

COMPORTAMIENTO DEL SUELO TROPICAL PERUANO

BEHAVIOR OF PERUVIAN TROPICAL SOILS

Arnaldo Carrillo Gil¹

PRESENTACIÓN: MAYO 2016

ACEPTACIÓN: JULIO 2016

RESUMEN

En este trabajo, se comentan numerosas experiencias de laboratorio y campo referidas a las características de origen genético y a las tendencias en el comportamiento de los suelos saprolíticos. Estos cuentan con una presencia importante en las diferentes cuencas hidrográficas de la planicie amazónica peruana, donde el contenido de humedad natural es significativamente mayor que el óptimo contenido de humedad de compactación. Por otro lado, se encontró una serie de relaciones válidas entre la plasticidad de las arcillas, su origen, la roca madre, la máxima densidad seca y otras características geotécnicas que pueden ser identificadas, en cada caso, para establecer relaciones humedad-densidad. Ello permitirá una adecuada evaluación de los suelos saprolíticos compactados, con el fin de construir terraplenes de carretera y aeropistas en la zona tropical del territorio peruano.

Palabras clave: suelos tropicales, compactación, suelos no-saturados.

ABSTRACT

In this paper, numerous laboratory and field experiences are commented with regard to characteristics of genetic origin and behavior tendencies of saprolitic soils which have an important presence in the different basins of the Peruvian Amazon plain. There, the natural water content is significantly higher than the optimum moisture content of compaction. On the other hand, valid relationships among clay plasticity, its origin and the parent rock, the maximum dry density and other geotechnical characteristics, which can be identified in each case, were found in order to establish compaction humidity-density relationships for saprolitic soils. That will allow a suitable evaluation of compacted tropical soils for highways embankments and runways which are built in the Peruvian tropical area.

Keywords: tropical soils, compaction, unsaturated soils.

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú <acingenieros@speedy.com.pe>

1. INTRODUCCIÓN

La infraestructura para carreteras y aeropuertos que se construyen en el trópico húmedo peruano presenta graves problemas geotécnicos, debido a que los mecanismos que controlan el comportamiento de estos suelos son más complejos que aquellos que operan en los suelos transportados. En general, casi todos los problemas geotécnicos en un suelo saprolítico ocurren en la zona del suelo que no está saturada. En ella, la resistencia al corte está íntimamente ligada a la presión de succión. Numerosas experiencias, tanto en campo como en el laboratorio, nos conducen a abordar el tema del comportamiento de los suelos tropicales peruanos con respecto a sus condiciones de densificación y a evaluar las características de humedad que influyen en los resultados de los ensayos de compactación, proceso artificial de densificación del suelo que permite utilizarlo como material de construcción.

La meteorización climática, la composición química y sus estructuras morfológicas, todas influenciadas por las estructuras heredadas de la roca madre, determinan las características del suelo superficial encontrado en cada cuenca de las regiones tropicales estudiadas.

Si se toman en cuenta todas estas consideraciones, encontramos que en el trópico peruano no existe un único tipo de roca predominante que pueda dar origen a los suelos residuales investigados, sino que se derivan de más de uno. Así, en algún lugar de la selva central y norte, se hallan hasta cinco grupos diferentes de rocas que han originado los suelos subyacentes. En algunos casos, se superponen entre sí, lo cual dificulta la identificación de los suelos resultantes (figura 1).

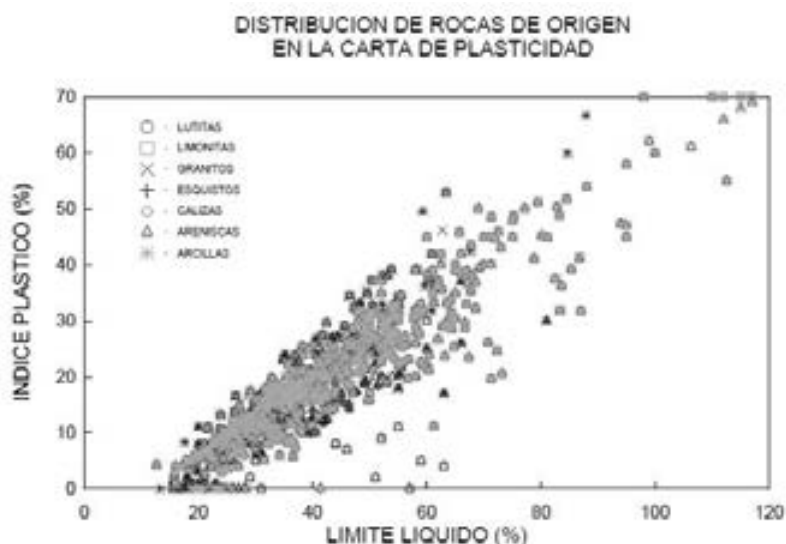


Fig. 1. Límites de consistencia y roca de origen en los suelos tropicales peruanos.

2. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Uno de los aspectos importantes para la caracterización geotécnica de los suelos tropicales es establecer sus propiedades al considerar la variación con respecto a la profundidad. El contenido de humedad natural del suelo regula las condiciones de resistencia y deformación. Su variabilidad indica que, desde la superficie hasta los 3 m de profundidad, aparecen valores prácticamente secos hasta algunos superio-

res al 100%. Sin embargo, se encontró un valor promedio entre 20% y 30% para la humedad natural manteniendo la relación hasta los 40 m de profundidad (figura 2).

Con respecto al peso unitario natural, se han obtenido resultados, tanto en laboratorio como en el campo de valores, que son muy uniformes con respecto a la profundidad. De esta manera, se determinó que estos varían en un rango de 1.50 ton/m³ a 2.20 ton/m³, con un promedio de 1.85 ton/m³ hasta los 50 m de profundidad. Si bien en los estratos superficiales se observa alguna dispersión en los ensayos, la gran mayoría de los mismos se puede considerar comprendida entre el rango señalado respecto a la profundidad (figura 3).

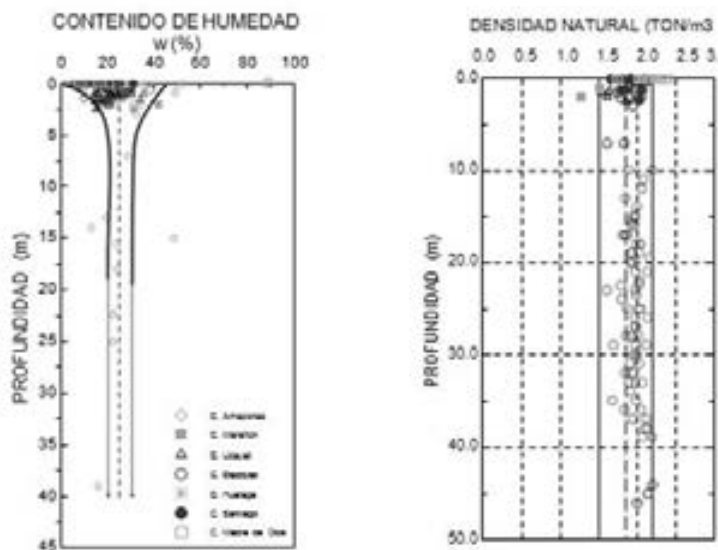


Fig. 2. Gráfico de relación entre contenido de humedad y profundidad.

Fig. 3. Gráfico de relación de la densidad natural con la profundidad.

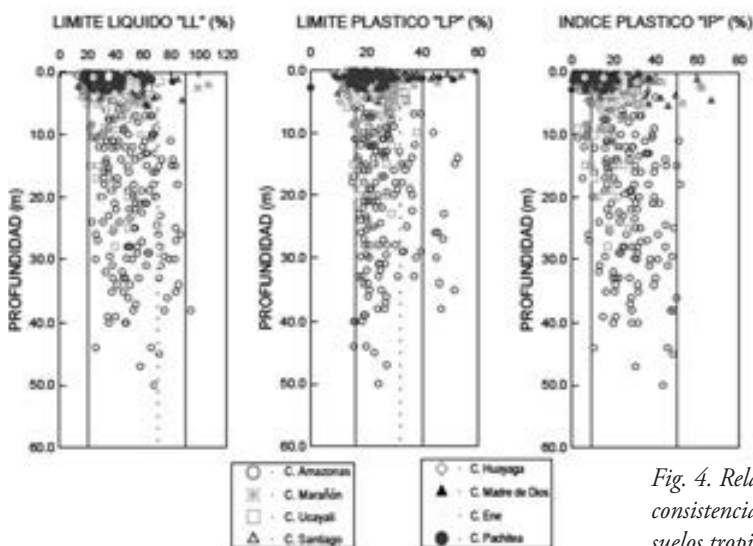


Fig. 4. Relación entre los límites de consistencia y la profundidad de los suelos tropicales en el Perú.

Los límites de consistencia varían con la profundidad. Así, para el límite líquido, corresponden valores comprendidos entre 20% y 70% a 90%. En el caso del límite plástico, se consideran entre 16% y 32% a 40%. Para los índices de plasticidad, se encuentran valores comprendidos entre 9% y 50%, en todos los casos, hasta la profundidad de 50 metros (figura 4).

En la carta de plasticidad de los suelos tropicales peruanos, podemos definir dos líneas paralelas a la «A», las cuales representan el rango de valores máximos y mínimos de plasticidad para los suelos tropicales peruanos. Estas difieren de las registradas en otros países (figura 5).

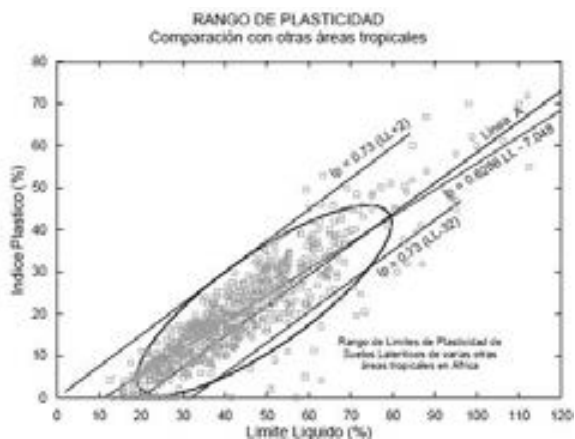


Fig. 5. Gráfico del rango de plasticidad en relación con otros países.

3. COMPACTACIÓN SEGÚN EL ORIGEN GENÉTICO

Para revisar el comportamiento del suelo tropical en el proceso de compactación, es necesario considerar dos aspectos fundamentales: el origen genético, que tiene que ver con su proceso de formación, y las relaciones humedad-densidad del laboratorio y el campo. Los factores genéticos más importantes suelen ser la naturaleza del suelo y las características de los diferentes tamaños de partículas, así como su composición mineralógica. Si bien la mayoría de los materiales geotécnicos tropicales presentan diferentes propiedades que varían según el tipo de suelo, es muy difícil que, conociendo dicha naturaleza, se puedan establecer valores de máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad que sean perfectamente confiables, dado que existen muchas variables que influyen en la compactación.

Del análisis comparativo de todas las curvas de compactación estudiadas, se determinan, en general, las tendencias de las muestras procedentes de la selva alta al ubicarse en la parte superior izquierda del gráfico. Ello indica una densidad seca más alta que en otras zonas tropicales del país que presentan valores que varían entre los 1.85 gr/cm³ y 2.25 gr/cm³. También, ostentan contenidos de humedad óptimos y relativamente bajos, pues varían entre el 5% y el 14%, por ser suelos residuales provenientes de las rocas duras como basaltos y granitos. Las curvas que representan las muestras extraídas de la selva baja se ubican en la zona inferior derecha de la figura 6 y son materiales geotécnicos que, debido a que provienen de rocas blandas como limonitas, lutitas y areniscas, exhiben densidades menores (variables entre 1.50 y 1.85 gr/cm³) y contenidos de humedad óptimos más altos, de manera que logran la compactación máxima (9% y 21% aproximadamente).

4. RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD

De los ensayos de compactación efectuados en un número significativo de muestras obtenidas de las diferentes regiones y cuencas de la selva peruana, se han determinado condiciones de comportamiento con respecto a la relación humedad-densidad del laboratorio, y las pruebas y observaciones efectuadas

en el campo durante la ejecución de obras de carreteras y aeropistas en la zona tropical del país.

El grupo de las saprolitas que deriva de rocas graníticas presenta también valores bajos de contenido óptimo de humedad: aproximadamente de 7% a 11%, y valores de densidad seca relativamente altos, entre 1.8 y 2 gr/cm³. El grupo de las saprolitas que deriva de gneiss tiene mayores valores (entre 14% y 20%). El que deriva de basaltos corresponde a valores de contenido de humedad entre 28% y 41% con densidades secas menores a los 1.5 gr/cm³.

Si se considera la ubicación de los puntos que representan las muestras peruanas en la figura 6, se puede ver que la mayor concentración de puntos corresponde a las saprolitas derivadas de granitos y gneiss. Esto concuerda con lo hallado en nuestras investigaciones, en las que se evidenció que los suelos que derivan de rocas graníticas se ubican en la zona de los andes orientales, así como en la sierra central.

En el comportamiento a la densificación del suelo saprolítico influyen la plasticidad y el óptimo contenido de humedad que intervienen en la trabajabilidad del suelo durante el proceso de compactación. De investigaciones efectuadas en diferentes zonas tropicales y por experiencias ocurridas en el Perú, se establece que, a pesar del contenido de humedad significativamente mayor al óptimo, los suelos saprolíticos blandos son más fáciles de trabajar y compactar que las llamadas arcillas rojas maduras. Además, según estudios realizados por diferentes autores y nuestra propia experiencia, se llega a determinar que muchas veces, en campo, es más fácil compactar estos suelos con un contenido natural de humedad mucho mayor que el óptimo (figura 7).

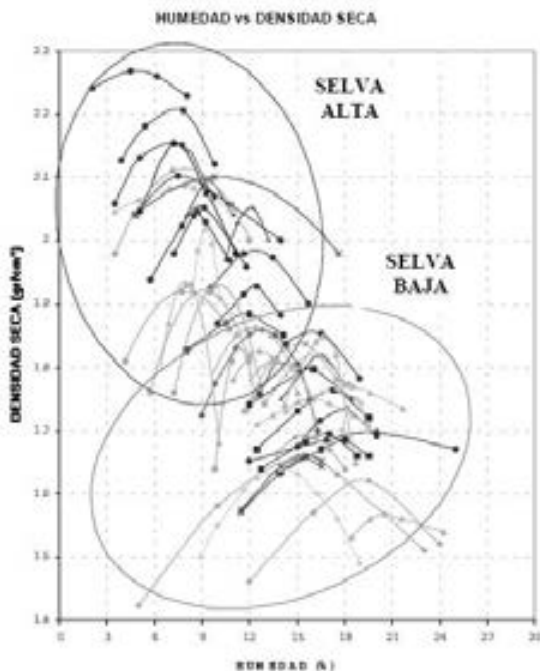


Fig. 6. Relaciones humedad-densidad para las muestras típicas estudiadas.



Fig. 7. Condiciones de compactación del suelo tropical en el campo.

5. CONDICIÓN DE HUMEDAD NATURAL DEL SUELO TROPICAL

En la figura 8, se presenta, con mucha claridad, la relación entre el contenido de humedad natural y el óptimo contenido de humedad de compactación para muestras de saprolitas que han sido diferenciadas por la cuenca a la que pertenecen. Si se efectúa un análisis de acuerdo a la posición de los suelos dentro de la figura indicada, se puede observar que, para algunas regiones, se necesitará un incremento de, más o menos, un 15% en el contenido de humedad de laboratorio. Algo parecido sucede con las

muestras de la zona noroccidental de la selva, donde el incremento llega al orden del 10%. Para los suelos tropicales de la selva central, la situación es más compleja, porque no hay una tendencia uniforme. Todo dependerá de la ubicación exacta de las muestras dentro de toda la cuenca. Algunas de las que pertenecen a la selva suroriental presentan valores de contenido de humedad que muchas veces son cercanos al óptimo y, en otras mayores, se aproximan a una cantidad

entre 5% y 10%. Los casos más críticos se presentan en la cuenca del río Amazonas y en otros suelos de la cuenca de la selva central del Perú. Esto se debe a que se determina una posición que indica que el suelo se encuentra en estado natural muy húmedo (puede alcanzar hasta 20% a 30% de humedad natural), por lo que es muy difícil compactarlo en campo, ya que, generalmente, sus valores de humedad óptima se ubican debajo del contenido de agua natural. Esos valores implicarán problemas relacionados con los procesos constructivos que se adoptan tradicionalmente en campo para estos tipos de suelos encontrados en la construcción de carreteras y aeropistas en la sierra y costa del Perú.

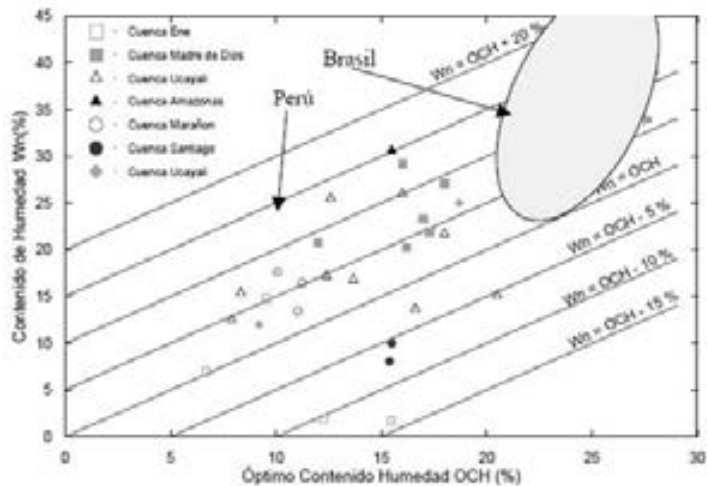


Fig. 8. Relación entre el contenido de humedad natural y el óptimo contenido de humedad de laboratorio para los suelos tropicales peruanos.

6. RELACIÓN ENTRE COMPACTACIÓN, PLASTICIDAD Y TIPO DE SUELO TROPICAL

Se establece en el campo como una de las premisas principales para una adecuada compactación, que el contenido de agua natural del suelo sea menor que el límite plástico. En este rango es que se encuentra el óptimo contenido de humedad. Sin embargo, este valor convencional, determinado en el laboratorio como referencia de control para propósitos de ingeniería que concierne a la eficacia en la compactación de las saprolitas, es deficiente, debido a la heterogeneidad extrema con la que se presentan estos suelos.

Complementariamente, después de muchas investigaciones, encontramos que los suelos saprolíticos de la planicie amazónica presentaron un mejor comportamiento con respecto a sus características de compactación, trabajabilidad, resistencia y compresibilidad cuando fueron compactados con contenidos de humedad mucho mayores que los valores obtenidos en el ensayo Proctor de laboratorio.

Por otro lado, se establece que, para el tipo de suelos tropicales saprolíticos de la selva baja, el óptimo contenido de humedad se ubica frecuentemente por debajo del límite plástico y, a pesar de la aparente dispersión en la ubicación de los suelos probados, puede observarse que esta tendencia se incrementa cuando el índice plástico crece.

En la figura 9, se han representado los valores de máxima densidad seca para los suelos tropicales peruanos, lo cual diferencia su procedencia por cuencas. Además, en la parte inferior de la figura se muestran los diferentes tipos de rocas que, de manera general, han originado estos suelos residuales.

Este gráfico ratifica las apreciaciones encontradas anteriormente para cada cuenca, no solo con respecto a la roca madre, sino, también, de acuerdo con la distribución de materiales geológicos encontrados en la selva peruana. Asimismo, se aprecia concordancia con nuestras investigaciones, ya que la mayoría de suelos se ubican en la zona de roca madre señalada como granitos, gneises, limonitas y areniscas. Así, se presenta una mayor concentración incluso para los suelos que proceden de areniscas y granitos, que son los que efectivamente se encuentran en mayores cantidades en la selva peruana.

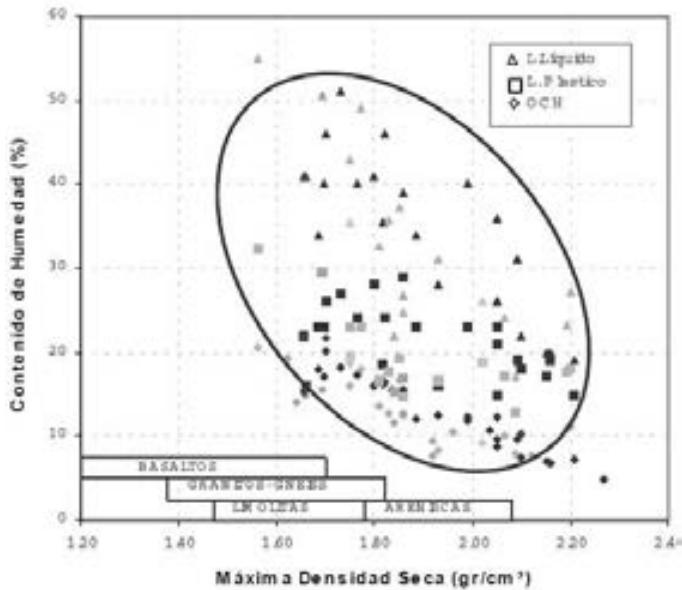


Fig. 9. Relación entre el contenido de humedad y la máxima densidad seca para los suelos tropicales.

7. COMPORTAMIENTO EN CAMPO DE LOS SUELOS SAPROLÍTICOS COMPACTADOS

El contenido de humedad con la máxima densidad seca, correlacionado con los contenidos de humedad correspondientes a los límites de consistencia, la humedad natural y la óptima humedad de compactación, nos permite establecer que los suelos tropicales peruanos presentan, en su mayoría, humedades naturales por encima del óptimo contenido de laboratorio y por debajo del límite plástico. Ello sucede, sobre todo, en la planicie amazónica. Por ello, los resultados de laboratorio normalmente requieren de golpes de martillo para su compactación en los moldes, que destruyen la estructura del suelo tropical y activan sus propiedades plásticas. Además, el secado en el laboratorio se hace normalmente en estufa o al aire, lo que no es posible en el campo, sobre todo en las zonas donde la lluvia intensa es diaria y no permite el desecado natural. Por lo tanto, los parámetros para una compactación eficaz del suelo saprolítico deben tomarse en el campo. Esto se debe a que, por medio de ensayos «in situ» o de procedimientos no destructivos que eviten tomar valores para diseño válidos, no errados ni fuera de la realidad prevaeciente en el sitio, en muchos casos, será necesario emplear valores de humedad mayores o menores que el óptimo obtenido en el laboratorio. Ello evita diseñar proyectos bajo condiciones totalmente adversas al verdadero comportamiento de los suelos tropicales peruanos.

Desde el punto de vista práctico, pueden utilizarse los resultados mostrados en la figura 10, que presenta las condiciones de comportamiento en el campo con respecto a la compactación de los suelos tropicales peruanos investigados. Estos evidencian la variación del límite líquido y el límite plástico que, en ambos casos, forman curvas que, al incrementar el contenido de humedad, disminuyen la máxima densidad seca del suelo compactado. A su vez, cuando ocurre lo contrario con respecto a la disminución del contenido de humedad de compactación, la máxima densidad seca crece hasta valores significativamente mayores. Por otro lado, se establece un rango de variación de promedio del contenido de humedad natural para las saprolitas arcillosas de la selva baja que se sitúa por debajo de la curva representativa de la variación del límite plástico y por encima del óptimo contenido de humedad de compactación de los suelos tropicales. Estas correlaciones con respecto al porcentaje de humedad se deben considerar en los suelos arcillosos del trópico húmedo peruano cuando es necesario aplicarles un proceso de compactación que permita lograr densidades aceptables en el campo para hallar la diferencia del contenido de humedad necesario, con el fin de alcanzar una determinada densidad máxima de compactación.

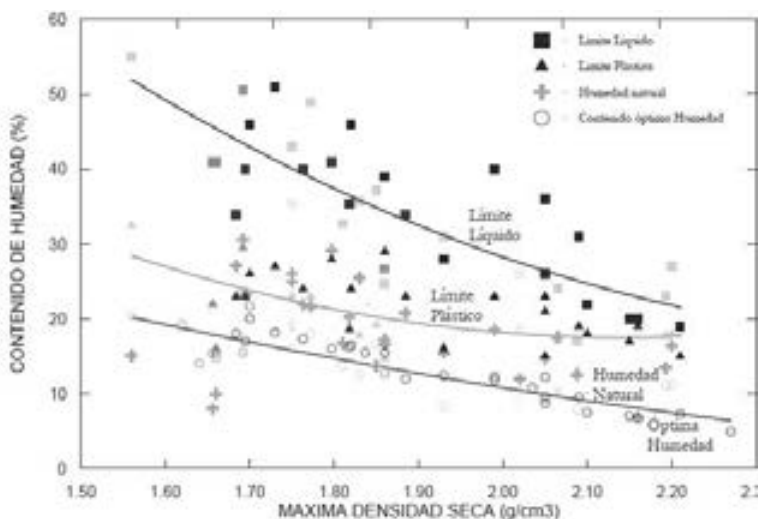


Fig. 10. Correlaciones entre el contenido de humedad natural, los límites de consistencia y el óptimo contenido de humedad de compactación de laboratorio para los suelos tropicales peruanos.

8. CONSIDERACIONES FINALES

Los estudios mencionados en este artículo proporcionan una visión global del comportamiento geotécnico de los suelos típicos de la selva peruana. Además, exponen algunas de las condiciones y parámetros que permiten lograr procesos de campo que son difíciles de ejecutar debido al tipo de suelo, clima prevalente en el sitio y al contenido de humedad natural elevado que presentan los materiales geotécnicos especiales. Este es un problema que, a menudo, se presenta en la compactación de obras de ingeniería que se construyen en esta región del Perú. Con los resultados de esta investigación, se puede obtener cierto rango de aumento o disminución del contenido de humedad óptimo en el laboratorio para emplearlo en el campo y lograr una compactación eficaz de los suelos tropicales. Por medio de terraplenes de prueba, se puede llegar a procedimientos válidos de construcción que no estén equivocados y se encuentren fuera de la realidad prevaleciente en el lugar (Carrillo, 2014).

Finalmente, los avances actuales que se han logrado en la investigación del suelo tropical peruano indican que los resultados de las curvas de succión (Carrillo, 2013) muestran que estos suelos no saturados pueden agruparse en amplios rangos de tendencia similar como arcillas (A), arcillas limosas (B) y arenas (C). Se procura, de esta manera, una visión global de características geotécnicas que permitan dar un tratamiento real en los aspectos de resistencia y deformabilidad del suelo saprolítico que son aplicados en grandes proyectos de ingeniería y se desarrollan con éxito en la selva baja del Perú (Carrillo, 2015).

9. REFERENCIAS

- [1] Carrillo, A. G. (1978). Características de los suelos tropicales del Perú. *Revista Latinoamericana de Geotecnia*. Vol. IV(4), 207-216.
- [2] Carrillo, A., Carrillo, E., y Robalino. (1994). Caracterización de los suelos tropicales del Perú. Comunicación presentada en el *X Congreso Nacional de Ingeniería Civil*. Lima: s. e.
- [3] Carrillo, A., Carrillo, E., y Cárdenas, J. (1995). Properties of the peruvian tropical soils. Comunicación presentada en el *X Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Guadalajara: s. e.
- [4] Carrillo, A. (1997). Peculiarities of tropical saprolitic soils on Peru. Comunicación presentada en *XIV Int. Conference on Soil Mech. And Foundation Eng.* Hamburgo: s. e.
- [5] Carrillo A. (1998). Monitoring and performance of instrumentation in landslides control. Comunicación presentada en *Second International Conference on Environmental Management*. Australia: University of Wollongong.
- [6] Carrillo, A. y Carrillo Acevedo, A. (1999). Slope stabilization in residual soils of Peru. Comunicación presentada en *International Symposium on Slope Stability Engineering, IS-Shikoku 99*. Matsuyama/Shikoku: s. e.
- [7] Carrillo, A., Carrillo Acevedo, A. (2001). *Pavimentos en la planicie amazónica del Perú*. Barcelona: s. e.
- [8] Carrillo, A. (2013). Evaluation curves for tropical peruvian soils. Comunicación presentada en *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. París: s. e.
- [9] Carrillo, A. (2014). *Geotecnia de los suelos no saturados peruanos* (en progreso). Lima: Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma.
- [10] Carrillo, A. (2015). Características de los suelos no saturados del trópico húmedo peruano. Comunicación presentada en *XV Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Buenos Aires: s. e.