



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

## Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: LM-IG-04-18

### Revisión del análisis de licuación en seis puentes de la Ruta Nacional N°32

INFORME FINAL



Preparado por:  
Ing. Ana Lorena Monge S., M.Sc.  
Coordinadora  
Programa de Ingeniería Geotécnica

San José, Costa Rica  
Setiembre, 2018



<b>1. Informe</b> <b>LM-IG-04-18</b>		<b>2. Copia No.</b> 1
<b>3. Título y subtítulo:</b> Revisión del análisis de licuación en seis puentes de la Ruta Nacional N°32		<b>4. Fecha del Informe</b> 25 setiembre 2018
<b>5. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
<b>6. Notas complementarias</b> Ninguna		
<b>7. Resumen</b>  <i>A solicitud de la Unidad de Auditoría Técnica del PITRA, se presenta a continuación la revisión de los informes de estudios de suelos realizados para los sitios de los puentes sobre los ríos Aguas Claras, Escondido, Cuba, Rojo, Toro y Blanco.</i> <i>La revisión consiste en verificar si efectivamente se realizó un análisis apropiado de la potencialidad de que se presente el fenómeno de licuación en los sitios de dichos puentes, pues en el reporte LM-PIE-UP-PF06-2018_R01 presentado por la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural, estos muestran evidencia de daños que podrían deberse a la presencia de licuación en los sitios correspondientes.</i> <i>Adicionalmente, se comenta acerca de los daños descritos en el reporte LM-PIE-UP-PF06-2018_R01, y la posibilidad de que hayan sido daños provocados por la presencia de la licuación en el lugar.</i>		
<b>8. Palabras clave</b> Licuación, puentes, daños, Ruta Nacional N°32.	<b>9. Nivel de seguridad:</b> -	<b>10. Núm. de páginas</b> 24
<b>11. Preparado y aprobado por:</b>   Ing. Ana Lorena Monge Sandí Coordinadora del Programa de Ingeniería Geotécnica		



**CONTENIDO**

I. Introducción ..... 4

II. Puentes de la Ruta Nacional N°32 detectados por la Unidad de Puentes sobre suelos potencialmente licuables ..... 4

III. Análisis de la información de los estudios de suelos en los sitios encontrados como potencialmente licuables ..... 5

IV. Análisis adicional de los materiales no considerados en los estudios de suelos aportados .. 6

    IV.1 Metodología utilizada para el análisis adicional ..... 6

    IV.2 Sitio del río Pacuarito ..... 7

    IV.3 Sitio de la quebrada Calderón ..... 9

    IV.4 Sitio del río Aguas Claras ..... 11

    IV.5 Sitio del río San Miguel ..... 11

    IV.6 Sitio del río Chirripó ..... 12

    IV.7 Sitio del río Escondido ..... 13

    IV.8 Sitio del río Cuba ..... 14

    IV.9 Sitio del río Rojo ..... 16

    IV.10 Sitio del río Toro ..... 18

    IV.11 Sitio del río Blanco ..... 19

V. Comentarios referentes a los daños encontrados en el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01. 21

VI. Comentarios finales ..... 21

VII. Referencias ..... 24

## REVISIÓN DEL ANÁLISIS DE LICUACIÓN EN 14 PUENTES DE LA RUTA NACIONAL N°32

### I. Introducción

La licuación es un fenómeno que se presenta cuando existe una caída repentina de la resistencia al corte de un suelo saturado o parcialmente saturado, bajo condiciones no drenadas, cuyo detonante puede ser el sometimiento del material a un esfuerzo dinámico, asociado generalmente a un sismo o a una explosión.

Generalmente, los suelos no cohesivos son los materiales más susceptibles a la licuación, sobre todo cuando estos se encuentran lo suficientemente sueltos como para que se compriman ante la aparición de una carga, y que posean una baja permeabilidad que impida un drenaje y por lo tanto alivio de la presión de poros apropiado del material, durante la aparición del evento sísmico. Por lo tanto, materiales como las arenas finas limpias y los limos arenosos no plásticos que contienen menos del 5% de material pasando el tamiz #200, y que se encuentran con la presencia de niveles freáticos someros, son los más susceptibles a presentar licuación ante la presencia de un sismo.

Por lo tanto, cuando en un proyecto se detecta la presencia de materiales granulares finos y poco cohesivos, con la presencia de nivel freático, se debe realizar una evaluación del potencial de licuación que pueda presentar dicho sitio ante un evento sísmico.

Existen varias metodologías de análisis de licuación, siendo la más conocida la metodología de Seed and Idriss (en todas sus actualizaciones), que se basa en evaluaciones empíricas del suelo, con parámetros de ensayos indirectos tales como el SPT. Sin embargo, es posible que para ciertos análisis donde no se cuente con la información requerida para la aplicación de esta metodología, se apliquen otras metodologías, que incluso pueden ser más simplificadas.

En el presente informe, se realiza una revisión de los estudios de suelo realizados por las empresas contratadas por la administración, para algunos de los puentes ubicados en la Ruta Nacional N°32, que en la Unidad de Puentes (UP) del Programa de Ingeniería Estructural, han detectado como afectados por la presencia de licuación.

### II. Puentes de la Ruta Nacional N°32 detectados por la Unidad de Puentes sobre suelos potencialmente licuables

En el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01, la Unidad de Puentes presenta un análisis de daños en los puentes de la Ruta Nacional N°32 comprendidos en el tramo desde el cruce con Río Frío hasta Limón. En este análisis, se contempló la potencialidad de licuación en las zonas en las que se encuentran cimentados cada uno de los puentes, superponiendo su ubicación en el mapa de suelos presentados en el Código de Cimentaciones de Costa Rica, tomando en cuenta la descripción dada.

El resultado de este análisis, es el cuadro 2 de dicho informe, que muestra 14 puentes de la Ruta Nacional N°32 sobre suelos que consideran potencialmente licuables. Adicionalmente, en la sección 3 del informe, se muestra una evaluación de daños en los puentes, concluyendo que existen 6 puentes con daños por la presencia de licuación en la zona.

Con base en información presentada en dicho informe, el Programa de ingeniería Geotécnica realiza un análisis de la información de los estudios de suelos de los 14 puentes indicados como situados sobre los suelos potencialmente licuables.



### III. Análisis de la información de los estudios de suelos en los sitios encontrados como potencialmente licuables

Dada la información presentada en el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01, se realiza el análisis de los estudios de suelos de dichos puntos, para determinar si la empresa contratada por la Administración, realizó el análisis de potencialidad de licuación para las cimentaciones de los puentes. El resultado es el siguiente:

Tabla 1. Estudios de suelos con análisis de la potencialidad de licuación de los sitios de los puentes detectados por el Programa de Ingeniería Estructural

Puentes de la Ruta Nacional N°32	Estudio PL del sitio	Suelo encontrado	Resultado
Paso superior sobre Ferrocarril	No	Aluviones densos	Material no susceptible a licuación
Puente Río Reventazón	No	Aluviones densos	Material no susceptible a licuación
Puente Río Pacuare	No	Aluviones densos	Material no susceptible a licuación
Puente Río Pacuarito	No	Aluviones densos	Material no susceptible a licuación
Puente Río Barbilla	No	Aluvi3n con matriz arenosa, de alta compactidad y arcillas compactadas	Material no susceptible a licuaci3n
Puente Quebrada Calder3n	Si	Estrato arenoso: BI: 6 a 10.5 m, BD: 2 a 5 m	BI: Licuable en todo el espesor de estudio BD: Licuable en todo el espesor de estudio
Puente Río Aguas Claras	Si	Estrato arenoso: BI: 18.5 a 30 m, BD: 14.5 a 30 m	BI: Licuable hasta los 20.5 m BD: Licuable hasta los 22 m
Puente Río San Miguel	Si	Estrato arenoso: BI: 6 a 30 m, BD: 3.5 a 30 m	BI: Licuable en todo el espesor de estudio BD: Licuable en todo el espesor de estudio
Puente Río Chirrip3	Si	Estratos arenosos: BI: 14.25 a 18.75 m y 20.25 a 21.75 m P1: 10.5 a 15.5 m y 20.25 a 28 m P2: 15 a 24.5 m P3: 7.5 a 8 m, 12.5 a 16.5 m y 21.5 a 24 m P4: 21 a 25 m P5: 8.5 a 13 y 18 a 25 m BD: 25.5 a 32 m	BI: Licuable de 14.25 a 18.75 m P1: Licuable de 10.5 a 15.5 m y de 20 a 23m P2: Licuable de 15 a 23 m P3: Licuable de 7.5 a 8 m, 12.5 a 16.5 m y 21.5 a 24 m (con excepci3n del estrato de 23 a 23.5) P4: Licuable de 22 a 24 m y 24.5 a 25 m P5: Licuable de 8.5 a 13 y 18 a 19.5 m BD: Licuable en todo el espesor de estudio
Puente Río Escondido	Si	Estrato arenoso: BI: 6 a 20 m, BD: 7 a 12 m	BI: Material no susceptible a licuaci3n BD: Licuable de 7 a 8.5 m
Puente Río Cuba	No	Arcillas y limos de alta plasticidad	Material no susceptible a licuaci3n
Puente Río Rojo	Si	Estratos arenosos: BI: 12.5 a 14 m y 17 a 19 m BD: 9 a 12 m y 18 a 22 m	BI: Licuable en los espesores de estudio BD: Licuable en los espesores de estudio
Puente Río Toro	Si	Estrato arenoso: BI: Materiales no licuables BD: 19 a 25 m	BI: Material no susceptible a licuaci3n BD: Licuable de 19 a 24.5 m
Puente Río Blanco	Si	Estrato arenoso: BI: 12 a 21 m P1: 7.5 a 17.5 m BD: 3.5 a 25 m	BI: Licuable de 12 a 13 m y de 14 a 14.5 P1: Licuable de 3.5 a 11.5 m BD: Licuable de 7.5 a 17.5 m

PL: Potencial de licuaci3n, BI: Basti3n izquierdo, BD: Basti3n derecho, P#: Pila

Como puede observarse, la empresa encargada de los estudios de suelos, si realizó análisis de potencialidad a la licuación en los sitios, dada la naturaleza del lugar y los antecedentes ocurridos en el terremoto de Limón en 1991.

Ahora bien, después de estudiar los estudios de suelos de los 14 sitios vulnerables, es posible apreciar que el criterio de análisis del potencial de licuación utilizado por la empresa responsable, se basa en aplicar la metodología de Seed e Idriss, y otra simplificada, únicamente a los suelos granulares catalogados como arenas, sin analizar otros materiales como limos o arcillas de baja plasticidad, que también pueden ser susceptibles a licuación.

Por lo tanto, en la siguiente sección se realizará un análisis adicional para determinar si los materiales no contemplados en los estudios de suelos de la empresa responsable, podrían ser eventualmente potencialmente licuables, basándose en la información de los estudios de suelo aportados por la Unidad de Auditoría Técnica del PITRA-LanammeUCR.

#### **IV. Análisis adicional de los materiales no considerados en los estudios de suelos aportados**

Como se indicó anteriormente, la empresa encargada de realizar los estudios de suelos, solamente contempló los suelos arenosos para el análisis de potencialidad de licuación. Es por ello, que en esta sección se amplía este análisis a suelos que presentan cierta plasticidad, basándose en la información con la que se cuenta de los estudios de suelos.

El análisis se amplía para los sitios de río Pacuarito, Quebrada Calderón, río Aguas Claras, río San Miguel, río Chirripó, río Escondido, río Cuba, río Rojo, río Toro y río Blanco, para los materiales que no se analizaron en los estudios de suelos revisados.

Para los casos de los sitios del paso superior del Ferrocarril, río Reventazón, río Pacuare y río Barbilla, no se cuenta con información adicional de la caracterización de los materiales, pues la empresa encargada de los estudios de suelos no pudo realizar el muestreo dada su condición y el tipo de exploración utilizada (perforación por rotación).

##### **IV.1 Metodología utilizada para el análisis adicional**

La metodología que se utiliza para el análisis adicional, es en primer lugar determinar el potencial de licuación de los materiales con plasticidad, colocándolos en la carta de plasticidad modificada por Idriss et al, presentada en el Seminario de la ASCE del 2003, la cual incluye una zonificación de suelos potencialmente licuables.



Esta carta de plasticidad modificada es la siguiente:

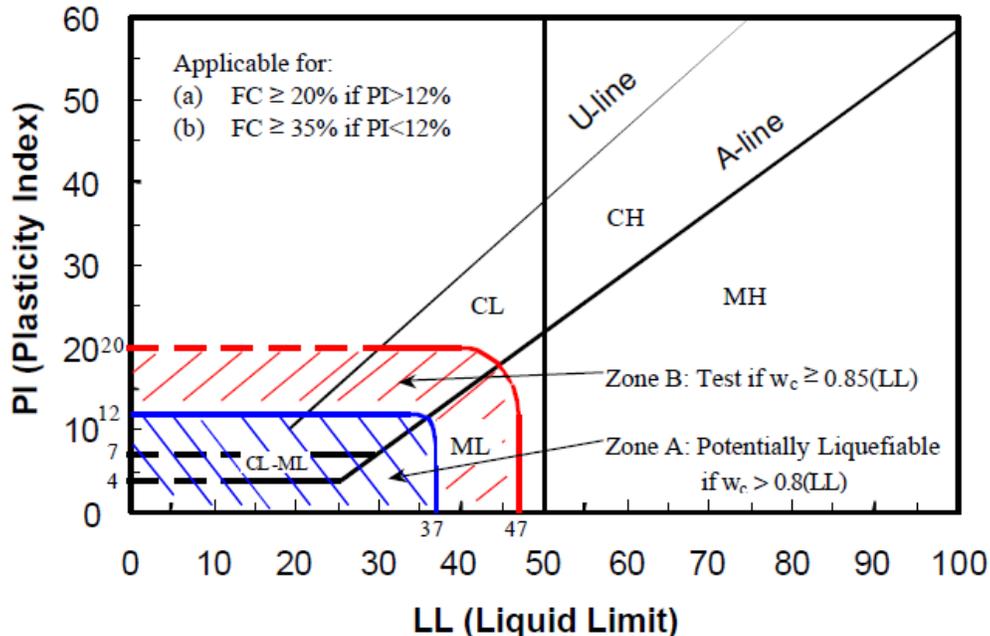


Figura 1. Carta de plasticidad modificada por Idriss et al (2003)

Cabe destacar que esta carta de plasticidad es aplicable para dos condiciones de suelos, a saber:

- Contenido de finos mayores que 20% si poseen un índice de plasticidad mayor que 12%
- Contenido de finos mayores que 35% si poseen un índice de plasticidad menor que 12%

Es importante hacer notar que, en esta carta de plasticidad modificada, la licuación se puede producir cuando al clasificar el suelo, este se encuentra en la zona A (zona azul) donde existe un potencial de licuación si el contenido de humedad natural del suelo es mayor al 80% del Límite Líquido ( $w_c > 0.8LL$ ), o se encuentra en la zona B, donde la licuación podría presentarse si el suelo posee un contenido de humedad natural es mayor o igual al 85% del Límite Líquido ( $w_c \geq 0.85LL$ ). La zona C es libre de licuación, al menos en su presentación clásica.

Dado que la información con la que se cuenta, se limita a lo proporcionado en cada estudio de suelos de la empresa responsable, en algunos casos solo se clasificará el suelo tomando en cuenta los datos de plasticidad proporcionados, sin posibilidad de verificar si los suelos cumplen con la condición de contenido de finos.

#### IV.2 Sitio del río Pacuarito

En el río Pacuarito, en el estudio de suelos proporcionado, muestra que las tres perforaciones están compuestas en su mayoría por materiales aluvionales de origen volcánico. Hay dos lentes de materiales plásticos: un limo arcillo-arenoso color café y una arcilla proveniente de la meteorización de un lente de lava.

Se cuenta con la caracterización de los limos muestreados de las dos perforaciones donde se encontraron, pero no se cuenta con la caracterización de la arcilla, posiblemente porque el material

es más de composición compacta como una roca meteorizada y no un suelo arcilloso. En resumen, los resultados de la caracterización de los limos es la siguiente:

Tabla 2. Caracterización de los limos arcillo-arenosos encontrados en el sitio del río Pacuarito

Perforación	Profundidad (m)	IP	LL
QZK 113	13.5 a 19	28	58
QZK 114	7.5 a 12	23	54

Cuando se introducen estos datos a la carta de plasticidad modificada, el resultado es el siguiente:

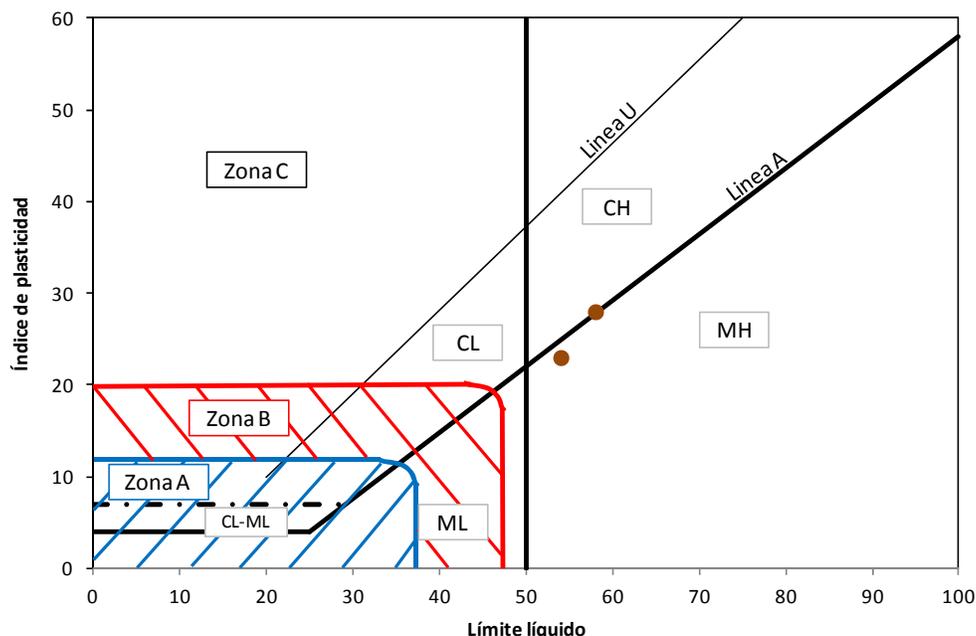


Figura 2. Análisis en carta de plasticidad modificada de limos arcillo-arenosos del sitio del río Pacuarito

Como es posible apreciar, estos limos no presentarían licuación al estar ubicados en la zona C de la carta de plasticidad modificada, aunque tuviesen las características de contenido de finos y humedad que indica el método de Idriss et al.

Para la arcilla y los distintos aluviones encontrados en el sitio, no es posible aplicar este método, pues no se encuentran caracterizados.

Por lo tanto, después de este análisis simplificado para el material plástico encontrado en ambas perforaciones (correspondientes a cada margen) del río Pacuarito, se puede indicar que con la información suministrada por los estudios de suelos, el sitio no parece ser susceptible a licuación.

Esta condición puede complementarse con la información de la inspección realizada por la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural, pues en el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01, se indica que este puente no presenta daños estructurales que se puedan asociar a licuación.

### IV.3 Sitio de la quebrada Calderón

En el sitio de la quebrada Calderón, el estudio de suelos proporcionado, muestra que en las dos perforaciones existen materiales arenosos, las cuales son analizadas con un método simplificado para determinar su susceptibilidad a la licuación. El resultado del análisis realizado se resume en la Tabla 1.

Sin embargo, en su mayoría se encuentran materiales plásticos en las perforaciones que presentan descripciones como materiales arcillosos de distintas tonalidades y con alta plasticidad. Se cuenta con la caracterización de estos materiales muestreados de las dos perforaciones. En resumen, la caracterización de estos materiales es la siguiente:

Tabla 3. Caracterización de los materiales plásticos encontrados en el sitio de la quebrada Calderón

Perforación	Profundidad (m)	Material	IP	LL
QZK 134	11 a 13.5	Material gris con arenas aisladas	5	35
	13.5 a 23.5	Material color grisáceo arcilloso de alta plasticidad	18 79	80 37
	23.5 a 25	Material arcilloso, color marrón y alta plasticidad	20	58
	27 a 30	Material color grisáceo arcilloso de alta plasticidad	28 22	62 54
QZK 135	5 a 6.5	Material color grisáceo con arenas finas, plasticidad media	21	62
	6.5 a 9.5	Material arcilloso color café, alta plasticidad	46	79
	9.5 a 14.5	Material arcilloso color café claro, plasticidad de media a alta	35 26	67 63
	14.5 a 19.5	Material arcilloso color grisáceo, alta plasticidad	26	54
	19.5 a 21	Material arcilloso, color marrón y alta plasticidad	20	52
	21 a 30	Material color grisáceo arcilloso de alta plasticidad	6 33 14	38 62 44

Se aplica entonces el método de Idriss et al, de la carta de plasticidad modificada. Cabe recordar que para esta metodología es necesario conocer el contenido de finos de los materiales y la humedad natural, pues estos son factores preponderantes para verificar la susceptibilidad a la licuación. Con la información proporcionada en los estudios de suelos aportados, no es posible conocer el contenido de finos pero si se cuenta con algunos datos de humedad natural.

Cuando se introducen los datos de la Tabla 3 a la carta de plasticidad modificada, el resultado es el siguiente:

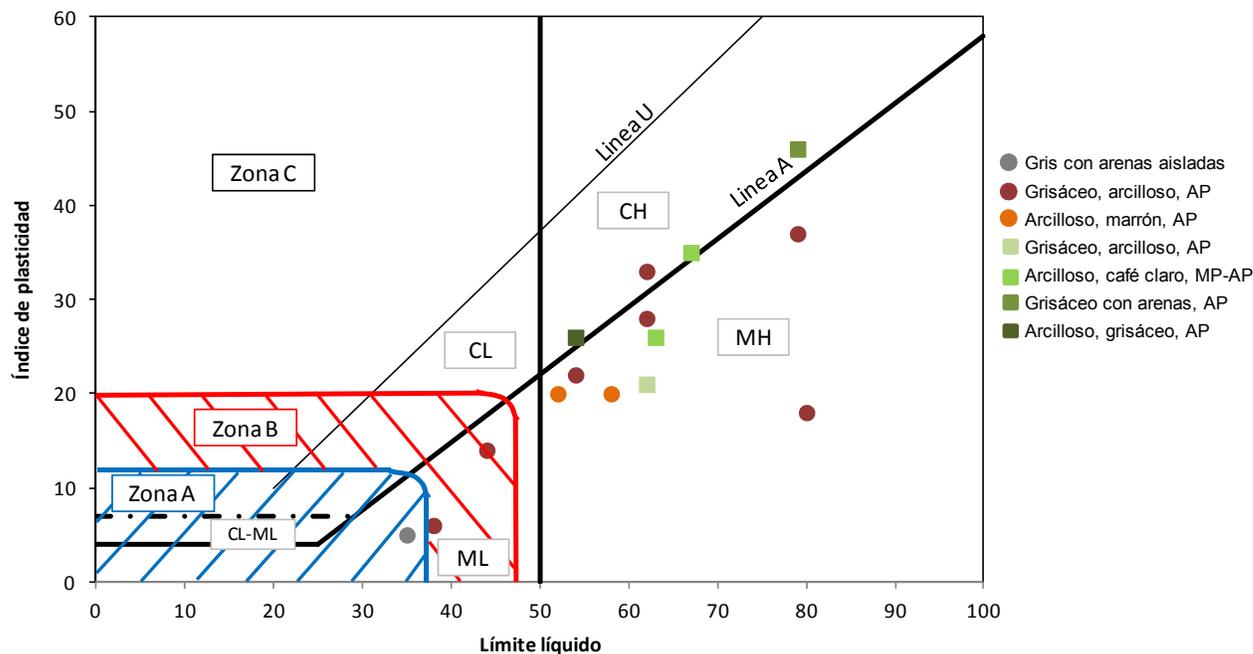


Figura 3. Análisis en carta de plasticidad modificada de materiales del sitio de la quebrada Calderón

Como se puede observar, el material descrito como “gris con arenas aisladas”, se encuentra en la zona A “Potencialmente licuable” y 2 de los 7 puntos del material descrito como “grisáceo arcilloso de alta plasticidad”, se encuentran en la zona B “Podrían ser licuables”. Ahora bien, para poder determinar si efectivamente estos dos materiales son potencialmente licuables, se debe analizar si su contenido de finos (CF) y su humedad natural ( $w$ ) cumplen con las características indicadas para la aplicabilidad del método.

Anteriormente, se comentó que la información proporcionada por el estudio de suelos para este sitio, no es suficiente para determinar el contenido de finos; sin embargo, si se cuenta con las humedades naturales. Con esta información se verifica si se están cumpliendo con las premisas de la metodología para su aplicabilidad.

El material gris con arenas aisladas, tiene una humedad natural promedio de 60.5%. Para determinar la aplicabilidad del método, la humedad natural debe ser mayor al 80% del límite líquido, es decir mayor que 28%. En este caso, se observa que la condición se cumple, por lo que el suelo podría ser “potencialmente licuable”, solo habría que verificar las condiciones de contenidos de finos.

En cuanto al material grisáceo arcilloso de alta plasticidad, específicamente estos dos puntos cuentan con una humedad natural promedio de 52.0%. Para determinar la aplicabilidad del método, la humedad natural debe ser mayor o igual al 85% del límite líquido, es decir mayor que 45%. En este caso también se cumple la premisa, por lo que el suelo podría ser “licuable”, solo habría que verificar las condiciones de contenidos de finos. Cabe destacar que esta condición del material se encuentra en la perforación QZK 135, en la profundidad de 21 a 30 m.

Dados estos resultados, se recomienda ampliar la profundidad del estudio de licuación para este sitio, tomando en cuenta metodologías de análisis que incluyan los materiales plásticos, analizando tanto el contenido de finos como el porcentaje de humedad natural.

#### IV.4 Sitio del río Aguas Claras

En la información proporcionada en el estudio de suelos del sitio, se observa que para ambas perforaciones solo se encontraron materiales arenosos, por lo que el análisis realizado por la empresa (método simplificado) y presentado en el informe es adecuado y suficiente para el sitio.

#### IV.5 Sitio del río San Miguel

En el sitio del río San Miguel, el estudio de suelos proporcionado, muestra que en las dos perforaciones existen materiales arenosos. La perforación QZK 138 de la margen izquierda, está compuesta en toda su profundidad por arena, mientras que la perforación QZK 139, cuenta con materiales arenosos en casi toda su profundidad a excepción de la profundidad 9.5 a 18 m, que se encuentra un material plástico. Los materiales arenosos se analizan para determinar su susceptibilidad a la licuación, con el método modificado de Idriss, y en este análisis se incluye el espesor de material plástico. El análisis realizado se resume en la Tabla 1.

A pesar de que este material es tomado en cuenta en el análisis de susceptibilidad a la licuación, a continuación se emplea adicionalmente el método de la carta de plasticidad modificado para complementar lo obtenido en el estudio de la empresa.

En resumen, los resultados de la caracterización de este material plástico encontrado es la siguiente:

Tabla 4. Caracterización del material plástico encontrado en el sitio del río San Miguel

Perforación	Profundidad (m)	IP	LL
QZK 139	9.5 a 18	6	32
		11	41
		13	42

Cabe recordar que para esta metodología es necesario conocer el contenido de finos de los materiales y la humedad natural, pues estos son factores preponderantes para verificar la susceptibilidad a la licuación. Con la información proporcionada en los estudios de suelos aportados, no es posible conocer el contenido de finos pero si se cuenta con algunos datos de humedad natural.

Cuando se introducen estos datos a la carta de plasticidad modificada, el resultado es el siguiente:

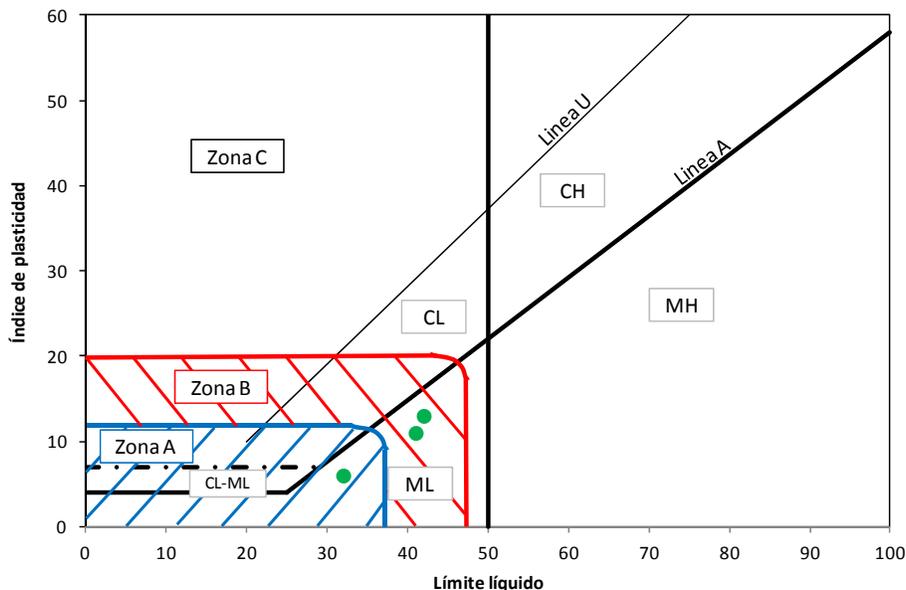


Figura 4. Análisis en carta de plasticidad modificada del material plástico del sitio del río San Miguel

Como se puede observar, el material se encuentra tanto en la zona A “Potencialmente licuable” como en la zona B “Podrían ser licuables”. Ahora bien, para poder determinar si efectivamente este es potencialmente licuable, se debe analizar si su contenido de finos (CF) y su humedad natural ( $w$ ) cumplen con las características indicadas para la aplicabilidad del método.

Como anteriormente se comentó, la información proporcionada por el estudio de suelos aportado para este sitio, no es suficiente para determinar el contenido de finos; sin embargo, si se cuenta con las humedades naturales. Con esta información se verifica si se están cumpliendo con las premisas de la metodología para su aplicabilidad.

Para determinar si el punto del material cumple con las premisas de la zona A, se debe comparar la humedad promedio de 40.5% con el 80% del límite líquido que es 31% y verificar si es mayor. Como se observa, se cumple que la humedad natural es mayor que el límite dado. Se hace de igual forma para la zona B, donde la humedad promedio se compara con el 85% del límite líquido. Igualmente, se cumple la premisa que la humedad natural es mayor que el valor de 33% que corresponde a este valor del límite.

Al observar el estudio que la empresa contratada por la Administración y verificar que en el análisis de licuación se incluyó el espesor de materiales plásticos, se concluye que el estudio de susceptibilidad de licuación se realizó correctamente.

#### IV.6 Sitio del río Chirripó

Para el sitio del río Chirripó, el estudio de suelos proporcionado, muestra que en las siete perforaciones existen suelos granulares y materiales arenosos, que analizan con el método modificado de Seed and Idriss para determinar la susceptibilidad a la licuación. El análisis realizado se resume en la Tabla 1.

Sin embargo, en las perforaciones se encuentran materiales plásticos que presentan descripciones como materiales arcillosos y con media y alta plasticidad. Se cuenta con la caracterización de estos materiales muestreados de las siete perforaciones. Sin embargo, no se cuenta con la información de todos los parámetros necesarios para verificar la susceptibilidad a la licuación de materiales plásticos, utilizando la metodología de la carta de plasticidad modificada.

Se cuenta con el índice de plasticidad, pero en el informe de estudios de suelos, la empresa encargada no incluye la información de los límites líquidos correspondientes. Para este caso, es recomendable solicitar estos datos faltantes, pues no se duda de su existencia ya que se requiere para calcular el índice de plasticidad. Simplemente se omitió su reporte.

#### IV.7 Sitio del río Escondido

En el sitio del río Escondido, el estudio de suelos proporcionado muestra que en las dos perforaciones existen materiales arenosos, que analizan con el método modificado de Idriss, para determinar su susceptibilidad a la licuación. El análisis realizado se resume en la Tabla 1.

Sin embargo, en ambas perforaciones existen materiales plásticos que no fueron analizados y como se indicó anteriormente, no deberían considerarse del todo no licuables desde un inicio solo por tener propiedades de plasticidad y debería realizarse un análisis simplificado para verificar que efectivamente los materiales poseen tal condición. Se cuenta con la caracterización de estos materiales muestreados de las dos perforaciones. En resumen, los resultados de la caracterización de los limos es la siguiente:

Tabla 5. Caracterización de los materiales plásticos encontrados en el sitio del río Escondido

Perforación	Profundidad (m)	Material	IP	LL
QZK 157	0 a 1.5	Limo arcilloso de alta plasticidad color grisáceo	57	98
	1.5 a 6	Arcilla color grisáceo de alta plasticidad	65	88
	6.5 a 13.5	Arcilla de alta plasticidad de color grisáceo muy compacta	NI	NI
QZK 158	0 a 3.5	Aluvión	-	-
	3.5 a 5.5	Limo arcilloso de alta plasticidad color grisáceo	46	79
	5.5 a 7	Arcilla color grisáceo de alta plasticidad	35 26	67 63

NI: No indicadas

Entonces, se aplica el método de la carta de plasticidad modificada, que cabe recordar que para aplicar esta metodología es necesario conocer el contenido de finos de los materiales y la humedad natural, pues estos son factores preponderantes para verificar la susceptibilidad a la licuación. Con la información proporcionada en los estudios de suelos aportados, no es posible conocer el contenido de finos pero si se cuenta con algunos datos de humedad natural, por si se necesitase realizar un análisis adicional del potencial de licuación.

Cuando se introducen estos datos a la carta de plasticidad modificada, el resultado es el siguiente:

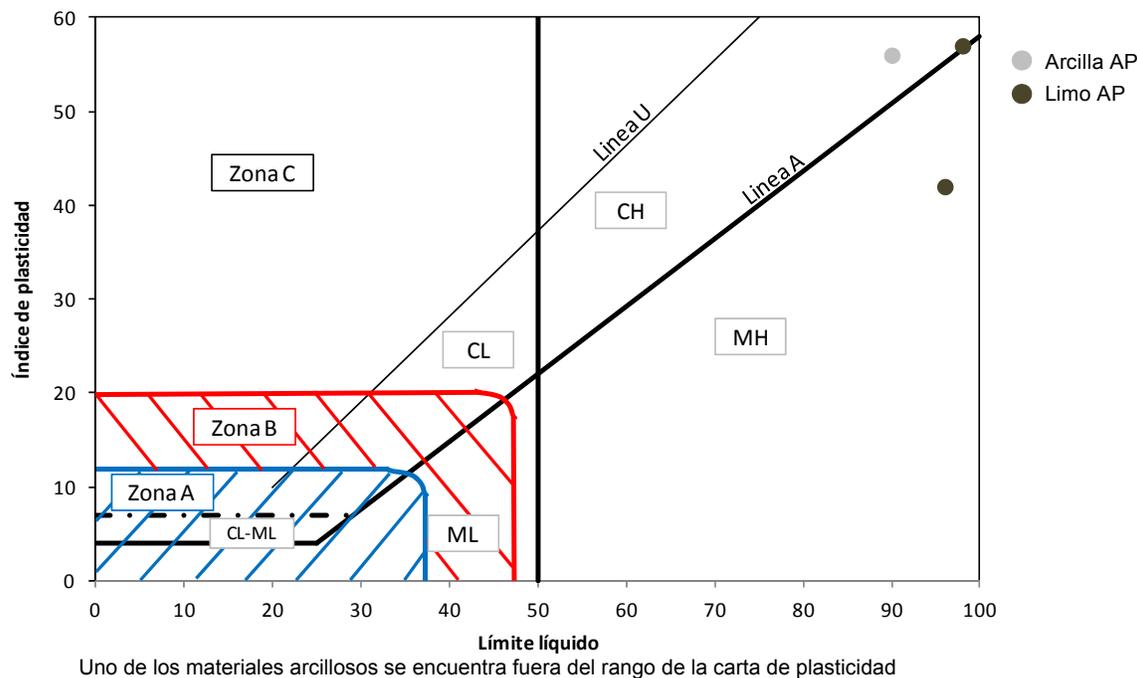


Figura 5. Análisis en carta de plasticidad modificada del material plástico del sitio del río Escondido

Como es posible apreciar, estos materiales no presentarían licuación al estar ubicados en la zona C de la carta de plasticidad modificada, aunque tuviesen las características de contenido de finos y humedad que indica el método de Idriss et al.

Por lo tanto, después de este análisis simplificado para el material plástico encontrado en ambas perforaciones (correspondientes a cada margen) del río Escondido, se puede indicar que con la información suministrada por los estudios de suelos, estos no parecen ser susceptible a licuación. Sin embargo, los materiales arenosos que se encuentran más profundos que los materiales plásticos evaluados, si presentan licuación, resultado del análisis realizado por la empresa encargada de los estudios de suelos.

Por lo tanto, la información proporcionada en los estudios de suelos aportados, se considera adecuada para el sitio del río Escondido.

#### IV.8 Sitio del río Cuba

Para el sitio del río Cuba, la empresa encargada de los estudios de suelos, no realizó un análisis de susceptibilidad a la licuación, por encontrarse materiales arcillosos en su mayoría en las cinco perforaciones ejecutadas.

Sin embargo, como anteriormente se comentó, es importante realizar el análisis de potencialidad a la licuación a materiales que no necesariamente son granulares, pero que por ciertas características, podría eventualmente presentarse licuación durante un sismo.

En resumen, los resultados de la caracterización de los limos es la siguiente:

Tabla 6. Caracterización de los materiales plásticos encontrados en el sitio del río Cuba

Perforación	Profundidad (m)	Material	IP	LL
QZK 159	0 a 2	Arcilla arenosa	NI	NI
	2 a 5.5	Material arenoso con bloques	-	-
	5.5 a 12.5	Arcilla de alta plasticidad de color gris oscuro	34	54
	12.5 a 14	Arena gruesa	-	-
	14 a 22.5	Limo color gris oscuro de alta plasticidad	31 33	66 60
QZK 160	0 a 3	Arcilla arenosa	NI	NI
	3 a 7.5	Arcilla color café oscuro de alta plasticidad	67	99
	7.5 a 11.5	Arcilla de alta plasticidad de color gris oscuro	25	53
	11.5 a 13.5	Arena gruesa	-	-
	13.5 a 25	Arcilla de alta plasticidad de color gris oscuro	29 39	52 77
QZK 161	0 a 2.5	Arcilla arenosa	NI	NI
	2.5 a 9	Arcilla color café oscuro de alta plasticidad	22	46
	9 a 13	Limo color gris oscuro de alta plasticidad	31	77
	13 a 14	Arena gruesa	-	-
	14 a 17	Limo color gris oscuro de alta plasticidad	22	56
	17 a 26	Arcilla de alta plasticidad de color gris oscuro	22 26	39 51
QZK 162	0 a 1.5	Arcilla arenosa	NI	NI
	1.5 a 4.5	Material arenoso con bloques	-	-
	4.5 a 12	Arcilla de alta plasticidad de color gris oscuro	43	71
	12 a 14	Arena gruesa	-	-
	14 a 25	Arcilla de alta plasticidad de color gris oscuro	39 37	55 64

NI: No indicadas

Estos parámetros de los materiales encontrados son colocados en la carta de plasticidad modificada. Cabe recordar que para esta metodología es necesario conocer el contenido de finos de los materiales y la humedad natural, pues estos son factores preponderantes para verificar la susceptibilidad a la licuación. Con la información proporcionada en los estudios de suelos aportados, no es posible conocer el contenido de finos pero si se cuenta con algunos datos de humedad natural.



Cuando se introducen estos datos a la carta de plasticidad modificada, el resultado es el siguiente:

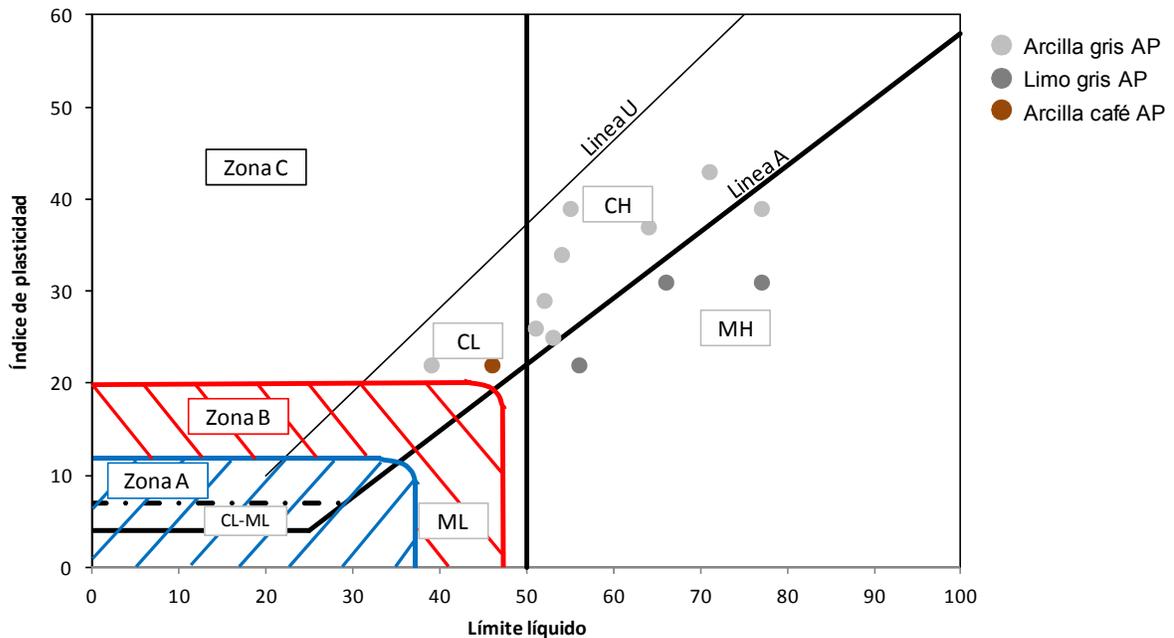


Figura 6. Análisis en carta de plasticidad modificada del material plástico del sitio del río Cuba

Como puede observarse, el sitio del río Cuba no es susceptible a que se presente el fenómeno de licuación. Sin embargo, en el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01 la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural, indica que este puente presenta daños que posiblemente son por licuación. Por lo observado de los análisis anteriores, los materiales plásticos no presentan problemas de susceptibilidad a la licuación.

Si efectivamente el fenómeno de la licuación es el que está causando los daños indicados por la Unidad de Puentes, podría deberse a los lentes de arena encontrados en las perforaciones. Esta condición no es posible verificarla aplicando el método de Idriss para determinar el potencial de licuación de estas arenas gruesas, porque no se cuenta con la información suficiente para la aplicación del método. Sería necesario ampliar el estudio de licuación, incluyendo el lente de arenas para determinar su potenciabilidad a la licuación.

#### IV.9 Sitio del río Rojo

En el sitio del río Rojo, en el estudio de suelos proporcionado, muestra que las dos perforaciones están compuestas tanto por materiales arenosos, como materiales plásticos (limos y arcillas). Estos últimos cuentan con la caracterización adecuada para de manera preliminar si podrían tener afectación en el sitio por su susceptibilidad a la licuación.



En resumen, los resultados de la caracterización de los materiales encontrados es la siguiente:

Tabla 7. Caracterización de los materiales plásticos encontrados en el sitio del río Rojo

Perforación	Profundidad (m)	Material	IP	LL
QZK 163	1 a 12.5	Limo café claro	34	71
			45	97
	12.5 a 14	Arena gruesa gris oscuro	-	-
	14 a 17	Arcilla de plasticidad media, color café claro	39	65
	12.5 a 14	Arena fina gris claro	-	-
	14 a 22.5	Limo arcilloso de alta plasticidad	35	93
QZK 164	5 a 9	Arcilla café oscuro de alta plasticidad	62	95
	9 a 12.5	Arena fina gris oscuro	-	-
	12.5 a 18	Arcilla gris oscuro	50	85
	18 a 22	Arena fina	-	-
	22 a 25	Arcilla gris oscuro de alta plasticidad	41	71

Cuando se introducen estos datos a la carta de plasticidad modificada, el resultado es el siguiente:

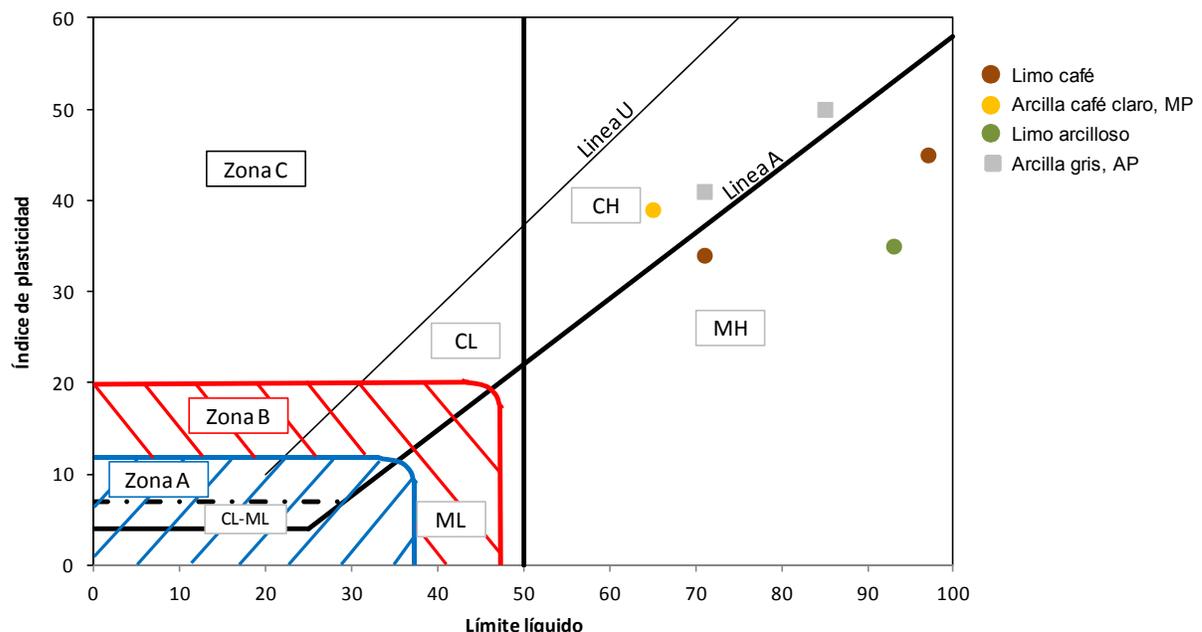


Figura 7. Análisis en carta de plasticidad modificada del material plástico del sitio del río Rojo

Como es posible apreciar, estos materiales plásticos no presentarían licuación al estar ubicados en la zona C de la carta de plasticidad modificada, aunque tuviesen las características de contenido de finos y humedad que indica el método de Idriss et al.



#### IV.11 Sitio del río Blanco

Por último, se encuentra el sitio de río Blanco que en su mayoría cuenta con materiales arenosos, los cuales son analizados por la empresa encargada de los estudios de suelos, con el método de Idriss para determinar el potencial de licuación de materiales granulares. Los resultados de estos análisis se encuentran resumidos en la Tabla 1 del presente informe.

Sin embargo, en las tres perforaciones realizadas, se detectan materiales plásticos que se deciden no analizar por su naturaleza. Sin embargo, se considera importante realizar al menos un análisis simplificado aplicando la carta de plasticidad modificada de Idriss et al, para determinar la susceptibilidad de estos materiales de manera preliminar.

Los materiales encontrados en las perforaciones, para algunos de los cuales se cuenta con información de caracterización, son:

Tabla 8. Caracterización de los materiales plásticos encontrados en el sitio del río Blanco

Perforación	Profundidad (m)	Material	IP	LL
QZK 174	0 a 7	Limo café claro de mediana plasticidad	31	70
	7 a 12	Limo café grisáceo de mediana plasticidad	23	66
	12 a 21	Arena limosa	-	-
	21 a 25	Arcilla gris verdoso	NI	NI
QZK 177	0 a 3.5	Arcilla café claro de alta plasticidad	31	56
	3.5 a 12.5	Arena limosa gris oscuro	8	34
	12.5 a 25	Arena limosa gris oscuro	-	-
QZK 176	0 a 7	Arena limosa café claro de mediana plasticidad	13 7	46 38
	7 a 12	Arena limosa gris verdoso	-	-
	12 a 25	Arena limosa gris oscuro	-	-

NI: No indicadas

Entonces se aplica el método de la carta de plasticidad modificada que cabe recordar, es necesario conocer el contenido de finos de los materiales y la humedad natural, pues estos son factores preponderantes para verificar la susceptibilidad a la licuación. Con la información proporcionada en los estudios de suelos aportados, no es posible conocer el contenido de finos pero si se cuenta con algunos datos de humedad natural.

Cuando se introducen estos datos a la carta de plasticidad modificada, el resultado es el siguiente:

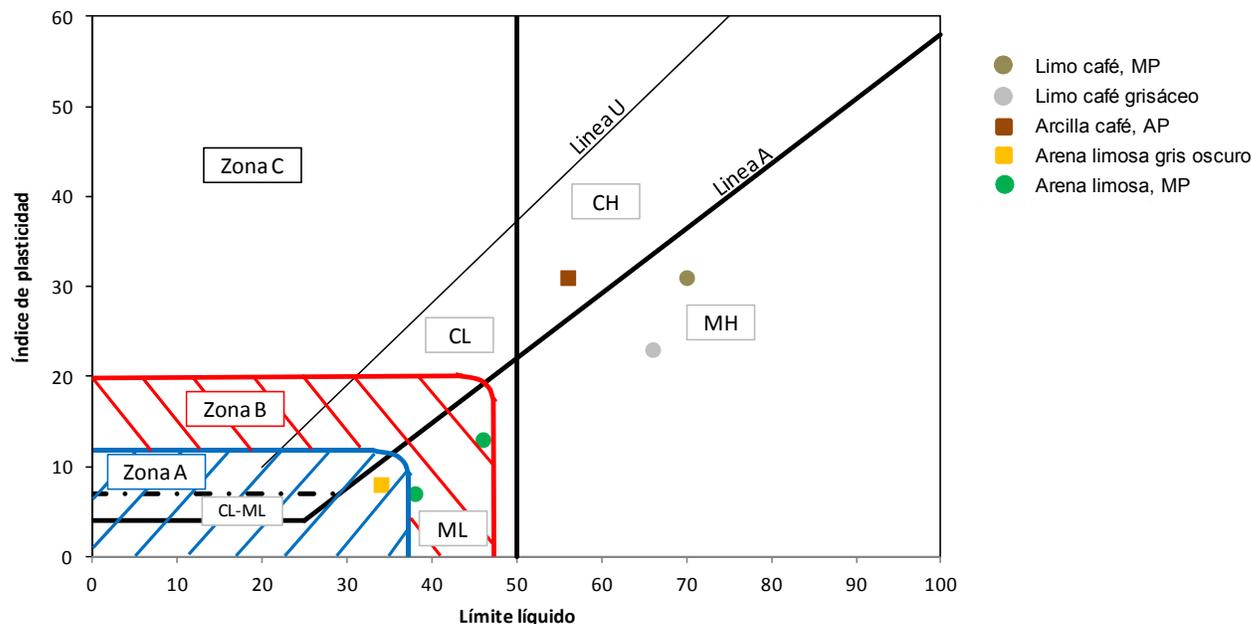


Figura 9. Análisis en carta de plasticidad modificada de la arcilla arenosa del sitio del río Blanco

Como se puede observar, el material descrito como “arcilla limosa gris oscuro”, se encuentra en la zona A “Potencialmente licuable”, y el material descrito como “arena limosa café claro de mediana plasticidad”, se encuentran en la zona B “Podrían ser licuables”. Ahora bien, para poder determinar si efectivamente estos dos materiales son potencialmente licuables, se debe analizar si su contenido de finos (CF) y su humedad natural ( $w$ ) cumplen con las características indicadas para la aplicabilidad del método.

Anteriormente, se comentó que de la información proporcionada por el estudio de suelos para este sitio, no es suficiente para determinar el contenido de finos; sin embargo, si se cuenta con las humedades naturales. Con esta información se verifica si se están cumpliendo con las premisas de la metodología para su aplicabilidad.

La arena limosa gris oscuro, tiene una humedad natural promedio de 32%. Para determinar la aplicabilidad del método, la humedad natural debe ser mayor al 80% del límite líquido, es decir mayor que 27.2%. En este caso, se observa que la condición se cumple, por lo que el suelo podría ser “potencialmente licuable”, solo habría que verificar las condiciones de contenidos de finos. Sin embargo, este material se analizó por la empresa encargada de los estudios de suelos, con el método modificado de Idriss para suelos granulares, dando como resultado un suelo que presenta licuación.

En cuanto a la arena limosa café claro de mediana plasticidad, específicamente estos dos puntos cuentan con una humedad natural promedio de 29.5%. Para determinar la aplicabilidad del método, la humedad natural debe ser mayor o igual al 85% del límite líquido, es decir mayor que 35.7%. En este caso se observa que no se cumple la premisa pues la humedad natural es menor al valor límite, por lo tanto este suelo no presenta la característica de “licuable”. Cabe destacar que este material se encuentra en la perforación QZK 176, en la profundidad de 0 a 7 m, y aunque no es licuable, el suelo que la subyace si lo es (ver Tabla 1), por lo que igualmente este material no se debe tomar en cuenta para los cálculos de capacidad de soporte del puente en este punto.



Dados los resultados, se considera que los estudios de suelos toman en cuenta el efecto de licuación. Sin embargo, se recomienda profundizar el estudio de licuación a los materiales de la perforación QZK 174, de la profundidad 21.5 a 25, que se trata de un material plástico cuyos valores de plasticidad no se encontraron en el informe; y en la perforación QZK 176, de la profundidad 17.5 a 25, que se trata de la misma arena limosa gris oscuro que en el tramo 12.5 a 17.5, la cual presenta susceptibilidad a la licuación, según el informe presentado por la empresa encargada de los estudios de suelos.

## V. Comentarios referentes a los daños encontrados en el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01.

En el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01, se muestran los daños encontrados por el personal de la Unidad de Puentes, en las estructuras que se encuentran en los suelos potencialmente licuables indicados en el Código de Cimentaciones de Costa Rica (2009), indicando que el daño es debido a la presencia del fenómeno en el sitio.

Se tiene conocimiento que muchos de los suelos de la zona de Limón, presentaron licuación durante el terremoto de 1991. Después de ahí, no se tiene conocimiento de si en la zona se ha vuelto a presentar licuación dada la presencia de un sismo. Si los daños que se muestran en el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01, corresponden a daños que datan desde 1991, si se puede concluir que son por la presencia del efecto de licuación de los suelos. Si los daños se han presentado posterior a esta fecha, difícilmente se pueda concluir que se trata por la presencia de licuación en la zona, ya que no se ha tenido la certeza de que el fenómeno se haya presentado nuevamente por la ocurrencia de un sismo.

Cabe recordar que para que se presente licuación en un material, este debe ser sometido a una fuerza repentina y rápida, que no permite que el agua que se encuentra naturalmente en el terreno drene, y por lo tanto por el aumento de la presión de poros, el esfuerzo efectivo en los suelos se vuelve nulo por lo que el suelo presenta un comportamiento de fluido. Si no existe una fuerza tal que desarrolle este fenómeno, con dichas condiciones, a pesar de que los suelos sean potencialmente licuables, no se presentará la licuación.

## VI. Comentarios finales

Se realiza una segunda revisión de los estudios de suelos de la empresa contratada por la Administración para estudiar los materiales sobre los cuales están cimentados 33 puentes en la Ruta Nacional N°32, tomando en cuenta la información suministrada por la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural. Al respecto se indica lo siguiente:

1. De los 14 puentes detectados en el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01 sobre suelos potencialmente licuables, 6 no cuentan con un análisis de licuación de ningún tipo, indicando que la razón de ello es que los materiales encontrados en los sitios, no corresponden a suelos granulares, específicamente materiales arenosos. Estos sitios son los de los puentes Paso Superior sobre Ferrocarril, río Reventazón, río Pacuare, río Pacuarito, río Barbilla y río Cuba.
2. De estos 6 sitios que no cuentan con un análisis de licuación, fue posible realizar en el presente informe un análisis adicional para 2 de los sitios: río Pacuarito y río Cuba. Este análisis adicional se realizó a los materiales plásticos, aplicando el método de la carta de plasticidad modificada por Idriss et al en el 2003, dejando de lado la premisa del



cumplimiento del contenido de finos, pues no se cuenta con estos datos en los informes de los estudios de suelos aportados). Para ambos casos, los materiales plásticos no clasifican en las zonas A y B de potencialmente licuables, por lo que no se consideran licuables. Sin embargo, en el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01, la Unidad de Puentes indica que en el río Cuba se presentan daños por la presencia de licuación. Para este caso, se encontró un lente de arenas en las cuatro perforaciones realizadas para el estudio de suelos, sin embargo este no fue analizado como susceptible a la licuación. Por tal motivo, se recomienda solicitar ampliar el análisis de licuación este material para descartar daños por licuación en el puente.

3. A los 4 sitios restantes (Paso Superior sobre Ferrocarril, río Reventazón, río Pacuare, y río Barbilla) no se les realizó análisis adicional, pues no se cuenta con una caracterización de la matriz del aluvión encontrado, ya que la exploración se realizó con perforaciones a rotación y por su naturaleza, no es posible tomar muestras para caracterizar. Sin embargo, en el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01, no se cuantifican daños en estos puentes, por lo que se puede pensar que los sitios no han sido susceptibles a la licuación.
4. De los 8 puentes que cuentan con un análisis de licuación, se observa que este estudio se realizó únicamente a los espesores de materiales arenosos encontrados en los sitios. No se tomaron en cuenta algunos materiales plásticos, cuyo comportamiento se ha encontrado en los últimos años puede generar problemas importantes de licuación. Por lo tanto, en el presente informe se realizó un análisis adicional, de los sitios con los que se contaba información para trabajar. El análisis se realizó según lo indicado en el punto 2.
5. Para los sitios del río San Miguel, del río Escondido y del río Rojo, se realizó el análisis con la carta de plasticidad modificada. En el caso de los sitios de río Escondido y río Rojo, los materiales plásticos no presentan susceptibilidad a la licuación; y en el caso del río San Miguel, los materiales plásticos si podrían presentar problemas de susceptibilidad de licuación al revisar el porcentaje de contenido de finos del material, sin embargo, los espesores de estos materiales fueron incluidos en el análisis de licuación de la empresa. Por lo tanto, con los análisis de licuación realizados por la empresa de los estudio de suelos, es suficiente.
6. Para el sitio del río Aguas Claras, no es necesario hacer un análisis adicional de licuación, pues en las perforaciones realizadas, se encuentran únicamente materiales granulares arenosos, por lo que el análisis de licuación realizado por la empresa es suficiente.
7. Para el sitio del río Chirripó, no se contó con la información suficiente para realizar el análisis adicional con la carta de plasticidad modificada, pues no se aportaron valores del límite líquido, necesarios como datos de ingreso para este método. En este caso, se recomienda solicitar dichos datos para hacer el análisis adicional. Lo mismo sucede para el sitio del río Toro, a pesar que se pudo analizar un material que se encontraba caracterizado y este no presenta posibilidades de susceptibilidad a la licuación, se recomienda ampliar el análisis a los materiales que no se encontraban caracterizados que también son materiales plásticos.
8. Para el sitio de quebrada Calderón, se obtiene como resultado que dos materiales se clasifican en la zona A y B de susceptibilidad a la licuación. Sin embargo, no se puede afirmar completamente su susceptibilidad, pues no se cuenta con el contenido de finos para verificar la premisa de aplicabilidad del método. Por lo tanto, se recomienda ampliar el análisis verificando el contenido de finos del material de la perforación QZK 134 en la profundidad de 11 a 13.5 m, y del material de la perforación QZK 135 en la profundidad de



21 a 30 m, para ello se deben solicitar dichos datos o la información con la que se pueda obtener el contenido de finos de los materiales en estudio.

9. Finalmente, para el sitio del río Blanco, se realizó el análisis de los materiales con propiedades plásticas, cuyos resultados indican que dos materiales podrían ser susceptibles a la licuación. Uno de ellos, la arena limosa gris oscuro (tramo de 3.5 a 12.5 m), es analizada por la empresa responsable del estudio de suelos, en su investigación de susceptibilidad a la licuación del sitio al aplicar el método de Idriss dando como resultado un suelo licuable. El otro material (arena limosa café claro de mediana plasticidad) no cumple con la premisa de la humedad natural, por lo que no se puede afirmar que es licuable. Con esto, se podría pensar que el estudio de suelos realizado por la empresa responsable es suficiente. Sin embargo, se considera pertinente solicitar la caracterización de la arcilla gris verdosa encontrada en la perforación QZK 174 para verificar su condición de susceptibilidad a la licuación; así como solicitar a la empresa que incluya en el análisis de licuación de la perforación QZK 176 el material que se encuentra en el tramo de 17.5 a 25 m de profundidad, pues es similar al material que se encuentra en el tramo de 12.5 a 17.5 que si es licuable.
10. En todos los casos de los estudios de suelos revisados, se proporciona una recomendación de nivel de desplante de la cimentación, tomando en cuenta incluso si el suelo cuenta con susceptibilidad a la licuación.
11. En cuanto a la rehabilitación de las cimentaciones existentes, no se hace ninguna indicación en los estudios de suelos. Esto generalmente es estudiado por un Ingeniero Estructural que analiza la interacción suelo-estructura, con ayuda de la información dada en un estudio de suelos que incluya el análisis de licuación.

Se revisan los daños mostrados en el informe LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01, y se concluye que no es posible determinar si los daños son producto de la licuación o que se esté presentado otro fenómeno, a menos que se trate de daños provocados en el terremoto de 1991. Esto porque no se tiene el conocimiento de si con otro sismo que se haya presentado en Costa Rica posterior al del año 1991, haya desencadenado licuación en la zona.

Cabe aclarar, que con los estudios de potenciabilidad de licuación, un aspecto importante que se deriva es la profundidad de desplante de la cimentación, que generalmente se trata de un sistema de pilotes. Sin embargo, para el diseño de la estructura del pilote, se debe tomar en cuenta el peso del material que puede “colgarse” del pilote al presentarse el fenómeno de licuación. Este es un aspecto que debe tomar en cuenta el Ingeniero Estructural que diseña el pilote como estructura.



## VII. Referencias

1. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente Paso Ferrocarril*. San José.
2. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río Reventazón*. San José.
3. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río Pacuare*. San José.
4. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río Pacuarito*. San José.
5. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río Barbilla*. San José.
6. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre quebrada Calderón*. San José.
7. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río Aguas Claras*. San José.
8. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río San Miguel*. San José.
9. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río Chirripó*. San José.
10. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río Escondido*. San José.
11. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río Cuba*. San José.
12. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río Rojo*. San José.
13. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río Toro*. San José.
14. IMNSA Ingenieros Consultores S.A (2016). *Informe Geológico-Geotécnico de Puente sobre río Blanco*. San José.
15. Vargas-Alas et al (2018). *Resumen de daños con indicios de licuefacción de suelos en los puentes de la ruta nacional no. 32 (tramo cruce de río Frío-Limón)*. LM-PIE-UP-PF06-2018\_R01. Unidad de Puentes, Programa de Ingeniería Estructural, LanammeUCR.