

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**ALTERNATIVA PREDICTIVA DE LA SATURACIÓN EN BASES EN  
SUELOS ÁCIDOS**

**por**

Álvaro Ismael CALIFRA SANGUINETTI

Tesis presentada como uno de los requisitos para  
obtener el título de Magíster en Ciencias Agrarias  
Opción Ciencias del Suelo

**MONTEVIDEO**

**2012**

**UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY  
FACULTAD DE AGRONOMIA**

**PROGRAMA DE POSGRADO  
MAESTRIA EN CIENCIAS AGRARIAS-OPCIÓN CIENCIAS DEL  
SUELO**

Tesis aprobada por:

-----  
Nombre completo y firma

-----  
Nombre completo y firma

-----  
Nombre completo y firma

Fecha: -----

Autor: -----  
Nombre completo y firma

Director: -----

## **Agradecimientos**

A los Ingenieros Agrónomos Artigas Durán, Mónica Cadenazzi, por guiarme en este trabajo.

A Todos mis compañeros del Departamento de Suelos y de maestría, muchos de los cuales fueron mis alumnos en Edafología, por haberme apoyado en la consecución de la formación académica; particularmente a Andrés Beretta, Amabelia del Pino y Jorge Hernández..

## **Dedicatoria**

A mi señora esposa Ana, nuestros hijos: Nicolás, Luciana y Carlos, por estar siempre junto a mí y apoyarme en todas mis decisiones.

Una vez que nos proponemos algo, sacrificamos tiempo, dedicación en pro de ese objetivo. Inexorablemente resultan menores en cantidad o calidad los espacios y tiempos para quienes comparten nuestra vida. Sin perjuicio de ello, una vez alcanzada la meta, el fruto de haberla logrado es mérito de todos quienes de una forma u otra colaboraron en ella. La enseñanza que nos deja es conocer el camino a recorrer para lograr un nuevo propósito ... afortunadamente siempre habrá uno diferente.

## Contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	13
1.1	Capacidad de intercambio catiónico .....	14
1.2	Saturación en bases .....	14
1.3	Sistemas de clasificación de suelos .....	16
1.4	OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN .....	18
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1	¿CÓMO y por QUÉ medir LA CIC Y LA CORRESPONDIENTE V?.....	21
2.2	Origen de la acidez del suelo .....	23
2.3	Acidez .....	25
2.3.1	Acidez Activa .....	26
2.3.2	Acidez potencial .....	28
2.3.3	Acidez intercambiable .....	30
2.3.4	Acidez no intercambiable .....	34
2.4	Nivel de saturación (V) y el pH .....	37
3	MATERIALES Y MÉTODOS .....	41
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	46
4.1	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA .....	46
4.2	ANÁLISIS MULTIVARIADO .....	60
4.2.1	Análisis de Componentes principales .....	60
4.2.2	Agrupamiento o Clúster .....	63
4.2.3	Correlación .....	71
5	CONCLUSIONES .....	77
6	BIBLIOGRAFÍA .....	79
7	ANEXO .....	86



## INDICE DE DE CUADROS Y FIGURAS

### Cuadros

Cuadro 1: Representación de los tipos de acidez y sus componentes .....	24
Cuadro 2: Interpretación del $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$ .....	25
Cuadro 3: Capacidad de intercambio catiónico efectiva y $\text{pH}$ promedio de los órdenes del Soil Taxonomy .....	27
Cuadro 4: Unidades Cartográficas que comprenden suelos ácidos de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay - Clasificación de los suelos por el Soil Taxonomy, Durán et al (2004) .....	40
Cuadro 5: Síntesis estadística descriptiva de la muestra de la población de suelos ácidos .....	45
Cuadro 6. Datos pedológicos de algunos suelos de Brasil .....	56
Cuadro 7: Autovalores generados a partir de las variables efectivamente medidas en el suelo .....	58
Cuadro 8: Ejes de correlación entre las diferentes variables .....	59
Cuadro 9: Valores medios de diferentes variables de suelos ácidos en tres agrupamientos por distancia euclidiana .....	64
Cuadro 10: Comparación de la $\text{CIC}_e$ estimada por modelos de Seybold y Grossman en Alfisoles, Ultisoles, clases de actividad “Semiactiva” y “Activa” del Soil Taxonomy vs los valores medios de $\text{CIC}_e$ obtenidos por los tres agrupamientos: 1, 2 y 3 .....	67
Cuadro 11. Contingencia entre la clasificación de suelos por valores estimados a partir de la aplicación del modelo (5) y la utilización de criterios apoyados en datos analíticos y morfológicos contenidos en la Clasificación de Suelos del Uruguay, 1976 .....	76

### Figuras

Figura 1: Distribución de suelos ácidos a nivel global.....	18
Figura 2: Relación entre la saturación en bases (V) y el $\text{pH}$ en diferentes materiales del suelo .....	36
Figura 3: Distribución de los perfiles de suelo estudiados .....	42
Figura 4: Distribución del contenido de Carbono orgánico y arcilla de las distintas muestras analizadas .....	52
Figura 5: Distribución del contenido de óxidos de hierro y $\text{CIC}_{\text{Ac}}$ de las distintas muestras analizadas .....	52
Figura 6: Distribución de la suma de bases y clases de $\text{pH}$ de las distintas muestras analizadas .....	55
Figura 7. Distribución en clases de los contenidos absolutos de Al intercambiable y su valor como porcentaje de la $\text{CIC}$ efectiva .....	55
Figura 8. Frecuencia de muestras de suelo pertenecientes a clases la capacidad de intercambio estimadas de con diferentes soluciones. $\text{CIC}_e$ : KCl (suma de bases más aluminio); $\text{CIC}_{\text{pH}7}$ : acetato de amonio 1 N ( $\text{pH}7,0$ ); $\text{CIC}_{\text{pH}8,2}$ : cloruro de bario 1 N – TEA ( $\text{pH}$ : 8,2) .....	57
Figura 9: Expresión gráfica de las variables de los suelos ácidos y ubicación los mismos suelos respecto a los Componentes 1 y 2 .....	61
Figura 10: Esquema gráfico del agrupamiento por distancia Euclidea (Ward), de horizontes subsuperficiales de suelos ácidos .....	63

Figura 11: Horizontes subsuperficiales de suelos ácidos según clases de actividad de fracción arcilla de acuerdo al Soil Taxonomy .....	70
Figura 12: Relación entre la saturación en bases efectiva ( $V_e$ ) y la saturación en bases a pH:8,2 ( $V_{8,2}$ ) en las muestras de horizontes subsuperficiales estudiados .....	72
Figura 13: Residuos estandarizados entre los valores predichos por la aplicación del modelo establecido entre las variables $V_e$ y $V_{8,2}$ y los valores efectivamente observados de $V_{8,2}$ .....	73



## RESUMEN

La Clasificación de Suelos del Uruguay, 1976 (CSROU, 1976), en el Orden de suelos Desaturados-Lixiviados, emplea el valor de la saturación en bases (V) como criterio para diferenciar los Grandes Grupos (GG): Luvisoles y Acrisoles, aproximados a Alfisoles y Ultisoles del Soil Taxonomy (SSS, 2010) y Alisoles, Acrisoles del World Reference Base (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2006). Ello supone necesariamente, la estimación de la cantidad de cationes básicos (suma de bases: SB) y ácidos (Al e H) en el complejo de intercambio. En materiales de suelo con cargas variables, los valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC) obtenidos, son diferentes dependiendo en gran medida de la técnica utilizada. El desarrollo de este fenómeno, obedece principalmente al efecto que diferentes soluciones químicas empleadas y su pH final (7,0 y 8,2), ejercen sobre los materiales intercambiadores. Si la interacción: solución – material intercambiador, promueve la ionización de cargas negativas, por encima de las que tenía el suelo en su estado natural, se incrementa la CIC, sobre valorando la estimación. Ocurre lo contrario, cuando la interacción de la solución empleada disminuye el número de cargas ionizadas, resultando una subvaloración del valor real de la CIC. Con el propósito de encontrar criterios alternativos que requieran menos tiempo y menor costo, a los que transforman el estado natural del suelo, se utilizaron métodos estadísticos descriptivos, análisis multivariado (componentes principales y agrupamiento) y correlación, en horizontes sub-superficiales de 49 suelos diferentes. La metodología facilitó la generación de modelos para estimar la V. La  $V_e$  es la proporción de bases que ocupan el complejo de intercambio y surge del cociente entre la suma de bases y las posiciones de intercambio medida con una solución que no modifica el pH. Los modelos obtenidos fueron: (1)  $V_{7,0}$  que responde a la ecuación:  $y = 14,117 e^{0,0166x}$  ( $r^2 = 0,8506$ ), (2)  $V_{8,2}$  que responde a la ecuación:  $y = 9,6802 e^{0,0172x}$  ( $r^2 = 0,8202$ ), siendo  $x$  la saturación en bases efectiva ( $V_e$ ). La aplicación de estas ecuaciones permite deducir que los valores 75% y 95% de  $V_e$  se corresponden a 35% y 50% de  $V_{8,2}$ ; criterios vigentes establecidos por la CSROU, para diferenciar los Grandes Grupos: Acrisoles de Luvisoles. Se estimó que de utilizar los modelos estadísticos en lugar de las

determinaciones de laboratorio, podría incurrirse en un error menor a 21%. Para diferenciar Acrisoles de Luvisoles, se propone como criterio complementario que los primeros deberían tener, al menos, un 40% de las posiciones de intercambio saturadas con aluminio. El método estadístico de agrupamientos, se mostró promisorio para ser utilizado en una clasificación de suelos sin intervención humana. Sin embargo, todavía está lejos de sustituir la capacidad de integración y análisis de una persona, y solamente puede utilizárselo en forma complementaria.

## SUMMARY

Soil Classification of Uruguay, 1976 (CSROU) in the “Saturados Lixiviados” Order, uses the value of base saturation (V) as distinguishing criterion among soil Great Groups (GG): “Luvisoles” and “Acrisoles”, equivalent to Alfisols and Ultisols of the Soil Taxonomy (SSS, 2010) and Alisols, Acrisols in the World Reference Base (IUSS Grupo de Trabajo WRB,2006). This necessarily implies the estimation of: amounts of base and acidic cations in the soil exchange complex. In soils with variable charge clay minerals Cation Exchangeable Capacity (CEC) values obtained are different depending on the technique used. The development of this phenomenon is due to the influence that different chemical solutions used, and their final pH (7.0 and 8.2), exert on soil material exchangers. If the interaction: solution - exchanger material, promotes the ionization of negative charges above the level presented in the soil in its natural state, and it increases the CEC, producing an over estimation. The opposite occurs when the interaction of the solution used decreases the number of ionized charges, resulting in an underestimation of the actual value of the CEC. In order to find alternative approaches to those that transform the natural state of soil, statistical descriptive, multivariate analysis (principal components and cluster analysis) and correlation methods were used in subsurface horizons from 49 different soils. It was found that the  $V_{7,0}$  responds to the equation: (1)  $y = 14.117 e^{0.0166 x}$  ( $r^2 = 0.8506$ ), and  $V_{8,2}$  to the equation: (2)  $y = 9.6802 e^{0.0172 x}$  ( $r^2 = 0.8202$ ), x being the effective base saturation ( $V_e$ ). Applying these equations it is possible to conclude that the values 75% and 95% for  $V_e$  correspond to 35% and 50%  $V_{8,2}$  (current criteria established by the CSROU to differentiate GG: Acrisoles from Luvisoles). The incurred error, using statistical models rather than laboratory determinations, could be less than 21%. To complement the classification criteria it is suggested that in order to differentiate Acrisoles from Luvisoles, the first should have at least 40% of the saturated exchange positions with Al. It was found that the main variables responsible for the variability of CEC in subsurface horizons of acid soils, and therefore both the V are: the quantity and mineralogical composition of the clay fraction. Clustering statistical method, showed promise

for use in a soil classification without human intervention. However, it is still far from replacing the integration and analysis capacity of a person, and it can be used just in a complementary manner.

## **1 INTRODUCCIÓN**

Los suelos son entes naturales complejos, con propiedades y características mayoritariamente cuantitativas. Para ordenar su conocimiento y mejorar su comprensión se han construido sistemas de clasificación, basados en características y propiedades observables y mensurables. La observación sistemática y reiterada de perfiles de suelo: sucesión vertical de capas y horizontes así como del entorno donde se desarrollan, han contribuido a definir entidades morfométricas (horizontes, con propiedades y nomenclatura respectiva). Para facilitar su comprensión, las propiedades son agrupadas en físicas, químicas, mineralógicas y biológicas.

Los criterios utilizados para distinguir diferentes tipos de horizontes implican la descripción morfológica, obtención de muestras y aplicación de técnicas de laboratorio. El conjunto de datos y criterios así reunidos, son analizados racionalmente y por lo común utilizados en forma jerárquica para: inferir génesis, diseñar y establecer clasificaciones, evaluar y predecir su comportamiento y productividad ante diferentes usos, manejos y empleo de tecnologías.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC o “T”) y la saturación en bases (SB o “V”) son propiedades químicas relacionadas con la capacidad de los suelos de sostener el crecimiento vegetal, mantener los nutrientes disponibles, contrarrestar el efecto de las precipitaciones ácidas y atrapar metales pesados tóxicos (Raduns, 2004). La capacidad del suelo de atraer y retener cationes, e intercambiarlos reversiblemente a través de reacciones químicas con los que se encuentran presentes en la solución del suelo, es una cualidad de importancia para evaluar la capacidad de suministro de nutrientes, el poder de absorción de elementos contaminantes y efectuar estudios de génesis y clasificación (Buol, 1997).

## 1.1 CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

La capacidad de intercambio catiónico de los suelos ( $CIC_s$ ) es definida como la suma de cargas negativas que un suelo posee a un pH específico, y que son capaces de retener iones de signo positivo (cationes). La  $CIC_s$  se expresa en centimoles de carga por kilogramo de suelo seco a estufa ( $cmol_c kg^{-1}$ ).

Según Durán (2004), los suelos más ácidos del territorio, por lo común se desarrollan a partir de areniscas, a veces de rocas metamórficas o ígneas muy meteorizadas. Los niveles de materia orgánica son frecuentemente inferiores a 2%, los de óxidos de hierro entre 0,5 a 4,0 % y hay mezclas de minerales arcillosos de cargas variables (1:1) y permanentes (2:1); aumentando la proporción de los segundos en profundidad. En estos suelos, la relación óxidos:arcilla es 0,06 o superior, lo cual junto a la relativamente baja actividad química de los filosilicatos arcillosos y la presencia de aluminio en el complejo de intercambio, evidencian una alteración química más avanzada, un mayor período de acción de los procesos edafogénicos, o ambos. El sistema de intercambio catiónico se aproxima al tipo mixto, de minerales arcillosos silicatados laminares con revestimientos de óxidos.

## 1.2 SATURACIÓN EN BASES

La saturación en bases es la proporción de posiciones de intercambio ocupadas o neutralizadas por cationes alcalino térreos como calcio ( $Ca^{+2}$ ) y magnesio ( $Mg^{+2}$ ) y alcalinos potasio ( $K^+$ ) y sodio ( $Na^+$ ), considerados globalmente como “bases” intercambiables. Además de los cationes citados, en algunos suelos pueden encontrarse iones de aluminio ( $Al^{+3}$ ) y en menor medida hidrógeno ( $H^+$ ). El concepto de saturación de bases es importante, porque la proporción de ácidos y bases en el complejo de sitios de intercambio, determina el pH del suelo. Cuando el número de iones  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $K^+$ , y  $Na^+$  disminuye y aumenta el número de iones  $H^+$  y  $Al^{+3}$ , disminuye el pH.

El porcentaje de saturación en bases (V) se calcula de la forma siguiente:

$$V = \frac{\sum \text{cmol}_c \text{Ca}^{+2}, \text{Mg}^{+2}, \text{K}^+, \text{Na}^+ \text{ kg}^{-1} \cdot 100}{\text{cmol}_c \text{CIC kg}^{-1}}$$

El problema es que el valor que puede tomar la CIC es variable y depende de varios factores. Uno de ellos es el propósito o finalidad que tenga la medición. Cuando se pretende evaluar la fertilidad natural de un suelo se toman muestras de los primeros centímetros de profundidad. Allí se concentra la mayor cantidad de raíces de la mayoría de los cultivos y es en ese entorno donde el suelo reúne propiedades más favorables a la producción vegetal. Por tal motivo, la mayoría de las determinaciones de este parámetro provienen de la superficie del suelo. Los técnicos que solicitan este tipo de análisis, en general, son agrónomos interesados en efectuar una evaluación de la fertilidad natural a efectos de aplicar fertilizantes o efectuar enmiendas tendientes a satisfacer las necesidades de las plantas, hacer más eficiente la absorción de nutrientes y mantener o mejorar la productividad y salud del suelo.

Smith (1986), menciona que los edafólogos están interesados en conocer propiedades del suelo relativamente constantes; que reflejen ambientes e intensidad de procesos que dieron lugar su formación y evolución. Por estas razones, Rhoades, (1982) prefiere que las determinaciones se efectúen en las porciones menos afectadas por el uso del suelo y con soluciones de referencia es estandarizadas a efectos de poder realizar comparaciones.

La finalidad de utilización del valor de la CIC influye en la selección de la técnica empleada, ya que los distintos especialistas requieren informaciones diferentes.

Buol (1997), señala que las medidas de CIC son bastante empíricas y los distintos métodos analíticos empleados dan resultados diferentes (Chapman, et al., citados por Buol (1997)). Las técnicas analíticas empleadas en la determinación se diferencian en el pH de la solución salina empleada, la carga y tamaño del catión utilizado para desplazar los iones presentes en el suelo y la concentración de la misma.

Otra fuente de variación en los resultados obtenidos surge de la neutralización de las cargas permanentes en las micas como biotita, vermiculita y muscovita, las cuales retienen con particular afinidad al  $\text{NH}_4^+$  o el  $\text{K}^+$  entre sus láminas constituyendo una absorción altamente selectiva.

En suelos ácidos hay una proporción de sitios de intercambio bloqueados por polímeros de aluminio, fuertemente adsorbidos, que tienen carga positiva. Cuando el pH se eleva, esos polímeros precipitan como  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , liberándose sitios de intercambio que ahora pueden participar en reacciones de intercambio normales. En forma similar, sitios de carga negativa, también pueden ser neutralizados por la absorción de cargas de partículas minerales de carga positiva, tales como óxidos de hierro. En esas partículas, las cargas positivas se originan de la adsorción específica de protones en las superficies de óxidos/hidróxidos, y su magnitud depende críticamente de la fuerza de ionización y del pH de la solución. Tal carga es substancialmente neutralizada a pH mayores o iguales a 7,0 (Rhoades, 1982).

### 1.3 SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Los sistemas de clasificación de suelos de más amplia utilización a nivel mundial son: la Taxonomía de Suelos (ST) y la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB).

La Clasificación de Suelos del Uruguay, MGAP, 1976, (CSROU), entre otros, se apoya en criterios morfológicos y analíticos previamente generados y utilizados en los sistemas de clasificación de difusión internacional. Los criterios morfológicos, se basan en la presencia, ausencia y combinación de horizontes diagnóstico (HD). Los HD, a su vez, son creaciones humanas definidas por criterios morfométricos y analíticos. Los segundos, se definen sobre muestras elegidas en base a la aplicación de los criterios previamente citados y consisten en clases, también creadas por el hombre, elaboradas sobre datos obtenidos a través de diferentes técnicas de laboratorio. Uno de tales criterios, es la saturación en bases (V).



Buscando criterios para separar los suelos que podrían ser utilizados en agricultura permanente de aquellos que no admitían más que una agricultura itinerante y disponiendo de un número de datos de análisis de suelos limitado, en EE.UU se alcanzó la conclusión de que la saturación en bases de 35% podría constituir ese límite (Smith, 1986). En el ST se diferencian los órdenes Alfisoles de Ultisoles por ese valor de V, utilizando para su determinación una solución de BaCl<sub>2</sub> TEA (pH<sub>8,2</sub>). En el ST, la V, también es tomada en cuenta para definir el epipedón mólico con una solución de AcONH<sub>4</sub> 1 M (pH<sub>7,0</sub>).

En el WRB, la V<sub>7,0</sub> es utilizada para definir los Phaeozems (suelos con elevado contenido de materia orgánica, de elevada fertilidad natural). Así mismo, se los utiliza para definir y establecer diferencias entre varios horizontes diagnóstico: Hórticos, Mólico, Úmbrico, Plágico, Sómbrico, Sáfico, Térrico, Thiónico y Vorónico. Por otra parte, además, la V<sub>7</sub> es utilizada por el WRB en la definición de: Alisoles, Acrisoles, Luvisoles, Albeluvisoles, Cambisoles, Umbrisoles y Lixisoles, así como en otras categorías de menor jerarquía relativa. En todos los casos el método químico empleado es el de AcONH<sub>4</sub> 1 M (pH<sub>7,0</sub>).

En la Clasificación de Suelos del Uruguay, MGAP (1976), de aquí en más: CSROU (1976), se utilizan los mismos criterios del ST para separar los Alfisoles de Ultisoles para hacer lo propio entre los Luvisoles de los Acrisoles. Estos Grandes Grupos en general constituyen los suelos más ácidos de nuestro territorio.

En los análisis estándar de caracterización de suelos del Uruguay no se incluye como determinación de rutina la acidez titulable con solución de BaCl<sub>2</sub> - tri - etanol amina tamponada a pH 8,2 por lo que la disponibilidad de información sobre esta variable es muy limitada (Durán y García, 2007).

Los métodos empleados generalmente, como soluciones mono-iónicas, fuertemente concentradas, modifican las condiciones naturales en las que se encuentran los suelos en su estado natural. Tales modificaciones provocan cambios en la concentración de solución del suelo y en su pH. Éstos a su vez promueven cambios en el comportamiento de constituyentes del suelo. Algunos constituyentes, muestran una particular afinidad con elementos de las soluciones empleadas afectando los resultados que se darían en condiciones naturales. A veces las soluciones pueden solubilizar sales como carbonatos, afectándose el

número de cargas operativas y las propias condiciones de la estimación. Los componentes con mayor proporción de cargas variables o dependientes del pH pueden experimentar una menor o mayor disociación de sus cargas, dependiendo de las condiciones a las que se los someta. Por las razones expuestas, según donde y como sea estimada esta propiedad su resultado variará. Además, los métodos tradicionalmente empleados, insumen tiempo, dinero y a veces no resultan amigables con el ambiente (Ross, 1995). Por tal motivo, varios autores: Manrique (1991), Ávila (1999), Skinner (2001), Seybold y Grossman (2005, 2006), Durán y García (2007), han propuesto alternativas estadísticas para estimar la CIC para facilitar procedimientos y lograr clasificaciones útiles y robustas.

#### 1.4 OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

El objetivo general de este trabajo es contribuir a generar criterios de clasificación a través de metodologías simples en suelos de reacción ácida o moderadamente ácida del Uruguay.

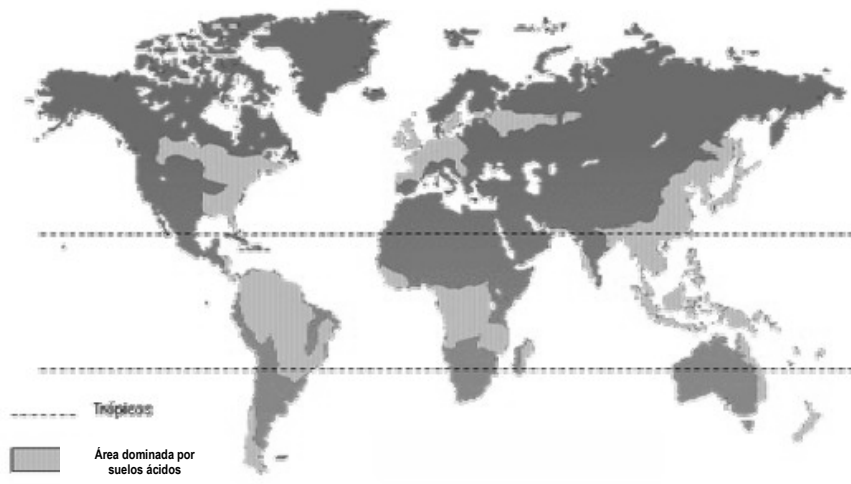
A su vez, se pretende promover la utilización de pautas sostenidas en propiedades y características intrínsecas de los suelos. Se procura que las medidas que se efectúan sobre los materiales de suelo tengan el menor impacto posible y conformen los intereses de a taxónomos y agrónomos.

Para realizar una gestión del territorio sostenible, es necesario relevar los suelos y clasificarlos por sus características, propiedades y condición. En forma paralela a las tareas de relevamiento, se observan y registran hechos y fenómenos de suma utilidad para evaluar las tierras. Finalmente, reuniendo la información de campo y laboratorio así como resultados de la investigación aplicada, se adjudica la aptitud que tiene cada unidad de paisaje-suelo para desarrollar un uso específico o una secuencia planificada, hasta elaborar un sistema de utilización de la tierra sostenible acorde a las necesidades y escala del proyecto. En este proceso se deben tener presentes las necesidades sociales así como la disponibilidad económica para articular y aplicar las tecnologías más apropiadas, tendientes a mejorar o mantener la calidad de vida de los habitantes y el territorio.

El mayor y más profundo conocimiento de la génesis de los suelos, paisaje asociado y distribución espacial son informaciones valiosas para analizar las relaciones ambiente - sociedad. Ese análisis, a su vez, facilita la elección responsable de usos y técnicas tendientes a prevenir su eventual deterioro y pérdida de productividad. Uno de los grupos de suelos más frágiles de nuestro territorio (Cayssials y Álvarez, 1984) y también a escala global, es el de aquellos generalmente asociados a pendientes pronunciadas, bajos contenidos de materia orgánica, empobrecidos en bases intercambiables y minerales alterables, marcada diferenciación textural, elevada acidez efectiva y baja actividad del complejo de intercambio, con un baja proporción de minerales arcillosos 2:1, y en general de texturas “gruesas” en las capas u horizontes superficiales. Por reunir varias de las propiedades mencionadas, una considerable proporción de estos suelos cumple con criterios suficientes para clasificarlos como Alfisoles y Ultisoles en el ST (2010), Alisoles y ocasionalmente Acrisoles en el WRB (2006) y Luvisoles o Acrisoles en la CSROU (1976). La sola cita de los sistemas de alcance internacional, sugiere que han sufrido actualizaciones permanentes. Mientras tanto, la CSROU no ha sido modificada desde su creación. No se conocen otras propuestas de definición, supresión o mejora y perfeccionamiento de categorías, que las sugeridas por Durán y García (2007).

Los suelos pertenecientes al Orden Desaturados Lixiviados, al nivel del conocimiento actual de los suelos del Uruguay, tienen una extensión relativamente pequeña frente a la que adquiere en otras regiones de América del Sur y el mundo Durán *et al.*, (2003).

Osorio (2003), menciona que el área total afectada por acidez del suelo representa 57% de los trópicos, siendo América Latina la región geográfica con mayor cantidad de suelos ácidos con niveles de aluminio no tóxico y potencialmente tóxico (Figura 1).



Adaptado de Van Wambeke, 1976 por Osorio, N; 2009

Figura 2: Distribución de suelos ácidos a nivel global

La importancia de estudiar estas tierras en el Uruguay no proviene entonces de la extensión sino por la fragilidad de las mismas. Informes recientes, a nivel detallado sobre tierras destinadas a uso forestal, sugieren que la extensión de estos suelos en la unidad Algorta de la CRSU puede ser mayor a la hasta ahora conocida (Califra *et al.*, 2007). Similarmente ocurriría en base a investigaciones preliminares realizadas en suelos influenciados y/o formados por rocas ígneas y metamórficas del zócalo cristalino, aunque la información aun disponible es muy escasa para poderlo confirmar. Por otra parte, Petraglia y Dell'Acqua (2004), reportan que la mayor parte de la forestación industrial nacional se desarrolla en los Departamentos Rivera y Tacuarembó donde los suelos de reacción ácida son muy abundantes.

## **2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### 2.1 ¿CÓMO Y POR QUÉ MEDIR LA CIC Y LA CORRESPONDIENTE V?

Martínez et al., (2008) dicen que la CIC es una propiedad química del suelo estrechamente vinculada a su fertilidad, depende de los coloides inorgánicos (arcillas cristalinas, geles amorfos, óxidos y sesquióxidos de hierro y aluminio) y del contenido de materia orgánica del suelo (MOS). La mayoría de los suelos tienen una carga permanente y otra carga que varía con el pH (Krull *et al.*, citado por Martínez, 2008), observándose un aumento de la CIC con el pH, por lo que la CIC total se mide a pH 8,2 de acuerdo a Tan y Dowling, citados por Martínez *et al.* (2008).

En el suelo hay cuatro fuentes generales de origen de la CIC: la sustitución isomórfica en las estructuras cristalinas, los bordes de ruptura de minerales arcillosos, la desprotonización de grupos funcionales de la MOS, y la de las cargas en la superficie de óxidos e hidróxidos (Zelazny et al., 1996, citado por Ávila 1999).

Los sistemas de clasificación de suelos utilizan criterios numéricos relativos a la CIC, la proporción de bases en el complejo de intercambio (V), en algunos casos la proporción de aluminio (como en la CSROU) y en otros se complementan con la actividad del complejo coloidal y composición mineralógica de la fracción menor a 2  $\mu\text{m}$ , como en el ST.

Según el método empleado en la determinación de la CIC resultarán valores diferentes para una misma muestra de suelo (Ngewoh, Hendershot *et al.*, citados por Finzi, 1998). Como consecuencia, el resultado de la CIC afectará los valores de V.

El desplazamiento de bases por parte de una solución concentrada monoiónica estima el número y tipo de bases que, en el instante del muestreo, posee una muestra de suelo en su complejo de intercambio. A su vez, ello facilita la valoración de las posiciones de intercambio totales que posee el suelo, (Rhoades,

1982; Tisdale, 1985). Las interacciones de las soluciones con los distintos tipos de suelo arrojan diversos resultados (de Villiers y Jackson, 1967).

Los edafólogos pretenden evaluar las propiedades de los suelos en aquellas porciones del perfil menos intervenidas por prácticas agrícolas modificadoras de las características del suelo, prefiriendo medir algunas de ellas en horizontes alejados de la superficie, (Buol, 1997; Smith, 1986). Los especialistas mencionados, además, procuran estandarizar los métodos de análisis aplicando el mismo tipo de solución a todas las muestras de suelo independientemente de su origen y condición ambiental.

Ross (1995), menciona que los agrónomos están interesados en conocer el comportamiento de los suelos frente a distintos cultivos, a los efectos de:

- a) Incrementar la disponibilidad de nutrientes,
- b) Mejorar la eficiencia del uso de fertilizantes,
- c) Optimizar la dosificación física y económica de fertilizantes,
- d) Realizar planes de fertilización, procurando alcanzar un balance de nutrientes entre las extracciones y reposiciones. Para lograr estos objetivos, prefieren utilizar soluciones salinas que no modifiquen las condiciones originales del suelo y determinen efectivamente las propiedades en las mismas circunstancias productivo-ambientales y en horizontes superficiales que es donde hay mayor enraizamiento.

Los diferentes enfoques y propósitos mencionados, hacen que los grupos de profesionales mencionados (edafólogos y agrónomos), se inclinen por la selección de metodologías que utilizan: a) soluciones que modifican el pH del suelo llevándolos a un valor estándar, como el  $\text{AcONH}_4$  a  $\text{pH}_7$  (Schollenberger, 1927) y  $\text{BaCl}_2$ -trietanolamina a  $\text{pH}_{8.2}$  (Mehlich, 1939); y b) soluciones que sustancialmente no lo hacen como el  $\text{KCl}$  y  $\text{BaCl}_2$ , (Gillman y Sumpter, citados por Rhoades, 1982).

La solución salina más ampliamente utilizada a nivel mundial para estimar la CIC y por consiguiente la determinación de la V, es la de  $\text{AcONH}_4$  (Rhoades, 1982; Buol, 1997; Smith, 1986). Esta solución impone al suelo un pH final igual a 7,0 ( $\text{AcONH}_4$  1M  $\text{pH}_7$ ). Varios autores (Van Raij, Fox, citados por Uehara y

Gillman, 1981), han reportado la inconveniencia de este método para suelos con cargas dependientes del pH.

Fauziah *et al.* (1997) reportó que en materiales ácidos con cargas dependientes del pH, la solución de AcONH<sub>4</sub> 1M tamponada a pH 7 sobreestima la CIC. En tales suelos, resulta menos apropiada aún la solución de BaCl<sub>2</sub>-TEA ya que ésta, modifica el pH a un valor más alejado (8,2) de su condición original (en general menor a 5,5 – 5,2).

El concepto de suelo “saturado” viene siendo utilizado desde que en 1933 Bradfield y Allison (citados por Thomas, 1977), luego de haber observado que la mayoría de los suelos agrícolas (europeos) son predominantemente saturados en Ca, y que un suelo calcáreo puede mantenerse sin que se disocien sus carbonatos con una atmósfera saturada en CO<sub>2</sub> de 0,0003 bars. En las condiciones descritas, el pH alcanza un valor de 8,3. Por lo que un suelo estaría “saturado en bases” en las circunstancias mencionadas. Si bien esta visión es -en teoría- compartida, en áreas de suelos ácidos no resulta práctico saturar un suelo con una atmósfera de 0,0003 bars de CO<sub>2</sub>.

Teniendo en cuenta los comentarios previos, el concepto de saturación en bases resulta difícil de aplicar y de escaso valor relativo. Smith (1996) comenta “que no sabe que es lo es lo más importante: “que un suelo se encuentre saturado o la cantidad de bases que posea el mismo”. Sin embargo, en el corto plazo, cuanto mayor sea la cantidad de cationes básicos intercambiables, más acidez puede ser neutralizada. Esto se conoce como poder buffer, tampón o amortiguador de la acidez del suelo.

## 2.2 ORIGEN DE LA ACIDEZ DEL SUELO

Los suelos son ácidos debido a la escasez de cationes básicos tales como calcio, magnesio, potasio y sodio en el material de origen o por los procesos pedogenéticos que favorecen la pérdida de ellos, (Catani y Gallo, citados por Da Silva, 2006). El desarrollo de la acidez es un proceso que ocurre a medida que los cationes básicos adsorbidos en el complejo coloidal van siendo desplazados a la

solución de suelo por iones  $H^+$  y de alguna manera fueron retirados del medio. De esta manera, cuanto menor resulte la capacidad de intercambio catiónico ocupada por cationes básicos, más ácido resultará el suelo.

Se considera que un material de suelo es ácido cuando su pH está por debajo de 7,0 (Spósito, 1989). El mismo autor dice que en condiciones naturales y clima húmedo hay una tendencia constante a la acidificación del suelo por dos mecanismos principales:

a) el suministro de iones  $H^+$ , procedentes sobre todo de la disociación del ácido carbónico, formado por disolución del  $CO_2$  desde el aire y el suelo, de acuerdo a la siguiente ecuación:



b) La entrada del ácido carbónico por el agua de lluvia. Esta reacción sólo se evidencia en los suelos con pH elevado, volviéndose menos importante a medida que los suelos se van acidificando y probablemente se torna insignificante a valores de pH inferiores a 5,2 (Spósito, 1989). Por otro lado, hay un empobrecimiento progresivo de cationes básicos, ya que, aquellos que son desplazados a la solución del suelo, pueden perderse en aguas de percolación a través el suelo más allá del perfil. De forma tal que si no hay una restitución de las bases retiradas o perdidas, se sucederá una acumulación de progresiva de  $H^+$  (Helyar, citado por Da Silva, 2006).

Aunque la acidez del suelo es causada principalmente por el ácido carbónico, también puede resultar de: a) las reacciones de intercambio por el contacto entre el hidrógeno intercambiable de las raíces de las plantas y las bases de intercambio del suelo; b) oxidación microbiológica del nitrógeno (N) y azufre (S); c) radicales de ácidos de ciertos fertilizantes (principalmente fuentes de nitrógeno (N) amoniacal, como el cloruro de amonio y sulfato de amonio; d) disociación de grupos  $COOH$  y  $OH$  de la materia orgánica; e) disociación de  $H^+$  expuestos en los radicales  $O^{2-}$  y  $OH^-$  en los bordes fractura de los minerales de la arcilla.



### 2.3 ACIDEZ

Desde el punto de vista químico se define a los ácidos como sustancias que en solución liberan protones ( $H^+$ ), y las bases son sustancias capaces para recibir los protones (Lewis, citado por Da Silva, 2006).

Las reacciones ácido-base se procesan de tal manera que un suelo ácido se encuentra en la presencia de una especie capaz de aceptar un protón  $H^+$  y un suelo básico se encuentra ante la presencia de una especie capaz de donar un protón  $H^+$ .

A los procesos que determinan la acidez le confieren una mayor complejidad la interacción de muchos fenómenos, algunos de los cuales dependen de la propia variación del pH en la solución que involucra las partículas sólidas, la diversidad de cationes y aniones en reacciones de intercambio y factores tales como la naturaleza del material coloidal.

La acidez del suelo está representada de dos maneras diferentes: a través de la acidez activa y acidez potencial (Van Raij y Quaggio, citados por Da Silva, 2006). La última a su vez se subdivide en acidez no intercambiable y acidez intercambiable, las cuales, brevemente se definen en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Representación de los tipos de acidez y sus componentes.

Tipo de acidez	Componentes acidez
Activa	$H^+$ de la solución del suelo
Acidez potencial	H del enlace covalente + $H^+$ intercambiable + $Al^{+3}$ intercambiable
Acidez Intercambiable	$Al^{+3}$ acidez intercambiable + $H^+$ intercambiable, cuando existe
La acidez no intercambiable	H de enlace covalente

Fuente: Adaptado de MELO (citado por Da Silva, 2006)

En resumen, para los coloides minerales del suelo, la resistencia a la neutralización de la acidez activa (pH), resulta de la movilización o ionización de la acidez potencial, la cual surge de la naturaleza de los mismos.

### 2.3.1 Acidez Activa

La acidez activa constituye la actividad de iones hidrógeno ( $H^+$ ) que se encuentran libres o disociados en la solución del sistema suelo-agua. Ese hidrógeno se encuentra en equilibrio con la acidez de fase sólida.

Como normalmente esa concentración es poco importante, se representa por logaritmo de su cociente, propuesta por Sørensen, denominado índice de pH; así el  $pH = \log 1 / [H^+]$ ; una concentración neutra de  $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7} = pH = 7,0$ , por lo tanto pH inferior a 7,0 representa acidez y por encima del valor equivalente a la neutralidad representa alcalinidad (Spósito, 1989). En el Cuadro 2 se indican las diferentes categorías de reacción del suelo de acuerdo a rangos en los valores de pH.

Cuadro 2: Interpretación del pH<sub>H2O</sub> (relación suelo: agua 1:2,5 - masa: volumen)

Fuente: (Blakemore, citado por Osorio, 2003).

<b>pH<sub>H2O</sub></b>	<b>Categoría</b>	<b>Interpretación</b>
4,5	Extremadamente ácido	Muy bajo
4,5 - 5,2	Fuertemente ácido	Bajo
5,3 - 5,9	Moderadamente ácido	Medio
5,9 - 6,5	Ligeramente ácido	
6,6 - 7,0	Neutral	Alto
7,1 - 7,5	Ligeramente alcalino	
7,6 - 8,3	Moderadamente alcalino	Muy Alto
8,4 - 9,0	Fuertemente alcalino	
>9,0	Extremadamente alcalino	

Según Thomas y Hargrove (1984), la determinación de la acidez en medio acuoso es extremadamente importante, ya que los experimentos muestran que hay diferencias causadas por la relación suelo: agua. Las relaciones suelo: agua pueden variar desde 1:1 a 1:10, pudiendo provocar diferencias, no de gran escala, pero de importancia significativa. Esta variación del pH en diferentes proporciones de suelo: agua, se reduce en el medida en que la proporción disminuye, atribuyéndose este fenómeno la hidrólisis cada vez mayor de cationes intercambiables, debido a la dilución del electrolito y al número reducido de contactos entre el electrodo de pH y las partículas del suelo. Frente a soluciones salinas ocurre una disminución de la capa doble difusa y decrecerán las oportunidades de intercambio entre los cationes intercambiables y las partículas. En general, el pH disminuye ante un incremento en la concentración salina (Pratt, 1966).

El ion H<sup>+</sup> tiene un comportamiento especial, parecido al de los cationes divalentes más débilmente hidratados. La sustitución de otros cationes por H<sup>+</sup> ofrece dificultades cada vez mayores, de acuerdo al material coloidal, en el siguiente orden: caolinita, illita y montmorillonita. Este comportamiento especial muestra una afinidad particular de hidrógeno con diversos puntos de intercambio (Wutke, 1972).

### 2.3.2 Acidez potencial

Se define como aquella que implica no sólo a la hidrólisis de moléculas de agua de los iones de  $Al^{+3}$ , sino también los iones  $H^{+}$  intercambiables y los que siguen combinados en coloides por enlaces de tipo covalente y que puede disociarse (Van Raij y Quaggio, 2001). Entonces la acidez potencial es la suma de acidez intercambiable y la acidez no intercambiable.

En la acidez están involucrados aspectos de intensidad y cantidad, porque una parte de los  $H^{+}$  están en equilibrio en la solución y otra parte están adsorbidos en coloides, de modo que la concentración efectiva de este ion en la solución se expresa comúnmente por el pH, discutido previamente. La cantidad de  $H^{+}$  que el suelo puede liberar durante la neutralización de la acidez es el factor cantidad, y la resistencia a la variación del pH original se llama capacidad tampón (o buffer) constituyendo el factor capacidad de la acidez del suelo (Melo, 1985).

En consecuencia, la acidez potencial es parte determinante de la CIC a pH 7,0, y será tanto mayor cuanto más elevada sea la cantidad de iones  $H^{+}$  y  $Al^{+3}$  que puedan venir a la solución.

Beery y Wilding (1971) encontraron una mayor correlación general entre la V y los valores de pH medidos en suelo con agua ( $pH_{H_2O}$ ) que cuando se los midió utilizando una solución de cloruro de potasio ( $pH_{KCl}$ ) en Molisoles, Alfisoles y Ultisoles. Las correlaciones entre la V y la solución utilizada fueron más bajas aún para los horizontes B que en los A.

El Cuadro 3, resume los valores promedio de  $CIC_e$  y pH en los diferentes ordenes de suelos de Estados Unidos. Los valores promedio de las variables  $CEC_e$  y pH en el Orden Ultisoles son: 3,5 ( $cmol_c\ kg^{-1}$ ) y 5,6; mientras que en los Alfisoles son 9,0 ( $cmol_c\ kg^{-1}$ ) y 6,0. Estos Ordenes abarcan suelos con propiedades y características similares a los Acrisoles y Luvisoles de la CSROU (Durán et al., 2005).

Cuadro 3: Capacidad de intercambio catiónico efectiva y pH promedio de los órdenes del Soil Taxonomy.

Orden de suelos	CIC <sub>e</sub> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	pH
Ultisoles	3.5	5.6
Alfisolos	9.0	6.0
Spodosoles	9.3	4.93
Mollisoles	18.7	6.51
Vertisoles	35.6	6.72
Aridisoles	15.2	7.26
Inceptisoles	14.6	6.08
Entisoles	11.6	7.32
Histosoles	128.0	5.50

Northern Arizona University and the HBCU/MI. 2012.

La acidez potencial de los suelos está constituida por hidrógeno y aluminio ( $H^+$  y  $Al^{+3}$ ), pero solo el Al es un catión intercambiable. De ahí la razón que a la cantidad de aluminio intercambiable también se le llama acidez intercambiable (Van Raij, 1988).

Según Ross (1995), los laboratorios de análisis de suelo (con fines utilitarios agropecuarios), no suelen proporcionar una medida directa de la CIC, sino más bien una estimación basada en las cantidades de  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $K^+$  y  $Na^+$ , extraídos por soluciones como por ejemplo Mehlich 3 y Morgan. Rodríguez y Rodríguez (2002) mencionan que la solución extractiva del primer método citado, (compuesta por 0,2 M  $CH_3COOH$ , 0,25 M  $NH_4NO_3$ , 0,015 M  $NH_4F$ , 0,013 M  $HNO_3$  y 0,001 M EDTA a un pH de 2,5), ofrece la ventaja de poder extraer simultáneamente del suelo P, Ca, Na, K, Mg y micronutrientes como Cu, Zn y Mn (entre otros). Además puede ser empleado para un amplio rango de pH (desde suelos ácidos a suelos de origen calcáreo). Según Wang *et al.* (citados por Rodríguez y Rodríguez, 2002), la estimaciones correlacionan bien con la disponibilidad de varios de estos elementos para las plantas. Eralshidi *et al.*, así como Wanget *al.* (citados por Rodríguez y Rodríguez, 2002) encontraron también altas correlaciones entre los cationes cambiables desplazados con la solución M3 y aquellos desplazados con acetato de amonio en suelos procedentes de distintos puntos de Estados Unidos de Norteamérica.

Ross (1995), reporta que puede haber Al intercambiable en cantidades significativas cuando el pH del suelo es inferior a 5,5, pero no pueden ser medidos con precisión con soluciones tamponadas, causando una subestimación de la

CIC. Para superar esto, muchos laboratorios suelen agregar la acidez intercambiable a la suma de bases (K, Ca, Mg y Na). El mismo autor cita que en forma práctica, frecuentemente, la acidez intercambiable se calcula a partir de una ecuación de regresión entre la acidez desplazada con la solución de KCl 1 M y el requerimiento de cal para elevar el pH hasta un valor dado. Ross (1995) menciona que de hecho en realidad constituye una medida del Al intercambiable, a menos que el suelo de haya sido mezclado con CaCO<sub>3</sub> para enmendar o amortiguar su pH. A estos tipos de mediciones: bases más acidez desplazada con KCl 1 M, se los denomina capacidad de intercambio efectiva (CIC<sub>e</sub>) y resulta razonablemente exacta cuando el pH del suelo es inferior 7,5.

### 2.3.3 Acidez intercambiable

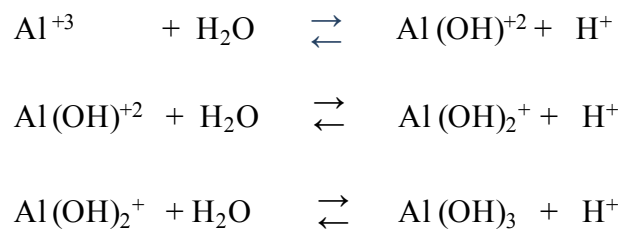
La presencia de aluminio en el complejo de intercambio de los suelos, se asocia a procesos de meteorización física, química y biológica sobre rocas y sedimentos, de intensidad y duración suficientes como para provocar su salida desde las estructuras cristalinas de aluminio-silicatos. El mecanismo de mayor importancia para explicar este fenómeno es la hidrólisis de feldespatos (Duchaufour, 1982, Durán 2003).

El Al<sup>+3</sup> intercambiable es casi el único responsable de la acidez intercambiable, porque la cantidad de H<sup>+</sup> bajo formas intercambiables en los suelos es relativamente muy pequeña. El Al<sup>+3</sup> en grandes cantidades hace que la mayoría de las plantas presenten inhibición del crecimiento (Chao y Harward, 1962; Thomas y Hargrove, 1984).

El comportamiento de acidez intercambiable (los iones Al<sup>+3</sup> y H<sup>+</sup> de la fase sólida, como una proporción de acidez potencial), varía con la naturaleza de los coloides del suelo y la V (Coleman y Thomas, citados por Manrique *et al.*, 1991). La acidez determinada por extracción con 1N KCl, aproximadamente a pH 5,4, es prácticamente la extracción de Al<sup>+3</sup> intercambiable, considerado una forma eficiente de obtener esta determinación, (Paván 1985; Figueiredo y Almeida, 1991).

El ion intercambiable  $\text{Al}^{+3}$  aparece en el suelo de dos maneras: por la disolución de hidróxidos de Al amorfos y cristalinos en medio ácido (Sposito, 1989), y también por descomposición de minerales arcillosos silicatados en medio ácido. Cuando el aluminio se presenta en la solución del suelo por procesos de acidificación puede causar la formación de iones  $\text{Al}^{+3}$ , monómeros y polímeros cargados positivamente, pudiendo localizarse entre las capas de arcilla como esmectita y vermiculita, o en complejos orgánicos (Figueiredo y Almeida, 1991).

Cuando el  $\text{Al}^{+3}$  es frecuente en los suelos, por tratarse de un ion de alta valencia, tiene un potencial de competición, por los sitios de intercambio, muy elevado respecto a otros cationes (Thomas y Hargrove, 1984). Al ser desplazado por otro catión, el  $\text{Al}^{+3}$  intercambiable pasa a la solución del suelo y se hidroliza liberando  $\text{H}^+$ , lo cual se esquematiza de la siguiente forma (Brady, 1989):



Los iones  $\text{H}^+$  y  $\text{Al}^{+3}$  se asocian a las cargas negativas constantes de los minerales de arcillosos del tipo 2:1, así como a las cargas negativas variables de arcillas 1:1, óxidos y polímeros por fuerzas de atracción electrostática en  $\text{O}^{-2}$  y  $\text{OH}^-$  de los bordes y superficies de los minerales (Melo, 1985).

Entre los diferentes minerales, el valor de acidez intercambiable de la acidez potencial es mayor para montmorillonita, intermedio en la vermiculita dioctaédrica (algunas vermiculitas trioctaédricas parecen ser mucho menores), más bajo en la caolinita y muy baja en los óxidos (Coleman y Thomas, citados por Manrique, 1991).

La fitotoxicidad del aluminio es comúnmente considerada como el principal efecto perjudicial de la acidez, siendo que el aluminio del suelo es bastante variable inclusive por debajo de  $\text{pH}=5,0$ , ya que depende de la naturaleza del

suelo y concentración de electrolitos, cuyo aumento eleva la concentración de aluminio soluble (Wutke, 1972).

Farina *et al.* (citados por Porta, 2003), en condiciones de invernáculo, encontraron que el rendimiento de maíz se correlacionó significativamente con diversos parámetros de acidez:  $r^2$  de 0,42, 0,47 y - 0,9 con  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ , y con el porcentaje de Al intercambiable (Al%), respectivamente.

En condiciones de alto contenido de Al y pH bajo, también puede ocurrir niveles solubles de otros metales como el manganeso y el hierro, también tóxicos para las plantas si se absorbe en cantidades excesivas (Van Raij, 1991).

Smith (1986), comenta que la V constituye un índice de la capacidad de reserva de nutrientes del suelo y que los pocos estudios existentes a la fecha sugieren que la toxicidad de aluminio puede ser más importante que la cantidad total de bases. El autor comenta que la  $V_e$  y la  $\text{CIC}_e$  estimadas a partir de la suma de bases más el aluminio extraído con cloruro de potasio (KCl), eran potenciales sustitutos de la CIC estimada con acetato de amonio y que tenían perspectivas de aplicación como criterios para separar Ordenes, ya utilizados en alguna medida en Taxonomía de suelos, en particular en los Oxisoles, pero que todavía no era muy grande el número de datos de  $\text{CIC}_e$  y que existían pocos estudios o determinaciones de Al intercambiable. El mismo autor, agrega que el “Comité Internacional de Suelos con minerales arcillosos de baja actividad”, estaba elaborando propuestas, pero que los estudios insumían mucho dinero y que los países donde ocurren estos tipos de suelo justamente son los que tienen menos recursos.

Fauziah (1997) comparando 7 métodos analíticos, encontró que el método recomendado para evaluar la fertilidad natural a través de la CIC por suma de bases más acidez intercambiable ( $\text{CIC}_{\text{sum}}$ ), utilizando respectivamente una solución 1M  $\text{AcONH}_4$  (pH 7.0) y otra de KCl no resultaba apto para algunos suelos tropicales.

Peech, Gillman y Sumpter (citados por Fauziah, 1997), llegan a la conclusión que en este tipo de suelos un aumento de la concentración de la solución de electrolitos induce una mayor carga negativa en la superficie de carga variable, por liberación de protones de la superficie, lo que entonces causa



disolución de capas de óxido amorfo. Con el método citado resultan valores de CIC mayores que el método de Intercambio Compulsivo (CIC<sub>ic</sub>) (Gillman, 1979), que utiliza una mezcla de soluciones 0,1 M de BaCl<sub>2</sub> y NH<sub>4</sub>Cl para el desplazamiento de las bases y una solución de 0,005M de MgSO<sub>4</sub> para su valoración. La diferencia entre los mayores valores del método de CIC<sub>sum</sub> respecto al de CIC<sub>ic</sub> se atribuyen a que se estarían midiendo posiciones ocupadas por Aluminio que no son intercambiables en las condiciones naturales de los suelos ya que en el complejo de intercambio no existen las concentraciones salinas que se utilizan en el laboratorio.

Buol *et al.* y Sánchez *et al.* (citados por Durán, 1991), mencionan un nivel de 10% de aluminio intercambiable como aquel asociado a una acidez del suelo limitante para las plantas. Porta (2003) reporta que pueden encontrarse problemas para el crecimiento vegetal en aquellos suelos ácidos en que la acidez total supere el 15% de la CIC<sub>e</sub>.

Tisdale *et al.* (1985), señalan que el aluminio es probablemente el mayor factor limitante de muchos suelos ácidos, particularmente en aquellos con pH menor de 5 a 5,5. Entre los efectos sobre las plantas citan: decrecimiento del largo de raíces, interferencia en la división celular, disminución de la tasa de respiración, interferencias en la síntesis de azúcar, incremento en la rigidez de las células, y en la cantidad, transporte y utilización de nutrientes y agua por las plantas. A pH menores o iguales a 4,5 la toxicidad de H<sup>+</sup> daña las membranas radiculares y restringe el crecimiento de muchas bacterias benéficas. Los mismos autores citan que el encalado que lleva al suelo a pH por encima del rango 5,5 - 5,7 reduce el aluminio intercambiable a menos del 10% de la CIC efectiva y elimina los problemas de toxicidad debidos a ese elemento.

Osorio (2003), menciona que los síntomas de toxicidad por Al varían con cada especie vegetal, en general estos consisten en una fuerte reducción del crecimiento de la parte aérea y de las raíces primarias y laterales, el desarrollo de clorosis en la planta y luego coloraciones púrpuras sobre las hojas. Los síntomas son similares a los de la deficiencia de fósforo (P) ya que el exceso de Al inhibe la absorción de H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup>. En consecuencia, los cultivos afectados tienen

un pobre establecimiento, bajo rendimiento y en casos severos las plantas pueden morir.

#### **2.3.4 Acidez no intercambiable**

La acidez del suelo también puede obtenerse mediante la determinación de la capacidad amortiguadora pH del suelo la cual se determina a pH neutro (7,0) u 8,2. Para esto se ha empleado soluciones tamponeadas o buffereadas a los pH respectivos. Es probable que el mantenimiento del pH igual a 7 propicie la neutralización e hidrólisis de  $Al^+$  intercambiable,  $H^+$  intercambiable y la disociación del H de los radicales ácidos de los bordes de arcillas silicatadas, óxidos y la materia orgánica que poseen una fuerza superior a la que se disocia el KCl.

Por lo tanto, en muchos casos este recurso ha sido utilizado para obtener  $H^+$  no intercambiable por la simple sustracción del  $Al^{+3}$  intercambiable de los valores obtenidos ( $H^+ + Al^{+3}$ ).

Otras formas de Al más allá de la forma intercambiable con (1N KCl) vienen siendo determinadas. Para ese propósito se están utilizando soluciones que tienen cationes con mayor fuerza de adsorción o equivalente a la de la adsorción específica del Al. La solución más utilizado para este propósito es el  $CuCl_2$  0,5 M, pH 2,8, que combina alta capacidad intercambio de  $Cu^{+2}$  y el pH bajo. Se considera Al no intercambiable por el  $CuCl_2$ , la diferencia entre lo extraído por este método menos lo extraído por 1N KCl que tiene menores posibilidades de intercambiarse (Figueiredo y Almeida, 1991).

Otras formas de extraer Al, en cantidad superior a la que se consigue con el KCl 1 N no intercambiable, es a través del uso de ácidos orgánicos que pueden formar complejos con el aluminio en solución aumentando la liberación de las diferentes formas en el suelo. La forma más comúnmente utilizada es el  $NH_4OAc$  1N pH 4,8 (Pavan *et al.* 1985), siendo la diferencia de la extracción con KCl por el  $NH_4OAc$  atribuida a formas de Al no intercambiables (Da Silva, 2006).

Los monómeros y polímeros de aluminio constituyen el grupo ácido llamado acidez no intercambiable. El  $H^+$  asociado a los oxhidrilos de coloides

tales como minerales 2:1 y 1:1, óxidos de hierro y aluminio, polímeros de aluminio y materia orgánica, están retenidos por enlace covalente, característica de la acidez no intercambiable. Según Melo (1985), el hidrógeno se disocia hasta un valor de pH cercano a 10,0; sin embargo su determinación se realiza a un pH de 7,0 en el cual la CIC del suelo se determina convencionalmente.

Suelos jóvenes (Inceptisoles, Andisoles, Alfisoles) poseen pequeñas concentraciones de óxidos, mientras que los suelos maduros (Ultisoles y Oxisoles), que han sufrido prolongados e intensos procesos de meteorización, se componen principalmente de óxidos de Fe y Al (Mitchell *et al.*, citados por Ávila, 1999). En suelos tropicales ferruginosos muy meteorizados, parte del fósforo queda ocluido por oxihidróxidos de hierro (Durán, 2004). Las condiciones ambientales señaladas se asocian a climas tropicales actuales. Según Durán (2004), una propiedad importante de los óxidos de hierro es su comportamiento anfótero. Este comportamiento determina que presenten carga negativa por encima de su punto isoeléctrico, carga cero en el punto isoeléctrico y carga positiva por debajo del punto isoeléctrico, contribuyendo de esta manera al poder buffer o amortiguador de los suelos. El pH del punto isoeléctrico de los óxidos y oxihidróxidos de Fe y Al enumerados arriba es muy fuertemente ácido, llegando a ser tan bajo como 2,1 para la hematita y no superando 5,4 en el caso de la lepidocrocita, aunque los hidróxidos amorfos de Fe y Al poseen un pH isoeléctrico de 8,3 – 8,5, (Fassbender, citado por Durán, 2004). Los hidróxidos amorfos presentan elevada superficie específica y muchas veces se disponen como recubrimientos de las partículas de arcilla, restándoles actividad química.

Bennema y Vittori (citados por Da Silva, 2006), encontraron un indicador de la CIC en horizontes B de suelos lateríticos llamado Kr, que es la relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Si la relación disminuye también lo hace la CIC.

Por otra parte, el tipo de cargas de los óxidos de hierro, resultan efectivas en la reducción del riesgo de contaminación con agroquímicos como el glifosato, potencialmente lavado en profundidad a través del perfil (Bogaard y Gimising, 2008).

Barnhisel y Bertsch (citados Buol, 1997), encontraron que en suelos ácidos la precipitación de aluminio en los espacios de inter-capa modifica de forma importante el comportamiento de los minerales arcillosos de estructura 2: 1.

Durán (1991) y Durán y García (2007), mencionan que en la mayoría de los perfiles de Luvisoles y Acrisoles los minerales arcillosos dominantes de horizontes subsuperficiales son de baja o media actividad química. Los valores promedio de CIC de la fracción arcilla ( $CIC_{Ac}$ ), en horizontes subsuperficiales (B), reportados por Durán y García (2007) son:  $34 \pm 11 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Otros autores (Sacco, Kaemmerer y Sacco, citados por Durán, 2007), encuentran un rango general de: 30 a  $45 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  y a veces más bajo: 20 a  $25 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . En horizontes superficiales, Vítora y Zamalvide (1972) encontraron valores de  $40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

Durán y Mercatini (citados por Durán, 1991), encontraron que los minerales arcillosos dominantes en los horizontes subsuperficiales son illita y caolinita. Pazos (1981), estudiando la mineralogía de los horizontes superficiales de 2 perfiles de suelos Desaturados Lixiviados, además de caolinita también encontró montmorillonita en similar proporción. Así como otros minerales arcillosos de superior CIC a la de la caolinita: illita y vermiculita o similar (halloysita y metahalloysita). Por otra parte, Van Wambeke y Barrera (citados por Durán, 1991), también encontraron montmorillonita e inter-estratificados en suelos pertenecientes al Orden Desaturados-Lixiviados.

Durán (1997) considera que en los suelos ácidos derivados de areniscas, y a veces de rocas metamórficas o ígneas, con bajo nivel de materia orgánica (igual o menor de 2%), con 0,5 a 4,0 % de óxido de hierro en el complejo de intercambio está compuesto por arcillas laminares en las que predomina caolinita con mica fina y otros filosilicatos 2:1 asociados en menor proporción.

Según Durán (1997), los suelos ácidos del orden Desaturados-Lixiviados, derivados a partir de sedimentos arenosos, poseen contenidos relativamente bajos en óxidos de hierro y relaciones óxidos:arcilla de 0,06 o mayores. Esas propiedades, unido a la relativamente baja actividad química de los filosilicatos arcillosos, hace que su sistema de intercambio catiónico se aproxime al tipo mixto, de silicatos laminares con revestimientos de óxido. Estos suelos poseen

otras características que también contribuyen a asemejarlos a los suelos típicos de las regiones subtropicales. Por su bajo contenido de materia orgánica y por la presencia importante de caolinita, la carga variable dependiente del pH está presente no sólo en el humus sino también en grado importante en los coloides minerales.

Martínez *et al.* (2008) consideran que la CIC permanente proviene de la fracción arcilla, mientras que la CIC variable depende de las sustancias húmicas. Los coloides inorgánicos prácticamente no varían en un suelo en particular, con valores de CIC que fluctúan entre 2 y 150  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  suelo. Por otro lado, los coloides orgánicos, son altamente dependientes del manejo y pueden tener una CIC que superan 200  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  de suelo. Para el caso de la fracción de MOS de alto peso molecular, el aporte a la CIC es menor (170  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) comparado con la fracción de bajo peso molecular (500  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ) (Oades *et al.*, Wolf y Snyder, citados por Martínez *et al.*, 2008).

#### 2.4 NIVEL DE SATURACIÓN (V) Y EL pH

Da Silva (2006) cita que Mehlich consideró insuficientes los reportes existentes de investigaciones sistemáticas en diferentes tipos de suelo y grado meteorización que relacionaran el pH y la V, como para concluir que los más meteorizados presentaban una menor V. Este autor dice que Mehlich (1942) mostró que diferentes minerales y en distintas proporciones con materia orgánica, (incluyendo su ausencia total), tenían un comportamiento distinto respecto a pH y V (Figura 2).

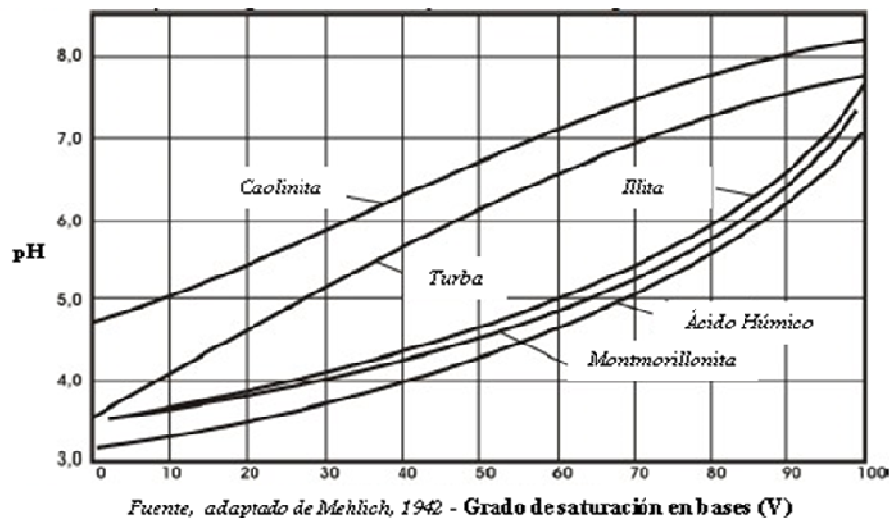


Figura 2: Relación entre la saturación en bases (V) y el pH en diferentes materiales del suelo

Más tarde, Chao Y Harward (1962) muestran que la forma de las curvas de titulación son muy variables en suelos de diferente composición mineralógica y que los iones utilizados en la determinación también introducen variación en los resultados, debiéndose considerar entonces las diferentes técnicas empleadas en la medición del pH y la V.

Coleman y Thomas (citados por Manrique, 1991), consideran que la parte intercambiable de la acidez de los suelos corresponde al comportamiento de un ácido fuerte y que la parte no intercambiable como un ácido débil.

Algunos autores (Ngewoh, 1989; Oorts, 2004) han comparado y/o ensayado nuevos métodos analíticos para medir la CIC en suelos ácidos. Otros, como Gobin (2000) y Lozada (1987), vienen aplicando crecientemente métodos de análisis multivariado con el propósito de lograr criterios objetivos de clasificación de suelos y en lo posible cuantitativos. Manrique (1991), y Seybold y Grossman (2005, 2006), han utilizado métodos estadísticos para predecir la CIC con fines clasificatorios o bien con el propósito de evaluar su comportamiento y productividad. Scalenghe *et al.* (2000), inclusive han intentado obtener esta variable a partir de propiedades simples (color, textura, pH) para facilitar las tareas de mapeo de suelos.

Seybold y Grossman, (2006) desarrollaron estudio de predicción de la  $CIC_e$  para los diferentes ordenes de la clasificación del Soil Taxonomy, usando herramientas estadísticas y variables simples como los contenidos de carbono orgánico, arcilla, limo, pH, con el propósito de obtener datos en forma rápida y fácil, para utilizarlos en informes de relevamiento de suelos. Estos autores, ajustaron un modelo para predecir la  $CIC_e$  en suelos ácidos con menos de 8,0 de carbono y pH inferior a 5,5 (sin discriminar tipo de horizonte), estratificando los datos de suelo en clases por taxonomía mineralógica y grupos de actividad del complejo de intercambio. Los mejores ajustes y error cuadrático medio, se lograron cuando se agruparon los datos por las cuatro clases de actividad, resultantes del cociente entre la  $CIC_{7,0}$  y el contenido de arcilla (%). Las clases de actividad del ST son: superactiva: 0,6 o mayor; activa, entre 0,4 y 0,6; semiactiva entre 0,4 y 0,24; y subactiva menor a ese último valor. Se dispuso de un número muy grande de datos y se desecharon los Órdenes que tuviesen menos de 35 muestras o datos. El propósito de ellos fue generar una herramienta predictiva de la  $CIC_e$  a partir de los datos que por lo común se obtienen en un relevamiento de suelos.

Durán (1991) relacionó el contenido de arcilla (Ac %), y el contenido de carbono orgánico (CO %), respectivamente con la CIC del suelo ( $CIC_s$ ) en perfiles del Orden Desaturados-Lixiviados ( $n = 24$ ). De esa forma ajustó los modelos lineales:

$$(1) y_1 = 2,0 + 0,3x, \text{ siendo la variable independiente Ac \% , } r = 0,663; n = 28$$

$$(2) y_2 = 2,5 + 2,4x, \text{ siendo la variable independiente CO \% , } r = 0,896; n = 22$$

Por regresión múltiple estimó la  $CIC_{CO}$  y  $CIC_{Ac}$  en 122 y 9  $cmol_c \text{ kg}^{-1}$ , respectivamente.

Durán y García (2007) observaron una alta correlación ( $r = 0,86$ ) entre la  $V$  a pH del suelo ( $V_e$ ) y  $V$  a pH 7 ( $V_7$ ) en los horizontes B de suelos Desaturados Lixiviados según el modelo:

$$(3) y = 14,298 e^{0,0147x}, \text{ con un } r^2 = 0,7419$$

Siendo  $y$ :  $V_7$  y  $x$ :  $V_e$

Durán (1991), cita un modelo potencial según el procedimiento utilizado por Buol (citado por Sánchez, 1981), que arroja un coeficiente de determinación de 0,93 para la saturación de bases a pH 7,0 y 8,2 en los horizontes B de esos suelos. El modelo ajustado es:

$$(4) y = 0,8992 x^{0,9563} \text{ con un } r^2 = 0,9268; \text{ siendo: } y = V_{8,2} \text{ y } x = V_7$$

Durán y García (2007) dicen que la ecuación (4), permite estimar con alta seguridad el valor crítico de 35% para  $V_{8,2}$  que corresponde muy aproximadamente con el de 45% para  $V_{7,0}$  (46% en términos exactos pero se redondea a 45%, sin error significativo). Estos autores también obtuvieron la ecuación de regresión que relaciona la  $V$  al pH del suelo ( $V_e$ ) y a pH 8,2 ( $V_{8,2}$ ). Este modelo es de tipo exponencial y toma la siguiente forma:

$$(5) y = 9,9837 e^{0,0172x}$$

Donde: "y" y "x", representan la saturación de bases a pH 8,2 ( $V_{8,2}$ ) y al pH suelo ( $V_e$ ), respectivamente, con un  $r^2 = 0,8662$ .



### **3 MATERIALES Y MÉTODOS**

Con el propósito de establecer relaciones entre diferentes componentes del suelo con la CIC y la V se extrajeron valores de la base de datos de suelos de la División de Suelos y Aguas del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (DSA-MGAP), que reuniesen las siguientes condiciones:

- pertenecer a horizontes sub-superficiales,
- tener una reacción por lo menos moderadamente ácida,
- existir disponibilidad de las siguientes propiedades:

aluminio intercambiable, bases intercambiables (Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio), contenido de materia orgánica, arcilla, limo, arena, óxidos de hierro,  $CIC_{pH\ 7,0}$  y  $CIC_{pH\ 8,2}$ .

La elección de los horizontes subsuperficiales obedece a que, como fuera señalado, en o cerca de la superficie pueden haber cambios inducidos por las actividades humanas: laboreo, cultivo, encalado o fertilizaciones que modifican significativamente algunas propiedades del suelo que se consideran diagnósticas para distinguir una categoría o taxa. La selección de datos de suelos considerados ácidos, se hizo en base a la clasificación de Blackmore (1987) ya indicada en el Cuadro 2. La muestra de datos abarcó suelos con pH inferior a 5,9, considerando las categorías moderadamente ácido, ácido y muy ácido según el autor mencionado. También obedeció a la necesidad de reunir el mayor número de datos posible en el momento de someterlos al análisis estadístico.

Con los datos de algunas variables, se derivaron otros. La CIC de la fracción arcilla, fue estimada extrayéndole a la  $CIC_{7,0}$  la contribución de la materia orgánica del suelo (MOS). A tales efectos se utilizó el valor promedio de  $200\text{ cmol}_c\text{ kg}^{-1}$  de MOS.

A partir de la  $CIC_s$  y el contenido de arcilla, también se derivaron las clases de actividad: superactiva, activa, semiactiva y subactiva que utiliza el ST. Así mismo, con algunas de las variables mencionadas previamente, se efectuaron cálculos que expresan el porcentaje de un elemento en el complejo de intercambio o bien relaciones que pueden resultar útiles en el momento de clasificar un suelo.

Por ejemplo, el porcentaje de aluminio intercambiable, o su relación con el contenido de arcilla y con otras variables.

En su mayoría, los datos de muestras de suelo que reunieron las exigencias previamente establecidas, provienen de perfiles representativos de las unidades de la Carta de Reconocimiento de Suelos (MGAP, 1976): Aparicio Saravia, A° Blanco, Carapé, C° Chato, Cuchilla Corrales, Cuchilla Mangueras, Las Toscas, Manuel Oribe, Tacuarembó, Tres Bocas, Tres Cerros, Tres Islas, Río Tacuarembó, Rincón de Zamora, Rivera, Sierra de Ánimas y Zapallar. En el Cuadro 4 se indica la equivalencia entre el sistema de clasificación utilizado en la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay y el ST (Durán et al., 2004).

Cuadro 4: Unidades Cartográficas que comprenden suelos ácidos de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay - Clasificación de los suelos por el Soil Taxonomy, Durán et al (2004)

<b>UCS - CRSROU</b>	<b>Suelos Dominantes y asociados (Soil Taxonomy)</b>
Aparicio Saravia	Typic Hapludalfs and Vertic Argiudolls
A° Blanco	Typic Hapludalfs and Typic Haplohumults
Bañado del Oro	Abruptic Argiudolls and Typic Albaqualfs
Carapé	Lithic, Humic Dystrudepts and Lithic Hapludolls
C° Chato	Entic, Lithic Hapludolls & Typic Argiudolls & Typic Hapludalfs
Cuchilla Corrales	Typic, Albaquic Hapludalfs & Typic, Pachic, Abruptic Argiudolls
Cuchilla Mangueras	Typic, Albaquic Hapludalfs & Typic, Pachic, Abruptic Argiudolls
Las Toscas	Typic, Mollic Hapludalfs and Typic, Humic Hapludults
Manuel Oribe	Typic, Albaquic Hapludalfs & Typic, Pachic, Abruptic Argiudolls
Tacuarembó	Typic, Mollic Hapludalfs and Typic, Humic Hapludults
Tres Cerros	Humic Hapludult & Lithic Udorthents
Tres Islas	Typic Hapludalfs and Typic Haplohumults
Rincón de Zamora	Typic, Albaquic Hapludalfs & Typic, Pachic, Abruptic Argiudolls
Río Tacuarembó	Typic Argiaquolls and Typic Albaqualfs
Rivera	Typic, Mollic Hapludalfs and Typic, Humic Hapludults
Zapallar	Typic, Albaquic Hapludalfs & Typic, Pachic, Abruptic Argiudolls

Los materiales parentales de las Unidades Cartográficas de Suelo (UCS) citadas, por lo común son areniscas triásicas o bien rocas metamórficas e ígneas pre-devonianas, MIE-DINAMIGE (1985). En ambos casos, la pérdida de

nutrientes se ve favorecida, ya sea porque el material de por sí es pobre, o bien porque ha sufrido procesos de alteración y transformación por espacio de tiempo significativos (hidrólisis, disolución, decarbonatación, oxidación, reducción e hidratación.). Las areniscas tienen una distribución claramente delimitada en el Noreste del territorio nacional. Los materiales geológicos constituidos por rocas ígneas y metamórficas si bien también se desarrollan en esa región, tienen una mayor expresión territorial en la región serrana que se extiende desde el sur al noreste y en menor medida hacia el Este del territorio nacional. Ambos tipos de materiales, generan productos de alteración sin liberación de carbonatos, propiciando la génesis de suelos de carácter ácido, requisito de este estudio. Además de los perfiles de suelo que sirvieron a la definición de las UCS mencionadas, se utilizaron otros, que reuniendo las características necesarias para el estudio, fueron obtenidos por una misión técnica del National Resources Conservation Service (NRCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América (USDA), junto a técnicos nacionales de la Facultad de Agronomía (FA) y la DSA-MGAP. Esas muestras, además, tienen la ventaja de contar con datos de algunos análisis (mineralogía de fracción arcilla, limo o de la arena fina, hierro y aluminio libres), que no son de rutina en los laboratorios de nuestro país y que complementaron la información nacional existente. La distribución de los sitios que abarca este estudio puede apreciarse en la Figura 3.

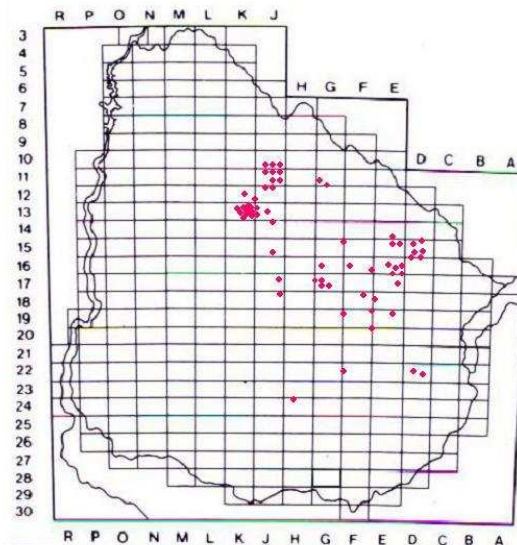


Figura 3. Distribución de los perfiles de suelo estudiados.

Los análisis de caracterización de las diferentes variables de suelo fueron realizados en tres laboratorios diferentes:

1. Merin Lagoon Project – PNUD-FAO – Pelotas, Brasil
2. División de Suelos y Aguas – DGRNR/MGAP – Montevideo, Uruguay
3. NRCS/USDA, Lincoln, NE, Estados Unidos de Norte América.

Los métodos de análisis estadístico descriptivo y multivariado fueron efectuados con los paquetes de programas Microsoft Office de Windows e INFOSTAT (2008).

Se presentan las estadísticas descriptivas como máximo, mínimo, media, desvío estándar y coeficiente de variación de las variables carbono orgánico, CO (%); arcilla (%); limo (%); arena (%); suma de bases (SB); CIC a pH del suelo o efectiva ( $CIC_e$ ), CIC a pH 7,0 ( $CIC_7$ ); CIC a pH 8,2 ( $CIC_{8,2}$ ); saturación en bases a pH 7,0 ( $V_7$ ); saturación en bases a pH 8,2 ( $V_{8,2}$ ); pH en agua ( $pH_{H_2O}$ ); pH medido en KCl ( $pH_{KCl}$ ), contenido de Al ( $cmol_c\ kg^{-1}$ ), porcentaje de Al intercambiable (PAint.); y contenido de óxidos de hierro (OxFe %). Se construyeron histogramas de frecuencia de clases con diversos componentes del suelo relacionados con la CIC.

Basados en un universo multivariado y con el objetivo de describir la similitud de los diferentes tipos de suelos, se aplicaron técnicas de ordenación y clasificación. Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) con todas las variables cuantitativas medidas y generadas, contando con 46 casos. A partir de este se realizó la eliminación de los datos correspondientes a los perfiles USDA11, D15-28 y 2 casos por falta de datos en una variable de la base de datos original. Este procedimiento permitió observar cuáles de los componentes del suelo aportan más variación y qué comportamiento guardan entre ellos. También se efectuó un análisis de clúster o agrupamiento, utilizando distancia euclidiana y el método de agrupamiento de Ward, procurando encontrar un patrón de asociación entre los tipos de suelo. Se observó el grado de coincidencia entre la clasificación de suelos convencional con el agrupamiento efectuado por la

herramienta estadística. Los valores promedio de los tres agrupamientos realizados, se sustituyeron en modelos de predicción de CIC y CIC<sub>e</sub> de Seybold y Grossman (2006) y Manrique (1991), con el fin de observar el grado de coincidencia de los modelos en suelos ácidos de nuestra región geográfica.

Basados en los resultados del análisis multivariado, se ajustaron modelos de regresión entre el valor de V<sub>7</sub> y V<sub>8,2</sub> en función de saturación en bases efectiva (V<sub>e</sub>) o porcentaje de saturación en bases a pH del suelo.

El ajuste del modelo de predicción de la V<sub>8,2</sub> en función de la V<sub>e</sub>, se evaluó por el coeficiente  $r^2$  y por el análisis de normalidad de los residuos a través de la estudentización de los residuales de las 46 muestras de suelo de los horizontes subsuperficiales.

A su vez, se efectuó una prueba de bondad de ajuste (Cuadro de contingencia-prueba Kappa), utilizando los datos de diecinueve horizontes subsuperficiales no utilizados en el desarrollo de los modelos de predicción. De esa forma, se evaluó el error probable al utilizar V<sub>e</sub> como criterio de diagnóstico sustitutivo de la V<sub>8,2</sub> para separar los taxas Luvisoles y Acrisoles de la CSROU. Se identificó la proporción de muestras que serían coincidentemente o no clasificadas utilizando este procedimiento.

## **4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA**

El Cuadro 5 sintetiza el comportamiento de variables independientes que se relacionan directa o indirectamente con la CIC y la V. En ella, pueden observarse, varios descriptores estadísticos (media, mínimo, máximo, desvío típico), de la muestra que representa la población de suelos ácidos (46). El rango de variación del CO entre las muestras de suelo estudiadas (horizontes subsuperficiales), es relativamente estrecho: 0,1 a 1,2%. El valor promedio 0,7 %, coincide con el reportado por Durán (2004) expresado como porcentaje promedio de materia orgánica en los horizontes B de suelos pertenecientes al orden Desaturados-Lixiviados : 1,23 (%).



Puede sorprender el valor relativamente elevado de tenor de CO máximo, fundamentalmente tratándose de un horizonte sub-superficial. Sin embargo, esta acumulación secundaria, en profundidad, verificable en la parte superior del horizonte de acumulación de arcilla (Argilúvico en la CSROU y Argílico en el ST), fue reportada por Durán (1991) y Durán y García (2007). Este fenómeno parece ser relativamente frecuente en gran parte de los perfiles con predominio de fracción arena, de los suelos pertenecientes al Orden Desaturados-Lixiviados.

Es necesario recordar que en las zonas templadas – húmedas, con vegetación natural de pastos, el proceso de formación de suelos predominante es la acumulación de materia orgánica, íntimamente asociada a la materia mineral. Los suelos ácidos se desarrollan particularmente a partir de materiales sueltos, porosos, bien drenados donde el agua que ingresa al perfil se mueve con relativa facilidad. Tales condiciones favorecen la disolución de sales y el arrastre eficiente de elementos coloidales. Los materiales arenosos conforman un escenario como el mencionado precedentemente. Allí puede verificarse un lavado de nutrientes, coloides órgano-minerales e hidróxidos de hierro y aluminio muy marcado. La velocidad de transferencia de los distintos compuestos se auto-enlentece, conforme se generan los horizontes de acumulación. Ese proceso es particularmente intenso y verificable en los horizontes B de suelos originados a partir de areniscas. El contenido de CO de las muestras de suelos ácidos, así como los correspondientes a pH y óxidos de hierro, no difieren de los de algunos Ultisoles y Alfisoles estudiados por otros autores en otras latitudes, (Manrique *et al*, 1991; Seybold y Grossman 2005, 2006; Skinner, 2001).

Otro componente del suelo, de importancia significativa en la determinación de la CIC, es el contenido de arcilla (Sumner y Miller, 1996; Manrique *et al* 1991). En este caso, el rango, así como el coeficiente de variación, son menores al del contenido de CO.

En general, cuanto mayor es el contenido de coloides minerales aumenta la CIC. El valor promedio del contenido de arcilla de la muestra, fue de 35,4 %, con un coeficiente de variación algo menor al correspondiente al CO. El contenido de arcilla se distribuyó de manera aproximadamente normal. La cantidad, calidad y proporción de especies de minerales arcillosos presentes en una muestra de suelo



juegan un rol importante en la determinación de las posiciones de intercambio potenciales.

Como fuera oportunamente mencionado, los datos mineralógicos de la fracción arcilla de los suelos a nivel nacional son escasos. Una forma aproximada de conocer el comportamiento de intercambio de la fracción arcilla es quitarle la contribución correspondiente al CO. A través de ese procedimiento, se obtuvo el valor promedio  $31,9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1} \pm 8,7$ , con un coeficiente de variación de 27,2%, inferior a los de las variables contenido de CO y contenido de arcilla (Arc.). El valor promedio de  $\text{CIC}_{Ac}$  hallado, no difiere significativamente del valor medio ( $34 \pm 11 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) reportado por Durán (1997) para la CIC de la fracción arcilla de horizontes sub-superficiales (B) de suelos ácidos derivados de areniscas, y a veces de rocas metamórficas o ígneas.

Los cálculos efectuados con el fin de conocer la clase de actividad de intercambio de la arcilla, a través del cociente entre la  $\text{CIC}_{7,0}/\text{Arcilla}$  (%) dieron un valor promedio de 0,39 lo cual se corresponde con el límite superior de clase semiactiva del ST. A esa clase de actividad de intercambio pertenece el 52,2% de los horizontes que componen la muestra. Las frecuencias de las clases Superactiva y Subactiva juntas, no llegan a abarcar el 10% de los individuos de la muestra, mientras que el 39% restante pertenecen a la clase Activa. Sólo el 6,5% de los perfiles de suelos ácidos de la muestra que pertenecen a la clase Subactiva, podrían poseer un horizonte Kándico (dominado por caolinita). Sin embargo, para cumplir con ese requisito la CIC de la fracción arcilla a  $\text{pH}_7$  debería ser menor a  $16 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  o bien a  $\text{pH}_{\text{suelo}}$  inferior a 12  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Ningún perfil satisface los requisitos citados para el horizonte Kándico. Los valores promedio de la actividad de la fracción arcilla y los respectivos porcentajes hallados en cada una de las clases, reafirman los conceptos de Durán *et al.* (1997), respecto a la constitución mineralógica probable de los horizontes subsuperficiales de suelos ácidos.

El valor máximo de  $\text{CIC}_{Ac}$  es de  $55 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , el cual puede ser considerado elevado. Sin embargo, estudios realizados en 1996 por una misión compuesta por técnicos de la Facultad de Agronomía, el MGAP y el Departamento de Agricultura de Estados Unidos en (1996), encontraron resultados de  $\text{CIC}_{Ac}$  similares en algunos horizontes B de suelos del Uruguay. No se descarta que el

valor máximo hallado en esta revisión, corresponda, en parte a montmorillonita, que en virtud de su pequeño tamaño relativo migra en suspensión fácilmente. Tal especie mineral, es uno de los minerales arcillosos más frecuentes en los horizontes argilúvicos (CSROU, 1976) o argílicos (ST, 2006) de los suelos de zonas templadas como el Uruguay (Califra, 1982; Durán, 1991). Los pocos estudios mineralógicos realizados en los suelos del Uruguay, más escasos aún en los horizontes sub-superficiales, parecen ratificar la presunción.

El contenido promedio de la fracción granulométrica limo (13,5%), resulta bajo ya que los complementarios porcentajes de arcilla y arena juntos, son los dominantes en la mayoría de estos suelos. Ello resulta racional, si se tiene presente que gran proporción de los suelos ácidos (Desaturados – Lixiviados) se forman a partir de areniscas o bien rocas graníticas (Durán, 1991).

El coeficiente de variación del limo, tiene un comportamiento intermedio, respecto al que presentan las otras variables discutidas. En uno de los modelos desarrollados por ajuste estadístico “Stepwise”, para predecir la CIC y la CICE en horizontes superficiales, Manrique et al. (1991), citan que la variable CS (contenido de arcilla más limo, expresados en porcentaje en peso) y el pH no fueron incluidas, porque si bien la ( $P < 0,001$ ) dio altamente significativa el  $r$  fue  $< 0,3$ . En los casos de los Ordenes Oxisoles, Espodosoles, y Ultisoles la Arcilla + Limo (CS) resultaron altamente correlacionados con la CIC. Sin embargo, luego de analizar más profundamente, sugieren que en realidad el limo puede haber estado mal medido. En base a trabajos de Flach y Lal (citados por Manrique *et al.*, 1991), se presume que en la fracción limo, por falta de dispersión suficiente, puedan haber subsistido pequeños agregados de arcilla que explican tal comportamiento.

Por el escaso valor promedio de la variable limo en los suelos que componen la muestra y teniendo presente, además, los comentarios realizados por los autores citados, no parece que el contenido de limo (%) pueda constituir una variable de importancia en la determinación de la CIC de los suelos considerados en esta investigación.

El contenido de arena no es una variable que pueda ser considerada responsable del comportamiento coloidal del suelo. Sin embargo fue incluida por

ser complementaria de las fracciones granulométricas más finas: arcilla y limo cuya participación en el comportamiento del complejo de intercambio es reconocido por la literatura. El CV% del contenido de arena es comparable al de la cantidad de arcilla.

El pH es la variable del suelo cuyos valores presentaron menor variación. El valor promedio de la muestra fue de 5,2 con un desvío típico de 0,4 unidades. El pequeño desvío de esa variable, en cierta forma resulta lógico, ya que cuando se seleccionaron datos, uno de los criterios fue que tuviesen menos de un determinado valor de pH. Complementariamente, además se exigió que se desarrollaran por debajo del horizonte superficial y dispusieran datos de CIC medidos a diferentes pH.

La suma de bases y el aluminio intercambiable son las variables con los mayores coeficientes de variación (66 y 74%, respectivamente).

El modelo más completo que desarrollaron Manrique *et al.* (1991) para estimar CIC a pH 7,0 y  $CIC_e$ , incluye todas las variables (contenido de arcilla, CO, suma de bases, aluminio extraíble y limo más arcilla) explicando más del 88% de la variación en los Ordenes: Alfisoles, Inceptisoles, Oxisoles, Espodosoles y Ultisoles. Sin embargo, el autor atribuye a la suma de bases, sola o combinada con el aluminio extraíble y el CO, la mayor proporción de tal variación.

Manrique *et al.* (1991), acotan que la contribución de la suma de bases no fue igual en todos los Órdenes. En los Molisoles, Alfisoles y Ultisoles la suma de bases fue quien explicó la mayor proporción de la variación de la CIC. Mientras que su aporte fue mínimo en Inceptisoles, Oxisoles y Espodosoles. En estos últimos Órdenes, el CO explicó más del 76% de la variación de la CIC.

Las variaciones en el contenido de bases, como las del contenido de aluminio intercambiable y los óxidos de hierro, son muy irregulares (Cuadro 5). El promedio de la suma de bases es  $6,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Este valor se aproxima al máximo del rango que reporta Durán (1991), entre  $3 - 6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , que el mismo autor menciona puede resultar superior en Luvisoles originados de rocas metamórficas.

Las variaciones en el contenido de aluminio, pueden explicarse por la heterogeneidad de materiales parentales que conforman esta muestra, por los distintos tiempos de meteorización a los que estuvieron expuestos y a las diversas circunstancias climático-ambientales que transcurrieron durante su evolución, Van Raij y Peech (1972). La intensidad de los procesos de alteración que sufrieron los minerales hasta liberar aluminio de sus estructuras cristalinas, no pueden haber sido uniformes en las diferentes ubicaciones temporo-ambientales de los suelos estudiados. Las bases y el aluminio son los componentes del suelo que más probablemente pueden explicar las variaciones de la CIC, dado que son los que efectivamente saturan las posiciones de intercambio en el complejo coloidal.

Uno de los hechos que el Cuadro 5 muestra más claramente, es lo citado por la bibliografía en relación al comportamiento de la CIC. En general la CIC se incrementa conforme se eleva el pH. En dicho Cuadro se observa que el valor promedio de la CIC a pH  $8,2$  duplica el valor promedio de la CIC<sub>e</sub>. Mientras que cuando se estima la CIC a pH  $7,0$ , el valor medio se encuentra entre los anteriores. Similares resultados encontró Paván *et al.* (1985) en suelos ácidos muy meteorizados del estado de Paraná, Brasil.

En la Figura 4, se observa que el contenido de Carbono orgánico y arcilla presentan una distribución aproximada a la normal. Estos componentes del suelo son los principales responsables de la CIC. Como puede observarse en el gráfico la clase más frecuente tiene apenas 0,5 % de CO. En este tipo de suelos, generalmente asociados a litologías gruesas, donde dominan por lo común arenas cuarzosas, el contenido en CO suele ser bajo, en relación al promedio de los suelos del Uruguay.

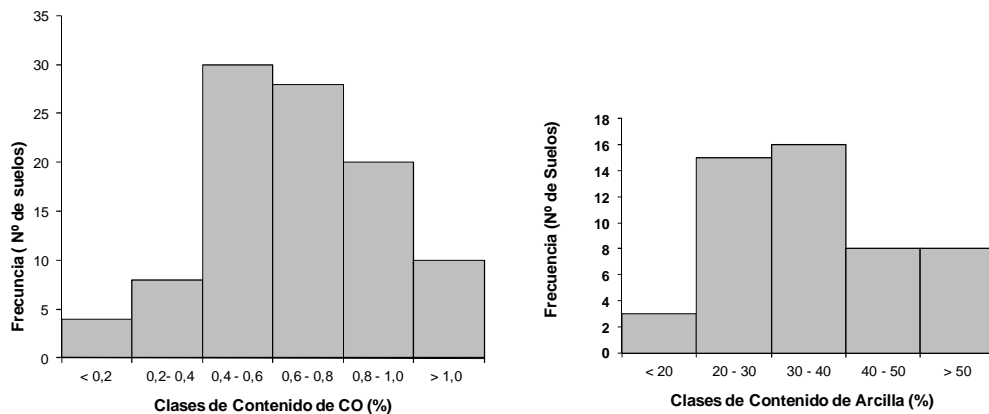


Figura 4. Distribución del contenido de Carbono orgánico (izquierda) y arcilla, (derecha), de las distintas muestras analizadas.

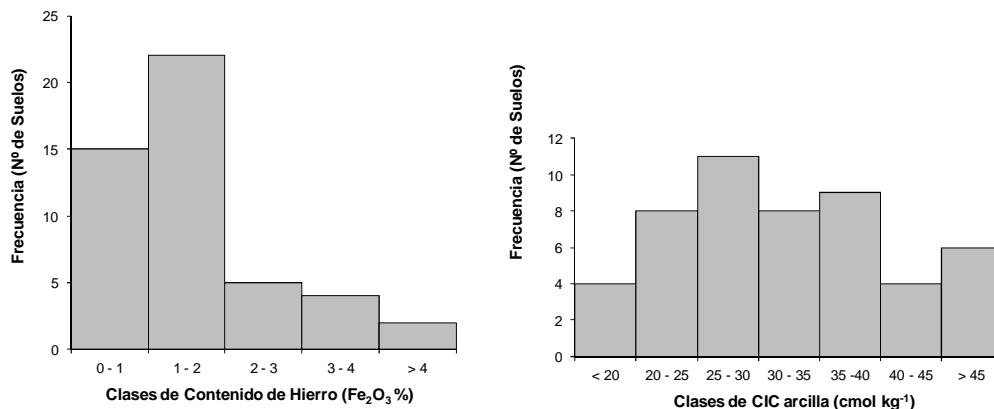


Figura 5: Distribución del contenido de óxidos de hierro (izquierda) y CIC<sub>Ac</sub> (derecha), de las distintas muestras analizadas.

Los compuestos de aluminio extraídos por el reactivo ditionito – citrato, son habitualmente denominados hidroxialumínicos (Barnhisel y Bertsch, citados por Manrique, 1991). En el modelo 2, del último autor, cita que la contribución de estos compuestos hidroxialumínicos a la CIC de Inceptisoles, Espodosoles y Ultisoles osciló entre 539 a 742 cmol kg Al<sup>-1</sup>. La magnitud de contribución fue especialmente notable, según Barnhisel (citado por Manrique *et al.*, 1991), dado que la CIC<sub>Ac</sub> del suelo normalmente aumenta después de la extracción de los hidróxidos. La contribución de materiales hidroxialumínicos a la CIC parece

estar en relación a su influencia en el pH del suelo. La evidencia sugiere que la cantidad de cargas dependientes del pH de un determinado suelo, está relacionado con la cantidad de compuestos hidroxialumínicos, Coleman y Thomas (citado por Manrique *et al.*, 1991). Según Thomas y Hargrove (1984) la carga de los compuestos hidroxialumínicos puede variar con el pH, constituyendo una característica común a muchos suelos ácidos ricos en materia orgánica.

En un estudio que abarcó los diferentes Órdenes del ST, Manrique *et al.* (1991), encontró una relación positiva entre el tenor de CO, Fe y Al hidratados con la CIC en el caso de los Espodosoles. El mismo autor cita que Tate y Theng (1980), alcanzaron la misma conclusión. Los hidróxidos de hierro y aluminio, podrían bloquear sitios potenciales de intercambio catiónico, originados en los coloides órgano-minerales (Ávila, 1999).

Comparando el promedio del contenido de hierro de los suelos estudiados (1,7 %  $\pm$  1,1) con los que se presenta Wasserman (2005), en el Cuadro 6 se advierte que el promedio 1,7 % es sensiblemente inferior a los valores comunes en los suelos de regiones tropicales, cuyo rango se encuentra entre 2 – 23 %. En ese ambiente operaron condiciones de alteración mineral y formación de suelo, más extremas que las de nuestra latitud.

Cuadro 6. Datos pedológicos de algunos suelos de Brasil

	Ferralsol	Ferralsol Goiânia	Nitisol	Ferralsol rico en hierro	Acrisol
K (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1
Ca (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	3,9	11,5	4,0	0,8	1,0
CIC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	4,8	12,3	6,1	5,2	6,3
pH en KCl	6,3	8,2	4,2	4,5	5,4
CO (%)	2,1	2,0	2,1	1,6	0,5
Arcilla (%)	18,0	16,0	49,0	77,0	9,0
Arena (%)	71,0	68,0	10,0	19,0	82,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	11,0	11,0	10,0	30,0	4,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3,0	5,0	13,0	23,0	2,0

Fuente: Wasserman *et al.* (2005).

En la Figura 5 y en el Cuadro 5, puede observarse que un número pequeño de casos (menos de 10), posee un contenido apreciable de óxidos de hierro (mayor a 3%) y que el contenido promedio en ese componente es 1,7%.

En general, cuanto mayor es la alteración química, más óxidos de hierro cabe esperar en la composición del suelo. Como fuera mencionado, la mayoría de los suelos de este estudio están originados a partir de areniscas cuarzosas, por lo que no existen minerales primarios alterables ricos en hierro. En el caso de aquellos suelos formados a partir de rocas ígneas o metamórficas de mayor edad que las areniscas, aumenta el contenido de ese tipo de minerales, así como el tiempo en que estuvieron expuestos a la alteración, provocando un enriquecimiento relativo en los suelos. De las cantidades de óxidos de hierro mencionadas, no puede esperarse una influencia muy marcada en la determinación de la CIC.

El histograma de clases de  $CIC_{Ac}$  (Figura 5), muestra que tan solo el 4 de los horizontes subsuperficiales poseen una mezcla de minerales arcillosos con valores de CIC menor a  $20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Cabe señalar que por tratarse de horizontes subsuperficiales y en general, además de suelos desarrollados sobre areniscas, no poseen cantidades de materia orgánica significativamente importantes, por lo que la mayor parte de la  $CIC_s$  provendrá de la  $CIC_{Ac}$ .

Del análisis del Cuadro 6 y la Figura 5, surge claramente que los suelos ácidos del Uruguay no tienen una mineralogía de arcilla dominada por minerales de baja actividad química, tal como la exigida por el ST en la definición del horizonte Kándico. Solamente cuatro de los suelos comprendidos en este estudio, podrían llegar a cumplir con los requisitos del ST, ya que se encuentran en la clase de menos de  $20 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de fracción arcilla.

En Cuadro 5 pudo apreciarse que en los suelos estudiados, el valor medio de la suma de bases (SB) es de  $6,6 \pm 4,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  y que la mediana es  $5,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  respectivamente.

La Figura 6 complementa la información del Cuadro 5, mostrando la distribución de la Suma de Bases (SB). Se observa una marcada asimetría y que la mayor proporción de los perfiles de suelo estudiados se encuentran en las clases menores a  $15 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , concentrando la mayor proporción de individuos la clase de 5 -a  $10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

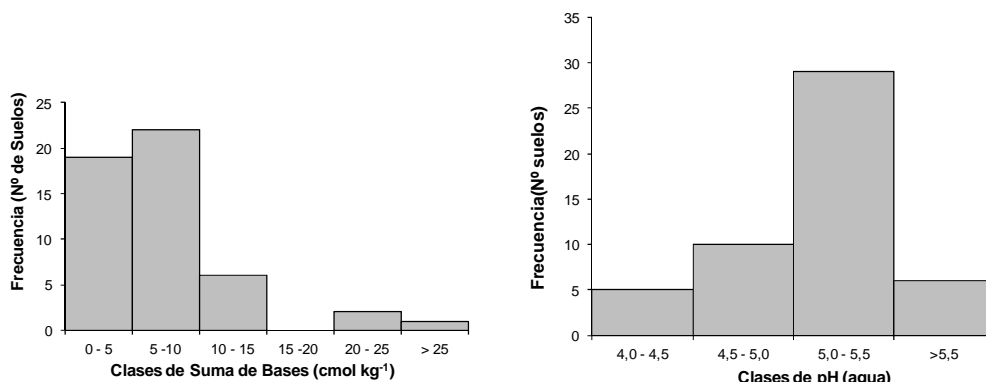


Figura 6: Distribución de la suma de bases y clases de pH (izquierda y derecha respectivamente) de las distintas muestras analizadas.

El valor promedio de pH<sub>(agua)</sub> de los suelos estudiados es  $5,2 \pm 0,43$  (Cuadro 5). La Figura 6 complementa esa información mostrando su distribución. En este caso la mayor cantidad de individuos se concentra en las clases de menor pH. Los casos que pertenecen a las clases de pH<sub>(agua)</sub> mayor que 5,5, son escasos.

La Figura 7 muestra la distribución en clases de los contenidos de Al intercambiable y el valor de Al intercambiable como porcentaje de la CIC efectiva. Mientras el primer gráfico no aporta información a los efectos de encontrar criterios para separar dos grupos dentro de los suelos ácidos, el segundo presenta una distribución bimodal que resulta útil a los propósitos citados.

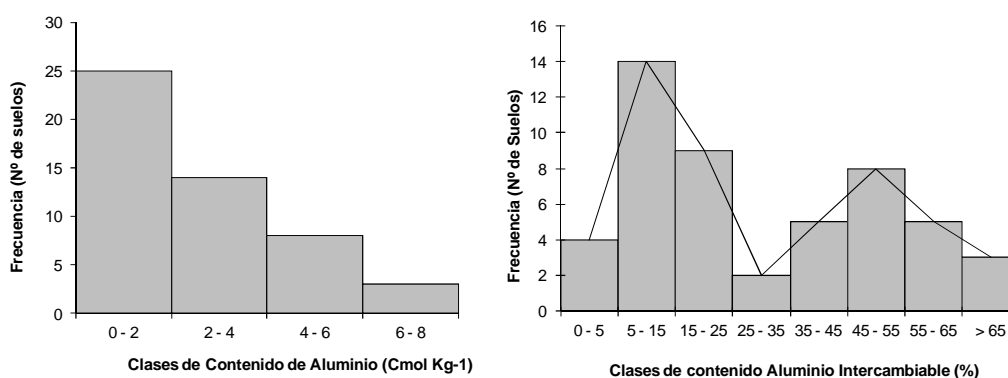


Figura 7. Distribución en clases de los contenidos absolutos de Al intercambiable (izquierda) y su valor como porcentaje de la CIC efectiva (derecha).



La proporción del contenido de Aluminio en el complejo de intercambio, es una propiedad diagnóstica para separar grupos en el conjunto de suelos ácidos en la CSROU (1976), ya manejada en forma temprana o anticipada, tal como mencionan Durán y García (2007). Si bien, el autor no lo dice explícitamente, en las propuestas complementarias o sustitutivas de la actual clasificación, menciona que la saturación en bases, para un determinado horizonte diagnóstico u Orden debe ser mayor al 95%. Es obvio que, el restante 5% es el valor que podría alcanzar el Aluminio. La proyección de las líneas de la Figura 7b sobre el eje de las abscisas abarcan un zona común a dos probables poblaciones. Los suelos con porcentaje de aluminio intercambiable mayores a 25% y menores a 35% podrían pertenecer a cualquiera de los dos subgrupos.

En la Figura 7, puede apreciarse que las clases de aluminio intercambiable relativas (% del total de posiciones de intercambio), presenta una distribución bimodal. Ese comportamiento podría estar representando dos poblaciones distintas: la correspondiente a Luvisoles y Acrisoles, respectivamente. Si se proyectan líneas que unen las clases de contenido de aluminio relativo, se podrá apreciar que existen individuos que bien podrían pertenecer a cualquiera de las poblaciones. Sin embargo, puede hallarse una solución gráfica para establecer un contenido mínimo de aluminio a partir del cual los individuos pertenecerían a la clase de los Acrisoles. Se estima que ese valor podría ser 40% de aluminio intercambiable.

Si a través de una medida tan simple como el pH potenciométrico se pudiese estimar el contenido de Al, contribuiría a clasificar rápidamente un suelo o bien se podría ayudar a interpretar sus propiedades de utilidad agrícola.

Lamentablemente no se logró establecer una relación útil y robusta entre las variables  $\text{pH}_{\text{KCl}}$ ,  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  y Al intercambiable ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ) o Al intercambiable expresado como porcentaje. En todos los casos el  $r^2$  fue inferior a 0,3.

En la Figura 8 puede comprobarse fácilmente la variación de la CIC en función de la técnica empleada y particularmente del pH final que imponen las respectivas soluciones. El V correspondiente a cada una de la determinaciones de CIC, tendrían una evolución inversa, disminuyendo cuando se eleva el pH de la determinación. No se graficó el V correspondiente a cada una de la CIC

mencionadas, pero obviamente tendrían una evolución inversa, es decir disminuiría el V conforme se eleva el pH de la determinación. La observación de la Figura pone en evidencia la presencia de cargas dependientes del pH en estos suelos.

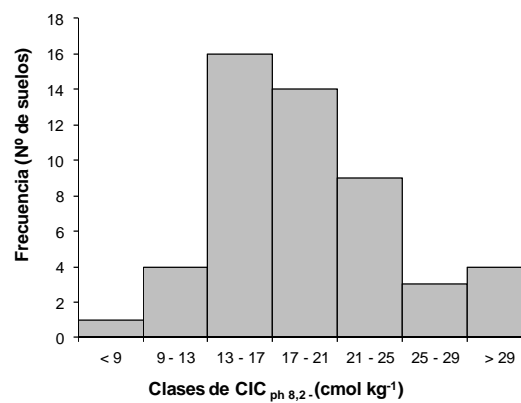
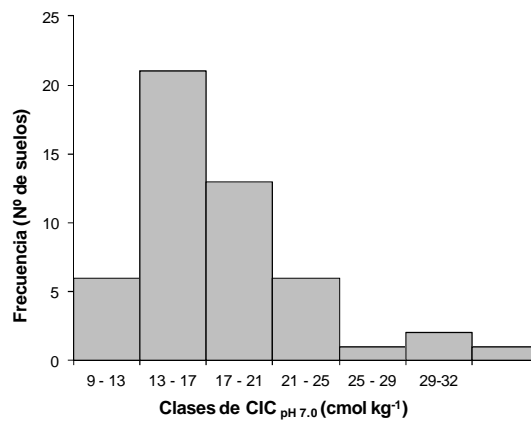
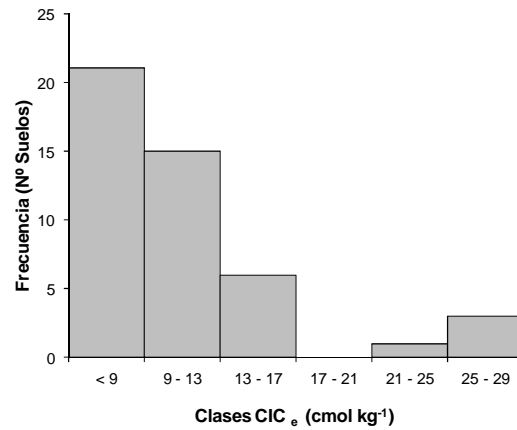


Figura 8. Frecuencia de muestras de suelo pertenecientes a clases la capacidad de intercambio estimadas de con diferentes soluciones.  $CIC_e$  : KCl (suma de bases más aluminio);  $CIC_{pH7}$ : acetato de amonio 1 N (pH7,0);  $CIC_{pH8,2}$ : cloruro de bario 1 N – TEA (pH: 8,2).

## 4.2 ANÁLISIS MULTIVARIADO

### 4.2.1 Análisis de Componentes principales

En el análisis de componentes principales (ACP) se utilizaron todas las variables simples disponibles que pudiesen contribuir o afectar las medias de CIC. En una primera instancia se sometieron al análisis todas las variables independientes y todos los datos disponibles de las variables dependientes con las medidas de CIC obtenidas con diferentes técnicas y pH asociados. Posteriormente se trabajó con las variables independientes:  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  (unidades de pH potenciométrico), Bases (suma de calcio, magnesio, potasio y sodio), aluminio intercambiable, CIC de la fracción arcilla en  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , arcilla, limo (porcentaje en peso), óxidos de hierro (porcentaje de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y porcentaje de aluminio intercambiable (porcentaje de las posiciones de intercambio). Por contribuir con poco peso relativo a la variación total se excluyeron Arena (%) y el CO (%). También se excluyeron las variables dependientes: CIC a pH7 y pH8,2.

El ACP dio como resultado que los componentes o autovectores  $\text{CICe}$  y  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ , acumulan el 63% de la variación total (Cuadro 7). Si se incluyese el tercer componente (bases), se obtendría el 80% de la variación.

Cuadro 7: Autovalores generados a partir de las variables efectivamente medidas en el suelo.

Variables	Lambda (autovalores)	Proporción de la variabilidad	
(1)	(2)	(3)	(4)
		Relativa	Acumulada
CICefectiva	3,46	0,38	0,38
$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	2,20	0,24	0,63
Bases	1,59	0,18	0,80
Al	0,83	0,09	0,90
Arcilla	0,55	0,06	0,96
Limo	0,23	0,03	0,98
OxFe	0,10	0,01	1,00
CICAc	0,04	4,1E-03	1,00
PAI interc,	0,00	0,00	1,00

Lambda corresponde a los autovalores, componentes o ejes de variación generados a partir de las variables efectivamente medidas en el suelo. La

proporción de la variación total explicada por cada eje se presenta en la columna “Relativa” (3), mientras que en la columna “Acumulada” se indica qué porcentaje de la variación se explica por las variables ingresadas hasta la correspondiente a la fila (4).

El Cuadro 8 muestra los autovectores (e1 y e2) correspondientes a los dos primeros ejes de los componentes principales (CP). Estos autovectores están formados por coeficientes ponderadores de cada variable en cada eje. En este caso se observa que las variables que determinan la mayor variación en el CP1 son las bases y la arcilla, mientras que en el CP2 es la CICefectiva y la CIC de la fracción arcilla (cicAC).

Cuadro 8: Ejes de correlación entre las diferentes variables.

<u>Variables</u>	<u>e1</u>	<u>e2</u>
CIC Efectiva	0.27	0.54
PHAGUA	0.31	0.13
BASES	0.47	0.29
AL	-0.32	0.33
ARCILLA	0.39	-0.02
LIMO	0.25	-0.22
OXFe	0.30	-0.29
cicAc	-0.02	0.59
<u>PAI interc.</u>	<u>-0.45</u>	<u>0.12</u>
<i>Correlación cofenética= 0.847</i>		

Nota: Capacidad de intercambio catiónico efectiva: CIC Efectiva; PHAGUA: pH medido en agua, BASES: suma de Ca, Mg, Na y K intercambiables, AL: aluminio intercambiable, ARCILLA: cantidad de arcilla, LIMO: cantidad de limo, OXFE: cantidad de óxidos de hierro (% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Capacidad de intercambio de la fracción arcilla: cicAc, porcentaje de aluminio intercambiable: PAIinterc.

En el segundo eje: componente 2, la mayor amplitud de la variación se da entre las inercias positiva y negativa, respectivamente de CIC<sub>Ac</sub> y OXFe. La CIC de la arcilla es función del tipo de mineral arcilloso. De ahí que las especies que conforman la mineralogía de la fracción arcilla explican la mayor o menor CIC. Si dominan minerales arcillosos de elevada CIC incrementará la variable CIC<sub>Ac</sub> pero si en el espacio intercapa se ubican óxidos de Al o hierro le restarán posibilidades



presentan un coeficiente angular y magnitud similares. El rango entre la proyección de las variables  $CIC_{Ac}$  y  $OXFe$  es la variación total sobre el eje de las ordenadas (24,4%), correspondiente al componente 2 (porción sombreada). El comportamiento que presentan las variables, podría servir para reducir el número de variables a incluir en un posterior análisis de componentes principales (ACP).

Uno de los componentes del suelo que aporta mayor poder discriminante o variación son los  $OXFe$ . Cuanto mayor resulten la longitud y el coeficiente angular de los ejes que representan las diferentes variables, mayor resultará la contribución de la variable a la variación total. Lamentablemente por diferentes razones no suelen realizarse estudios de la composición mineralógica ni determinaciones de óxidos de hierro en forma de rutina.

El ACP permite seleccionar las variables que explican la mayor variabilidad de las muestras que representan la población de suelos ácidos. Procediendo de esta manera se puede economizar tiempo y dinero en la caracterización y clasificación de suelos. Las variables que mayor proporción de variación aportan serían las que prioritariamente habría que determinar. Posteriormente, una vez obtenidos sus respectivos valores se los incluiría en forma prioritaria en modelos de predicción y eventualmente de clasificación.

En la Figura 9 se agrupó con un polígono, la identificación de perfiles de suelo que provienen de un espacio geográfico similar. Así resultó que una proporción importante de suelos ácidos se concentra en los fotoplanos J11, J12 y J13. Es lógico suponer que los suelos que provienen de un espacio geográfico común, también presenten propiedades y características similares y pueda realizarse un agrupamiento.

#### **4.2.2 Agrupamiento o Clúster**

Con el objetivo de generar grupos por similitud, facilitar la clasificación y disminuir la intervención humana subjetiva, con los mismos datos y variables de los suelos utilizadas anteriormente se ensayó un análisis de agrupamiento o clúster. La técnica utiliza la medida de distancia euclidiana estandarizada (o sea la

correlación entre variables) y el método de agrupamiento de Ward. Ver a continuación: figura 10 y Cuadro 9.



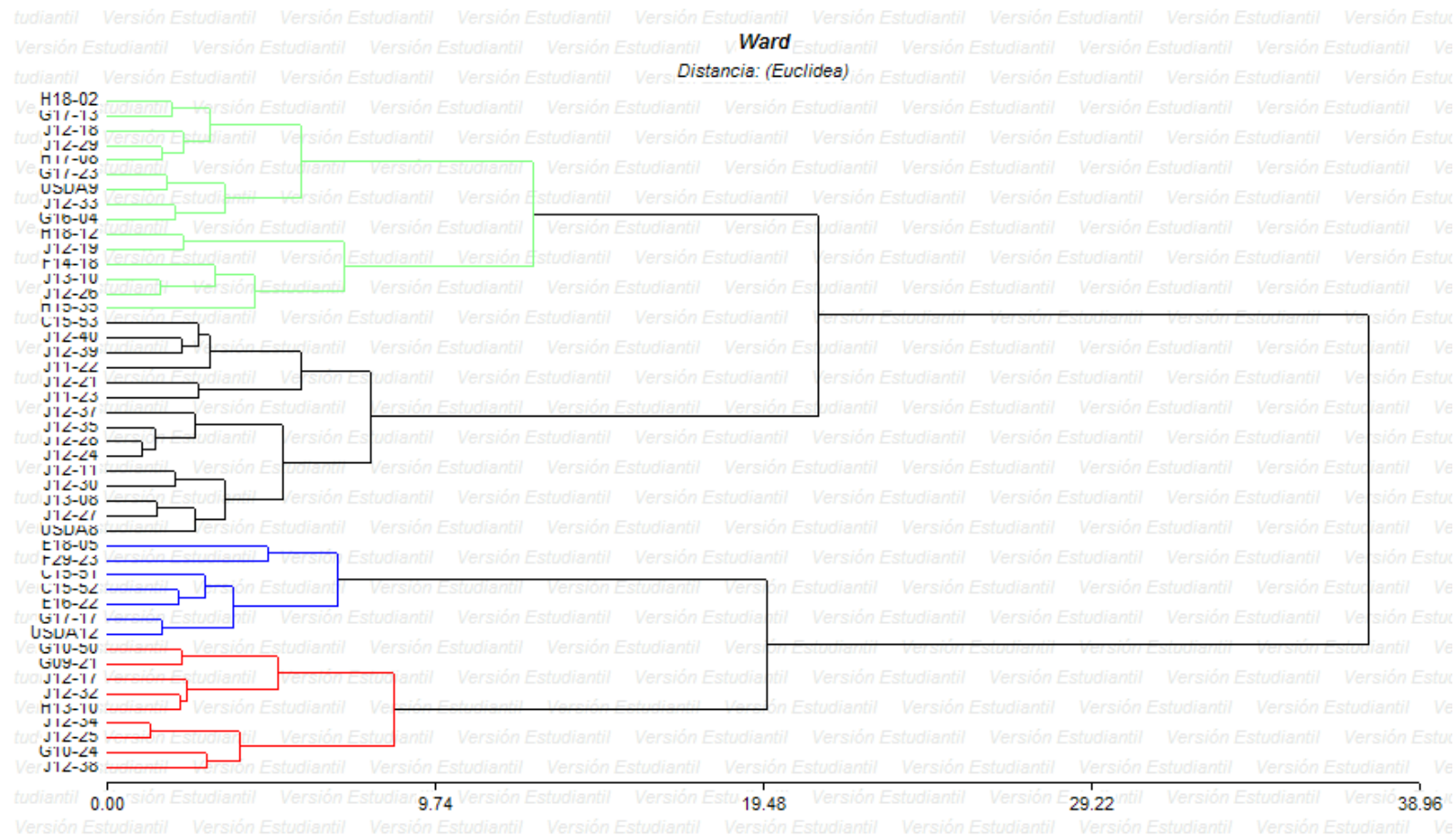


Figura 10. Esquema gráfico del agrupamiento por distancia Euclidea (Ward), de los horizontes subsuperficiales de suelos ácidos.

Cuadro 9. Valores medios de diferentes variables de suelos ácidos en tres agrupamientos por distancia euclidiana. Agrup.: agrupamiento, CIC<sub>e</sub>: CIC efectiva, CIC<sub>7,0</sub>: CIC a pH 7, CIC<sub>8,2</sub>: CIC a pH 8,2, Ac: Arcilla, OXFe: óxidos de hierro, CO : carbono orgánico, Al interc (cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) : aluminio intercambiable, Al interc. (%): Aluminio intercambiable en %.

N° Agrup..	CIC <sub>e</sub>	CIC <sub>7,0</sub>	CIC <sub>8,2</sub>	CIC <sub>Ac</sub>	BASES	Al interc	pH <sub>H2O</sub>	Ac	Limo	Ar.	OXFe	C.O	Al interc.
1	11,9	16,1	21,3	37,7	9,6	2,2	5,4	38	11,8	51	1,4	0,6	18,6
2	10,5	17,6	23,2	29,3	8,8	1,7	5,1	51	22,4	27	3,5	0,8	15,0
3	7,1	10,5	15,2	30,2	3,8	3,3	5,0	29	11,3	60	1,3	0,7	43,5

Si a los agrupamientos 1 y 3 se le adjudica coincidencia con Luvisoles y Acrisoles respectivamente, se observa que los valores medios de las variables independientes: CO, OXFe, LIMO y Al no los distinguen sustancialmente. Mientras que los valores promedio de las variables independientes: BASES,  $pH_{H_2O}$ , ARCILLA, ARENA y Al interc. (%), los diferencian notoriamente. Resulta lógico que los suelos que han estado expuestos a la meteorización durante más tiempo y o que han sufrido una combinación de procesos con una intensidad mayor posean en promedio  $pH_{H_2O}$ , BASES más bajos que otros. Los agrupamientos 1 y 3 también difieren en las variables dependientes como las CIC resultando un valor mayor en cualquiera de ellas ( $CIC_e$ ,  $CIC_{7,0}$ ,  $CIC_{Ac}$  y  $CIC_{8,2}$ ) y mayor el promedio en el agrupamiento 1, respecto al 3. Estos resultados podrían estar explicando las diferencias en génesis particulares entre Luvisoles y Acrisoles.

El agrupamiento 2, presenta valores promedio mayores que los de los grupos anteriores en las variables independientes: C.O., OXFe, LIMO y ARCILLA. Su promedio también resulta mayor en las variables dependientes:  $CIC_{7,0}$  y  $CIC_{8,2}$ . Este agrupamiento presenta promedios menores en las variables: Al, Al interc. y  $CIC_{Ac}$  respecto a los agrupamientos 1 y 3 juntos.

El agrupamiento 2 tiene valores intermedios a los de los agrupamientos 1 y 3 en las variables: BASES,  $pH_{H_2O}$ . El comportamiento de este grupo a veces presenta similitud con el Agrupamiento 1 y otras con el 2; Los suelos que conforman el Agrupamiento 2, en su mayoría pertenecen a unidades cartográficas (UC), desarrolladas a partir materiales geológicos de rocas ígneas y metamórficas (Ver los últimos Cuadros del Anexo). A veces resultan de perfil poco espeso y pueden clasificar como Inceptisoles, otras veces, cuando poseen un horizonte Argilúvico pueden clasificar como Luvisoles. Por tal motivo, aunque se considera promisorio la utilización de técnicas de agrupamiento estadísticas, se considera que el número de datos no es suficiente, para que se convierta en un procedimiento automático hábil para este tipo de tarea.

### Comparación de resultados de modelos con valores medios de Agrupamientos

Los valores medios de las variables independientes de cada agrupamiento fueron introducidas en algunos modelos desarrollados por Seybold y Grossman (S&G) para suelos pertenecientes a los Ordenes: Alfisoles, Ultisoles así como en otros desarrollados específicamente para diferentes clases de actividad de la fracción arcilla, de acuerdo al ST. Con esto se procuró indagar en el grado de predicción de modelos desarrollados a partir de un número de muestras muy importante de suelos de Estados Unidos. A tales efectos se compararon los resultados de la CIC efectiva estimada por los tres agrupamientos o clúster, vistos anteriormente, con los valores de CIC efectiva obtenidos a partir de la aplicación de 4 modelos de Seybold y Grossman (S&G).

Los modelos predictivos de CICE de S&G para los Ordenes del ST y clases de actividad fueron respectivamente los siguientes: **1:** Alfisoles, **2:** Ultisoles, **3:** Semiactivos y **4:** Activos.

$$\mathbf{1: \exp[0,019(\ln CO) + 0,834(\ln \text{arcilla}) + 0,325(\ln \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}) + 0,288(\ln \text{limo}) - 1,937]}$$
$$r^2: 0,66; \text{ cme} : 0,454; \text{ n: } 2963$$

$$\mathbf{2: \exp[0,555(\ln \text{arcilla}) + 0,481(\ln \text{limo}) - 1,204(\ln \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}) + 0,016]}$$
$$r^2: 0,51; \text{ cme} : 0,609; \text{ n: } 3596$$

$$\mathbf{3: \exp[1,409 (\ln \text{arcilla}) + 0,481(\ln CO) - 1,864]}$$
$$r^2: 0,84; \text{ cme} : 0,317; \text{ n: } 1399$$

$$\mathbf{4: \exp[1,15(\ln \text{arcilla}) - 0,115(\ln CO) - 1,725]}$$
$$r^2: 0,88; \text{ cme} : 0,296; \text{ n: } 1695$$

Nota: cme significa error cuadrático medio

Tomando como base 100 los resultados de CICE obtenidos en los diferentes Agrupamientos se le restó el valor de predicción de los distintos modelos de S&G. La diferencia fue expresada en porcentaje respecto a la base. Los resultados de la comparación se resumen en el Cuadro siguiente:

Cuadro 10: Comparación de la CIC<sub>e</sub> estimada por modelos de Seybold y Grossman en Alfisoles, Ultisoles, clases de actividad “Semiactiva” y “Activa” del Soil Taxonomy vs los valores medios de CIC<sub>e</sub> obtenidos por los tres agrupamientos: 1, 2 y 3

Nº de Modelo/Agrupamiento	CIC <sub>e</sub> estimado por (S&G)	CIC <sub>e</sub> estimada por Agrupamiento	Diferencia (%)
1 Alfisoles			
1	10,4	11,9	-13
2	15,8	10,5	50
3	8,0	7,1	12
2 Ultisoles			
1	16,5	11,9	39
2	32,3	10,5	208
3	13,5	7,1	90
3 Semiactiva			
1	7,2	11,9	-40
2	9,7	10,5	-8
3	5,4	7,1	-25
4 Activa			
1	12,3	11,9	3
2	8,8	10,5	55
3	16,7	7,1	24

En síntesis, la CIC<sub>e</sub> estimada a partir de los modelos de Seybold y Grossman no presenta diferencias mayores a 13 % respecto a los valores de predicción obtenidos por los agrupamientos. Cuando las diferencias entre los dos métodos de predicción son mayores a 13% las celdas están oscurecidas. El mayor grado de coincidencia predictiva ocurre con el modelo generado para Alfisoles ya que la diferencia es aproximadamente de 13% respecto a dos de los Agrupamientos. En el caso del Agrupamiento 1 subestimando en un 13% y en del Agrupamiento 3, sobrestimando en casi igual proporción (12).

Los resultados de CIC<sub>e</sub> del Agrupamiento 2 muestran el menor grado de coincidencia predictiva general ya que su diferencia resulta siempre mayor a 13% en tres de los modelos de S&G (Alfisoles, Ultisoles y Activa). Aunque la coincidencia es relativamente elevada (8%) entre el caso del modelo Semiactiva y el Agrupamiento 2, pero no lo es con los otros dos Agrupamientos.

Los valores predictivos de la  $CIC_e$  más próximos en valor absoluto, ocurren entre el modelo de S&G desarrollado para la clase Activa y el Agrupamiento 3 (diferencia 3%).

El modelo de S&G para Ultisoles no coincide con ninguno de los promedios de  $CIC_e$  de los diferentes agrupamientos. Ni siquiera lo hace con el Agrupamiento 3 considerado como más próximo a los Acrisoles de la Clasificación de Suelos del Uruguay (1976) y probablemente a los Oxisoles del ST.

La clase de actividad de la fracción arcilla es una relación entre la  $CIC_{Ac}$  ( $cmol_c\ kg^{-1}$ ) y el porcentaje de arcilla en peso (%). La Figura 7, muestra que independientemente de cómo resulte clasificado un suelo, la mayor proporción de los horizontes subsuperficiales de suelos ácidos pertenecen a las clases Semiactiva y Activa de acuerdo al ST. De esta forma, sin realizar estudios muy costosos en términos de equipamiento y tiempo, puede tenerse una idea aproximada de la composición mineralógica dominante. La pertenencia de la mayoría de las muestras de horizontes subsuperficiales a las clases “Activa” y “Semiactiva” reafirman la conclusión de Durán (2004), que el sistema de intercambio catiónico en los suelos ácidos se aproxima al tipo mixto, de minerales arcillosos silicatados laminares con revestimientos de óxidos.

La distribución de los horizontes subsuperficiales en clases de actividad del Soil Taxonomy puede observarse en la Figura 11.

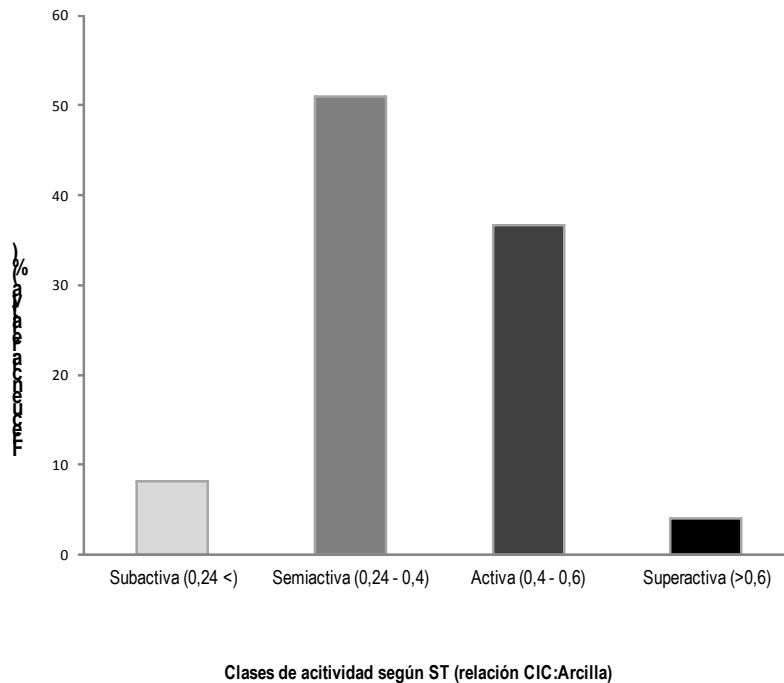


Figura 11. Horizontes subsuperficiales de suelos ácidos según clases de actividad de fracción arcilla de acuerdo al ST.

Cuando se disponga de datos de arcilla, limo, pH, CO y se necesite estimar la  $CIC_e$  podrían utilizarse los modelos de S&G teniendo en cuenta las limitaciones que se desprenden de su coeficiente de determinación y error cuadrático medio. Además, deberían utilizarse aquellos modelos que mostraron un mayor grado de ajuste a través de los comentarios expuestos anteriormente. Sin perjuicio de lo expuesto, tanto para la utilización agrícola como con fines clasificatorios se recomienda contar con datos de la suma de bases y aluminio intercambiable.

## MODELOS DE PREDICCIÓN

### 4.2.3 Correlación

#### Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Con los pares de datos de  $CIC_e$  y  $CIC_7$  se ajustó el modelo:

$$(1) \quad y = 1,2031x + 2,3679 \quad (r^2 = 0,887; n = 46)$$

Siendo  $y$ :  $CIC_7$ ;  $x$ :  $CIC_e$

Disponiendo de datos de bases totales más aluminio, puede predecirse el resultado esperado de  $CIC_7$ , con una probabilidad razonable.

Con la misma información, también puede predecirse la  $CIC_{8,2}$ ; en este caso, la función a utilizar es:

$$(2) \quad y = 13,085 \ln x + 9,7475 \quad (r^2 = 0,813; n = 46)$$

Siendo  $y$ :  $CIC_{8,2}$ ;  $x$ :  $CIC_e$

### Saturación en Bases (V)

La correlación entre los valores de  $V_e$ ,  $V_7$  y  $V_{8,2}$  permitió ajustar los siguientes modelos:

$$(3) \quad y = 0,761 x - 1,6546$$

Siendo  $y$ :  $V_{8,2}$ ;  $x$ :  $V_7$  ( $r^2 = 0,8663$ ,  $n = 46$ )

$$(4) \quad y = 0,7053 x - 1,2484$$

Siendo  $y$ :  $V_{7,0}$ ;  $x$ :  $V_e$ ; ( $r^2 = 0,7951$ ,  $n = 46$ )

$$(5) \quad y = 9,6802 e^{0,0172x}$$

Siendo  $y$ :  $V_{8,2}$  y  $x$ :  $V_e$ ; ( $r^2 = 0,8202$ ;  $n : 46$ )

La última expresión es muy similar a la hallada por Durán y García (2007):

$$y = 9,9837 e^{0,0172X}$$

Siendo  $y$ :  $V_{8,2}$ ;  $x$ :  $V_e$  ( $r^2 = 0,8661$ ,  $n = 32$ )

Utilizando el modelo (4), puede hallarse el valor que debería tomar la variable independiente  $V_e$  para estimar el valor de  $V_{7,0}$ , tal que cumpla con el requisito establecido como criterio en un sistema de clasificación o su modificación.

Por ejemplo, al valor  $V_{7,0}$ , mayor a 50% exigido por la definición de horizonte Melánico, le corresponde un valor de  $V_e$  aproximadamente del 67,4 %.



En forma similar, utilizando el modelo (5), se pueden estimar los valores que debería adquirir la variable independiente  $V_e$ , para que la variable dependiente  $V_{8,2}$  resulte inferior a 50%. La solución gráfica (Figura 12) se da alrededor de 95 % de saturación en bases efectiva ( $V_e$ ), lo cual coincide con el criterio propuesto por Durán y García (2007). El 5 % complementario corresponde al porcentaje de aluminio intercambiable. Estos criterios  $V_{8,2}$  menor a 50% y más de 5% de aluminio intercambiable son los criterios exigidos en la clasificación del Uruguay (1976), para la definición del Orden: Suelos Desaturados – Lixiviados.

Al utilizar el modelo (5), se despejó el valor que adquiriría la variable independiente para separar los Grandes Grupos Acrisoles y Luvisoles: menor de 35 y mayor de 50%  $V_{pH8,2}$ . El valor correspondería a 74% de  $V_{pH\text{ suelo}}$  o  $V_e$  (Figura 12). Este valor es muy similar al reportado por Durán y García (2007). Estos autores no proponen la  $V_e$  como criterio para diferenciar Alisoles (sustitutivo de Luvisoles) de Acrisoles porque juzgan que la el  $r^2$  entre las variables  $V_e$  y  $V_{8,2}$  no tiene precisión suficiente.

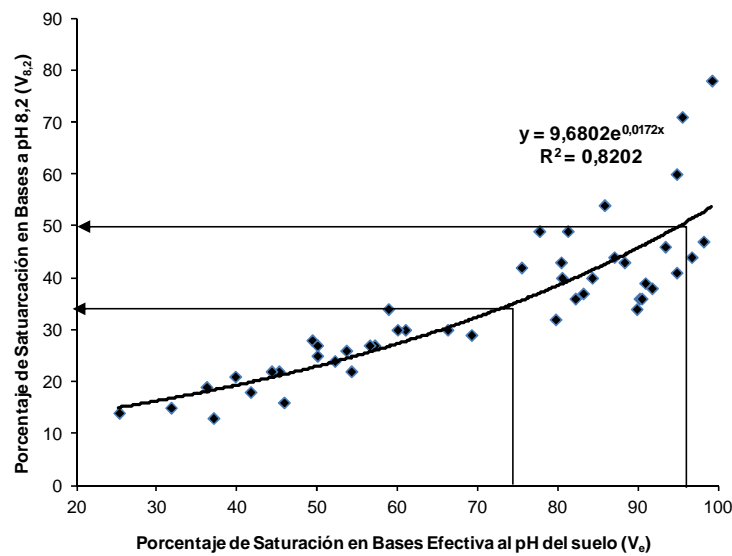


Figura 12. Relación entre la saturación en bases efectiva ( $V_e$ ) y la saturación en bases a pH:8,2 ( $V_{8,2}$ ) en las muestras de horizontes subsuperficiales estudiados. Las líneas horizontales y verticales unen valores correspondientes entre los ejes respectivos. Al valor 95% de  $V_e$  le

corresponde un 50 % en  $V_{8,2}$ . Al valor de 75% de  $V_e$  le corresponde 35% de  $V_{8,2}$

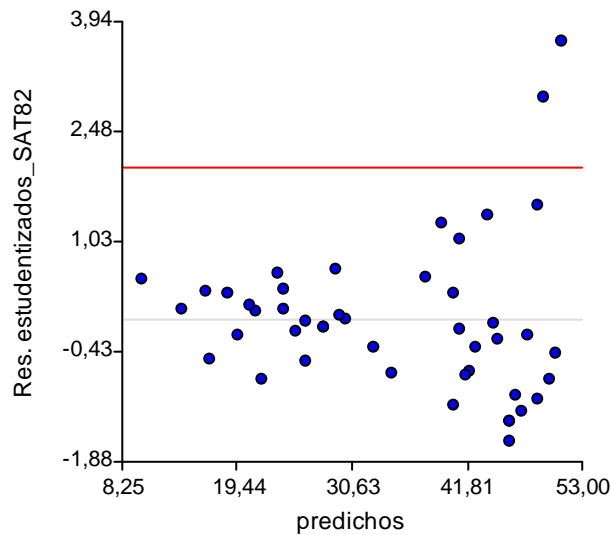


Figura 13. Residuos estandarizados entre los valores predichos por la aplicación del modelo establecido entre las variables  $V_e$  y  $V_{8,2}$  y los valores efectivamente observados de  $V_{8,2}$ .

La distribución aproximadamente normal de los residuos estandarizados, permite concluir que el ajuste carece de sesgo significativo (Figura 13).

Con datos de 19 muestras no utilizadas en la generación del modelo (5) se realizó una prueba de validación del mismo. En el Cuadro 11 se presenta dicha información. El cuadro es de doble entrada, sobre la izquierda bajo el rótulo “Reales” aparecen los Grandes Grupos de suelos tal como fueron clasificados por medios convencionales (información asociada al paisaje y morfológica), así como analíticas: CIC, Bases y Al intercambiable, y luego poder estimar la  $V_7$  y  $V_{8,2}$ . Mientras que en la parte superior, bajo el rótulo “Estimado” se encuentran los mismos Grandes Grupos pero clasificados de acuerdo a la estimación de  $V_7$  y  $V_8$  obtenidas a través del modelo ajustado.

Al utilizar el valor de  $V_e$  del suelos como criterio de diferenciación entre Luvisoles o Acrisoles, no existe coincidencia en dos de los seis suelos clasificados inicialmente como Luvisoles, ver Cuadro 11, cuadrante superior derecho. Más tarde se verificó que en realidad había muestras que pertenecían a otros Grandes

Grupos: Inceptisoles y Planosoles; los cuales fueron incluidos en el cuadro de contingencia como “otros”. Uno de los Acrisoles fue erróneamente clasificado como Luvisol, ver Cuadro 11, primer columna en el centro. Mientras que una de las muestras extraída de la base de datos, originalmente clasificada equívocamente como Luvisol, en realidad pertenece a uno de los Grandes Grupos citados denominado como “otros” (Ver Cuadro 11, ángulo inferior izquierdo).

Si se suman coincidencias, no coincidencias, y “otros” totalizan 19 posibilidades, por lo que los errores de clasificación al utilizar solamente la  $V_e$  para calificar los suelos ácidos podría estar cometiendo un error de 21 % (Cuadro 11). De los 6 Luvisoles “posibles”, cuatro fueron identificados correctamente por el modelo 5. Un Luvisol fue confundido con un Acrisol (1/19), un perfil fue clasificado como Luvisol, cuando en realidad pertenecía a un Gran Grupo diferente de los Desaturados – Lixiviados (1/19). En los casos “posibles” de Acrisoles el modelo no tuvo ningún error. Mientras que clasificó como Luvisoles a dos muestras pertenecientes a perfiles que tampoco se encuentran comprendidos en el orden Desaturados-Lixiviados (2/19). La sumatoria de las frecuencias de errores acumuladas constituye el 21%.

Se considera que este error es aceptable si se utiliza esta herramienta en forma complementaria con otro criterio: cuando la muestra del horizonte Agilúvico posee más de 35% de aluminio intercambiable el perfil se clasificaría como Acrisol, (ver Figura 7).

El presente trabajo se desarrolló para encontrar mecanismos que contribuyeran a facilitar la decisión en la clasificación de los actuales Acrisoles y Luvisoles. Sin embargo algunos de datos de suelo incrementaron el error. Los perfiles J12-25, F29, 23 y C21-51 no pertenecen la Orden Desaturados-Lixiviados, por lo que no tendrían que haber sido incluidos en la validación del modelo 5 (ver Anexo, Síntesis de Clusters o Agrupamientos). O sea que de no haber incluido esos perfiles, el error del modelo 5 para diferenciar Luvisoles de Acrisoles seguramente hubiese resultado menor.

Cuadro 11. Contingencia entre la clasificación de suelos por valores estimados a partir de la aplicación del modelo (5) y la utilización de criterios apoyados en datos analíticos y morfológicos contenidos en la Clasificación de Suelos del Uruguay, 1976

		<b>Estimado</b>			Total
		Luvisoles	Acrisoles	otros	
<b>Real</b>	Luvisoles	4	0	2	6
	Acrisoles	1	9	0	10
	Otros	1	0	2	3
	Total	6	9	4	19

## **5 CONCLUSIONES**

El valor promedio de  $CIC_{Ac}$ , la distribución de las clases de actividad de la fracción arcilla y el promedio del contenido de óxidos de hierro (ditionito)  $1,7 \pm 1,1\%$ , reafirman la composición mineralógica sugerida por Durán (2004) para los suelos ácidos. Los óxidos de hierro y aluminio serían los responsables de bloquear posiciones de intercambio permanentes y a su vez constituyen la fuente o el origen de cargas dependientes del pH.

Los valores de actividad de la fracción arcilla de acuerdo a la relación utilizada por el Soil Taxonomy:  $CIC_7 / \text{arcilla } \%$ , permitieron clasificar las muestras de perfiles horizontes subsuperficiales ácidos, encontrándose que pertenecen mayoritariamente a las clases Semiactiva y Activa. Esta clasificación ayuda a interpretar la composición mineralógica y el potencial de retención de nutrientes de los suelos.

Las técnicas ACP y agrupamiento o clúster, se mostraron útiles para contribuir a clasificar los suelos de reacción ácida por sus propiedades naturales. Su comparación tomando como “real” lo interpretado por el hombre, puede no ser ecuánime, dado que a veces puede estar fundada en información escasa o aún errónea.

La utilización de los valores promedio de las variables obtenidas en los agrupamientos o clúster en modelos de predicción de  $CIC_e$  generados en otras latitudes, mostraron diferencias que hacen suponer que la composición cumple un rol fundamental en la explicación del potencial para retener cationes necesarios al crecimiento vegetal.

Ante la carencia de determinaciones de  $CIC_7$  o  $CIC_{8,2}$  pueden distinguirse los Luvisoles (Alisoles) de Acrisoles utilizando modelos estadísticos que estiman la  $V_{8,2}$  a partir de la  $V_e$ , obtenida de la suma de bases más la acidez intercambiable medida con KCl 1N. Los suelos pertenecientes al Orden Desaturados – lixiviados serían aquellos cuya  $V_e$  resulte inferior a 95%. (se desprende que al menos 5% es Aluminio intercambiable en el horizonte B), cuyo valor se corresponde con un valor de  $V_{8,2} = 50\%$

Si no se dispone de datos analíticos de  $V_{8,2}$  en los horizontes Argilúvicos para diferenciar Luvisoles (Alisoles) de Acrisoles, pueden utilizarse  $V_e$  de 75%, que coincide aproximadamente con el de 35%  $V_{8,2}$ . Para complementar este criterio a los Acrisoles se le exigiría, además, que posean un nivel de Aluminio intercambiable mayor a 40%.

La herramienta generada (robusta aunque perfectible), es de utilidad tanto para taxónomos como para agrónomos en el uso y manejo de suelos. Es necesario desarrollar investigaciones complementarias para mejorar el grado de predicción de modelos de CIC en suelos desarrollados en el ambiente de la región, teniendo en cuenta variaciones debidas a su constitución y edad.

## 6 **BIBLIOGRAFÍA**

- Ávila, M. 1999. Techniques for evaluating changes in chemical and mineralogical properties of acidified soils. (1999), Master Science Thesis – University of Wisconsin – Madison. 119 pp.
- Beery, M., Wilding, L. P. 1971. The Relationship Between Soil pH and Base-Saturation Percentage for Surface and Subsoil Horizons of Selected Mollisols, Alfisols, and Ultisols in Ohio. (1971), The Ohio Journal of Science. V71 N1, 43-55
- Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcilla de suelos – San José, Costa Rica: IICA., 1216p.- (IICA/Serie de libros y materiales educativos; no. 60). ISBN 92-9039-067-0. 1.
- Borggaard, O.K., Gimising, A.L 2008. Fate of glyphosate in soil and possibility of leaching to ground and surface waters: a review – Pest Managing Science 64:441-456.
- Brady, N. C. Weil, R.. 2002 The nature and properties of soils. Publisher: Pearson Prentice Hall . Edition Number: 14 . Language: English . ISBN: 013227938X. EAN: 9780132279383. No. of Pages: 965.
- Buol, S. W.; Hole, E. D.; McCracken, R. J., Southard, R. J. 1997. Soil Genesis and Classification. Iowa State Press. 527 pp. Ames.
- Califra, A. Ruiz, A.; Alliaume, F., Durán, A. 2007. Contribución al estudio de los suelos “Algorta” Agrociencia Vol XI N° 1 pág. 35 – 46.
- Califra, A.; Taró, G. 1982. Caracterización de una toposecuencia de suelos representativos de la cuenca de Aceguá, Tesis (Ing Agr). (Dpto. Cerro Largo, Montevideo, Facultad de Agronomía, UY, 211 p.
- Cayssials, R., Álvarez, C. 1984 Interpretaciones Agronómicas de la Carta de Suelos del Uruguay - Aptitud potencial de las tierras para diferentes usos - Boletín Técnico n° 9. DSA/MGAP.
- Chao, T., Harward, M. E. 1962 Nature of acid clays and relationships to ion activities and ion ratios in equilibrium solutions. Soil Science. Wisconsin, USA. v: 93, p. 246-253.

- Da Silva, V. 2006. Variáveis de acidez em função da mineralogia do solo. Tesis de Maestría, Curitiba , Paraná, Brasil (2006).86 pp.
- de Villiers, J. M. ; Jackson, D M. L. 1967. Cation Exchange Capacity Variations with pH in Soil Clays, Published in Soil Sci. Soc. Am. J 31:473-476 (1967)© 1967 Soil Science Society of America
- Duchaufour, P. 1982 Pedology: Pedogenesis and Classification, English. 631.4 \_S593 ISBN 0-004-6310151-0, ISBN 0-04-631016
- Durán A, García, F. 2007. Suelos del Uruguay, T1 y T2. ISBN 9974674011y9974674028, Ed. HEMISFERIO SUR, 700 pp.
- Durán A, Califra A; Molfino J, Lynn W. 2005. Keys to soil taxonomy for Uruguay- United States Department of Agriculture, Natural Resource Conservation Center. 74p
- Durán A. Califra A, Molfino J. 2004. Los suelos del Uruguay en la taxonomía de suelos de EE.UU- Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, Argentina.
- Durán. A. 2004. Composición del suelo. [En línea]. 30 marzo 2012. <http://www.fagro.edu.uy/~edafologia>.
- Durán A, Ippoliti G, Zamalvide J, García F. 1997. Propiedades físico-químicas de los suelos. Código 421. Facultad de Agronomía. 109 pp
- Durán, A. 1991. Los suelos del Uruguay - Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur, Montevideo. 398 pp.
- Fauziah, C.I, Jamilah, I., Syed S.R, 1997. An evaluation of cation exchange capacity methods for acid tropical soils. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Selangor, Malaysia. *Pertanika J . Tr ap. Agric. Sci.* 20(2/3): 113-119(1997) ISSN: 0126-6128 © University Putra Malaysia Press.
- Figueiredo, O. A. R.; Almeida, J. A. 1991. Quantificação das Formas Trocáveis e Não Trocáveis de Alumínio em Solos Ácidos do Estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo.* Campinas, SP. v: 15, p. 151-156.
- Finzi, A.C., Canham, C.D., van Breemen, N. 1998. Canopy tree–soil interactions within temperate forests species effects on ph and cations - *Ecological applications*, 8(2), 1998, pp. 447–454, by the Ecological Society of America



- Fontes, M.P. 1992. Iron oxide-clay mineral association in Brazilian Oxisols. *Clays and Clay Minerals*, Vol. 40, No. 2, 175-179.
- Gobin A., Campling P.; Deckers J.; Feyen J. 2000. Quantifying soil morphology in tropical environments: Methods and application in soil classification *Soil Science Society of America journal*, ISSN 0361-5995, CODEN SSSJD4, vol. 64, no4, pp. 1423-1433.
- Hendershot, W.H; Duquette, M. 1986. A simple method for estimation cation exchange capacity and exchangeables cations – *Soil Science Society of America Journal* 50:605-608.
- INFOSTAT versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Lozada J, Villasimil.J. 1987. Utilización del análisis multivariado en la clasificación de suelos del orden Vertisol en Venezuela; in 10. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y 9. Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Maracaibo (Venezuela). 14-21 Jun.
- Manrique, L.A, Jones, C.A, Dyke, P.T. 1991. Predicting cation exchange capacity from soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 787–794
- Martínez, H., Fuentes, J., Acevedo H. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *RC Suelo Nutr. Veg.* 8 (1) 68-96.
- Melo, F.A. 1985. Seminário sobre Corretivos Agrícolas: Origem, natureza e componentes da Acidez do Solo: Critérios para Calagem. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ. Fundação Cargill. Piracicaba – São Paulo. cap. II p. 67.
- Ministerio de Agricultura y Pesca, Dirección de Suelos y Fertilizantes, 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay - Tomo I: Clasificación de suelos. Montevideo.Uruguay.
- Ministerio de Industria y Energía, Dirección Nacional De Minería y Geología, 1985. Carta Geológica del Uruguay, Escala 1:500.000.
- Molfino, H; Califra A, Petraglia, C; Perdomo J; De los Heros M, 1994. Compendio Actualizado de Información de Suelos del Uruguay (CAISU) Escala 1:100.000. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP),

- Dirección de Recursos Naturales Renovables, División Suelos y Aguas. Sistema de Información Geográfica (SIG). Uruguay. Editado en CD.
- Ngewoh Z. S. Taylor R. W., Shuford W. 1989. Exchangeable cations and CEC determinations of some highly weathered soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 20 (17 y 18) pg. 1833 – 1855
- Northern Arizona University and the HBCU/MI. 2012. ENV 320 Soil Science. Chapter 5:158-168. Lecture 13: Clay Minerals. [En línea]. 30 marzo 2012. <http://jan.ucc.nau.edu/~doetqp-p/courses/env320/lec13/Lec13.html>
- Oorts, K., Vanlauwe, B, Pleysier, J., Merckx, R 2004. A new method for the simultaneous measurement of pH-dependent cation exchange capacity and pH buffering capacity. in *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1578–1585
- Osorio, W. 2003. Eficiencia y efectividad de la fertilización en la agricultura de Colombia. Manejo integral de la fertilidad del suelo. Soc. Col. de la Ciencia del Suelo. Bogotá. D.C. p.177-210
- Pavan. M.; Bingham, F. T y Pratt, P.F. (1985) Características químicas y mineralógicas de suelos ácidos seleccionados del Estado de Paraná, Brasil. *Revista Intearmericana de Ciencias Agrícolas. TURRAB* (35)2 pp 131-139.
- Pazos, J. 1981. Identificación de los minerales arcillosos de los suelos utilizados en un ensayo de dinámica de potasio Tesis de grado (1981) Montevideo, T-1378, 80 p.
- Petraglia, C., Dell'Acqua, M. 1999. 4ª. Carta forestal. Dirección General Forestal, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, República Oriental del Uruguay. [En línea]. 18 junio 2010.: <http://www.mgap.gub.uy/Forestal/DGF.htm>
- Porta, J.; López, M; Roquero C. (2003) Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente . 3º Edición. Ediciones Mundi-Prensa 960 pp. Madrid.
- Pratt, P.P., Alvahydo, R. 1966. Cation Exchange Characteristics of Soils of Sao Paulo Brazil- Bull. 31, IRI Research Institute, Brazil.
- Rhoades, J. 1982. Cation Exchange Capacity. In: *Methods of Soil Analysis. Part. 2. Agronomy Monograph N° 9, (2nd. Edition).* U.S. Salinity Lab. USDA-ARS, Riverside, C.A. 92501

- Rodríguez, O., Rodríguez, A. 2002. Comparación de la CIC en dos suelos, utilizando Acetato de Amonio, Acetato de Sodio y Cloruro de Amonio - Rev. Fac. Agron. v.19 n.4 Caracas Revista de la Facultad de Agronomía ISSN 0378-7818 versión impresa.
- Ross D. S. 1995. Recommended soil testing procedures for the northeastern United States- 2nd Edition Northeastern Regional Publication No. 493- Agricultural Experiment Stations Of Connecticut, Delaware, Maine, Maryland, Massachusetts, New Hampshire, New Jersey, New York, Pennsylvania, Rhode Island, Vermont, And West Virginia.
- Scalenghe, R.; Zanini, E; Nielsen, D. R. 2002. Modeling soil development in a post-incisive chronosequence,- Soil Science, Volume 165,- Issue 6 - pp 455-462
- Schwertfeger, D.M., Hendershot W.H. (2009) Determination of effective cation exchange capacity and exchange acidity by a one-step BaCl<sub>2</sub> method. Soil Science Society of America Journal 73:737-743.
- Seybold, C. A., Grossman, R. B. 2005. Predicting cation exchange capacity for soil survey using linear models Published online May 6, 2005 - Published in Soil Sci. Soc. Am. J. 69:856–863 The U.S. Soil Science Society of America.
- Seybold, C. A., Grossman, R. B. 2006. Prediction of effective cation exchange capacity in low pH soils. Soil Science Vol. 171, N° 1 – 0038-075X/06/17101-03-12.
- Shuman L. M.; Ramseur, E. L; R. Duncan, R. 1990. Soil aluminum effects on the growth and aluminum concentration of sorghum- Published online 1 March 1990, Published in Agron. J 82:313-318 (1990)© American Society of Agronomy.
- Skinner, M. F. 2001. Measuring the cation exchange capacity of forest soils- Commun. Soil Sci. Plant Anal., 32(11&12), 1751–1764.
- Smith, G. 1986. The Guy Smith Interviews - Rationale for concepts in soil taxonomy, Edited by T.R. Forbes. Soil Management Support Services. Soil Conservation Service. U. S. Department of Agriculture, New York State College of Agriculture and Life Sciences. Cornell University, Department of Agronomy.

- SOIL SURVEY STAFF. 2010. Keys to Soil Taxonomy, 10th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Somroek, W., Freitas, F., Averbeck, H. 1970. Soil studies in the Laguna Merín basin. Appendix A: Descripciones, Datos Físicos y Químicos de Perfiles Seleccionados: Parte Uruguay CLM/FAO, Treinta y Tres, Uruguay - UY1970.01
- Spósito, G. 1989. The Chemistry of Soils. University of California at Berkeley. Oxford University Press. New York.
- Sumner, M. E., Miller W. P. 1996. Cation exchange capacity , and exchange coefficients. In: D. L. Sparks (ed.) Methods of soil analysis. Part 2: Chemical properties, (3rd ed.) ASA, SSSA, CSSA, Madison, WI.
- Thomas, G. W y Hargrove, 1984. The chemistry of soil acidity. In F.Adams (ed) Soil Acidity and Liming, Agronomy 12:3-56
- Thomas, G. W. 1977. Historical developments in soil chemistry: ion exchange Soil Sci. Soc. Am. J . Vol. 41.
- Tisdale, S.; Nelson, W.; Beaton, C. 1985. Soil fertility and fertilizers. 4th ed. Macmillan Publishing Co. N.Y.
- Uehara, G., Gillman, G. 1981. The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview Press, Boulder, Colorado
- Van Raij, B.; Quaggio, J. A. 2001 Analise química para a avalicao da fertilidade dos solos tropicais. Campinas, instituto Agronomico, 285 p.
- Van Raij B. 1991. Macronutrientes Secundarios. En: Fertilidade do solo e adubação, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. P. 219-240.
- Van Raij B. 1988. Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo Soil fertility and Fertilizers. 5ed. Columbus. Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 88p.
- Van Raij, B.; Peech, M. 1972. electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropics, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Vol. 36.
- Víctora, C., Zamalvide, J. (1972) Contribución de la materia orgánica a la capacidad de intercambio catiónico en distintos suelos del Uruguay, Tesis Facultad de Agronomía, Montevideo, UY.

Wasserman, M, Viana A, Bartoly, F, Vidal D, Ruas E, Wasserman J, de Carvalho, C., Janvrot, R. 2005. Bio-geochemical behavior of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in tropical soil. Radioprotection, Suppl. 1, vol. 40 (2005) S135-S142-© EDP Sciences.

WORLD REFERENCE SYSTEM, 2006 IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources, 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. ISBN 92-5-105511-4

Wutke, A, Camargo, A. 1972. Adsorção e troca iônica. In: MONIZ, A. C. (Coord.) Elementos de Pedologia. São Paulo, Polígno.p.125-147.

7 **ANEXO**

Síntesis de Clúster a o Agrupamiento 1

Perfil	Cmol c. kg <sup>-1</sup>						pH H <sub>2</sub> O	(%)					CSROU	
	CICe	CIC <sub>7</sub>	CIC <sub>8,2</sub>	CIC <sub>Ac</sub>	Bases	Al		Arcilla	Limo	Arena	Ox. Fe	C.O.		Al interc.
J12-38	13,4	15,8	18,0	55	12,8	0,6	5,5	28,2	14,5	57,3	0,76	0,10	4,48	Luvisol Ócrico Abrúptico Ar
H13-10	12,7	16,3	20,3	41	10,9	1,8	5,3	33,8	16,2	50	0,5	0,75	14,17	Luvisol Ócrico Abrúptico Ar
G09-21	14,1	18,8	24,2	35	8,3	5,8	5,7	47	6,1	46,9	1,55	0,81	41,13	Luvisol Ócrico Álbico
G10-24	10,6	14,2	19,0	47	8	2,6	5,1	28,1	13,6	58,3	0,84	0,3	24,53	Luvisol Ócrico Álbico
J12-17	14,8	17,8	23,5	35	11,5	3,3	5,3	43	10,8	46,2	1,5	0,81	22,3	Luvisol Ócrico Abrúptico ArFr
H17-08	6,9	12,2	18,1	26	6,2	0,7	5,6	38,2	13,2	48,6	2,52	0,68	10,14	Acrisol Melánico Típico
G10-50	14,2	20,1	26,3	43	7,1	7,1	5,3	40,8	12,6	46,6	1,47	0,71	50,00	Luvisol Ócrico Álbico
G17-13	7,7	9,8	15,6	19	6,2	1,5	5,5	42,6	11,7	45,7	3,08	0,47	19,48	Luvisol Ócrico Típico ArFr r
H18-02	7,7	11	15,8	25	6,8	0,9	5,6	38,2	20,3	41,5	2,16	0,44	11,69	Luvisol Melánico Típico
J12-18	9,7	12,9	18,1	31	7,8	1,9	5,7	35,7	10,0	54,3	1,23	0,56	19,59	Luvisol Ócrico Álbico Ar, pa
J12-25	11	14,9	23,2	36	10,8	0,2	5,4	37,2	7,8	55	1,44	0,41	1,82	Planosol Dístrico Ócrico

Continuación agrupamiento 1														
	Cmol c. kg <sup>-1</sup>								(%)					
Perfil	CICe	CIC <sub>7</sub>	CIC <sub>8,2</sub>	CIC <sub>Ac</sub>	Bases	Al	pH H <sub>2</sub> O	Arcilla	Limo	Arena	Ox. Fe	C.O.	Al interc.	CSROU
J12-29	7,4	15,5	18,7	33	5,9	1,5	5,4	39,8	13,6	46,6	1,88	0,69	20,27	Luvisol Melánico Típico Ar pa.
J12-32	14,4	19,3	24,1	47	11,7	2,7	5,4	34,4	8,0	57,6	0,51	0,87	18,75	Luvisol Umbrico Albico
J12-34	10,8	15	21,5	38	9,4	1,4	5,25	35,1	7,9	57	0,86	0,45	12,96	Luvisol Ocrico Albico Ar
D15-28	22,7	27,4	33,8	55	21	1,7	5,6	42,8	10	47,2	0,68	1,18	7,50	Luvisol Melánico Álbico
<b>Media</b>	<b>11,9</b>	<b>16,1</b>	<b>21,3</b>	<b>37,7</b>	<b>9,6</b>	<b>2,2</b>	<b>5,4</b>	<b>37,7</b>	<b>11,8</b>	<b>50,6</b>	<b>1,4</b>	<b>0,6</b>	<b>18,6</b>	

Síntesis de Clúster a o Agrupamiento 2

Perfil	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>						pH <sub>H2O</sub>	(%)					CSROU	
	CICe	CIC <sub>7</sub>	CIC <sub>8,2</sub>	CIC <sub>Ac</sub>	Bases	Al		Arcilla	Limo	Arena	Ox. Fe	C.O.		Al interc
USDA12	9,1	15,7	18,7	28	8,5	0,6	5,3	46,9	22,8	30,3	1,9	0,7	6,59	Luvisol Umbrico Típico, ArF ArFmixed,
G17-17	9,5	15,5	21,1	24	7,9	1,6	5,3	53,1	17,7	29,2	2,45	0,82	16,84	Luvisol Ócrico Abrúptico, r
F29-23	14	22,8	29,6	37	8	6	4,7	54,6	28,3	17,1	3,2	0,83	42,86	Inceptisol Úmbrico, Fr mp
E16-22	8,8	16	20,3	26	8	0,8	5,3	50,7	14,4	34,9	4,2	0,78	9,09	Luvisol Melánico Abrúptico, ArFr
C15-51	12,1	20	26,5	30	11,7	0,4	5,4	55,3	15,5	29,2	3,98	1,06	3,31	Argisol Dístrico Umbrico, ArFr
C15-52	9,7	17,5	23,6	29	8,9	0,8	4,9	50,2	22,1	27,7	3,91	0,91	8,25	Acrisol Umbrico Típico FrAr
E18-05	10,1	15,4	22,9	31	8,3	1,8	5,1	44,2	35,9	19,9	4,77	0,47	17,82	Luvisol Melánico Típico Fr, r.
<b>Media</b>	<b>10,5</b>	<b>17,6</b>	<b>23,2</b>	<b>29,3</b>	<b>8,8</b>	<b>1,7</b>	<b>5,1</b>	<b>50,7</b>	<b>22,4</b>	<b>26,9</b>	<b>3,5</b>	<b>0,8</b>	<b>15,0</b>	



Síntesis de Clúster a o Agrupamiento 3.

Perfil	cmolc kg -						pH H <sub>2</sub> O	(%)					Al interc.	CSROU
	CICe	CIC <sub>7</sub>	CIC <sub>8,2</sub>	CIC <sub>Ac</sub>	Bases	Al		Arcilla	Limo	Arena	Ox. Fe	C.O.		
USDA8	9,1	12,5	16,4	37	2,3	6,8	4,9	28,3	6,2	65,5	0,9	0,6	74,73	Acrisol Ócrico Típico Ar
J11-23	7,7	10,6	13,8	46	3,8	3,9	4,4	18,2	9,1	72,7	1,04	0,65	50,65	Acrisol Ócrico Típico Ar
H15-35	4,1	5,3	8,3	19	2,5	1,6	5,4	17,5	15,5	67	0,63	0,59	39,02	Acrisol Ocrico Abúptico Ar
J11-22	6	9,2	12	30	3,6	2,4	4,5	25,2	10,1	64,7	0,90	0,5	40,00	Acrisol Ocrico Típico Ar
J12-19	7	10,2	14,9	28	5,9	1,1	5,1	22	27	51	0,74	1,15	15,71	Luvisol Melánico Típico, Ar pa.
J12-39	7,2	12,4	16,5	32	3	4,2	4,4	30,1	9,4	60,5	1,2	0,84	58,33	Acrisol Ocrico Típico Ar
G16-04	8	11,8	17,7	24	5,3	2,7	5,1	39,8	18	42,2	1,34	0,62	33,75	Luvisol Melánico Típico

Continuación agrupamiento 3

Perfil	cmolc kg <sup>-1</sup>						pH H <sub>2</sub> O	(%)					CROU	
	CIC <sub>e</sub>	CIC <sub>7</sub>	CIC <sub>8,2</sub>	CIC <sub>Ac</sub>	Bases	Al		Arcilla	Limo	Arena	Ox. Fe	C.O.		Al interc.
USDA9	5,9	10,2	14,6	21	3,2	2,7	4,9	39,9	10,2	49,9	2,00	0,56	45,76	Acrisol Ócrico Típico Ar, r
G17-23	6,9	8,5	15,3	16	3,6	3,3	5	46,8	12,9	40,3	2,42	0,38	47,83	Acrisol Ócrico Típico Ar, r
H18-12	5,1	7,7	12,8	19	4,6	0,5	5,3	23,6	20,1	56,3	1,22	0,95	9,80	Luvisol Melánico Típico Ar Fr, r
J12-21	6,3	9,9	13,7	39	2	4,3	5,1	18,9	12,0	69,1	0,39	0,76	68,25	Acrisol Umbrico Típico Ar, pa Tiene
J12-24	8,3	11,7	16,1	30	3,3	5	4,9	31,7	4,8	63,5	1,36	0,61	60,24	Acrisol Ocrico Albico Ar, pa
J12-26	5,8	7,3	13,5	21	5,5	0,3	5,4	26,9	7,1	66	1,04	0,46	5,17	Luvisol Ocrico Albico Ar
J12-27	9,4	13,7	17,8	39	3,4	6	5	26,4	6,8	66,8	0,56	0,99	63,83	Acrisol Umbrico Típico Ar

Continuación agrupamiento 3														
	cmolc kg <sup>-1</sup>							(%)						
Perfil	CIC <sub>e</sub>	CIC <sub>7</sub>	CIC <sub>8,2</sub>	CIC <sub>Ac</sub>	Bases	Al	pH <sub>H2O</sub>	Arcilla	Limo	Arena	Ox. Fe	C.O.	Al interc.	CROU
J12-28	7,3	11,9	14,8	31	3,3	4	5	32,5	7,9	59,6	1,52	0,56	54,79	Acrisol Ocrico Albico. pa.
J12-30	9,7	14,6	20	44	5,2	4,5	5,4	27,4	12,4	60,2	0,64	0,75	46,39	Acrisol Ócrico Típico Ar
J12-33	7,8	12,8	18,8	32	5,4	2,4	5,05	33,7	11,1	55,2	1,00	0,55	30,77	Luvisol Ocrico Abrúptico Ar
J12-35	7,0	9,3	14,3	26	3,1	3,9	4,95	27,8	8,8	63,4	1,32	0,56	55,71	Acrisol Ocrico Abruptico Ar
J12-37	9,8	11,8	19,5	27	4,9	4,9	5,3	34,8	8,3	56,9	1,83	0,65	50,00	Acrisol Ocrico Albico Ar
J12-40	6,9	9,9	14,6	25	3,9	3,0	4,4	29,6	9,4	61,0	2,9	0,75	43,48	Acrisol Ocrico Típico Ar

Continuación agrupamiento 3

Perfil	cmolc kg <sup>-1</sup>						pH H <sub>2</sub> O	(%)					CROU	
	CIC <sub>e</sub>	CIC <sub>7</sub>	CIC <sub>8,2</sub>	CIC <sub>Ac</sub>	Bases	Al		Arcilla	Limo	Arena	Ox. Fe	C.O.		Al interc.
J13-10	4,2	8,3	10,7	28	3,8	0,4	5,3	23,6	8,5	67,9	1,4	0,48	9,52	Luvisol Ocrico Abrúptico Ar, r
C15-53	5,4	9,2	15,2	23	2,0	3,4	4,4	25,9	20,3	53,8	1,78	0,96	62,96	Inceptisol Umbrico ArFr , mp
J12-11	7,2	12,6	21,1	41	3,3	3,9	5,1	26,8	11,7	61,5	1,12	0,52	54,17	Luvisol Ócrico Abrúptico hm
F14-18	5,8	6,5	9,1	37,1	5,5	0,3	4,9	33,6	4,7	61,7	1,47	0,30	5,17	Luvisol Ocrico Típico Ar, r
J13-08	9,6	13,6	18,7	39	3,7	5,9	5,2	27,0	10,7	62,3	1,72	1,00	61,46	Acrisol Ocrico Abruptico Ar
<b>Media</b>	<b>7,1</b>	<b>10,5</b>	<b>15,2</b>	<b>30,2</b>	<b>3,8</b>	<b>3,3</b>	<b>5,0</b>	<b>28,7</b>	<b>11,3</b>	<b>60,0</b>	<b>1,3</b>	<b>0,70</b>	<b>43,50</b>	

**Síntesis estadística descriptiva de la muestra de la población de suelos ácidos**

Variable.	CIC <sub>e</sub>	CIC <sub>7,0</sub>	CIC <sub>8,2</sub>	CIC <sub>Ac</sub>	Bases	Al	pH	Arcilla	Limo	Arena	Ox.Fe.	C.O.	CIC <sub>7,0</sub> / Arc.
	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>							%					
Mínimo	4,1	5,3	8,3	16,0	2,0	0,2	4,4	17,5	4,7	14,7	0,4	0,1	0,2
Máximo.	28,5	36,0	36,4	55,0	28,3	7,1	6,1	59,3	35,9	72,7	4,8	1,2	0,6
Media	9,2	13,5	18,4	31,9	6,6	2,6	5,2	35,4	13,5	51,1	1,7	0,7	0,39
Mediana	8,2	12,6	18,1	31,0	5,7	2,4	5,3	34,1	11,9	55,1	1,4	0,7	0,37
Desv. Típico.	4,1	5,2	5,3	8,7	4,4	1,9	0,4	10,5	6,8	14,4	1,1	0,2	0,1
C.V	43,8	38,4	29,0	27,2	66,1	74,1	7,1	29,6	50,2	28,3	63,6	34,5	26,1

