230	-4.39	-14.78	170	-5.71
6	7.074	14.354	981.13	20.51	17.06	14.15	29.59	230	-3.79	-14.59	170	-5.17
2	7.049	14.314	961.21	19.5	16.88	14.12	28.08	310	-4.8	-18.35	250	-6.69
3	7.056	14.354	984.8	20.7	17.21	14.26	30.09	200	-3.6	-12.75	140	-4.68
35	7.085	14.389	1018.8	24.83	17.62	14.11	35.72	50	0.53	-0.6	-10	0.95
35	7.073	14.441	1019.8	24.86	17.63	14.12	35.78	50	0.56	-0.39	-10	1.02
37	7.092	14.397	1019.2	25.13	17.58	14.05	35.99	50	0.83	-0.47	-10	1.22
32	7.099	14.421	1024.2	25.61	17.6	14.01	36.58	35	1.31	0.61	-25	1.82
33	7.107	14.408	1025.8	25.6	17.6	14.01	36.58	35	1.3	0.64	-25	1.81
29	7.069	14.365	1024.7	25.17	17.83	14.24	36.54	30	0.87	2.38	-30	1.78
30	7.075	14.416	1020.3	26.2	17.66	13.99	37.37	30	1.9	2.28	-30	2.61
26	7.087	14.433	1019.2	26.3	17.56	13.9	37.27	35	2	1.33	-25	2.51
27	7.1	14.407	1027.7	26.6	17.67	13.96	37.86	25	2.3	3.11	-35	3.09
28	7.088	14.416	1025.0	25.7	17.67	14.06	36.84	30	1.4	1.61	-30	2.07
13	7.095	14.418	1028.0	26.59	17.69	13.97	37.88	25	2.29	3.29	-35	3.11
14	7.131	14.513	1027.8	26.45	17.39	13.76	37.09	40	2.15	-0.23	-20	2.32
15	7.079	14.432	1023.6	25.6	17.67	14.07	36.73	40	1.3	1.43	-20	1.96
10	7.094	14.415	1034.1	26.78	17.8	14.04	38.33	15	2.48	4.9	-45	3.57
12	7.078	14.464	1029.8	27.81	17.75	13.89	39.38	15	3.51	6	-45	4.61
38	7.063	14.378	1013.2	23.74	17.64	14.25	34.5	60	-0.56	-2.32	0	-0.26
39	7.077	14.347	1015.1	23.92	17.64	14.24	34.72	60	-0.38	-1.97	0	-0.05
40	7.075	14.326	1018.2	24.11	17.73	14.29	35.12	50	-0.19	-0.61	-10	0.35

Valores de módulo de resiliencia (Arena limosa,SM)

N°	σ3=14(kPa)				σ3=28(kPa)				σ3=41(kPa)				σ3=41(kPa)			
	σd= 27(kPa)	48	68	99	27	48	68	99	27	48	68	99	27	48	68	99
23	143	102	92	86	182	132	116	106	205	155	136	126	221	179	155	141
24	119	97	88	84	147	119	107	102	171	137	123	117	190	155	139	132
20	111	89	83	79	143	112	102	98	172	132	119	113	196	152	136	129
21	117	89	82	79	146	113	102	97	170	133	120	114	193	153	137	129
22	89	79	76	75	110	101	97	93	132	119	113	110	151	137	128	126
16	123	93	82	76	157	119	102	93	180	138	120	109	201	155	134	123
18	95	82	79	76	119	103	96	92	140	121	112	106	156	136	126	118
7	175	124	114	111	204	151	134	130	228	174	155	147	241	194	173	162
8	133	95	87	86	166	120	109	104	194	142	127	120	214	160	142	134

N°	$\sigma_3=14(\text{kPa})$				$\sigma_3=28(\text{kPa})$				$\sigma_3=41(\text{kPa})$				$\sigma_3=41(\text{kPa})$			
	$\sigma_d=27(\text{kPa})$	48	68	99	27	48	68	99	27	48	68	99	27	48	68	99
9	117	84	77	75	147	107	96	92	165	127	114	108	183	144	129	122
4	146	128	121	124	180	159	149	148	208	184	171	165	228	202	187	180
6	106	93	91	94	142	122	117	118	173	146	139	138	196	168	157	153
2	172	142	131	128	223	177	163	153	245	200	183	174	264	221	202	189
3	159	126	119	113	188	151	141	133	209	170	157	148	219	185	172	160
35	64	62	60	61	92	87	82	80	116	106	102	96	140	126	118	112
35	75	65	60	61	105	88	83	79	131	109	102	94	156	130	120	107
37	65	61	58	59	87	81	78	76	110	99	96	90	127	116	111	106
32	49	49	49	46	71	70	68	59	92	87	84	73	111	104	102	88
33	51	52	50	51	73	73	70	69	94	91	89	86	113	109	106	104
29	65	58	53	53	96	82	74	71	124	104	94	89	148	125	113	107
30	55	54	52	53	78	75	71	70	103	96	92	88	123	115	109	105
26	46	49	50	52	72	73	71	71	95	92	89	87	113	110	107	104
27	48	51	50	54	69	70	70	71	88	88	86	88	107	105	103	103
28	45	48	49	52	69	70	70	71	92	90	89	88	113	109	107	104
13	33	37	41	48	53	54	58	62	77	72	74	75	99	91	90	88
14	52	51	48	47	75	70	67	64	96	88	84	79	115	106	101	94
15	57	52	49	49	83	72	68	65	103	89	85	79	121	106	100	94
10	64	59	56	56	91	80	77	73	112	100	94	87	129	118	109	102
12	59	52	49	50	82	71	65	64	101	87	82	77	119	103	97	90
38	76	62	58	57	104	85	76	74	126	103	94	89	146	122	111	105
39	42	46	47	49	69	69	70	71	92	90	87	87	111	108	103	102
40	59	57	55	55	88	81	77	74	113	101	95	90	133	120	112	106

**ANEXO II: DATOS METEOROLÓGICOS DEL SERVICIO
METEOROLÓGICO NACIONAL (SMN), 2014 – 2024.**

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

COORDINACIÓN GENERAL DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL

ESTADÍSTICA MENSUAL

EMISIÓN: 14/03/2025

DATOS DISPONIBLES EN LA BASE DE DATOS A: MARCH DE 2025;

CON LA INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR LAS UNIDADES ADMINISTRATIVAS

ESTACIÓN: 22058

NOMBRE: SANTA TERESA

ESTADO: QUERÉTARO

MUNICIPIO: HUIMILPAN

SITUACIÓN: OPERANDO

CVE-OMM

LATITUD: 20.4919444°

LONGITUD: -100.3033333 °

ALTITUD: 2092 msnm

LLUVIA MAXIMA 24 H.												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	0	6	10	18	10	8	5	20	10	12	10	10
2016	8	0	17	5	15	21	60	40	10	9	15	5
2017	0	10	10	0	7	0	25	20	65	5	3	0
2018	0	10	0	8	20	20	11	30	50	30	15	10
2019	0	0	10	0	10	0	5	10	10	15	30	22
2020	9	20	11	0	8.5	8	70	42	20	12	0	8
2021	23	0	0	3.2	34	34	31	85	62.5	100.3	10	0
2022	0.9	1.5	0.3	0.3	0.2	18.2	19.4	33	21	30.1	20.3	5.2
2023	0	0	0.7	2.3	32.7	7	29.7	36.6	24.4	73.8	9.1	9.8
2024	6.2	14.5	0	0.4	1.4	28	62.5	19.7	22.7	3	0.5	0.5
MÍNIMA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MÁXIMA	23	20	27	25	36	71	94	85	70	100.3	30	30
MEDIA	3.3	3.2	4.4	4.4	10.3	22.2	29.7	32.6	26.8	19.9	6.9	4
DESV.ST	5.8	5.2	7	6.6	10.8	21.2	23.5	21	21.7	22.5	8.9	7

LLUVIA TOTAL MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	0	9	10	35	11.5	25.7	23	44	53	12	49	17.5
2016	16	0	59	9	42	122.6	121.5	322	70	20	25	8
2017	0	10	21	0	7	0	184.3	72	204	17	5	0
2018	0	15	0	8	57	138	68	83	238	63	79	15
2019	0	0	10	0	11.5	0	23	66	53	40	45.2	22
2020	11	22	17.5	0	14.4	25.7	139.3	95.5	59	12	0	11
2021	42	0	0	7.6	110.7	127.2	56.6	301.4	259.1	115.5	12.3	0
2022	0.91	1.9	0.3	0.71	0.2	19.55	48.37	106.15	62.5	35.7	20.6	8.3
2023	0	0	1.5	3.3	90.73	7	108.22	111.8	43.7	157.9	24.3	36.81

2024	6.32	15.8	0	0.42	3	93.8	254.8 2	39.8	75.31	5.61	0.5	0.51
MÍNIMA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MÁXIM A	42	22	59	53.9	110.7	206.1	254.8 2	322	312	162	79	55
MEDIA	5.4	3.9	7.1	8	25.7	60.6	95.8	98.1	91.7	41.1	14.3	6.9
DESV.ST	10	6.1	13.8	12.9	33.8	56	67.8	76.7	88.7	45.8	20.2	12.3

EVAPORACIÓN MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015		78.47	151.6	188	158.1	125.7	163		131.6			
2016	98.42	90.79	132.3 4	143.1	139.0 8	169.4 1	95.94	217.4	156.7 2	146.0 4	141.9 1	57.79
2017	62	68.8	139.2	156.8	158.6	147.2	131.0 6	141.0 4	144	129	84.42	55.3
2018	48.7	80.1	140.2	130.6	62	146.4	150.9	142.2	152.4	139.3	106.4	79.7
2019	75.75	96.46	151.6	127.4	158.1	147.2	163	146	131.6	136.8 5	123.0 7	52.13
2020	70.3	104.4	147.5	191	198.4	148.7	110.6	145.5		126.2	73.17	61
2021	63.83	102.7 8	163.6 5	184.3 1	199.7	122.4 6	128.1 3	167.0 9	107.6 3	95.46	72.8	56.05
2022	67.06	69.69	162.0 8	186.9	224.6 5	158.4 2	148.3 8	157.9 2	94.38	88.64	63.48	58.1
2023	68	97.16	159.0 1	192.9 9	179.6 8	222.6 6	186.5 1	149.5 2	153.5	80.05	66.45	35.92
2024	66.66	88.34	161.6 3	198.4 5	207.5 6	174.5 2	65.25	134.5 1	104.4 6	99.51	74.33	61.57
MÍNIMA	35.22	30.34	125.8 8	127.4	62	122.4 6	16.9	56.6	94.38	80.05	63.48	35.92
MÁXIM A	158.2 2	176	242.7 1	272.8	273	238.7	191.7	217.4	182.6 3	183.9 7	143.1	143.9 9
MEDIA	95.6	106.6	172	189.8	190.7	171.4	129.2	151	137.2	122.4	101.2	79.2
DESV.ST	38	39.2	37.8	41	44.5	36.3	42.7	30.9	24.8	28.7	28	33.6

TEMPERATURA MAXIMA PROMEDIO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	21.6	24.5	25.4	26.4	26.6	24.8	24.9	26.1	23.7	26	24.1	22.6
2016	22.3	23.9	24.8	26.1	27.9	24.8	22.9	24.2	23.7	25.8	24.3	24.5
2017	22	24	25.5	32	34	32.8	25.3	25.1	22.2	24	24	21.8
2018	20.4	24.7	29.9	31.6	32.4	27.6	25.9	27	24.5	24.5	19.4	20.4
2019	21.6	27.2	30.5	31	33.4	32.8	20.6	26.6	22.7	23.8	24.1	21.8
2020	21.9	24.5	28.8	33.3	31.5	28.6	27.9	26.1	24.6	26	24.6	23.8
2021	24.3	26.9	30.4	31.7	30	26	25.9	26.6	25.2	24.7	23.3	24.9
2022	24.3	25.6	29.4	33.3	34	27.6	20.6	25.5	23.9	25.4	25.3	22.6
2023	24.4	26.3	30.2	31.7	31.7	33.5	28.9	27.1	28.4	24.6	23.8	19.2
2024	23.9	26.7	31	32.6	36	30.2	25.8	27.1	25.2	23.8	26.2	23.4
MÍNIMA	19.2	20.5	22.5	24.6	25.7	23.5	20.6	22.3	21.7	21	19.4	19.2
MÁXIM A	24.4	27.2	31	33.3	36	33.5	28.9	27.7	28.4	26.3	26.4	24.9
MEDIA	22.2	24	26.6	29	29.7	27.1	24.6	24.9	24	23.7	23.2	22.2
DESV.ST	1.3	1.6	2.2	2.4	2.6	2.6	1.8	1.4	1.3	1.4	1.5	1.3

TEMPERATURA MAXIMA EXTREMA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	26	31	31	30	30	28	27	31	27	30	28	26
2016	26	28	30	32	33	32	25	28	26	29	28	28
2017	27	30	32	36	36	36	33	31	27	30	35	27
2018	26	30	33	35	35	36	30	30	27	27	27	26
2019	25	32	33	33	36	36	30	34	29	27	27	26
2020	26	30	33	35	35	34	31	31	30	29	30	26
2021	28	32	33	35	34	32	30	30	28	30	26	28
2022	28	31	33	36	36	36	30	29	27	30	29	27
2023	28	30	33	36	35	36	32	31	32	29	29	24
2024	28	31	33	36	39	37	30	31	31	27	29	27
MÍNIMA	24	24	27	30	30	28	25	25	25	25	25	24
MÁXIM A	33	32	35	38	39	37	33	34	32	31	35	29
MEDIA	26.8	28.7	31.2	33.2	33.7	32.1	28.5	28.3	27.7	27.8	27.4	26.3
DESV.ST	1.9	2	1.9	2.2	2.1	2.6	2	2.2	1.8	1.6	2	1.2

TEMPERATURA MINIMA PROMEDIO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	4.1	9.3	11.4	13.1	10.5	10.7	5.5	12.2	6.6	9.5	11.7	7.7
2016	6.9	8.3	13.1	12.3	12.5	12.8	10.8	12.2	12.7	11.6	9.4	8.9
2017	4.8	6.3	7.7	11.4	14.5	14	11.4	12.2	10	10	6.7	4.3
2018	2.7	8.7	10.5	12.7	13.2	12.2	12.5	11.6	11.6	12.5	6.6	3.1
2019	4.1	7.2	9.2	12.1	15.6	14	5.5	6.4	6.6	12.6	11.7	8.6
2020	7.4	9.2	12.4	16.1	14.5	13.7	14.1	13.8	12.9	9.5	9	7.7
2021	7.8	8.4	11.6	13.5	14.4	13.8	13.6	13.8	13.3	11.9	7.5	7.6
2022	7.9	7.8	10.2	16.1	14.5	12.2	5.5	11.4	12.4	11.4	10.8	7.1
2023	6.7	8.2	12	14.1	14.9	16.3	14.8	13.9	13.1	12.4	9.4	7.7
2024	8.1	8.9	11.9	14.2	18.5	15.8	14.5	13.8	14.3	10.2	9.4	7
MÍNIMA	2.7	3.1	4.3	7.6	7.1	7.6	5.5	6.4	6.6	5.6	3.9	2.8
MÁXIM A	14.7	17.1	15.3	17.9	19.8	16.7	16	16.8	14.3	15.6	14.9	14.5
MEDIA	6.4	7.7	9.5	11.6	12.5	12.1	11.3	11.4	11.1	10.1	8.5	7.1
DESV.ST	3.1	3.1	2.7	2.8	2.8	2.1	2.4	1.9	1.7	2.2	2.5	2.7

TEMPERATURA MINIMA EXTREMA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	1	1	7	10	7	7	2	10	3	3	8	2
2016	4	5	9	7	7	8	8	9	10	6	6	5
2017	0	0	5	7	10	12	9	9	5	5	0	0
2018	0	4	5	9	10	9	9	10	9	10	0	0
2019	2	3	5	9	10	12	2	0	3	7	8	1
2020	0	1	4	13	10	8	12	12	4	4	4	2
2021	1	2	6	5	11	12	11	11	10	8	5	3
2022	3	0	2	13	10	9	2	9	6	7	8	3
2023	1	0	3	9	10	13	12	11	10	6	5	3
2024	3	4	6	7	14	13	13	12	9	4	3	2

MÍNIMA	-5	-2	-5	1	3	4	2	0	3	0.5	-2	-4
MÁXIM A	10	10	10	13	16	13	13	12	11	12	11	11
MEDIA	1.8	2.6	4.2	6.8	8.2	8.5	8.2	8.5	7.2	5.3	3.7	2.5
DESV.ST	3.4	3.4	3.1	2.9	2.7	2.3	2.8	2.2	2.2	2.8	3.3	3.4

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	12.9	16.9	18.4	19.8	18.6	17.8	15.2	19.1	15.1	17.8	17.9	15.2
2016	14.6	16.1	19	19.2	20.2	18.8	16.9	18.2	18.2	18.7	16.9	16.7
2017	13.4	15.2	16.6	21.7	24.2	23.4	18.4	18.6	16.1	17	15.3	13.1
2018	11.5	16.7	20.2	22.1	22.8	19.9	19.2	19.3	18	18.5	13	11.8
2019	12.9	17.2	19.9	21.6	24.5	23.4	13.1	16.5	14.6	18.2	17.9	15.2
2020	14.6	16.9	20.6	24.7	23	21.1	21	20	18.8	17.8	16.8	15.8
2021	16	17.6	21	22.6	22.2	19.9	19.8	20.2	19.2	18.3	15.4	16.2
2022	16.1	16.7	19.8	24.7	24.2	19.9	13.1	18.4	18.1	18.4	18	14.9
2023	15.5	17.2	21.1	22.9	23.3	24.9	21.9	20.5	20.8	18.5	16.6	13.4
2024	16	17.8	21.4	23.4	27.2	23	20.1	20.5	19.8	17	17.8	15.2
MÍNIMA	11.5	12.4	13.9	16.2	17.6	15.8	13.1	15.4	14.6	14.1	12.8	11.8
MÁXIM A	18.8	21.6	21.4	24.7	27.2	24.9	21.9	22.2	20.8	20	19.5	19
MEDIA	14.3	15.8	18	20.3	21.1	19.6	18	18.1	17.5	16.9	15.9	14.7
DESV.ST	1.8	2.1	2.1	2.2	2.4	2.1	1.9	1.4	1.3	1.5	1.7	1.8

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

COORDINACIÓN GENERAL DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL

ESTADÍSTICA MENSUAL

EMISIÓN: 14/03/2025

DATOS DISPONIBLES EN LA BASE DE DATOS A: MARCH DE 2025;

CON LA INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR LAS UNIDADES ADMINISTRATIVAS

ESTACIÓN: 22067

NOMBRE: LA VENTA

ESTADO: QUERÉTARO

MUNICIPIO: PEDRO ESCOBEDO

SITUACIÓN: OPERANDO

CVE-OMM

LATITUD: 20.48611111°

LONGITUD: -100.1875 °

ALTITUD: 1906 msnm

LLUVIA MÁXIMA 24 H.												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	18.2	2.4	10.1	60	22.7	16.8	40	46.5	43.5			
2016		29	2	5	8	8	86	40.5	25.6	13.4	5	7
2017		0	0	0	13.7	7.3	9	1.2	17.6	4.2	1.4	0

LLUVIA MÁXIMA 24 H.												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2018	0.3	0	0	5.2	0	7.1	8.3	2.4	10.9	0	0	0
2019	0	0	0	0	0	10	0	0	1	1.8	0	3.8
2020			0	0	0	7.8	0	0	0	0	0	0
2021	0	0	0	0	0	10	1.8	0	7	1.8	0	3.8
2022	0	0	0	0	0	0	0	1.8	5.1	29	0	1.8
2023	1.5	0	0	0	0	0	11.4	30.6	22.4	41	4.6	3.3
2024	0	0	0	0	0	18.2						
MÍNIMA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MÁXIMA	46	29	31.5	60	41.8	81	86	58	51	49	23.5	7
MEDIA	6.4	4.2	3.2	10.1	9.9	20.5	25.5	25	22.5	15.3	4.7	1.3
DESV.ST	11.8	8.3	6.9	17.2	11.4	18.7	19.8	17	14.9	14.7	6.5	1.9

LLUVIA TOTAL MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	20.5	2.4	13.6	73.4	135.8	28.3	104.3	192.6	91			
2016		35.5	3.5	10.5	28	23	302.4	125.3	90.4	33.4	9	7
2017		0	0	0	15.1	17.1	42.7	4.4	65.7	4.8	1.4	0
2018	0.3	0	0	5.2	0	17.1	37.7	5.4	58.4	0	0	0
2019	0	0	0	0	0	10.9	0	0	3.6	6.5	0	5.5
2020			0	0	0	19.4	0	0	0	0	0	0
2021	0	0	0	0	0	10.9	6.8	0	14.6	6.5	0	5.5
2022	0	0	0	0	0	0	0	3	10.3	53	0	3
2023	2.5	0	0	0	0	0	37.6	55.8	45.6	93.3	5.5	12.7
2024	0	0	0	0	0	97.75						
MÍNIMA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MÁXIMA	162.6	41	33.5	73.4	135.8	199.7	302.4	192.6	264	132	51.4	12.7
MEDIA	13.2	6.6	4.9	14.9	29.5	58.3	94.6	71.9	66.3	31.6	8.2	1.9
DESV.ST	33.3	12.4	10	21.6	41.6	57.3	79.1	57.2	62	33.1	13.2	3.2

EVAPORACION MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	103.7	104.79	165.39	143.1	180.93	214.67	132.82	209.22	130.65			
2016		116.88	168.01	147.84	157.73	167.11	183.15	196.07	171.03	132.44	119.43	119.62
2017		85.89	102	99.46	140.01	110.63	99.63	97.22	87.2	146.89	151.07	126.2
2018	135.8	117.3	144.91	151.43	184.74	110.63	112.63	97.22	83.62	103.71	100.67	91.7
2019	103.7	104.79	199.56	143.1	186.56	224.67	191.1	194.63	190.32	162.16	117.22	108.68
2020			165.39	198.89	180.93	117.23	134.18	131.91	126.69	113.36	110.03	128.03
2021	123.9	111.12	165.39	143.1	177.93	213.21	139.62	128.46	148.96	164.8	112.92	109.3
2022	106.2	102.36	165.98	179.52	238.5	178.32	147.11	168.13	121.19	125.68	118.24	117.24
2023	97.16	80.56	116.91	143.31	203.28	199.64	167.01	134.66	141.14	118.22	123.94	105.62
2024	126.1	114.88	147.35	165.69	204.25	173.53						

LLUVIA MÁXIMA 24 H.												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MÍNIMA	70.8	13.83	102	99.46	140.01	110.63	99.63	97.22	83.62	103.71	100.67	54.46
MÁXIMA	207.2	166.22	223	203.8	238.5	224.67	222.12	209.22	190.32	189.31	151.07	129.7
MEDIA	124.4	105.7	165.1	162.2	194.7	178.6	158.8	161	136.7	143.8	121.1	108.7
DESV.ST	30.1	31.3	32.6	27.2	26.4	35.7	32	40.9	30.6	25.9	12.5	19.1

TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	22.5	25.4	28.2	30	27.2	27.2	25.1	26	24.4			
2016		24.9	24.1	25	26.4	26.6	25.1	24.4	23.8	21.7	22.7	23.8
2017		21.8	22.3	27	30	26.8	24.6	24.8	23.2	24.5	32.7	22.7
2018	21	24.7	27	26.5	27.9	28.8	25.8	27.7	24.1	21.3	25.2	26.2
2019	28.1	27.5	24.5	22.5	29.7	27.2	24.4	26	24.5	23.8	25.1	22.3
2020			28.2	28.5	27.1	26	25.1	24.4	24.4	24.5	23.7	22.5
2021	23.1	27.4	28.2	22.5	27.2	27.2	25.1	25	24.4	23.8	23.8	22.3
2022	22.3	23.6	27.3	29.1	32	28.6	25.6	24.8	23.4	23.9	24.2	22.6
2023	21.4	25.6	27.2	29.5	29.2	33.4	25.7	25	26.4	24.6	24.5	20.7
2024	25.1	27.4	30.1	31.8	35.2	31.1						
MÍNIMA	9.3	11.8	15.6	17.6	21.1	21.2	20.9	21.1	21.8	21.3	21.6	17.5
MÁXIMA	28.1	27.5	30.1	31.8	35.2	33.4	27.8	27.7	30.9	27.2	32.7	27
MEDIA	21.9	23.9	26.1	27.7	28.8	27.4	25.4	25.5	25.5	24.7	24.8	23
DESV.ST	4.2	3.8	3.4	3.4	2.9	2.7	1.6	1.7	2.2	1.5	2.1	2

TEMPERATURA MAXIMA EXTREMA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	26	28	33	33	31	32	28	29	27			
2016		29	27	28	29	30	29	28	29	28	25	29
2017		24	28	30	36	29	28	29	29	35	36	26
2018	26	29	30	29	33	33	32	32	30	28	30	32
2019	35	36	31	32	32	32	27	29	27	28	29	28
2020			33	31	30	29	28	26	27	27	27	27
2021	27	31	33	32	31	32	28	30	27	29	28	28
2022	26	28	31	32	35	34	29	28	27	27	26	26
2023	25	29	30	33	31	37	29	31	28	28	28	24
2024	28	32	32	36	38	37						
MÍNIMA	14	17	19	23	26	23	23	25	25	26	24	22
MÁXIMA	35	37	33	36	38	37	41	32	35	35	36	32
MEDIA	25.9	28.1	30.1	31.6	32.5	31.4	29.2	28.8	28.8	29	28.3	26.8
DESV.ST	4.5	4.3	3.6	2.9	3.2	3.4	2.9	1.6	2.1	1.9	2.4	2.6

TEMPERATURA MINIMO PROMEDIO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	8.3	8.3	8.4	8.6	11.9	9.4	10.5	11.7	11.8			
2016		7.6	7.6	10.4	10.9	11.7	11.9	11.7	10.3	7.7	7.5	7.2
2017		15.6	16.3	15.9	15.9	14.1	13.3	14.4	13.8	12.4	13.9	6.3

LLUVIA MÁXIMA 24 H.												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2018	6.2	10	11.4	12.9	13	14.1	13.3	14.5	13.8	14	16.9	18.2
2019	20.8	19.8	17.7	15.9	15.2	20	13.2	13.9	13.7	13.5	12.8	9.9
2020			12.2	14.5	13.9	14.2	14.5	14.2	14.1	11.3	10.2	10
2021	10.3	10.7	12.2	15.9	13.9	19.8	14.4	14.8	14.1	13.5	10.2	9.9
2022	10	10	11.5	14.5	13.2	13.7	14.3	13.7	13.8	12.7	11.9	9.5
2023	8.9	10.5	12.5	13.3	13.6	16	14.6	14.2	14.3	13.5	11.8	10
2024	8.6	9.1	11.2	13.9	17.3	16.6						
MÍNIMA	-1.2	0.6	1.7	5.2	7.4	8.1	8.2	8.9	7.9	3.3	2.1	0.5
MÁXIMA	20.8	19.8	17.7	15.9	17.3	20	14.6	14.8	14.3	14	16.9	18.2
MEDIA	5.6	6.8	8.2	10.3	11.5	12.6	11.6	11.8	11.4	9.7	8	6.5
DESV.ST	4.6	4.2	3.9	3.5	2.4	2.9	1.8	1.8	2	2.9	3.9	3.7

TEMPERATURA MINIMA EXTREMA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	6	6	7	7	6	7	8	8	9			
2016		5	6	8	8	9	9	8	6	1	3	4
2017		13	14	15	13	11	12	13	9	6	8	-1
2018	-1	7	8	9	2	11	12	13	9	7	9	11
2019	14	14	12	13	12	14	12	12	12	12	10	3
2020			7	12	10	10	12	12	12	8	8	7
2021	8	5	7	13	9	14	11	12	12	11	8	3
2022	8	6	3	12	10	11	12	12	11	7	9	7
2023	7	8	10	11	11	14	13	12	12	10	8	5
2024	5	3	8	10	15	14						
MÍNIMA	-8	-6	-5	0	2	3	4	5	2	-1	-3	-6
MÁXIMA	14	14	14	15	15	14	13	13	12	12	10	11
MEDIA	1.9	2.7	3.8	6.8	7.7	9.2	8.9	9.1	8	5.2	3.4	2.2
DESV.ST	4.9	4.9	4.7	4.2	2.8	3.1	2.5	2.3	2.9	3.8	4.4	3.7

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	15.4	16.9	18.3	19.3	19.6	18.3	17.8	18.9	18.1			
2016		16.2	15.9	17.7	18.6	19.1	18.5	18	17	14.7	15.1	15.5
2017		18.7	19.3	21.4	23	20.4	19	19.6	18.5	18.4	23.3	14.5
2018	13.6	17.4	19.2	19.7	20.4	21.4	19.6	21.1	19	17.6	21	22.2
2019	24.5	23.6	21.1	19.2	22.4	23.6	18.8	20	19.1	18.6	19	16.1
2020			20.2	21.5	20.5	20.1	19.8	19.3	19.2	17.9	17	16.2
2021	16.7	19	20.2	19.2	20.6	23.5	19.8	19.9	19.2	18.6	17	16.1
2022	16.1	16.8	19.4	21.8	22.6	21.1	20	19.2	18.6	18.3	18	16
2023	15.1	18	19.9	21.4	21.4	24.7	20.1	19.6	20.4	19	18.1	15.3
2024	16.9	18.2	20.6	22.9	26.2	23.9						
MÍNIMA	4.2	6.2	9.4	11.6	16	15.6	14.8	15.6	15.6	14.5	13.1	12.1
MÁXIMA	24.5	23.6	21.1	22.9	26.2	24.7	20.1	21.1	21.4	19	23.3	22.2
MEDIA	13.7	15.3	17.2	19	20.1	20	18.5	18.6	18.4	17.2	16.4	14.8
DESV.ST	3.7	3.3	2.8	2.5	2	2.2	1.3	1.3	1.3	1.5	2.4	2

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

COORDINACIÓN GENERAL DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL

ESTADÍSTICA MENSUAL

EMISIÓN: 14/03/2025

DATOS DISPONIBLES EN LA BASE DE DATOS A: MARCH DE 2025;

CON LA INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR LAS UNIDADES ADMINISTRATIVAS

ESTACIÓN: 22029

NOMBRE: HUIMILPAN

ESTADO: QUERÉTARO

MUNICIPIO: HUIMILPAN

SITUACIÓN: OPERANDO

CVE-OMM

LATITUD: 20.3838889°

LONGITUD: -100.280556 °

ALTITUD: 2271 msnm

LLUVIA MAXIMA 24 H.												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2014	1.5	0	7.5	9.5	30.1	27.5	40.5	28	46	69	4	1.4
2015	4.4	6.5	73.1	22.5	10	60	21	68	35	28.5	2.4	7.4
2016	4.3	0	18.5	4.6	15.6	35.5	13.7	37.5	24.7	13	11.6	4.3
2017	0.01	0.01	7.3	5.6	10.6	18	52	16	69	7.4	0.01	0
2018	0.9	9.5	0	56	10.6	18	52	16	69	10	11.6	4.3
2019	0.01	8.3	5	4	14.8	31.5	40	39.5	48	23.5	2.8	14.8
2020	8.6	16.5	24	13.3	2.9	32	73.7	87.3	20.6	34	0	3
2021	5.3	0	0	0.5	27.3	66	32.8	40.6	60.4	33.7	5.2	0.3
2022	0	0.01	0	2.4	3.3	10.5	36.7	61.3	29.5	11.8	4.3	2.3
2023	7	0	9.5	2.7	20	23	46.5	28.3	21.6	39.5	3.4	15.5
MÍNIMA	0	0	0	0	2	7.3	11	13.2	6.5	0	0	0
MÁXIMA	52	18	73.1	56	78.5	98	94	87.3	97	69	40.4	15.5
MEDIA	7.2	4.2	6.4	11.1	18.6	35.4	44	37.3	38	25.6	5.6	3.1
DESV.ST	10.1	5.3	11.7	11.9	16.4	17.8	19.9	15.3	19.2	18	7.7	4

LLUVIA TOTAL MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2014	1.5	0	12.5	24	55.2	160.1	144.1	85.8	100.4	127	11	2
2015	5.9	13.5	115.1	23.5	40.4	149	77.5	133.1	73.6	72.2	2.4	21.6
2016	5.4	0	43.4	8.7	42.3	154.8	128.5	219.3	87.71	20.21	31.13	7.8
2017	0.02	0.02	16.71	7.9	24.7	89.52	161.03	76.6	179.5	19.2	0.01	0
2018	0.91	13.82	0	79	24.7	89.52	161.03	76.63	179.51	15.01	31.13	7.8
2019	0.02	11.1	14.1	6.3	25.32	103.9	127.1	125.62	103.41	81.72	2.82	15.1
2020	10.2	21	52.7	18.7	6.9	99.22	232.3	174.52	49.1	37	0	3.01
2021	5.8	0	0	0.53	83	197.01	105.72	200.61	311.1	48.6	5.2	0.3

2022	0	0.01	0	3.13	7.7	44.85	145.9 2	171.7	79.5	19.1	10.82	3.3
2023	7.2	0	11.01	3.2	58.83	23	182.8 1	136.7 2	24.81	105	12.01	45.91
MÍNIMA	0	0	0	0	3	11.82	55.61	31	15.8	0	0	0
MÁXIM A	99	64.5	115.1	79	136.6 5	379.2	338.8	339	328.1 4	153	54.7	45.91
MEDIA	13.6	8.1	11.5	21.8	42.5	125	183.1	145.9	119	59.1	10.3	5.1
DESV.ST	22	12.8	20.4	21.6	32.3	74.3	75.4	66.1	70.7	44.2	14.1	8.8

EVAPORACIÓN MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2014	102.0 8	129.7	204.1 3	189.2 2	162.7 8	145.5 2	151.7 2	124.2	111.3 2	121.3 3	88.04	101.7 6
2015	111.3 7	99.29	131.0 7	185.9 2	145.2 6	127.7 7	145.0 8	129.8 1	108.6 7	117.3 6	93.97	102.9 7
2016	115.7 8	108.8 2	126.6 4	166.8 4	214.0 2	102.4 2	99.96	100.8 8	99.71	96.05	88.3	103.8
2017	104.0 1	104.2 1	117.7 3	158.7 1	201.9 7	117.2 4	94.53	105.0 5	95.98	103.9 6	90.82	93.15
2018	83.88	93.75	134.2 7	158.7 1	201.9 7	117.2 4	94.53	105.0 5	95.98	104.4 2	87.73	103.8
2019	103.0 1	91.05	114.6 8	158.0 1	238.6 9	166.5 9	164.1 3	157.9 1	139.0 6	121.2	105.1 4	105.3 2
2020	120.9 9	145.0 8	193.8 5	243.6 7	225.1 5	183.1 1	187.4 2	151.7 1	132.5 7	140.9 3	124.6 3	106.9 2
2021	130.2 8	168.3 9	224.1 2	241.5 9	210.3 7	134.2 7	131.9 5	132.2	141.2 4	112.5	132.3 6	130.7 8
2022	136.7 7	146.2 4	240.9 5	238.9 2	268.2	200.2 3	177.4 6	177.3 8	132.4 9	127.8 8	125.5 7	124.2 3
2023	130.9 9	151.2 9	213.8 3	227.9 4	212.0 1	249.4 4	151.2 5	156.3 6	199.3 9	118.8 7	109.0 4	86.01
MÍNIMA	83.69	66.65	90.5	2.7	81.2	102.4 2	94.53	100.8 8	91.7	92.3	41.04	63.1
MÁXIM A	163.6 4	168.3 9	278.3	257.5	287.7 6	249.4 4	254.4 8	177.3 8	199.3 9	151.3 5	161.6 7	141.7
MEDIA	116	127.6	180.1	191.5	197.7	165.1	148.8	143.7	128.7	120.9	106	106.3
DESV.ST	18.2	24.5	40.3	47.9	38.1	37.7	31	20.5	22.4	14.9	20	14.5

TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2014	20	25.4	26.9	27.7	25.6	24	23.1	22.8	23	21.9	22	23.5
2015	21.6	22.3	24.5	27.4	26	24.2	23.8	23.3	23.2	23.7	21.8	21.8
2016	23.5	24.1	24.4	27.9	29.4	24	23.1	23.6	22.9	22.5	21.7	23.4
2017	23.1	23.9	24.4	27.4	28.7	26.3	23.5	24.2	22.5	23	22.8	22.5
2018	20.7	22.3	26.8	27.4	28.7	26.3	23.5	24.2	22.5	22.5	21.6	23.4
2019	23.1	22.4	24.4	27.2	29.2	25.6	24.1	24.7	24.4	21.5	22.9	22.1
2020	20.4	23.7	26.8	29.4	27.6	24.5	24.5	23.1	21.9	26.1	24.9	23.7
2021	22.8	24.9	28.8	29	26.5	21.7	22.5	23.3	22	22.3	21	23.1
2022	22.7	23	27	28.4	28.9	24.8	25	23.9	21.4	23	24.1	20.7
2023	23.1	22.9	27.3	28.2	27.8	30.5	25.7	24.6	26.8	22.9	22.6	17.8
MÍNIMA	17	18.5	19.5	18	18.2	19.1	19.1	18.5	18.4	18.4	18	17.8
MÁXIM A	26.5	28.4	29.2	32.6	32.6	30.5	28.8	27.8	26.8	27.9	29.5	25.6
MEDIA	21.3	22.7	24.9	26.7	27	25	23	22.9	22.2	22	21.7	21.2
DESV.ST	2.1	2	2	2.3	2.5	2.1	1.8	1.7	1.7	1.8	1.9	1.7

TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2014	25	28	31	31	29	29	26	25	25	25	26	26
2015	25	24.5	29	30	30	28	26	26	26	27.5	24	25.5
2016	26	26	29.5	31	34	27	25	28	25	24.5	24	25.5
2017	28	27	29	30	31.5	30	25	26	27	25	26	25
2018	24.5	27	30.5	30	31.5	30	25	26	27	24.5	24	25.5
2019	28	27	29	30	32	30	26	28	27	27	26.5	27
2020	25	29	32.5	33	31	30	31	27	27	30	30	26
2021	27	29	31	31	29.5	27	25	26	26	27	24	27
2022	27	27	31	33	33	30	28	27	25	27	27	25
2023	27	28	31	33	31	33	28	28	30	28	29	20
MÍNIMA	21	22	22.5	19.5	19.5	21.5	21	20	20.5	20	20	20
MÁXIM A	35	32	32.5	35	38	35	34	40	32	32	33	39
MEDIA	25.2	26.6	29	30.2	31	29.3	26.8	26.3	25.5	25.7	25.2	25.2
DESV.ST	2.5	2	1.9	2.5	2.9	2.5	2.8	2.9	2.1	2.4	2.6	3.1

TEMPERATURA MINIMA PROMEDIO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2014	3.4	5.9	8.4	9.8	7	9.8	10.1	9.8	9.8	8	7	4.1
2015	6.5	5.9	8.9	10.2	9.5	9.4	9.6	9.7	9.5	7.9	4.8	4.3
2016	6.9	6.9	7.4	7.9	9.9	9.6	9.4	9.4	7.6	6.9	5.4	4.5
2017	3.9	4.1	4.8	7.4	8.3	9.4	9.7	10.2	7.8	6.9	1.8	1.8
2018	0.9	4.6	5.6	7.4	8.3	9.5	9.7	10.2	7.8	7	5.5	4.6
2019	4.1	4.4	4.9	7.4	10.2	10.9	9.3	9.6	9.4	9.1	6.7	2.4
2020	2.3	4	7.1	9.6	9	9.9	10.2	10.5	9	9.5	8.5	7.3
2021	2.5	1.9	4.9	6.3	8.8	9.9	9.6	9.9	9.9	8.2	2.9	2.1
2022	2.7	2.5	3.9	7.3	8.6	9.2	9.8	9.9	9.3	6.7	5.1	2.7
2023	0.9	2.2	5.3	7.9	9.5	10.8	10.7	9.9	8.6	8.9	6.1	6.3
MÍNIMA	-1.7	0.8	3.6	6.3	7	8.2	8.2	8.4	6.6	4.2	1.8	1.8
MÁXIM A	10.8	11	11.1	11.2	12.1	12.2	12.5	12	12.2	10.4	10.4	8.1
MEDIA	4.3	5.2	7	8.8	9.9	10.5	10.5	10.5	9.8	8.1	5.8	4.9
DESV.ST	2.1	1.9	1.7	1.2	1.2	0.9	1	0.8	1.2	1.5	1.7	1.6

TEMPERATURA MINIMA EXTREMA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2014	0	2	4	6	4	7	7	7	7	3	4	0
2015	1	1	5	8	7	7	7	7	6	4.5	2.5	1
2016	2	3	0	5	7	7	7	7.5	5	3.5	0.5	-1
2017	-3	-1.5	1.5	2	6	7.5	7	6	4	1	-4	-6
2018	-6.5	0	3	2	6	7.5	7	6	3	3.5	0.5	0
2019	-3	0	1.5	2	6	7	8	6	6	5	4	-2.5
2020	-3	-1	2	6.5	7	4.5	7.5	7	3	5	3	4
2021	-2	-4	0	0	6	5	5	8	7	4	-1	-3
2022	-2	-2	-1	3	5	6	7	8	3	3	1	-2
2023	-4	-4	-2	5	7	7	8	6	5	2	0	0

MÍNIMA	-6.5	-6	-2.5	0	4	3.5	5	2	3	-3.5	-5	-6
MÁXIM A	9	9	10	8	10	10	11	10.5	10	8	7	6
MEDIA	-0.4	1	2.7	5	6.9	7.4	7.9	7.3	5.9	3.5	1	0.4
DESV.ST	3.1	2.8	2.7	2	1.4	1.5	1.3	1.5	1.9	2.4	2.5	2.8

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2014	11.7	15.6	17.6	18.8	16.3	16.9	16.6	16.3	16.4	14.9	14.5	13.8
2015	14.1	14.1	16.7	18.8	17.8	16.8	16.7	16.5	16.4	15.8	13.3	13.1
2016	15.2	15.5	15.9	17.9	19.6	16.8	16.2	16.5	15.2	14.7	13.6	13.9
2017	13.5	14	14.6	17.4	18.5	17.9	16.6	17.2	15.2	14.9	12.3	12.2
2018	10.8	13.4	16.2	17.4	18.5	17.9	16.6	17.2	15.2	14.8	13.6	14
2019	13.6	13.4	14.6	17.3	19.7	18.2	16.7	17.1	16.9	15.3	14.8	12.2
2020	11.3	13.8	17	19.5	18.3	17.2	17.4	16.8	15.4	17.8	16.7	15.5
2021	12.7	13.4	16.9	17.6	17.6	15.8	16	16.6	15.9	15.2	11.9	12.6
2022	12.7	12.8	15.4	17.8	18.8	17	17.4	16.9	15.3	14.8	14.6	11.7
2023	12	12.5	16.3	18	18.6	20.6	18.2	17.2	17.7	15.9	14.4	12.1
MÍNIMA	9	11.5	13	12.8	13.1	13.7	13.8	13.5	13.6	13	10.7	11
MÁXIM A	18.6	19	18.9	21.9	22.1	20.6	19.5	19.6	18.5	17.8	20	16.8
MEDIA	12.8	14	15.9	17.8	18.4	17.8	16.8	16.7	16	15	13.8	13.1
DESV.ST	1.8	1.6	1.4	1.5	1.4	1.1	1	0.9	1	1.2	1.6	1.2

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

COORDINACIÓN GENERAL DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

BASE DE DATOS CLIMATOLÓGICA NACIONAL

ESTADÍSTICA MENSUAL

EMISIÓN: 14/03/2025

DATOS DISPONIBLES EN LA BASE DE DATOS A: MARCH DE 2025;

CON LA INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR LAS UNIDADES ADMINISTRATIVAS

ESTACIÓN: 22028

NOMBRE: GALINDO

ESTADO: QUERÉTARO

MUNICIPIO: SAN JUAN DEL RÍO

SITUACIÓN: OPERANDO

CVE-OMM

LATITUD: 20.39305556 °

LONGITUD: -100.0941667 °

ALTITUD: 1937 msnm

LLUVIA MÁXIMA 24H												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	3	22.5	63.8	19.1	41	75.3	35	35.7	42	6.6	7	12
2016	18.2	2.4	10.1	60	2	16.8	40	46.5	43.5	5	0	0
2017	0	0	13.2	3	14.5	35	38.5	41	53	3.3	0.9	0
2018	1	2	1	8	32.6	60	28.3	15.5	51	28.8	14	0

2019	3	2	0	3	2	43	0	15	32	20	7	16
2020	16	9	14	4	8	14	20	22.8	57.2	35	2.8	5
2021	2	0.01	0.01	52	71	31	18	50	53	20.8	0.01	1
2022	0.01	3	0.8	3	1.5	8	24.8	27.7	25	40	8	8
2023	9	0	1.5	12.5	22	7	30	47	15	33	9.9	10
2024	4	7.5	0	0.01								
MÍNIMA	0	0	0	0	1.5	7	0	7.5	5.5	0	0	0
MÁXIMA	25.8	22.5	63.8	60	71	75.3	80	53.2	72.5	87	44.5	18.3
MEDIA	6.2	4	5.7	13	21.3	32.9	36.8	31.2	34.3	20.8	8.1	3.9
DESV.ST	7.6	5.9	11.1	14.9	15.8	17.8	16.1	12	16.6	16.7	11.1	4.9

LLUVIA TOTAL MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	5.5	27.7	106.1	34.7	146.9	232.9	160.5	84.1	76.6	19.5	9	18.3
2016	20.5	2.4	13.6	73.4	2.01	28.3	104.3	192.6	91	8.72	0	0
2017	0	0	30.2	4.53	41.05	142.8	128.95	116.73	229.45	10.11	0.92	0
2018	1.03	5.23	1	20	51.7	203.72	65.31	100.53	145.03	69.02	51.2	0
2019	3	2	0	4.53	2.01	82.92	0	46.24	59.41	63.52	15.01	17
2020	19.01	10	33.7	7.01	14.52	43.62	102.51	58.43	80.03	35	2.82	7.8
2021	4.11	0.02	0.01	52.83	157.7	155.32	50.43	163.72	286.42	30.24	0.02	1.02
2022	0.01	3	0.8	7.01	1.53	16.72	60.24	114.02	53.45	85.92	28.11	17
2023	9	0	3.22	17.03	74.55	8.71	88.32	129.93	16	64.92	32.44	35.61
2024	4	7.5	0	0.03								
MÍNIMA	0	0	0	0	1.53	8.71	0	11.4	16	0	0	0
MÁXIMA	53.9	67	106.1	73.4	157.7	257.2	300.4	195.71	311.23	163.9	63.22	38.6
MEDIA	9.6	7.1	10	22.7	48.5	106	134.2	114.2	104.7	48.4	14.9	6.4
DESV.ST	13.3	12.9	19.5	20.8	38.8	66.4	63.4	48.6	72.1	38	18.8	9.7

EVAPORACION MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	150.81	120.2	146.06	164.6	175.67	196.24	160.31	123.41	123.32	122.31	118.77	106.03
2016	100.9	118.3	153.5	174.5	189.7	175.59	102.74	158.07	124.1	169.04	127.22	75.7
2017	103.6	122	154.1	166	165.8	182.7	149.2	144.1	129.7	114.8	119.7	113
2018	85.2	79.1	144.9	165	159.5	153.1	161.8	128.3	150.8	92.4	90.7	85.3
2019	100.9	108.8	167.3	119.5	242.07	152.1	132.4	157.2	130.3	122.3	97	102.9
2020	92.3	121	156.9	191.3	203.4	174.49	103.39	137.15	130.9	137	110.9	100
2021	120.3	144.56	172.95	168.3	188.7	124.4	118.9	144.2	106.2	153.5	93.8	94.2
2022	103.6	125.66	179.7	205	147.5	171.1	173.4	149	116.4	27.82	92.4	106.2
2023	43.1		3.2	17	33.2	1.7	34.3	57.7	29.46	39.85	39.9	37.82
2024	13.63	18.11	11.47	18.87								
MÍNIMA	13.63	18.11	3.2	17	33.2	1.7	34.3	57.7	29.46	27.82	39.9	37.82
MÁXIMA	150.81	155.98	275.2	267.2	242.07	218.7	186.3	168.2	153.2	169.04	137.2	117
MEDIA	103.1	125.5	176.7	182.5	192	163.9	143.1	144.1	122.8	115.8	103	95.6
DESV.ST	25.7	27	51.4	52	37.7	37.2	30	20.1	24.2	29.4	17.9	15.2

TEMPERATURA MAXIMA PROMEDIO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC

2012	25.2	24.7	29.6	31.2	32.1							
2015	25.1	26.2	26.5	30.9	29.9	28.5	27.2	28.8	28.8	29.6	27.3	25
2016	22.5	25.4	28.3	30	28.2	27.7	27.6	25.6	27.4	27.8	25.6	23.5
2017	26.4	28.3	28.6	31.7	33.1	31.5	27.5	28.5	26.3	26	27.9	26
2018	23.9	27.1	31.5	31.4	32	28.2	28.7	27.8	27.8	26.1	24.6	25.5
2019	25.8	29.5	31	31.7	34.1	30.6	27.4	30	28.7	27.4	27.3	25.5
2020	24.8	27.7	31.1	33.8	32.4	31.1	29.6	28.6	27.8	28.8	27.6	26.4
2021	26.3	28.8	31.9	32.4	29.9	27.1	27.6	27.8	25.8	26.8	26.1	26.9
2022	31.2	27.6	28.6	31.7	34.1	31.5	27.6	30	26.1	27	28	25.8
2023	27.1	28.3	32	32.7	32.2	35.7	30.4	28.7	31.3	26.7	26.7	21.9
2024	26.2	29.3	33	34								
MÍNIMA	20.4	21.7	25.8	25.7	28.2	25.5	23.5	24.2	22.2	22.2	20.1	21.2
MÁXIMA	31.2	29.5	33	34	35.1	35.7	30.4	30	31.3	29.6	28	26.9
MEDIA	24.4	26.2	29.1	30.8	30.9	28.8	26.9	27.1	26.4	25.9	25.4	24.1
DESV.ST	2.1	1.8	1.7	1.9	1.9	2.4	1.7	1.5	1.7	1.7	1.6	1.4

TEMPERATURA MAXIMA EXTREMA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2012	29	30	32	35	36							
2015	28	31	32	34	34	33	31	31	32	32	31	29
2016	26	28	33	33	35	33	36	29	30	31	29	25
2017	30	32	32	35	36	36	36	32	31	31	31	30
2018	30	31	34	34	38	36	32	30	30	30	30	29
2019	29	34	35	35	36	35	36	32	31	30	30	29
2020	29	32	36	37	36	36	32	32	31	31	32	30
2021	30	32	34	36	33	33	31	31	28	31	29	29
2022	36	32	32	35	36	36	36	32	30	31	31	30
2023	30	32	35	36	36	38	32	32	34	31	33	27
2024	30	34	36	36								
MÍNIMA	26	28	30	31.5	32	29.5	27	27.5	27	27	26	25
MÁXIMA	36	34	36	37	39	38	36	32	34	32	33	30
MEDIA	28.4	30.2	32.8	34.3	35	33.3	30.8	29.8	29.7	29.8	29.1	27.9
DESV.ST	1.9	1.6	1.6	1.4	1.7	2.4	2.6	1.5	1.6	1.3	1.7	1.4

TEMPERATURA MINIMA PROMEDIO												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2012	5.3	8	9	8.8	11.1							
2015	6.7	7.5	10.3	12.5	13.8	13.5	13.7	13.5	14.3	15.5	11	8.2
2016	6.3	8	8.4	8.7	11.9	9.4	10.5	11.7	11.9	9.1	9.8	8.4
2017	5.4	7.1	9.5	11	15.1	14.8	15	14.8	14.1	11.9	6.7	4.9
2018	4.1	9.3	10.8	11.8	13.7	14.9	13.9	14.5	14.7	14	9.5	5.5
2019	6.4	9.3	10.3	11	15	15.3	15.1	14.4	14.2	13.8	11.7	6.3
2020	6.9	8.3	11.3	14.8	13.9	14.7	15.2	15.2	13.3	8.8	8.1	6.5
2021	5.9	6.4	9.4	11.9	13.6	15.1	14.5	14.5	14.3	12.5	6.8	5.6
2022	14.8	8.4	9.5	11	15	14.8	15	14.4	13.3	11.4	11.3	6.8
2023	5.4	7.4	10.6	13.1	14.5	15.7	16.1	15	13.7	13.9	9.7	8.2
2024	7.8	7.4	9.8	13.3								

MÍNIMA	2.5	3.1	5.4	8.7	11.1	9.4	10.5	11.7	10.7	7.3	4.8	3.2
MÁXIMA	14.8	9.3	11.3	14.8	15.1	15.7	16.1	15.2	14.9	15.5	11.7	8.4
MEDIA	5.4	6.6	9	11.1	13	13.8	13.5	13.3	12.9	11	8.2	5.9
DESV.ST	2	1.4	1.1	1.2	1	1.2	1.2	0.9	1.1	1.8	1.7	1.3

TEMPERATURA MINIMA EXTREMA												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2012	1	4	5	4	8							
2015	4	3	4	9	11	10	11	11	11	9	7	6
2016	1	5	7	7	6	7	8	8	9	5	2	6
2017	1	3	5	7	11	12	12	12	7	5	1	-3
2018	-1	4	7	7	10	12	11	13	12	12	2	0
2019	1	6	6	7	11	11	12	12	11	11	10	1
2020	-1	4	6	12	11	9	13	12	5	4	5	1
2021	1	0	4	5	12	12	11	11	12	8	3	1
2022	9	4	5	7	11	12	12	12	9	6	7	3
2023	1	1	3	10	11	13	11	11	11	6	5	3
2024	5	3	1	8								
MÍNIMA	-4	-3.5	-2	3	6	6	6.5	8	2	-0.5	-2	-5
MÁXIMA	9	6	7	12	12	13	13	13	12.5	12	10	6
MEDIA	0.5	1.9	3.8	6.9	9.5	10.3	10.3	10.3	8.7	6	3	1
DESV.ST	2.6	2.2	2.2	2.2	1.6	1.7	1.4	1.3	2.7	2.6	2.7	2.5

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2012	15.2	16.4	19.3	20	21.6							
2015	15.9	16.9	18.4	21.7	21.9	21	20.4	21.1	21.6	22.6	19.1	16.6
2016	14.4	16.7	18.4	19.4	20	18.6	19	18.6	19.6	18.4	17.7	15.9
2017	15.9	17.7	19	21.4	24.1	23.1	21.2	21.6	20.2	19	17.3	15.4
2018	14	18.2	21.1	21.6	22.9	21.6	21.3	21.1	21.2	20	17	15.5
2019	16.1	19.4	20.6	21.4	24.6	23	21.2	22.2	21.4	20.6	19.5	15.9
2020	15.9	18	21.2	24.3	23.1	22.9	22.4	21.9	20.6	18.8	17.9	16.4
2021	16.1	17.6	20.6	22.1	21.8	21.1	21	21.1	20	19.6	16.4	16.2
2022	23	18	19	21.4	24.6	23.1	21.3	22.2	19.7	19.2	19.6	16.3
2023	16.2	17.9	21.3	22.9	23.4	25.7	23.2	21.9	22.5	20.3	18.2	15
2024	17	18.4	21.4	23.6								
MÍNIMA	12.4	13.6	15.9	17.4	20	18.6	17.7	18.6	17.2	16.2	14.2	13.2
MÁXIMA	23	19.4	21.4	24.3	24.6	25.7	23.2	22.2	22.5	22.6	19.6	16.6
MEDIA	14.9	16.4	19	20.9	22	21.3	20.2	20.2	19.6	18.4	16.8	15
DESV.ST	1.8	1.4	1.2	1.4	1.2	1.5	1.1	1	1.2	1.4	1.4	0.9

**ANEXO III: METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE
THORNTHWAITE.**

Índice de Thornthwaite

Año: 2014						
Estación	Nombre	Municipio	Estado	Elev.	longitud	Latitud
22067	La Venta	P. Escobedo	Querétaro	1906	100°11'15.15"	20°29'10.10"
22058	Santa Teresa	Humilpan	Querétaro	2092	100°18'12.12"	20°29'31.31"
22029	Humilpan	Humilpan	Querétaro	2271	100°16'50.50"	20°23'02.2"
22028	Galindo	San Juan del Rio	Querétaro	1937	100°05'39.39"	20°23'35.35"

Temperatura mínima media

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom. Anual	Mín. anual
La Venta Santa Teresa Humilpan Galindo	3.4	5.9	8.4	9.8	7.0	9.8	10.1	9.8	9.8	8.0	7.0	4.1	7.8	3.4

Temperatura máxima media

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom. Anual	Mín. anual
La Venta Santa Teresa Humilpan Galindo	20.0	25.4	26.9	27.7	25.6	24.0	23.1	22.8	23.0	21.9	22.0	23.5	23.8	27.7

Temperatura media (TMM)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom. Anual
La Venta Santa Teresa Humilpan Galindo	11.7	15.60	17.60	18.80	16.30	16.90	16.60	16.30	16.40	14.90	14.50	13.80	15.783

$$ETP_{sin\ correjir} = 16 * \left(\frac{10 * TMM}{I} \right)^a \quad I = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$a = 675 \times 10^{-9} * I^3 - 771 \times 10^{-7} * I^2 + 1792 \times 10^{-5} * I + 0.49239$$

a	1.579
---	-------

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Nº Días	31.0	28.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0
Promedio (TMM)	11.7	15.6	17.6	18.8	16.3	16.9	16.6	16.3	16.4	14.9	14.5	13.8
	3.622	5.600	6.721	7.427	5.98	6.32	6.15	5.98	6.04	5.22	5.01	4.65

Índice de calor mensual													
Índice de calor anual I	68.739												
ETP sin corregir	37.057	58.366	70.614	78.365	62.555	66.230	64.383	62.555	63.163	54.28	52.001	48.093	

Horas de sol (N)

Mes	Lat	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas de sol (N)	25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
	20.38	10.97	11.48	12.00	12.60	13.11	13.33	13.22	12.81	12.30	11.69	11.176	10.87
Norte	20.00	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20	10.90

Evapotranspiración Corregida (ETP corregida) mm

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETP corregido	35.02	52.13	72.96	82.33	70.64	73.57	73.31	69.03	64.74	54.65	48.43	45.04

Numero de lluvias

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta													265.00
Santa Teresa													
Humilpan Galindo	1.50	0.00	7.50	9.50	30.10	27.50	40.50	28.00	46.00	69.00	4.00	1.40	

Precipitación (mm)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta													687.50
Santa Teresa													
Humilpan Galindo	1.50	0.00	12.50	24.00	55.20	160.10	140.00	85.80	100.40	95.00	11.00	2.00	

A, DEF y EXC (primera iteración)

	100.0 0	66.47	14.33	0.00	0.00	0.00	86.52	100.0 0	100.0 0	100.0 0	100.0 0	62.56
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC

Precipitación promedio (mm/mes)	1.50	0.00	12.50	24.00	55.20	160.10	140.00	85.80	100.40	95.00	11.00	2.00
ETP Corregida (mm)	35.03	52.14	72.97	82.33	70.65	73.58	73.31	69.03	64.74	54.66	48.44	45.05
Balance Bi=A(i-1) +Pi-ETPi	-14.01	-52.14	-60.47	-58.33	-15.45	86.52	153.21	116.77	135.66	140.34	62.56	19.52
Ai (pasada 1)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	86.52	100.00	100.00	100.00	100.00	62.56	19.52
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.21	16.77	35.66	40.34	0.00	0.00
DEFi	14.01	52.14	60.47	58.33	15.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Seguir Iterando Para Encontrar el Balance Hídrico

$$B_i = A_{i-1} + P_i - ETP_i \quad A_{i-1} = 0mm$$

$$EXC_1 = 0mm \quad A_{MAX} = 100mm$$

$$A_{i-1} = 0mm$$

NAF

A, DEF y EXC (Segunda iteración), DEF y EXC (Segunda iteración)

	19.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	86.5	100.0	100.0	100.0	100.0	62.5
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	1.50	0.00	12.50	24.00	55.20	160.10	140.00	85.80	100.40	95.00	11.00	2.00
ETP Corregida (mm)	35.03	52.14	72.97	82.33	70.65	73.58	73.31	69.03	64.74	54.66	48.44	45.05
Balance Bi=A(i-1) + Pi-ETPi	-14.01	-52.14	-60.47	-58.33	-15.45	86.52	153.21	116.77	135.66	140.34	62.56	19.52
Ai (pasada 1)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	86.52	100.00	100.00	100.00	100.00	62.56	19.52
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.21	16.77	35.66	40.34	0.00	0.00
DEFi	14.01	52.14	60.47	58.33	15.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Se Encontró el Balance Hídrico

Evapotranspiración potencial anual (mm)

$$ETP = \sum_{i=1}^{12} ETP(\text{corregida})_i$$

Exceso de agua anual (mm)

741.91

El índice de Thornthwaite (TMI) es una combinación de humedad (I_h) y del índice de aridez (I_a), calculados de acuerdo con las siguientes expresiones.

$$I_h = \frac{EXC}{ETP} \times 100$$

19.68

$$ETP = \sum_{i=1}^{12} ETP(\text{corregida})_i$$

145.98

$$I_a = \frac{DEF}{ETP} \times 100$$

27.01

Déficit de agua anual (mm)

$$EXC = \sum_{i=1}^{12} EXC_i$$

200.39

$$TMI = I_h - 0.61I_a$$

3.20

Año: 2015

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Nº Días	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Promedio (TMM)	14.58	16.20	17.95	19.90	19.48	18.48	17.53	18.90	17.80	14.05	12.58	11.23
Índice de calor mensual	5.05	5.93	6.92	8.10	7.83	7.23	6.68	7.49	6.84	4.78	4.04	3.40
Índice de calor anual I	74.29											
ETP sin corregir	49.47	59.05	70.12	83.34	80.38	73.59	67.36	76.44	69.14	46.52	38.63	31.94

Horas de sol (N)

Mes	Lat	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas de sol (N)	25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
	20.39	10.98	11.48	12.00	12.61	13.12	13.33	13.22	12.82	12.30	11.69	11.18	10.88
	Norte	20.00	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20

Evapotranspiración Corregida (ETP corregida) mm

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETP corregido	46.76	52.74	72.45	87.56	90.78	81.75	76.70	84.36	70.87	46.84	35.98	29.91

Numero de lluvias

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	18.20	2.40	10.10	60.00	22.70	16.80	40.00	46.50	43.50	0.00	0.00	0.00	260.20

Análisis del Comportamiento del Módulo de Resiliencia en Suelos No Saturados bajo Variaciones Climáticas
Utilizando el Índice de Thornthwaite.

Santa Teresa	0.00	6.00	10.00	18.00	10.00	8.00	5.00	20.00	10.00	12.00	10.00	10.00	119.00
Humilpan	0.00	6.00	10.00	18.00	10.00	8.00	5.00	20.00	10.00	12.00	10.00	10.00	119.00
Galindo	3.00	22.50	63.80	19.10	41.00	75.30	35.00	35.70	42.00	6.60	7.00	12.00	363.00

Precipitación (mm)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	20.50	2.40	13.60	73.40	135.80	28.30	104.30	192.60	91.00	0.00	0.00	0.00	661.90
Santa Teresa	0.00	9.00	10.00	35.00	11.50	25.70	23.00	44.00	53.00	12.00	49.00	17.50	289.70
Humilpan	9.00	14.90	110.10	28.30	94.10	128.90	96.90	85.00	96.30	60.50	25.90	6.90	756.80
Galindo	5.50	27.70	106.10	34.70	146.90	232.90	160.50	84.10	76.60	19.50	9.00	18.30	921.80

A, DEF y EXC (primera iteración)

	100.0	62.2	24.4	62.0	2.8	6.1	53.3	73.5	74.1	99.5	100.0	89.9
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	9.00	14.90	110.10	28.30	94.10	128.90	96.90	85.00	96.30	60.50	25.90	6.90
ETP Corregida (mm)	46.76	52.74	72.45	87.56	90.78	81.75	76.70	84.36	70.87	46.84	35.98	29.91
Balance $B_i = A(i-1) + P_i - ETP_i$	62.24	24.40	62.05	2.79	6.11	53.26	73.46	74.10	99.53	113.19	89.92	66.91
A_i (pasada 1)	62.24	24.40	62.05	2.79	6.11	53.26	73.46	74.10	99.53	100.00	89.92	66.91
EXC _i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.19	0.00	0.00
DEF _i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Seguir Iterando Para Encontrar el Balance Hídrico

A, DEF y EXC (Segunda iteración), DEF y EXC (Segunda iteración)

	66.9	29.2	0.0	37.6	0.0	3.3	50.5	70.7	71.3	96.7	100.0	89.9
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	9.00	14.90	110.10	28.30	94.10	128.90	96.90	85.00	96.30	60.50	25.90	6.90
ETP Corregida (mm)	46.76	52.74	72.45	87.56	90.78	81.75	76.70	84.36	70.87	46.84	35.98	29.91
Balance $B_i = A(i-1) + P_i - ETP_i$	29.15	-8.69	37.65	-21.61	3.32	50.47	70.67	71.31	96.74	110.41	89.92	66.91
A_i (pasada 1)	29.15	0.00	37.65	0.00	3.32	50.47	70.67	71.31	96.74	100.00	89.92	66.91
EXC _i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.41	0.00	0.00
DEF _i	0.00	8.69	0.00	21.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Se Encontró el Balance Hídrico

$$TMI = I_h - 0.61I_a$$

-1.04

Año: 2016

Temperatura mínima media

Nomb re	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom. Anual	Mín. anual
La Venta	0.0	7.6	7.6	10.4	10.9	11.7	11.9	11.7	10.3	7.7	7.5	7.2	8.7	0.0
Santa Teresa	6.9	8.3	13.1	12.3	12.5	12.8	10.8	12.2	12.7	11.6	9.4	8.9	11.0	6.9
Humil pan	6.9	6.9	7.4	7.9	9.9	9.6	9.4	9.4	7.6	6.9	5.4	4.5	7.7	4.5
Galin do	6.3	8	8.4	8.7	11.9	9.4	10.5	11.7	11.9	9.1	9.8	8.4	9.5	6.3

Temperatura máxima media

Nomb re	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom. Anual	Mín. anual
La Venta	0.0	24.9	24.1	25.0	26.4	26.6	25.1	24.4	23.8	21.7	22.7	23.8	22.4	26.6
Santa Teres a	22.3	23.9	24.8	26.1	27.9	24.8	22.9	24.2	23.7	25.8	24.3	24.5	24.6	27.9
Humil pan	23.5	24.1	24.4	27.9	29.4	24.0	23.1	23.6	22.9	22.5	21.7	23.4	24.2	29.4
Galin do	22.5	25.4	28.3	30.0	28.2	27.7	27.6	25.6	27.4	27.8	25.6	23.5	26.6	30.0

Temperatura media (TMM)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Prom. Anual
La Venta	0.00	16.20	15.90	17.70	18.60	19.10	18.50	18.00	17.00	14.70	15.10	15.50	15.53
Santa Teresa	14.60	16.10	19.00	19.20	20.20	18.80	16.90	18.20	18.20	18.70	16.90	16.70	17.79
Humilpan	15.20	15.50	15.90	17.90	19.60	16.80	16.20	16.50	15.20	14.70	13.60	13.90	15.92
Galindo	14.40	16.70	18.40	19.40	20.00	18.60	19.00	18.60	19.60	18.40	17.70	15.90	18.06

a 1.702

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Nº Días	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Promedio (TMM)	11.05	16.13	17.30	18.55	19.60	18.33	17.65	17.83	17.50	16.63	15.83	15.50
Índice de calor mensual	3.32	5.89	6.55	7.28	7.91	7.15	6.75	6.85	6.66	6.17	5.72	5.55
Índice de calor anual I	75.79											
ETP sin corregir	30.39	57.81	65.16	73.38	80.58	71.87	67.42	68.56	66.45	60.90	55.99	54.05

Horas de sol (N)

Mes	Lat	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas de sol (N)	25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
	10.97	11.48	12.00	12.61	13.12	13.34	13.23	12.82	12.30	11.69	11.17	10.87	10.97
	Norte	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20	10.90	11.00

Evapotranspiración Corregida (ETP corregida) mm

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETP corregido	28.71	51.62	67.34	77.11	91.04	79.89	76.81	75.69	68.11	61.30	52.12	50.60

Numero de lluvias

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta		29.00	2.00	5.00	8.00	8.00	86.00	40.50	25.60	13.40	5.00	7.00	229.50
Santa Teresa	8.00	0.00	17.00	5.00	15.00	21.00	60.00	40.00	10.00	9.00	15.00	5.00	205.00
Humilpan	4.30	0.00	18.50	4.60	15.60	35.50	13.70	37.50	24.70	13.00	11.60	4.30	183.30
Galindo	18.20	2.40	10.10	60.00	2.00	16.80	40.00	46.50	43.50	5.00	0.00	0.00	244.50

Precipitación (mm)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	3.30	28.20	26.00	71.70	132.10	131.10	125.30	69.30	38.80	30.30	6.50	662.60
Santa Teresa	16.00	0.00	59.00	9.00	42.00	122.60	121.50	322.00	70.00	20.00	25.00	8.00	815.10
Humilpan	5.40	0.00	18.50	4.60	15.60	35.50	13.70	37.50	24.70	13.00	11.60	4.30	184.40
Galindo	20.50	2.40	13.60	73.40	2.01	28.30	104.30	192.60	91.00	8.72	0.00	0.00	536.83

A, DEF y EXC (primera iteración)

	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	52.2	100.0	100.0	100.0	77.5	55.7
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	0.00	3.30	28.20	26.00	71.70	132.10	131.10	125.30	69.30	38.80	30.30	6.50
ETP Corregida (mm)	28.71	51.62	67.34	77.11	91.04	79.89	76.81	75.69	68.11	61.30	52.12	50.60
Balance Bi=A(i-1)+Pi-ETPi	-28.71	-48.32	-39.14	-51.11	-19.34	52.21	106.50	149.61	101.19	77.50	55.67	11.58
Ai (pasada 1)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.21	100.00	100.00	100.00	77.50	55.67	11.58
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.50	49.61	1.19	0.00	0.00	0.00
DEFi	28.71	48.32	39.14	51.11	19.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Seguir Iterando Para Encontrar el Balance Hídrico

A, DEF y EXC (Segunda iteración), DEF y EXC (Segunda iteración)

	11.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	52.2	100.0	100.0	100.0	77.5	55.7
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	0.00	3.30	28.20	26.00	71.70	132.10	131.10	125.30	69.30	38.80	30.30	6.50
ETP Corregida (mm)	28.71	51.62	67.34	77.11	91.04	79.89	76.81	75.69	68.11	61.30	52.12	50.60
Balance $B_i = A(i-1) + P_i - ETP_i$	-17.13	-48.32	-39.14	-51.11	-19.34	52.21	106.50	149.61	101.19	77.50	55.67	11.58
A_i (pasada 1)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.21	100.00	100.00	100.00	77.50	55.67	11.58
EXC _i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.50	49.61	1.19	0.00	0.00	0.00
DEF _i	17.13	48.32	39.14	51.11	19.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Se Encontró el Balance Hídrico

-6.34

Año: 2017

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
N° Días	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Promedio (TMM)	10.70	16.40	17.38	20.48	22.45	21.20	18.80	19.25	17.50	17.33	17.05	13.80
Índice de calor mensual	3.16	6.04	6.59	8.45	9.72	8.91	7.43	7.70	6.66	6.56	6.41	4.65
Índice de calor anual I	82.28											
ETP sin corregir	25.81	56.18	62.41	84.15	99.51	89.65	72.04	75.21	63.23	62.08	60.30	41.03

Horas de sol (N)

Mes	Lat	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
Horas de sol (N)	20.49	10.97	11.48	12.00	12.61	13.12	13.34	13.23	12.82	12.30	11.69	11.17	10.87
Norte	20.00	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20	10.90

Evapotranspiración Corregida (ETP corregida) mm

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Análisis del Comportamiento del Módulo de Resiliencia en Suelos No Saturados bajo Variaciones Climáticas
Utilizando el Índice de Thornthwaite.

ETP corregido	24.39	50.16	64.49	88.43	112.42	99.66	82.07	83.02	64.81	62.49	56.13	38.40
------------------	-------	-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Numero de lluvias

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	13.70	7.30	9.00	1.20	17.60	4.20	1.40	0.00	54.40
Santa Teresa	0.00	10.00	10.00	0.00	7.00	0.00	25.00	20.00	65.00	5.00	3.00	0.00	145.00
Humilpan	0.01	0.01	7.30	5.60	10.60	18.00	52.00	16.00	69.00	7.40	0.01	0.00	185.93
Galindo	0.00	0.00	13.20	3.00	14.50	35.00	38.50	41.00	53.00	3.30	0.90	0.00	202.40

Precipitación (mm)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	15.10	17.10	42.70	4.40	65.70	4.80	1.40	0.00	151.20
Santa Teresa	0.00	10.00	21.00	0.00	7.00	0.00	184.30	72.00	204.00	17.00	5.00	0.00	520.30
Humilpan	0.70	2.00	20.90	17.70	29.60	83.20	107.90	92.20	168.00	67.40	1.30	1.80	592.70
Galindo	0.00	0.00	30.20	4.53	41.05	142.80	128.95	116.73	229.45	10.11	0.92	0.00	704.74

A, DEF y EXC (primera iteración)

	100.0	76.3	28.2	0.0	0.0	0.0	0.0	25.8	35.0	100.0	100.0	45.2
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	0.70	2.00	20.90	17.70	29.60	83.20	107.90	92.20	168.00	67.40	1.30	1.80
ETP Corregida (mm)	24.39	50.16	64.49	88.43	112.42	99.66	82.07	83.02	64.81	62.49	56.13	38.40
Balance $B_i = A(i-1) + P_i - ETP_i$	76.31	28.15	-15.43	-70.73	-82.82	-16.46	25.83	35.01	138.20	104.91	45.17	8.57
A_i (pasada 1)	76.31	28.15	0.00	0.00	0.00	0.00	25.83	35.01	100.00	100.00	45.17	8.57
EXC _i	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.20	4.91	0.00	0.00
DEF _i	0.00	0.00	15.43	70.73	82.82	16.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

A, DEF y EXC (Segunda iteración), DEF y EXC (Segunda iteración)

	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.8	35.0	100.0	100.0	45.2
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	0.70	2.00	20.90	17.70	29.60	83.20	107.90	92.20	168.00	67.40	1.30	1.80
ETP Corregida (mm)	24.39	50.16	64.49	88.43	112.42	99.66	82.07	83.02	64.81	62.49	56.13	38.40
Balance $B_i = A(i-1) + P_i - ETP_i$	-15.12	-48.16	-43.59	-70.73	-82.82	-16.46	25.83	35.01	138.20	104.91	45.17	8.57

Ai (pasada 1)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25.83	35.01	100.00	100.00	45.17	8.57
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.20	4.91	0.00	0.00
DEFi	15.12	48.16	43.59	70.73	82.82	16.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Se Encontró el Balance Hídrico

$$TMI = I_h - 0.61I_a$$

-15.50

Año: 2018

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
N° Días	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Promedio (TMM)	12.48	16.43	19.18	20.20	21.15	20.20	19.18	19.68	18.35	17.73	16.15	15.88
Índice de calor mensual	3.99	6.05	7.65	8.28	8.88	8.28	7.65	7.96	7.16	6.79	5.90	5.75
Índice de calor anual I	84.35											
ETP sin corregir	33.14	55.28	73.73	81.23	88.48	81.23	73.73	77.35	67.94	63.70	53.57	51.89

Horas de sol (N)

Mes	Lat	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas de sol (N)	25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
	20.38	10.98	11.48	12.00	12.61	13.12	13.33	13.22	12.82	12.30	11.69	11.18	10.88
Norte	20.00	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20	10.90

Evapotranspiración Corregida (ETP corregida) mm

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETP corregido	31.32	49.38	76.19	85.35	99.93	90.24	83.96	85.36	69.64	64.13	49.90	48.60

Numero de lluvias

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.30	0.00	0.00	5.20	0.00	7.10	8.30	2.40	10.90	0.00	0.00	0.00	34.20
Santa Teresa	0.00	10.00	0.00	8.00	20.00	20.00	11.00	30.00	50.00	30.00	15.00	10.00	204.00
Humilpan	0.90	9.50	0.00	56.00	10.60	18.00	52.00	16.00	69.00	10.00	11.60	4.30	257.90
Galindo	1.00	2.00	1.00	8.00	32.60	60.00	28.30	15.50	51.00	28.80	14.00	0.00	242.20
Precipitación (mm)													

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.30	0.00	0.00	5.20	0.00	17.10	37.70	5.40	58.40	0.00	0.00	0.00	124.10
Santa Teresa	0.00	15.00	0.00	8.00	57.00	138.00	68.00	83.00	238.00	63.00	79.00	15.00	764.00
Humilpan	0.91	9.50	0.00	56.00	10.60	18.00	52.00	16.00	69.00	10.00	11.60	4.30	257.91
Galindo	9.20	10.00	2.80	24.10	39.50	161.80	31.40	71.70	110.20	58.60	31.10	3.80	554.20

A, DEF y EXC (primera iteración)

	100.0	77.9	38.5	0.0	0.0	0.0	71.6	19.0	5.3	45.9	40.4	21.6
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	9.20	10.00	2.80	24.10	39.50	161.80	31.40	71.70	110.20	58.60	31.10	3.80
ETP Corregida (mm)	31.32	49.38	76.19	85.35	99.93	90.24	83.96	85.36	69.64	64.13	49.90	48.60
Balance Bi=A(i-1) +Pi-ETPi	77.88	38.50	-34.89	-61.25	-60.43	71.56	19.00	5.34	45.91	40.37	21.58	-23.22
Ai (pasada 1)	77.88	38.50	0.00	0.00	0.00	71.56	19.00	5.34	45.91	40.37	21.58	0.00
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFi												

Seguir Iterando Para Encontrar el Balance Hídrico

A, DEF y EXC (Segunda iteración), DEF y EXC (Segunda iteración)

	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	71.6	19.0	5.3	45.9	40.4	21.6
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	9.20	10.00	2.80	24.10	39.50	161.80	31.40	71.70	110.20	58.60	31.10	3.80
ETP Corregida (mm)	31.32	49.38	76.19	85.35	99.93	90.24	83.96	85.36	69.64	64.13	49.90	48.60
Balance Bi=A(i-1) + Pi-ETPi	-22.12	-39.38	-73.39	-61.25	-60.43	71.56	19.00	5.34	45.91	40.37	21.58	-23.22
Ai (pasada 1)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	71.56	19.00	5.34	45.91	40.37	21.58	0.00
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFi	22.12	39.38	73.39	61.25	60.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.22

Se Encontró el Balance Hídrico

$$TMI = I_h - 0.61I_a$$

-20.46

Año: 2019

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
N° Días	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Promedio (TMM)	16.78	18.40	19.05	19.88	22.80	22.05	17.45	18.95	18.00	18.18	17.80	14.85
Índice de calor mensual	6.25	7.19	7.58	8.08	9.95	9.46	6.63	7.52	6.95	7.06	6.84	5.20
Índice de calor anual I	88.70											
ETP sin corregir	55.31	66.21	70.84	76.93	100.50	94.16	59.72	70.12	63.44	64.64	62.07	43.63

Horas de sol (N)

Mes	Lat	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas de sol (N)	25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
	20.38	10.98	11.48	12.00	12.61	13.12	13.33	13.22	12.82	12.30	11.69	11.18	10.88
	20.00	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20	10.90

Evapotranspiración Corregida (ETP corregida) mm

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETP corregido	52.28	59.14	73.20	80.83	113.50	104.60	68.00	77.38	65.02	65.08	57.81	40.86

Numero de lluvias

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	0.00	0.00	1.00	1.80	0.00	3.80	16.60
Santa Teresa	0.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	5.00	10.00	10.00	15.00	30.00	22.00	112.00
Humilpan	0.01	8.30	5.00	4.00	14.80	31.50	40.00	39.50	48.00	23.50	2.80	14.80	232.21
Galindo	3.00	2.00	0.00	3.00	2.00	43.00	0.00	15.00	32.00	20.00	7.00	16.00	143.00

Precipitación (mm)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.90	0.00	0.00	3.60	6.50	0.00	5.50	26.50
Santa Teresa	0.00	0.00	10.00	0.00	11.50	0.00	23.00	66.00	53.00	40.00	45.20	22.00	270.70
Humilpan	0.02	11.10	14.10	6.30	25.32	103.90	127.10	125.62	103.41	81.72	2.82	15.10	616.51
Galindo	3.00	2.00	0.00	4.53	2.01	82.92	0.00	46.24	59.41	63.52	15.01	17.00	295.64

A, DEF y EXC (primera iteración)

	100.0	50.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	3.00	2.00	0.00	4.53	2.01	82.92	0.00	46.24	59.41	63.52	15.01	17.00
ETP Corregida (mm)	52.28	59.14	73.20	80.83	113.50	104.60	68.00	77.38	65.02	65.08	57.81	40.86
Balance Bi=A(i-1)+Pi-ETPi	50.72	-6.42	-73.20	-76.30	111.49	-21.68	-68.00	-31.14	-5.61	-1.56	-42.80	-23.86
Ai (pasada 1)	50.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFi	0.00	6.42	73.20	76.30	111.49	21.68	68.00	31.14	5.61	1.56	42.80	23.86

A, DEF y EXC (Segunda iteración), DEF y EXC (Segunda iteración)

	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	3.00	2.00	0.00	4.53	2.01	82.92	0.00	46.24	59.41	63.52	15.01	17.00
ETP Corregida (mm)	52.28	59.14	73.20	80.83	113.50	104.60	68.00	77.38	65.02	65.08	57.81	40.86
Balance Bi=A(i-1)+Pi-ETPi	-49.28	-57.14	-73.20	-76.30	-111.4	-21.68	-68.00	-31.14	-5.61	-1.56	-42.80	-23.86
Ai (pasada 1)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFi	49.28	57.14	73.20	76.30	111.49	21.68	68.00	31.14	5.61	1.56	42.80	23.86

Se Encontró el Balance Hídrico

$$TMI = I_h - 0.61I_a$$

-39.97

Año: 2020

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Nº Días	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Promedio (TMM)	10.45	12.18	19.75	22.50	21.23	20.33	20.15	19.50	18.50	18.08	17.10	15.98
Índice de calor mensual	3.05	3.85	8.00	9.75	8.92	8.36	8.25	7.85	7.25	7.00	6.43	5.80
Índice de calor anual I	84.52											
ETP sin corregir	23.76	31.59	77.82	99.23	89.01	82.10	80.79	76.00	68.90	65.98	59.50	52.41

Horas de sol (N)

Análisis del Comportamiento del Módulo de Resiliencia en Suelos No Saturados bajo Variaciones Climáticas
Utilizando el Índice de Thornthwaite.

Mes	Lat	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
Horas de sol (N)	10.98	11.48	12.00	12.61	13.12	13.33	13.22	12.82	12.30	11.69	11.18	10.88	10.98
Norte	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20	10.90	11.00

Evapotranspiración Corregida (ETP corregida) mm

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETP corregido	22.46	28.22	80.42	104.25	100.52	91.20	91.99	83.87	70.62	66.43	55.42	49.09

Numero de lluvias

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.80
Santa Teresa	9.00	20.00	11.00	0.00	8.50	8.00	70.00	42.00	20.00	12.00	0.00	8.00	208.50
Humilpan	8.60	16.50	24.00	13.30	2.90	32.00	73.70	87.30	20.60	34.00	0.00	3.00	315.90
Galindo	16.00	9.00	14.00	4.00	8.00	14.00	20.00	22.80	57.20	35.00	2.80	5.00	207.80

Precipitación (mm)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.40
Santa Teresa	11.00	22.00	17.50	0.00	14.40	25.70	139.30	95.50	59.00	12.00	0.00	11.00	407.40
Humilpan	23.70	12.50	19.30	17.20	34.40	66.40	83.30	58.60	70.30	13.40	6.60	1.30	407.00
Galindo	19.01	10.00	33.70	7.01	14.52	43.62	102.51	58.43	80.03	35.00	2.82	7.80	414.45

A, DEF y EXC (primera iteración)

	100.0	100.0	84.3	23.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	23.70	12.50	19.30	17.20	34.40	66.40	83.30	58.60	70.30	13.40	6.60	1.30
ETP Corregida (mm)	22.46	28.22	80.42	104.25	100.52	91.20	91.99	83.87	70.62	66.43	55.42	49.09
Balance Bi=A(i-1)+Pi-ETPi	101.24	84.28	23.16	-63.89	-66.12	-24.80	-8.69	-25.27	-0.32	-53.03	-48.82	-47.79
Ai (pasada 1)	100.00	84.28	23.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EXCi	1.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFi	0.00	0.00	0.00	63.89	66.12	24.80	8.69	25.27	0.32	53.03	48.82	47.79

Seguir Iterando Para Encontrar el Balance Hídrico

A, DEF y EXC (Segunda iteración), DEF y EXC (Segunda iteración)

	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	23.70	12.50	19.30	17.20	34.40	66.40	83.30	58.60	70.30	13.40	6.60	1.30
ETP Corregida (mm)	22.46	28.22	80.42	104.25	100.52	91.20	91.99	83.87	70.62	66.43	55.42	49.09
Balance Bi=A(i-1) + Pi-ETPi	1.24	-14.48	-61.12	-87.05	-66.12	-24.80	-8.69	-25.27	-0.32	-53.03	-48.82	-47.79
Ai (pasada 1)	1.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFi	0.00	14.48	61.12	87.05	66.12	24.80	8.69	25.27	0.32	53.03	48.82	47.79

Se Encontró el Balance Hídrico

$$TMI = I_h - 0.61I_a$$

-31.60

Año: 2021

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Nº Días	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Promedio (TMM)	15.38	16.90	19.68	20.38	20.55	20.08	19.15	19.45	18.58	17.93	15.18	15.28
Índice de calor mensual	5.48	6.32	7.96	8.39	8.50	8.20	7.64	7.82	7.29	6.91	5.37	5.42
Índice de calor anual I	85.30											
ETP sin corregir	48.40	57.81	76.93	82.15	83.48	79.90	73.12	75.29	69.05	64.58	47.23	47.81

Horas de sol (N)

Mes	Lat	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas de sol (N)	25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
	20.38	10.98	11.48	12.00	12.61	13.12	13.33	13.22	12.82	12.30	11.69	11.18	10.88
	20.00	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20	10.90

Evapotranspiración Corregida (ETP corregida) mm

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETP corregido	45.75	51.64	79.49	86.31	94.29	88.76	83.26	83.08	70.77	65.02	43.99	44.78

Numero de lluvias

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	1.80	0.00	7.00	1.80	0.00	3.80	24.40
Santa Teresa	23.00	0.00	0.00	3.20	34.00	34.00	31.00	85.00	62.50	100.30	10.00	0.00	383.00
Humilpan	5.30	0.00	0.00	0.50	27.30	66.00	32.80	40.60	60.40	33.70	5.20	0.30	272.10
Galindo	2.00	0.01	0.01	52.00	71.00	31.00	18.00	50.00	53.00	20.80	0.01	1.00	298.83

Precipitación (mm)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.90	6.80	0.00	14.60	6.50	0.00	5.50	44.30
Santa Teresa	42.00	0.00	0.00	7.60	110.70	127.20	56.60	150.00	120.00	95.00	12.30	0.00	721.40
Humilpan	5.80	0.00	0.00	0.53	83.00	197.01	105.72	200.61	311.10	48.60	5.20	0.30	957.87
Galindo	4.11	0.02	0.01	52.83	157.70	155.32	50.43	163.72	286.42	30.24	0.02	1.02	901.84

A, DEF y EXC (primera iteración)

	100.0	96.2	44.6	0.0	0.0	16.4	54.9	28.2	95.1	100.0	100.0	68.3
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	42.00	0.00	0.00	7.60	110.70	127.20	56.60	150.00	120.00	95.00	12.30	0.00
ETP Corregida (mm)	45.75	51.64	79.49	86.31	94.29	88.76	83.26	83.08	70.77	65.02	43.99	44.78
Balance Bi=A(i-1)+Pi-ETPi	96.25	44.61	-34.89	-78.71	16.41	54.86	28.20	95.12	144.35	129.98	68.31	23.53
Ai (pasada 1)	96.25	44.61	0.00	0.00	16.41	54.86	28.20	95.12	100.00	100.00	68.31	23.53
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.35	29.98	0.00	0.00
DEFi												

Seguir Iterando Para Encontrar el Balance Hídrico

A, DEF y EXC (Segunda iteración), DEF y EXC (Segunda iteración)

	23.5	19.8	0.0	0.0	0.0	16.4	54.9	28.2	95.1	100.0	100.0	68.3
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	42.00	0.00	0.00	7.60	110.70	127.20	56.60	150.00	120.00	95.00	12.30	0.00
ETP Corregida (mm)	45.75	51.64	79.49	86.31	94.29	88.76	83.26	83.08	70.77	65.02	43.99	44.78
Balance Bi=A(i-1)+Pi-ETPi	19.78	-31.86	-79.49	-78.71	16.41	54.86	28.20	95.12	144.35	129.98	68.31	23.53
Ai (pasada 1)	19.78	0.00	0.00	0.00	16.41	54.86	28.20	95.12	100.00	100.00	68.31	23.53
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.35	29.98	0.00	0.00
DEFi												

Se Encontró el Balance Hídrico

$$TMI = I_h - 0.61I_a$$

-4.97

Año: 2022

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
N° Días	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Promedio (TMM)	16.98	16.08	18.40	21.43	22.55	20.28	17.95	19.18	17.93	17.68	17.55	14.73
Índice de calor mensual	6.36	5.86	7.19	9.05	9.78	8.33	6.92	7.65	6.91	6.76	6.69	5.13
Índice de calor anual I	86.65											
ETP sin corregir	57.62	51.94	67.19	89.79	98.99	80.83	64.09	72.68	63.92	62.23	61.40	43.95

Horas de sol (N)

Mes	Lat	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas de sol (N)	25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
	20.38	10.98	11.48	12.00	12.61	13.12	13.33	13.22	12.82	12.30	11.69	11.18	10.88
	20.00	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20	10.90

Evapotranspiración Corregida (ETP corregida) mm

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETP corregido	54.47	46.40	69.43	94.34	111.80	89.80	72.98	80.21	65.52	62.66	57.19	41.16

Numero de lluvias

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80	5.10	29.00	0.00	1.80	37.70
Santa Teresa	0.90	1.50	0.30	0.30	0.20	18.20	19.40	33.00	21.00	30.10	20.30	5.20	150.40
Humilpan	0.00	0.01	0.00	2.40	3.30	10.50	36.70	61.30	29.50	11.80	4.30	2.30	162.11
Galindo	0.01	3.00	0.80	3.00	1.50	8.00	24.80	27.70	25.00	40.00	8.00	8.00	149.81

Precipitación (mm)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00	10.30	53.00	0.00	3.00	69.30

Análisis del Comportamiento del Módulo de Resiliencia en Suelos No Saturados bajo Variaciones Climáticas
Utilizando el Índice de Thornthwaite.

Santa Teresa	0.91	1.90	0.30	0.71	0.20	19.55	48.37	106.15	62.50	35.70	20.60	8.30	305.19
Humilpan	3.80	5.80	0.70	19.10	4.70	47.80	57.10	67.10	98.30	40.30	22.40	7.70	374.80
Galindo	0.01	3.00	0.80	7.01	1.53	16.72	60.24	114.02	53.45	85.92	28.11	17.00	387.81

A, DEF y EXC (primera iteración)

	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.8	10.4	0.0
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Precipitación promedio (mm/mes)	3.80	5.80	0.70	19.10	4.70	47.80	57.10	67.10	98.30	40.30	22.40	7.70	
ETP Corregida (mm)	54.47	46.40	69.43	94.34	111.80	89.80	72.98	80.21	65.52	62.66	57.19	41.16	
Balance Bi=A(i-1)+Pi-ETPi	-50.67	-40.60	-68.73	-75.24	107.10	-42.00	-15.88	-13.11	32.78	10.42	-24.36	-33.46	
Ai (pasada 1)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.78	10.42	0.00	0.00	
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
DEFi	50.67	40.60	68.73	75.24	107.10	42.00	15.88	13.11	0.00	0.00	24.36	33.46	

Seguir Iterando Para Encontrar el Balance Hídrico

Se Encontró el Balance Hídrico

$$TMI = I_h - 0.61I_a$$

-33.97

Año: 2023

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
N° Días	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Promedio (TMM)	14.70	16.40	19.65	21.30	21.68	23.98	20.85	19.80	20.35	18.43	16.83	13.95
Índice de calor mensual	5.12	6.04	7.94	8.97	9.21	10.73	8.69	8.03	8.37	7.20	6.28	4.73
Índice de calor anual I	91.32											
ETP sin corregir	41.46	51.60	74.08	87.04	90.13	110.27	83.40	75.21	79.45	65.13	54.31	37.33

Horas de sol (N)

Mes	Lat	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas de sol (N)	25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
	20.38	10.98	11.48	12.00	12.61	13.12	13.33	13.22	12.82	12.30	11.69	11.18	10.88
	20.00	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20	10.90

Evapotranspiración Corregida (ETP corregida) mm

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETP corregido	39.19	46.09	76.55	91.45	101.79	122.50	94.96	83.00	81.43	65.57	50.58	34.97

Numero de lluvias

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.40	30.60	22.40	41.00	4.60	3.30	114.80
Santa Teresa	0.00	0.00	0.70	2.30	32.70	7.00	29.70	36.60	24.40	73.80	9.10	9.80	226.10
Humilpan	7.00	0.00	9.50	2.70	20.00	23.00	46.50	28.30	21.60	39.50	3.40	15.50	217.00
Galindo	9.00	0.00	1.50	12.50	22.00	7.00	30.00	47.00	15.00	33.00	9.90	10.00	196.90

Precipitación (mm)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	37.60	55.80	45.60	93.30	5.50	12.70	253.00
Santa Teresa	3.20	2.40	8.20	12.30	46.30	11.60	66.40	71.80	16.10	52.40	17.60	23.80	332.10
Humilpan	7.20	0.00	9.50	2.70	20.00	23.00	46.50	28.30	21.60	39.50	3.40	15.50	217.20
Galindo	9.00	0.00	3.22	17.03	74.55	8.71	88.32	129.93	16.00	64.92	32.44	35.61	479.73

A, DEF y EXC (primera iteración)

	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Precipitación promedio (mm/mes)	3.20	2.40	8.20	12.30	46.30	11.60	66.40	71.80	16.10	52.40	17.60	23.80	
ETP Corregida (mm)	39.19	46.09	76.55	91.45	101.79	122.50	94.96	83.00	81.43	65.57	50.58	34.97	
Balance Bi=A(i-1)+Pi-ETPi	-35.99	-43.69	-68.35	-79.15	-55.49	110.90	-28.56	-11.20	-65.33	-13.17	-32.98	-11.17	
Ai (pasada 1)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
DEFi	35.99	43.69	68.35	79.15	55.49	110.90	28.56	11.20	65.33	13.17	32.98	11.17	

Seguir Iterando Para Encontrar el Balance Hídrico

Se Encontró el Balance Hídrico

$TMI = I_h - 0.61I_a$

-38.19

Año: 2024

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Análisis del Comportamiento del Módulo de Resiliencia en Suelos No Saturados bajo Variaciones Climáticas
Utilizando el Índice de Thornthwaite.

N° Días	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Promedio (TMM)	16.63	18.13	21.13	23.30	17.80	15.63	6.70	6.83	6.60	5.67	5.93	5.07
Índice de calor mensual	6.17	7.03	8.87	10.28	6.84	5.62	1.56	1.60	1.52	1.21	1.30	1.02
Índice de calor anual I	53.01											
ETP sin corregir	72.90	81.75	100.15	113.99	79.76	67.15	21.83	22.41	21.40	17.48	18.58	15.07

Horas de sol (N)

Mes	Lat	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Horas de sol (N)	25.00	10.70	11.30	12.00	12.70	13.30	13.70	13.50	13.00	12.30	11.60	10.90	10.60
	20.49	10.97	11.48	12.00	12.61	13.12	13.34	13.23	12.82	12.30	11.69	11.17	10.87
	Norte	20.00	11.00	11.50	12.00	12.60	13.10	13.30	13.20	12.80	12.30	11.70	11.20

Evapotranspiración Corregida (ETP corregida) mm

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
ETP corregido	68.87	72.99	103.49	119.79	90.11	74.64	24.87	24.73	21.93	17.60	17.29	14.10

Numero de lluvias

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.20
Santa Teresa	6.20	14.50	0.00	0.40	1.40	28.00	62.50	19.70	22.70	3.00	0.50	0.50	159.40
Humilpan													
Galindo	4.00	7.50	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.51

Precipitación (mm)

Nombre	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
La Venta	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	65.10	55.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	120.80
Santa Teresa	6.32	15.80	0.00	0.42	3.00	93.80	165.10	55.70	75.31	5.61	0.50	0.51	422.07
Humilpan													
Galindo	4.00	7.50	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.53

A, DEF y EXC (primera iteración)

	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.8	6.1	0.0	0.0	0.0
Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Precipitación promedio (mm/mes)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	65.10	55.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ETP Corregida (mm)	68.87	72.99	103.49	119.79	90.11	74.64	24.87	24.73	21.93	17.60	17.29	14.10
Balance Bi=A(i-1)+Pi-ETPi	-68.87	-72.99	103.49	119.79	-90.11	-9.54	30.83	6.10	-15.83	-17.60	-17.29	-14.10
Ai (pasada 1)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.83	6.10	0.00	0.00	0.00	0.00
EXCi	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFi	68.87	72.99	103.49	119.79	90.11	9.54	0.00	0.00	15.83	17.60	17.29	14.10

Seguir Iterando Para Encontrar el Balance Hídrico

Se Encontró el Balance Hídrico

$$TMI = I_h - 0.61I_a$$

-49.67

**ANEXO IV: DATOS DEL CONSEJO NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA)
PRECIPITACIÓN ANUAL (MM) Y TEMPERATURA MEDIA (°C) POR
ESTACIÓN.**

Análisis del Comportamiento del Módulo de Resiliencia en Suelos No Saturados bajo Variaciones Climáticas
Utilizando el Índice de Thornthwaite.

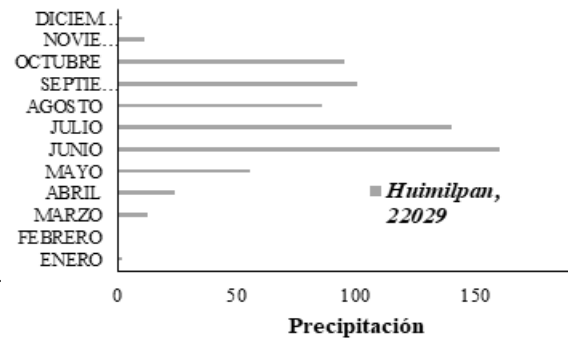
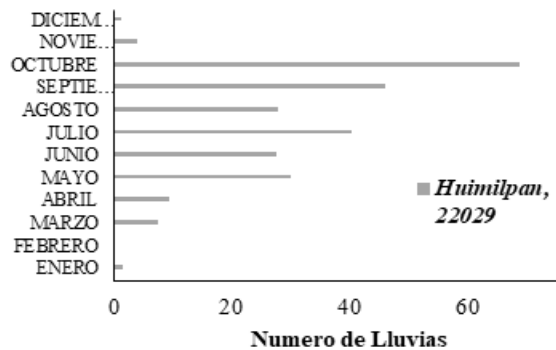
Datos					Precipitación acumulada anual (mm)											
Long.	Lat.	Edo.	Código.	Ubicación	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
-100.49	20.59	QRO	ADJQT	LAS ADJUNTAS, QRO., AUTOMATI CA	494.60	455.00	227.80	0.00	0.00	364.70	3.40					
-100.27	20.7	QRO	AMZQT	AMAZCALA, QRO. AUTOMATI CA	248.80	285.80	252.50	0.00	0.00	433.70	169.50					
-100.35	20.5	QRO	BATQT	EL BATAN	582.20	492.12	862.60	0.00	0.00	702.40	450.53	301.53	629.55	265.01	370.05	434.95
-100.44	20.6	QRO	CARQT	CARRILLO	472.80	676.86	598.90	655.00	0.00	469.70	367.00	170.20	0.00	41.60	201.90	292.22
-100.07	20.42	QRO	CNSQT	CONSTITUCION DE 1917	645.90	612.24	649.20	595.50	522.30	605.80	262.50	251.52	629.02	307.90	422.72	524.02
-100.45	20.54	QRO	EPUQT	EL PUEBLITO	579.50	582.99	649.50	3.50	0.00	363.12	338.10	370.20	22.00	87.50	466.25	552.02
-100.37	20.57	QRO	GHQQT	GERENCIA HIDALGO QRO.	415.60	715.65	662.30	711.70	0.00	288.00	343.80	132.00		72.30	458.00	455.77
-100.28	20.39	QRO	HUIQT	EHCA HUIMILPAN	402.00	479.77	625.00	0.00	0.00	423.70	361.40	406.60	804.70	398.77	131.35	14.40
-99.97	20.21	QRO	IDFQT	SAN ILDEFONSO	1084.00	920.10	807.00	632.50	656.30	749.90	396.10	524.30	844.00	325.90	26.51	474.40
-99.48	21.23	QRO	JLPQT	JALPAN	930.60	940.93	747.90	783.10	0.00	369.90	473.10	158.90	320.40	278.20	357.51	680.81
-100.45	20.7	QRO	JRQQT	JURIQUILLA	510.10	763.30	599.60	658.30	0.00	475.80	266.00	272.70		121.50	429.92	425.10
-100.23	20.62	QRO	MARQT	MARQUEZ	458.10	438.82	234.70	0.00	0.00	633.20	542.90	76.90	0.00	0.00	25.8	0.00
-100.37	20.57	QRO	OBSQT	OBSERVAT ORO	433.60	778.16	462.00	755.80	0.00	399.70	248.70	282.40	284.51	70.40	355.35	575.28
-99.82	21.06	QRO	PMLQT	PEÑAMILLE R	413.40	382.42	317.10	360.70	0.00	307.42	251.60	109.10		49.70	125.16	296.42
-100	20.36	QRO	SJSQT	SAN JOSE	642.80	644.91	394.60	708.90	0.00	507.20	142.90	346.52	791.82	286.80	302.21	514.61

Datos de CONAGUA Temperatura anual 2013 – 2024 (C°)

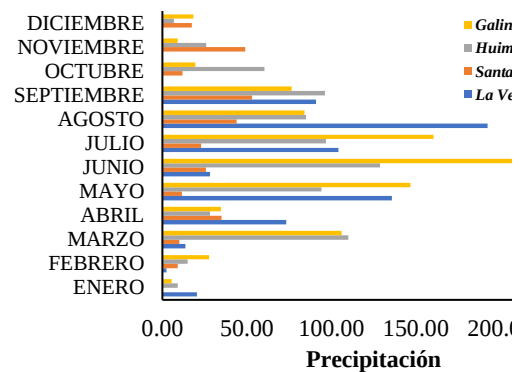
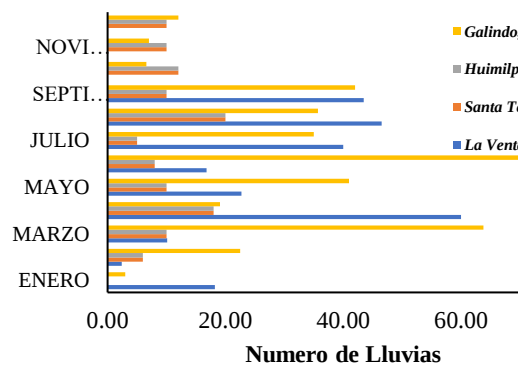
Datos					Tmed (°C)											
Lon	Lat	Clave	Edo	Est	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
-100.41	20.5	BATQT	QRO	El Batán Qro.	18.48	19.48	20.06	19.57	19.79	19.72	20.42	20.07	20.29	19.93	20.64	20.59
-100.08	20.42	CNSQT	QRO	Constitución de 1917 Qro.	19.19	19.20	19.01	19.31	19.85	19.82	20.53	20.57	20.60	20.63	20.01	20.04
-100.45	20.54	EPUQT	QRO	El Pueblito Qro.	20.09	20.19	20.19	20.20	20.20	20.20	20.21	20.20	20.20	20.21	20.22	20.22
-100.37	20.57	GHQQT	QRO	Gerencia Hidalgo Qro.	09.53	19.84	19.78	20.29	20.42	20.09	20.89	20.86	20.24	20.82	20.74	20.04
-100.28	20.39	HUIQT	QRO	Huimilpan Qro. SMN*	17.46	16.45	17.02	-	-	-	-	16.61	17.42	16.62	16.92	17.65
-99.48	21.23	JLPQT	QRO	Jalpan Qro.	24.24	23.23	23.24	24.24	25.25	25.25	25.24	25.24	25.23	25.23	26.26	26.26
-100.45	20.7	JRQQT	QRO	Juriquilla Qro.	80.20	19.09	19.19	19.19	20.20	20.20	20.20	20.19	20.20	20.21	20.21	20.21
-100.19	20.62	MMQT	QRO	Aeropuerto Intercontinental de Querétaro, Qro*	26.18	19.09	18.62	18.95	18.63	-	-	-	-	-	-	-
-100.37	20.57	OBSQT	QRO	Observatorio de Querétaro Qro.	80.21	08.21	49.21	13.20	24.20	-	-	-	-	-	-	-
-99.82	21.06	PMLQT	QRO	Peñamiller Qro.	72.09	18.09	18.18	18.78	18.78	40.07	07.00	36.00	36.65	38.38	25.25	25.25
-99.96	20.2	IDFQT	QRO	San Ildefonso Qro.	23.00	23.02	23.17	23.16	23.79	23.24	24.00	24.00	23.52	23.58	23.16	23.23
-100	20.36	SJSQT	QRO	San José Qro.	26.00	-	17.73	16.01	16.28	16.46	17.98	16.36	16.08	17.78	17.12	18.12
-100.44	20.6	CARQT	QRO	Carrillo Qro.	-	16.72	19.77	18.90	19.63	19.20	20.12	20.53	20.76	20.37	20.15	20.46
-100.23	20.62	MARQT	QRO	El Marqués Qro.	-	-	20.70	18.76	18.62	22.44	21.49	22.42	21.64	18.60	-	-
-100.4	20.58	76625	QRO	QUERETARO	-	-	-	-	-	20.30	20.16	20.17	20.14	-	-	-
-99.17	21.5	SGOR DAI	QRO	Sierra Gorda 1 Qro. SMN*	-	-	-	-	-	90.20	56.20	-	-	-	-	-
-99.47	21.21	PJALP AN	QRO	Presa Jalpan Qro. SMN*	-	-	-	-	-	-	-	23.43	23.46	24.19	25.35	26.43
-100.37	20.56	QUERETARO_OB	QRO	Observatorio de Querétaro Qro. SMN*	-	-	-	-	-	-	-	20.69	20.10	20.70	18.89	-
-100.46	20.69	ARMQT	QRO	Arenal Qro. SGT*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.86	-	-
-100.19	20.62	MMQT	QRO	Aeropuerto Intercontinental de Querétaro Qro.*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18.31	18.35	19.03

**ANEXO V: ELECCIÓN DE ESTACIÓN PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE
THORNTHWAITE.**

2014

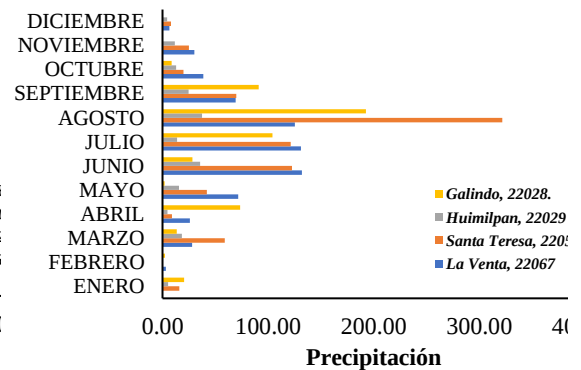
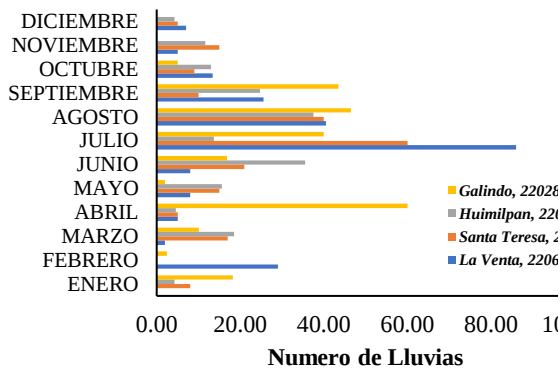


2015

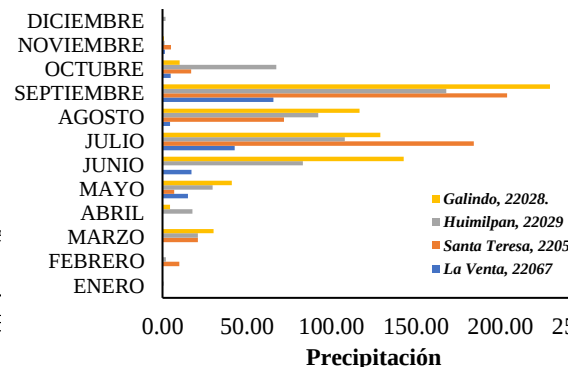
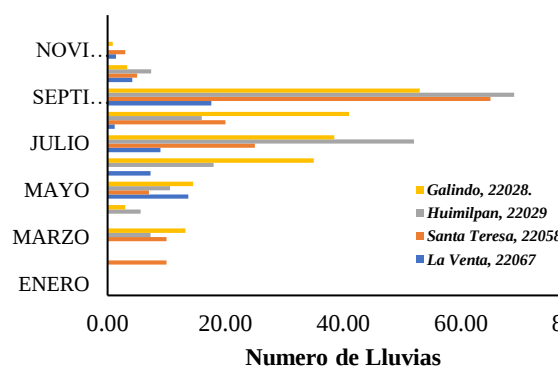


4.

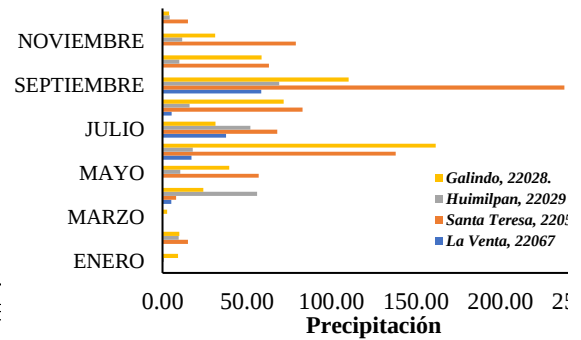
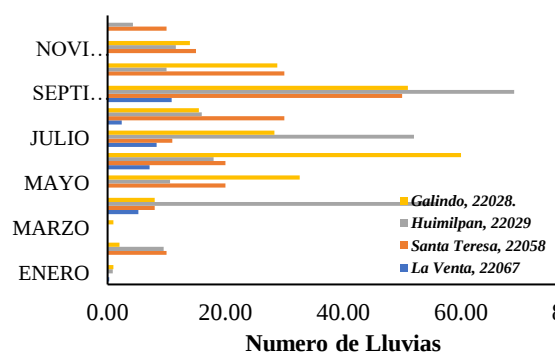
2016



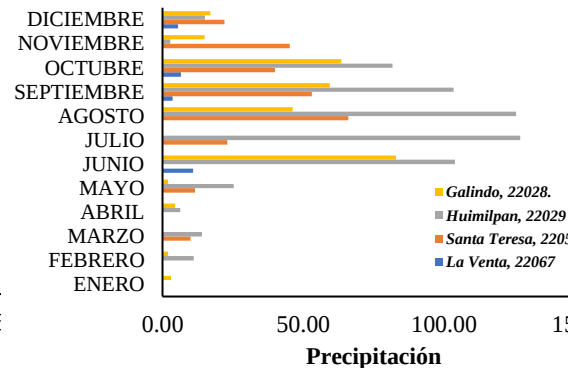
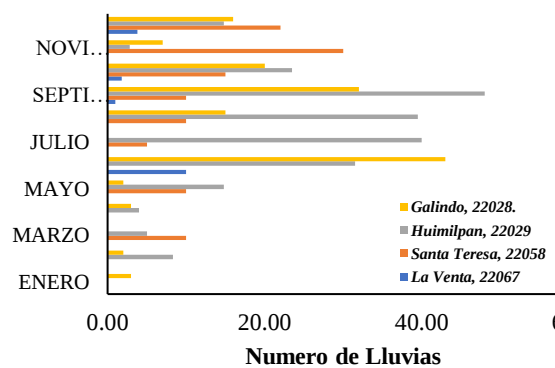
2017



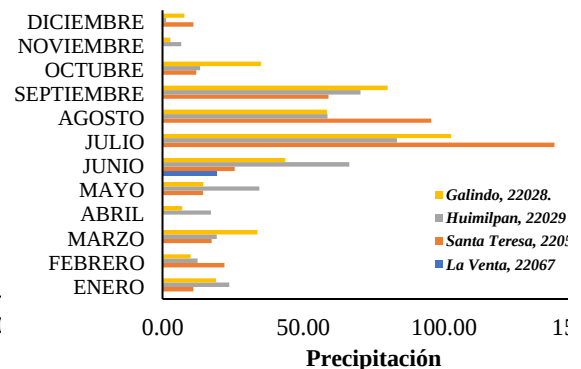
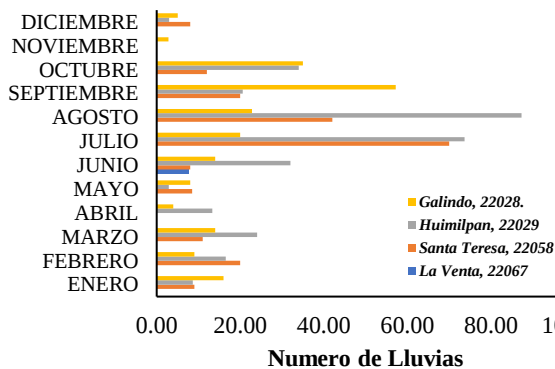
2018



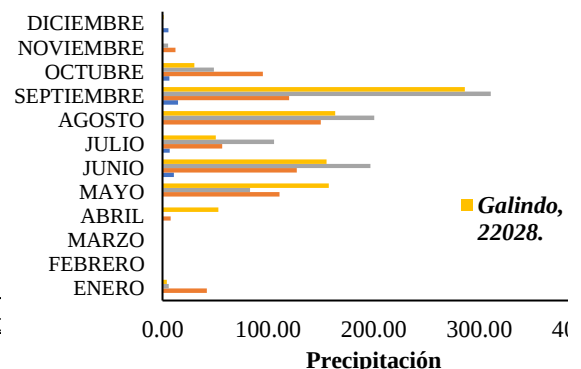
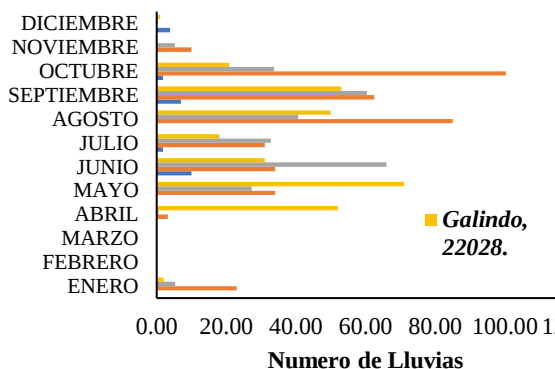
2019



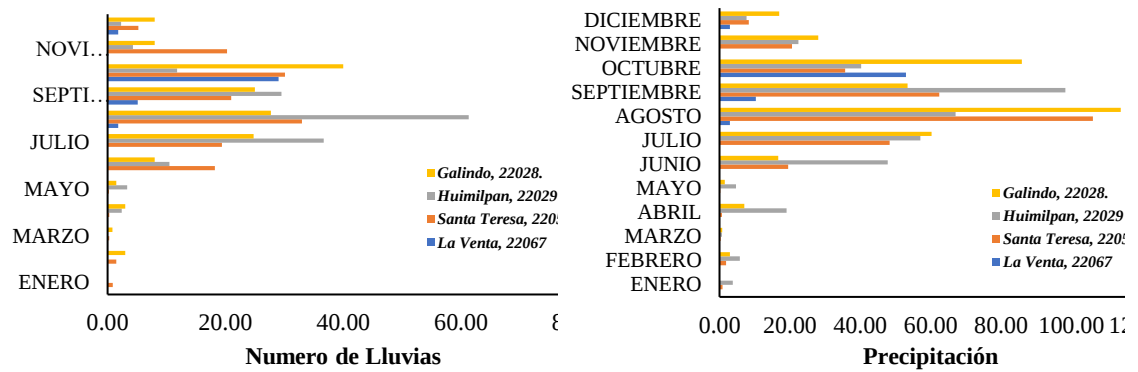
2020



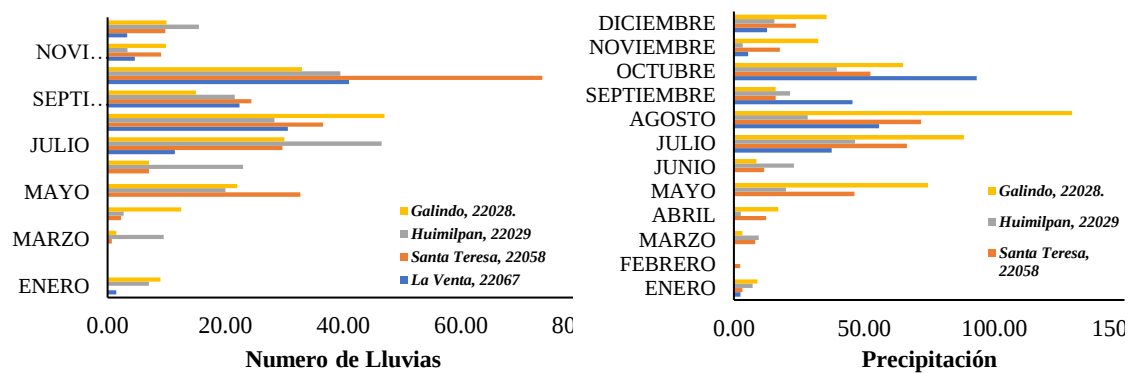
2021



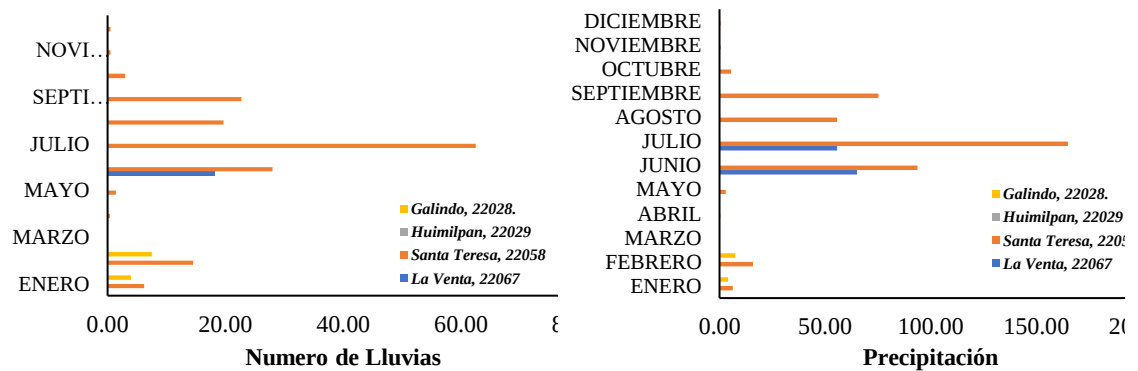
2022



2023



2024



ANEXO VI: CODIGOS REALIZADOS EN MATLAB.

Anexo V.I

Código desarrollado en MATLAB

```
% Ajuste y análisis de sensibilidad para ITo y k
clear; close all; clc;

% -----
% Datos para cada suelo
% -----
suelos(1).nombre = 'Arcilla de Alta Compresibilidad (CH)';
suelos(1).IT = [3.01 6.07 15.89 9.75 18.34 15.89 -3.13 4.23
...
42.27 43.99 49.02 45.21 65.95 50.55 66.50 71.72
...
77.79 74.48 97.67 88.16 84.36 30 30];
suelos(1).thetaExp = [0.382 0.388 0.402 0.392 0.405 0.400
0.390 0.397 ...
0.438 0.437 0.445 0.443 0.460 0.446 0.462
0.468 ...
0.480 0.480 0.504 0.493 0.494 0.416 0.420];
suelos(1).thetaSat = [0.478 0.478 0.487 0.493 0.493 0.492
0.472 0.480 ...
0.521 0.521 0.526 0.522 0.532 0.526 0.530
0.529 ...
0.544 0.538 0.554 0.550 0.544 0.503 0.507];

suelos(2).nombre = 'Limo de Baja Compresibilidad (ML)';
suelos(2).IT = [30 30 19.23 19.10 9.43 3.53 8.20 10.34 ...
-4.91 6.77 -8.93 -12.76 43.17 42.65 43.88 ...
41.81 42.65 41.74 58.22 59.20 56.47 63.61 71.14];
suelos(2).thetaExp = [0.405 0.4076 0.4073 0.4086 0.3749
0.3808 0.3862 0.3882 ...
0.3578 0.3722 0.3539 0.3394 0.4333 0.4375
0.4343 0.4330 ...
0.4336 0.4272 0.4559 0.4542 0.4500 0.4663
0.4673];
suelos(2).thetaSat = [0.5184 0.5192 0.5184 0.5195 0.5076
0.5091 0.5102 0.5151 ...
0.5047 0.5091 0.5069 0.5065 0.5240 0.5266
0.5221 0.5221 ...
0.5214 0.5229 0.5259 0.5255 0.5248 0.5292
0.5266];

suelos(3).nombre = 'Arena Limosa (SM)';
suelos(3).IT = [21.63996099 19.13194928 14.95192978
15.28633134 12.10951651 7.009892713 9.099902466
5.755886861 ...
9.099902466 13.27992197 -10.88059078 -
4.192559565 -10.96419117 -0.93214435 32.75881287 ...
36.35362965 36.93883238 38.4436394
37.52403511 31.42120663 40.86805072 49.22808973 ...
50.06409363 43.37606242 46.63647764
46.30207608 40.03204682 49.89689285 56.83572523 30 30
30];
suelos(3).thetaExp = [0.3282 0.324 0.3219 0.3247 0.3164
0.3212 0.3218 0.3116 0.3125 0.3212 ...
0.2906 0.2959 0.2808 0.3009 0.3572 0.3578
0.3599 0.3658 0.3658 0.3654 ...
0.3737 0.3727 0.3786 0.3684 0.3788 0.3709
0.3673 0.3833 0.3938 0.345 0.3472 0.3512];
suelos(3).thetaSat = [0.427 0.430 0.423 0.425 0.426 0.425
0.425 0.427 ...
0.431 0.430 0.426 0.427 0.432 0.426 0.431
0.426 ...
0.430 0.425 0.425 0.420 0.428 0.428 0.426
0.425 ...
0.427 0.427 0.427 0.431 0.431 0.425 0.425
0.422];

% -----
% Modelo (sigmoidal tipo logística)
% -----

model = @(ITo,k,IT,thetaSat) thetaSat .* ( 1 ./ (1 + exp(-k .*
(IT - ITo))) );

% -----
% Bucle por cada suelo
% -----
for s = 1:length(suelos)
    fprintf('=====\n');
    fprintf(' Suelo: %s\n', suelos(s).nombre);
    fprintf('=====\n');

    % Filtrar datos válidos (quitar NaN)
    idx = ~isnan(suelos(s).thetaExp) &
~isnan(suelos(s).thetaSat);
    IT = suelos(s).IT(idx);
    thetaExp = suelos(s).thetaExp(idx);
    thetaSat = suelos(s).thetaSat(idx);
    n = numel(IT);

    % -----
    % Ajuste (fminsearch) - función objetivo SSE
    % -----
    obj = @(p)sum( (thetaExp -
model(p(1),p(2),IT,thetaSat)).^2);
    p0 = [20, 0.05];
    opts = optimset('Display','off','TolX',1e-8,'TolFun',1e-
8,'MaxIter',1e4);
    p_opt = fminsearch(obj, p0, opts);
    ITo_opt = p_opt(1);
    k_opt = p_opt(2);

    % Predicción y métricas
    thetaPred = model(ITo_opt,k_opt,IT,thetaSat);
    resid = thetaExp - thetaPred;
    RMSE = sqrt(mean(resid.^2));
    R2_approx = 1 - var(resid)./var(thetaExp);

    fprintf(' ITo_opt = %.6f\n', ITo_opt);
    fprintf(' k_opt = %.6f\n', k_opt);
    fprintf(' RMSE = %.6e\n', RMSE);
    fprintf(' R^2 aprox = %.4f\n\n', R2_approx);

    % -----
    % Elasticidades
    % S = 1 / (1+exp(-k*(IT-ITo)))
    % dS/dk, dS/dITo, dtheta_dk, dtheta_dITo
    % Elasticidades E_k, E_ITo (por muestra) y promedios
    % -----
    S = 1 ./ (1 + exp(-k_opt .* (IT - ITo_opt)));
    dS_dk = (IT - ITo_opt) .* S .* (1 - S);
    dS_dITo = -k_opt .* S .* (1 - S);

    dtheta_dk = thetaSat .* dS_dk;
    dtheta_dITo = thetaSat .* dS_dITo;

    thetaPred_safe = thetaPred;
    thetaPred_safe(thetaPred_safe==0) = eps;

    E_k_vec = dtheta_dk .* (k_opt ./ thetaPred_safe);
    E_ITo_vec = dtheta_dITo .* (ITo_opt ./ thetaPred_safe);

    mean_Ek = mean(E_k_vec);
    mean_EITo = mean(E_ITo_vec);

    fprintf('Elasticidades (promedio): E[k]=%.4f,
E[ITo]=%.4f\n\n', mean_Ek, mean_EITo);

    % -----
    % Gráfica Exp vs Pred
    % -----
end
```

```

figure('Name','Exp vs Pred - ' +
suelos(s).nombre, 'Color','w');
plot(1:n, thetaExp, 'ko',
'MarkerFaceColor','b','DisplayName','\theta_{Exp}'); hold
on;
plot(1:n, thetaPred, 'r--o',
'LineWidth',1.5,'DisplayName','\theta_{Pred}');
xlabel('Muestra'); ylabel('\theta');
legend('Location','best'); grid on; box on;
title(['Comparación \theta_{Exp} vs \theta_{Pred} - ' +
suelos(s).nombre]);

% -----
% Histograma de elasticidades
% -----
figure('Name','Elasticidades - ' +
suelos(s).nombre, 'Color','w');
subplot(1,2,1);
histogram(E_k_vec); xlabel('E_k'); title('Elasticidad
respecto a k'); grid on; box on;
subplot(1,2,2);
histogram(E_ITo_vec); xlabel('E_{ITo}');
title('Elasticidad respecto a ITo'); grid on; box on;

% -----
% Tornado (±10%)
% -----
pct = 0.10;
RMSE_base = RMSE;

p_up_k = [ITo_opt, k_opt*(1+pct)];
p_down_k = [ITo_opt, k_opt*(1-pct)];
p_up_ITo = [ITo_opt*(1+pct), k_opt];
p_down_ITo = [ITo_opt*(1-pct), k_opt];

RMSE_k_up = sqrt(mean((thetaExp -
model(p_up_k(1),p_up_k(2),IT,thetaSat)).^2));
RMSE_k_down = sqrt(mean((thetaExp -
model(p_down_k(1),p_down_k(2),IT,thetaSat)).^2));
RMSE_ITo_up = sqrt(mean((thetaExp -
model(p_up_ITo(1),p_up_ITo(2),IT,thetaSat)).^2));

RMSE_ITo_down = sqrt(mean((thetaExp -
model(p_down_ITo(1),p_down_ITo(2),IT,thetaSat)).^2));

vars = {'k','ITo'};
delta_k = [RMSE_k_down - RMSE_base, RMSE_k_up -
RMSE_base];
delta_ITo = [RMSE_ITo_down - RMSE_base,
RMSE_ITo_up - RMSE_base];

figure('Name','Tornado - ' + suelos(s).nombre, 'Color','w');
barh(categorical(vars), [delta_k; delta_ITo], 'stacked');
xlabel('\Delta RMSE'); legend('-
10%', '+10%', 'Location','best');
grid on; box on;
title(['Sensibilidad (Tornado) - ' + suelos(s).nombre]);

% -----
% Sensibilidad GLOBAL (Mapa RMSE)
% -----
ITo_range = linspace(max(ITo_opt-30, -100),
ITo_opt+50, 120);
k_range = linspace(max(k_opt*0.1, 1e-4), k_opt*5, 120);
[Rmsh, Kmsh] = meshgrid(ITo_range, k_range);
RMSE_grid = zeros(size(Rmsh));
for i = 1:numel(Rmsh)
    ITo_try = Rmsh(i); k_try = Kmsh(i);
    th = model(ITo_try,k_try,IT,thetaSat);
    RMSE_grid(i) = sqrt(mean((thetaExp - th).^2));
end

figure('Name','Mapa RMSE - ' +
suelos(s).nombre, 'Color','w');
contourf(ITo_range, k_range, RMSE_grid, 40); colorbar;
xlabel('ITo'); ylabel('k');
title(['Mapa de RMSE (ITo vs k) - ' + suelos(s).nombre]);
hold on;
plot(ITo_opt, k_opt, 'kp', 'MarkerSize',12,
'MarkerFaceColor','w');
grid on; box on;
end

```

Anexo V.II

Código desarrollado en MATLAB, factor de forma de la Dra. Zapata.

```

%% Ajuste  $\theta(\psi)$  con Fredlund & Xing y Zapata, factor de forma.
clear; clc; close all;

% =====
% DATOS
% =====
theta_CH = [0.385 0.386 0.400 0.400 0.405 0.404 0.375
0.387 0.443 0.444 0.450 ...
0.445 0.465 0.452 0.463 0.465 0.481 0.474 0.498
0.491 0.483 0.421 0.424];
psi_CH = [198.11 188.41 161.18 177.56 155.18 161.18
219.52 194.16 109.34 106.77 ...
99.66 104.98 79.80 97.62 79.24 74.21 68.85 71.71
54.43 60.79 63.60 130.27 130.27];

theta_ML = [0.4158 0.4164 0.4018 0.4025 0.3800 0.3724
0.3801 0.3869 0.3563 0.3772 ...
0.3514 0.3449 0.4357 0.4373 0.4349 0.4327 0.4330
0.4332 0.4527 0.4533 0.4500 0.4605 0.4647];
psi_ML = [147.06 146.98 207.10 207.81 294.78 368.20
307.78 283.16 521.90 325.07 ...
619.89 737.41 100.56 101.83 98.75 104.47 102.14
104.61 68.46 66.89 71.46 60.19 50.84];

theta_SM = [0.34 0.338 0.326 0.328 0.323 0.314 0.317 0.313
0.322 0.328 0.278 0.293 ...
0.282 0.298 0.360 0.360 0.364 0.362 0.360 0.348
0.367 0.377 0.375 0.367 ...
0.373 0.372 0.365 0.380 0.386 0.351 0.351 0.348];
psi_SM = [85.49 92.65 106.40 105.20 117.26 140.57 130.35
147.19 130.35 112.62 ...
288.17 216.79 289.24 190.09 61.05 55.09 54.19 51.97
53.31 63.47 48.61 38.94 ...
38.10 45.42 41.66 42.02 49.74 38.27 32.12 66.18
66.18 66.18];

% =====
% FUNCIONES C(h)
% =====
c_FX = @(h,hr) 1 - log(1+h./hr)./log(1+1e6./hr);
c_Z = @(h,hr) 1 - log(1+h./hr)./log(1+1.45e5./hr);

% =====
% AJUSTAR CADA SUELO Y GRAFICAR
% =====
soils = {'CH','ML','SM'};
data_theta = {theta_CH, theta_ML, theta_SM};
data_psi = {psi_CH, psi_ML, psi_SM};

for s = 1:3
    theta = data_theta{s};
    psi = data_psi{s};

    % Ajuste Fredlund & Xing
    [p_FX, rmse_FX] = fit_model(theta,psi,1,c_FX,c_Z);
    % Ajuste Zapata
    [p_Z, rmse_Z] = fit_model(theta,psi,2,c_FX,c_Z);
end

% Predicciones (rango extendido hasta 1e6)
psi_fit = logspace(0,6,500);
theta_FX = ( c_FX(psi_fit,p_FX(1)) .* ( p_FX(2) ./ (
log(exp(1)+(psi_fit./p_FX(3)).^p_FX(4)).^p_FX(5)) ));
theta_Z = ( c_Z(psi_fit,p_Z(1)) .* ( p_Z(2) ./ (
log(exp(1)+(psi_fit./p_Z(3)).^p_Z(4)).^p_Z(5)) ));

% ----- GRAFICA PRINCIPAL -----
figure;
semilogx(psi,theta,'ko','MarkerFaceColor','k'); hold on;
semilogx(psi_fit,theta_FX,'b-','LineWidth',2);
semilogx(psi_fit,theta_Z,'r-','LineWidth',2);
grid on;
xlabel('\psi (kPa)'); ylabel('\theta (m^3/m^3)');
title(['Curvas de retención extendidas (0 - 10^6) - Suelo '
soils{s}]);
legend('Datos','Fredlund & Xing','Zapata
2006','Location','best');

% Insertar etiquetas de RMSE dentro de la gráfica
text(10, max(theta)*0.9, sprintf('RMSE FX =
%.4f',rmse_FX), 'Color','b','FontSize',10);
text(10, max(theta)*0.8, sprintf('RMSE Z =
%.4f',rmse_Z), 'Color','r','FontSize',10);

% ----- GRAFICA DE DIFERENCIAS -----
figure;
semilogx(psi_fit,theta_Z - theta_FX,'m-','LineWidth',2);
hold on;
yline(0,'k--');
grid on;
xlabel('\psi (kPa)'); ylabel('\Delta\theta (Zapata - FX)');
title(['Diferencia entre modelos - Suelo ' soils{s}]);

% ----- RESULTADOS -----
fprintf('\nSuelo %s:\n',soils{s});
fprintf(' Fredlund & Xing -> RMSE = %.5f\n',rmse_FX);
fprintf(' Zapata 2006 -> RMSE = %.5f\n',rmse_Z);
end
%% =====
% FUNCIÓN DE AJUSTE (al final del archivo)
% =====
function [p_fit,rmse] =
fit_model(theta,psi,whichModel,c_FX,c_Z)
    theta_model = @(p,h) ...
    ( (whichModel==1).*c_FX(h,p(1)) +
    (whichModel==2).*c_Z(h,p(1)) ) ...
    .* ( p(2) ./ ( log(exp(1)+(h./p(3)).^p(4)).^p(5)) );
    % p = [hr, theta_sat, a_f, b_f, c_f]
    % Valores iniciales y límites
    p0 = [100 0.45 200 0.5 1];
    lb = [1 0.3 1 0.1 0.1];
    ub = [1000 0.6 1e4 5 5];
    % Ajuste con lsqcurvefit
    opts = optimoptions('lsqcurvefit','Display','off');
    [p_fit,~,resid] =
lsqcurvefit(theta_model,p0,psi,theta,lb,ub,opts);

    % RMSE
    rmse = sqrt(mean(resid.^2));

```

Anexo V.III

Código desarrollado en MATLAB, Comparación de curvas características entre el modelo de Van Genuchten y el desarrollado en esta investigación.

```

% Grado de Saturación (Sr) vs. Succion (psi) para los tres
suelos estudiados

```

```

% --- 0. Configuración y Limpieza ---
clear; close all; clc;

```

% --- 1. Definición de Parámetros y Constantes ---

% Parámetros fijos del Modelo IT (Datos proporcionados)

k_CH = 0.0082; IT0_CH = -168.918;

k_ML = 0.0149; IT0_ML = -63.3398;

k_SM = 0.0226; IT0_SM = -38.5505;

% Punto de Restricción para Extensión de Curva (Sr -> 0 en 10⁶ kPa)

psi_restriction = 1e6;

Sr_restriction = 1e-4; % Valor muy cercano a cero

% --- 2. Datos Experimentales (S_r y psi) ---

% Grado de Saturación Experimental (Sr_Exp)

Sr_Exp_CH = [0.80, 0.81, 0.82, 0.80, 0.82, 0.81, 0.83, 0.83, 0.84, 0.84, 0.85, 0.85, 0.86, 0.85, 0.87, 0.88, 0.88, 0.89, 0.91, 0.90, 0.91, 0.83, 0.83, 0.80, 0.81];

Sr_Exp_ML = [0.78, 0.79, 0.79, 0.79, 0.74, 0.75, 0.76, 0.75, 0.71, 0.73, 0.70, 0.67, 0.83, 0.83, 0.83, 0.83, 0.82, 0.87, 0.86, 0.86, 0.88, 0.89];

Sr_Exp_SM = [0.80, 0.80, 0.82, 0.82, 0.81, 0.84, 0.84, 0.82, 0.80, 0.81, 0.84, 0.83, 0.81, 0.83, 0.82, 0.82, 0.81, 0.84, 0.84, 0.87, 0.84, 0.81, 0.82, 0.82, 0.83, 0.83, 0.83, 0.81, 0.82, 0.82, 0.82, 0.84];

% Succión Experimental (psi_Exp)

psi_Exp_CH = [200.00, 180.00, 150.00, 190.00, 150.00, 170.00, 190.00, 210.00, 120.00, 130.00, 110.00, 110.00, 90.00, 120.00, 70.00, 60.00, 60.00, 50.00, 35.00, 50.00, 40.00, 140.00, 140.00, 200.00, 180.00];

psi_Exp_ML = [200.00, 200.00, 200.00, 200.00, 300.00, 300.00, 300.00, 300.00, 500.00, 400.00, 550.00, 800.00, 100.00, 100.00, 90.00, 100.00, 90.00, 120.00, 45.00, 50.00, 55.00, 30.00, 25.00];

psi_Exp_SM = [110.00, 120.00, 110.00, 110.00, 150.00, 120.00, 130.00, 170.00, 170.00, 140.00, 230.00, 230.00, 310.00, 200.00, 50.00, 50.00, 50.00, 35.00, 35.00, 30.00, 30.00, 25.00, 40.00, 40.00, 15.00, 15.00, 60.00, 60.00, 50.00, 35.00, 25.00, 40.00];

% Estructuras de Suelos

Suelo1 = struct('Nombre', 'Arcilla - CH', 'IT_params', [k_CH, IT0_CH], 'Data', struct('Sr_Exp', Sr_Exp_CH, 'psi_Exp', psi_Exp_CH));

Suelo2 = struct('Nombre', 'Limo - ML', 'IT_params', [k_ML, IT0_ML], 'Data', struct('Sr_Exp', Sr_Exp_ML, 'psi_Exp', psi_Exp_ML));

Suelo3 = struct('Nombre', 'Arena Limosa - SM', 'IT_params', [k_SM, IT0_SM], 'Data', struct('Sr_Exp', Sr_Exp_SM, 'psi_Exp', psi_Exp_SM));

Suelos = [Suelo1, Suelo2, Suelo3];

% Rango de ploteo para la curva (1 a 10⁶ kPa)

psi_plot = logspace(0, 6, 200);

% --- 3. Definición de Funciones para Optimización ---

% Modelo VG para Sr, parámetros a optimizar: [alpha, n]

VG_Sr_model_optim = @(params, psi) 1 ./ ((1 + (params(1) * psi).^params(2)).^(1 - 1./params(2)));

% Modelo IT para Sr (alineación con VG), parámetros a optimizar: [A_map, B_map]

% k e IT0 se definen en el bucle

IT_Sr_alignment_model = @(k, IT0, Map_params, psi) 1 ./ (1 + exp(-k * ((Map_params(1) - Map_params(2) * log10(psi)) - IT0)));

%% --- 4. Bucle de Optimización y Ploteo ---

for i = 1:length(Suelos)

Nombre = Suelos(i).Nombre;

Sr_Exp = Suelos(i).Data.Sr_Exp;

end

psi_Exp = Suelos(i).Data.psi_Exp;

% Parámetros IT del suelo actual

k = Suelos(i).IT_params(1);

IT0 = Suelos(i).IT_params(2);

% ** Aplicar la Restricción de Cola al Data Set **

psi_Exp_constrained = [psi_Exp, psi_restriction];

Sr_Exp_constrained = [Sr_Exp, Sr_restriction];

% --- OPTIMIZACIÓN 1: Ajuste de VG (S_r Exp. + Restricción) ---

x0_VG = [0.03, 1.1];

lb_VG = [0.0001, 1.001];

ub_VG = [1.0, 5.0];

[VG_params_opt, ~, ~, ~, ~] = lsqcurvefit(VG_Sr_model_optim, x0_VG, psi_Exp_constrained, Sr_Exp_constrained, lb_VG, ub_VG);

Sr_VG_simulated = VG_Sr_model_optim(VG_params_opt, psi_plot);

% --- OPTIMIZACIÓN 2: Alineación de IT a VG ---

x0_Map = [150, 20];

lb_Map = [0, 0];

ub_Map = [300, 500];

[IT_alignment_func, ~, ~, ~, ~] = lsqcurvefit(IT_Sr_alignment_model, x0_Map, psi, IT_Sr_alignment_model(k, IT0, Map_params, psi);

[Map_params_opt, ~, ~, ~, ~] = lsqcurvefit(IT_alignment_func, x0_Map, psi_plot, Sr_VG_simulated, lb_Map, ub_Map);

% Curva IT simulada

Sr_user_simulated = IT_alignment_func(Map_params_opt, psi_plot);

% --- PLOTEO ---

figure;

% Curvas Modelos

semilogx(psi_plot, Sr_user_simulated, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Modelo IT');

hold on;

semilogx(psi_plot, Sr_VG_simulated, 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Curva VG');

% Puntos Experimentales

scatter(psi_Exp, Sr_Exp, 50, 'g', 'filled', 'DisplayName', 'Datos Exp.');

% Etiquetas y Formato (Usando Interpreter 'tex' y etiquetas simples)

titulo_principal = sprintf('Curva Característica: %s', Nombre);

subtitulo = 'Grado de Saturación vs. Succión';

title({titulo_principal, subtitulo}, 'Interpreter', 'tex');

xlabel('Succión, \psi [kPa] (Escala Logarítmica)', 'Interpreter', 'tex');

ylabel('Grado de Saturación, S_r', 'Interpreter', 'tex');

grid on;

legend('Location', 'southwest', 'Interpreter', 'tex');

% Rango Y y X final

ylim_max = max(1.05, max(Sr_Exp) + 0.02);

ylim([0.0 max(1.0, ylim_max)]);

xlim([1 1e6]);

set(gca, 'FontSize', 12);

Anexo V.IV

Código desarrollado en MATLAB, Validación del Módulo de Resiliencia (MR)

```
%% -----
%% Limpieza inicial
%% -----
clear; clc; close all;
%% -----
%% Cargar datos desde Excel
%% Nota al cargar los datos verificar que el archivo que se
cargue debe de tener los datos de suelo a analizar
%% -----
archivo = 'DatosSueloSM.xlsx';
datos = readtable(archivo);

IT = datos.IT;
Mr_exp = datos.Mr_Experimental;
Mr_teo = datos.Mr_Teorico;
%% -----
%% Validación cruzada
%% -----
n = length(Mr_exp); % número de datos
k = 5; % para k-Fold

% -----
% 1) LOOCV (Leave-One-Out Cross-Validation)
% -----
error_LOOCV = zeros(n,1);

for i = 1:n
    IT_train = IT([1:i-1 i+1:end]);
    Mr_train = Mr_exp([1:i-1 i+1:end]);

    p = polyfit(IT_train, Mr_train, 1); % modelo lineal
    Mr_pred = polyval(p, IT(i));

    error_LOOCV(i) = abs(Mr_pred - Mr_exp(i))/Mr_exp(i);
end
meanError_LOOCV = mean(error_LOOCV);

% -----
% 2) k-Fold Cross-Validation
% -----
cv = cvpartition(n,'Kfold',k);
error_kfold = zeros(k,1);

for i = 1:k
    trainIdx = training(cv,i);
    testIdx = test(cv,i);

    IT_train = IT(trainIdx);
    Mr_train = Mr_exp(trainIdx);
    IT_test = IT(testIdx);
    Mr_test = Mr_exp(testIdx);

    p = polyfit(IT_train, Mr_train, 1);
    Mr_pred = polyval(p, IT_test);

    error_kfold(i) = mean(abs(Mr_pred - Mr_test)./Mr_test);
end
meanError_kfold = mean(error_kfold);
%% -----
%% Etiqueta de robustez del modelo
%% -----
umbral = 0.1; % 10% de error relativo máximo
if meanError_LOOCV < umbral && meanError_kfold < umbral
    robustez = 'Robusto';
else
    robustez = 'No Robusto';
end
%% -----

%% Gráfica 1: MR Experimental vs MR Teórico
normalizado con colores
%% -----
% Normalización de datos
Mr_exp_norm = Mr_exp / max(Mr_exp);
Mr_teo_norm = Mr_teo / max(Mr_teo);

% Distancia relativa para colores
distancia_rel = abs(Mr_exp_norm - Mr_teo_norm);
distancia_rel = distancia_rel / max(distancia_rel);
figure('Name','Figura 1: MR Exp vs Teo Normalizado');
scatter(Mr_teo_norm, Mr_exp_norm, 80, distancia_rel,
'filled'); hold on;
colormap(jet); colorbar; caxis([0 1]);
xlabel('MR Normalizado Teórico');
ylabel('MR Normalizado Experimental');
title(['MR Experimental vs Teórico: ' robustez]);
grid on; axis equal;

% Línea 1:1
plot([0 1], [0 1], 'k--', 'LineWidth',1.5);

%% -----
%% Gráfica 2: IT vs MR Experimental y Teórico
%% -----
figure('Name','Figura 2: IT vs MR');
scatter(IT, Mr_exp, 80, 'r', 'filled'); hold on;
scatter(IT, Mr_teo, 80, 'b', 'filled');
xlabel('IT (%)');
ylabel('MR (MPa)');
title('IT vs MR Experimental y Teórico');
legend('MR Experimental','MR Teórico','Location','best');
grid on;

%% -----
%% Gráfica 3: MR Experimental vs MR Teórico sin
normalizar con R²
%% -----
% Ajuste lineal
p_fit = polyfit(Mr_teo, Mr_exp, 1);
Mr_fit = polyval(p_fit, Mr_teo);

% R²
R = corrcoef(Mr_teo, Mr_exp);
R2 = R(1,2)^2;

figure('Name','Figura 3: MR Experimental vs Teórico');
scatter(Mr_teo, Mr_exp, 80, 'm', 'filled'); hold on; % puntos
magenta
plot(Mr_teo, Mr_fit, 'k--','LineWidth',1.5); % línea de
ajuste
xlabel('MR Teórico (MPa)');
ylabel('MR Experimental (MPa)');
title(['MR Experimental vs Teórico: R² = '
num2str(R2,'%3f')]);
grid on;

%% -----
%% Mostrar resultados
%% -----
fprintf('Error LOOCV promedio: %2f%%\n',
meanError_LOOCV*100);
fprintf('Error k-Fold promedio: %2f%%\n',
meanError_kfold*100);
fprintf('Robustez del modelo: %s\n', robustez);
fprintf('R² de MR Normalizado: %3f\n', R2)
```

Anexo V.V Código desarrollado en MATLAB, Relación de las capas de pavimento, así como las integraciones de los parámetros mecánicos e hidrológicos.

```
function ejecutar_analisis_completo()
% EJECUCIÓN DEL ANALISIS DE MODULO RESILIENTE
% Implementa el Modelo Térmico Estocástico y Refinado.

clear; close all; clc;
fprintf("\n=====
=====
ANALISIS DE MODULO RESILIENTE (MR)");
fprintf(' Ejecución de Modelo Térmico Estocástico y Refinado.\n');

fprintf('=====
=====
\n');
try
% PASO 1: Configurar el análisis
fprintf('PASO 1: Configurando analisis...\n');
config = configurar_analisis();
% PASO 2: Cargar datos climáticos
fprintf('PASO 2: Cargando datos climaticos...\n');
climate_data =
cargar_datos_climaticos(config.archivo_clima);

% PASO 3: Calcular propiedades hidráulicas (Humedad y Succión)
fprintf('PASO 3: Calculando propiedades hidraulicas (IT de Thornthwaite).\n');
propiedades_hidraulicas =
calcular_propiedades_hidraulicas(climate_data, config);
% PASO 4: Simular Carga Vehicular (Esfuerzos)
fprintf('PASO 4: Simulando esfuerzos por carga vehicular...\n');
datos_esfuerzos = simular_carga_vehicular(config);
% PASO 5: Calcular temperaturas (Modelo Térmico de Suelo Refinado)
fprintf('PASO 5: Calculando distribucion de temperatura (Variabilidad Inter-Anual).\n');
datos_temperatura =
calcular_temperaturas_suelo(climate_data, config);
% PASO 6: Calcular modulo resiliente con efectos combinados
fprintf('PASO 6: Calculando MR con efectos Hídricos/Térmicos.\n');
datos_MR =
calcular_modulo_resiliente(propiedades_hidraulicas,
datos_temperatura, ...
datos_esfuerzos, climate_data,
config);
% PASO 7: Exportar resultados
fprintf('PASO 7: Exportando resultados...\n');
exportar_resultados(datos_MR,
propiedades_hidraulicas, datos_temperatura,
datos_esfuerzos, climate_data, config);

% PASO 8: Crear visualizaciones
fprintf('PASO 8: Generando visualizaciones...\n');
crear_visualizaciones(datos_MR,
propiedades_hidraulicas, datos_temperatura,
datos_esfuerzos, climate_data, config);

% PASO 9: Mostrar resumen
mostrar_resumen_final(datos_MR, config);

catch error_info
fprintf('\nERROR CRITICO EN EJECUCION: %s\n',
error_info.message);
if ~isempty(error_info.stack)

fprintf('Linea: %d, Funcion: %s\n',
error_info.stack(1).line, error_info.stack(1).name);
end
end

fprintf('\n*** ANALISIS COMPLETADO
EXITOSAMENTE ***\n');
end

% -----
% CONFIGURACIÓN Y PROPIEDADES INICIALES
% -----

function config = configurar_analisis()
config = struct();
config.archivo_clima = 'clima_MR.csv';
config.nombres_capas = {'Carpeta_Asfaltica',
'Base_Granular', 'Subbase', 'Subrasante', 'Terraplen'};
config.espesores = [0.08, 0.08, 0.25, 0.40, 1.00]; % metros
config.numero_capas = length(config.nombres_capas);
config.centros_capas =
calcular_centros_capas(config.espesores);

config.tipos_material = {'asfalto', 'granular', 'granular',
'limo', 'arcilla'};
config = configurar_propiedades_capas(config);

% RANGOS DE MR (Mín/Máx en MPa - Confinamiento SCT/Referencia)
config.limites_confinamiento = struct();
config.limites_confinamiento.min_arcilla = 34;
config.limites_confinamiento.max_arcilla = 90;
config.limites_confinamiento.min_limo = 50;
config.limites_confinamiento.max_limo = 100;
config.limites_confinamiento.min_granular = 200;
config.limites_confinamiento.max_granular = 320;
config.limites_confinamiento.min_asfalto = 400.0;
config.limites_confinamiento.max_asfalto = 2500;

% AJUSTES TÉRMICOS
config.temp_referencia = 20;
config.difusividad_termica = 1.16e-6;
config.delta_T_MPDG = 7;
config.factor_atenuacion_termica = 2.5;

% Desviación Estándar del Offset Anual de Temperatura (Realismo Inter-Anual)
config.std_anual_offset_T = 1.5;
% AJUSTES DE POST-PROCESAMIENTO (Ruido y Suavizado)
config.std_ruido_relativo_otros = 0.030;
config.std_ruido_relativo_granular = 0.040;
config.std_ruido_it = 8.0;
config.factor_inercia_minima_granular = 0.15;
config.granular_smoothing_window_fraction = 6.0;
config.grado_polinomio_sg = 3;
config.factor_inercia_minima_otros = 0.10;
config.smoothing_window_fraction_otros = 3.0;
config.grado_polinomio_sg_otros = 3;
end

function centros = calcular_centros_capas(espesores)
profundidades_superiores = [0, cumsum(espesores(1:end-1))];
centros = profundidades_superiores + espesores / 2;
end
```

```

function config = configurar_propiedades_capas(config)
    pesos_volumetricos = [24.0, 22.0, 20.5, 18.5, 17.0]; %
    kN/m3
    porosidades = [0.08, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45];
    config.pesos_volumetricos = pesos_volumetricos;
    config.porosidades = porosidades;

    config.parametros_VG = cell(1, config.numero_capas);
    alfas_VG = [0.0005, 0.0010, 0.0020, 0.0050, 0.0080];
    ns_VG = [3.0, 2.5, 2.0, 1.6, 1.2];
    for i = 1:config.numero_capas
        config.parametros_VG{i} = struct();
        config.parametros_VG{i}.alfa = alfas_VG(i);
        config.parametros_VG{i}.n = ns_VG(i);
        config.parametros_VG{i}.m = 1 - 1/ns_VG(i);
    end
end

function simbolo = obtener_simbolo_material(tipo_material)
    if strcmp(tipo_material, 'arcilla'), simbolo = 'CH';
    elseif strcmp(tipo_material, 'limo'), simbolo = 'ML';
    elseif strcmp(tipo_material, 'granular'), simbolo = 'SM';
    elseif strcmp(tipo_material, 'asfalto'), simbolo = 'ASF';
    else, simbolo = 'UNK'; end
end

function climate_data =
cargar_datos_climaticos(nombre_archivo)
    if ~isfile(nombre_archivo), error('Archivo climatico no
    encontrado: %s', nombre_archivo); end
    try tabla_datos = readtable(nombre_archivo); catch,
    error('Error al leer archivo climatico CSV'); end
    columnas_requeridas = {'Year', 'Month', 'IT', 'Tmean_C'};
    columnas_faltantes = setdiff(columnas_requeridas,
    tabla_datos.Properties.VariableNames);
    if ~isempty(columnas_faltantes), error('Columnas
    faltantes: %s', strjoin(columnas_faltantes, ', ')); end

    climate_data = struct();
    climate_data.fechas = datetime(tabla_datos.Year,
    tabla_datos.Month, ones(height(tabla_datos), 1));
    climate_data.fechas_num =
    datenum(climate_data.fechas);
    climate_data.IT = tabla_datos.IT;
    climate_data.temperatura_media = tabla_datos.Tmean_C;
    climate_data.numero_meses = length(tabla_datos.Year);
    climate_data.years = tabla_datos.Year;
    climate_data.months = tabla_datos.Month;
end

function props_hidraulicas =
calcular_propiedades_hidraulicas(climate_data, config)
    num_meses = climate_data.numero_meses; num_capas =
    config.numero_capas;
    props_hidraulicas = struct();
    props_hidraulicas.contenido_agua = zeros(num_meses,
    num_capas);
    props_hidraulicas.succion = zeros(num_meses,
    num_capas);

    parametros_suelo = obtener_parametros_suelo();
    it_ruido = config.std_ruido_it * randn(num_meses, 1);

    for capa = 1:num_capas
        tipo_material = config.tipos_material{capa}; porosidad
        = config.porosidades(capa);
        params =
        obtener_parametros_tipo_suelo(parametros_suelo,
        tipo_material);

        IT_valores_aplicados = climate_data.IT + it_ruido;

        theta_sat = porosidad;

        contenido_agua = theta_sat .* (1 ./ (1 + exp(-params.k .*
        (IT_valores_aplicados - params.IT0))));
        contenido_agua = max(contenido_agua, 0.01);
        contenido_agua = min(contenido_agua, theta_sat * 0.95);
        props_hidraulicas.contenido_agua(:, capa) =
        contenido_agua;

        % Cálculo de Succión con modelo Van Genuchten
        theta_r = params.theta_r; theta_efectivo =
        max(contenido_agua, theta_r + 1e-6);
        Se_vg = (theta_efectivo - theta_r) ./ (theta_sat - theta_r);
        Se_vg = max(Se_vg, 1e-6); Se_vg = min(Se_vg,
        0.9999);
        vg_params = config.parametros_VG{capa};
        succion = (1/vg_params.alfa) .* ((Se_vg.^(-
        1/vg_params.m) - 1).^(1/vg_params.n));
        props_hidraulicas.succion(:, capa) = max(succion, 1);

        props_hidraulicas.grado_saturacion(:, capa) =
        contenido_agua ./ porosidad;
    end
end

function parametros = obtener_parametros_suelo()
    parametros = struct();
    parametros.arcilla = struct('k', 0.0082, 'IT0', -168.918,
    'theta_r', 0.0000);
    parametros.limo = struct('k', 0.0149, 'IT0', -63.3398,
    'theta_r', 0.0654);
    parametros.granular = struct('k', 0.0226, 'IT0', -38.5505,
    'theta_r', 0.0000);
    parametros.asfalto = parametros.granular;
end

function params =
obtener_parametros_tipo_suelo(parametros_suelo,
tipo_material)
    if strcmp(tipo_material, 'arcilla'), params =
    parametros_suelo.arcilla;
    elseif strcmp(tipo_material, 'limo'), params =
    parametros_suelo.limo;
    elseif strcmp(tipo_material, 'granular'), params =
    parametros_suelo.granular;
    elseif strcmp(tipo_material, 'asfalto'), params =
    parametros_suelo.asfalto;
    else, params = parametros_suelo.granular;
    end
end

function datos_esfuerzos = simular_carga_vehicular(config)
    num_capas = config.numero_capas; P = 40; r = 0.15; %
    Carga, Radio
    datos_esfuerzos = struct(); datos_esfuerzos.desviador =
    zeros(1, num_capas); datos_esfuerzos.confinante = zeros(1,
    num_capas);
    for capa = 1:num_capas
        profundidad_z = config.centros_capas(capa);
        peso_propio = calcular_esfuerzo_peso_propio(config,
        capa);
        datos_esfuerzos.confinante(capa) = max(21,
        peso_propio); % sigma_3 (kPa)

        radio_efectivo = r + profundidad_z * 0.5;
        sigma_vertical_carga = P / (pi * radio_efectivo^2) *
        1000;
        datos_esfuerzos.desviador(capa) = max(21,
        sigma_vertical_carga * 0.65); % sigma_d (kPa)
    end
end

function peso_propio =
calcular_esfuerzo_peso_propio(config, capa)

```

```

    espesores = config.espesores; pesos_volumetricos =
config.pesos_volumetricos;
    peso_propio = 0;
    if capa == 1
        peso_propio = pesos_volumetricos(capa) *
espesores(capa) / 2;
    else
        for i = 1:capa-1, peso_propio = peso_propio +
pesos_volumetricos(i) * espesores(i); end
        peso_propio = peso_propio + pesos_volumetricos(capa)
* espesores(capa) / 2;
    end
end

function          datos_temp          =
calcular_temperaturas_suelo(climate_data, config)
    num_meses = climate_data.numero_meses;

    % 1. Temperatura media anual (Base para la T a
profundidad)
    T_aire_base = climate_data.temperatura_media;
    T_avg_annual = mean(T_aire_base);

    % 2. Generar Offset Anual Estocástico (para variabilidad
climática año a año)
    years_unique = unique(climate_data.years);
    num_years = length(years_unique);
    annual_offsets = config.std_anual_offset_T *
randn(num_years, 1);

    T_aire_mensual_con_variabilidad = T_aire_base;
    for i = 1:num_years
        year = years_unique(i);
        indices = climate_data.years == year;
        T_aire_mensual_con_variabilidad(indices) =
T_aire_base(indices) + annual_offsets(i);
    end

    periodo_anual_seg = 365.25 * 24 * 3600;
    difusividad = config.difusividad_termica;
    coef_atenuacion_base = sqrt(pi / (difusividad *
periodo_anual_seg));
    coef_atenuacion = coef_atenuacion_base *
config.factor_atenuacion_termica;

    datos_temp = zeros(num_meses, config.numero_capas);
    for capa = 1:config.numero_capas
        profundidad = config.centros_capas(capa);
        factor_atenuacion = exp(-profundidad *
coef_atenuacion);
        ajuste_hosseini = config.delta_T_MPDG * exp(-
profundidad * 2.5);

        for mes = 1:num_meses
            T_aire = T_aire_mensual_con_variabilidad(mes);

            % Modelo Térmico Refinado: T_suelo =
T_media_anual + Fluctuación_atenuada + Ajuste_superficial
            T_fluctuacion = T_aire - T_avg_annual;
            temp_final = T_avg_annual + (T_fluctuacion *
factor_atenuacion) + ajuste_hosseini;

            datos_temp(mes, capa) = temp_final;
        end
    end

    % Post-verificación de la temperatura mínima (Asegura no
congelación en capas profundas)
    T_min_seguridad = 5;
    datos_temp(:, 2:end) = max(datos_temp(:, 2:end),
T_min_seguridad);
    datos_temp(:, 1) = max(datos_temp(:, 1), -5);
end

function          [theta_corr,          succion_corr]          =
aplicar_correccion_temperatura(theta,          succion,          temp,
tipo_material, temp_ref)
    dif_temp = temp - temp_ref;
    if strcmp(tipo_material, 'asfalto'), factor_theta = 0.020;
factor_succion = 0.010;
    elseif strcmp(tipo_material, 'granular'), factor_theta =
0.008; factor_succion = 0.005;
    elseif strcmp(tipo_material, 'limo'), factor_theta = 0.012;
factor_succion = 0.008;
    elseif strcmp(tipo_material, 'arcilla'), factor_theta = 0.018;
factor_succion = 0.012;
    else, factor_theta = 0.010; factor_succion = 0.006;
    end
    theta_corr = theta .* (1 + factor_theta .* dif_temp);
    succion_corr = succion .* (1 + factor_succion .* dif_temp);
    theta_corr = max(0.01, min(theta_corr, 0.65));
    succion_corr = max(1, min(succion_corr, 15000));
end

% -----
% PASO 6: CÁLCULO DEL MÓDULO RESILIENTE
(MR)
% -----

function          datos_MR          =
calcular_modulo_resiliente(props_hidraulicas,
datos_temperatura, datos_esfuerzos, climate_data, config)
    num_meses = climate_data.numero_meses; num_capas =
config.numero_capas;
    datos_MR = struct();
    datos_MR.arcilla = zeros(num_meses, num_capas);
    datos_MR.limo = zeros(num_meses, num_capas);
    datos_MR.granular = zeros(num_meses, num_capas);
    datos_MR.asfalto = zeros(num_meses, num_capas);
    datos_MR.final = zeros(num_meses, num_capas);

    IT_valores = climate_data.IT;
    IT_referencia = 0;

    it_ruido = config.std_ruido_it * randn(num_meses, 1);

    for capa = 1:num_capas
        tipo_material = config.tipos_material{capa};
        theta = props_hidraulicas.contenido_agua(:, capa);
        succion = props_hidraulicas.succion(:, capa);
        temperatura = datos_temperatura(:, capa);

        sigma_d = datos_esfuerzos.desviador(capa);
        sigma_3 = datos_esfuerzos.confinante(capa);
        profundidad_z = config.centros_capas(capa);

        Theta_eff = 3 * sigma_3 + sigma_d;

        [theta_corr,          succion_corr]          =
aplicar_correccion_temperatura(...
            theta,          succion,          temperatura,          tipo_material,
config.temp_referencia);

        log_succion = log10(succion_corr);
        log_theta_eff = log10(Theta_eff);

        % --- MODELO DE SUELOS COHESIVOS/FINOS
(Arcilla/Limo) ---
        if strcmp(tipo_material, 'arcilla') || strcmp(tipo_material,
'limo')
            if strcmp(tipo_material, 'arcilla')
                k_decay = 0.00005; MR_min =
config.limite_confinamiento.min_arcilla; MR_max =
config.limite_confinamiento.max_arcilla;

```

```

MR_base_esf = exp(4.5 + 0.15 * log_succion + 1.2
* log_theta_eff - 25.0 * theta_corr);
else % Limo
    k_decay = 0.000035; MR_min =
config.limite_confinamiento.min_limo; MR_max =
config.limite_confinamiento.max_limo;
MR_base_esf = exp(4.8 + 0.20 * log_succion + 1.5
* log_theta_eff - 35.0 * theta_corr);
end

IT_campana = IT_valores + it_ruido;
FS = exp(-k_decay * (IT_campana -
IT_referencia).^2);
mr_calculado_normalizado = MR_min + FS .*
(MR_max - MR_min);
mr_calculado = 0.85 * mr_calculado_normalizado +
0.15 * MR_base_esf;

% --- MODELO GRANULAR (FCI - Factor de
Condición Hídrica) ---
elseif strcmp(tipo_material, 'granular')
    MR_min_conf =
config.limite_confinamiento.min_granular;
    MR_max_conf =
config.limite_confinamiento.max_granular;

    if capa == 2, IT_rango_cal = 150.0; IT_max_base =
60.0; k_it_sensibilidad = 1.0;
    else, IT_rango_cal = 100.0; IT_max_base = 40.0;
    k_it_sensibilidad = 0.7;
    end

    IT_campana = IT_valores + it_ruido;
    FHI_base = 1.0 - k_it_sensibilidad * (((IT_campana -
IT_max_base) / IT_rango_cal).^2);
    FHI = max(0.05, min(1.0, FHI_base));

    MR_calculado_FCI = MR_min_conf +
(MR_max_conf - MR_min_conf) .* FHI;
    k_profundidad = 0.15;
    FPD = 1.0 - k_profundidad * exp(-1.0 /
(profundidad_z + 1e-6));

    Termino_Confinamiento_Base = 10.0 *
log_theta_eff;
    mr_calculado = MR_calculado_FCI .* FPD +
Termino_Confinamiento_Base;
    mr_calculado = max(MR_min_conf,
min(mr_calculado, MR_max_conf));

% --- MODELO ASFALTO (T Dominante) ---
else
    exp_arg_asfalto = 7.1 - 0.4 * theta_corr - 0.070 *
IT_valores .* temperatura + ...
0.08 * log_succion + 0.8 * log_theta_eff;
    mr_calculado = exp(exp_arg_asfalto);

    MR_min_conf =
config.limite_confinamiento.min_asfalto;
    MR_max_conf =
config.limite_confinamiento.max_asfalto;
    end

    if strcmp(tipo_material, 'arcilla'), datos_MR.arcilla(:,
capa) = mr_calculado;
    elseif strcmp(tipo_material, 'limo'), datos_MR.limo(:,
capa) = mr_calculado;
    elseif strcmp(tipo_material, 'granular'),
datos_MR.granular(:, capa) = mr_calculado;
    else, datos_MR.asfalto(:, capa) = mr_calculado;
    end
end

% --- POST-PROCESAMIENTO (Ruido, Inercia y
Suavizado) ---
datos_MR_procesado =
aplicar_suavizado_controlado_y_ruido(datos_MR,
climate_data, config);

% --- ASIGNACIÓN FINAL CON CONFINAMIENTO
(Restringe al Rango de Norma) ---
for capa = 1:num_capas
    tipo_material = config.tipos_material{capa};
    mr_calculado = datos_MR_procesado.(tipo_material)(:,
capa);

    if strcmp(tipo_material, 'asfalto'), MR_min =
config.limite_confinamiento.min_asfalto; MR_max =
config.limite_confinamiento.max_asfalto;
    elseif strcmp(tipo_material, 'arcilla'), MR_min =
config.limite_confinamiento.min_arcilla; MR_max =
config.limite_confinamiento.max_arcilla;
    elseif strcmp(tipo_material, 'limo'), MR_min =
config.limite_confinamiento.min_limo; MR_max =
config.limite_confinamiento.max_limo;
    else, MR_min =
config.limite_confinamiento.min_granular; MR_max =
config.limite_confinamiento.max_granular;
    end

    datos_MR.final(:, capa) = max(MR_min,
min(mr_calculado, MR_max));
end

datos_MR.IT_ruidoso = IT_valores + it_ruido;
end

% --- FUNCIONES DE POST-PROCESAMIENTO ---

function datos_MR_procesado =
aplicar_suavizado_controlado_y_ruido(datos_MR,
climate_data, config)
    materiales = {'asfalto', 'granular', 'limo', 'arcilla'};
    datos_MR_procesado = datos_MR;
    num_meses = climate_data.numero_meses;

    ventana_otros = max(3, round(num_meses /
config.smoothing_window_fraction_otros));
    if mod(ventana_otros, 2) == 0, ventana_otros =
ventana_otros + 1; end

    ventana_granular = max(3, round(num_meses /
config.granular_smoothing_window_fraction));
    if mod(ventana_granular, 2) == 0, ventana_granular =
ventana_granular + 1; end

    for i = 1:length(materiales)
        material = materiales{i};
        if isfield(datos_MR, material)
            datos_originales = datos_MR.(material);

            if strcmp(material, 'granular')
                ventana_actual = ventana_granular;
                factor_inercia =
config.factor_inercia_minima_granular;
                std_ruido_relativo =
config.std_ruido_relativo_granular;
                grado_polinomio = config.grado_polinomio_sg;
            else
                ventana_actual = ventana_otros;
                factor_inercia =
config.factor_inercia_minima_otros;
                std_ruido_relativo =
config.std_ruido_relativo_otros;
            end
        end
    end
end

```

```

        grado_polinomio =
config.grado_polinomio_sg_otros;
end

        datos_ruido =
aplicar_ruido_controlado(datos_originales,
std_ruido_relativo);

        datos_suavizados_inercia =
aplicar_inercia_minima(datos_ruido, factor_inercia);
        datos_suavizados_extremo =
aplicar_suavizado_savitzky_golay(datos_suavizados_inercia
, ventana_actual, grado_polinomio);

        datos_MR_procesado(material) =
datos_suavizados_extremo;
end
end
end

function datos_suavizados_sg =
aplicar_suavizado_savitzky_golay(datos, ventana,
grado_polinomio)
[~, num_capas] = size(datos);
datos_suavizados_sg = zeros(size(datos));

grado_polinomio = min(grado_polinomio, ventana - 1);

for capa = 1:num_capas
    if all(datos(:, capa) == 0), continue; end
    try
        if exist('sgolayfilt', 'builtin') || exist('sgolayfilt', 'file')
            datos_suavizados_sg(:, capa) = sgolayfilt(datos(:,
capa), grado_polinomio, ventana);
        else
            % Fallback a Media Móvil si sgolayfilt no está
            disponible
            if exist('movmean', 'builtin') || exist('movmean',
'file')
                datos_suavizados_sg(:, capa) =
movmean(datos(:, capa), ventana);
            else
                datos_suavizados_sg(:, capa) = conv(datos(:,
capa), ones(ventana, 1)/ventana, 'same');
            end
        end
    catch
        datos_suavizados_sg(:, capa) = conv(datos(:, capa),
ones(ventana, 1)/ventana, 'same');
    end
end
end

function datos_ruido = aplicar_ruido_controlado(datos,
std_relativo)
[num_meses, num_capas] = size(datos);
datos_ruido = datos;
for capa = 1:num_capas
    if all(datos(:, capa) == 0), continue; end
    mr_avg = mean(datos(:, capa));
    std_abs = mr_avg * std_relativo;
    ruido = std_abs * randn(num_meses, 1);
    datos_ruido(:, capa) = datos(:, capa) + ruido;
end
end

function datos_suavizados = aplicar_inercia_minima(datos,
factor_inercia_extra)
[num_meses, num_capas] = size(datos);
datos_suavizados = datos;
for mes = 2:num_meses
    for capa = 1:num_capas
        if all(datos(:, capa) == 0), continue; end
        % Simple filtro IIR para simular inercia (MR_actual
        = (1-a)*MR_calc + a*MR_anterior)
        datos_suavizados(mes, capa) = (1 -
        factor_inercia_extra) * datos_suavizados(mes, capa) + ...
        factor_inercia_extra *
        datos_suavizados(mes-1, capa);
    end
end

function exportar_resultados(datos_MR, props_hidraulicas,
datos_temperatura, datos_esfuerzos, climate_data, config)
num_meses = climate_data.numero_meses; num_capas =
config.numero_capas; total_registros = num_meses *
num_capas;
fechas = cell(total_registros, 1); nombres_capas =
cell(total_registros, 1); tipos_material = cell(total_registros,
1);
theta = zeros(total_registros, 1); succion =
zeros(total_registros, 1); saturacion = zeros(total_registros,
1);
IT_val = zeros(total_registros, 1); T_val =
zeros(total_registros, 1); sigma_d_val =
zeros(total_registros, 1); sigma_3_val =
zeros(total_registros, 1);
mr_final = zeros(total_registros, 1);

indice_registro = 1;
for capa = 1:num_capas
    for mes = 1:num_meses
        fechas{indice_registro} = climate_data.fechas(mes);
        nombres_capas{indice_registro} =
config.nombres_capas{capa};
        tipos_material{indice_registro} =
config.tipos_material{capa};
        theta(indice_registro) =
props_hidraulicas.contenido_agua(mes,
capa);
        succion(indice_registro) = props_hidraulicas.succion(mes,
capa);
        saturacion(indice_registro) =
props_hidraulicas.grado_saturacion(mes, capa);
        IT_val(indice_registro) = climate_data.IT(mes);
        T_val(indice_registro) = datos_temperatura(mes,
capa);
        sigma_d_val(indice_registro) =
datos_esfuerzos.desviador(capa);
        sigma_3_val(indice_registro) =
datos_esfuerzos.confinante(capa);
        mr_final(indice_registro) = datos_MR.final(mes,
capa);
        indice_registro = indice_registro + 1;
    end
end

resultados_tabla = table(fechas, nombres_capas,
tipos_material, IT_val, T_val, theta, succion, saturacion,
sigma_d_val, sigma_3_val, mr_final, ...
'VariableNames', {'Fecha', 'Capa',
'Material', 'IT_Thornthwaite', 'Temperatura_C',
'ContenidoAgua_Vol', 'Succion_kPa', 'GradoSaturacion',
'SigmaDesviador_kPa', 'SigmaConfinante_kPa',
'MR_Final_MPa'});
writetable(resultados_tabla,
'MR_resultados_completos_v21.0.csv');
end

function mostrar_resumen_final(datos_MR, config)
fprintf("\n=== RESUMEN ESTADISTICO FINAL
===\n");
for capa = 1:config.numero_capas
    if capa <= size(datos_MR.final, 2)
        mr_capa = datos_MR.final(:, capa);
        mr_promedio = mean(mr_capa); mr_desviacion =
std(mr_capa); cv = (mr_desviacion / mr_promedio) * 100;
        simbolo_material =
obtener_simbolo_material(config.tipos_material{capa});
    end
end

```

```

        if strcmp(config.tipos_material{capa}, 'asfalto'),
MR_min_conf = config.limite_confinamiento.min_asfalto;
MR_max_conf = config.limite_confinamiento.max_asfalto;
        elseif strcmp(config.tipos_material{capa}, 'arcilla'),
MR_min_conf = config.limite_confinamiento.min_arcilla;
MR_max_conf = config.limite_confinamiento.max_arcilla;
        elseif strcmp(config.tipos_material{capa}, 'limo'),
MR_min_conf = config.limite_confinamiento.min_limo;
MR_max_conf = config.limite_confinamiento.max_limo;
        else,
            MR_min_conf =
config.limite_confinamiento.min_granular; MR_max_conf
= config.limite_confinamiento.max_granular;
        end

fprintf('\n%s (%s):\n', config.nombres_capas{capa},
simbolo_material);
fprintf('    Profundidad central: %2f m\n',
config.centros_capas{capa});
fprintf('    Promedio MR: %1f MPa\n', mr_promedio);
fprintf('    Rango MR: %1f - %1f MPa (Límites de
Confinamiento: %1f a %1f MPa)\n', ...
min(mr_capa), max(mr_capa), MR_min_conf,
MR_max_conf);
fprintf('    Coef. Variacion: %1f%%\n', cv);
    end
end
end

% -----
% FUNCIONES DE VISUALIZACIÓN (Mantenidas)
% -----

function crear_visualizaciones(datos_MR,
propiedades_hidraulicas, datos_temperatura,
datos_esfuerzos, climate_data, config)

% Gráficas Individuales MR vs IT con Límites de
Confinamiento (FIGURA 6.x)
crear_graficas_individuales_limite_norma(datos_MR,
climate_data, config);

% Serie de Tiempo de Temperatura (FIGURA 1)
crear_grafica_temperatura(datos_temperatura,
climate_data, config);

% Gráfica de Esfuerzos (FIGURA 2)
crear_grafica_esfuerzos_mallado(datos_esfuerzos,
config);

% Mapa de Calor IT de Referencia (FIGURA 3)
crear_mapa_calor(datos_MR, climate_data, config);

% Serie de Tiempo de MR (FIGURA 4.x)
crear_graficas_individuales_MR_tiempo(datos_MR,
climate_data, config);

% Gráfica de Dispersión MR vs IT Simple (FIGURA 5.x)
crear_graficas_individuales_MR_IT(datos_MR,
climate_data, config);

% MAPA DE CALOR MR vs PROFUNDIDAD/TIEMPO
(FIGURA 7)
crear_mapa_calor_mr_profundidad(datos_MR,
climate_data, config);

% MAPA DE CALOR TEMPERATURA vs
PROFUNDIDAD/TIEMPO (FIGURA 8)
crear_mapa_calor_temperatura(datos_temperatura,
climate_data, config);

fprintf('Visualizaciones creadas exitosamente.\n');
end

function [ticks, labels] =
configurar_eje_tiempo(climate_data)
fechas_num = climate_data.fechas_num;
years = climate_data.years;
months = climate_data.months;

inicio_anios_idx = find(months == 1);
ticks = fechas_num(inicio_anios_idx);
labels = arrayfun(@(y) sprintf('%d', y),
years(inicio_anios_idx), 'UniformOutput', false);

if months(1) ~= 1
ticks = [fechas_num(1); ticks];
labels = {sprintf('%d', years(1)); labels{}};
end
end

function
crear_graficas_individuales_limite_norma(datos_MR,
climate_data, config)
IT_valores = datos_MR.IT_ruidoso;
colores = lines(config.numero_capas);
it_min = min(IT_valores) * 0.95;
it_max = max(IT_valores) * 1.05;

for capa = 1:config.numero_capas
figure('Name', sprintf('FIGURA 6.%d. MR vs IT - %s',
capa, config.nombres_capas{capa})), 'Position', [50 +
capa*40, 50 + capa*40, 800, 600]);
mr_capa = datos_MR.final(:, capa);
tipo_material = config.tipos_material{capa};
simbolo = obtener_simbolo_material(tipo_material);

if strcmp(tipo_material, 'asfalto'), MR_min_conf =
config.limite_confinamiento.min_asfalto; MR_max_conf =
config.limite_confinamiento.max_asfalto;
elseif strcmp(tipo_material, 'arcilla'), MR_min_conf =
config.limite_confinamiento.min_arcilla; MR_max_conf =
config.limite_confinamiento.max_arcilla;
elseif strcmp(tipo_material, 'limo'), MR_min_conf =
config.limite_confinamiento.min_limo; MR_max_conf =
config.limite_confinamiento.max_limo;
else,
MR_min_conf =
config.limite_confinamiento.min_granular; MR_max_conf
= config.limite_confinamiento.max_granular;
end

X_patch_norma = [it_min, it_max, it_max, it_min];
Y_patch_norma = [MR_min_conf, MR_min_conf,
MR_max_conf, MR_max_conf];
patch(X_patch_norma, Y_patch_norma, [0.8, 0.8, 0.8],
'FaceAlpha', 0.4, 'DisplayName', 'Límites de Confinamiento
SCT (Referencia)');
hold on;

plot([it_min, it_max], [MR_max_conf, MR_max_conf],
'r', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', sprintf('Límite Superior
(%1f MPa)', MR_max_conf));
plot([it_min, it_max], [MR_min_conf, MR_min_conf],
'g', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', sprintf('Límite Inferior
(%1f MPa)', MR_min_conf));

scatter(IT_valores, mr_capa, 40, colores{capa, :}, 'filled',
'MarkerFaceAlpha', 0.6, ...
'DisplayName', 'MR Final');

y_min_plot = min([min(mr_capa)*0.95,
MR_min_conf*0.95]);
y_max_plot = max([max(mr_capa)*1.05,
MR_max_conf*1.05]);

```

```

ylim([y_min_plot, y_max_plot]);
xlim([it_min, it_max]);

titulo_str = sprintf('FIGURA 6.%d: MR vs Índice de
Thornthwaite (IT) - %s (%s)', capa,
config.nombres_capas{capa}, simbolo);
title(titulo_str);
xlabel('IT (Índice de Thornthwaite)');
ylabel('MR (MPa)');
legend('Location', 'best');
grid on;
hold off;
try, print(gcf, 'FIGURA_6_MR_vs_IT_Normalizado_%s',
config.nombres_capas{capa}), '-dpng'); catch, end
end

function crear_grafica_temperatura(datos_temp,
climate_data, config)
figure('Name', 'FIGURA 1. Distribución de Temperatura
vs Tiempo', 'Position', [100, 100, 1000, 600]);
colores = lines(config.numero_capas);
fechas_num = climate_data.fechas_num;

for capa = 1:config.numero_capas
plot(fechas_num, datos_temp(:, capa), 'Color',
colores(capa, :), 'LineWidth', 2, 'DisplayName',
config.nombres_capas{capa});
hold on;
end

[ticks_x, ~] = configurar_eje_tiempo(climate_data);
y_limits = ylim;
for t = ticks_x
plot([t, t], y_limits, 'k--', 'LineWidth', 0.5,
'HandleVisibility', 'off');
end
ylim(y_limits);

title('FIGURA 1. Distribución de Temperatura vs Tiempo
por Capa');
xlabel('Fecha de Análisis');
ylabel('Temperatura (°C)');
legend('Location', 'best');
grid on;
datetick('x', 'yyyy', 'keepticks');
try, print(gcf, 'FIGURA_1_Temperatura_vs_Tiempo', '-
dpng'); catch, end
end

function crear_grafica_esfuerzos_mallado(datos_esfuerzos,
config)
figure('Name', 'FIGURA 2. Esfuerzos (Confinante y
Desviador) por Capa', 'Position', [150, 150, 800, 500]);

centros_capas_str = arrayfun(@(i) sprintf('%s (%.2f m)',
config.nombres_capas{i}, config.centros_capas(i)),
1:config.numero_capas, 'UniformOutput', false);

bar([datos_esfuerzos.confinante;
datos_esfuerzos.desviador], 'grouped');

legend('Esfuerzo Confinante ($\sigma_3$) (kPa)',
'Esfuerzo Desviador ($\sigma_d$) (kPa)', 'Interpreter', 'latex',
'Location', 'northwest');
title('FIGURA 2. Esfuerzos de Tránsito (Confinante y
Desviador) por Capa');
ylabel('Esfuerzo (kPa)');
xticklabels(centros_capas_str);
xtickangle(45);
grid on;

try, print(gcf, 'FIGURA_2_Esfuerzos_por_Capa', '-dpng');
catch, end
end

function crear_mapa_calor(datos_MR, climate_data, config)
figure('Name', 'FIGURA 3. Índice de Thornthwaite (IT) vs
Tiempo', 'Position', [200, 200, 1000, 300]);

IT_valores = climate_data.IT;
fechas_num = climate_data.fechas_num;

profundidad_referencia = [0, 1];
pcolor(fechas_num, profundidad_referencia,
repmat(IT_valores, 2, 1));
shading flat;

title('FIGURA 3. Índice de Thornthwaite (IT) vs Tiempo
(Referencia Climática)');
xlabel('Fecha de Análisis');
ylabel('IT (Referencia Climática)');

[ticks_x, labels_x] = configurar_eje_tiempo(climate_data);
xticks(ticks_x);
xticklabels(labels_x);
yticks([]);

c = colorbar;
c.Label.String = 'Índice de Thornthwaite (IT)';

try, print(gcf, 'FIGURA_3_IT_Mapa_Calor', '-dpng');
catch, end
end

function crear_graficas_individuales_MR_tiempo(datos_MR,
climate_data, config)
colores = lines(config.numero_capas);
fechas_num = climate_data.fechas_num;

for capa = 1:config.numero_capas
figure('Name', sprintf('FIGURA 4.%d. MR vs Tiempo -
%s', capa, config.nombres_capas{capa}), 'Position', [250 +
capa*40, 250 + capa*40, 800, 500]);
mr_capa = datos_MR.final(:, capa);
tipo_material = config.tipos_material{capa};
simbolo = obtener_simbolo_material(tipo_material);

plot(fechas_num, mr_capa, 'Color', colores(capa, :),
'LineWidth', 2);
hold on;

[ticks_x, ~] = configurar_eje_tiempo(climate_data);
y_limits = ylim;
for t = ticks_x
plot([t, t], y_limits, 'k--', 'LineWidth', 0.5,
'HandleVisibility', 'off');
end
ylim(y_limits);

titulo_str = sprintf('FIGURA 4.%d: Módulo Resiliente
(MR) vs Tiempo - %s (%s)', capa,
config.nombres_capas{capa}, simbolo);
title(titulo_str);
xlabel('Fecha de Análisis');
ylabel('MR (MPa)');
grid on;
datetick('x', 'yyyy', 'keepticks');
hold off;

try, print(gcf, 'FIGURA_4_MR_vs_Tiempo_%s',
config.nombres_capas{capa}), '-dpng'); catch, end
end

```

```

end
end

function crear_graficas_individuales_MR_IT(datos_MR,
climate_data, config)
    colores = lines(config.numero_capas);
    IT_valores = datos_MR.IT_ruidoso;

    for capa = 1:config.numero_capas
        figure('Name', sprintf('FIGURA 5.%d. MR vs IT - %s
(Dispersión)', capa, config.nombres_capas{capa})), 'Position',
[300 + capa*40, 300 + capa*40, 800, 500]);
        mr_capa = datos_MR.final(:, capa);
        tipo_material = config.tipos_material{capa};
        simbolo = obtener_simbolo_material(tipo_material);

        scatter(IT_valores, mr_capa, 40, colores(capa, :), 'filled',
'MarkerFaceAlpha', 0.6);

        titulo_str = sprintf('FIGURA 5.%d: MR vs Índice de
Thornthwaite (IT) - %s (%s)', capa,
config.nombres_capas{capa}, simbolo);
        title(titulo_str);
        xlabel('IT (Índice de Thornthwaite)');
        ylabel('MR (MPa)');
        grid on;

        try, print(gcf,
sprintf('FIGURA_5_MR_vs_IT_Dispersion_Simple_%s',
config.nombres_capas{capa}), '-dpng'); catch, end
    end

function crear_mapa_calor_mr_profundidad(datos_MR,
climate_data, config)
    profundidades = config.centros_capas;
    fechas_num = climate_data.fechas_num;
    MR_matriz = datos_MR.final;

    figure('Name', 'FIGURA 7. MR vs Profundidad y Tiempo',
'Position', [50, 50, 1000, 600]);

    pcolor(fechas_num, profundidades, MR_matriz);
    shading interp;

    set(gca, 'YDir', 'reverse');
    xlabel('Fecha de Análisis (Tiempo)');
    ylabel('Profundidad Central de Capa (m)');

    [ticks_x, labels_x] =
configurar_eje_tiempo(climate_data);
    xticks(ticks_x);
    xticklabels(labels_x);

    hold on;
    y_limits = [0, profundidades(end) +
config.espesores(end)/2];
    for t = ticks_x
        plot([t, t], y_limits, 'w--', 'LineWidth', 0.5,
'HandleVisibility', 'off');
    end
    ylim([0, profundidades(end) + config.espesores(end)/2]);
    hold off;
    title('FIGURA 7. Módulo Resiliente (MR) vs Profundidad
y Tiempo');
    c = colorbar; c.Label.String = 'Módulo Resiliente (MPa)';
    caxis([min(MR_matriz(:)), max(MR_matriz(:))]);
    profundidades_limite = [0, cumsum(config.espesores)];
    for k = 1:length(profundidades_limite)
        line(xlim, [profundidades_limite(k),
profundidades_limite(k)], 'Color', 'k', 'LineStyle', '--',
'LineWidth', 0.5); end

    yticks(profundidades);
    ytick_labels = cell(1, length(profundidades));
    for k = 1:length(profundidades)
        ytick_labels{k} = sprintf('%s (%.2f m)',
config.nombres_capas{k}, profundidades(k));
    end
    yticklabels(ytick_labels);
    datetick('x', 'yyyy', 'keepticks');

    try, print(gcf,
'FIGURA_7_MR_Mapa_Calor_Profundidad_Tiempo', '-
dpng'); catch, end

function crear_mapa_calor_temperatura(datos_temp,
climate_data, config)
    profundidades = config.centros_capas;
    fechas_num = climate_data.fechas_num;
    T_matriz = datos_temp;

    figure('Name', 'FIGURA 8. Temperatura vs Profundidad y
Tiempo', 'Position', [50, 50, 1000, 600]);

    pcolor(fechas_num, profundidades, T_matriz);
    shading interp;

    set(gca, 'YDir', 'reverse');
    xlabel('Fecha de Análisis (Tiempo)');
    ylabel('Profundidad Central de Capa (m)');

    [ticks_x, labels_x] =
configurar_eje_tiempo(climate_data);
    xticks(ticks_x);
    xticklabels(labels_x);

    hold on;
    y_limits = [0, profundidades(end) +
config.espesores(end)/2];
    for t = ticks_x
        plot([t, t], y_limits, 'w--', 'LineWidth', 0.5,
'HandleVisibility', 'off');
    end
    ylim([0, profundidades(end) + config.espesores(end)/2]);
    hold off;

    title('FIGURA 8. Temperatura (°C) vs Profundidad y
Tiempo');

    c = colorbar; c.Label.String = 'Temperatura (°C)';
    caxis([min(T_matriz(:)), max(T_matriz(:))]);
    colormap('jet');

    profundidades_limite = [0, cumsum(config.espesores)];
    for k = 1:length(profundidades_limite)
        line(xlim, [profundidades_limite(k),
profundidades_limite(k)], 'Color', 'k', 'LineStyle', '--',
'LineWidth', 0.5);
    end
    yticks(profundidades);
    ytick_labels = cell(1, length(profundidades));
    for k = 1:length(profundidades)
        ytick_labels{k} = sprintf('%s (%.2f m)',
config.nombres_capas{k}, profundidades(k));
    end
    yticklabels(ytick_labels);
    datetick('x', 'yyyy', 'keepticks');

    try, print(gcf,
'FIGURA_8_Temperatura_Mapa_Calor_Profundidad_Tiem
po', '-dpng'); catch, end

```