

Capítulo 16

INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE INSUMOS AGRÍCOLAS EN LAS PROPIEDADES Y EL COMPORTAMIENTO DE LOS SUELOS TROPICALES NO SATURADOS

Andrea Cardona Pérez
José Camapum de Carvalho

Dedicatoria: La autora y el autor dedican este capítulo al profesor Luis Fernando Martins Ribeiro por su dedicación a la enseñanza, por sus investigaciones dirigidas al área ambiental y el desarrollo sostenible y por su fuerza y determinación, ejemplos para continuar este camino.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de fertilizantes se ha visto potencializada no solo en Brasil si no en todo el mundo, debido a diversos factores entre los que se encuentra el aumento en la demanda de alimentos, la escasez de determinados nutrientes y la necesidad de ajustar el potencial hidrógeno (pH) del suelo. Sin embargo, el uso de estos insumos agrícolas y, de modo más significativo, su uso desequilibrado y/o en exceso, así como la substitución de la flora, terminan propiciando la contaminación del suelo y el rompimiento de la cadena de microfauna (hongos, bacterias, gusanos etc.) alterando la fertilidad del mismo e induciendo al uso de una mayor cantidad de fertilizantes con el tiempo (Kist *et al.*, 2011). Por otro lado, la práctica de monocultivos, la compactación del suelo debido a los ciclos de humedecimiento y secado (Momoli *et al.* 2017), las erosiones superficiales y la contaminación con lixiviados, empeoran el problema haciendo con que el suelo sea menos apropiado para la práctica de la agricultura y requiera más intervenciones de orden químico. Este párrafo introductorio señala algunas de las actividades que pueden influenciar en las propiedades y comportamiento de los suelos no saturados debido, entre otros, al potencial que tienen para intervenir en las succiones mátrica y osmótica.

Si bien, el impacto de la fertilización excesiva sobre la agricultura y el medio ambiente han sido estudiados con mayor detenimiento desde sus áreas respectivas, la influencia de estos agentes químicos en el comportamiento mecánico del suelo y sus efectos sobre la estabilidad de los taludes, a conocimiento de los autores, han sido poco analizados. Específicamente, investigaciones enfocadas en los efectos de los fertilizantes sobre el comportamiento de los suelos tropicales no saturados, abundantes en varios países como Brasil, vienen desarrollándose esporádicamente. En un estudio presentado por Chahal *et al.* (2011), se muestra la contribución de la cal al mejoramiento de parámetros físicos y mecánicos, destacándose que en la práctica de la agricultura son utilizados los calcáreos como reguladores de la acidez. Por otro lado, en los trabajos de Ezeokonkwo (2011) y Jiang-tao & Bin (2007) los fertilizantes como el NPK (Nitrógeno, Fósforo y Potasio) mostraron una disminución en los valores de los límites de Atterberg y estabilidad, además de un incremento en la porosidad del suelo. Adicionalmente, fue observado que la acción de esos compuestos en el suelo depende de la naturaleza del mismo, de su composición químico-mineralógica, estructura, presencia de agregaciones, así como del propio porcentaje de insumo utilizado.

Dada la creciente implementación de fertilizantes en zonas tropicales y la poca información disponible sobre sus efectos en el suelo desde el punto de vista geotécnico, fue desarrollado el presente estudio considerando el efecto acumulador que puede ocurrir *in situ* debido al uso frecuente de los insumos agrícolas, por ello se utilizó un porcentaje de 10% del producto químico en relación a la masa húmeda del suelo en condición de campo. Aunque otros fertilizantes hayan sido utilizados en el estudio, en este capítulo sólo serán analizados el Calcáreo Dolomítico, agente usado como regulador de acidez, la Urea, empleado ampliamente para proporcionar nitrógeno al suelo, y el SUC, siendo este último un compuesto preparado a partir de la unión en partes iguales de los insumos Super Simples, Urea y Cloruro de Potasio, combinación que representaría al tan ampliamente utilizado fertilizante NPK, el cual proporciona al suelo nitrógeno, fósforo y potasio.

Este capítulo muestra que dependiendo del tipo de suelo (nivel de intemperización, composición mineralógica, etc.) ocurrirán como consecuencia del uso de insumos agrícolas, cambios en las propiedades físicas, en las curvas características de retención de agua y en el comportamiento mecánico. En los análisis de este capítulo, fueron presentados dos suelos provenientes de un mismo perfil de intemperismo, siendo uno profundamente intemperizado, suelo laterítico, colectado a 1 m de profundidad, y el otro un suelo poco intemperizado, suelo saprolítico, colectado a 11 m de profundidad. Para estos dos tipos de suelo fue evaluada la influencia de los insumos en el comportamiento mecánico a partir de ensayos de resistencia a tracción por compresión diametral. Adicionalmente, se hace un análisis de la influencia de la cantidad de sales generadas durante las reacciones químicas entre cada fertilizante y el suelo, la cual puede intervenir significativamente en la succión osmótica y, por tanto, en la succión total y en el comportamiento mecánico.

2. PROPIEDADES DE LOS SUELOS FRENTE A LOS INSUMOS AGRÍCOLAS

2.1 Propiedades físicas

Dependiendo de la composición químico-mineralógica del suelo y del fertilizante utilizado, propiedades como masa específica, textura, consistencia y la propia estructura del suelo, pueden ser afectadas debido a las reacciones químicas entre partículas. En la Figura 1 se muestran imágenes ejemplificando el efecto generado por el fertilizante Urea en el suelo altamente intemperizado (a) y en el suelo saprolítico (b), evidenciando la importancia de la composición químico-mineralógica del suelo en las reacciones que ocurrirán cuando estos entran en contacto con los insumos agrícola. Adicionalmente, los ciclos de solubilización y cristalización que pueden ocurrir a lo largo del tiempo, generan cristales que pueden desplazar a las partículas, distanciándolas entre sí, provocando una alteración de algunas propiedades como masa específica (r) e índice de vacíos (e).



Figura 1 – Efecto de la Urea en la estabilidad estructural de un suelo:
a) laterítico; b) saprolítico

La Figura 2 presenta la composición mineralógica obtenida por Rodrigues (2017) para el perfil de suelo estudiado, destacándose la gran cantidad de gibbsita en el suelo superficial altamente intemperizado y su desaparecimiento en los suelos menos intemperizados como es el caso del suelo saprolítico estudiado, suelo en el cual se encuentra el mineral moscovita. Sobresale también el paralelismo entre los porcentajes de gibbsita y de cuarzo a lo largo del perfil, con la premisa de que gran parte del cuarzo presente en ese perfil de intemperismo se ha formado recientemente, conforme fue apuntado por Camapum de Carvalho y Gitirana Jr. (2021). Cabe destacar que el cuarzo como mineral recién formado en perfiles de intemperismo, fue estudiado por Senaha (2019) involucrando suelos regionales. En el contexto de este capítulo, es relevante destacar la gran diferencia entre la composición mineralógica de los suelos superficiales de este perfil de intemperismo, suelos lateríticos y los suelos profundos, suelos saprolíticos.

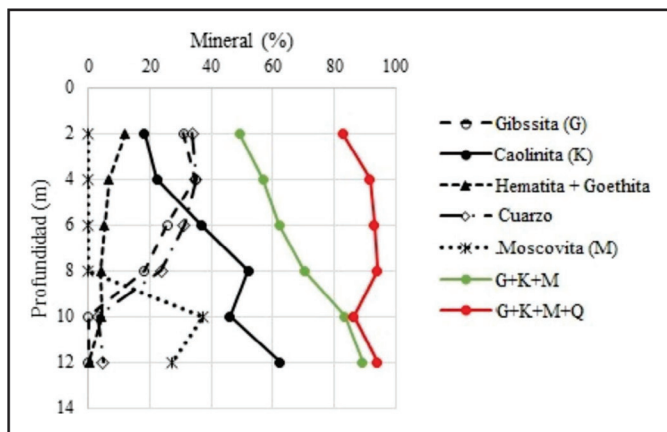


Figura 2 – Composición mineralógica de los perfiles de suelo estudiado (modificado, Rodrigues 2017)

De igual forma, la Figura 3 presenta los valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC), los porcentajes de materia orgánica (MO), las saturaciones por bases (Sr) y la acidez a lo largo del perfil de intemperismo estudiado (Pérez 2018), evidenciando las diferencias significativas entre las propiedades químicas del suelo laterítico estudiado colectado a 1 m de profundidad y el suelo saprolítico colectado a 11 m de profundidad.

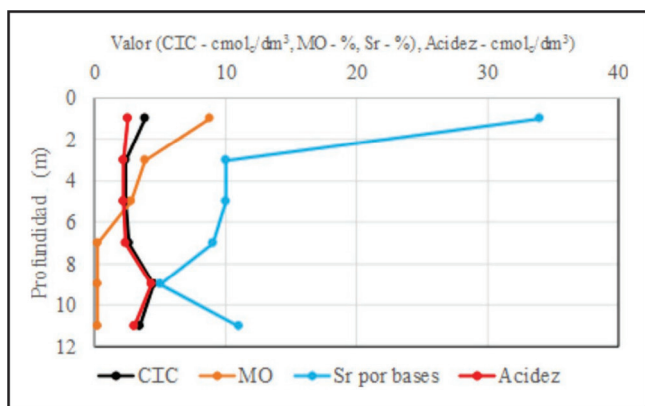


Figura 3 – Valores de CIC, MO, saturación por bases y acidez a lo largo del perfil (Pérez, 2018)

La Figura 4 presenta los resultados de potencial de carga cero (PZC) y potencial hidrógeno (pH), conceptos previamente discutidos en capítulos anteriores, los cuales fueron determinados para diferentes profundidades que componían un perfil de intemperismo tropical. En el caso de las mezclas, se presentan los resultados en las Figuras 4a y 4b para un tiempo de cura igual a 24 horas y 7 días respectivamente.

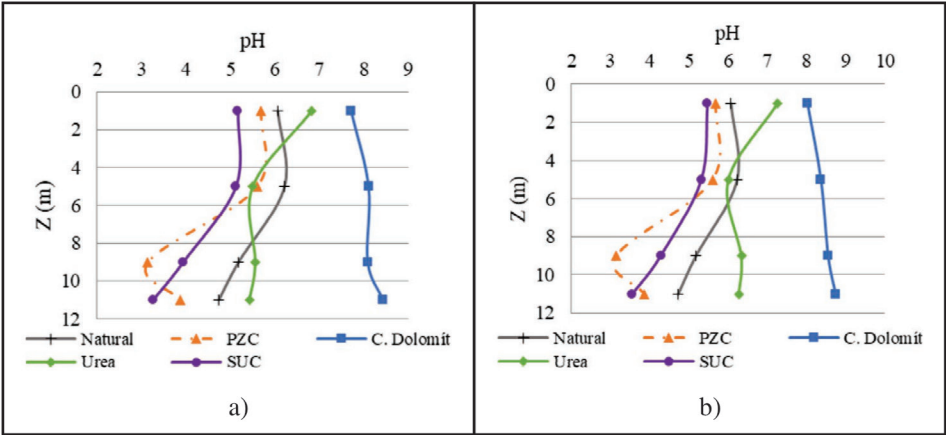


Figura 4 – Variación con la profundidad del PZC para el suelo natural y del PH para el suelo puro y las mezclas con Calcáreo Dolomítico, Urea e SUC: a) 24 horas de cura; b) 7 días de cura (modificado, Pérez 2018)

El valor de PZC presentado en la figura corresponde al del suelo puro, en cuanto que los valores de pH se refieren tanto al suelo puro como a las mezclas analizadas (Calcáreo Dolomítico, Urea, SUC). Sobresalen resultados similares para los dos períodos de cura, apenas con tendencia de un pequeño aumento en los valores de pH para 7 días de cura. Los valores de PZC obtenidos a lo largo del perfil son inferiores a los valores de pH del suelo puro, verificándose que apenas el compuesto SUC presentó resultados inferiores al PZC potencializando así la desagregación del suelo laterítico colectado a 1m de profundidad y la defloculación del suelo saprolítico colectado a 11m de profundidad.

Por otro lado, haciendo un análisis más detallado de la masa específica (r) obtenida utilizando un equipo pentapícnometro a gas, tanto para los suelos e insumos puros, así como para las diferentes mezclas de suelo-fertilizante (Tabla 1), se observa que las masas específicas resultantes de las mezclas no corresponden a la ponderación de las masas específicas del suelo con la del insumo utilizado, indicando así la ocurrencia de interacciones químicas, transformaciones y formación de nuevos compuestos que influyen en los resultados y análisis contenidos en este capítulo.

Tabla 1 – Masas específicas (r) del suelo puro, de los insumos usados y de las mezclas suelo-insumo (* valor medido, ** valor ponderado)

Suelo Puro		Masa específica (r) (g/cm ³)	
		Laterítico	Saprolítico
		2.68	2.88
Calcáreo Dolomítico	2.87	2,65* - 2,70**	2,86* - 2,88**
Urea	1.34	2,69* - 2,56**	2,65* - 2,74**
SUC	1.96	2,60* - 2,61**	2,69* - 2,80**

La textura y estructura de los suelos mezclados con fertilizantes, son dos propiedades físicas que también cambian dependiendo del producto químico con el cual el suelo reacciona. El efecto de la adición de los agentes químicos Calcáreo Dolomítico, Urea y SUC en estas características del suelo laterítico se muestra en la Figura 5, luego de un tiempo de exposición de aproximadamente dos años. Las imágenes obtenidas usando un microscopio electrónico de barrido (MEB) con un aumento de 50 veces, muestran una mayor presencia de partículas de menor tamaño para el suelo con incorporación de Calcáreo Dolomítico (Figura 5b) cuando comparado con la textura del suelo natural (Figura 5a), como si la muestra estuviese presentando pequeñas agregaciones de material; en cuanto que al evaluarse la mezcla con la Urea y con el SUC (Figura 5c y Figura 5d respectivamente), se observa una textura menos porosa con la unión de las agregaciones apuntando para la ocurrencia de desagregaciones

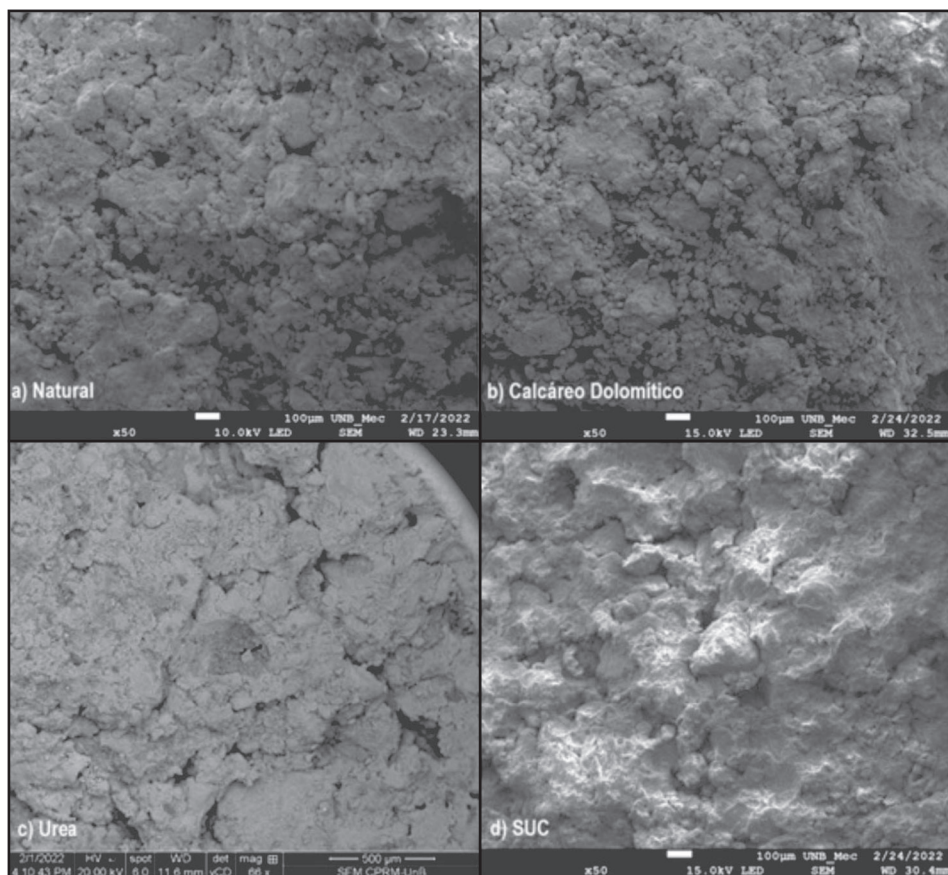


Figura 5 – Variações na textura e porosidade do solo laterítico a) puro; b) mezclado con Calcáreo Dolomítico; c) mezclado con SUC; d) mezclado con Urea

De acuerdo con los resultados presentados por Pérez (2018), estos fertilizantes generan desagregación de las partículas, siendo las mezclas con Urea y SUC las que más producen este efecto en los ensayos de sedimentación con agua destilada, aumentando también dicho efecto con el tiempo de cura (Figura 6a - 24 h de cura; Figura 6b - 7 días de cura). Para el caso de la mezcla con el Calcareo Dolomítico, las pequeñas agregaciones observadas en el estado no saturado, se deshacen con facilidad cuando entran en contacto con el agua, generando en ese caso desagregación y revelando baja estabilidad.

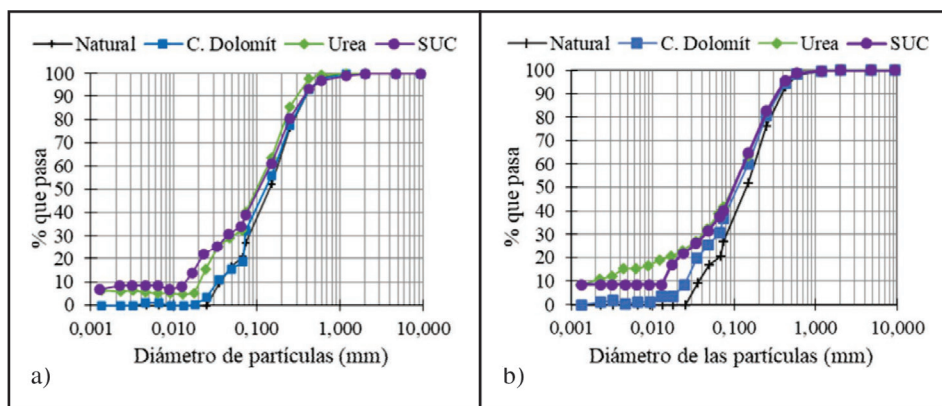


Figura 6 – Distribución granulométrica del suelo laterítico mezclado con Calcareo Dolomítico, Urea y con el compuesto SUC: a) 24 horas después de la mezcla; b) 7 días después de la mezcla (modificado Pérez, 2018)

La desagregación o agregación que un producto químico puede generar en un suelo, va a depender de la composición químico-mineralógica de ese material, así como se ilustra en la Figura 7. Esta figura presenta el efecto de diferentes fertilizantes en la distribución granulométrica de un suelo de transición ensayado 24 horas y 7 días después de haber sido realizadas las mezclas, el cual, al encontrarse entre el suelo laterítico y el suelo saprolítico, va a presentar en mayor o menor proporción los dos tipos de estructura que caracterizan a estos dos suelos, o sea, las partículas pueden encontrarse aisladas, débilmente agregadas o formando paquetes de arcilla. Este suelo presentaba la mayor capacidad de intercambio catiónico de los suelos que componían el perfil de suelo estudiado, característica que también contribuye para el comportamiento obtenido en los resultados de granulometría. Cabe destacar en esa figura el desplazamiento verticalizado que se observa en todas las curvas al pasarse del tamaño de granos 0,074mm para 0,06mm indicando que las agregaciones que se mantuvieron estables en el proceso de sedimentación pierden su estabilidad cuando son sometidas al tamizado. Comparándose esa figura con la Figura 6, se observa que solo el suelo natural presentó un pequeño desnivel indicando la mayor estabilidad de las agregaciones.

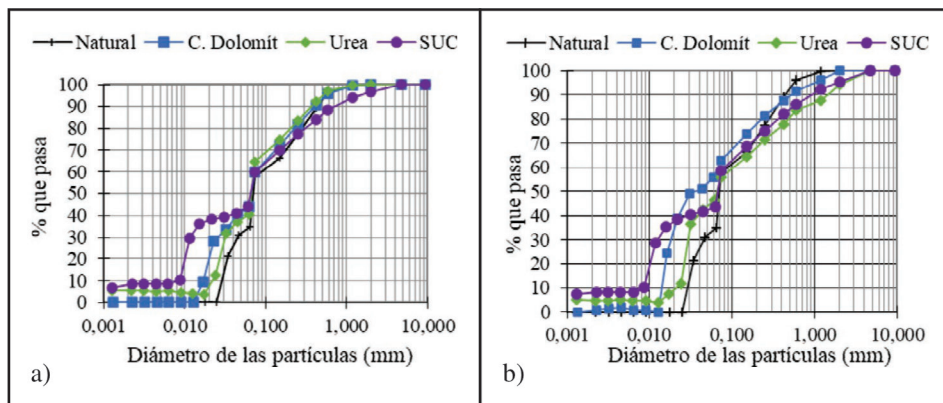


Figura 7 – Distribución granulométrica del suelo de transición y de las mezclas con Calcareo Dolomítico, Urea y con el compuesto SUC:
a) 24 horas y b) 7 días de cura (modificado Pérez, 2018)

El suelo saprolítico está compuesto predominantemente por la fracción limo con distribución granulométrica uniforme (Figura 8). Aunque la Urea y el compuesto SUC aumentan la fracción arcilla de este suelo, solo el compuesto SUC promueve el desplazamiento de la curva para un material más fino, apuntando al probable desprendimiento de partículas de arcilla que se encontraban adheridas a las partículas de limo. Considerándose los resultados de las figuras a y b, se verifica que el tiempo de cura prácticamente no intervino en ese desprendimiento de las partículas de arcilla.

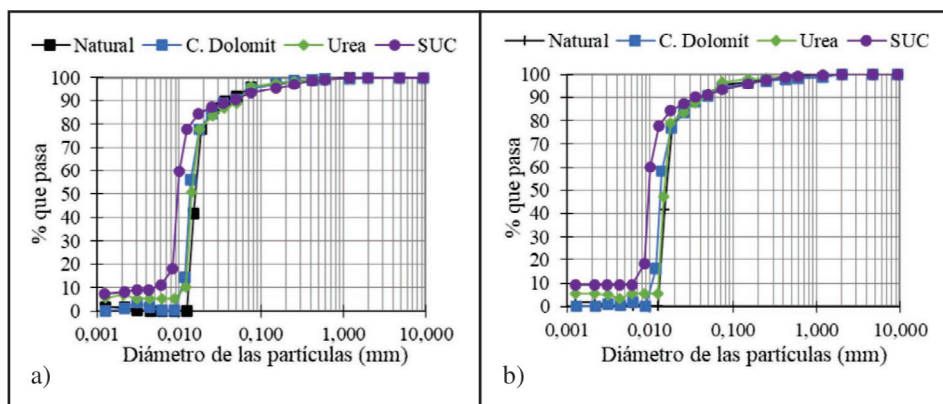


Figura 8 – Distribución granulométrica del suelo saprolítico y de las mezclas con Calcareo Dolomítico, Urea y con el compuesto SUC:
a) 24 horas y b) 7 días de cura (modificado Pérez, 2018)

En cuanto a la consistencia del material, la Figura 9 presenta, para las profundidades 1m, 5m, 9m y 11m, los resultados de límite líquido (LL, Figura 9a) y límite de plas-

ticidad (LP, Figura 9b) obtenidos por Pérez (2018), tanto para el suelo puro como para el suelo mezclado con los productos aquí analizados (Calcáreo Dolomítico, Urea, SUC). Las figuras muestran que los valores menores de LL y LP a lo largo del perfil fueron obtenidos para la mezcla con el compuesto SUC, compuesto que generó el mayor porcentaje de arcilla en los análisis granulométricos, haciendo que sobresalga su potencial reductor de las fuerzas de interacción entre partículas. Esa disminución en los límites de liquidez y plasticidad indica una disminución de la resistencia del suelo al ser mezclado con ese compuesto (Grim, 1962). Teniendo en vista que tanto el límite de liquidez como el límite de plasticidad guardan relación con la resistencia del suelo y que los productos químicos afectan directamente la succión osmótica, esos resultados muestran la importancia de su consideración en situaciones en las cuales la química del medio sufre alteraciones como ejemplifican Ramírez *et al.* (2017) al estudiar los límites de Atterberg de un suelo cuando está en estado natural y cuando está contaminado por lixiviado.

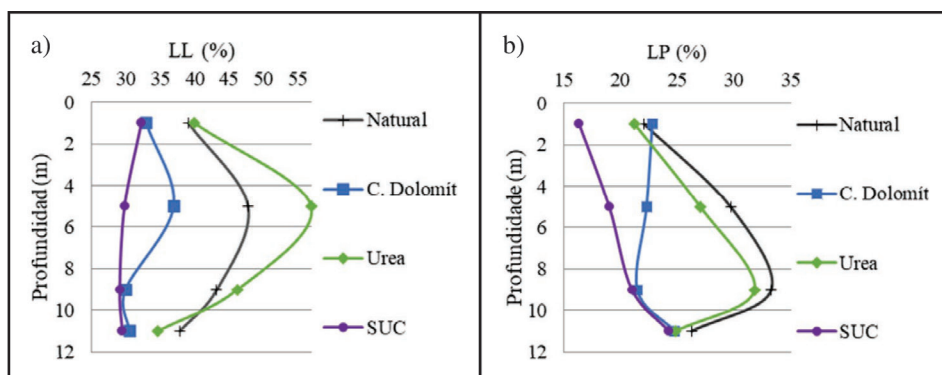


Figura 9. Resultados de los límites de atterberg siendo
a) LL y b) LP (modificado, Pérez 2018)

3. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE RETENCIÓN DE AGUA

3.1 Índice de vacíos

Como fue visto en la sección anterior, la presencia de fertilizantes en los suelos tropicales altera la textura y consistencia de los mismos, todo ello inducido por las reacciones químicas que ocurren, y que a medida que pasa el tiempo van intensificando su efecto. Ahora bien, desde el punto de vista geotécnico, el índice de vacíos es un parámetro importante en la determinación del comportamiento mecánico de los suelos, estrechamente relacionado con la estructura y granulometría de los mismos. Así pues, en esta sección se pretende analizar el efecto de la adición de insumos agrícolas en el índice de vacíos de los dos tipos de suelos estudiados.

La Figura 10 presenta los resultados obtenidos para los índices de vacíos de los cuerpos de prueba, sometidos al ensayo de determinación de la curva característica de reten-

ción de agua por la técnica del papel filtro, usando trayectoria mixta, tanto para el suelo laterítico (Figura 10a) como para el suelo saprolítico (Figura 10b). Inicialmente todos los cuerpos de prueba fueron compactados dinámicamente en un molde metálico de 5cm de diámetro, haciendo uso del compactador utilizado en la metodología MCV y aplicándose 6 golpes con el martillo pequeño (Peso = 2270gf).

Para las mezclas, las compactaciones fueron realizadas inmediatamente después de la homogenización con los productos químicos, esto para restringir las reacciones catiónicas inmediatas. La cantidad de suelo fue definida para que se obtuviesen cuerpos de prueba usando el suelo puro con 2,5 cm de altura, a esa cantidad de suelo fue adicionado 10% en peso para cada insumo utilizado. Como el diámetro del molde, el peso y la altura de caída del martillo fueron los mismos, teóricamente se redujo en aproximadamente 10% el valor de la energía de compactación cuando se adicionaron los insumos, siendo así esperado en esos casos un aumento del índice de vacíos inicial. Sin embargo, las Figura 10a y Figura 10b muestran valores de índices de vacíos mayores y menores que aquellos obtenidos para el suelo puro, determinados luego de un periodo de cura de 10 días.

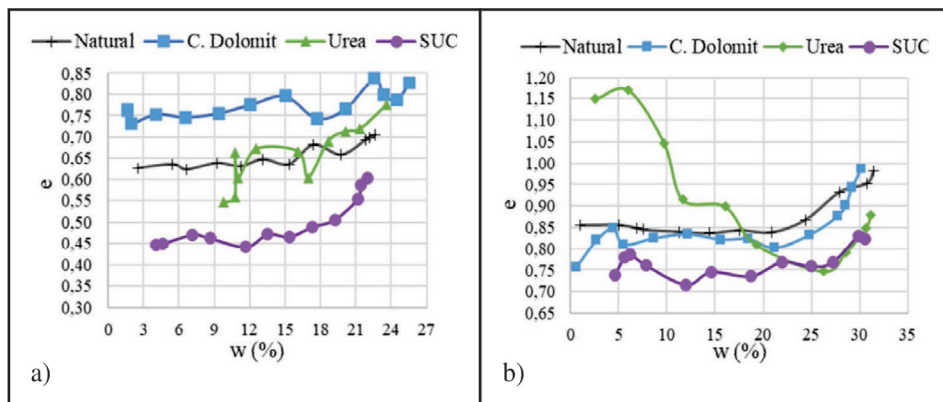


Figura 10 – Índices de vacíos en función de la humedad para el
a) suelo laterítico y b) suelo saprolítico

En ambas figuras se observa que la mezcla con el compuesto SUC produce una disminución del índice de vacíos respecto al suelo natural, evidenciándose un efecto mayor sobre el suelo laterítico, coherente con los resultados de los análisis granulométricos y de pH, siendo este último inferior al PZC del suelo puro, reafirmando la potencial desagregación generada por este producto al contribuir con la reducción de la macroporosidad y, en consecuencia, del índice de vacíos del suelo compactado. Los menores valores de LL e LP obtenidos para ese compuesto SUC en relación al suelo laterítico puro también apuntan para una menor resistencia del suelo al proceso de compactación, lo que permite su mayor densificación.

Para el producto Urea, la granulometría fue poco afectada con 24 horas de cura, el pH próximo de 7 apunta para la neutralidad de la influencia de las fuerzas de atracción y repulsión y los límites de liquidez y plasticidad son semejantes a los obtenidos para el

suelo puro, tal y como se constata en las figuras presentadas. Para el producto Calcáreo Dolomítico los mayores valores de índice de vacíos obtenidos en relación al suelo puro, apuntan para la influencia del pH básico en los resultados al ampliar las fuerzas de repulsión entre partículas y entre agregados.

Para el suelo saprolítico los menores valores de índice de vacíos obtenidos para el compuesto SUC en relación al suelo natural, se deben prácticamente a los mismos factores mencionados para el suelo laterítico, excepto que, en lugar del potencial de desagregación, se establece el potencial de defloculación. Respecto al Calcáreo Dolomítico, a pesar del incremento en el pH y la potencialización de las fuerzas de repulsión entre partículas, los análisis granulométricos y la semejanza en los valores de límite de plasticidad con el suelo puro, señalan una semejanza en los resultados de compactación, acorde con los índices de vacíos próximos a los obtenidos para el suelo natural (Figura 10b).

Los resultados alcanzados para las mezclas con Urea, excepto para las humedades más elevadas donde ocurrió mayor preservación estructural con el tiempo de cura, fueron perjudicados por los fisuramientos oriundos de cristalizaciones y que llevaron a la ampliación de los índices de vacíos medidos. Además de una pequeña defloculación ampliando el porcentaje de arcilla en las mezclas con Urea, los menores valores de límite de liquidez y de plasticidad (Figura 9), indican una menor resistencia a la energía de compactación aplicada, lo que habría propiciado la proximidad con los resultados obtenidos para las humedades más elevadas del compuesto SUC.

3.2 Succión matricial

Como ya fue presentado, la textura, estructura e índice de vacíos de un suelo puede cambiar cuando los argilominerales que lo componen reaccionan con los elementos contenidos en cada fertilizante, generando así variaciones en la curva característica de retención de agua matricial, la cual, aunque generalmente afectada por la porosidad, no considera de modo directo la influencia del índice de vacíos en su forma cuando está en función de la humedad gravimétrica.

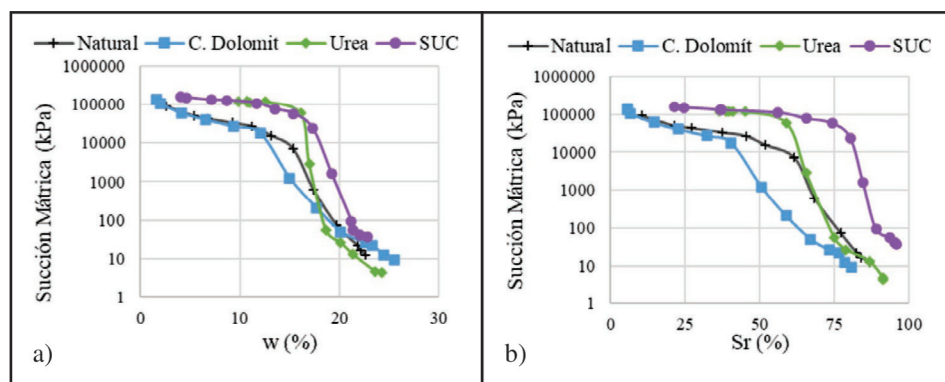


Figura 11 – Curvas características de retención de agua (succión mátrica) para el suelo laterítico en función: a) de la humedad (w); b) del grado de saturación (S_r)

En la Figura 13 se presentan las curvas características en función de la humedad y de la saturación obtenidas para el suelo laterítico junto con las curvas correspondientes a las mezclas con los fertilizantes utilizados. Notese que los valores de succión para la mezcla con el Calcáreo Dolomítico fueron bien similares a los obtenidos para el suelo natural en la region de los microporos, lo que indica que este producto no influye en la microestructura del suelo. Al mismo tiempo se observa para este insumo, una disminución en el valor de humedad (Figura 13a) y del grado de saturación (Figura 13b) del punto de entrada de aire en los microporos con relación al suelo natural, indicando una reducción del volumen de microporos debido a la posible desagregación generada por este agente químico en consecuencia del aumento del pH (Figura 4), propiciando así la necesidad de una menor cantidad de agua para llenar la zona de microporosidad.

Por otra parte, las mezclas con Urea y SUC presentan un incremento en los valores de succión en la zona de los microporos, sugiriendo una disminución en su tamaño debido probablemente a la cristalización que experimenta la Urea con la pérdida de humedad (Schmid *et al.*, 2018), tal y como muestra la Figura 1a. Estos cristales estarían sellando o disminuyendo el tamaño de algunos microporos, reduciendo su volumen respecto a la condición natural, de modo que, si bien pueden contribuir (Figura 6), no pueden asociarse directamente a fenómenos de desagregación como fue sugerido para el Calcáreo Dolomítico. Así mismo, el compuesto SUC, al contener Urea y Cloruro de Potasio en su composición, donde este último también presenta cristalización a medida que se pierde humedad en la mezcla (Figura 12), reduce la cantidad de agua necesaria para la saturación de los microporos.



Figura 12 – Cristalización del Cloruro de Potasio en un suelo laterítico

Analizando la zona de los meso y macroporos, la mezcla con Urea tiende a presentar un comportamiento similar al del suelo natural en cuanto que, para la mezcla con Calcáreo Dolomítico, se estaría generando una mejor distribución de los poros resultando en una transición más suave en el trecho entre los microporos y macroporos. Además, apesar del aumento de la porosidad de la mezcla con el Calcáreo Dolomítico en relación al suelo natural cuando compactado, esa mejor distribución de poros generó un incremento de la succión en la zona de los poros de mayor tamaño (Figura 11a).

La verticalización de las curvas características de retención de agua registrada para la Urea y para el compuesto SUC en el tramo intermediário entre los macro y micropo-

ros (Figura 11a) indica una reducción de los poros aquí considerados como mesoporos. En la Figura 11b se observa cierto paralelismo en el tramo de los mesoporos para estos dos fertilizantes, notándose una ligera reducción de la inclinación para la mezcla con SUC ya que la presencia del supersimples disminuye proporcionalmente la acción de los agentes cristalizadores Urea y Cloruro de Potasio

Al observar los resultados de la Figura 11b se percibe que la curva correspondiente a la mezcla con SUC, presenta un desplazamiento para la derecha con relación a la Figura 11a, esto debido al incremento en los valores del grado de saturación causado por la disminución del índice de vacíos para este producto químico, tal como se muestra en la Figura 10a. La disminución en el índice de vacíos podría ser producto de la desagregación generada por estos productos químicos (Perez, 2018), provocando un mayor número de contactos entre las partículas de suelo y un cierre de una parte de los macro y mesoporos que, unidos a las cristalizaciones observadas, contribuyen también para la disminución de los tamaños de los microporos. Aún no puede descartarse el impacto de los diferentes intercambios catiónicos que se presentan al momento de realizarse las diferentes mezclas, los cuales pueden alterar la carga de la solución, volviendo las conexiones entre partículas no solo un poco más débiles si no también interviniendo en las fuerzas resistentes a la compactación.

Un comportamiento inverso presentó la mezcla con el Calcareo Dolomítico, donde el desplazamiento de las curvas para la izquierda es causado por un aumento en el índice de vacíos (Figura 10a). Como se observó en la Figura 5b ese aumento es producto de pequeñas agregaciones, las cuales una vez en contacto con el agua se deshacen con facilidad generando desagregación (Perez, 2018). En la Urea no se presentaron cambios significativos en relación al suelo puro en el trecho intermediario de la curva característica en función del grado de saturación (Figura 11b), exceptuando la pendiente, esto debido a que la variación del índice de vacíos no fue tan grande, quedando en un rango relativamente próximo al del suelo natural (Figura 10a).

En la Figura 13 son mostradas las curvas de succión transformada para el suelo laterítico según lo establecido por Camapum de Carvalho & Leroueil (2004). En este gráfico pF corresponde al logaritmo de la succión en centímetros de columna de agua. A pesar de la esperada divergencia de las curvas debido a la influencia de los compuestos químicos introducidos en el suelo, la amplificación de esa variación retrata el impacto de la alteración en la distribución de los poros oriundas de desagregaciones y cristalizaciones, conforme cada caso analizado previamente. Camapum de Carvalho *et al.* (2002) muestran que al considerarse la distribución de poros es posible aproximar curvas características de retención de agua que estaban distantes, esto cuando tratadas en terminos de un índice de vacíos global.

Las mayores perturbaciones se presentan en las curvas correspondientes a las mezclas con Urea y SUC, lo que retrata mayor impacto de esos productos en la distribución de poros por medio de las cristalizaciones formadas. Otro aspecto relevante a considerar se refiere al impacto de las propias alteraciones de las fuerzas interactivas fluido-mineral en la succión matricial, propiciando cambios en la naturaleza del material e interfiriendo directamente en los resultados de e^*pF . Este análisis de las curvas características en terminos de e^*pF es relevante, pues indica que además de la influencia de la distribución de poros, es necesario considerar el impacto de las modificaciones químicas del medio y del propio suelo en los resultados obtenidos.

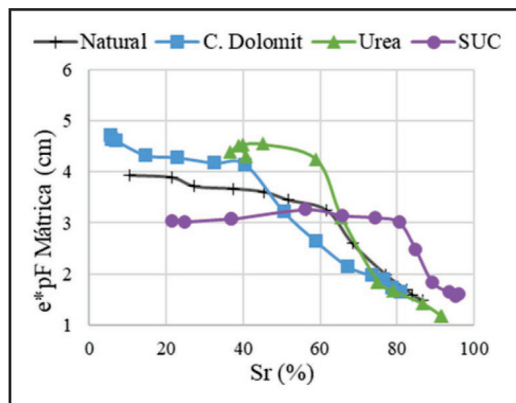


Figura 13 – Curvas características transformadas de las diferentes mezclas con el suelo laterítico

Así mismo, la Figura 14 presenta las curvas características de retención de agua matricial obtenidas para el suelo saprolítico en función del porcentaje de humedad (a) y del grado de saturación (b). Aunque el proceso de fisuración y cristalización generado en la mezcla con Urea lleva a un aumento del volumen medido de los cuerpos de prueba, la coincidencia en el trecho final de la curva ($e \times w$) con los resultados obtenidos para SUC (Figura 10b), indican una cierta semejanza en la porosidad de estas dos mezclas. Las menores porosidades registradas para estas mezclas serían entonces responsables por el aumento de las succiones en relación al suelo natural; los mayores valores obtenidos para la mezcla con el compuesto SUC en relación a la de la Urea se deben ciertamente a las diferencias en las fuerzas de interacción del fluido con los minerales y a la intervención de otros factores de orden químico.

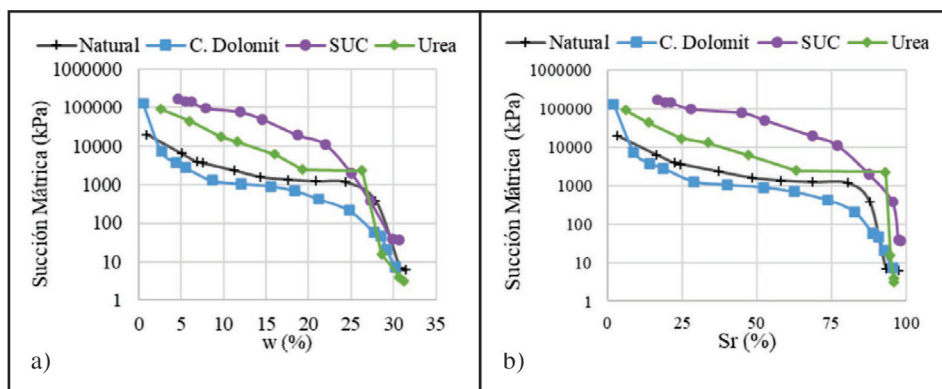


Figura 14 – Curvas características de retención de agua (succión mátrix) para el suelo saprolítico en función: a) de la humedad (w); b) del grado de saturación (S_r)

De igual manera, la Figura 15 presenta las curvas características transformadas obtenidas utilizándose los resultados de índice de vacíos y succión matricial presentados en la Figura 10b y Figura 14b, respectivamente. Se observa que para el suelo saprolítico ocurre mayor aproximación entre las curvas características transformadas por el índice de vacíos que para el suelo laterítico, recalcando la importancia de la distribución de poros en estos análisis, pues en cuanto el suelo laterítico presenta distribución de poros bimodal, el suelo saprolítico presenta distribución de poros monomodal.

Las diferencias entre las curvas características transformadas obtenidas para el suelo puro y para las diferentes mezclas, muestran la influencia de la química del medio en las interacciones entre partículas, sobresaliendo, sin embargo, una proximidad entre los resultados obtenidos para la Urea y para el compuesto SUC. Aunque la química del medio, conforme ya fue discutido, ejerza influencia en la succión matricial, la localización de la curva característica transformada obtenida para el Calcáreo Dolomítico con respecto a la del suelo puro, es coherente con los menores valores obtenidos para la succión mátrica (Figura 14b) y para el índice de vacíos (Figura 10b).

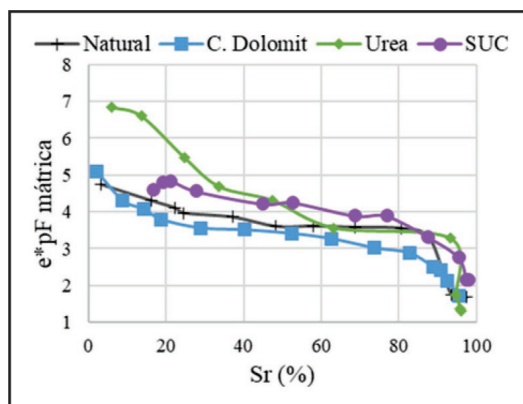


Figura 15 – Curvas características transformadas de las diferentes mezclas con el suelo saprolítico

3.3 Succión osmótica

Como fue mencionado en otros capítulos, la succión osmótica está relacionada con la concentración de sales disueltas en el agua contenida en el suelo, los cuales generan una disminución de la humedad relativa y la necesidad de mayor energía para remover una molécula de agua. Su actuación depende de la composición químico-mineralógica del suelo razón por la cual se optó por mostrar en este ítem los resultados obtenidos para el suelo laterítico y saprolítico estudiados en las secciones anteriores.

La Figura 16 muestra el gran efecto de los diferentes insumos agrícolas analizados sobre la succión osmótica de estos dos suelos. De forma general puede observarse el hecho de que aparentemente los fertilizantes ejercen poca, o inclusive ninguna influencia

en la succión osmótica actuante en los microporos del suelo laterítico (Figura 16a). Cabe destacar que esa tendencia registrada para humedades un poco inferiores a las asumidas como correspondientes a la entrada de aire en los microporos, se debe probablemente al hecho de que el equilibrio iónico con el fluido presente al interior de los agregados y microagregados, llevaría un período de tiempo mayor que el adoptado en los ensayos

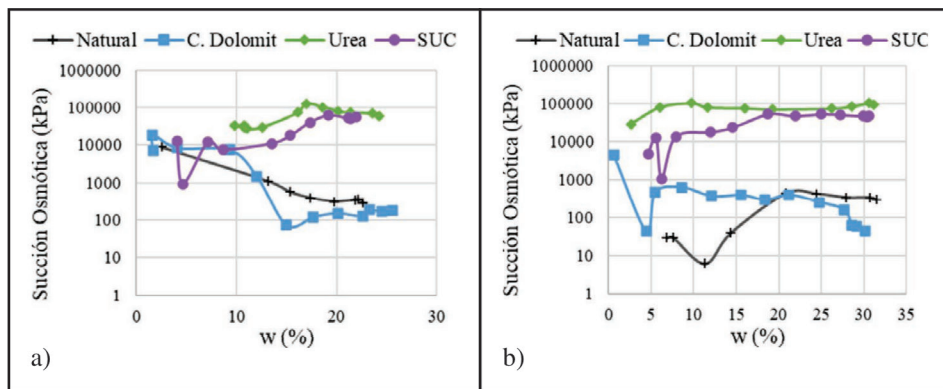


Figura 16 – Curvas características de succión osmótica en función de la humedad para un a) suelo laterítico y b) un suelo saprolítico

Para el suelo saprolítico (Figura 16b), teniendo como referencia al suelo laterítico con humedades inferiores a 10%, se observan no solo succiones osmóticas distintas, según el compuesto químico mezclado con el suelo, sino también valores que superan a la succión osmótica obtenida para el suelo natural, lo que refuerza el entendimiento de que la química introducida, para el caso del suelo laterítico, aún no ha tenido el tiempo suficiente de reacción como para llegar a afectar la zona de los microporos de este suelo.

Ya específicamente, para el caso del suelo laterítico mezclado con el Calcáreo Dolomítico (Figura 16a), se presenta la misma tendencia de comportamiento que el suelo natural, donde a mayor humedad menor succión osmótica generada, comportamiento semejante al comúnmente observado para la succión mátrica. Este fertilizante no tuvo variaciones significativas entre la succión total y la succión mátrica, indicando que el efecto de la succión osmótica no es muy relevante y, por tanto, las sales que proporciona el Calcáreo Dolomítico, o son pocas en comparación a los otros productos químicos, o no reaccionan significativamente con los argilominerales presentes en esta profundidad.

Para la Urea y el compuesto SUC el efecto sobre la succión osmótica fue contrario a la forma tradicional de la curva característica verificada para la succión mátrica. Considerando a Fredlund (1993), estos productos químicos estarían generando una gran concentración de sales disueltas en el agua del suelo, impidiendo que las moléculas de agua se evaporen, disminuyendo la presión de vapor y, por tanto, aumentando la succión osmótica, lo que finalmente produce un incremento en los valores de succión total. Para los suelos lateríticos estudiados, en la zona de los macroporos es donde se presenta la con-

centración de estas sales, evidenciando un mayor desplazamiento de las curvas de succión osmótica en comparación con las curvas correspondientes a los resultados de succión mátrica.

Por otra parte, para el suelo saprolítico (Figura 16b) se observa que los valores de succión osmótica obtenidos para las mezclas con Urea y SUC son muy similares para humedades superiores al 18%, al igual que ocurre con el suelo puro y la mezcla con Calcáreo Dolomítico. Los mayores valores de succión osmótica para los primeros dos casos, indican que las sales que proporcionan estos fertilizantes, reaccionan en mayor cantidad con los argilominerales de esta profundidad, haciendo con que una mayor cantidad de moléculas de agua hagan parte de esas reacciones; destácase la mezcla con Urea ya que presenta el mayor aumento de la succión osmótica, el cual se mantiene prácticamente constante a partir de la humedad 10%.

En el caso del Calcáreo Dolomítico, la succión osmótica tiende a disminuir con el aumento de la humedad, indicando que, a mayor cantidad de agua libre en la estructura del suelo, menor es la capacidad de retención de las moléculas de agua debido a la poca disponibilidad de sales en esta mezcla.

Sobresale de estos análisis que la succión osmótica es función no solo de la composición químico-mineralógica del suelo, sino también de la composición química del medio y de la zona de actuación en los poros. El hecho de que se produzca un incremento del índice de vacíos, a partir de aproximadamente el 17% y 22% de humedad para el suelo laterítico y saprolítico, respectivamente (Figura 10), en conjunto con el aumento de la humedad y las variaciones poco significativas en la succión osmótica, indica que en términos de película de recubrimiento de las partículas por el fluido, se mantiene cierta similitud, volviéndose constante la concentración de sales.

3.4 Succión total

Vistos los análisis realizados de las curvas de succión matricial y osmótica, en esta sección se analiza la contribución de cada una de ellas en la succión total, determinada mediante la técnica del papel filtro. En la Figura 17 se muestran los resultados de succión total para el suelo laterítico (a) y para el suelo saprolítico (b), notándose pequeñas variaciones con el porcentaje de humedad para las mezclas con Urea y con el compuesto SUC, como resultado de los valores mayores de succión mátrica y menores de succión osmótica para los menores contenidos de humedad, ocurriendo el caso contrario a medida que aumenta el contenido de agua de las mezclas. De igual forma, los valores de succión total obtenidos para la Urea y para el compuesto SUC son similares independiente de la humedad presente, siendo superiores a los valores obtenidos para el Calcáreo Dolomítico y para el suelo puro, los cuales también se encuentran próximos entre sí y, como se vio de igual forma con la succión mátrica (Figura 11a y Figura 14a), apuntando para una menor influencia de la succión osmótica en los resultados obtenidos para estos dos casos.

Por tanto, los análisis de las diferentes curvas características de retención de agua, succión mátrica, succión osmótica y succión total, muestran el elevado potencial de los insumos Urea y SUC para afectar el comportamiento mecánico de los suelos, obteniéndose un efecto menor cuando se utiliza el Calcáreo Dolomítico.

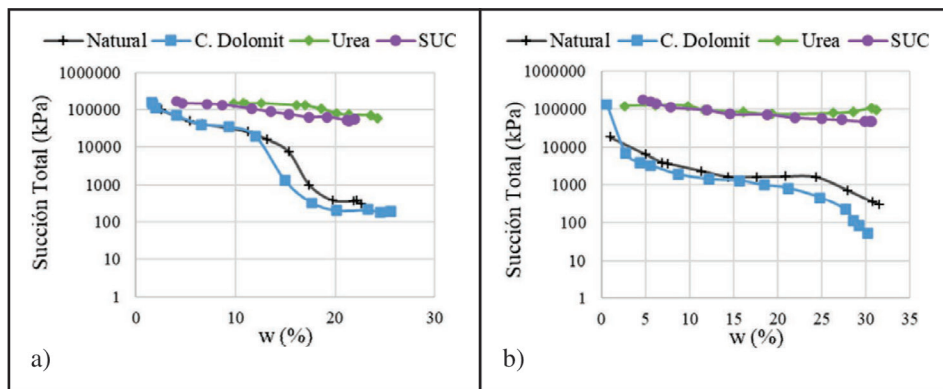


Figura 17 – Curvas características de retención de agua (succión total) en función de la humedad para un a) suelo laterítico y b) un suelo saprolítico

4. COMPORTAMIENTO MECÁNICO

4.1 Resistencia a la tracción por compresión diametral

El comportamiento mecánico de los suelos no saturados está directamente conectado a las succiones en él actuantes y estas dependen de factores como composición químico-mineralógica del suelo, química del fluido, porosidad, distribución de poros, porcentaje de humedad y distribución de la humedad. En la mayoría de los casos prevalece como más relevante el estudio de la influencia de la succión matricial en el comportamiento mecánico, sin embargo, en situaciones involucrando alteraciones químicas del medio y por consecuencia también del suelo, se hace necesaria una mayor atención a las variaciones de la succión osmótica, de las fuerzas de interacción entre partículas, así como la posibilidad de solubilización de determinados compuestos químicos presentes en los suelos y que están muchas veces actuando como adhesivo.

Cuando los suelos son utilizados para actividades agrícolas, no es raro que se vuelva necesario corregir su pH y adicionarle nutrientes indispensables para el cultivo de las plantas, lo que muchas veces implica cambios significativos en su comportamiento. Aunque tales acciones se den en el manto más superficial, las migraciones de compuestos y elementos químicos, así como sus solubilizaciones y conducción por medio de los flujos para capas más profundas, vuelve relevante en muchos casos, análisis más amplios del impacto de los insumos sobre las propiedades y comportamiento de los suelos.

A partir de lo expuesto serán analizados en este ítem, los impactos de la humedad, del índice de vacíos, de las succiones matricial y osmótica y de formulaciones englobando estos elementos, en el comportamiento mecánico de los suelos tropicales estudiados, basándose en los resultados de ensayos de resistencia a tracción por compresión diametral sobre los cuerpos de prueba utilizados en las determinaciones de las curvas características de retención de agua.

La Figura 18 presenta los resultados de resistencia a la tracción obtenidos para el suelo laterítico (a) y para el suelo saprolítico (b) en función del porcentaje de humedad en estado puro y cuando sometidos al tratamiento con los insumos agrícolas objeto de este estudio, los cuales son: Calcáreo Dolomítico, Urea y el compuesto SUC. Se evidencian comportamientos distintos en función del porcentaje de humedad para el suelo laterítico y para el suelo saprolítico, además del hecho de que las máximas resistencias a la tracción obtenidas para el suelo laterítico, son por mucho, superiores a las del suelo saprolítico. Las variaciones de la resistencia conforme el insumo utilizado, ya demuestran por sí mismas la necesidad de dar mayor importancia a las alteraciones químicas del medio y no apenas en consecuencia de la adición de insumos agrícolas.

Como era de esperar, existe una tendencia general de la disminución de la resistencia a la tracción con el aumento del índice de vacíos para ambos tipos de suelos (Figura 19), quedando claro también, cómo los insumos afectan de forma diferente a cada uno de ellos en relación al comportamiento presentado para la condición natural.

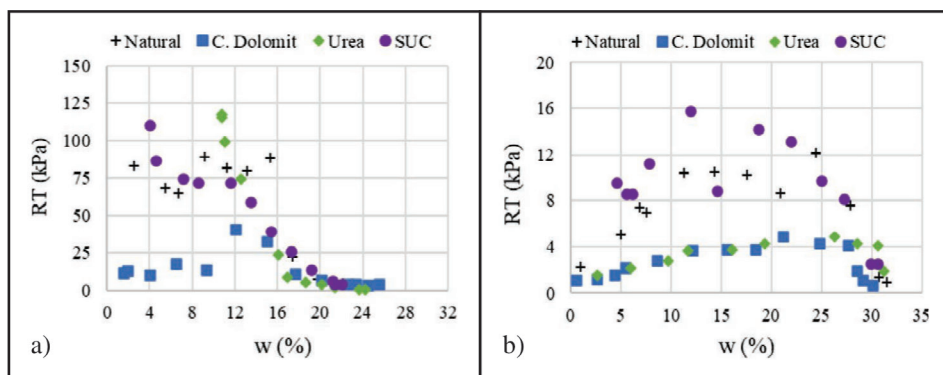


Figura 18 – Resistencia a la tracción por compresión diametral en función de la humedad para: a) suelo laterítico; b) suelo saprolítico

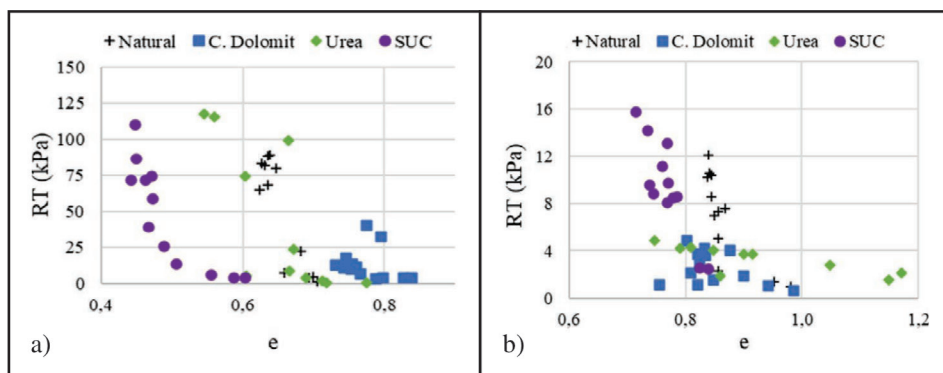


Figura 19 – Resistencia a la tracción por compresión diametral en función del índice de vacíos para: a) suelo laterítico; b) suelo saprolítico

Por otro lado, en la Figura 20 son presentados los resultados de resistencia en función de la succión matricial para los dos suelos analizados. Nótese que, considerando el conjunto de resultados obtenidos, los valores de succión matricial máxima alcanzados en ambos tipos de suelos son similares, siendo de 159MPa para el suelo laterítico y de 170MPa para el suelo saprolítico, resultando, sin embargo, en valores de resistencia a la tracción muy diferentes, apuntando a la necesidad de considerar en el estudio del comportamiento mecánico de los suelos no saturados, no solo la succión matricial sino también la succión osmótica y otros factores como la composición químico-mineralógica del suelo y del medio.

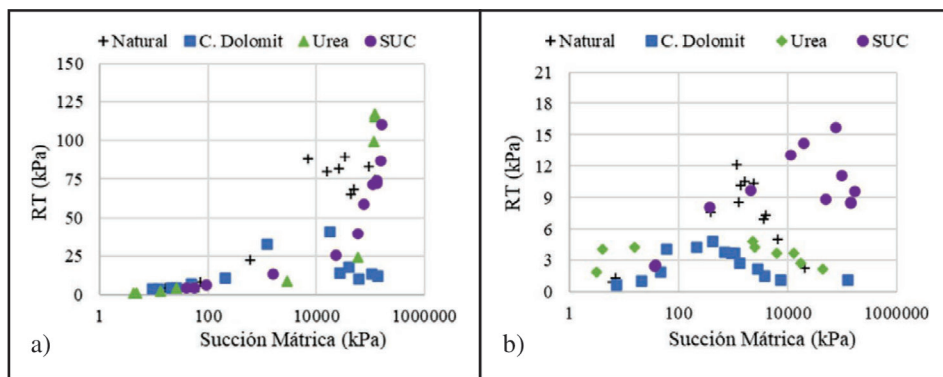


Figura 20 – Resistencia a la tracción por compresión diametral en función de la succión matricial para: a) suelo laterítico; b) suelo saprolítico

La Figura 21 presenta los resultados de resistencia a la tracción en función de la succión osmótica, revelando tendencias de comportamiento contrarias a las esperadas, ya que un aumento de la succión osmótica sugeriría incremento de la resistencia a la tracción. Por ejemplo, aunque para el suelo laterítico puro aparezca la tendencia supuesta, para las mezclas con Urea y con el compuesto SUC no sucede esto. Sin embargo, no se puede despreciar su relevancia para el comportamiento mecánico de los suelos como se demostrará a continuación.

En los estudios presentados por Camapum de Carvalho *et al.* (2002) se mostró que, si se mantiene la distribución de poros para un suelo en estado no saturado, su resistencia está dada en función de la succión matricial en pF (pF es el logaritmo de la succión en centímetros de columna de agua) normalizada por el índice de vacíos. Considerando lo anterior, se realizó este análisis para los suelos estudiados buscando evaluar el impacto de los insumos utilizados, como se evidencia en la Figura 22, donde se presenta el patrón esperado a pesar de la significativa dispersión de los datos, implicando, sin embargo, una mayor necesidad de entendimiento del impacto de los fertilizantes en el suelo.

Cabe resaltar dos aspectos relevantes antes de avanzar en los análisis: el primero corresponde a que el comportamiento mecánico de los suelos no saturados se da en función no solo de la succión matricial sino también de otros factores como el tipo de suelo, su estructura etc. El segundo aspecto indica que independiente del nivel de intemperismo del

suelo, este va a alcanzar un pico de resistencia a la tracción con el aumento de la succión, ya que, en materiales agregados, como lo son los suelos lateríticos, a medida que aumenta la succión, esta pasa a actuar de modo predominante en los microporos. Ya para los suelos poco intemperizados o suelos saprolíticos, la resistencia a la tracción se ve comprometida por el surgimiento de fisuras cuando se tienen valores elevados de succión (Camapum de Carvalho & Gitirana Jr., 2021; Valencia *et al.*, 2007; Valencia *et al.*, 2019).

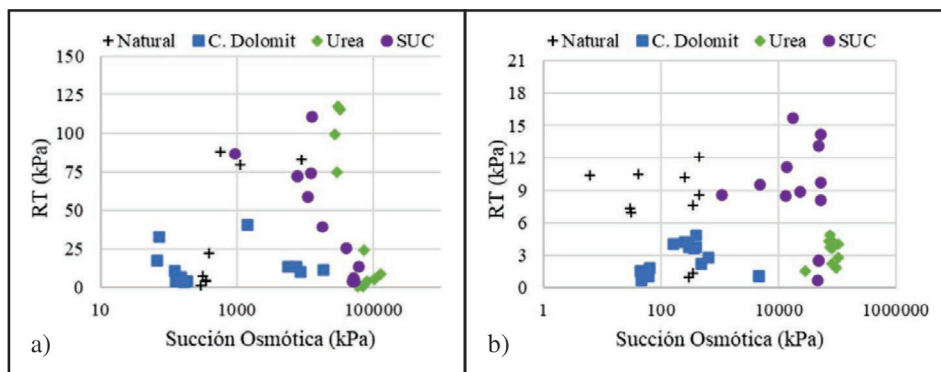


Figura 21 – Resistencia a la tracción por compresión diametral en función de la succión osmótica para: a) suelo laterítico; b) suelo saprolítico

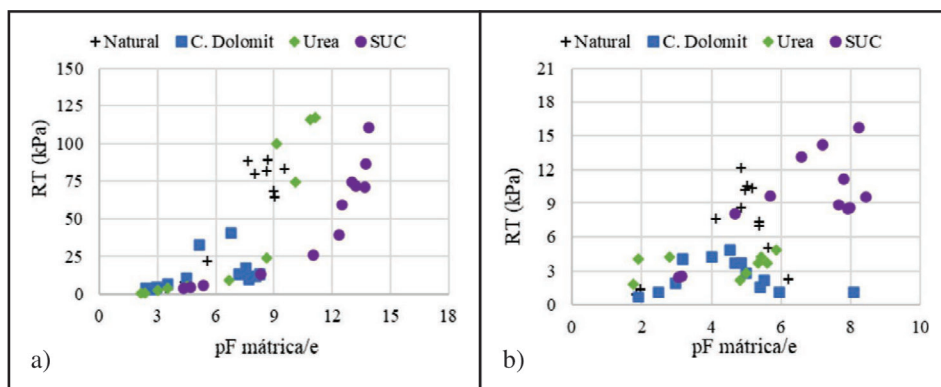


Figura 22 – Resistencia a la tracción por compresión diametral en función de la succión mátrica dada como pF y normalizada por el índice de vacíos para: a) suelo laterítico; b) suelo saprolítico

Haciéndose el análisis para la resistencia a la tracción en función de la succión osmótica expresada como pF y normalizada por el índice de vacíos (Figura 23) se verifica una leve mejoría de la distribución de los puntos en relación a los resultados presentados en función de la succión osmótica, conforme mostrado en la Figura 21.

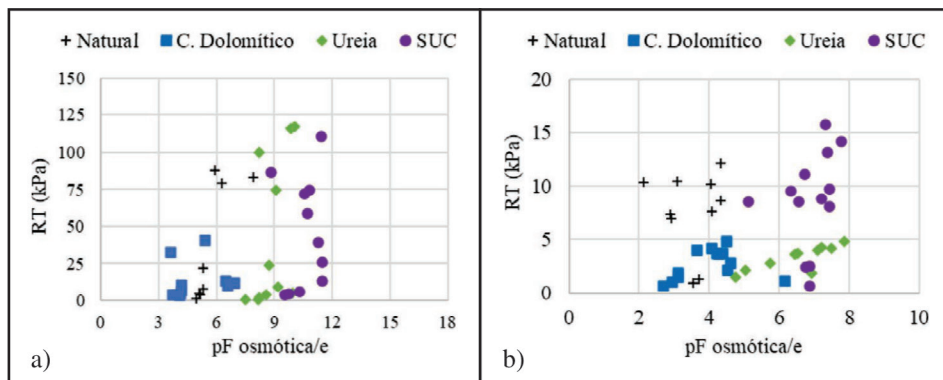


Figura 23 – Resistência à tração por compressão diametral em função de la succión osmótica dada como pF y normalizada por el índice de vacíos para: a) suelo laterítico; b) suelo saprolítico

Considerando que tanto la succión mátrica como la osmótica afectan el comportamiento mecánico de los suelos, se analizó la resistencia a la tracción en función de la suma del pF de la succión mátrica y osmótica, ambas normalizada en relación al índice de vacíos, obteniendo los resultados presentados en la Figura 24. Comparando estas gráficas con las mostradas en la Figura 22 – Resistencia a la tracción por compressão diametral em função de la succión mátrica dada como pF y normalizada por el índice de vacíos para: a) suelo laterítico; b) suelo saprolítico., no hubo gran alteración en la distribución de los puntos, sin embargo, en relación a los resultados de la Figura 23, es notoria la mejoría para los dos tipos de suelos.

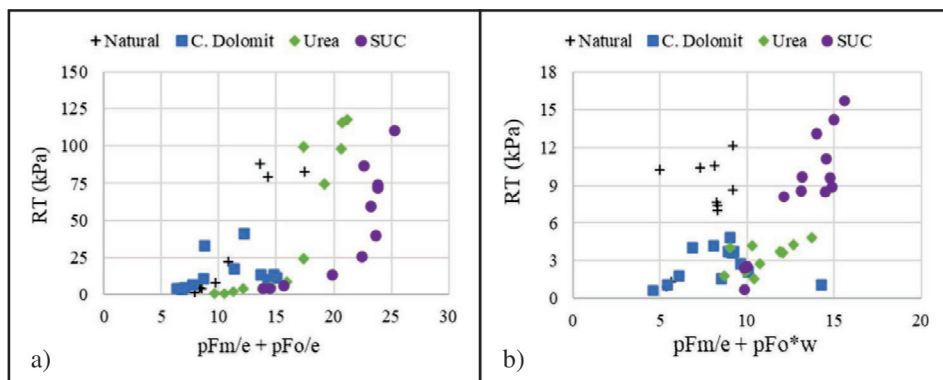


Figura 24 – Resistência à tração por compressão diametral em função de la suma de la succión mátrica y osmótica, ambas dadas como pF y normalizadas por el índice de vacíos para: a) suelo laterítico; b) suelo saprolítico

Por otro lado, teniendo en cuenta el hecho de que mientras la succión mátrica es directamente una función de las dimensiones de los poros y que la succión osmótica está más relacionada al agua de hidratación del suelo, se optó por analizar la influencia de la suma de la succión mátrica normalizada por el índice de vacíos y la succión osmótica multiplicada por la humedad, en la resistencia a la tracción de los cuerpos de prueba, ambas succiones presentadas en términos de pF. Los resultados obtenidos para los suelos en estudio se presentan en la Figura 25, resaltando una nítida mejoría en la distribución de los puntos, especialmente para el suelo saprolítico.

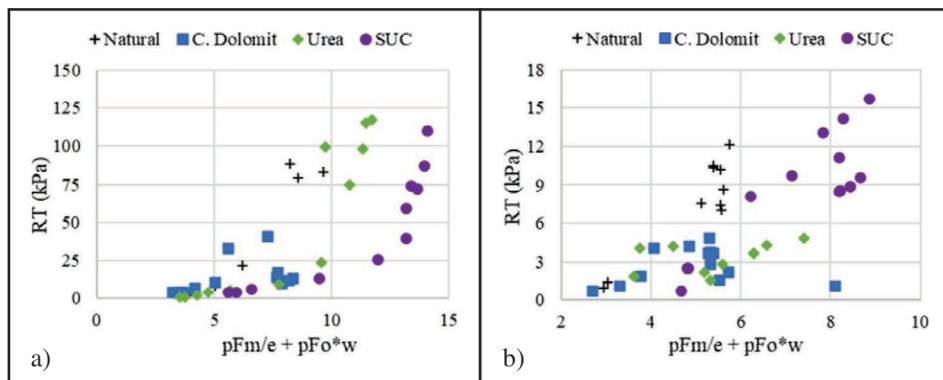


Figura 25 – Resistencia a la tracción por compresión diametral en función de la suma de la succión mátrica normalizada por el índice de vacíos y la succión osmótica transformada por la humedad para: a) suelo laterítico; b) suelo saprolítico

CONSIDERACIONES FINALES

El objetivo principal de este capítulo fue demostrar el efecto de la inserción de compuestos químicos en las propiedades y el comportamiento mecánico de suelos con diferentes grados de intemperismo, permitiendo ratificar la importancia de considerar la interacción agente-medio-suelo en los análisis realizados en el ámbito de la ingeniería geotécnica para el estado no saturado, e inclusive pudiendo afectar la condición saturada. Los estudios fueron dirigidos para la evaluación de la influencia de insumos agrícolas en las propiedades y comportamiento de los suelos que componen los perfiles de intemperismo tropical, sin embargo, las modificaciones de la química del fluido en contacto con el suelo y del sistema suelo-fluido también se pueden dar por la adición de estabilizantes químicos, cuando se introduce el concreto fresco en el suelo, cuando se usa agua contaminada en la compactación, cuando se infiltran aguas contaminadas en el suelo o hasta inclusive por alteraciones en la calidad del agua de lluvia que por lo menos en parte termina infiltrándose en el suelo, entre otros ejemplos.

Los resultados presentados y analizados en este capítulo, mostraron que los diferentes insumos utilizados en las mezclas con los suelos, generaron cambios en las propiedades físicas, en la estructura, en las curvas características de retención de agua y en la resistencia del suelo, las cuales variaron según el tipo de fertilizante, grado de intemperización y composición químico-mineralógica del suelo.

Los cambios presentados en la estructura del suelo, muestran que los diferentes fertilizantes pueden afectar la micro, meso y macroporosidad debido a las variaciones en el tamaño, volumen y cantidad de poros que componen estas zonas, generando con esto una alteración en los valores de la succión mátrica que a su vez está relacionada con la resistencia del suelo. La alteración en la concentración de sales producto de las reacciones del suelo con algunos de los productos químicos estudiados, también generaron cambios significativos en los valores de la succión osmótica y, por tanto, en la succión total, afectando las propiedades y comportamiento de los suelos analizados.

Los estudios y análisis presentados en este capítulo muestran la relevancia de considerar el uso y ocupación del suelo, pues las alteraciones químicas del medio y del sistema suelo-fluido que ocurran a corto, medio y largo plazo, son susceptibles de provocar desde simples alteraciones texturales hasta cambios significativos en la succión y comportamiento mecánico de los suelos. En el caso específico de los insumos agrícolas, sus solubilizaciones y lixiviaciones pueden generar a medio y largo plazo, problemas como subsidencias y rupturas de laderas, dependiendo de factores como composición químico-mineralógica del suelo, insumos utilizados, condiciones de drenaje y clima. Cuando se utilicen suelos que fueron sometidos a la práctica agrícola en obras de ingeniería, debe evaluarse si su composición química actual comprometería el desempeño de la obra a corto, medio y largo plazo.

Finalmente, cabe resaltar la necesidad de un mayor número de investigaciones alrededor de la temática abordada en este capítulo, tanto para ampliar los estudios realizados como para ayudar a un mejor entendimiento de los fenómenos químicos que ocurren en el suelo, de las consecuencias de la intervención humana en el medio que nos rodea y, más específicamente, de sus implicaciones en el análisis y ejecución de los proyectos de ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este capítulo agradecen al CNPq por el apoyo financiero al desarrollo de la pesquisa que generó los resultados en los que se basa este capítulo y a Jair Ochoa Valderrama y Marleny Pérez Silva por su ayuda en la revisión de la traducción del mismo.

REFERENCIAS

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA Jr. , G.F.N. (2021). Unsaturated Soils in the context of tropical soils. *Soils and Rocks* 44(3): 21 p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GUIMARÃES R.C. & PEREIRA, J.H.F. (2002). Courbes de retention d'eau d'un profil d'alteration. *Proceedings of the 3rd International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2002, Recife, Brasil, v I*, pp 289-294.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. & LEROUEIL, S. (2004). Curva característica de sucção transformada. *Solos e Rochas*, (27)3: pp 231-242.

CHAHAL, N., RAJOR, A. & SIDDIQUE, R. (2011). Calcium carbonate precipitation by different bacterial strains. *African J. Biotechnol.*, 10(42): pp 8359-8372.

EZEOKONKWO, J.C. (2011). Engineering properties of NPK fertilizer modified soil. *J. Emerg. Trends Eng. Appl. Sci.*, 2(6): pp 962-966.

FREDLUND, D. G. & RAHARDJO, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. Jhon Wiley & Sons Inc. New York. pp 82-85.

GRIM, R.E. (1962). *Applied clay mineralogy*. McGraw-Hill Book Company, New York, 422 p.

JIANG-TAO, L.I. & BIN, Z. (2007). Paddy soil stability and mechanical properties as affected by long-term application of chemical fertilizer and animal manure in subtropical China 17(40371059): pp 568-579.

KIST STEFFEN, G.P., STEFFEN, R.B. & ANTONIOLLI, Z.I. (2011). Contaminação do solo e da água pelo uso de agrotóxicos. *TECNO-LÓGICA*, pp 15 - 21.

MOMOLI, R.S., CAMAPUM DE CARVALHO, J. & COOPER, M. (2017). Erosão hídrica em solos cultivados. In *Erosão em Borda de Reservatório*. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, pp. 369-397. <https://gecon.eec.ufg.br/p/18785-publicacoes>

PÉREZ, A.C. (2018). Influência de insumos agrícolas em propriedades físicas de solos tropicais. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 103 p.

RAMIREZ, A.Q.; GONZÁLEZ, Y.V. & VALENCIA, L.A.L. (2017). Efecto de los lixiviados de residuos sólidos en un suelo tropical. *DYNA*, vol 84, n. 203, pp 283-290.

RODRIGUES, S.M. (2017). Caracterização Mineralógica e microestrutural de um perfil intemperizado de Brasília. Anápolis: Universidade Estadual de Goiás, 133 p.

SCHMID, J., ZARIKOS, I., TERZIS, A., ROTH, N. & WEIGAND, B. (2018). Crystallization of urea from an evaporative aqueous solution sessile droplet at sub-boiling temperatures and surfaces with different wettability. *International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*. 91, pp 80-88.

SENAHA, S.C.F. (2019). A quartzilização em perfis de intemperismo tropical. Brasília: Dissertação de Mestrado G.DM. – 332/2019, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, 159 p.

VALENCIA, Y.G.; CAMAPUM DE CARVALHO, J. & GITIRANA Jr., G.F.N. (2019). Metodologias simples para determinar em solos parcialmente saturados a envoltória de resistência ao cisalhamento. *Revista EIA*. Vol. 16 (32), pp. 43-53. <https://doi.org/10.24050/reia.v16i32.1218>.

VALENCIA, Y.G.; SANTOS, M.A.A.; CAMAPUM DE CARVALHO, J.; FARIAS, M.M. & GITIRANA Jr., G.F.N. (2007). Una metodología simple para determinar la envolvente de resistencia al corte de suelos no saturados: resultados experimentales y validación. *Proc. XIII Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*. Isla de Margarita. SVDG e ISSMGE, pp. 710-715.