

Estudio comparativo de la mineralogía y los coloides arcillosos en suelos de trópicos húmedos

Comparative study of mineralogy and clay colloids in the humid tropical soils

Juan Bullón Ames¹, Erika Bullón Castillo²
Universidad Continental

RESUMEN

Objetivos: Comparar las diferencias de la composición mineralógica de los suelos de Malasia y Zaire con suelos del Perú, en relación al tipo de coloides arcillosos que poseen. **Métodos:** Se utilizó el método analítico descriptivo correlacional, siendo las variables: a) Tipo de arcillas, b) Propiedades físicas del suelo y c) Propiedades químicas. Se operacionalizó las variables siendo sus indicadores: Para tipo de arcillas: kaolinitas, halloysitas, Illitas, cloritas y esmectitas; para Propiedades físicas, textura: arena, limo y arcilla; para propiedades químicas: pH, aluminio cambiante, acidez cambiante KCl, acidez cambiante BaCl₂ TEA. Para determinar estos indicadores se utilizaron los métodos analíticos siguientes: Termodiferencial y Microscopía electrónica para el tipo de arcillas y los minerales goetita y gibsita. Las propiedades físico-químicas fueron determinadas por los siguientes métodos: La Granulometría (textura) por el método Bouyoucos, pH por potenciometría, el aluminio cambiante por titulación del extracto con KCl, acidez cambiante KCl por el método Yuan, y acidez cambiante BaCl₂ TEA por Cloruro de bario. **Resultados:** Se encontró que los Oxisoles están compuestos por arcillas Kaolinitas y por los minerales: Gibsita y Goetita, mientras que los Ultisoles están conformados por arcillas Illíticas, complejos expandibles esmectícos, en menor proporción por Kaolinitas. **Conclusión:** Los Ultisoles presentes en Perú son más fértiles que los Oxisoles.



Juan Bullón

jbames39@gmail.com

Historial del artículo:

Recibido: 21 de agosto de 2014

Aprobado: 12 de octubre de 2014

Disponible en línea: 30 de diciembre de 2014

Palabras claves: Coloides, oxisoles, ultisoles, mineralógica, termodiferencial, kaolinitas, gibsita, goetita, illitas.

¹ Ph.D, M.Sc, Ing. Agrónomo, docente universitario, gerente B-C Consultora Constructora Ingenieros S. A. C.
² Bachiller en Ciencias Agronómicas, consultora. B-C Consultora Constructora Ingenieros S. A. C.

ABSTRACT

Objectives: To compare the differences between the Malaysia and Zaire and the Peru's soils mineralogical composition, in relation to the clayey colloids type they own. **Methods:** We used the correlational descriptive analytical method, with the variables: a) Clay type, b) Soil physical properties and c) Chemical properties. Variables were operationalized, being its indicators: For clay type: kaolinites, halloysites, illite, chlorite and smectite; for Physical properties, texture: sand, silt and clay; for chemical properties: pH, exchangeable aluminum, exchangeable acidity KCl, exchangeable acidity BaCl₂ TEA. To determine these indicators, the following analytical methods were used: thermodifferential and electron microscopy for the clay type and goethite and gibbsite minerals. The physico-chemical properties were determined by the following methods: The granulometry (texture) by Bouyoucos method, pH by potentiometry, the exchangeable aluminum by extract titration with KCl, KCl exchangeable acidity by Yuan method, and exchangeable acidity BaCl₂ TEA by Barium chloride. **Results:** Oxisols are composed by Kaolinites clays and by the gibbsite and goethite minerals, while Ultisols are formed by Illitic clays, smectitic expandable convoluted, in a lesser proportion by kaolinites. **Conclusions:** Ultisols located in Peru are more fertile than Oxisols.

Keywords: Colloids, oxisols, ultisols, mineralogical, thermodifferential, kaolinites, gibbsite, goethite, illite.

INTRODUCCIÓN

El problema central de esta investigación es el desconocimiento de los componentes mineralógicos y coloidales de suelos de selva alta y baja (Perú) compuestos por Oxisoles y Ultisoles comparados con suelos de trópicos húmedos de Malasia (Asia) y de Zaire (África).

En los antecedentes se encontró que el

estudio de la mineralogía de los suelos, Oxisoles y Ultisoles de los trópicos húmedos, ha sido objeto de numerosas investigaciones a nivel mundial (1, 2), una de las conclusiones que se ha desprendido de la revisión bibliográfica es que, existen varios resultados de la composición mineralógica de Oxisoles y Ultisoles (3, 4), en el presente trabajo se ha determinado las propiedades físico-químicas-coloidales presentes en los minerales de los suelos estudiados de Perú, Malasia y Zaire para conocer los diferentes tipos de arcillas y los minerales que componen cada uno de estos suelos, de tal manera que sea posible solucionar el problema central de este trabajo, en lo relativo a fertilización balanceada de café y cacao en suelos de Selva Alta y Baja de Perú (5, 6, 7) se ha realizado correlación y regresión lineal y exponencial entre las propiedades físico-químicas indicadoras de la riqueza de los suelos.

Se discuten los resultados de un trabajo de investigación realizado en tres suelos peruanos, dos de Malasia y uno africano.

Con la finalidad de comparar el tipo de arcillas presentes en suelos de los órdenes taxonómicos Ultisoles y Oxisoles y la correlación con las propiedades físico-químicas mencionadas, partiendo del conocimiento que las kaolinitas son las arcillas más pobres, por tener baja capacidad de adsorción de cationes, debido a que sus cargas electrostáticas negativas varían de 3 a 10 me/100g de arcilla (8, 9), siendo importante porque la Amazonía peruana posee, Ultisoles y en menor proporción Oxisoles.

Este estudio permitió conocer la riqueza potencial de los Ultisoles frente a los Oxisoles. Para planificar el aprovechamiento productivo de los suelos de los trópicos húmedos del Perú. La caracterización de suelos permitirá identificar la capacidad de retención de cationes (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, NH₄⁺ y microelementos catiónicos) que están presentes en los fertilizantes y materia orgánica aplicada (8, 9). Se ha encontrado que existen propiedades físico-químicas y coloidales en los dos órdenes de suelos

estudiados, tales como: granulometría, pH, Aluminio cambiante, Acidez cambiante y tipo de arcillas que son importantes para programar una fertilización químico-orgánica balanceada en Ultisoles y Oxisoles (10, 11).

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio comprendió tres partes: La primera, revisión de literatura especializada. La segunda describe los métodos analíticos utilizados y sitúa a los suelos en un contexto geográfico sistemático. La tercera parte discute los resultados que presentan las propiedades físico-químicas-coloidales y la mineralogía de todos los suelos elegidos.

Respecto a los materiales, se ha seleccionado dos Oxisoles de Malasia (series Segamat y Kuantan) y una muestra de Zaire África (serie S2QA-F10, he), tres muestras de suelos del orden Ultisoles de la selva tropical peruana (12), cuyas principales características son:

Oxisoles. Serie Segamat, Typic Haplortox La serie Segamat ocupa pequeñas superficies repartidas en varios lugares del territorio de Malasia, el clima es cálido y húmedo (precipitación de 3038 mm y temperatura media de 25 °C), el perfil del suelo es profundo de color variable de rojo (2,5 YR 4/6) a rojo amarillo (5 YR 5/8), desarrollado sobre andesitas, la textura es arcillosa, con buen drenaje (13). Serie Kuantan, Typic Acrorthox La serie Kuantan ocupa una pequeña superficie al Este de Malasia, (10.000 has), el clima es caracterizado por una precipitación anual de 3038 mm y una temperatura media de 24 °C. Serie S2QA-F10 he, Arenic Umbriustox. La serie Zaire está desarrollada sobre materiales de arena cuarcítica, estos materiales originales son de textura arenosa arcillosa, la precipitación anual es de 1700 mm, la duración de la estación seca es de 2 a 3 meses, la temperatura anual varía entre 20 y 32 °C (14).

Ultisoles. Se ha seleccionado 3 Ultisoles, de Perú; del departamento de San Martín (series: Bella Vista Alta, Tarapoto y La Habana) Serie

Bella Vista Alta, Typic Haplustult Pertenece a una zona forestal de relieve plano, sobre una terraza alta, la precipitación es de 1623 mm y una temperatura media anual de 26 °C. El suelo reposa sobre un conglomerado dominado por granodiorita, los colores varían de gris rojizo oscuro (5 YR 4/2) a marrón rojizo (5 YR 4/3). El drenaje es imperfecto (14). Serie Tarapoto, Oxic Haplustult Ocupa una importante extensión alrededor de la ciudad de Tarapoto, en una zona de relieve ondulado a plano. Desarrollado sobre terrazas medias a altas, el material original es arenisca ácida, los colores del suelo varían de marrón oscuro (7,5 YR 3/2) a marrón vivo (7,5 YR 5/8), son suelos bien drenados (15). Serie La Habana, Aeric Plinthic Paleustult. Es un suelo desarrollado sobre una terraza media a partir de un material arcilloso muy alterado proveniente de lutitas ácidas, los colores varían de marrón (10 YR 5/3) a gris rojizo (7,5 YR 7/2), el drenaje es malo y el suelo está cubierto por una vegetación forestal pantanosa.

Respecto a los métodos utilizados, se ha utilizado el método analítico, descriptivo, correlacional, siendo las variables investigadas: Tipo de arcillas, propiedades físicas del suelo y propiedades químicas del suelo. Estas variables han sido determinadas a través de los métodos (15) siguientes:

- Granulometría. La textura ha sido analizada por el método Bouyoucos, utilizando como dispersante exametafosfato de sodio.
- pH. Ha sido determinado por potenciometría en una suspensión suelo-agua 1:1, y en una suspensión 1:1 suelo-KCl (1N), con un electrodo de vidrio (USDA-SCS, 1967).
- Acidez y aluminio Intercambiables. De acuerdo al método de Yuan (1959) las muestras son saturadas con una solución de KCl (1N). La acidez cambiante es titulada con NaOH en presencia del indicador fenolftaleína (15).
- Óxidos de Hierro Libre. Se determinan de

acuerdo al método de Mehra y Jackson (1960), la extracción de hierro libre es mediante la técnica del ditionito-citrato-bicarbonato de sodio, la cual es realizada con el ácido sulfo salicílico (16).

- Capacidad de intercambio catiónico (CIC). Se determinó mediante el método del NH_4Cl (1N) no tamponado: la solución del suelo se saturó con NH_4 , posteriormente se desplazó el amonio con una solución de KCl al 10% y se tituló con HCl .
- Determinación mineralógica, de los coloides del suelo Mineralogía de la fracción fina $< 2\mu$ Análisis de las propiedades mineralógicas y coloidales de las muestras de los suelos Oxisoles y Ultisoles.
- Análisis termodiferencial. El análisis

termo diferencial ha sido realizado en las muestras de arcilla de los horizontes óxicos y argílicos. Para lo cual se ha utilizado un aparato termo-analizador automático DUPONT 900. La interpretación de este análisis ha sido realizada de acuerdo a Mackenzie (17, 18).

- Microscopia electrónica. Las observaciones de la cristalografía de las arcillas y sus impurezas fueron realizadas mediante el microscopio electrónico, ello se practicó en las seis muestras de los suelos estudiados (3).

RESULTADOS

La tabla 1, muestra el resultado de los análisis físicos practicados por el método Bouyoucos o del hidrómetro, corresponde

Tabla N° 1: Granulometría de los Oxisoles, método de Bouyoucos.

Perfil	Hor.	Profund. cm.	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase textural
Segamat Typic Haplorthox	A1	0-6	1,8	7,2	91,0	Arcillosa
	B1	6-18	1,8	7,2	91,0	Arcillosa
	B21	18-38	1,8	7,2	91,0	Arcillosa
Kuantan Acrothox	B22Ox	38-100	1,7	7,9	90,4	Arcillosa
	A1	0-8	4,0	14,8	81,2	Arcillosa
	B1	8-20	4,0	14,8	81,2	Arcillosa
S2QA-F10 he Arenic	B21Ox	20-60	4,0	15,9	80,1	Arcillosa
	A1	0-28	84,8	11,5	3,8	Arena limosa
Umbristox	A/B	28-60	83,9	9,6	6,5	Arena limosa
	IIB2Ox,1	60-95	68,8	4,6	26,7	Limo arcillo arenoso

Tabla N° 2: Granulometría de los Ultisoles, método Bouyoucos.

Perfil	Hor.	Profund. cm.	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase textural
Bellavista Typic Haplustult	A1	0-15	56,0	14,8	14	Limo arenoso
	A2	15-21	30,0	14,8	18	Limoso
	A3m	21-39	56,0	15,9	22	Limo arenoso
Tarapoto Oxic Haplustult	Ap	0-25	4,0	14,8	28	Limo arcillo arenoso
	B21t	25-45	4,0	14,8	38	Arcillo arenoso
	B22t	45-60	4,0	15,9	38	Arcillo arenoso
La Habana Aeric Plinthic paleaquilt	A1	0-40	84,8	11,5	12	Limo arenoso
	Bt	40-70	83,9	9,6	54	Arcillosa
	B21g	70-110	68,8	4,6	52	Arcillosa

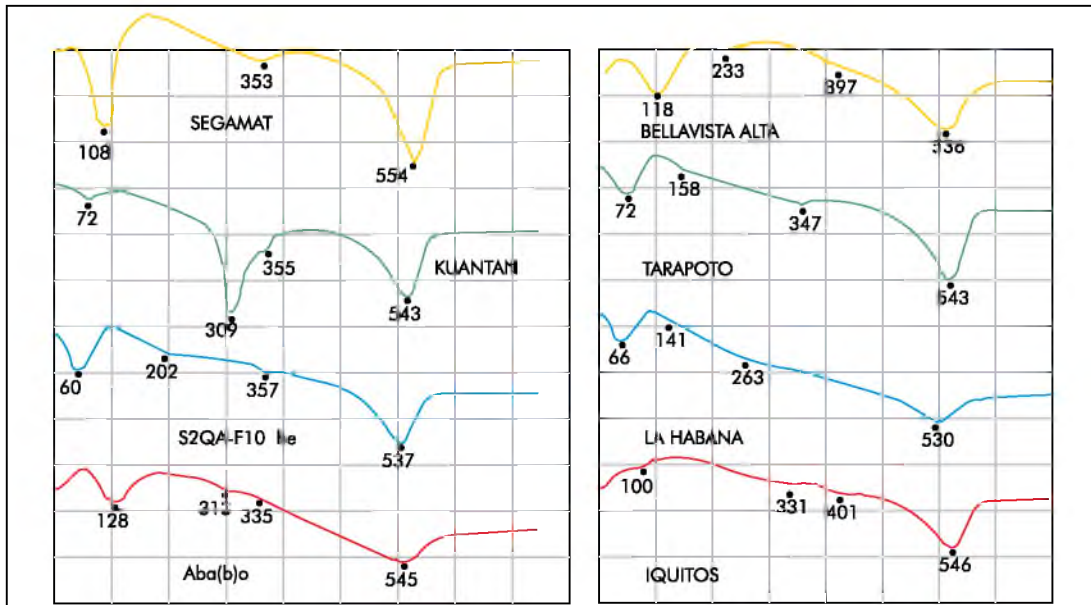


Figura N° 1: Análisis termo-diferencial en los horizontes óxicos y argílicos

a los horizontes de los perfiles de suelos Oxisoles de Malasia y de Zaire. Mientras que la tabla 2, presenta los resultados del análisis realizado en los horizontes de los tres perfiles de Perú, siendo suelos Ultisoles.

En la figura 1, se presenta los resultados del análisis termodiferencial de los Oxisoles con sus principales curvas de inflexión que corresponden a la deshidratación de las muestras de suelos expuestas a temperaturas variables desde 60l °C hasta 545 °C. Igualmente para los Ultisoles las temperaturas varían de 66 a 546 °C.

Las figuras 2 y 3 corresponden a la regresión y correlación entre la acidez cambiante KCl y el aluminio cambiante KCl. Realizadas para los Oxisoles de Malasia y Zaire y para los Ultisoles de Perú.

Las figuras 4 y 5, representan las regresiones y correlaciones estadísticas de comprobación de los resultados entre los indicadores acidez cambiante BaCl₂ TEA y aluminio cambiante KCl.

Las figuras 6 y 7 muestran las regresiones y correlaciones estadísticas para Oxisoles y

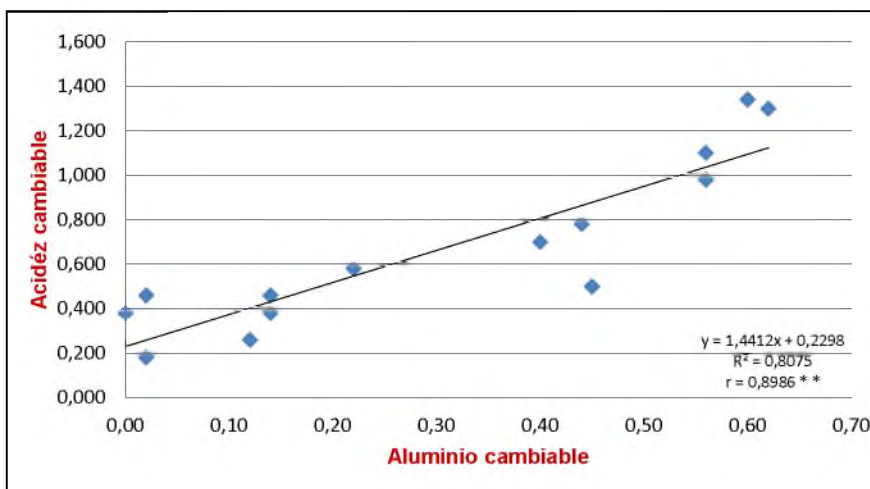


Figura N° 2: Regresión y correlación lineal simple entre acidez cambiante y aluminio cambiante en oxisoles.

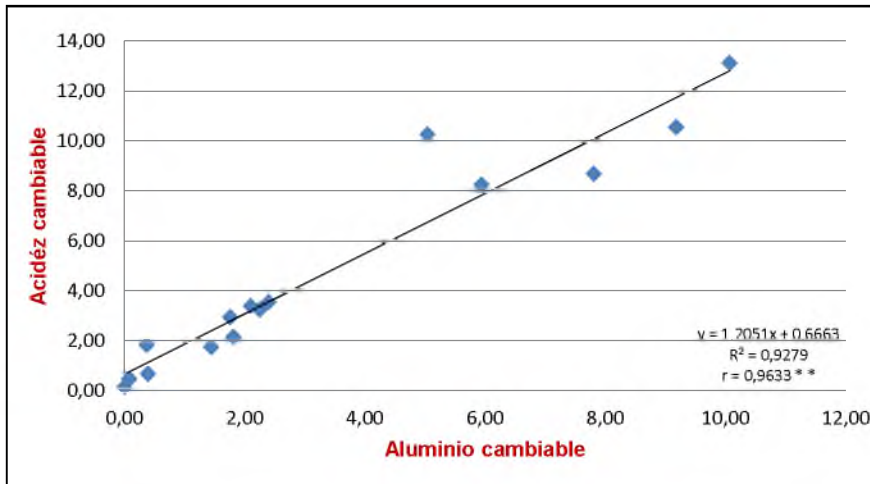


Figura N° 3: Regresión y correlación lineal simple entre acidez cambiabile y aluminio cambiabile en ultisoles.

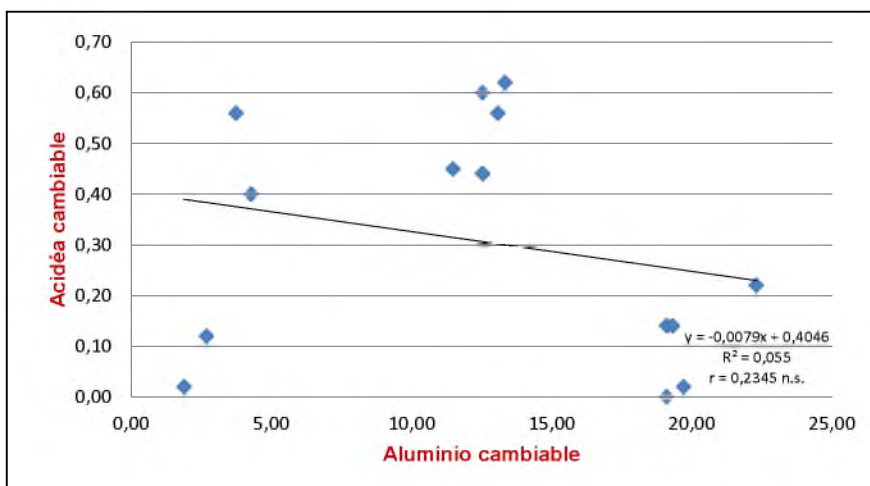


Figura N° 4: Regresión y correlación lineal simple entre acidez cambiabile BaCl₂, TEA y aluminio cambiabile en oxisoles.

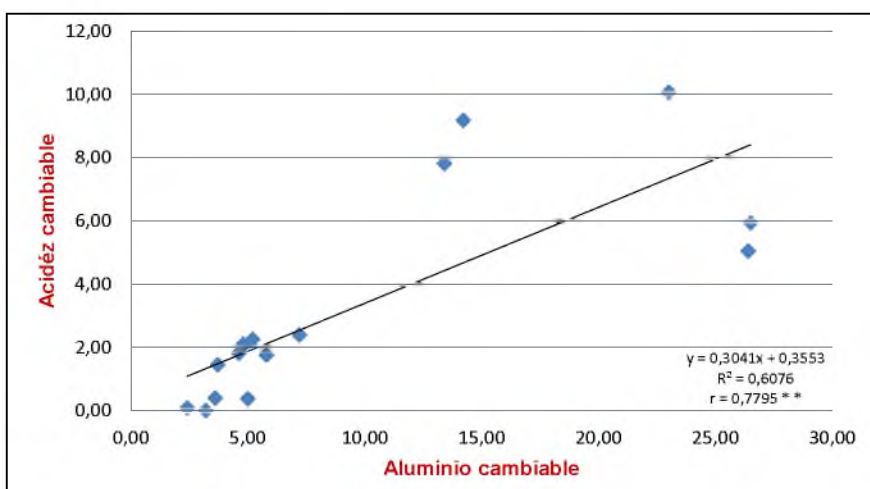


Figura N° 5: Regresión y correlación lineal simple entre acidez cambiabile BaCl₂, TEA y aluminio cambiabile en ultisoles.

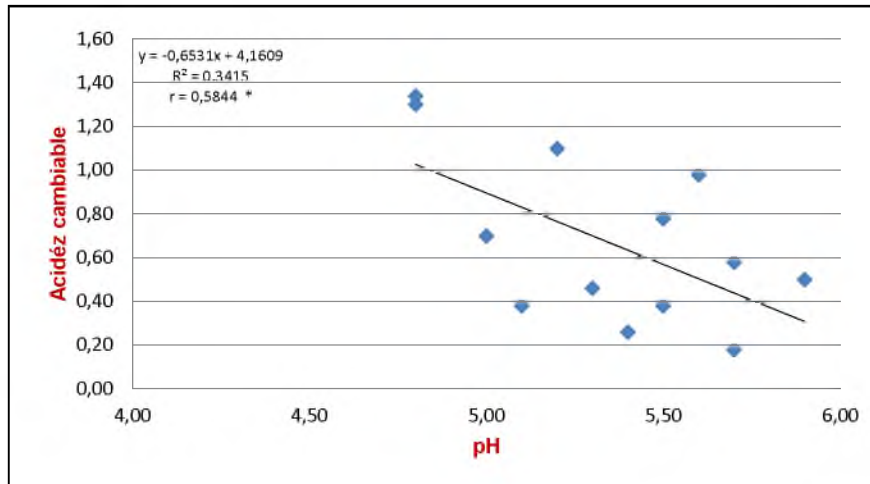


Figura N° 6: Regresión y correlación lineal simple entre Acidez Cambiable KCl y pH H₂O en Oxisoles.

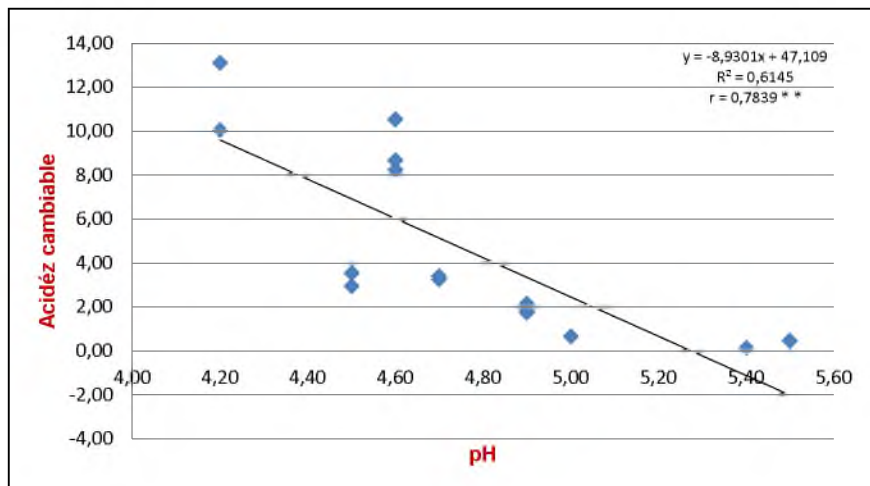


Figura N° 7: Regresión y correlación lineal simple entre acidez cambiante KCl y pH H₂O en ultisoles.

Ultisoles, comprobando la relación existente entre los indicadores citados de la variable propiedades físicas.

DISCUSIÓN

La granulometría se muestra en las tablas 1 y 2. Todos los horizontes de los suelos Segamat y Kuantan son de textura arcillosa. La distribución de arcilla en los dos perfiles es homogénea y decrecen desde la superficie hacia abajo. La serie Segamat presenta un contenido de arcilla mayor que Kuantan. El porcentaje de limo aumenta en profundidad para los dos suelos. El contenido de arena es muy bajo en ambos

suelos (15). En general todos los Ultisoles estudiados son de textura más gruesa que los Oxisoles derivados de rocas básicas. Variando en los horizontes superficiales de limo-arenoso a arena limosa. Todos los horizontes argílicos pertenecen a la clase arcillosa.

Composición mineralógica de la fracción < 2 μ . Análisis termogravimétrico, las curvas termo diferenciales de los Ultisoles muestran tres inflexiones (reacciones endotérmicas) principales (figura 1). La primera es de intensidad baja a media y está situada entre 66 y 118 °C. Ella corresponde a la parte de agua (deshidratación) adsorbida a baja energía (3, 16). La segunda inflexión es muy baja y continúa a 380 °C, esta

se debe a la deshidratación completa de los materiales illíticos, esmectíticos y los complejos illita-esmectita. La tercera inflexión es de intensidad fuerte y se sitúa entre 530 a 546 °C, debida a la pérdida de agua de constitución (deshidroxilación) de la kaolinita. Hay una baja reacción endotérmica en la muestra del perfil Tarapoto a 347 °C que es producida por la deshidroxilación de la Goetita (17). Las curvas termo diferenciales de los Oxisoles son más variadas que las curvas de los Ultisoles (figura N° 1). Estas presentan tres inflexiones. La primera de baja a fuerte intensidad, está situada entre 60 a 128 °C, denota impurezas que acompañan a la kaolinita, así como la presencia de agua débilmente retenida por la kaolinita. La segunda reacción endotérmica es baja, se localiza entre 350 y 358 °C y es producida por la deshidroxilación de a Goetita. La tercera inflexión que es muy fuerte se sitúa a 540 °C y corresponde a la deshidroxilación de la kaolinita. El oxisol Kuantan muestra además una fuerte inflexión a 309 °C debido a la deshidroxilación de la Gibsita (16).

Microscopía electrónica. Las observaciones en los Oxisoles (Kuantan, Segamat y SE2QA-F10 he) (3) (18), mediante el microscopio electrónico muestran minerales gruesos bajo la forma hexagonal bien cristalizados (kaolinitas) y pequeños cristales de forma irregular (Goetita). En los Ultisoles Tarapoto y Bellavista Alta, estos minerales están presentes, pero los contornos de los cristales son des uniformes (19).

pH. El pH en agua varía entre 4,8 a 5,9 en todos los horizontes de los Oxisoles. Siendo un poco más bajo en la superficie que en profundidad en las series Segamat y Kuantan. El pH en KCl es siempre inferior al pH en agua. (3) (20). La medida del pH en agua y en KCl permite reconocer la predominancia de hidróxidos libres sobre los óxidos en los aluminosilicatos, (20), figuras 6, 7). En los Ultisoles, el pH en agua varía de 3,9 a 5,5 y es ligeramente más elevado en la superficie que a profundidad contrariamente a los Oxisoles. De acuerdo a Mekaru y Uehara (1972) (21). Acidez

cambiable KCl. La acidez cambiable KCl, en los tres Oxisoles es baja, ello está en relación a la baja cantidad de aluminio cambiable de esos suelos. La regresión y correlación lineal de la acidez cambiable en función del pH muestra una diferencia neta entre la acidez cambiable de los Ultisoles y de los Oxisoles (figuras 2, 3) (3), (21).

Aluminio cambiable. El tenor de aluminio cambiable es bajo en los tres Oxisoles. Las regresiones y correlaciones lineales simples de la acidez cambiable y el aluminio cambiable en KCl, se presentan en las figuras 2 y 3. En ambos suelos son positivas y altamente significativas.

En las figuras 4, 5 se muestran la regresión lineal simple de la Acidez Cambiable BaCl₂, TEA y el Aluminio Cambiable KC entre los Oxisoles y los Ultisoles siendo negativa y no significativa en los Oxisoles, mientras que en los Ultisoles fue positiva y estadísticamente significativa. En las figuras 6, 7 se muestra los resultados de la regresión y correlación lineal simple entre la acidez cambiable KCl y el pH en H₂O, en Oxisoles y Ultisoles; donde la regresión y correlación es negativa en ambos suelos, significativa en los Oxisoles y negativa y altamente significativa en los Ultisoles. Ello indica que a medida que el pH aumenta la acidez cambiable disminuye en ambos suelos. Los Ultisoles presentan una concentración mayor de aluminio cambiable (22).

De los resultados se llegó a las conclusiones siguientes:

- Las curvas termo diferenciales de los Oxisoles son más variadas que las curvas de los Ultisoles (figura 1). Ello indica la diferencia de pérdida de agua por las altas temperaturas a la que se someten las arcillas investigadas. Los horizontes de los suelos Segamat y Kuantan son de textura arcillosa, los de Zaire son arenosos. Los Ultisoles estudiados presentan textura más gruesa que los Oxisoles.
- Las arcillas presentes en los Oxisoles son kaolinitas, en menor proporción goetitas y gibsititas, óxidos de hierro libre y de

- aluminio. En los Ultisoles las arcillas son Illitas, un poco de cuarzo, esmectíticas y kaolínificas.
- El pH en KCl es inferior al pH en agua. En los suelos estudiados, por lo cual se puede calcular la carga negativa del coloide suelo.
 - La regresión y correlación lineal de la acidez cambiante en función del pH muestra una diferencia neta entre la acidez cambiante de los Ultisoles y de los Oxisoles. En los Oxisoles la correlación lineal simple de la Acidez Cambiable BaCl₂, TEA y el Aluminio Cambiable KCl fue negativa y no significativa, mientras que en los Ultisoles fue positiva y estadísticamente significativa.

Estos hallazgos permiten concluir que los Ultisoles (Perú) presentan mayor potencial productivo que los Oxisoles (Asia y África).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arias F, Mata R. Mineralogía de la fracción arcilla de algunos suelos Cultivados con banano en las Llanuras aluviales del Caribe de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 2010; 34(2): 197-222.
2. Besoain E. Mineralogía de arcillas de suelos. San José: Bib. Orton IICA; 1985.
3. Bullón J. Etude comparative de la Mineralogie et de L'Adsorption de Phosphates et de Sulfates dans les sols Tropicaux. [Tesis doctoral]. Bélgica: Université d'Etat de Gand; 1976.
4. Brinkman R. Ferrolisis a hydromorphic soil forming process. *Geoderma*. 1970; 3: 199-206.
5. Cochrane T, Sánchez P Recursos de tierras, suelos y su manejo en la región amazónica: Informe acerca del estado de conocimiento. *Amazonía Investigación Agricultura Uso de Tierras*. 1982; 4(82): 141-203.
6. Coleman N.T, Thomas G.W. The basic chemistry of soil acidity. *Advances in Agronomy*. 1967; 12: 1-41.
7. Correa J.C. Recursos edáficos do Amazonas. Manaus: EMBRAPA - UEPAE; 1984.
8. Fassbender H.W. Química de suelos, con énfasis en suelos de América latina. 5ª ed. San José: IICA; 1986.
9. Forsythe W. Física de suelos: Manual de laboratorio. San José: IICA; 1985.
10. Grim R.E. Clay Mineralogy. 2ª ed. New York: Mc Graw-Hill; 1968.
11. Hashimoto I, Jackson M.L. Rapid dissolution allophone and kaolinitahalloysite after dehydration. *Clays and Clay minerals*. 1958; 7: 102-113.
12. Hoag, R. Characterization of soil floodplains of tributaries flowing into the Amazon River in Perú. [Tesis doctoral]. Carolina del Norte: North Carolina State University; 1985.
13. Instituto Tecnológico Geominero de España. Contaminación y depuración de suelos. Madrid: ITGE; 1995.
14. Jackson M.L. Soil Chemical Analysis. Advanced course. Madison: UW-Madison; 1956.
15. Krauskopf K.B, Bird D.K. Introduction to geochemistry. New York: McGraw-Hill: 1995.
16. Mackenzie R.C. The differential thermal investigation of clay minerals. London: Mineralogical Society; 1957.
17. Mclean J.E, Bledsoe B.E. Behaviour of metals in soils. Washington, DC: US EPA/Ground Water Issue; 1992. EPA/540/S-92/018.
18. Mehra O.P, Jackson M.L. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clay and Clay minerals*. 1960; 7(88): 315-342.
19. Mejía M. Caracterización mineralógica de los suelos tropicales de la reserva forestal de la Universidad Agraria de la Selva por difracción de rayos x y espectroscopia Mössbauer. [Tesis de pregrado]. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos; 2011.
20. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. Clasificación de las tierras del Perú. Lima: ONERN; 1982.
21. Rojas A. Criterios para la interpretación del análisis mineralógico de arcillas. Seminario-Taller "Fundamentos para

- la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego". Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo; 1991.
22. Yuan T.L. Determination of exchangeable hydrogen in soils by a titration method. Soil Sci. 1959; 88: 164-167.