

#### COORDINACIÓN DE INFRAESTRUCTURA

### INFORME DE INVESTIGACIÓN

#### PROYECTO No. IE 17/16:

DETERMINACIÓN DEL MODELO DE AJUSTE PARA LA DETERMINACIÓN DEL IFI EN CARRETERAS MEXICANAS CON EQUIPO MU METER (FASE II)

Responsable del proyecto:

Ing. Alfonso Pérez Salazar

Jefe de Grupo de Investigación Mecánica de Geomateriales

Aprobó:

Ing. Rodolfo Téllez Gutiérrez Coordinador de Infraestructura Autorizó:

Ing. Roberto Aguerrebere Salido
Coordinador Operativo
En cumplimiento a la Comisión otorgada por el Subsecretario de
Infraestructura, en términos de los artículos 2º, fracción II y 6º, fracciones VI y XVII del
Reglamento Interior de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, mediante el
Oficio No. 3.-113

### Créditos y Agradecimientos

El presente trabajo de investigación denominado "DETERMINACIÓN DEL MODELO DE AJUSTE PARA LA DETERMINACIÓN DEL IFI EN CARRETERAS MEXICANAS CON EQUIPO MU METER" fue desarrollado por los siguientes investigadores del Instituto Mexicano del Transporte: Ing. Alfonso Pérez Salazar, M. en C. María Guadalupe López Domínguez y Dr. Paul Garnica Anguas.

Se agradece la colaboración de los asistentes de Investigación: Filiberto Garduño Matadamas, Federico Castro Mondragón, Michael Villeda Acevedo, Luis Jaime Pantoja Peña; así como los Técnicos Mario Antonio Pérez González y Miguel Ángel Cervantes Nieto.

Especial agradecimiento a los Ingenieros Antonino Noé Robles Hernández, Daniel Sánchez Solís de la Dirección General de Servicios Técnicos y a los Jefes de las Unidades Generales de Servicios Técnicos de Nuevo León, Tabasco e Hidalgo y a su personal por el apoyo durante las mediciones en campo y la coordinación de los trabajos desarrollados en el presente proyecto.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 2 DE 90 F1 RI-003

## **ÍNDICE**

CRÉDITOS Y AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	8
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.2 ALCANCES	8
2. DESARROLLO DEL ESTUDIO	9
2.1 ANTECEDENTES	9
2.1.1 QUERÉTARO	9
2.1.1 NUEVO LEÓN	12
2.1.2 TABASCO	17
2.1.3 HIDALGO	20
3. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS SOBRE LOS TRAMOS DE PRUEBA PARA OBTENER I IFI	
3.1 DETERMINACIÓN DE LA MACROTEXTURA CON CÍRCULO DE ARENA	22
3.2 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN CON PÉNDULO BRITÁNICO	25
3.3 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN CON MU METER	28
4. OBTENCIÓN DE CURVAS MAESTRAS DEL IFI, A PARTIR DE PÉNDULO BRITÁNICO Y CÍRCULO DE ARENA	31
5. OBTENCIÓN DE CURVAS MAESTRAS DEL IFI, A PARTIR DE MU METER Y CÍRCULO I ARENA	
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
APÉNDICE A "CURVAS MAESTRAS DE IFI A PARTIR DE PÉNDULO BRITÁNICO Y CIRCULO DE ARENA DE LOS TRAMOS EVALUADOS"	42
APÉNDICE B "OBTENCIÓN DE CURVAS MAESTRAS DEL IFI, A PARTIR DE MU METER 'CÍRCULO DE ARENA"	
APÉNDICE C "COMPARACIÓN ENTRE CURVA MAESTRA DEL PÉNDULO BRITÁNICO Y CURVA FR DEL EQUIPO MU METER"	66
APÉNDICE D "COMPARACIÓN ENTRE CURVA MAESTRA DEL PÉNDULO BRITÁNICO Y CURVA MAESTRA CORREGIDA DEL EQUIPO MU METER"	
7. BIBLIOGRAFÍA	90

### **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1 Ubicación Geográfica de los Tramos de Estudio (Querétaro)	9
Figura 2 Ubicación Geográfica de los Tramos de Estudio (Nuevo León)	12
Figura 3 Ubicación Geográfica de los Tramos de Estudio (Tabasco)	17
Figura 4 Ubicación Geográfica de los Tramos de Estudio (Hidalgo)	20
Figura 5 Método del círculo de Arena para determinar la macrotextura de un Pavimento	23
Figura 6 Péndulo Británico utilizado en los Tramos de Prueba para determinar el C.F. de un pavimento.	27
Figura 7 Equipo Mu-Meter usado en los tramos evaluados para determinar el C.F	29
Figura 8 Relación entre los valores de CF para mu meter contra curva maestra	39
Figura 9 – 32 (ÁPENDICE A) Curva Maestra de IFI Para los Tramos Evaluados	42
Figura 33 – 56 (ÁPENDICE B) Curva de IFI para los Tramos Evaluados, a partir de FR60 con mu meter	54
Figura 57 - 80 (ÁPENDICE C)Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra para los Tramos Evaluados	66
Figura 81 - 104 (ÁPENDICE D) Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu Meter) de los Tramos Evaluados	ı- 78

### **ÍNDICE DE TABLAS**

Fabla 1 Ubicación de los Tramos de Estudio en el Estado de Querétaro	11
rabla 2 Ubicación de los Tramos de Estudio en el Estado de Nuevo León	16
Tabla 3 Tabla 4 Ubicación de los Tramos de Estudio en el Estado de Tabasco	19
Fabla 5 Ubicación de los Tramos de Estudio en el Estado de Tabasco.	22
Fabla 6 - 9 Promedio de los valores de macrotextura obtenidos con técnica volumétrica (círculo de arena) en los Tramos Evaluados.	
Fabla 10 - 13 Promedio de los valores de coeficiente de fricción con péndulo Británico sobre lo ramos Evaluados.	
Tabla 14 – 17 Promedio de los valores de coeficiente de fricción con mu meter sobre los tramo	os 29
Γabla 18 – 21 Valores de la constante de referencia de la velocidad (Sρ) en función de la macrotextura de los Tramos Evaluados	31
Tabla 22 - 25 Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) conpéndulo británico en los Tramos Evaluados.	33
Tabla 26 - 29 Valores de la fricción en el modelo IFI a 60 km/h (F60) en los Tramos Evaluados	s. 35
Fabla 30 – 33 Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) determinados con mu meter de los tramos Evaluados	36
「abla 34 Relación Curva Maestra (Péndulo Británico) y FR60 (Mu-Meter) en todos los Tramos Evaluados	38

#### RESUMEN

El Ing. Clemente Poon Hung, Director General de Servicios Técnicos, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, solicitó al IMT, determinar los parámetros de ajuste que deberán ser utilizados en la metodología del cálculo del IFI, en virtud de que en sus programas de auscultación se están realizando mediciones del coeficiente de fricción y el cálculo del índice de Fricción Internacional (IFI), lo anterior para 60 131 km de la red federal de carreteras.

Se presentan los resultados de las determinaciones de Coeficiente de fricción con péndulo británico y mu meter, así como de macrotextura con círculo de arena; con la finalidad de establecer la relación entre los dos equipos que determinan coeficiente de fricción, y con ayuda de la macrotextura, y dado que esta última y el péndulo británico fueron dos de los equipos armonizados en el experimento PIARC para determinar el IFI, establecer los parámetros que mejor ajusten la curva obtenida con mu meter a la curva de referencia del IFI.

El presente corresponde a la continuación del estudio realizado en 2015 en donde se determinaron los parámetros citados para tramos de referencia del IMT, en las proximidades de sus instalaciones; en este estudio se incorporaron resultados de 15 tramos carreteros en Nuevo León, Tabasco e Hidalgo para robustecer la base de datos y la confiabilidad de los resultados.

#### 1. INTRODUCCIÓN

La fricción está definida como la resistencia al deslizamiento de un cuerpo contra otro o una superficie. Actualmente es uno de los parámetros que más se cuidan en la auscultación de pavimentos, debido a la seguridad que implica a los usuarios tener C.F. (coeficientes de fricción) adecuados; ya que si los coeficientes son muy bajos el pavimento puede presentar riesgos de deslizamientos y por consiguiente accidentes, sobre todo en condiciones de lluvia, contrariamente para valores de fricción muy altos, la superficie puede tornarse muy rugosa y provocar un desgaste mucho mayor a lo habitual, en los neumáticos de los vehículos.

Desde hace varios años, se han empleado distintos equipos y metodologías en todo el mundo para calcular la fricción de las carreteras, con la inherente variabilidad en los parámetros entregados por cada uno de ellos.

La Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) realizó en 1995 un experimento para comparar y armonizar las medidas de textura y resistencia al deslizamiento. Con el fin de establecer correlaciones entre los distintos métodos y equipos usados en aquel entonces. Actualmente en México el equipo más empleado para determinar el coeficiente de fricción de un pavimento es el equipo Mu-meter, equipo que no fue armonizado en el experimento, por lo que no se cuenta con los parámetros de ajuste al modelo IFI para este equipo. Debido a lo anterior, se realizó un experimento para definir dichos parámetros propios del mu meter, tomando como referencia al Péndulo Británico y círculo de arena, que participaron en la armonización realizada por la PIARC para obtener el IFI.

Las parámetros a medir serán 2: Macrotextura (Circulo de Arena), Fricción (Péndulo Británico y equipo Mu-meter), las mediciones se realizarán tan cercanos en el tiempo como sea posible, con la finalidad de garantizar que los datos fueron tomados en las mismas condiciones del camino.

El presente informe corresponde a la determinación de los parámetros de ajuste A y B necesarios para obtener el IFI con equipo mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 7 DE 90 F1 RI-003

#### 1.1 Objetivos del estudio

Definir los parámetros de ajuste A y B que mejor satisfagan la relación coeficiente de fricciónvelocidad, misma que es función de la macrotextura y que constituye al modelo IFI.

#### 1.1.1. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del proyecto pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Definir los diferentes tramos homogéneos con un abanico en los valores de interés, en este caso coeficiente de fricción y macrotextura
- Determinar los valores de fricción de referencia de coeficiente de fricción con péndulo británico v macrotextura con círculo de arena.
- A partir de los valores de referencia obtener las curvas de IFI para cada tramo, utilizando los coeficientes establecidos en la metodología emanada del experimento PIARC.
- Obtener los valores de coeficiente de fricción con mu meter, del cual no se presenta armonización en el experimento PIARC y por ende no se presentaron sus coeficientes A y B de ajuste.
- Ajustar las curvas coeficiente de fricción-velocidad obtenidas por mu meter a las curvas obtenidas con péndulo británico tomadas como referencia, toda vez que este último si participó en la armonización y se cuenta con parámetros de ajuste para obtener la curva maestra Coeficiente de fricción- velocidad.

#### 1.2 Alcances

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) determinará los parámetros A y B de ajuste con los cuales se presume se pueden obtener las curvas maestras de coeficiente de fricción-velocidad que establece el modelo del IFI.

Lo anterior se realizará para varios tramos de prueba en diferentes regiones del País, con diferentes valores tanto de macrotextura como de coeficiente de fricción.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 8 DE 90 F1 RI-003

#### 2. DESARROLLO DEL ESTUDIO

#### 2.1 ANTECEDENTES

Los tramos de Estudio se sitúan en 4 diferentes estados de la República Mexicana; Querétaro, Nuevo León, Hidalgo y Tabasco. Propuestos por Ingenieros de la Dirección General de Servicios Técnicos, y elegidos en función de los valores que presentan en coeficiente de fricción y macrotextura, procurando que el abanico de valores en ambos parámetros sea amplio y representativo de las condiciones del País; utilizando la base de datos resultante del programa de auscultación de carreteras.

La evaluación consistió en la determinación de macrotextura (con circulo de Arena), Microtextura (con péndulo británico) y coeficiente de fricción (con equipo Mu-meter).

#### 2.1.1 QUERÉTARO

# ASPECTOS GEOGRÁFICOS Ubicación Geográfica



Figura 1 Ubicación Geográfica de los Tramos de Estudio (Querétaro)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 9 DE 90 F1 RI-003

#### Hidrografía:

La entidad (Querétaro) participa en dos grandes regiones hidrológicas nacionales: el Lerma - Santiago y el Pánuco. La región Lerma - Santiago está integrada por las cuencas Lerma - Toluca y La Laja; en tanto que la región Pánuco se compone por las cuencas: Tamuín y Moctezuma. En su región Occidental, por medio de los ríos Querétaro y del Pueblito, acopia las aguas de varios afluentes a partir del volcán Zamorano en Colón, señalándose como parte opuesta a la loma de Calamanda en Pedro Escobedo, para verter al río La Laja. Esta cuenca cubre una superficie de 2 800 km² en el estado y su desplazamiento medio anual es de 40 millones de metros cúbicos en la actualidad.

#### Clima:

En el estado se distinguen tres áreas climáticas bien definidas: la porción Sur que comprende parte de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, donde los climas son templados. La región Centro abarca áreas del Eje Neovolcánico, la Sierra Madre Oriental y la Mesa del Centro. Aquí los climas son semisecos, con variaciones de cálidos a templados y la zona Norte que corresponde a una porción de la Sierra Madre Oriental, con climas de cálidos a templados.

#### **Recursos Naturales:**

Entre los recursos naturales con que cuenta el estado, tienen especial lugar la riqueza forestal y la minería. Así, en lo que se refiere al recurso forestal, la entidad aprovecha las especies de pino, encino, cedro, oyamel, enebro, mezquite, eucalipto y otras de menor importancia, principalmente ubicadas en la Sierra Gorda. Ésta tiene aproximadamente 70 000 ha potencialmente productivas, aunque de éstas, sólo 17 000 ha tienen estudios de manejo.

Por su parte, la explotación minera es una actividad muy antigua en el estado, teniéndose múltiples registros arqueológicos de ello. Existen 10 distritos mineros de metales en la Sierra Gorda de Querétaro, con producción de plomo, plata, zinc, cobre, oro, mercurio y antimonio. Se encuentran, además, otras 7 zonas de explotación de minerales no metálicos: la zona de mármol; zona de sillar y caolín; zona de cantera; zona de ópalos; zona de sillar y pómez y zona de caleras.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 10 DE 90 F1 RI-003

#### Características y uso del Suelo:

Como resultado de la estructura orográfica, los tipos de clima y la vegetación, en el estado existen 4 tipos de suelos: los que se presentan en los Valles de San Juan del Río, Querétaro, Pedro Escobedo, Corregidora y El Marqués son denominados negros o chernozem, que se han formado con materiales de origen residual, aluvial y coluvial, y contienen abundante materia orgánica. Son profundos, de 3 a 6 m; se dan en terrenos planos o con poca pendiente y son de fertilidad adecuada para la producción agrícola intensiva, con climas templados y lluvias o humedad regular. En la parte central del estado se cuenta con suelos castaños o chestnut con regosoles y feozems, de capas delgadas de 50 cm de profundidad, de bajo contenido de materia orgánica

#### Identificación de los Tramos Evaluados:

Los tramos correspondientes son 10 de los cuales 3 se encuentran al interior del Instituto Mexicano del Transporte (Pista de pruebas IMT), los demás sobre la carretera Estatal 431, cercanos IMT:

TRAMO	UBICACIÓN
8C	Pista de Pruebas IMT
8E	Pista de Pruebas IMT
8F	Pista de Pruebas IMT
9A	Carretera Estatal 431 km 8+000 - 7+800
9B	Carretera Estatal 431 km 7+800 - 7+600
11A	Carretera Estatal 431 km 8+000 - 8+200
11B	Carretera Estatal 431 km 8+200 - 8+400
2B	Carretera Estatal 431 km 12+200 - 12+400
4	Carretera Estatal 431 km 11+000 - 10+800

Tabla 1 Ubicación de los Tramos de Estudio en el Estado de Querétaro.

#### 2.1.1 NUEVO LEÓN

# ASPECTOS GEOGRÁFICOS Ubicación Geográfica:

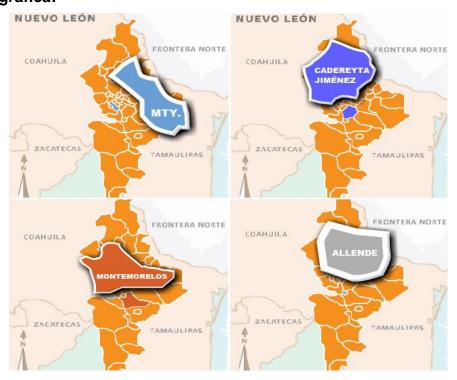


Figura 2 Ubicación Geográfica de los Tramos de Estudio (Nuevo León)

#### Hidrografía:

El estado, según estudios del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), se ve beneficiado por proporciones de las siguientes regiones fluviales: río Bravo, en lo que corresponde a la parte centro-norte; San Fernando-Soto La Marina, en la parte este y sureste; y El Salado en la parte sur-suroeste del estado. El río Bravo marca el límite entre los Estados Unidos de América y México, en la parte entre Ciudad Juárez y su desembocadura con el Golfo de México. En el estado de Nuevo León penetran cinco cuencas de este río.

Un área mínima del estado de Nuevo León corresponde a la parte suroeste de la cuenca río Bravo-Matamoros-Reynosa. La mayor parte de la cuenca río Bravo-San Juan queda dentro del estado de Nuevo León. Una de sus corrientes principales es el río San Juan segundo afluente de importancia del Bravo. Tiene su origen en el arroyo La Chueca que recibe aportaciones de varios pequeños arroyos perennes que bajan de la Sierra Madre Oriental. El arroyo La Chueca

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 12 DE 90 F1 RI-003

corre con dirección sureste hasta la presa La Boca construida para aumentar la dotación de agua de Monterrey y de aquí continúa con el nombre de río San Juan, cambiando su dirección hacia el noreste y recibiendo por la izquierda las aportaciones del río Santa Catarina y por la derecha las del río Ramos. Más adelante pasa por el poblado de San Juan Vado para continuar hacia el oriente, confluyendo en la margen derecha con el arroyo Garrapatas, el río Pilón y el arroyo Mohínos.

Los principales almacenamientos de esta región están ubicados dentro del municipio de Linares, N.L., y lo constituyen; la presa El Porvenir con una capacidad total de 5'280,000 de metros cúbicos que irriga 700 hectáreas y beneficia a 80 familias: las presas La Estrella y General Jerónimo Treviño, con una capacidad de 3, 000,000 de metros cúbicos irrigan 312 y 270 hectáreas, respectivamente, y benefician a 100 y 48 familias.

#### Clima:

El clima de Nuevo León es muy variable debido a las grandes regiones que forman la Sierra Madre; predominan los climas semisecos extremosos. La precipitación pluvial es bastante escasa, aunque cuenta con regiones que registran lluvias anuales mayores de 800 milímetros; la media general del estado oscila entre 300 y 600 milímetros. En la región de la Gran Llanura de Norteamérica se distribuyen principalmente los climas seco y semiseco. Los climas secos a los que se asocia el tipo de vegetación xerófita, se distribuyen en el extremo norte del estado, con dos subtipos: El seco muy cálido y cálido, cuya precipitación pluvial anual oscila entre 400 y 600 milímetros. En los meses de enero, marzo y diciembre se observa la menor incidencia de lluvias con una precipitación pluvial entre 10 y 15 milímetros la mayor precipitación pluvial ocurre en septiembre con un valor entre 110 y 120 milímetros.

La temperatura media anual es mayor a 22°C; la media mensual más alta se registra en julio y oscila entre 28° y 29°C y la mínima en enero con 14° y 15°C. El clima seco muy cálido con lluvia invernal incluye a los municipios de Lampazos. De Naranjo y parte de Sabinas Hidalgo, Vallecillo y Los Aldama, entre otros. La precipitación media anual, fluctúa entre 300 y 600 milímetros. La máxima se registra en el mes de septiembre y oscila entre 110 y 120 milímetros, y las mínimas de 10 y 15 milímetros, ocurre en los meses de marzo y diciembre. La temperatura

media anual es mayor de 22°C, la media mensual más cálida se registra en los meses de junio. Julio y agosto con 30°C y 31°C .y la menor en los meses de enero y diciembre con 13O y 14° C.

Los climas semisecos están asociados a la vegetación del matorral intermontano y mezquital, se distribuyen en el centro de la entidad con dos variantes: el clima semiseco muy cálido con lluvia en verano, se localizan en los municipios de General Terán y Linares; su precipitación media anual oscila entre 500 y 700 milímetros. La máxima precipitación pluvial se registra en septiembre con 160 y 170 milímetros y la mínima en marzo con 10 y 15 milímetros.

La temperatura media anual es de 22°C. Los meses más cálidos son junio, julio y agosto. Con 27° y 28°C; el mes más frío es enero, con una temperatura media de 15°C. El clima semiseco muy cálido con lluvia escasa todo el año se distribuye en los municipios de Melchor acampo, General Treviño y en parte General Bravo y Los Aldama. La precipitación media anual varía de 500 a 600 milímetros, su temperatura media anual es de 22°C. La mayor precipitación pluvial se da en el mes de septiembre y fluctúa entre los 1\0 y 120 milímetros; y la menor ocurre en marzo entre 10 y 15 milímetros.

#### **Recursos Naturales:**

Existen pocos yacimientos de minerales metálicos cuya producción es de mínima importancia. Prácticamente el aspecto económico de la geología se enfoca a la explotación de minerales no metálicos ya los bancos de roca caliza. Los yacimientos de minerales metálicos que se trabajan se encuentran localizados en la localidad de Mamulique donde se explota el zinc y en la localidad de La Iguana donde se trabaja eventualmente una mina de plomo y zinc.

En el cerro de las Mitras, en el cerro El Topo en el cañón de la huasteca y cerca de las grutas de Garda se llevan a cabo las explotaciones más grandes de caliza, misma que se utiliza en la industria del vidrio; también pequeños mineros, explotan la fosforita y la barita en el municipio de Galeana los cuales tienen como mercado a San Luis Potosí y a PEMEX. El yeso se explota en algunas localidades de los municipios de García, Hidalgo y Mina, se expende a la industria de la construcción en el área conurbada de Monterrey.

En la porción nororiental del estado existen yacimientos de hidrocarburos; PEMEX tiene en producción numerosos pozos que están intercalados con los gasoductos que llevan el hidrocarburo a las refinerías del norte. También existe un yacimiento de uranio que URAMEX está explorando. En los valles son explotadas por algunas compañías privadas grava y arena las cuales son utilizadas en la industria de la construcción y en la fabricación de tabicón.

En la Llanura Costera del Golfo Norte se encuentran algunos bosques de encino-pino en los sitios más altos. La extracción de los recursos maderables en esta región con fines comerciales tienen limitaciones fuertes, no obstante éstas son leves para la tala; aun así, el destino de lo obtenido es para consumo local.

#### Características y Uso del Suelo:

Al estado de Nuevo León lo comprenden tres zonas fisiográficas; la Gran Ilanura de Norteamérica, la Ilanura Costera del Golfo y la Sierra Madre Oriental. Mismas que, basadas en estudios del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática (INEGI), a continuación se describen. Unas de las Ilanuras más amplias dentro de la zona de la Gran Llanura de Norteamérica es la que se extiende desde la ciudad de Anáhuac. N.L., hasta Nueva Rosita. Coahuila. Dentro del estado la Gran Llanura abarca una superficie de 23,138.39 kilómetros cuadrados, en ella se localizan los municipios de Los Aldama, Anáhuac, China, Doctor Coss, General Bravo, General Treviño, Los Herreras, Melchor Ocampo, Parás y Vallecillo y parte de los de Agualeguas, Cerralvo, General Terán Lampazos de Naranjo y Los Ramones.

El sistema de Topoformas presenta, principalmente, lomeríos suaves con llanuras, sierra baja, meseta y valle con pendientes, por lo general, suaves y casi planas. Los suelos que predominan son los xerosoles, lúricos, cálcicos y háplicos. La vegetación más característica es el matorral espinoso, tamaulipeco y el mezquital. La agricultura en esta zona se practica en menos del 6 por ciento de su superficie, es decir en 1,362.63 kilómetros cuadrados; se dedican a la agricultura de riego 820.00 kilómetros cuadrados, ésta se realiza, en parte en el distrito de riego de Anáhuac. El suministro de agua se aplica por gravedad o aspersión. En la zona de la sierra Madre Oriental, predominan los litosoles y asociados a estos suelos están los xerosoles

cálcicos y háplicos. Las sierras y lomeríos localizados en esta área de Galeana son susceptibles de ser explotados forestalmente, en la extracción de lechuguilla.

Otra área que ocupa dentro del estado esta tercera zona fisiográfica es la conocida como Sierra Madre, la cual tiene una extensión de 10,149.29 kilómetros cuadrados y engloba a los municipios de Doctor Arroyo y Mier y Noriega, parte de Galeana y Aramberri. El sistema de Topoformas comprende a las sierras, lomeríos, llanuras y bajadas. En esta área, que ocupa casi toda la zona sur del estado, predominan los suelos xerosoles cálcicos; en el límite del estado con San Luis Potosí y en gran parte del municipio de Mier y Noriega, dominan los litosoles, en asociación con xerosoles, rendzinas y fluvisoles; en la porción occidental del estado abundan los xerosoles cálcicos asociados a xerosoles háplicos y litosoles; en el municipio de Galeana dominan suelos con alto contenido de sales asociados a xerosoles, litosoles y rendzinas.

El área de la Sierra Madre Oriental que queda dentro de Nuevo León que incluye los municipios: General Zaragoza, Iturbide, Rayones, Santa Catarina y Santiago, parte de los de Allende, Aramberri, Galeana, Garza García, Guadalupe, Juárez, Linares, Montemorelos y Monterrey; cubre una superficie de 8,808.45 kilómetros cuadrados. En esta predominan los suelos denominados litosol y rendzina, sin embargo existen asociaciones diversas de suelos que varían de acuerdo al sistema de Topoformas: sierra pliegue, sierra compleja, bajadas y valles.

#### Identificación de los Tramos Evaluados:

En este caso, los tramos son 5 y se encuentran más dispersos, en diferentes carreteras del Estado como se muestra en la tabla:

TRAMO	UBICACIÓN
CARRETERA ALLENDE CARREVTA	
CARRETERA ALLENDE – CADEREYTA	Km 5+200 - 5+000
CARRETERA MONTE MORELOS - GRAL. TERÁN	Km 15+000 - 15+200
CARRETERA CD. VICTORIA – MONTERREY	Km 213+000 - 213+200
CARRETERA CD. MIER – MONTERREY	Km 32+200 - 32+000
CARRETERA MONTERREY - MONCLOVA	Km 8+000 - 8+200

Tabla 2 Ubicación de los Tramos de Estudio en el Estado de Nuevo León

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 16 DE 90 F1 RI-003

#### 2.1.2 TABASCO

# ASPECTOS GEOGRÁFICOS Ubicación Geográfica

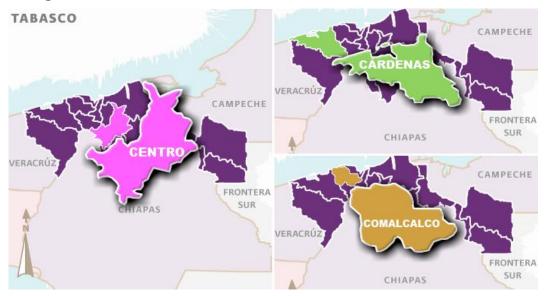


Figura 3 Ubicación Geográfica de los Tramos de Estudio (Tabasco)

#### Hidrografía:

El sistema fluvial se constituye con los caudales del río Usumacinta, el más grande de la República y el río Grijalva el segundo por su caudal, con numerosos afluentes que desembocan en el Golfo de México. Solo quedan fuera de éste sistema el río Tonalá y el Tancochapa o Pedregal, que sirve de límite entre Tabasco y Veracruz, al oeste de Huimanguillo; los pequeños ríos de la Chontalpa que se alimentan de excesos de aguas de lluvias acumuladas en los popales (pantanos) y el río González, brazo desprendido del Mezcalapa a fines del siglo XIX, que desemboca al mar por la barra de Chiltepec.

A los numerosos ríos, riachuelos y arroyos que cruzan en todos los sentidos al estado de Tabasco, se añaden algunas albuferas y un número elevado de lagunas diseminadas en su territorio, destacándose los sistemas lagunares de El Carmen, Pajonal, La Machona y Mecoacán. La disponibilidad de agua se basa en las cuencas bajas de los ríos Usumacinta y Grijalva, estas cuencas acumulan el agua de innumerables corrientes y se descargan al mar en forma conjunta. El volumen medio anual es de 125 mil millones de metros cúbicos, que

representan el 35% de las corrientes del país, formando un amplio cauce que inunda grandes áreas y origina en las zonas bajas numerosas lagunas de poca profundidad. En los meses de septiembre y noviembre se alcanza los máximos niveles de agua causando inundaciones.

#### Clima:

La ubicación de Tabasco en la zona tropical, su escasa elevación con respecto al nivel del mar y su cercanía con el Golfo de México a lo largo de 190 kilómetros de costa, determinan el desarrollo de climas cálidos con influencia marítima. El clima tropical húmedo es una característica muy singular de la región, con temperaturas que van de los 15°C en los meses más fríos (enero y diciembre) hasta 42°C en los más calurosos; la temperatura promedio es de 26°C, la cual en razón de la escasa altura con relación al nivel del mar permanece constante.

#### **Recursos Naturales:**

El estado cuenta con recursos naturales factibles para su aprovechamiento en la construcción de muebles y diversas artesanías de madera como caoba, cedro, barí, macuilís, tinto y ceiba; existen diferentes árboles maderables que se utilizan para la elaboración del carbón.

En cuanto a yacimientos petrolíferos se cuenta con un volumen de producción diaria de petróleo crudo de 556,371 barriles y un volumen de producción diario de gas natural de 1,363 millones de pies cúbicos; así como un volumen de producción anual de petróleo crudo de 203,077 barriles y un volumen de producción anual de gas natural de 497,463 millones de pies cúbicos; se cuenta con una fábrica de cemento denominada "Cementos Apasco" e industria de extracción de grava y arena.

#### Características y Uso del Suelo:

La región de Tabasco pertenece al período cuaternario, su composición es de rocas ígneas (extrusivas) y arenas de aluvión, los tipos de suelos localizados en el Estado son: el vertisol, que son suelos muy arcillosos, presentan problemas de agrietamientos en la época de sequía y tienen problemas de drenaje en épocas de lluvia; regosoles, son suelos arenosos de bordes de playas; solonchak son suelos salinos debido a las cercanías de las aguas del Golfo de México, gleysoles son suelos generalmente de texturas francas que presentan problemas de exceso de

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 18 DE 90 F1 RI-003

humedad por deficiente drenaje; cambisol y fluvisol, son aquellos ubicados en las márgenes o vegas de los ríos; rendzinas, suelos ricos en materia orgánica y materiales calcáreos, generalmente están asociados a pendientes abruptas, se localizan en los límites con el estado de Chiapas; Acrisoles, son suelos arenosos, ácidos y de baja fertilidad.

El estado se encuentra formado por llanuras bajas y húmedas de origen aluvial, efecto de la acción de los ríos; en la zona de la Chontalpa y parte de los municipios de Centla y Jonuta existen depresiones pantanosas y anegadizas, tanto por la avenida de los ríos como por las aguas que traen perturbaciones ciclónicas y las abundantes lluvias.

#### Identificación de los Tramos Evaluados:

Los tramos evaluados al igual que en Nuevo León fueron 5 y se muestran en la siguiente tabla:

TRAMO	UBICACIÓN
CARRETERA COATZACOALCOS - VILLA HERMOSA	Km 154+000 - 153+800
CARRETERA CÁRDENAS - COMALCALCO	Km 141+000 - 141+200
CARRETERA COMALCALCO - EL BELLOTE	Km 177+400 - 177+600
CARRETERA VILLA HERMOSA - CD. DEL CARMEN	Km 12+200 - 12+400
CARRETERA VILLA HERMOSA - FCO. ESCÁRCEGA	Km 21+200 - 21+400

Tabla 3 Tabla 4 Ubicación de los Tramos de Estudio en el Estado de Tabasco.

#### 2.1.3 HIDALGO:

#### **ASPECTOS GEOGRÁFICOS**

#### **Ubicación Geográfica:**



Figura 4 Ubicación Geográfica de los Tramos de Estudio (Hidalgo)

#### Hidrografía:

Entre las principales corrientes pluviales, destacan los ríos Tula, Amajac y Metztitlán. El río Tula tiene como principales afluentes, el río Rosas, Cuautitlán, Guadalupe y Salado. Al unirse con el río San Juan toma el nombre de Moctezuma, que sirve de límites con Querétaro, penetrando posteriormente a San Luis Potosí para formar el río Pánuco. El río Amajac nace en la sierra de Pachuca, y sirve de límites entre Atotonilco el Grande y Actopan, con el nombre de río de San Juan, pasa por los distritos de Jacala y Molango, donde recibe las aguas de Jalpa y confluye y se une al río Moctezuma fuera de los límites de la entidad. El río Metztitlán, se origina en los límites del estado de Puebla con los escurrimientos del cerro Tlachaloya, que forma el río Huiscongo y da origen al río Chico de Tulancingo, también se forma con los escurrimiento de Cuasesengo y la Paila, ambos forman el río San Lorenzo que da origen al río Grande de Tulancingo. El arroyo de la Cañada y el rio Tortugas, que al unirse al río Grande de Tulancingo y a otros menores, forman la corriente principal del río Metztitlán, cuya afluencia da origen a la laquna de Metztitlán.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 20 DE 90 F1 RI-003

Las principales lagunas del estado son: las de Metztitlán, Zupitlán (Tulancingo); de San Antonio, Pueblilla y Carrillos (Apan); de Atezca (Molango); de San Miguel (Huasca); y de San Francisco (Tenango de Doria). También existen aguas termales sulfurosas y medicinales, en la Cantera (Tula); Mixquiahuala, Vito (Atotonilco/Tula); Tephé (Ejido Tephé); Humedades y Dios Padre (ixmiquilpan); Tolantongo e Ixtacapa (Cardonal); Tzindeje (Tasquillo); Pathé Grande (Tecozautla); San Francisco (Acaxoxhitlán); Amajac (Atotonilco el Grande); Atempa (Calnali); Texidhó (Tecozautla), entre otras. Así mismo se cuenta con las siguientes presas importantes como Endhó, Requena Omiltémetl, Vicente Aguirre, Tejocotal, Madero, Esperanza y San Salvador entre otras.

#### Clima:

En Hidalgo se conjugan tres principales climas: el cálido, que ha registrado temperaturas de hasta 44°C a la sombra veraniega en el municipio de Pisaflores; el templado, que también tiene lo suyo en calor, pero que el viento refresca y la niebla lo acompaña; y el clima frío, con una temperatura de 5°C bajo cero en el día y hasta -15 grados centígrados durante la noche tiene regiones con lluvia de 2,800 mm. Al año, que contrastan con la resequedad del municipio de lxmiguilpan, donde se registran escasos 250 mm.

#### **Recursos Naturales:**

En el Estado de Hidalgo se cuentan con una gran cantidad de recursos naturales, de todo tipo, dentro de los más destacables podemos mencionar: Productos minerales, como el oro, la plata, el plomo, el cobre, el zinc, el cadmio y el azufre entre otros de la producción forestal maderable se encuentran una gran cantidad de coníferas como el pino y oyamel, y las latifoliadas como el encino y otras diversas; de la no maderable se pueden mencionar el hongo blanco, el musgo y el heno. De la producción de pesca podemos mencionar a la carpa en sus tipos de barrigona, espejo, plateada, negra, brema, cabezona y herbívora, así como el alevín.

#### Identificación de los Tramos Evaluados:

TRAMO	UBICACIÓN
MÉXICO – PACHUCA	Km 71+000 - 70+800
PACHUCA - CIUDAD SAHAGÚN	Km 13+800 - 13+600
PACHUCA - CIUDAD VALLES	Km 12+300 - 12+100
PACHUCA – TUXPAN	Km 10+000 - 10+200
VENTA DE CARPIO - TULANCINGO	Km 80+000 - 79+800

Tabla 5 Ubicación de los Tramos de Estudio en el Estado de Tabasco.

# 3. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS SOBRE LOS TRAMOS DE PRUEBA PARA OBTENER EL IFI.

#### 3.1 Determinación de la macrotextura con círculo de arena.

En este apartado se presenta la metodología utilizada para obtener la macrotextura en los diferentes tramos de prueba, así como los resultados obtenidos.

Para la determinación de la macrotextura con círculo de arena se utilizó la metodología establecida en la normativa ASTM E-965, misma que establece la utilización de microesferas de vidrio para tal fin, las esferas deben cumplir con un 90 % de redondez de acuerdo con la norma ASTM D1155 y contar con una distribución granulométrica en la que al menos el 90% del material, en masa pase la malla No. 60 y se retenga en la malla No. 80.

El ensaye se realizó de la siguiente manera;

- 1. Se realizó una inspección de la superficie de pavimento por evaluar y se seleccionó un lugar seco, un área homogénea que no contenga características únicas o localizadas tales como grietas y juntas. Se limpió a fondo la superficie utilizando un cepillo de cerdas suaves para eliminar residuos, escombros o partículas de agregados con pérdida de adherencia de la superficie y se colocó la pantalla contra viento alrededor de la superficie de ensaye.
- 2. Una vez realizado lo anterior, se llenó un cilindro de volumen conocido con el material seco y se golpeó suavemente la base del cilindro varias veces sobre una superficie rígida, con la finalidad de lograr un mejor acomodo del material; se añadió más material para llenar el cilindro en la parte superior, y se niveló con ayuda de una regla.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 22 DE 90 F1 RI-003

- 3. Se procedió a verter el volumen medido del material sobre la superficie limpia dentro del área protegida por la pantalla contra viento. Se distribuyó con cuidado el material dentro del círculo con la herramienta para dispersar, llenando los vacíos de la superficie al ras de las puntas de las partículas de agregado.
- 4. Se midieron y registraron los diámetros de la superficie circular cubierta por el material en un mínimo de cuatro puntos equidistantes alrededor de la circunferencia de la muestra, para posteriormente calcular y registrar el diámetro medio.



Figura 5 Método del círculo de Arena para determinar la macrotextura de un Pavimento

Es importante destacar que se realizaron veintiún determinaciones, uniformemente espaciadas para la obtención de la media de la profundidad en la macrotextura sobre la superficie de un tipo de pavimento. La media aritmética de los valores individuales de la profundidad en la macrotextura se considera la media de la profundidad de la macrotextura para la superficie de un pavimento ensayado. De acuerdo con el procedimiento anterior, se calculó la profundidad media de la macrotextura como:

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2}$$

Donde:

MTD= profundidad media de la macrotextura de un pavimento, mm.

**V**= volumen de la muestra, mm.<sup>3</sup>

**D**= media del diámetro del área cubierta por el material, *mm.* 

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 23 DE 90 F1 RI-003

Toda vez que el volumen del cilindro es conocido y determinado con anterioridad.

Los resultados de macrotextura obtenidos con la metodología citada, se presentan en las Tablas 6, 7, 8 y 9 para cada tramo de prueba.

#### MACROTEXTURA (mm.) "QUERÉTARO"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
8C	0.73	0.14
8E	1.01	0.21
8F	1.40	0.28
9A	0.45	0.09
9B	1.00	0.04
11A	0.83	0.27
11B	0.89	0.16
2B	1.01	0.29
4	1.27	0.23

Tabla 6 Promedio de los valores de macrotextura obtenidos con técnica volumétrica (círculo de arena) en Querétaro.

#### MACROTEXTURA (mm.) "NUEVO LEÓN"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
CARRETERA ALLENDE – CADEREYTA	0.85	0.22
CARRETERA MONTE MORELOS - GRAL. TERÁN	1.11	0.24
CARRETERA CD. VICTORIA – MONTERREY	0.39	0.06
CARRETERA CD. MIER – MONTERREY	0.77	0.15
CARRETERA MONTERREY – MONCLOVA	0.29	0.09

Tabla 7 Promedio de los valores de macrotextura obtenidos con técnica volumétrica (círculo de arena) en Nuevo León.

#### MACROTEXTURA (mm.)"TABASCO"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
CARRETERA COATZACOALCOS - VILLA HERMOSA	1.07	0.18
CARRETERA CÁRDENAS – COMALCALCO	0.8	0.21
CARRETERA COMALCALCO - EL BELLOTE	0.67	0.12
CARRETERA VILLA HERMOSA - CD. DEL CARMEN	1.3	0.33
CARRETERA VILLA HERMOSA - FCO. ESCÁRCEGA	0.46	0.13

Tabla 8 Promedio de los valores de macrotextura obtenidos con técnica volumétrica (círculo de arena) en Tabasco.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 24 DE 90 F1 RI-003

#### MACROTEXTURA (mm.)"HIDALGO"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
MÉXICO – PACHUCA	0.75	0.14
PACHUCA - CIUDAD SAHAGÚN	1.23	0.20
PACHUCA - CIUDAD VALLES	0.44	0.04
PACHUCA – TUXPAN	1.20	0.27
VENTA DE CARPIO - TULANCINGO	0.47	0.10

Tabla 9 Promedio de los valores de macrotextura obtenidos con técnica volumétrica (círculo de arena) en Hidalgo.

#### 3.2 Determinación del coeficiente de fricción con péndulo británico.

A continuación se presenta la metodología para obtener el coeficiente de fricción con péndulo británico y los resultados a partir de su aplicación en los tramos de prueba.

- 1. Antes de determinar la fricción con el péndulo, es importante asegurarse que la superficie de ensayo en campo debe estar libre de partículas sueltas y, en su caso, se limpiará con una brocha; la superficie no tiene que ser horizontal ya que el péndulo puede ser nivelado, utilizando únicamente los tornillos de nivelación.
- 2. Una vez limpia la superficie, se niveló el instrumento girando los tornillos de nivelación hasta centrar la burbuja del nivel; posteriormente, se ajustó el péndulo a la marca de cero, primeramente se elevó el mecanismo del péndulo aflojando los tornillos de seguridad (ubicados directamente detrás del pivote del péndulo) y se giraron los tornillos de la cabeza móvil ubicados en el centro del instrumento, para que la zapata oscilara libremente. Se apretaron firmemente los tornillos de seguridad.
- 3. Se colocó el péndulo en posición horizontal y se movió la aguja indicadora en el sentido de las manecillas del reloj hasta la posición de reposo contra el tornillo de ajuste en el brazo del péndulo. Se liberó el péndulo y se registró la lectura de la aguja indicadora. En el caso en el que la lectura no fue cero, se aflojó el anillo del seguro y se giró suavemente el anillo de fricción en el eje de soporte y se asegura nuevamente. Se repitió el procedimiento y se ajustó el anillo de fricción hasta que el movimiento oscilatorio del péndulo llevó a la aguja a la posición de cero.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 25 DE 90 F1 RI-003

- 4. Con el péndulo ajustado a cero, se procedió a ajustar la longitud de deslizamiento en la superficie de prueba, con el brazo del péndulo suspendido libremente, se insertó el espaciador debajo del tornillo de ajuste de la palanca de elevación de la zapata. Se bajó el péndulo de tal manera que el borde de la zapata tocara la superficie a medir. Se aseguró el péndulo firmemente, se levantó la palanca de elevación de la zapata y se retiró el espaciador.
- 5. Posteriormente, se levantó la zapata con la palanca de elevación y se desplazó el péndulo hacia la derecha y se bajó la zapata permitiendo que el péndulo se moviera libremente hacia la izquierda lentamente hasta que el borde de la zapata hiciera contacto con la superficie. Para verificar la longitud de deslizamiento, se colocó el medidor de la longitud de contacto a un lado de la zapata y paralelo a la dirección del movimiento oscilatorio. Se levantó la zapata y se desplazó el péndulo hacia la izquierda. Se liberó la zapata y lentamente se movió el péndulo hacia la derecha hasta que el borde de la zapata entrara en contacto con la superficie.
- 6. Si la superficie de contacto no se encontraba entre 124 a 127 mm medido entre el borde de entrada y borde de salida del recorrido de la zapata, se ajustó subiendo o bajando el aparato con el tornillo frontal de nivelación o con los tornillos de ajuste de altura vertical. De ser necesario de ajustó nuevamente el nivel del péndulo. Se colocó el péndulo de manera horizontal y se movió la aguja indicadora en el sentido de las manecillas del reloj hasta tocar con el tornillo de ajuste en el brazo del péndulo.
- 7. Una vez realizado lo anterior se procedió a realizar 5 mediciones de coeficiente de fricción con el péndulo en veintiún puntos distribuidos a lo largo de la rodera externa de cada tramo de prueba, de la siguiente manera; se aplicó agua suficiente para cubrir completamente el área de prueba, se ejecutó un movimiento oscilatorio pero sin registrar los datos; tan pronto como fue posible, se realizaron cinco oscilaciones del péndulo (medición de fricción), agregando agua a la superficie entre cada una y se registraron los resultados, cuyo promedio aparece en las Tablas 10, 11, 12 y 13.



Figura 6 Péndulo Británico utilizado en los Tramos de Prueba para determinar el C.F. de un pavimento.

#### FRICCIÓN CON PÉNDULO BRITÁNICO "QUERÉTARO"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
8C	72	4.0
8E	76	3.0
8F	67	1.5
9 A	45	2.0
9B	44	2.0
11 A	60	4.0
11B	57	2.5
2B	55	3.5
4	54	3.0

Tabla 10 Promedio de los valores de coeficiente de fricción con péndulo Británico sobre los tramos de prueba en Querétaro.

#### FRICCIÓN CON PÉNDULO BRITÁNICO "NUEVO LEÓN"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
CARRETERA ALLENDE – CADEREYTA	61.5	2.9
CARRETERA MONTE MORELOS - GRAL. TERÁN	47.1	2.1
CARRETERA CD. VICTORIA – MONTERREY	40.9	1.9
CARRETERA CD. MIER - MONTERREY	47.5	2.5
CARRETERA MONTERREY - MONCLOVA	36.8	1.3

Tabla 11 Promedio de los valores de coeficiente de fricción con péndulo Británico sobre los tramos de prueba en Nuevo León.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 27 DE 90 F1 RI-003

#### FRICCIÓN CON PÉNDULO BRITÁNICO "TABASCO"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
CARRETERA COATZACOALCOS - VILLA HERMOSA	55.3	2.0
CARRETERA CÁRDENAS - COMALCALCO	73.4	3.6
CARRETERA COMALCALCO - EL BELLOTE	57.5	1.2
CARRETERA VILLA HERMOSA - CD. DEL CARMEN	50.6	4.0
CARRETERA VILLA HERMOSA - FCO. ESCÁRCEGA	50.8	3.6

Tabla 12 Promedio de los valores de coeficiente de fricción con péndulo Británico sobre los tramos de prueba en Tabasco.

#### FRICCIÓN CON PÉNDULO BRITÁNICO "HIDALGO"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
MÉXICO – PACHUCA	60.1	3.7
PACHUCA - CIUDAD SAHAGÚN	71.1	1.9
PACHUCA - CIUDAD VALLES	60.4	2.9
PACHUCA – TUXPAN	72.7	3.0
VENTA DE CARPIO - TULANCINGO	46.9	1.4

Tabla 13 Promedio de los valores de coeficiente de fricción con péndulo Británico sobre los tramos de prueba en Hidalgo.

#### 3.3 Determinación del coeficiente de fricción con mu meter.

La determinación del coeficiente de fricción se realizó de la siguiente manera;

- Antes de cada serie de pruebas, se calentaron los neumáticos recorriendo al menos 8 km (5 millas) a velocidades usuales de tránsito en la posición normal de no divergencia de las llantas. Se colocaron las llantas de prueba en la posición de divergencia y la tercera rueda en la posición abajo.
- 2. Posteriormente, se realizaron las pruebas a la velocidad de prueba de 75 km/h dentro del rango ± 1,6 km/h. En cuanto a los tramos de prueba, es importante destacar que se tuvo cuidado de evitar curvas cerradas y pendientes pronunciadas, o con pasos a nivel. Se intentó mantener los tramos de prueba lo más uniforme posible, de manera que el promedio resultante de la prueba registrada será el promedio de una superficie uniforme. En este caso, las pruebas se realizaron con la rueda derecha de prueba en la parte central de la trayectoria de desgaste de la rodera derecha del carril de tránsito.

3. En el desarrollo de la prueba para determinar el coeficiente de fricción de cada tramo, se llevó el equipo a la velocidad de prueba, aplicando el agua a los neumáticos de prueba aproximadamente 1 segundo antes de iniciar la prueba y se continuó hasta que se completó esta.



Figura 7 Equipo Mu-Meter usado en los tramos evaluados para determinar el C.F.

Los números Mu se mostraron en la pantalla de la laptop de cabina, junto con otros datos reportados como necesarios de acuerdo a la norma nacional seleccionada y se registraron los promedios por tramo para cada una de las cuatro pasadas realizadas sobre cada uno de ellos, mismos que se muestran en las Tablas 14, 15, 16 y 17.

#### FRICCIÓN CON MU-METER "QUERÉTARO"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
8C	0.63	4.0
8E	0.63	3.0
8F	0.66	1.5
9A	0.25	2.0
9B	0.26	2.0
11A	0.45	4.0
11B	0.48	2.5
2B	0.35	3.5
4	0.40	3.0

Tabla 14 Promedio de los valores de coeficiente de fricción con mu meter sobre los tramos de prueba en Querétaro.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 29 DE 90 F1 RI-003

#### FRICCIÓN CON PÉNDULO BRITÁNICO "NUEVO LEÓN"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
CARRETERA ALLENDE - CADEREYTA	0.31	0.02
CARRETERA MONTE MORELOS - GRAL. TERÁN	0.23	0.01
CARRETERA CD. VICTORIA - MONTERREY	0.17	0.01
CARRETERA CD. MIER - MONTERREY	0.25	0.02
CARRETERA MONTERREY - MONCLOVA	0.16	0.01

Tabla 15 Promedio de los valores de coeficiente de fricción con mu meter sobre los tramos de prueba en Nuevo León.

#### FRICCIÓN CON PÉNDULO BRITÁNICO "TABASCO"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
CARRETERA COATZACOALCOS - VILLA HERMOSA	0.39	0.01
CARRETERA CÁRDENAS - COMALCALCO	0.53	0.03
CARRETERA COMALCALCO - EL BELLOTE	0.33	0.01
CARRETERA VILLA HERMOSA - CD. DEL CARMEN	0.35	0.01
CARRETERA VILLA HERMOSA - FCO. ESCÁRCEGA	0.24	0.01

Tabla 16 Promedio de los valores de coeficiente de fricción con mu meter sobre los tramos de prueba en Tabasco.

#### FRICCIÓN CON MU-METER "HIDALGO"

Tramo	Promedio	Desv. Est.
MÉXICO – PACHUCA	0.51	0.010
PACHUCA - CIUDAD SAHAGÚN	0.51	0.010
PACHUCA - CIUDAD VALLES	0.56	0.006
PACHUCA – TUXPAN	0.53	0.012
VENTA DE CARPIO - TULANCINGO	0.20	0.005

Tabla 17 Promedio de los valores de coeficiente de fricción con mu meter sobre los tramos de prueba en Hidalgo.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 30 DE 90 F1 RI-003

# 4. OBTENCIÓN DE CURVAS MAESTRAS DEL IFI, A PARTIR DE PÉNDULO BRITÁNICO Y CÍRCULO DE ARENA.

En virtud de que, tanto el péndulo británico y el circulo de arena para determinar coeficiente de fricción y macrotextura, respectivamente, fueron metodologías armonizadas en el experimento PIARC, se procedió a obtener las curvas maestras de fricción-velocidad, de acuerdo con dicha metodología.

Primeramente, y de acuerdo con el procedimiento, se procedió a la definición de  $S_p$  a partir de los valores de textura (Tx) obtenidos para cada tramo de prueba, con la siguiente expresión:

$$Sp = a + (b)(Tx)$$

Para Tx en milímetros.

En este caso para círculo de arena se obtiene de la Tabla 24, página 136, línea 5 (MTD) del documento PIARC, a = -11.5981 y b = 113.63246 de aquí que:

$$S_p = -11.5981 + (113.63246) Tx$$

Para este caso y aplicable a todos los tramos de prueba evaluados con éste procedimiento; en las Tablas 18, 19, 20 y 21 se presentan los resultados de la aplicación de la expresión.

Sp (Km/h) "QUERÉTARO"

Tramo	Sp
8C	71.4
8E	103.2
8F	147.5
9A	39.5
9B	102.0
11A	82.7
11B	89.5
<b>2</b> B	103.2
4	132.7

Tabla 18 Valores de la constante de referencia de la velocidad  $(S_p)$  en función de la macrotextura (Querétaro).

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 31 DE 90 F1 RI-003

#### Sp (Km/h) "NUEVO LEÓN"

Tramo	Promedio
CARRETERA ALLENDE – CADEREYTA	85.0
CARRETERA MONTE MORELOS - GRAL. TERÁN	113.4
CARRETERA CD. VICTORIA – MONTERREY	32.7
CARRETERA CD. MIER – MONTERREY	75.9
CARRETERA MONTERREY – MONCLOVA	21.4

Tabla 19 Valores de la constante de referencia de la velocidad (S<sub>p</sub>) en función de la macrotextura (Nuevo León).

#### Sp (Km/h) "TABASCO"

Tramo	Promedio
CARRETERA COATZACOALCOS - VILLA HERMOSA	110.0
CARRETERA CÁRDENAS – COMALCALCO	79.3
CARRETERA COMALCALCO - EL BELLOTE	64.5
CARRETERA VILLA HERMOSA - CD. DEL CARMEN	136.1
CARRETERA VILLA HERMOSA - FCO. ESCÁRCEGA	40.7

Tabla 20 Valores de la constante de referencia de la velocidad (S<sub>p</sub>) en función de la macrotextura (Tabasco).

Sp (Km/h) "HIDALGO"

Tramo	Promedio
MÉXICO – PACHUCA	73.6
PACHUCA - CIUDAD SAHAGÚN	128.2
PACHUCA - CIUDAD VALLES	38.4
PACHUCA – TUXPAN	124.8
VENTA DE CARPIO – TULANCINGO	41.8

Tabla 21 Valores de la constante de referencia de la velocidad  $(S_p)$  en función de la macrotextura (Hidalgo).

Una vez determinado el valor de  $S_p$  se procedió a determinar el valor de la fricción de cada tramo a 60 km/h (FR60), lo anterior a partir de los datos obtenidos con péndulo británico, considerando una velocidad media de medición (S) de 10 km/h para este equipo, y para la expresión 2) definida por la metodología adoptada para el IFI, se tiene:

$$FR60 = (FRS)e^{\frac{S-60}{Sp}}$$

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 32 DE 90 F1 RI-003

#### Donde:

FR60= es el valor ajustado de la fricción de cualquier velocidad "s" a 60 km/h

FRS= es el coeficiente de fricción determinado con péndulo británico

Sp= es la constante de referencia de la velocidad (SP) en función de la macrotextura

**S**= es la velocidad de medición del coeficiente de fricción en este caso 10 km/h para péndulo británico

Aplicando la expresión 2 a cada tramo de prueba y utilizando los valores de la Tabla 2.2 y 3.1, se obtienen los valores de Fr60 para cada tramo de prueba cuyos resultados se muestran en las Tablas 22, 23, 24 y 25.

FR60 PÉNDULO BRITÁNICO "QUERÉTARO"

Tramo	Promedio
8C	35.73
8E	46.81
8F	47.74
9A	12.71
9B	26.95
11A	32.78
11B	32.61
2B	33.88
4	37.05

Tabla 22 Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) con péndulo británico. (Querétaro).

#### FR60 PÉNDULO BRITÁNICO "NUEVO LEÓN"

Tramo	Promedio
CARRETERA ALLENDE – CADEREYTA	34.15
CARRETERA MONTE MORELOS - GRAL. TERÁN	30.31
CARRETERA CD. VICTORIA - MONTERREY	8.87
CARRETERA CD. MIER – MONTERREY	24.58
CARRETERA MONTERREY – MONCLOVA	3.54

Tabla 23 Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) con péndulo británico (Nuevo León).

#### FR60 PÉNDULO BRITÁNICO "TABASCO"

Tramo	Promedio
CARRETERA COATZACOALCOS - VILLA HERMOSA	35.10
CARRETERA CÁRDENAS – COMALCALCO	39.07
CARRETERA COMALCALCO - EL BELLOTE	26.50
CARRETERA VILLA HERMOSA - CD. DEL CARMEN	35.05
CARRETERA VILLA HERMOSA - FCO. ESCÁRCEGA	14.86

Tabla 24 Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) con péndulo británico (Tabasco).

#### FR60 PÉNDULO BRITÁNICO "HIDALGO"

Tramo	Promedio
MÉXICO - PACHUCA	30.47
PACHUCA - CIUDAD SAHAGÚN	48.13
PACHUCA - CIUDAD VALLES	16.43
PACHUCA - TUXPAN	48.69
VENTA DE CARPIO - TULANCINGO	14.18

Tabla 25 Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) con péndulo británico (Hidalgo).

Una vez definido el valor de *FR60* para cada tramo evaluado se procedió a determinar la curva maestra del IFI para cada tramo con la expresión 3).

$$F60 = A + (B)(FR60)$$

En el que:

F60= representa el valor de la fricción del modelo IFI a 60 km/h

A y B son constates del modelo para llevar el valor de fricción a 60 km/h de cualquier equipo participante en la armonización, al valor del internacionalmente aceptado del IFI.

**FR60**= valor de la fricción a 60 km/h con el equipo de medición.

En este caso, para el péndulo británico, **A**= 0.07784 y **B**= 0.00709, de acuerdo con la Tabla 26 (II) que aparece en la página 144 (A14) del documento PIARC. Sustituyendo:

$$F60 = 0.07784 + 0.00709(FR60)$$

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 34 DE 90 F1 RI-003

Aplicando la ecuación y haciendo uso de los valores presentados en las Tablas anteriores se obtuvieron los resultados de F60 que se muestran en las Tablas 26, 27, 28 y 29.

#### **F60 PÉNDULO BRITÁNICO "QUERÉTARO"**

Tramo	Promedio
8C	0.3312
8E	0.4097
8F	0.4163
9A	0.1679
9B	0.2689
11A	0.3130
11B	0.3090
2B	0.3180
4	0.3405

Tabla 26 Valores de la fricción en el modelo IFI a 60 km/h (F60) en Querétaro.

#### F60 PÉNDULO BRITÁNICO "NUEVO LEÓN"

Tramo	Promedio
CARRETERA ALLENDE – CADEREYTA	0.3200
CARRETERA MONTE MORELOS - GRAL. TERÁN	0.2927
CARRETERA CD. VICTORIA - MONTERREY	0.1407
CARRETERA CD. MIER – MONTERREY	0.2521
CARRETERA MONTERREY – MONCLOVA	0.1029

Tabla 27 Valores de la fricción en el modelo IFI a 60 km/h (F60) en Nuevo León.

#### **F60 PÉNDULO BRITÁNICO "TABASCO"**

Tramo	Promedio
CARRETERA COATZACOALCOS - VILLA HERMOSA	0.3267
CARRETERA CÁRDENAS – COMALCALCO	0.3549
CARRETERA COMALCALCO - EL BELLOTE	0.2657
CARRETERA VILLA HERMOSA - CD. DEL CARMEN	0.3263
CARRETERA VILLA HERMOSA - FCO. ESCÁRCEGA	0.1832

Tabla 28 Valores de la fricción en el modelo IFI a 60 km/h (F60) en Tabasco.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 35 DE 90 F1 RI-003

**F60 PÉNDULO BRITÁNICO "HIDALGO"** 

Tramo	Promedio
MÉXICO – PACHUCA	0.2939
PACHUCA - CIUDAD SAHAGÚN	0.4191
PACHUCA - CIUDAD VALLES	0.1943
PACHUCA – TUXPAN	0.4231
VENTA DE CARPIO - TULANCINGO	0.1784

Tabla 29 Valores de la fricción en el modelo IFI a 60 km/h (F60) en Hidalgo.

A partir de los valores F60 de cada tramo, es posible obtener la Golden Curve o curva maestra del IFI, en donde se relaciona el coeficiente de fricción a cualquier velocidad y cuyo patrón de variación depende de la macrotextura del pavimento evaluado, en el Apéndice A se pueden apreciar las curvas del modelo IFI para cada tramo evaluado.

## 5. OBTENCIÓN DE CURVAS MAESTRAS DEL IFI, A PARTIR DE MU METER Y CÍRCULO DE ARENA.

Haciendo uso de los valores de S<sub>p</sub> obtenidos dado que la macrotextura se obtuvo con círculo de arena, se procede a determinar los valores de FR60 para cada tramo de prueba evaluado con mu meter, aplicando la misma fórmula sólo que en este caso la velocidad corresponde a:

$$V_{Mu\ Meter} = \sin(7.5^{\circ})(75km/h) = 9.7895km/h$$

Obteniéndose los resultados que se muestran en las Tablas 30, 31, 32 y 33.

FR60 MU METER "QUERÉTARO"

Tramo	Promedio
8C	0.3117
8E	0.3872
8F	0.4696
9A	0.0702
9B	0.1589
11A	0.2452
11B	0.2740
2B	0.2151
4	0.2740

Tabla 30 Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) determinados con mu meter (Querétaro)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 36 DE 90 F1 RI-003

#### FR60 MU METER "NUEVO LEÓN"

Tramo	Promedio
CARRETERA ALLENDE - CADEREYTA	0.1717
CARRETERA MONTE MORELOS - GRAL. TERÁN	0.1477
CARRETERA CD. VICTORIA - MONTERREY	0.0366
CARRETERA CD. MIER - MONTERREY	0.1290
CARRETERA MONTERREY - MONCLOVA	0.0152

Tabla 31 Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) determinados con mu meter (Nuevo León)

#### FR60 MU METER "TABASCO"

Tramo	Promedio
CARRETERA COATZACOALCOS - VILLA HERMOSA	0.2471
CARRETERA CÁRDENAS – COMALCALCO	0.2814
CARRETERA COMALCALCO - EL BELLOTE	0.1516
CARRETERA VILLA HERMOSA - CD. DEL CARMEN	0.2420
CARRETERA VILLA HERMOSA - FCO. ESCÁRCEGA	0.0698

Tabla 32 Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) determinados con mu meter (Tabasco)

### FR60 MU METER "HIDALGO"

Tramo	Promedio
MÉXICO – PACHUCA	0.2579
PACHUCA - CIUDAD SAHAGÚN	0.3447
PACHUCA - CIUDAD VALLES	0.1515
PACHUCA – TUXPAN	0.3544
VENTA DE CARPIO - TULANCINGO	0.0602

Tabla 33 Valores ajustados de la fricción de cualquier velocidad a 60 km/h (FR60) determinados con mu meter (Hidalgo)

Una vez que se cuenta con los valores de fricción a 60 km/h para el equipo, se proceden a determinar las gráficas de fricción-velocidad en el formato de IFI, para, en este caso el mu meter. Es importante mencionar que todavía en este punto no corresponden a las curvas maestras del modelo del IFI, sino que éstas deberán ajustarse a las obtenidas en el apartado 3 para cada tramo de prueba, cuyos coeficientes de ajuste corresponderán a los parámetros A y B del modelo IFI buscados.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 37 DE 90 F1 RI-003

En el Apéndice B se presentan las relaciones coeficiente de fricción-velocidad obtenida a partir de FR60, para cada tramo evaluado.

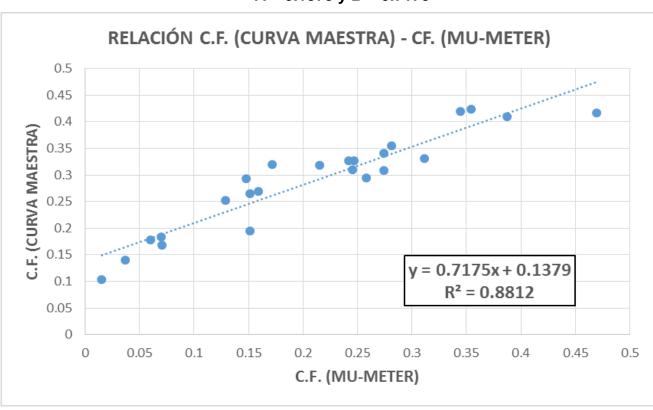
En el Apéndice "C" Se muestran las curvas los tramos comparada contra la maestra (IFI), los coeficientes de ajuste A y B que se propongan, llevarán a la curva roja (mu meter) hacia la azul (Maestra).

A partir de los datos obtenidos para coeficiente de fricción con la curva maestra y con equipo mu meter se obtiene la relación que se presenta en la tabla 34 y Gráfica de la figura 8, nótese que los coeficientes de la recta de ajuste, corresponden a los valores de A y B buscados; en este caso:

TRAMO	F60 (PÉNDULO)	FR60 (MU-METER)
8C	0.3312	0.3117
8E	0.4097	0.3872
8F	0.4163	0.4696
9a	0.1679	0.0702
9B	0.2689	0.1589
11 <sup>a</sup>	0.3103	0.2452
11B	0.309	0.274
2B	0.318	0.2151
4	0.3405	0.274
ALLENDE – CADEREYTA	0.32	0.1717
MONTEMORELOS - GENERAL TERÁN	0.2927	0.1477
CIUDAD VICTORIA - MONTERREY	0.1407	0.0366
CIUDAD MIER – MONTERREY	0.2521	0.129
MONTERREY – MONCLOVA	0.1029	0.0152
COATZACOALCOS - VILLA HERMOSA	0.3267	0.2471
CÁRDENAS - COMALCALCO	0.3549	0.2814
COMALCALCO - EL BELLOTE	0.2657	0.1516
VILLA HERMOSA - CD. DEL CARMEN	0.3263	0.242
VILLA HERMOSA - FCO. ESCÁRCEGA	0.1832	0.0698
MÉXICO – PACHUCA	0.2939	0.2579
PACHUCA - CD. SAHAGÚN	0.4191	0.3447
PACHUCA - CD. VALLES	0.1943	0.1515
PACHUCA – TUXPAN	0.4231	0.3544
VENTA DE CARPIO - TULANCINGO	0.1784	0.0602

Tabla 34 Relación Curva Maestra (Péndulo Británico) y FR60 (Mu-Meter) en todos los Tramos Evaluados

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 38 DE 90 F1 RI-003



### A = 0.1379 y B = 0.7175

Figura 8 Relación entre los valores de CF para mu meter contra curva maestra

Aplicando los valores A y B obtenidos, en el Apéndice "D" se tienen la gráficas CF vs velocidad de medición de la fricción (curva maestra obtenida a partir de Péndulo y mu meter)

En dichas gráficas puede observarse una buena aproximación entre las dos curvas, maestra obtenida a partir de metodologías participantes en la armonización y la obtenida para mu meter. El menor grado de ajuste se observó en el tramo Allende - Cadereyta, haciendo una inspección de los tramos de prueba, se detectó que dicho tramo fue el único que en su estructura contaba con losa de concreto Hidráulico, por lo que dicho factor pudo haber influido en el ajuste de la curva maestra.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 39 DE 90 F1 RI-003

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presenta aquí una metodología para establecer el modelo del IFI a partir de un equipo para el cual no se cuenta con parámetros de ajuste reportados en el experimento de armonización realizado por PIARC, en donde se establece el modelo del IFI.

Se determinaron curvas maestras para veinticuatro tramos de prueba con diferentes características de fricción y macrotextura, los cuales constaban de 200m de longitud cada uno; lo anterior a partir de mediciones de fricción con péndulo británico y de macrotextura con círculo de arena, debido a que ambas metodologías fueron armonizadas en el experimento citado y por ende, se cuenta con los coeficientes de ajuste reportados en el informe correspondiente editado por la PIARC.

A partir de las curvas de coeficiente de fricción contra velocidad de medición (formato IFI) obtenidas ahora con mu meter, para los mismos tramos de prueba, se realiza el ajuste de dichas curvas con las maestras obtenidas con equipos participantes con el experimento. Una vez realizado lo anterior, se está en posibilidades de definir los coeficientes A y B de ajuste para mu meter al modelo PIARC, en este caso, A = 0.1379 y B = 0.7175, mismos que pueden aplicarse a las mediciones de fricción determinados con mu meter en nuestra red de carreteras, para obtener el Índice de Fricción Internacional tal como se indica en la literatura.

Al aplicar estos factores a cada uno de los tramos, se observó buena concordancia de las curvas maestras obtenidas con mu meter y péndulo de fricción. Se observa que para el tramo Allende–Cadereyta, se presentan las mayores dispersiones entre ambas curvas, llama la atención que es precisamente este tramo el único pavimento de concreto hidráulico evaluado en esta campaña de auscultación.

Se propone realizar evaluaciones de este parámetro para pavimentos rígidos, con superficie de rodadura de concreto Hidráulico, que cuentan con macrotextura particularmente diferente a la de pavimentos de concreto asfáltico, lo anterior con la finalidad de establecer la necesidad o no de un modelo particular para este tipo de pavimentos.

Dado que en nuestra red de carreteras la macrotextura se obtiene con equipo de alto rendimiento, y con la finalidad de alcanzar la mejor aproximación al modelo del IFI, se propone utilizar las ecuaciones de ajuste proporcionadas por el IMT, para cada equipo durante su verificación, para ajustar los valores de macrotextura a valores de círculo de arena y posteriormente aplicar los coeficientes IFI para círculo de arena para obtener los valores de FR60.

Finalmente, y con la finalidad de obtener el IFI a partir de los datos obtenidos para nuestra red de carreteras, se deben aplicar las ecuaciones ya con los valores de mu meter levantados y considerando que los coeficientes A y B, aquí propuestos, se deben aplicar para los valores de mu meter tal como los entrega el equipo, es decir, en valor decimal.

# APÉNDICE A "CURVAS MAESTRAS DE IFI A PARTIR DE PÉNDULO BRITÁNICO Y CIRCULO DE ARENA DE LOS TRAMOS EVALUADOS"

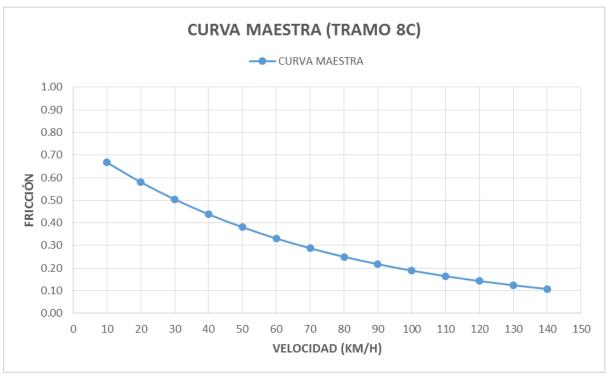


Figura 9 Curva Maestra de IFI Para el Tramo 8C

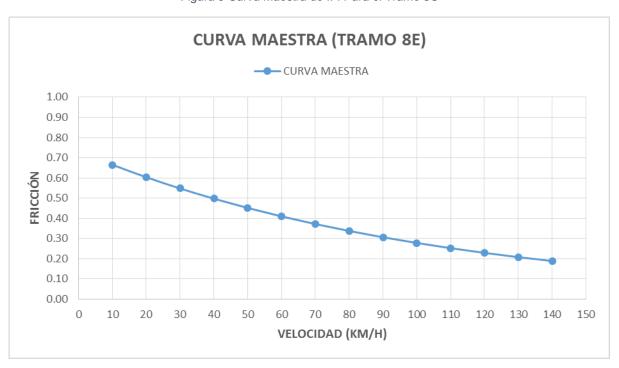


Figura 10 Curva Maestra de IFI Para el Tramo 8E

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 42 DE 90 F1 RI-003

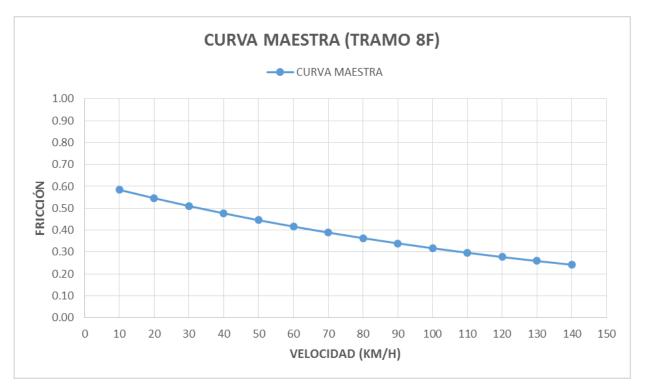


Figura 11 Curva Maestra de IFI Para el Tramo 8F



Figura 12 Curva Maestra de IFI Para el Tramo 9A

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 43 DE 90 F1 RI-003

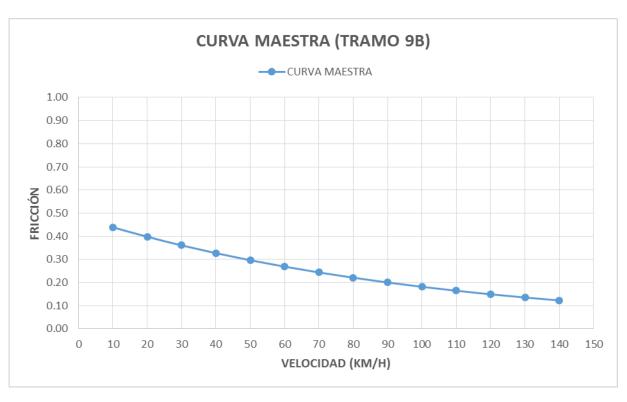


Figura 13 Curva Maestra de IFI Para el Tramo 9B

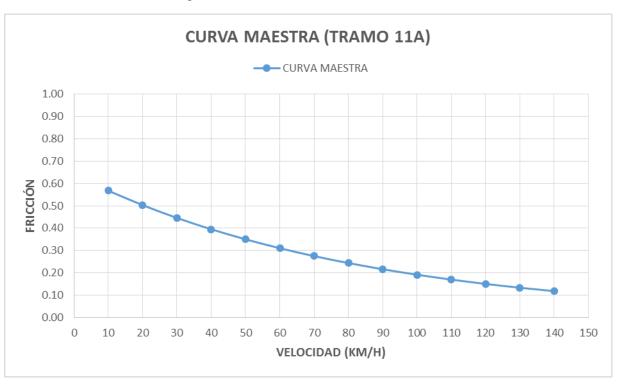


Figura 14 Curva Maestra de IFI Para el Tramo 11A

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 44 DE 90 F1 RI-003



Figura 15 Curva Maestra de IFI Para el Tramo 11B

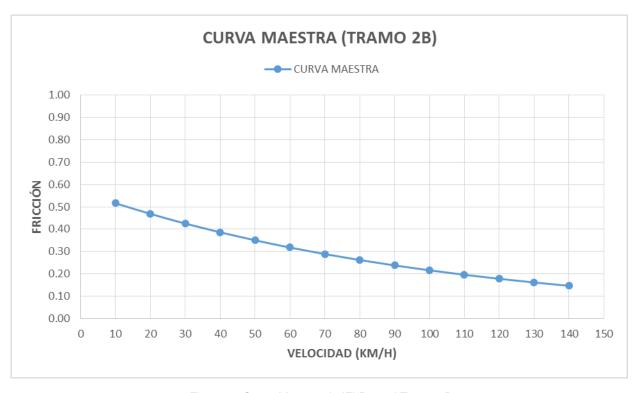


Figura 16 Curva Maestra de IFI Para el Tramo 2B

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 45 DE 90 F1 RI-003



Figura 17 Curva Maestra de IFI Para el Tramo 4

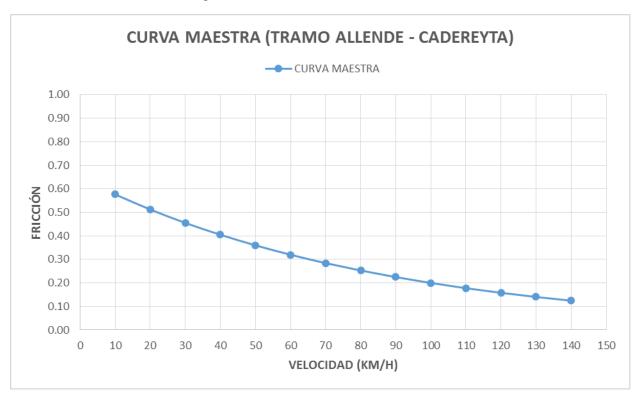


Figura 18 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Allende Cadereyta.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 46 DE 90 F1 RI-003

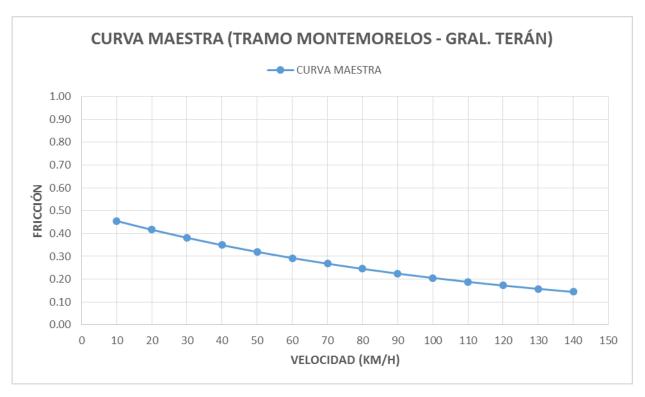


Figura 19 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Montemorelos – General Terán.

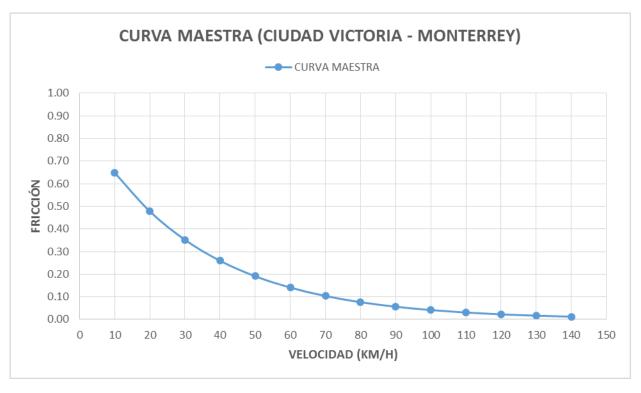


Figura 20 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Ciudad Victoria - Monterrey.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 47 DE 90 F1 RI-003

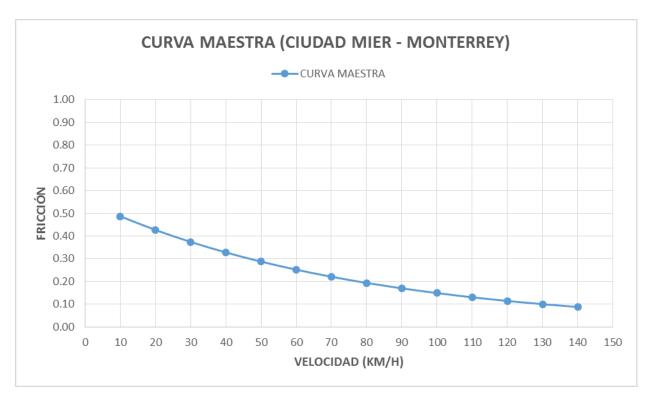


Figura 21 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Ciudad Mier - Monterrey.

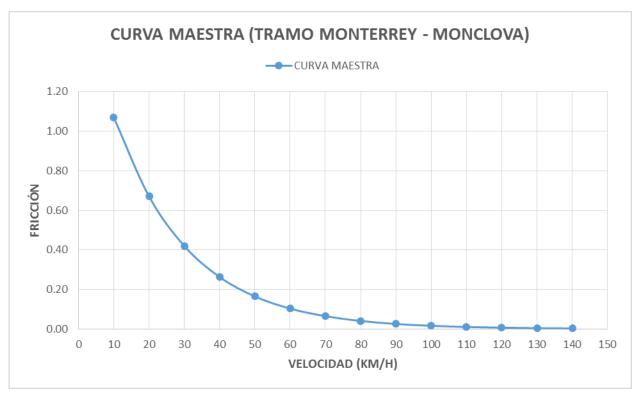


Figura 22 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Monterrey – Monclova.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 48 DE 90 F1 RI-003

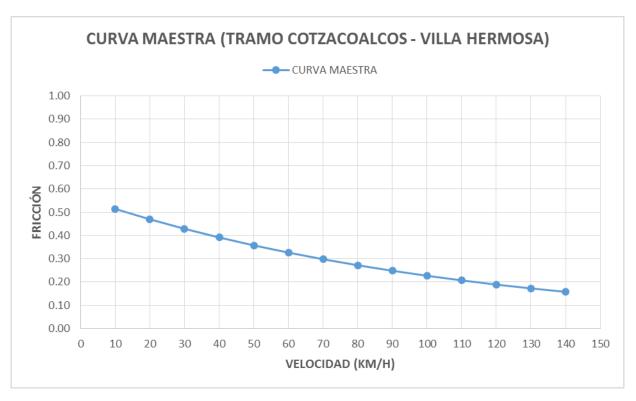


Figura 23 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Coatzacoalcos – Villa Hermosa.

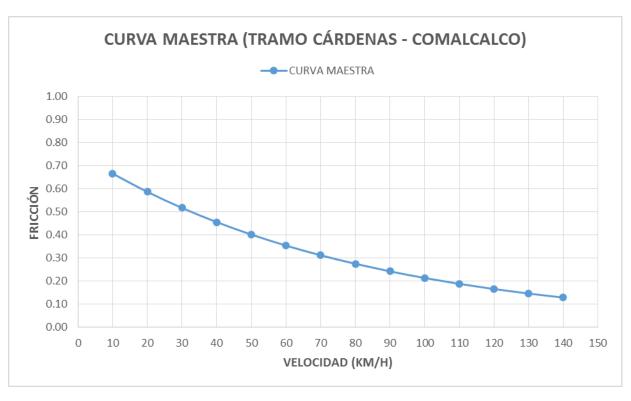


Figura 24 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Cárdenas - Comalcalco.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 49 DE 90 F1 RI-003

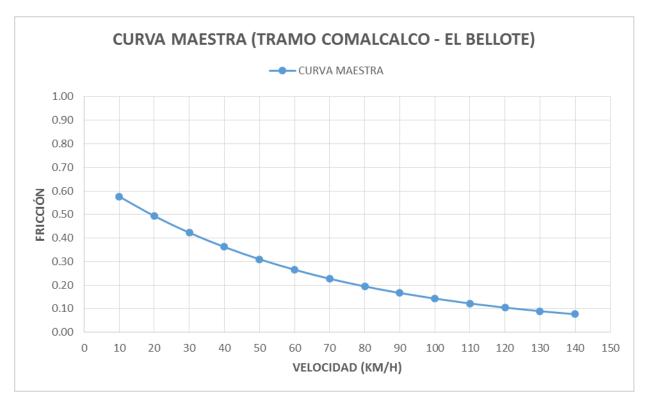


Figura 25 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Comalcalco – El Bellote.

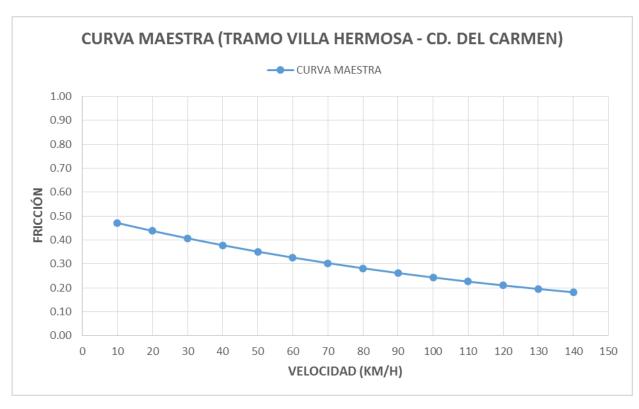


Figura 26 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Villa Hermosa – Ciudad del Carmen.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 50 DE 90 F1 RI-003

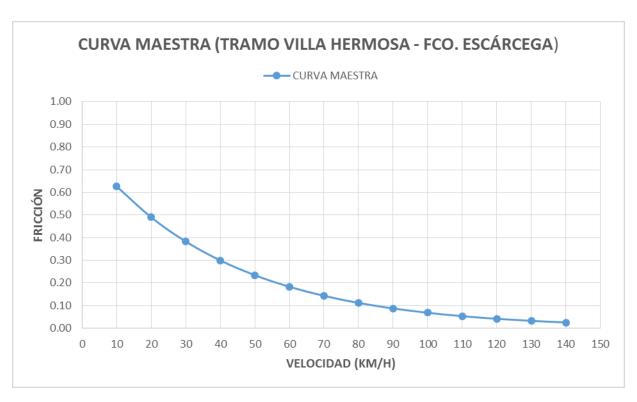


Figura 27 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Villa Hermosa – Francisco Escárcega.

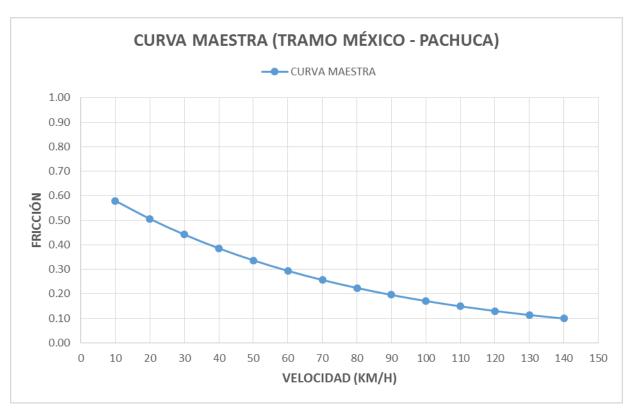


Figura 28 Curva Maestra de IFI Para el Tramo México – Pachuca.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 51 DE 90 F1 RI-003

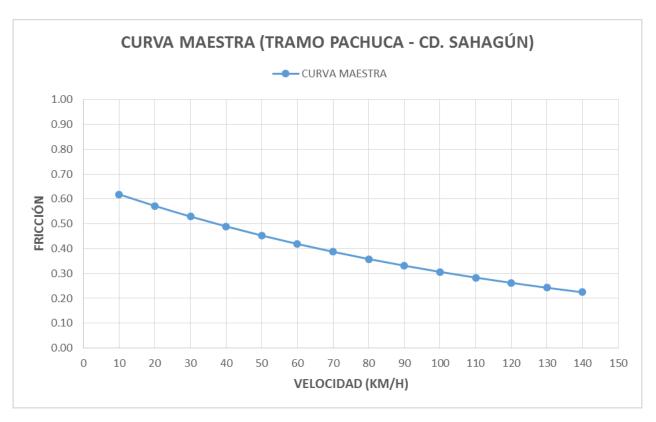


Figura 29 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Pachuca – Ciudad Sahagún.

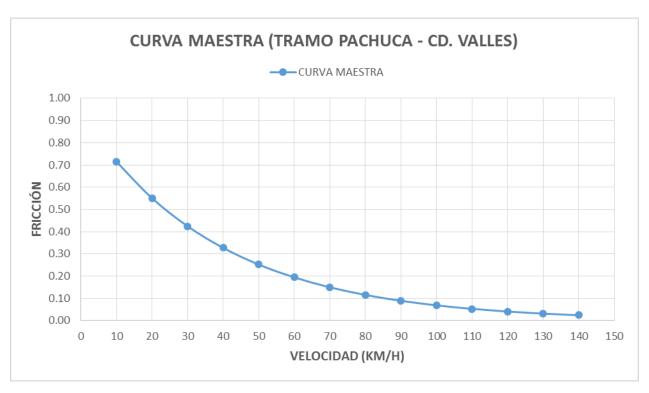


Figura 30 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Pachuca – Ciudad Valles.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 52 DE 90 F1 RI-003

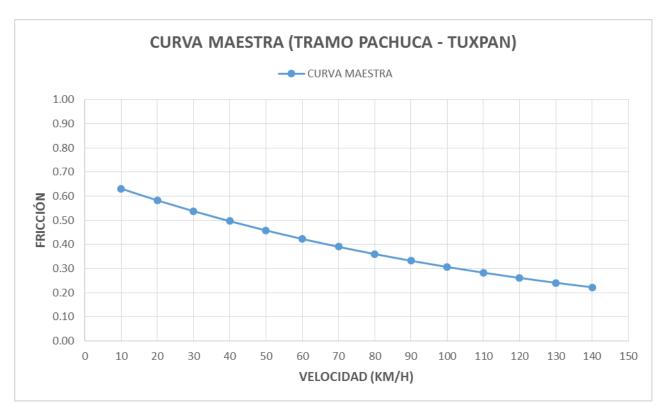


Figura 31 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Pachuca – Tuxpan.

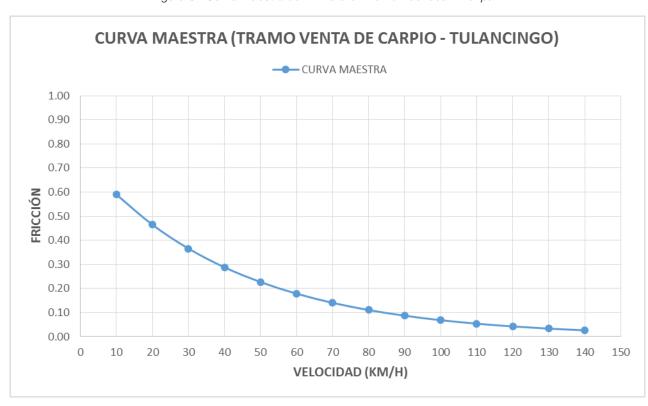


Figura 32 Curva Maestra de IFI Para el Tramo Venta de Carpio – Tulancingo.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 53 DE 90 F1 RI-003

## APÉNDICE B "OBTENCIÓN DE CURVAS MAESTRAS DEL IFI, A PARTIR DE MU METER Y CÍRCULO DE ARENA"

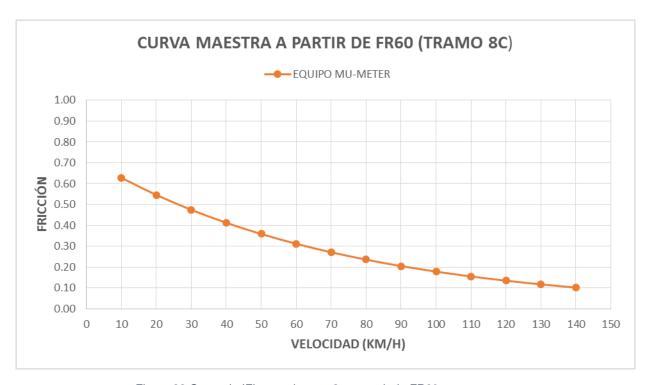


Figura 33 Curva de IFI para el tramo 8c, a partir de FR60 con mu meter.

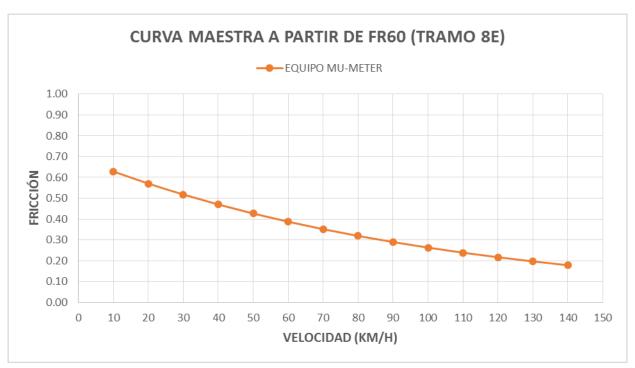


Figura 34 Curva de IFI para el tramo 8E, a partir de FR60 con mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 54 DE 90 F1 RI-003

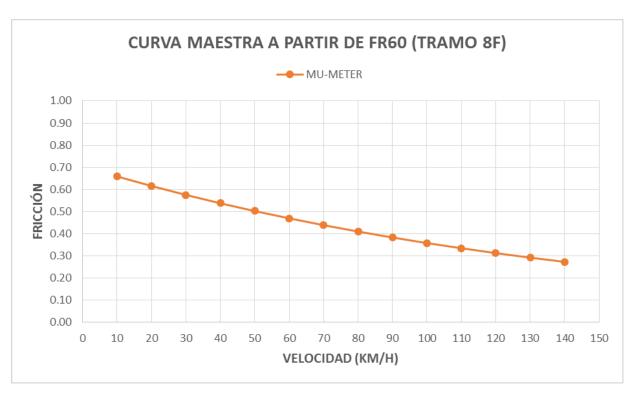


Figura 35 Curva de IFI para el tramo 8F, a partir de FR60 con mu meter.

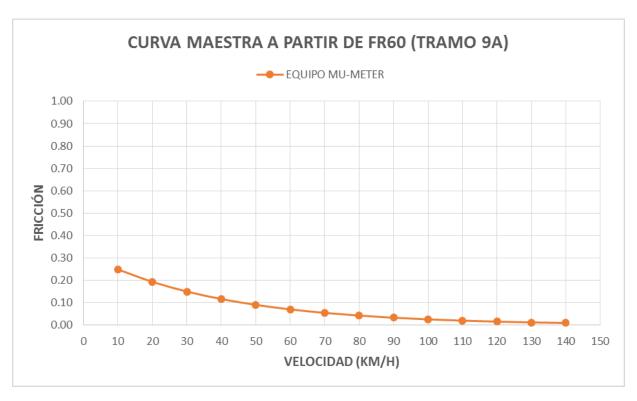


Figura 36 Curva de IFI para el tramo 9A, a partir de FR60 con mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 55 DE 90 F1 RI-003

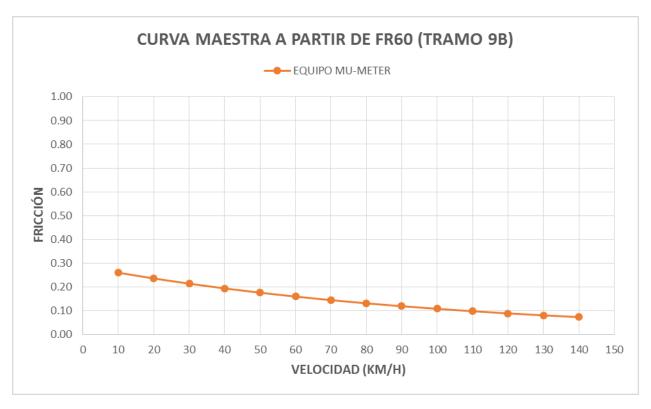


Figura 37 Curva de IFI para el tramo 9B, a partir de FR60 con mu meter.

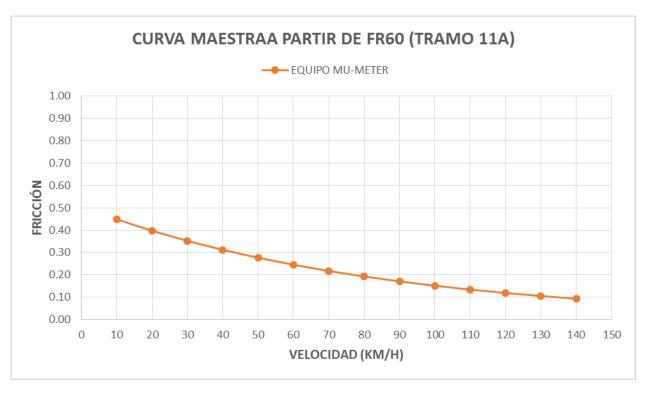


Figura 38 Curva de IFI para el tramo 11A, a partir de FR60 con mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 56 DE 90 F1 RI-003

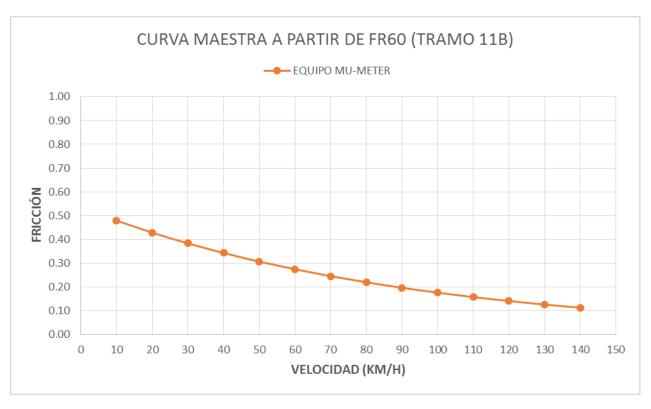


Figura 39 Curva de IFI para el tramo 11B, a partir de FR60 con mu meter.

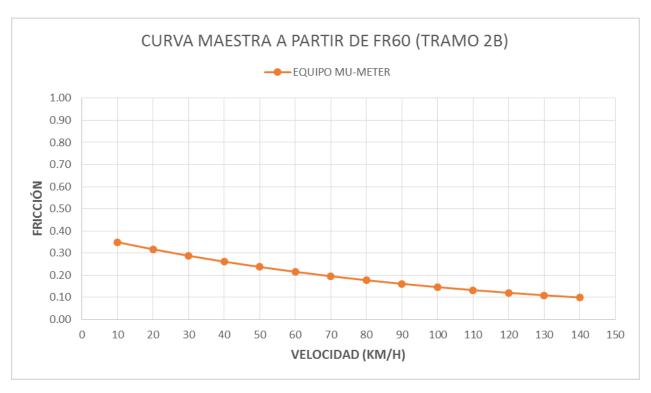


Figura 40 Curva de IFI para el tramo 2B, a partir de FR60 con mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 57 DE 90 F1 RI-003

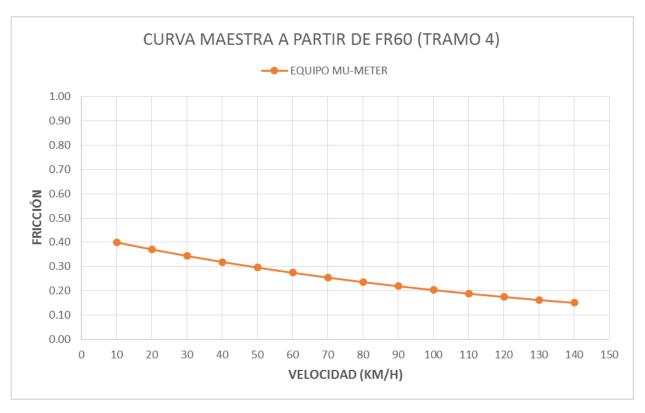


Figura 41 Curva de IFI para el tramo 2B, a partir de FR60 con mu meter.

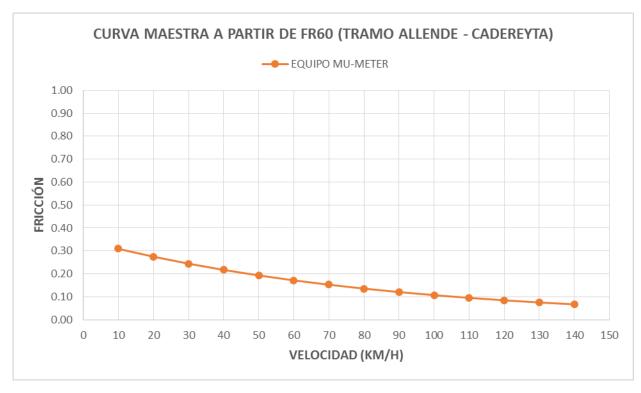


Figura 42 Curva de IFI para el tramo Allende - Cadereyta, a partir de FR60 con mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 58 DE 90 F1 RI-003

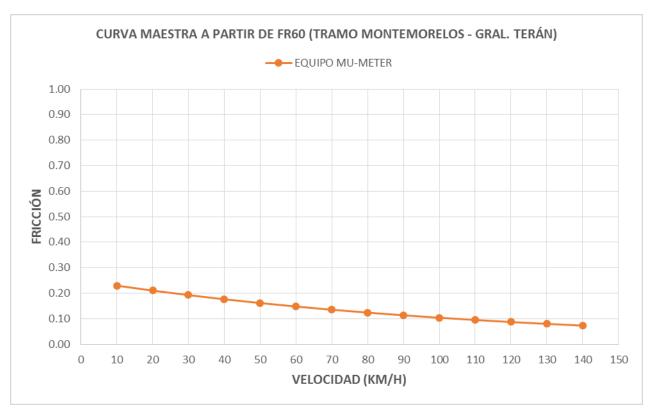


Figura 43 Curva de IFI para el tramo Montemorelos – General Terán, a partir de FR60 con mu meter.

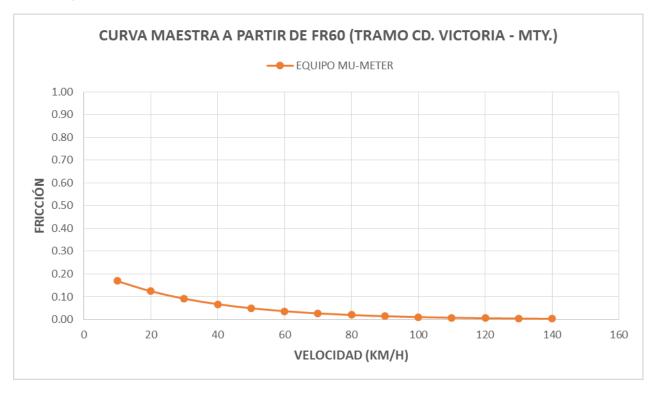


Figura 44 Curva de IFI para el tramo Ciudad Victoria - Monterrey, a partir de FR60 con mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 59 DE 90 F1 RI-003

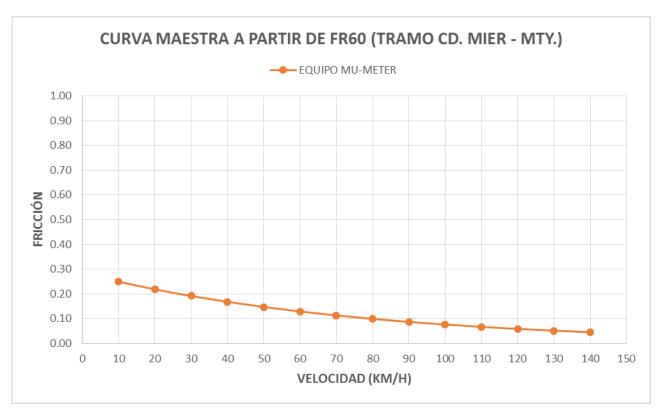


Figura 45 Curva de IFI para el tramo Ciudad Mier - Monterrey, a partir de FR60 con mu meter.

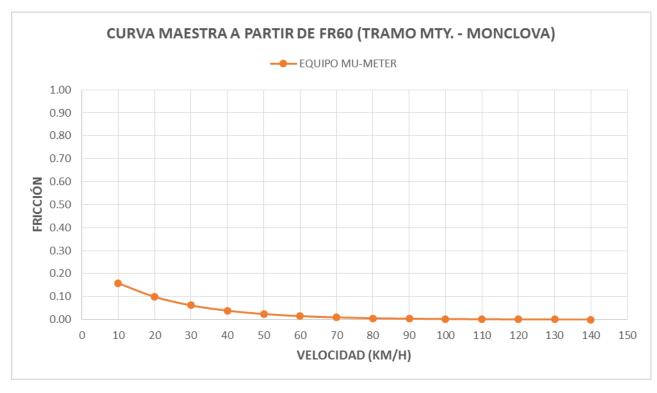


Figura 46 Curva de IFI para el tramo Monterrey - Monclova, a partir de FR60 con mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 60 DE 90 F1 RI-003

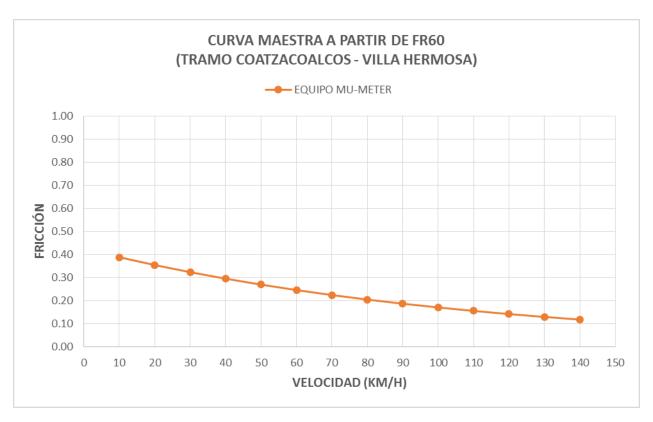


Figura 47 Curva de IFI para el tramo Coatzacoalcos – Villa Hermosa, a partir de FR60 con mu meter.

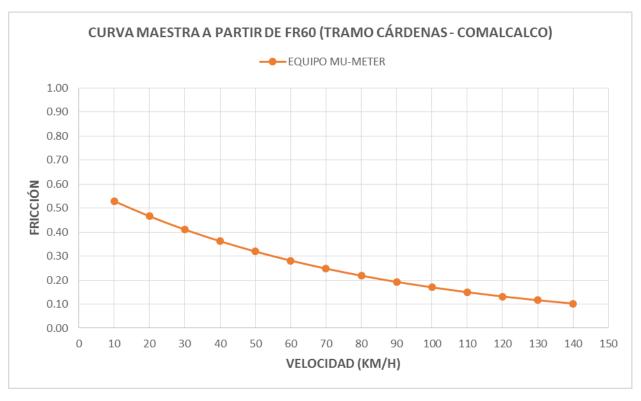


Figura 48 Curva de IFI para el tramo Cárdenas - Comalcalco, a partir de FR60 con mu meter

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 61 DE 90 F1 RI-003

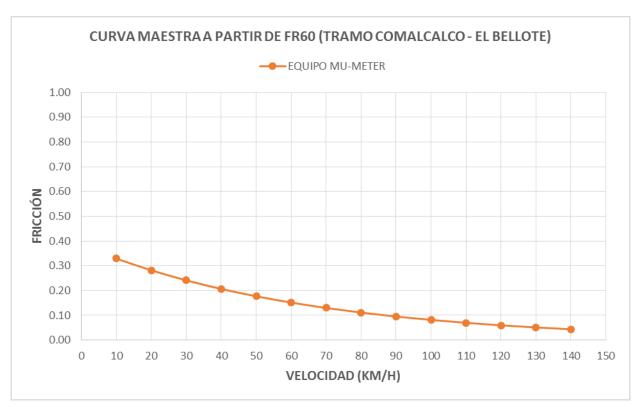


Figura 49 Curva de IFI para el tramo Comalcalco – El Bellote, a partir de FR60 con mu meter.

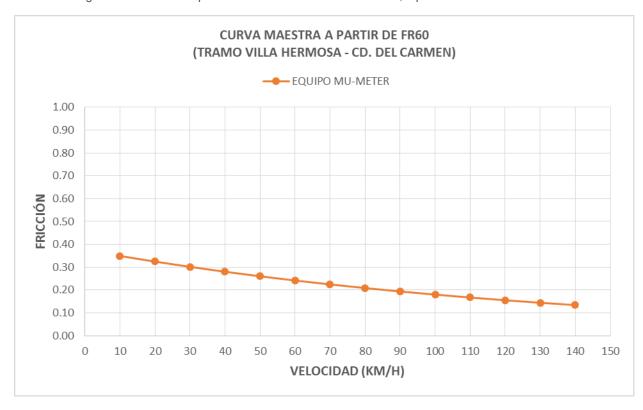


Figura 50 Curva de IFI para el tramo Villa Hermosa – Ciudad del Carmen, a partir de FR60 con mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 62 DE 90 F1 RI-003



Figura 51 Curva de IFI para el tramo Villa Hermosa – Francisco Escárcega, a partir de FR60 con mu meter.

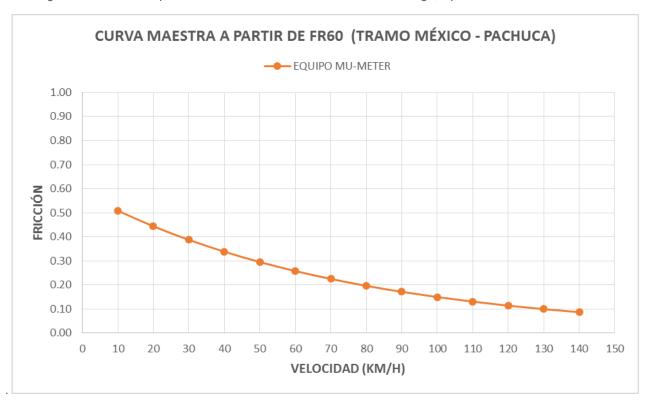


Figura 52 Curva de IFI para el tramo México – Pachuca, a partir de FR60 con mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 63 DE 90 F1 RI-003

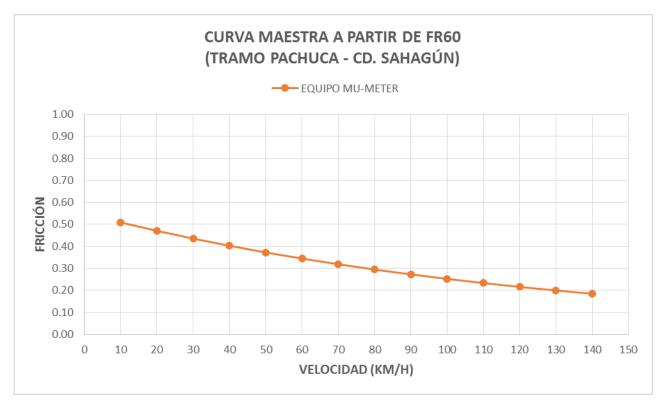


Figura 53 Curva de IFI para el tramo Pachuca – Ciudad Sahagún, a partir de FR60 con mu meter.

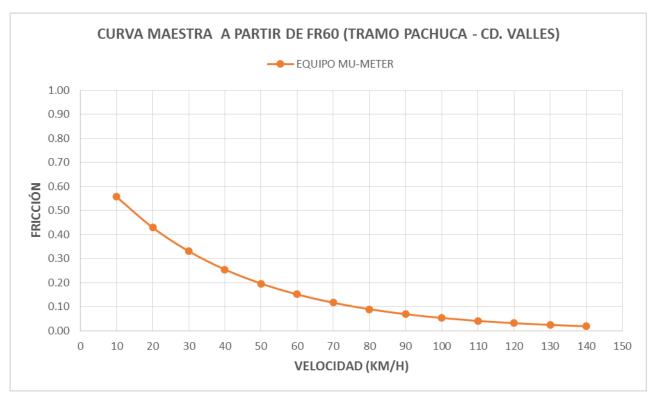


Figura 54 Curva de IFI para el tramo Pachuca – Ciudad Valles, a partir de FR60 con mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 64 DE 90 F1 RI-003

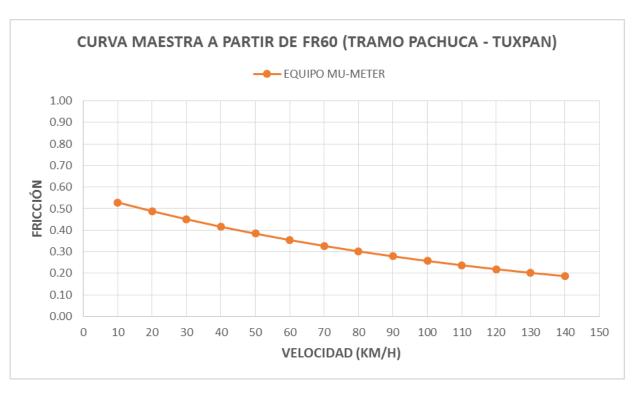


Figura 55 Curva de IFI para el tramo Pachuca – Tuxpan, a partir de FR60 con mu meter.

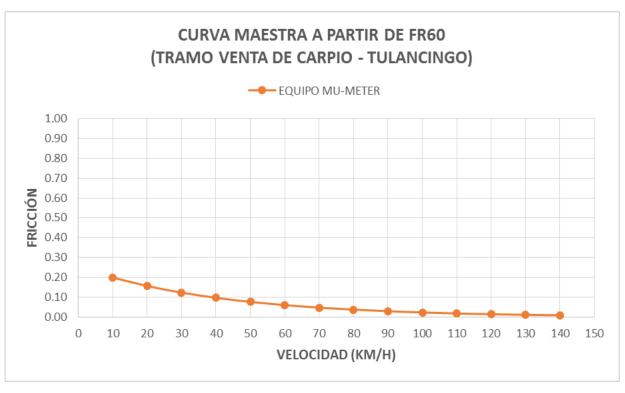


Figura 56 Curva de IFI para el tramo Venta de Carpio - Tulancingo, a partir de FR60 con mu meter.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 65 DE 90 F1 RI-003

## APÉNDICE C "COMPARACIÓN ENTRE CURVA MAESTRA DEL PÉNDULO BRITÁNICO Y CURVA FR DEL EQUIPO MU METER"

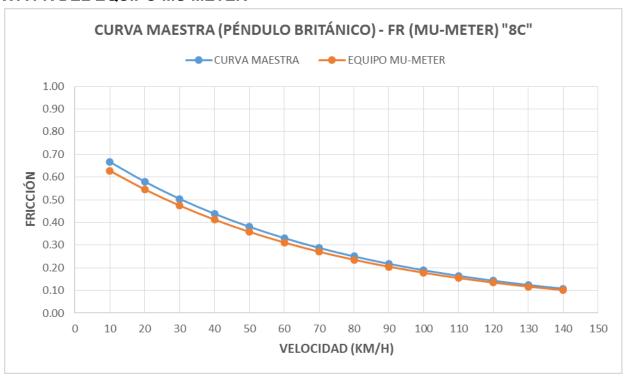


Figura 57 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (8C)

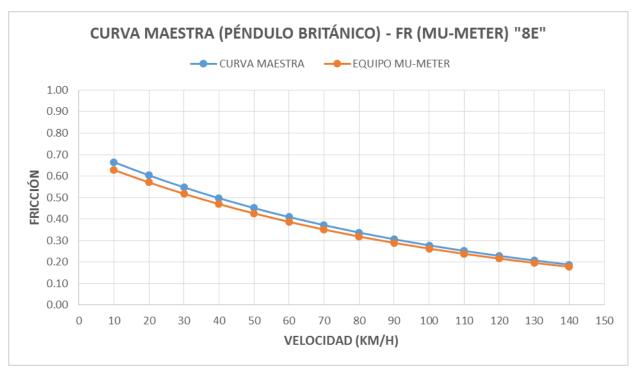


Figura 58 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (8E)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 66 DE 90 F1 RI-003

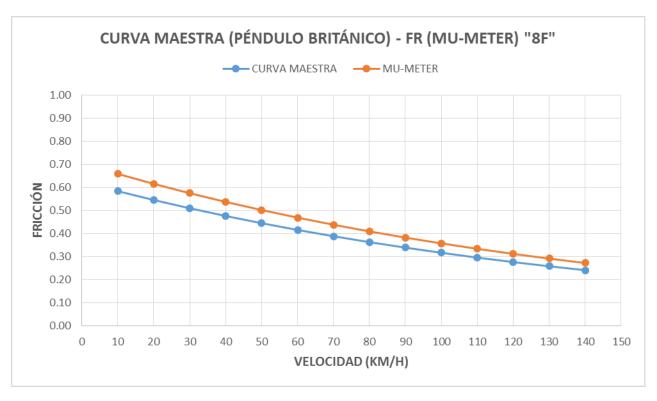


Figura 59 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (8F)

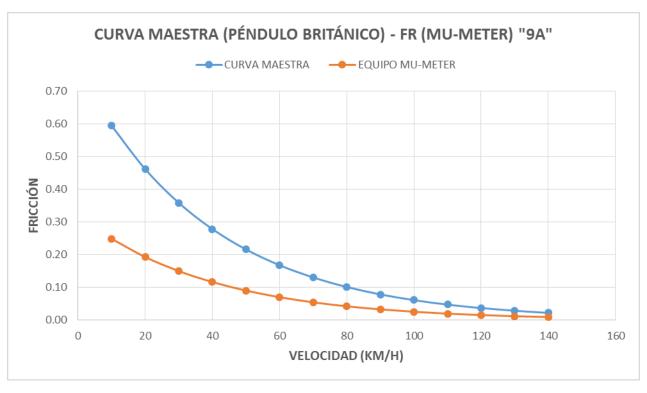


Figura 60 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (9A)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 67 DE 90 F1 RI-003

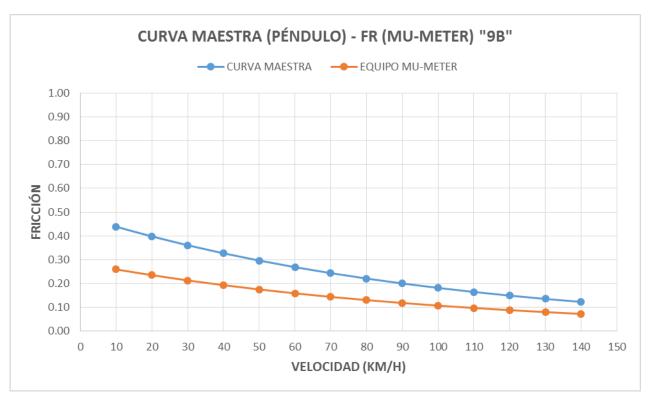


Figura 61 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (9B)

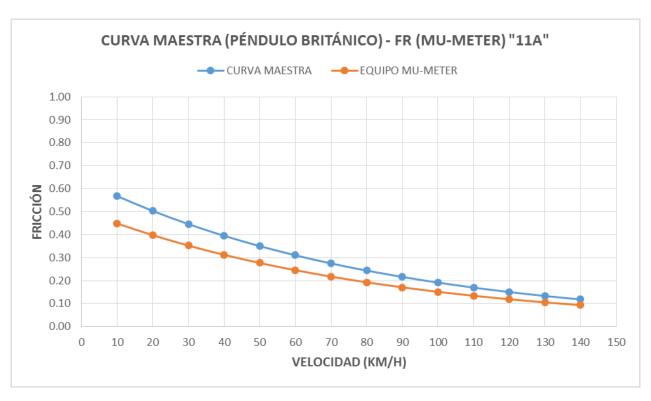


Figura 62 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (11A)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 68 DE 90 F1 RI-003

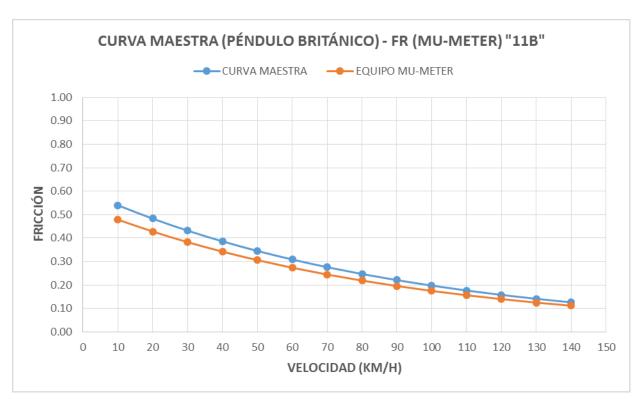


Figura 63 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (11B)

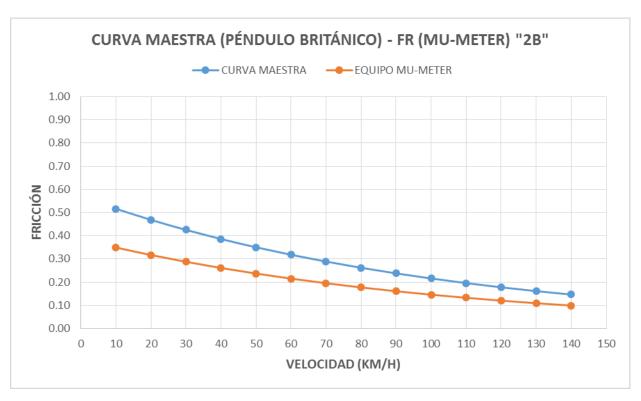


Figura 64 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (2B)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 69 DE 90 F1 RI-003

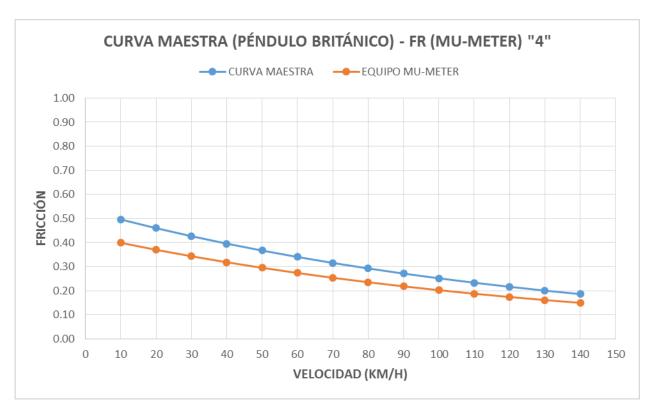


Figura 65 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (4)

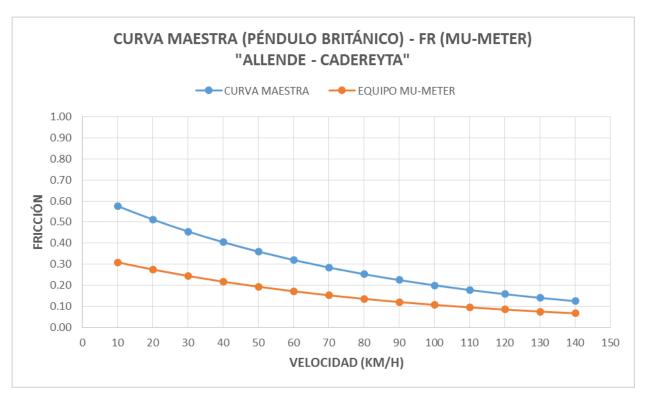


Figura 66 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Allende - Cadereyta)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 70 DE 90 F1 RI-003

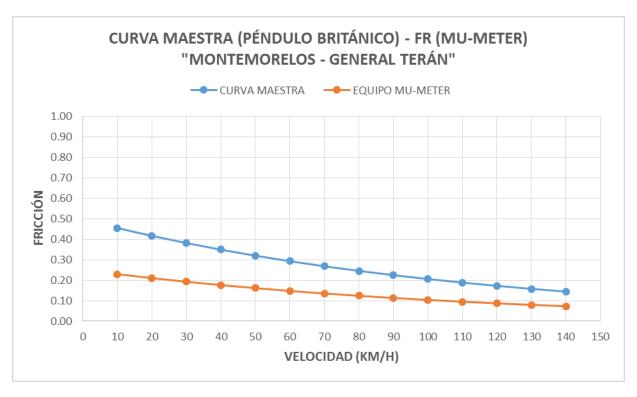


Figura 67 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Montemorelos – General Terán)

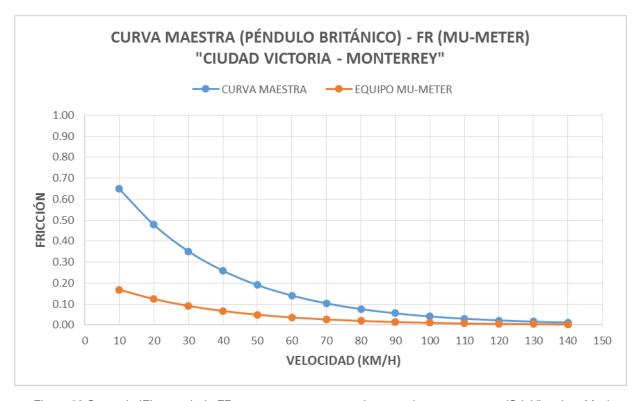


Figura 68 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Cd. Victoria – Mty.)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 71 DE 90 F1 RI-003

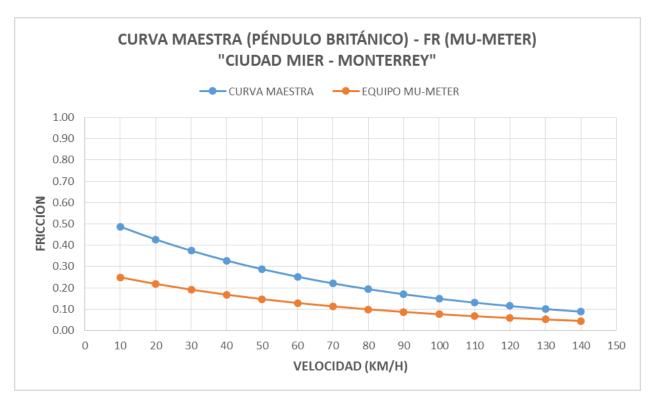


Figura 69 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Cd. Mier – Mty.)

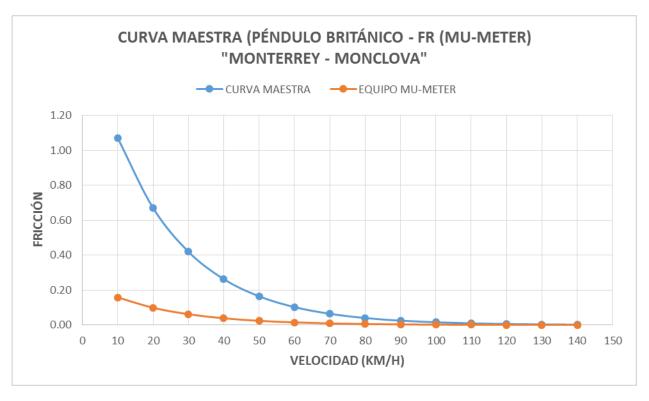


Figura 70 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Mty. – Monclova.)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 72 DE 90 F1 RI-003

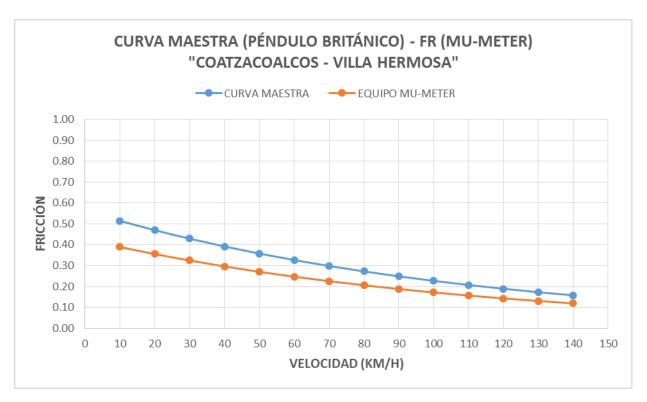


Figura 71 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Coatzacoalcos – Villa Hermosa)

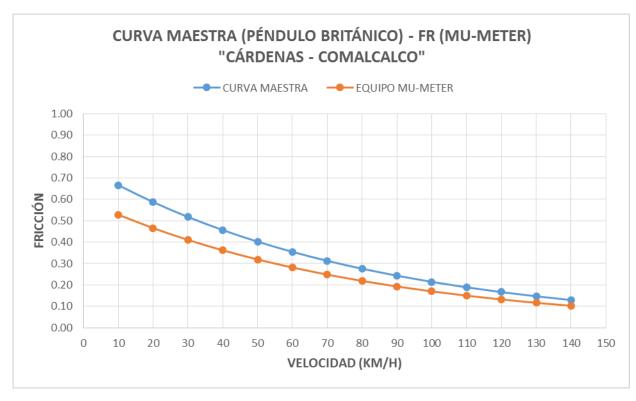


Figura 72 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Cárdenas – Comalcalco)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 73 DE 90 F1 RI-003

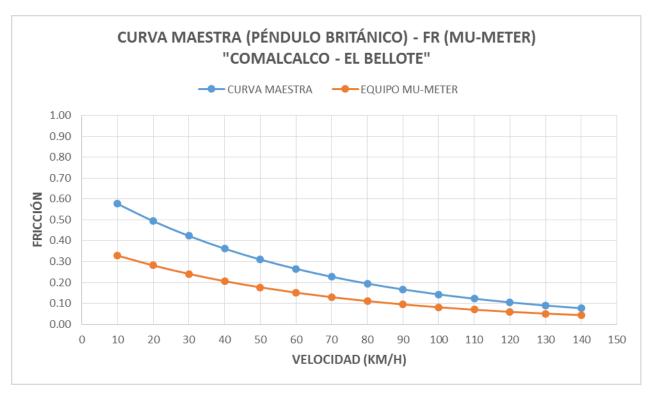


Figura 73 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Comalcalco - El Bellote)

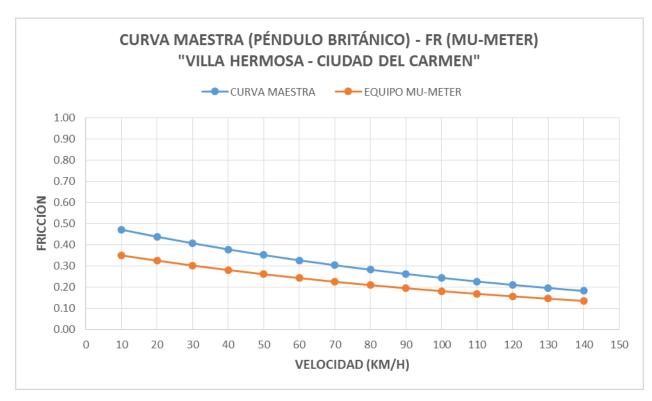


Figura 74 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Villa Hermosa – Ciudad del Carmen)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 74 DE 90 F1 RI-003

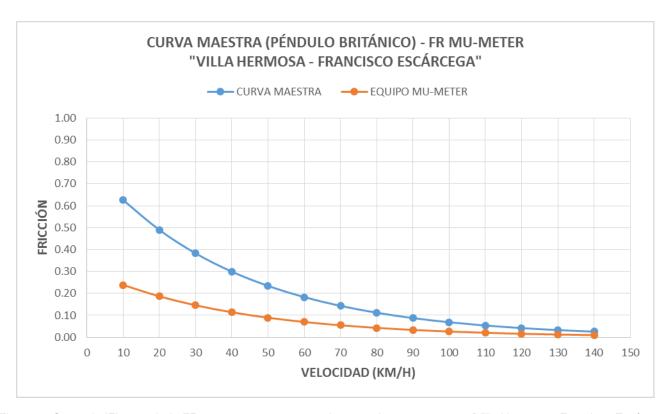


Figura 75 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Villa Hermosa – Francisco Escárcega)

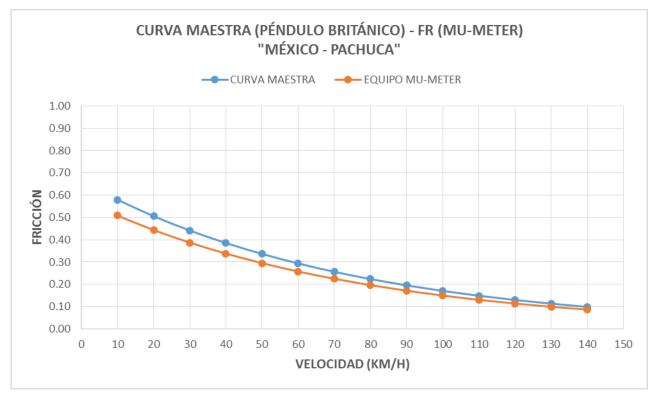


Figura 76 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (México – Pachuca)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 75 DE 90 F1 RI-003

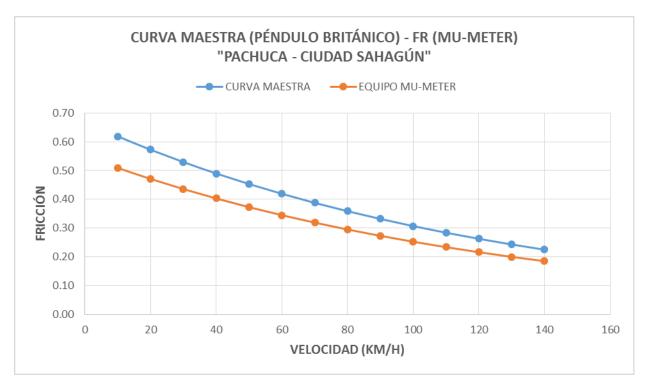


Figura 77 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Pachuca - Ciudad Sahagún)

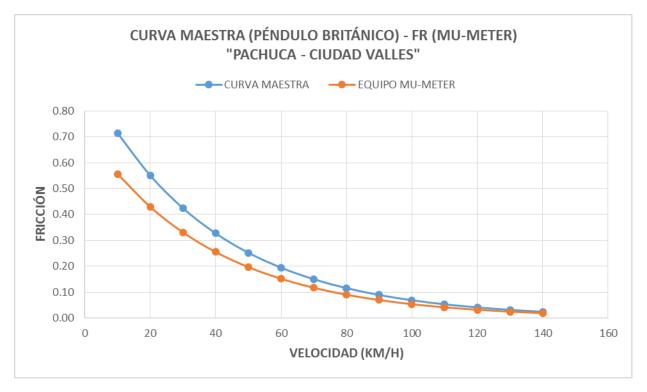


Figura 78 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Pachuca – Ciudad Valles)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 76 DE 90 F1 RI-003

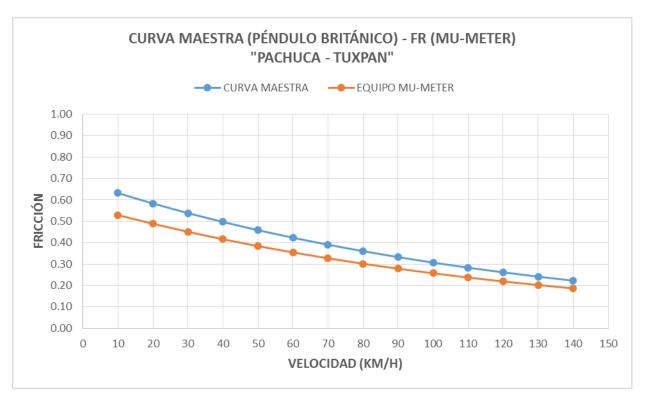


Figura 79 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Pachuca – Tuxpan)

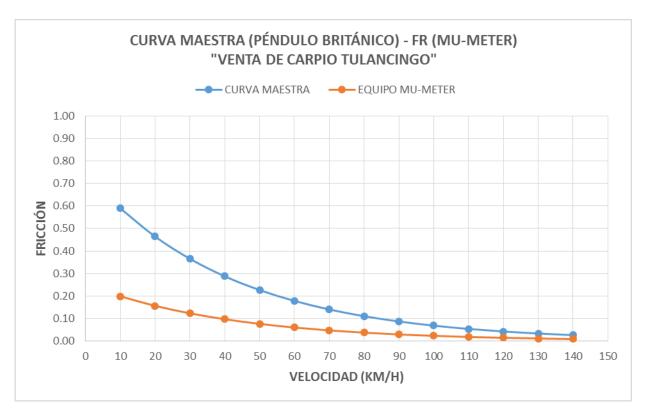


Figura 80 Curva de IFI, a partir de FR con mu meter comparada contra la curva maestra (Venta de Carpio – Tulancingo)

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 77 DE 90 F1 RI-003

## APÉNDICE D "COMPARACIÓN ENTRE CURVA MAESTRA DEL PÉNDULO BRITÁNICO Y CURVA MAESTRA CORREGIDA DEL EQUIPO MU METER"

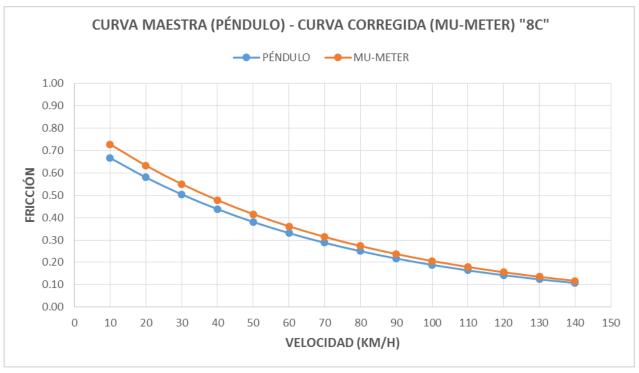


Figura 81 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo 8C.

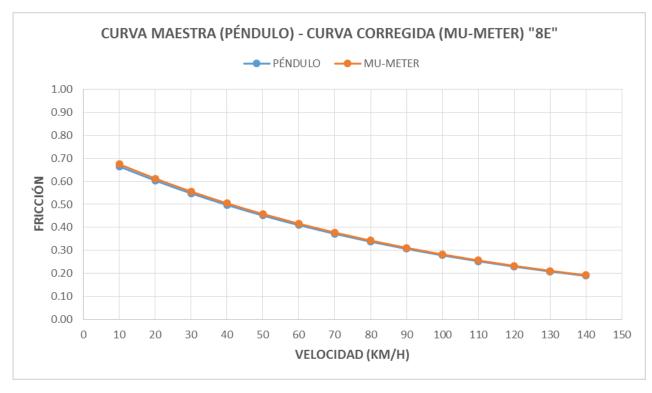


Figura 82 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo 8E.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 78 DE 90 F1 RI-003

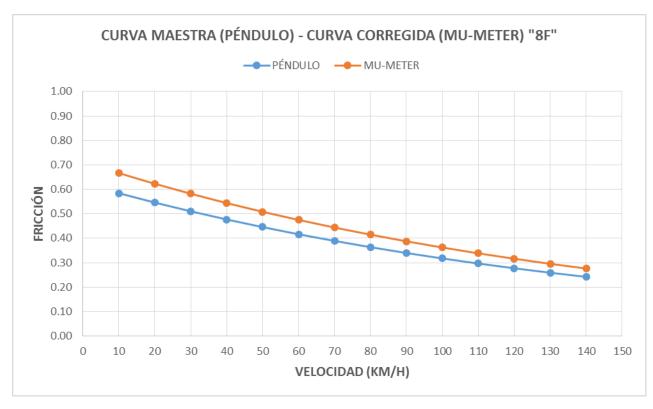


Figura 83 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo 8F.

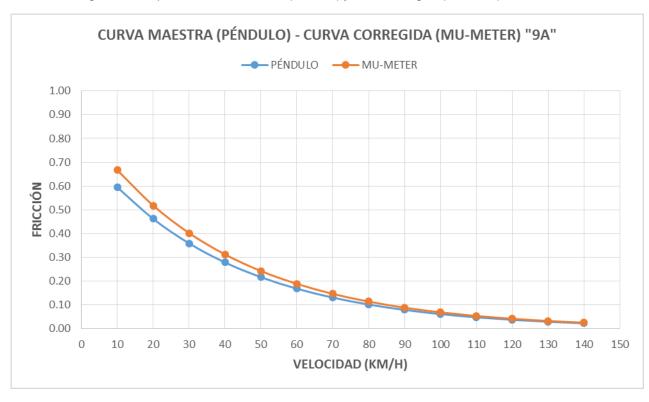


Figura 84 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo 9A.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 79 DE 90 F1 RI-003

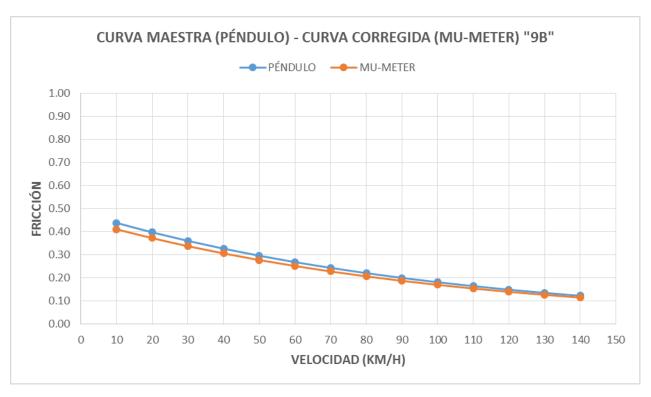


Figura 85 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo 9B.

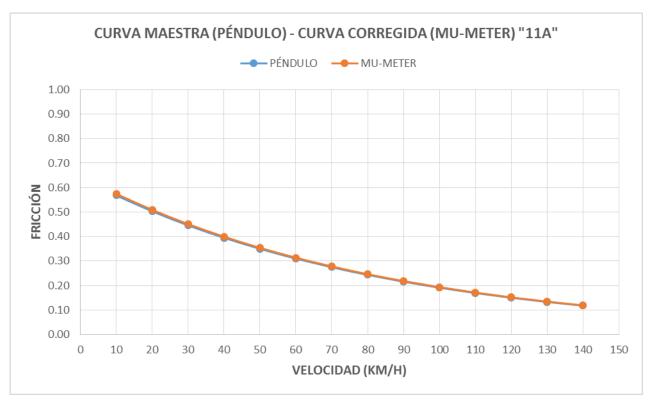


Figura 86 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo 11A

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 80 DE 90 F1 RI-003

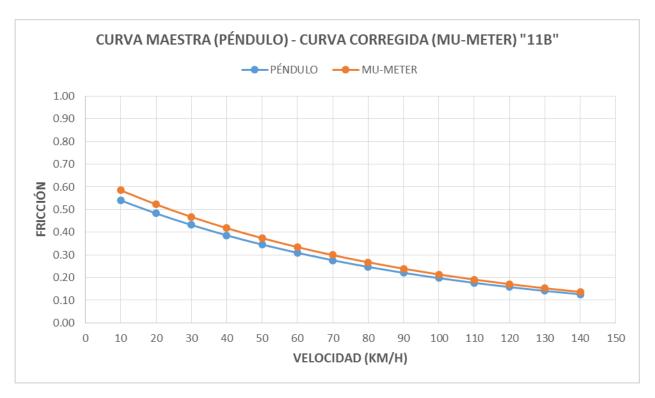


Figura 87 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo 11B

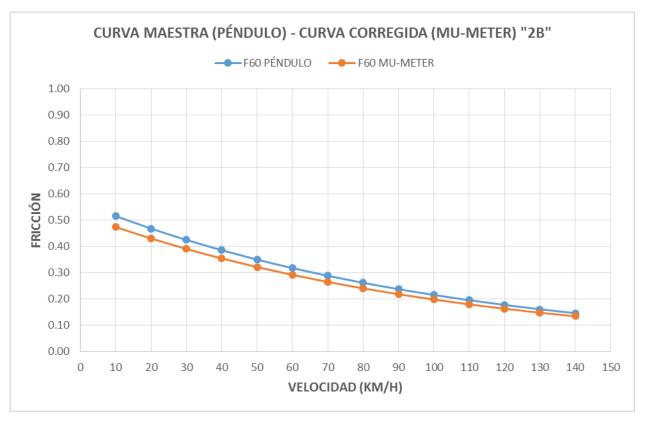


Figura 88 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo 2B

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 81 DE 90 F1 RI-003

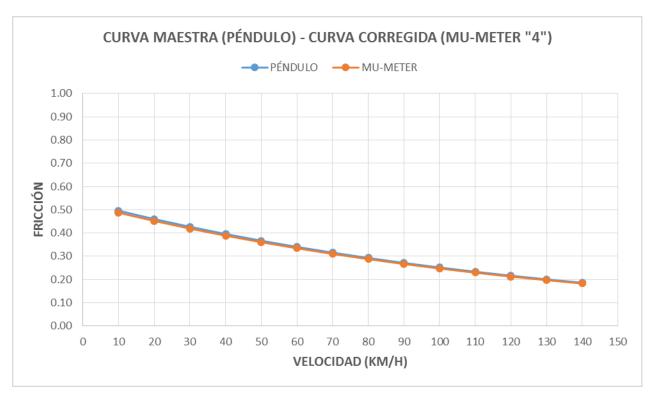


Figura 89 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo 4

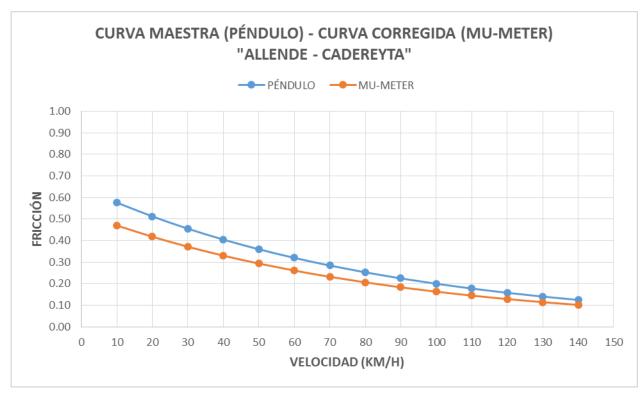


Figura 90 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo Allende - Cadereyta

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 82 DE 90 F1 RI-003

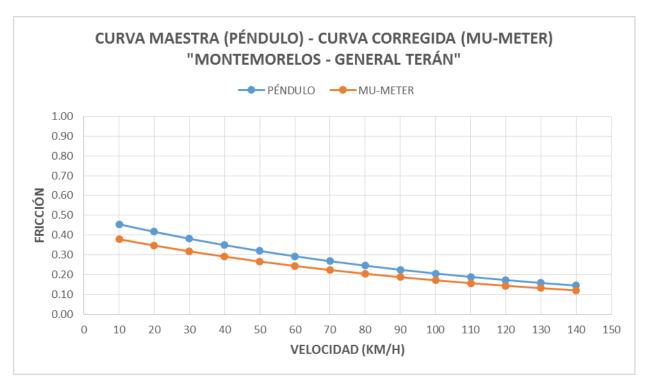


Figura 91 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter)del tramo Montemorelos – General Terán.

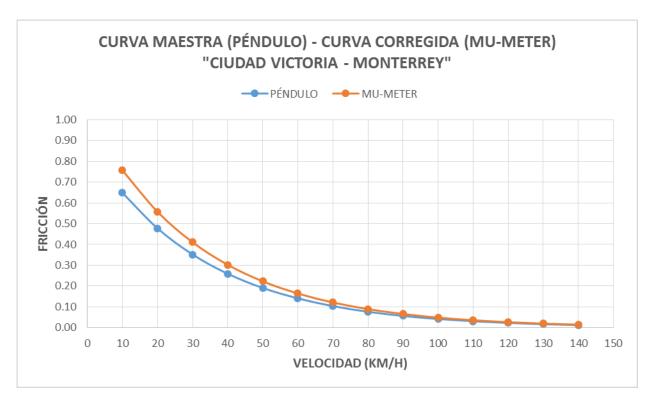


Figura 92 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo Ciudad Victoria – Monterrey.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 83 DE 90 F1 RI-003

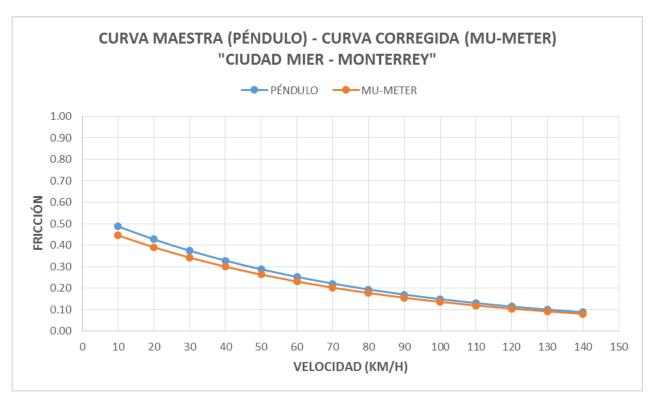


Figura 93 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter)del tramo Ciudad Mier - Monterrey.

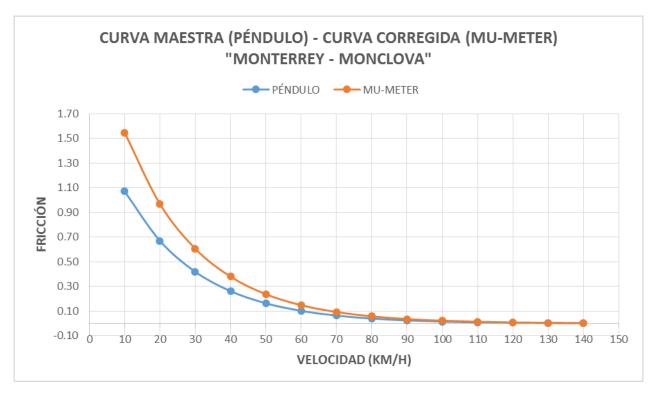


Figura 94 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo Monterrey – Monclova.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 84 DE 90 F1 RI-003

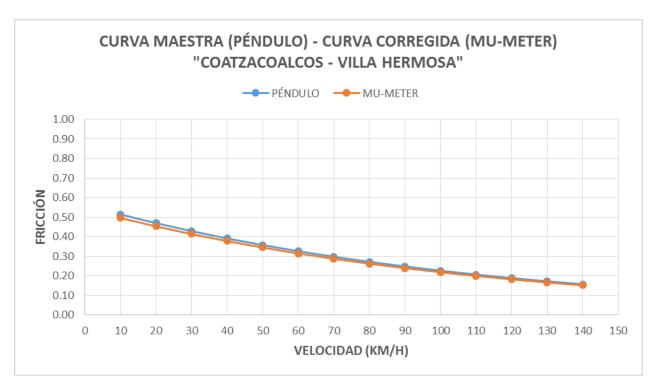


Figura 95 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo Coatzacoalcos – Villla Hermosa.

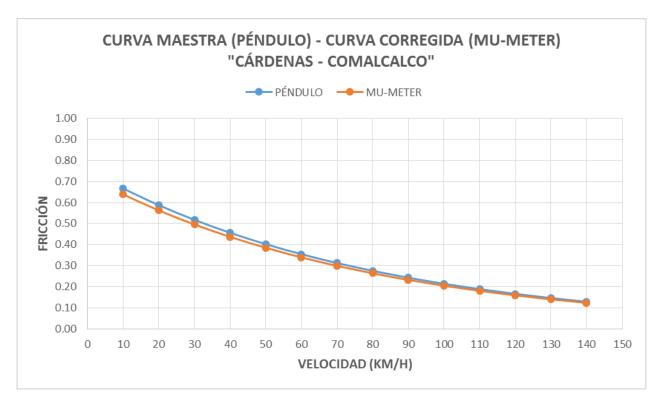


Figura 96 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter)del tramo Cárdenas - Comalcalco.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 85 DE 90 F1 RI-003

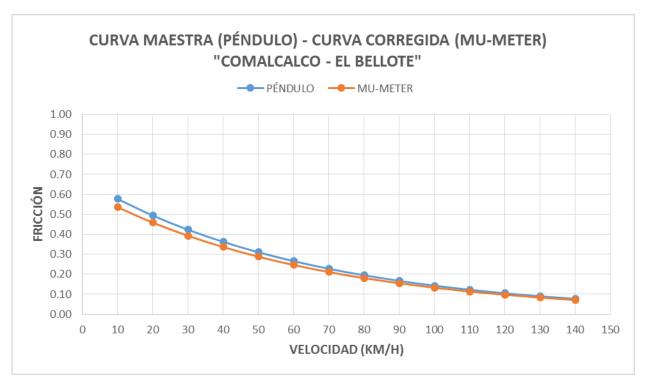


Figura 97 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo Comalcalco - El Bellote..

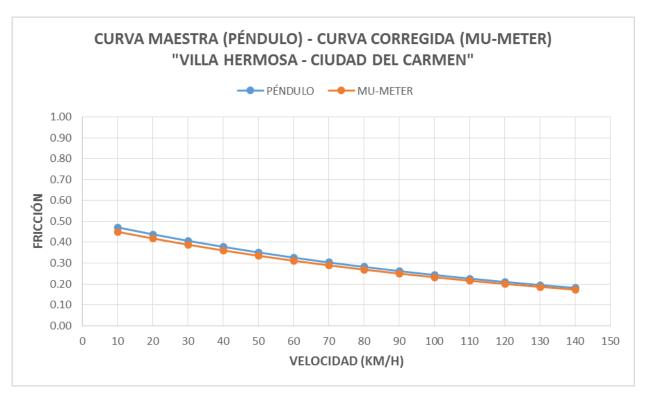


Figura 98 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo Villa Hermosa – Ciudad del Carmen.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 86 DE 90 F1 RI-003

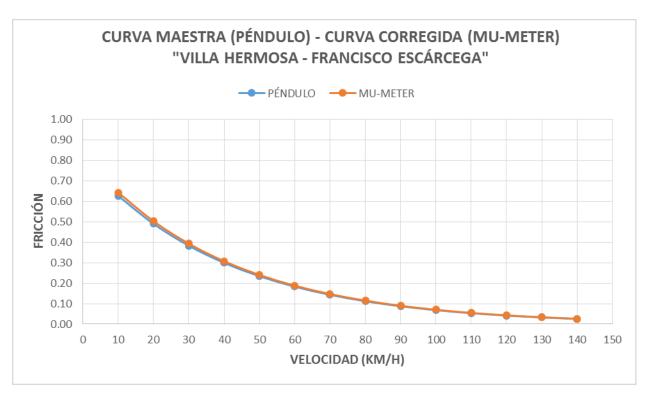


Figura 99 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo Villa Hermosa – Francisco Escárcega.

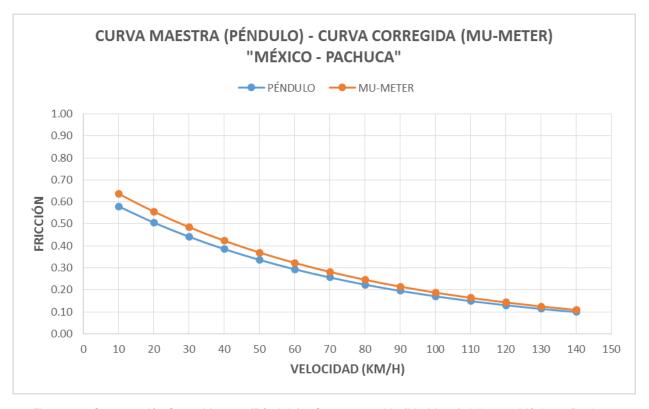


Figura 100 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo México – Pachuca.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 87 DE 90 F1 RI-003

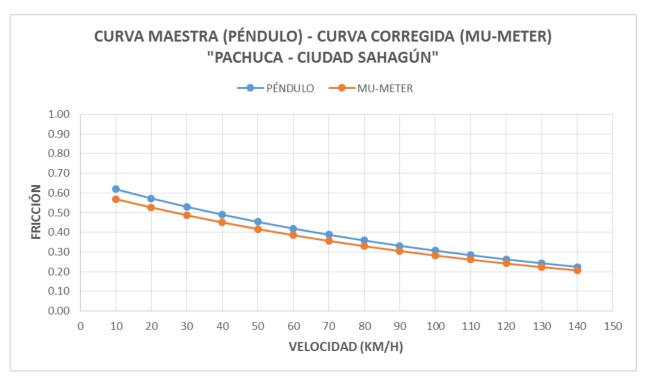


Figura 101 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo Pachuca – Ciudad Sahagún.

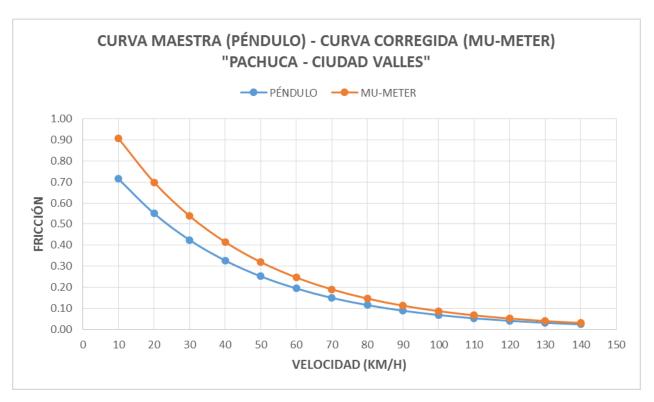


Figura 102 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo Pachuca - Ciudad Valles.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 88 DE 90 F1 RI-003

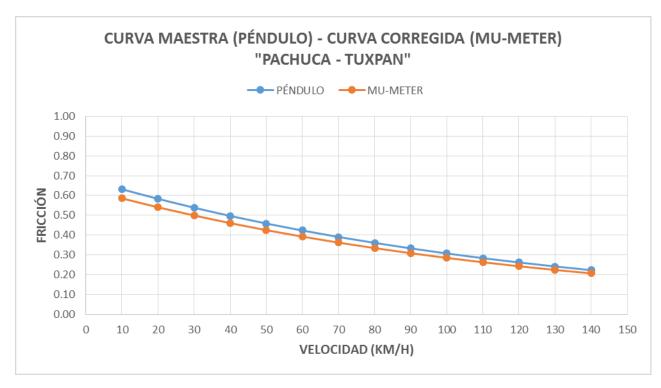


Figura 103 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo Pachuca - Tuxpan.

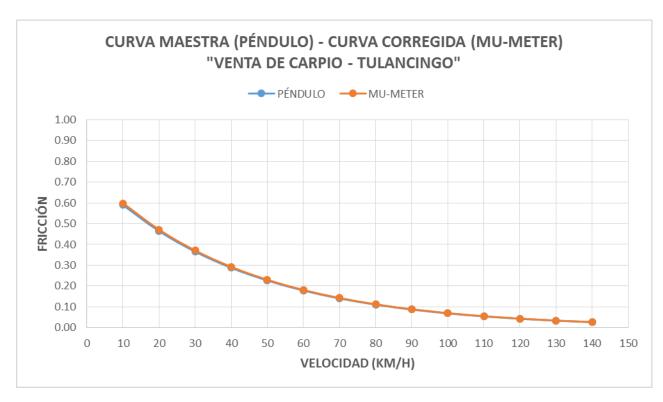


Figura 104 Comparación Curva Maestra (Péndulo) y Curva corregida (Mu-Meter) del tramo Venta de Carpio – Tulancingo.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 89 DE 90 F1 RI-003

## 7. BIBLIOGRAFÍA

ASTM E 1960-07 (Reapproved 2011) Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement

ASTM E 303-93 (2013) Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester

E 965-15 Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique

ASTM E 670-09 (2015) Standard Test Method for Testing Side Force Friction on Paved Surfaces Using the Mu-Meter

Experimento Internacional AIPCR de comparación y armonización de las medidas de textura y resistencia al deslizamiento, AIPCR: Comité Técnico AIPCR de Características Superficiales C.1. Publicación AIPCR- 01-04.T-1995.

López, V D.B., Garnica A. P, Consideraciones para la aplicación del Índice de Fricción Internacional en carreteras de México, P.T. 170, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro, 2002.

REV 04, FECHA: 20120117 HOJA 90 DE 90 F1 RI-003