ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA

Instituto de Suelos

Importancia y papel del Hierro y del Aluminio en los suelos de las regiones cálidas y húmedas.

P. Ségalen

Colaborador del Instituto de Suelos de la Academia de Ciencias de Cuba, miembro de los Servicios Científicos Centrales de la ORSTOM.

La Habana, Marzo de 1 9 7 3 "Año del XX Aniversario" 3 13 13 13 73

Collection de Référence 6403 Pe de

INDICE

- Recuento de algunas propiedad iónicas del hierro y del aluminio.
 - 1.1 Los iones de Fe y Al
 - 1.2 Número de coordinación
 - 1.3 Tetraedros y octaedros
 - 1.4 Los iones OH , H2O y un ácido orgánico
 - 1.5 Reacción con hidróxilos según el pH
 - 1.6 Reacción con la sílice.
- II. Constituyentes ferruginosos y aluminosos del suelo.
 - 2.1 Silicatos primarios
 - 2.2 Procesos de alteración
 - 2.3 Los minerales del suelo: silicatos
 - 2.4 Los minerales del suelo: óxidos e hidróxidos
 - 2.5 Los productos amorfos
 - 2.6 Formas iónicas
 - 2.7 Complejos orgánicos
- III. Análisis de los constituyentes del suelo con Fe y Al.
 - 3.1 Análisis cualitativo
 - 3.2 Análisis químico. Fusión alcalina
 - 3.3 Análisis químico. (Triácido
 - 3.4 Constituyentes libres de Aluminio
 - 3.5 Constituyentes libres de Hierro
 - 3.6 Constituyentes libres amorfos.

(Cont... INDICE)

- IV. Influencia del hierro y del aluminio sobre algunas propiedades del suelo.
 - 4.1 Acidez del suelo
 - 4.2 Toxicidad del aluminio
 - 4.3 Fijación del ácido fosfórico; fosfatos
 - 4.4 El color del suelo
 - 4.5 Oxidación y reducción
- V. Acumulación de hierro y aluminio en el suelo.
 - 5.1 Acumulación relativa y absoluta
 - 5.2 Acumulación difusa
 - 5.3 Acumulación localizada
 - 5.4 Acumulación generalizada
 - 5.5 Formación actual de las corazas
- VI. Repartición geográfica de los compuestos de hierro y de aluminio.
 - 6.1 Regiones frias y templadas
 - 6.2 Regiones cálidas y lluviosas
 - 6.3 Reflexiones sobre la distribución geográfica
- VII. Algunos problemas a resolver
 - 7.1 Sintesis
 - 7.2 Alteración
 - 7.3 Desplazamiento

VIII. CONCLUSIONES.

Se sabe que el hierro y el aluminio son los metales más importantes del suelo. En efecto, se acumulan en él, modificando algunas propiedades físicas y químicas y, a través del color, son utiliza dos en la clasificación de los suelos. Entonces merecen que los estudiemos cuidadosamente. Vamos a tratar de hacerlo hoy y mañana.

Primero, me parece muy útil, sino indispensable, de recordar al - gunas propiedades de ambos metales cuando se hallan en forma de - iones. Vamos a estudiar los dos en conjunto, pués en el suelo se encuentran casi siempre juntos y sus propiedades, que a veces son diferentes, son a menudo parecidas.

1. Citemos algunas propiedades iónicas del hierro y el aluminio.

1.1 - Un átomo metálico se constituye de un núcleo redondo de diversas capas de electrones, la más externa que es la que nos interesa, tiene tres electrones en ambos meta - les. Al quitar estos electrones, se forman iones.

(1) Fe
$$\longrightarrow$$
 Fe² + 2^e

(2)
$$Fe - Fe^3 + 3^e$$

(3)
$$Fe^{2^{+}}$$
 Fe^{3} + e

(4)
$$A1 \leftarrow A1^3 + 3e$$

Pero aquí aparece una diferencia fundamental con el alu minio el cual puede formar un solo ión, mientras que el hierro tiene la posibilidad de formar dos iones correspondientes a dos niveles de oxidación.

La reacción (3) ocurre en ambas direcciones y es bastan te frecuente en ciertos suelos.

La dimensión de estos iones es conocida. Es más o menos 0.5-0.75 A. Más pequeño que la de los metales alcalinos y alcalino-térreos, del oxígeno y oxidrílo; pero
es más grande que la de los iones de sílice.

La dimensión y la igual carga de Fe^{3^+} y Al^{3^+} permitenel reemplazo de uno por otro en ciertas estructuras. -- El ión Mg^{2^+} tiene casi la mismas dimensión y la mismacarga que el Fe^{2^+} y la sustitución es también fácil. El reemplazo de un ión trivalente por un ión bivalente de casi igual tamaño es fácil pero necesita una carga su plementaria para mantener el equilibrio de las mismas.

Ambos metales si pueden perder electrones, también pueden ganar otros en la periferia (hasta 12). Se dice que el hierro y el aluminio son aceptores de electrones. Mientras que otros iones pueden dar electrones para fi-

jarse al hierro y al aluminio. Esos iones son donadores de electrones. Los más importantes son: el oxígeno, el oxidrílo y también el nitrógeno, etc.

Los donadores de electrones se organizan alrededor delos aceptores, formando estructuras que son determinadas por la dimensión de los radios iónicos. Así Fe3⁺ Y Fe^{2⁺} están generalmente rodeados por 6 oxígenos.

1.2 - Se sabe que su <u>número de coordinación es 6.</u> Mientrasque el Al, el cual es un poco más pequeño, está rodeado, ya sea por 4 o por 6 oxígenos, es decir, el Al tiene dos número de coordinación 4 y 6, esto es muy importante.

Así, el Al y el Fe existen en la naturaleza en estructuras donde son rodeados por 4 ó 6 elementos.

1.3 - El tetraedro y el octaedro. El Al y el Fe ocupan el -centro de las estructuras mientras que los vértices -son ocupados por el centro del oxígeno. De manera sen
cilla, el Al3 Fe3 y Fe2 pueden hallarse en octaedros;
de ahí pueden ser reemplazados por el Mg2 pero con ne
cesidad de un suplemento de carga: pueden también reem
plazarse uno por el otro, sin cambio de carga. El Al3
en ciertos casos puede hallarse en tetraedros donde -sustituye al Si pero esto necesita un suplemento de carga. Es muy raro encontrar Fe en tetraedros, y
en todo caso no en productos del suelo.

Casi siempre el donador de electrones es el oxígeno - que en su capa periférica tiene electrones "desapareados". Pero este oxígeno puede provenir de oxidrilos - de moléculas de agua, o de diversas sustancias organicas.

1.4 - En el caso de oxidrílo, cuando un Al³⁺ ó Fe³⁺ es rodea do de OH, se fijan de la manera siguiente. En la es-tructura de los hidróxidos cada octaedro comparte sus oxidrílos con sus vecinos, de manera de formar una capa tal como la de la gibbsita.

Esta capa tiene vacía una posición octaédrica de cadatres; si dos están ocupadas, se dice que es dioctaédrica; si todas las posiciones están ocupadas, se denominan trioctaédricas.

En solución, los iones de hierro o aluminio son rodeados de moléculas de agua orientadas.

Los hidrógenos del agua son rechazados hacia el exterior, en cuyo caso se dice que éste es "solvatado". Como se trata de materia orgánica (por ejemplo, el ácido oxálico), se puede obtener una estructura del tipo si -- guiente:

El metal central es como tomado en una trampa; es rodeado de amplias moléculas orgánicas, ya no tiene sus propiedades moleculares usuales. En particular, estas estructuras son solubles en condiciones en las cuales los hidróxidos precipitan usualmente. Esto es muy importante y permite explicar las migraciones de hierro y aluminio bajo la influencia de la materia orgánica.

1.5 - Una propiedad muy importante de los iones es la reacción con los hidróxílos según el pH. El comportamiento de am bos metales es aquí muy diferente (se muestra en anexo - aparte).

En el caso de hierro férrico. El hidróxido de hierro - férrico se precipita a partir de pH 2.5. No hay pH pare cido en el suelo, por lo tanto en suelos normalmente -- oxidados, no habrá iones sino hidróxidos de hierro.

Si se trata de hierro ferroso el límite se coloca alrede dor de 6. Si hay condiciones reducidas, hay posibilidades de tener iones ferrosos y entonces hay movimiento del hierro, con tal que el pH sea bastante ácido.

En el caso del aluminio, este metal es diferente del -hierro. Hay tres zonas mostrando que en un pH bastanteácido hay posibilidades de iones aluminosos; en la parte
central no hay más que hidróxidos; en la parte derecha,el hidróxido del aluminio puede redisolverse formando -otro tipo de ión Al (OH), Entonces en suelos ácidos hay posibilidad de tener aluminio iónico y también en -suelos muy alcalinos. Entre los dos, los hidróxidos son
estables.

1.6 - La última propiedad que veremos es la reacción del hie - rro y del aluminio con la sílice. Este problemas ha sido objeto de muchos trabajos y se puede resumir diciendo -- que en medio ácido el hierro reacciona muy poco con la sílice y que no se puede obtener compuestos definidos; - en medio alcalino en presencia de otros iones como magne sio y también aluminio se puede obtener silicatos definidos, teniendo una estructura de mineral arcilloso.

Por lo contrario, el aluminio reacciona muy fácilmente - en medio ácido y débilmente alcalino con la sílice. Si se echa aluminio en una solución de ácido sílico, inme - diatamente se forma un precipitado pero es casi imposí - ble de obtener un producto cristalizado, si bien en la - naturaleza los minerales arcillosos están muy difundidos. He aquí un problema, el cual todavía no tiene explica -- ción.

2. Hay que considerar ahora cuáles son los constituyentes ferruginosos y aluminosos del suelo.

Primero, los minerales de las rocas ígneas suministran los ma teriales utilizados para formar los minerales de los suelos. -Pueden existir también el de los suelos.

Los primeros se llaman usualmente <u>minerales primarios</u>, mien -- tras que los de los suelos son los <u>minerales secundarios</u>. Estos minerales primarios tienen características que me parece -- útil mencionar.

Son esencialmente varios los <u>silicatos</u>, perteneciendo a familias tales como: peridotitas (Mg^{2^+} y Fe^{2^+} sin $A13^+$) anfíboles y piroxenos (Fe^{2^+} y $A13^+$), micas (Fe^{2^+} y $A13^+$) y feldespatos (A1 sin Fe^{2^+}). En estos minerales hay --·2.1 otros iones: Mg2+, Ca2+, Na+ y K+ . Las estructurasson muy diferentes. En las peridotitas los tetraedros de sílice están separados; hay un poco de hierro en lu gar de magnesio: son poco estables. En los piroxenos y anfiboles los tétraedros de sílice forman filas senci -llas o dobles donde el hierro y el aluminio son consti tuyentes normales. La solidez es bastante débil. En -las micas la estructura es parecida a la de ciertas ar cillas, los tetraedros forman dos capas entre las cuales hay octaedros de hierro o aluminio, en las capas tetraédricas un sílice de cada cuatro es reemplazado por un -aluminio. Ciertas micas (muscovita) son muy resistentes al intemperísmo, mientras que la biotíta es débilmente resistente. Los feldespatos tienen una estructura par ticular tridimensional; una sílice de cada cuatro es reemplazada por un aluminio.

Así como en las micas, la presencia de aluminio en lu - gar de silice, crea un déficit de carga que hay que compensar con iones de potasio, sodio o calcio.

En casi todos estos minerales, el hierro está bajo la -forma ferrosa. Durante la alteración se volverá férrico
formándose un desequilibrio de las cargas. El aluminioestá a la vez en los tetraedros y en los octaedros. Durante la alteración, el aluminio pasará poco a poco a -los octaedros y al final todo el aluminio estará en los
octaedros.

Los minerales ferruginosos y aluminosos que pasan directamente de las rocas al suelo sin que la alteración losmodifique son esencialmente la magnetita y la ilmenita y también diversos silicatos del metamorfismo como silimanita, kienita y andalusita en los cuales el aluminio ya está en los octaedros.

Entonces los minerales primarios que llegan al suelo han de sufrir la alteración. Esta toma varias formas, la -más sencilla es la disolución. Pero no concierne muchoa los minerales de Fe o Al que son casi insolubles. Encambio, la hidrólisis es muy importante, ya que se trata de la destrucción de varias estructuras bajo la influencia de los iones H+ y OH- suministrados por el agua, por el ácido carbónico, por ácidos orgánicos solubles etc. Casi todas las estructuras minerales pueden romper Primero, los iones alcalinos y alcalino-térreos son atacados. Luego, el Fe y el Al son extraídos de la sí lice. El Fe y Al existieron de manera fugaz como ionesy la sílice bajo forma de ácido silícico monómero. Se gún el pH, la calidad del drenaje y la cantidad de sílice presente, habrá o no reacción entre los diversos ele-· mentos.

Si la sílice es completamente eliminada, existirán --hidróxidos de hierro y aluminio; si la sílice no es eliminada, en medio ácido habrá mineral arcilloso de tipo caolinita e hidróxido de hierro. Si la sílice no es eliminada en medio débilmente alcalino, habrá minerales arcillosos con dos capas de sílice esmectitas, ilitas, -vermiculitas, etc.

La <u>oxidación</u> interviene también, pero en el hierro solamente; este metal existe en los minerales primarios bajo la forma ferrosa. Pasa totalmente a la forma férrica, en los minerales arcillosos del tipo ilita o esmectita o en los hidróxidos.

Al final la quelatación se refiere al ataque de minera - les por moléculas orgánicas que tienen, radicales ácidos aldehídicos, fenólicos, etc., cerca una de otra de tal - manera que los iones de hierro o aluminio pueden tomarse como por una pinza. En este caso el hierro y el alumi - nio pueden movilizarse en el perfil.

2.3 - Hemos visto ya como los minerales primarios son destruídos (por lo menos los que pueden alterarse y que son la mayoría) ?qué tipo de minerales encontraremos en el suelo?

Son dos tipos: cristalizados y amorfos. Los primeros - son más importantes que los segundos, pero en ciertos ca sos los productos amorfos juegan un papel particular.

Son los primeros los <u>minerales arcillosos</u>; los minerales fibrosos (paligorsquita, etc.) que no contienen hierro - sino aluminio y magnesio, que hasta ahora eran consider<u>a</u> dos como minerales primarios de las rocas sedimentarias, pero se piensa que pueden formarse en medios muy salinos.

Los minerales tipo 2/2 son las <u>cloritas</u> con capas de minerales 2/1 separados por una capa de hidróxido de magnesioque son generalmente minerales primarios ricos en hierro procedentes de rocas metamórficas.

Las cloritas aluminosas son cada vez más conocidas en los suelos, pero no así en las regiones cálidas y húmedas.

Los minerales tipo 2/1 son numerosos y conocidos gracias a los análisis químicos pero sobre todo por el comportamiento bajo los rayos X.

Las <u>vermiculitas</u> son ricas en magnesio y hierro férrico, -con un poco de aluminio en capas tetraédricas. Las vermiculitas aluminosas son cada vez más conocidas. Estos minerales no son frecuentes en suelos de zona tropical o ecuatorial, pero en la parte subtropical de los EE.UU y Australia son a menudo encontrados.

Las <u>esmectitas</u> son minerales que pueden expandirse con polialcoholes diversos (glicerol, glicol, etc.) y de esta ma nera son fácilmente identificados por los rayos X. Hay — dos tipos teóricos, las montmorrillonitas, donde las capas tetraédricas no presentan sustituciones de sílice por aluminio. Este metal está en la capa octaédrica con magnesio.

En las beidelitas, donde las capas tetraédricas son sustituídas por aluminio, el hierro puede llegar a ocupar casitoda la capa octaédrica. En este caso el mineral se llama Nontronita.

En la naturaleza, las esmectitas se parecen a ambos tiposy tienen Al en las capas tetraédricas y Al y Fe con Mg en las capas octaédricas. Estos minerales son muy importan tes en los suelos de las zonas subtropical y tropical, toda vez que la estación seca es larga y el drenaje deficien te.

Los minerales tipo 1/1. Son las caolinitas más o menos -bien cristalizadas, y las haloysitas con capas de agua entre las láminas, tienen nada más que aluminio y sílice sin hierro. Estos minerales están muy difundidos por todas --las zonas cálidas y húmedas del mundo. Tengo que añadir - que se encuentran cada vez más, zeólitas con estructura -- tridimensional en medios muy alcalinos.

2.4 - Los óxidos e hidróxidos.

En los minerales de fórmula M(OH)3 la <u>gibbsita</u> es la más - conocida, hay otras como Bayerita ó <u>Nordstrandita</u>, con la misma fórmula, pero con otra estructura y son muy escasas-en los suelos.

Minerales de fórmula MOOH.

La <u>Bohemita</u> constituída por el Aluminio y la lepidocrecita por el hierro, se presentan en los suelos, pero la segunda es escasa. La Bohemita se encuentra a menudo en corazas ferruginosas.

La Diáspora constituída por el aluminio, y la geothita por el hierro, tienen la misma fórmula, pero una estructu
ra diferente de las precedentes. La Diáspora no apareceen los suelos; pero la geothita en cambio está muy esparcida y es un mineral esencial de los suelos:

Los minerales de fórmula M203.

El corindón Al_2O_3 no existe en los suelos, mientras que - la Hematita Fe_2O_3 es un mineral muy común. La Magnetita- es rara.

Hay que recordar que la Magnetita Fe_3O_4 no es un producto del suelo, pero es heredada de la roca. (basalto por ejem plo).

2.5 - Los productos amorfos.

Existen dos categorías de productos amorfos: los silicatos y los hidróxidos. Todos tienen alta cantidad de agua que se extrae a baja temperatura; una superficie específi ca elevada (unas centenas de metros cuadrados); ausenciade diagrama con los rayos X.

Los hidróxidos no tienen capacidad de intercambio de bases, en cambio los silicatos tienen una alta capacidad en relación con el pH.

En los suelos, los productos amorfos son muy comunes, sobre todo en los suelos ferralíticos, fersialíticos y los podzoles, en los cuales el contenido puede alcanzar el --25%.

Los silicatos amorfos o <u>alófanos</u> son sobre todo derivados de cenizas volvánicas ricas en cristales. Estos productos son muy importantes en los suelos de todos los países donde se encuentran volcanes en actividad como las Antillas Menores, América Central, los países andinos, Japón, Java, etc.

2.6 - Las formas iónicas. Estas se conocen cada día más y forman los llamados iones "hidroxilados", intermedios entrelos iones ya vistos y los hidróxidos; corresponden sobre-

todo al aluminio y a formas intermedias tales como el -- Al (OH) y Al (OH) 24. Estas formas pueden polimerizarse- y se conocen polímeros de fórmulas muy complicadas en forma de cadenas o de anillo.

Estos polímeros son encontrados entre las capas de minerales arcillosos que pueden abrirse, tales como la vermicul<u>i</u> ta y sobre todo las <u>esmoctitas</u>. Allí constituyen paquetes que confieren a los minerales una rigidez que les impidenexpandirse con polialcoholes pues toman aspecto de clorita y el nombre es seudo-clorita o mejor vermiculita-Al o mon<u>t</u> morillonita-Ala

Se puede eliminar este aluminio y entonces el mineral vuel ve a tomar sus características normales.

Estos productos son ahora bien conocidos en los suelos de zonas subtropical y templada.

2.7 - Y por último, en los suelos hay también hierro y aluminioen complejos orgánicos donde no es posible de identificarlos metales sin destruir la parte orgánica. Eso es comúnen los podzoles pero puede encontrarse en otros suelos.

> Después de ver las principales características de los iones, los constituyentes de los suelos, tenemos que conside rar cómo identificar y dosificar cada parte.

- 3. El análisis de los constituyentes del suelo abarca dos aspectos muy diferentes.
 - La identificación cualitativa hizo durante las últimas décadas progresos notables, citaré los análisis térmico diferencial y ponderal, la difracción de rayos X, absorciónde los rayos infrarojos, la microscopia electrónica, etc.-Estos medios nos informan sobre la naturaleza y la estructura de los minerales, y nos permite verlos a pesar de su tamaño muy reducido. De esta manera, la estructura a menu do complicada de minerales 2/1, es ahora bien conocida. No se puede identificar sin una o varias de estas técnicas; ahora, la difracción de los rayos X parece ser la técnicamás útil.

Pero todo eso es nada más que cualitativamente ya que no - se pueden obtener cifras y por centajes, por eso necesita - mos recurrir al análisis químico. ?Pero cuál análisis?

3.2 - Primero, es importante separar los minerales primarios como el cuarzo y otros de los minerales secundarios propiosdel suelo. Si se obra por fusión alcalina, todos los cons tituyentes son mezclados y la diferencia fundamental no - se realiza, creo, personalmente, que este método es costo so, de rendimiento bajo y de resultados discutibles, de - biéndose abandonar fuera de algunos casos particulares.

3.3 - Me parece mejor, utilizar un método como el del ataque -triácido que no tiene los citados inconvenientes. Fueradel cuarzo muy fino, la mayoría de los minerales prima -rios no son disueltos. Hay que señalar que la magnetitay las micas sufren y son casi totalmente disueltos. En este caso, tienen que tratar de separarlos.

?Qué puede hacerse con los resultados logrados?

Siempre es interesante conocer la composición centesimalde un suelo o de una arcilla. Pero sirve sobre todo para obtener datos sobre la naturaleza de los minerales arcillosos; la relación sílice/aluminio permite obtener estainformación. Sin embargo si se busca solo este resultado es mejor realizarlo en un aparato de rayos X.

- 3.4 Pero siempre es interesante conocer los constituyentes libres de un suelo. En lo que se refiere al aluminio sus unicos constituyentes libres son los hidróxidos amorfos y cristalizados.
- 3.5 Muchos esfuerzos han sido realizados en el pasado cuandono se clasificaba como ferraliticos los suelos que no tienen aluminio libre. Ahora, esta diferencia no existe. Antes no se buscaba determinar aluminio libre, pero no es lo mismo con el hierro. Con motivo de su importancia en la clasificación, el hierro libre es interesante de conocer. El hierro libre se refiere a los óxidos e hidróxi dos cristalizados y amorfos del suelo. Hay que determinarlos sin sacar al mismo tiempo el hierro de los minerales primarios y el de los minerales arcillosos.

Numerosas técnicas se han utilizado, se basan casi todasen la doble valencia del hierro; hay que reducir el hierro de la forma férrica a ferrosa fácilmente soluble y de terminar su contenido.

Diversos reductores han sido utilizados; el ácido sulfhidrico, hidrógeno naciente, por reacción de un ácido con un metal (aluminio o magnesio). Desde 1950 se utiliza un método iniciado por el indio DEB, con el reductor ditionito de sodio.

Este método se ha modificado muchas veces añadiendo va -rias sustancias como citrato, tartrato y bicarbonato de -sodio, etc. Todos estos métodos son casi iguales. El he
cho importante es cerciorarse de que la fracción libre -sea bien extraída.

Puede hacerse repitiendo las extracciones y trazando la curva hierro/número de extracciones. Se sabe que todo es extraído cuando la curva presenta un nivel horizontal.

Otra técnica tan eficaz y más rápida es la de DE ENDREDYque utiliza una lámpara ultravioleta.

3.6 - Puede ser interesante conocer también la parte <u>amorfa</u> de los productos libres del suelo. Lo que puede hacerse por los ataques repetidos con un ácido y una base, los productos amorfos son disueltos más rápidamente que los productos cristalizados y por una construcción geométrica sen cilla se logra el contenido buscado.

Al final, quisiera decir que el comportamiento del aluminio y del hierro en los suelos es cada vez mejor conocido, los dos metales siguen las leyes de la quimica y la físico-quimica, fuera del suelo como en el suelo; pero los problemas son más complejos en el suelo debido al número importante de constituyentes mezclados. Me consideraré satisfecho si concuerdan con esta opinión.

- 4. El hierro y el aluminio son responsables de algunas propiedades del suelo. Vamos a considerar una de ellas.
 - 4.1 Se cree, hace largo tiempo, que la acidez de un suelo se debe a los iones hidrógeno, muchos trabajos mostraron que el aluminio fijado en el complejo era responsable de gran parte de la acidez. Si se lava un suelo con una solución diluída de un ácido, todos los iones intercambiables son reemplazados enseguida por hidrógeno; pero al poco tiempo parte de los iones hidrógeno son reemplazados por iones aluminio. La presencia de este aluminio puede ser demostrada de varias maneras.

La curva de titración de un suelo ácido por una base di - luída presenta primero una línea más o menos horizontal - seguida por otra ascedente; la primera se debe a la neu - tralización de los iones hidrógeno y aluminio. Cuando - son neutralizados, el pH puede subir. Esto ha sido com - probado por la neutralización de arcillas en las cuales - el aluminio fué fijado.

La determinación de la acidez debida al Al y al H puede - hacerse cuando se cambie el aluminio y el hidrógeno con - una sal neutra. La acidez que se mide en la solución es debido a los iones hidrógenos suministrados por el suelo- y a los que resultan de la hidrólisis de los iones aluminio. Es posible conocer la parte debida al H+ y al Al3+; hay que hacer dos partes de la solución. En la primera, - la acidez es debida al Al+H. En la segunda, no hay más -

que añadir un poco de fluoruro de sodio para complejar el aluminio, y la acidez restante es debida al hidrógeno.

La determinación del aluminio intercambiable se efectúa - después de desplazarlo con una sal neutra; el cloruro de potasio. Para estar seguro que toda la forma cambiable - ha sido eliminada, es mejor hacer una medida cinética.

El aluminio neutraliza una parte importante de las cargas permanentes de un suelo ácido; pero cuando el pH es más - alto que 6.0, estas cargas son neutralizadas sobre todo - por el calcio y el magnesio.

- 4.2 Cuando mucho aluminio cambiable es fijado en el complejode un suelo, puede ser asimilado por los vegetales. El provoca entre muchos de ellos, fenómenos de toxicidad, -- degeneración de las raices, detención del crecimiento y a menudo las plantas mueren. En muchos casos un mal desa rrollo es debido a un exceso de aluminio; muchas plantas son sensibles, como el trigo, cebada, maíz, arroz, toma te, espinaca, girasol, alfalfa, etc. Algunas plantas como la caña de azúcar y sobre todo el té, parecen poco sen sibles al aluminio. Las causas de esta toxicidad son muy discutidas, unos piensan que se trata de un bloqueo del ácido fosfórico por el aluminio; otros que el aluminio in terviene sobre la asimilación de los micronutrientes. Se puede combatir con mucha eficacia esta toxicidad subiendo el pH: hay que añadir cal en el suelo a fin de precipitar los hidróxidos.
- 4.3 El hierro y el aluminio juntos obran sobre la fijación del ácido fosfórico en el suelo, la mayería de los fosfatos no tienen hierro ni aluminio, pero cuando se añade -- fosfatos a un suelo que tiene mucho hierro o aluminio, se precipitan fosfatos de aluminio y de hierro casi insolu bles. El fosfato de aluminio que precipita primero, no es totalmente inasimilable; pero poco a poco el aluminio- es reemplazado por el hierro y este fosfato de hierro es mucho más insoluble. Si hay potasio o calcio en alta can tidad, se forman fosfatos más complejos: taranakitas -- con (K y Al) o crandalitas con (Ca y Al) estos fosfatos son también muy poco solubles.

Cuando se anade fosfatos a un suelo que centiene hidróxidos y minerales arcillosos, diversas reacciones ocurren.—
Los hidróxidos reaccionan primero, al mismo tiempo que el aluminio cambiable. Pero el aluminio de las capas octaédricas de las arcillas reacciona también (Al de la mont — morillonita reacciona, pero no el magnesio). Se han podido seguir el ataque de los minerales arcillosos por el acido fosfórico con el microscopio electrónico. Esos minerales desaparecen mientras que aparecen fosfatos sintéticos, este proceso se llama "fosfatólisis".

La lucha contra la retrogradación del ácido fosfórico parece muy dificil, la mejor solución es añadir complejan - tes que impiden al Fe y al Al reaccionar. La materia orgánica natural es rica en complejantes, por eso es importante mantener un alto contenido de materia orgánica en - el suelo.

4.4 - El color del suelo es debido, sobre todo a la materia orgánica y a los compuestos de hierro; el papel del alumi nio es muy débil. En las regiones que nos interesan, hay dos colores fundamentales: rojo y amarillo.

Al eliminar todos los óxidos e hidróxidos de hierro con - el ditionito de sodio, estos colores desaparecen, pués - el color es debido a los compuestos de hierro, aunque es necesario profundizar en este asunto.

En Africa, las regiones que tienen un clima de régimen -ecuatorial, es decir con mucha lluvia y casi sin sequía,
el color de los suelos es siempre amarillo o anaranjado.En regimenes tropicales con una estación seca bastante -larga los suelos son a menudo rojos. En el primer caso,
estudios mineralógicos muestran que el mineral ferruginoso es siempre la goethita, pero en el segundo caso no es
sencillo. El color rojo puede ser debido a la hematita,pero no siempre.

Productos ferruginosos amorfos dan al suelo color rojo también: la eliminación de esos productos es fácil. hay hematita, el suelo queda largo tiempo rojo; si hay -goethita, que es el caso más corriente el suelo se pone amarillo; si no hay productos cristalizados el suelo se_pone gris. Esto se puede observar en la zona intertropical así como cerca del Mediterráneo; generalmente el drenaje del suelo rojo es mejor que el del suelo amarillo -cuando existen juntos. La diferencia entre los dos es -pequeña en lo que se refiere a los productos amorfos, (1 a 3% de productos amorfos). Ciertos suelos ferraliticos tienen un horizonte B con dos colores: amarillo en la parte superior y rojo en la parte inferior, En la partealta no hay productos amorfos, pero si goethita; en la -parte baja existen productos amorfos y goethita. puede decir que todos los tipos de compuestos ferrugino sos: cristalizados y amorfos, pueden intervenir en el color del suelo.

4.5 - Los fenómenos de redox, afectan al hierro y no al aluminio, cuando hay reducción en un suelo ácido hay formación
de iones ferrosos estables hasta pH 6.5: eso permite el desplazamiento del hierro hasta distancias bastante lar gas. Cuando el potencial redox cambia, el hierro vuelvea oxidarse y a precipitarse. Las topografías planas y cu
biertas por aguas estancadas durante parte del año favore

cen la reducción y el desplazamiento del hierro. El cambio de formas oxidadas a formas reducidas es acompañado de de la formación de iones hidrógeno. A esos iones es sinduda atribuído el ataque y la destrucción de los minerales arcillosos y de los hidróxidos y óxidos en la parte superior de los perfiles; este fenómeno fue nombrado "ferrolisis".

Además la presencia de materia orgánica ácida rica en radicales complejantes ayuda a las posibilidades de desplaza miento del hierro (y en este caso del aluminio). Se forman grandes moléculas donde el hierro y el aluminio son prote gidos de la precipitación y pueden desplazarse.

Estas condiciones son las únicas que pueden invocarse para explicar movimientos de Fe y Al en los suelos.

- 5. El hierro y el aluminio del suelo provienen de la alteración de los minerales primarios de las rocas a través de hidrólisis, cuan do los iones aparecen hay dos posibilidades:
 - reacción con sílice (más otros cationes) para formar minerales arcillosos
 - sin sílice, formación de óxidos e hidróxidos.
 - 5.1 Dos tipos de acumulación son posibles: acumulación relativa y acumulación absoluta.

Acumulación relativa. La hidrólisis de los minerales primarios es seguida por la formación de minerales arcillosos e hidróxidos muy poco solubles. El agua no es capaz de --disolverlos (como sílice, carbonato de calcio, etc.) En -un medio de acidez moderada bien aireado, estos minerales, pueden acumularse debido a la salida de las bases y de --una parte importante de la sílice.

Acumulación absoluta. Se produce cuando hay movimiento de sustancias dentro de un perfil o de un perfil a otro. Este movimiento ocurre cuando hay lixiviación, complejación o quelatación de hierro y aluminio, o reducción del hierro. En ambos casos la acumulación puede ser importante y tener diversos aspectos.

5.2 - La acumulación difusa. En muchos casos la presencia de -hidróxidos de hierro o aluminio no cambia mucho el aspecto
del horizonte, el color es rojo o amarillo: la estructuraes fragmentaria, poliédrica fina o poliédrica subangular;la consistencia en estado húmedo es generalmente friable.
Al examen al microscopio electrónico se observan los hidro
óxidos fijados a la superficie de los minerales arcillo -sos, o agrupados en paquetes muy pequeños. Este tipo de --

acumulación es frecuente cuando el suelo tiene muy buen -drenaje. El contenido de hierro o de aluminio puede ser muy alto (por ejemplo, ciertos suelos de Jamaica o Haití en aluminio, ciertos suelos derivados de ultrabásicas en Cuba, en hierro).

- 5.3 Acumulación localizada. En ciertos casos las acumulacio nes son localizadas y endurecidas; se conocen nódulos sin zonas de endurecimiento, concreciones con pequeñas capas de endurecimiento. Estas masas duras tienen formas variables más o menos redondeadas, el tamaño es más o menos tam bién muy variable, de algunos milimetros o centimetros, pero también en bloques gruesos. Se conocen también diversas formas: redondeadas, alargadas, radiciformes, etc. Estas acumulaciones resultan casi siempre del tipo absoluto.
- 5.4 Acumulación generalizada. En ciertos casos el endurecimiento se refiere a un horizonte o varios horizontes. El espesor puede alcanzar unos metros y la superficie es de kilómetros cuadrados, aunque puede abarcar comarcas ente ras. Es el fenómeno de formación de corazas. La composición es muy variable, a menudo ferruginosa. (A este tipo se refiere el nombre, antiguo de "laterita"), o aluminoso (en este caso los mineros la nombran "bauxita"). El color es muy variable: blanca, roja, casi negra; la estructura es también muy variada: aolítica, pisolítica, vacuolaria, hojosa, maciza, etc. Los constituyentes están generalmente cristalizados pero pueden ser también amorfos.
- 5.5 Existen en estos momentos corazas en formación. Se puedemostrar en diferentes lugares donde existen alternancias de oxidación y reducción, de humedecimiento y desecación y
 aporte de productos ferruginosos. Los lugares más favorables son los siguientes: alrededor de charcos temporales,debajo de ciertas vertientes con débil declive y al aflora
 miento de capas freáticas, etc. En estos casos, la coraza
 tiene una extensión limitada, es visible y es descubiertapor la erosión.

Pero en ciertas zonas llanas muy extendidas, existe a poca profundidad una capa freática cuyas fluctuaciones mantie - nen condiciones de oxidación y reducción favorables a la - formación de una coraza llamada de "capa freática", muy ex tendida y de bastante grosor. El examen de las condicio - nes de formación muestra, que estas deben ser:

- una topografía plana con agua estancada durante parte del año.
- un clima tropical con una estación de sequía -- bastante larga.

- una fuente de hierro. Todas las rocas pueden ser fuentes de hierro, pero las básicas y ultrabásicas son muy favorables; sin embargo, la fuente más rica es una coraza antigua que domine el paisaje, su fre erosión en la periferia y forman a veces peque nos pantanos que favorecen la reducción y quelatación. Es posible mostrar en estos momentos la gran formación actual de corazas, pero las grandes extensiones de corazas que pueden verse en la zona intertropical son casi todas antiguas. En efecto, ocupan mesetas muy extendidas; dominan valles y -planicies por decenas y aún centenas de kilómetros: van destruyéndose por la erosión y sus bloques -siembran las vertientes, no estando relacionadas con las condiciones climáticas actuales, pués las hay en la selva ecuatorial y en los bordes de desiertos. Estas corazas en cambio pueden relacio narse con los peniplanamientos antiguos que han -abarcado superficies muy grandes durante épocas -geológicas pasadas: las corazas han fosilizado y protegido el terreno. Los cambios tectónicos o climáticos las han movido poco, pero con los cambios de nivel de base resulta que ocupan posiciones ba<u>s</u> tante altas en el paisaje. En nuestro tiempo es tas corazas son muy buscadas en diferentes partesde la zona intropical, sobre todo cuando el contenido en aluminio es alto, al igual que el de hie rro. Estas corazas fósiles serán o son riquezas para varios países.
- 6. Nos parece interesante ahora, estudiar cómo están repartidos enel mundo los compuestos de hierro y de aluminio. Un examen aún somero de las regiones climáticas del mundo muestra que hay dos partes muy distintas. En la primera están los polos, las zonasfrías y templadas y parte de los desiertos; en la segunda estánlas regiones ecuatorial, tropical y subtropical, mediterránea y una gran parte de los desiertos.
 - 6.1 En la primera zona los hielos se extendieron durante el Cuaternario, moliendo rocas y suelos, quedando después -del deshielo, materiales suaves a menudo con un relieve accidentado y un drenaje frecuentemente malo. La parte arenosa de estos materiales contiene numerosos minerales
 no alterados y alterables, mientras que la parte fina con
 tiene muchas veces ílitas, esmectitas y cloritas, la cali
 za puede estar presente o no. Durante los períodos fríos,
 secos y fuertemente eólicos que han seguido al deshielo,estos materiales fueron desplazados por los vientos y depositados formando los loess. Su extensión es muy importante en Canadá y Norte de los Estados Unidos, la mayor parte de la República Argentína; la mayor parte de Europa,
 en Asia, Siberia y la parte norte de China.

Numerosos tipos de suelos son conocidos pero no hablaré - más que de tres. En los podzoles, son los materiales originales sometidos a la acción conjunta de la materia organica ácida y a la hidromorfía, los minerales primarios y secundarios son atacados. El hierro y el aluminio son expulsados de todos los compuestos y pueden moverse a través del suelo y acumularse en la base del perfil. Pero las cantidades son muy pequeñas, sólo algunos porcientos de cada metal.

En el sur de Canadá, norte de EE.UU. en la URSS (Ukrania, Siberia, etc.). Se forman los Chernozems. Una acumula - ción destacada de materia orgánica se produce con un espe sor bastante fuerte, la caliza se acumula en la base del perfil, pero los minerales arcillosos son a penas alterados. Ninguna liberación o acumulación de hidróxidos de hierro o aluminio es visible.

Los suelos brunificados a menudo lavados están muy extendidos en el noreste de los EE.UU. y en Europa occidental, los minerales arcillosos de origen Cuaternario o productos de la alteración de las otras rocas no son alterados, pero pueden moverse a través del perfil. No hay individualización de hidróxidos de hierro o aluminio. Por lotanto, en superficies considerables en el mundo, los minerales arcillosos, en la mayoría de los suelos son heredados de los glaciales del Cuaternario y actualmente no sufren alteración, salvo en los podzoles que liberan cantidades bastante pequeñas de hidróxidos de hierro y alumidades bastante pequeñas de hidróxidos de hierro y alumidades.

6.2 - En la otra parte del mundo, la temperatura es más alta y la lluvia también, pero además se pueden hacer otras comprobaciones.

Los hielos cuaternarios no la han alcanzado, pués no hay materiales glaciales ni loess. Una parte ha sufrido plegamientos y ha sido levantada durante el Terciario y también durante el Cuaternario. Las nocas son a menudo calizas y rocas volcánicas con muchas cenizas, los suelos enestas cadenas son bastante jóvenes y rejuvenecidos debido a la erosión; pero la otra parte no ha sido alcanzada por las glaciaciones ni por plegamientos. Esta emerge, en elertas partes desde el Secundario, a menudo durante el elerciario; está constituída de rocas ígneas o metamórficas de origen continental tales como arenas, areniscas, arcillas, etc. En ciertas partes, inmensas capas de basalto han cubierto todas las otras rocas.

Durante millones de años estos bloques continentales han - sufrido la alteración y también la erosión. Ahora se presen tan como superficies a menudo muy bien aplanadas. Se ob - serva una suceción de llanuras de material aluvial; de mesetas de diversas alturas separadas por escarpas a veces - importantes.

Los suelos son muy diversos, los minerales secundarios son casi siempre derivados por síntesis de las rocas. Diver - sos tipos de suelos son conocidos. En los vertisoles no - hay más que minerales arcillosos de tipo 2/1, pero con muy poco hidróxidos de hierro. Su color oscuro es debido a la materia orgánica, los suelos fersialíticos contienen minerales arcillosos de tipo 2/1, pero los hidróxidos de hie - rro libre pueden alcanzar un porcentaje alto. Usualmente, estos suelos pueden observarse en lugares donde la lluviano es muy elevada.

Los suelos ferralíticos contienen minerales tipo 1/1, e -hidróxidos de hierro y a menudo de aluminio. Estos pueden
presentar un espesor muy importante y un contenido de -hidróxidos muy alto. Se considera que aún los mineralescomo la caolinita pueden alterarse y que el residuo finalpuede componerse de nada más que hidróxidos. Esto sin embargo es rara vez alcanzado, pero es muy frecuente obser var capas endurecidas de hierro y aluminio en las corazas.

6.3 - Así aparece que puede decirse que la acumulación de hierro y de aluminio en el suelo está relacionada con las condiciones climáticas. En efecto, la parte más fría no tienemuchos hidróxidos, salvo en los podzoles; y en la parte más cálida y también más lluviosa tienen mucho hierro con aluminio libre.

Sin embargo la historia geológica del globo y el tiempo me parecen que han jugado un papel muy importante, los suelos con mucho hierro y aluminio siempre son más antiguos que aquellos que contienen poco. En los países tropicales, — los suelos jóvenes son muy a menudo parecidos a algunos de los de las zonas templadas o frías. Tenemos un buen ejemplo de esto en Cuba con la abundancia de suelos pardos. — Igualmente, la naturaleza de las rocas madres es importante, las diversas rocas no se alteran con la misma veloci — dad.

No es posible de conocer como serían los suelos de las zonas templadas y frías, si el tiempo de alteración hubierasido tan largo en las zonas cálidas y lluviosas.

7. Las diversas consideraciones anteriores son el resultado de la -observación de lo que puede verse en la naturaleza, pero ciertosproblemas no pueden resolverse fácilmente gracias sólo a la obser
vación; los fenómenos que uno quiere comprobar son demasiado len-

tos y entonces se recurre a la síntesis y a la alteración artificial.

7.1 - Los óxidos e hidróxidos han sido procesados con éxito completo. Se conocen las condiciones convenientes para obtener todos los minerales del suelo. En lo que se refiere a minerales arcillosos, el éxito fue parcial.

La síntesis de los minerales tipo 2/1, los más complicados fueron procesados con cierta facilidad; en cambio el mineral que tiene la estructura más sencilla, la caolinita, no fue obtenida sino con dificultad. De manera que la cantidad fue siempre pequeña y los minerálogos no están todavía seguros de que el producto obtenido sea la caolinita. Diversos grupos de investigadores trabajan sobre este problema ahora, se puede esperar un éxito para los próximos años.

7.2 - La alteración de los minerales primarios es siempre muy -lenta. Entonces los investigadores han tratado de acele rarlo en el laboratorio; diversos medios fueron utilizados,
como la sintesis, aumentar la presión, aumentar la tempera
tura, renovar las soluciones en contacto con las rocas.
Con alta presión y temperatura se pueden alterar con rapidez casi todos los minerales, pero estas no son condicio nes naturales. El método que más se acerca a ella es el que utiliza Pedro con el aparato de Soxhlet.

Diversos tipos de minerales y de rocas se han podido alterar así.

El resultado más destacado, fue una vez más, la obtenciónrápida de hidróxidos de hierro y aluminio; la caolinita fue alterada obteniéndose sílice y gibsita. Pero nunca mi
nerales arcillosos y mi la caolinita fueron obtenidas, -aquí hay todavía investigaciones muy interesantes que se pueden realizar.

- 7.3 Otro tipo de investigación se refiere al desplazamiento del hierro; muchos trabajos han sido realizados para estudiar el efecto de la materia orgánica y se puede mostrar ampliamente que con materia orgánica fresca en condiciones anaerobias este desplazamiento es muy fácil.
- 8. Durante estas dos conferencias he tratado de mostrar la importancia pedológica mayor de los dos metales: hierro y aluminio.

 Primero recordé las propiedades de los metales en forma de iones, luego los constituyentes naturales y los métodos de dosificarlos. Hay muchos buenos métodos, lo que importa es utilizarlos sabiendo

bien la parte que uno quiere determinar.

Los dos metales son responsables de diversas propiedades impor - tantes del suelo, así como el color y la acidez, pueden acumular se en el suelo y cuando esta acumulación es muy grande, el suelo no tiene mucho valor para el agricultor sino para el minero.

Muchos trabajos de investigación han sido realizados tanto en el campo como en el laboratorio, queda mucho por hacer para resol - ver numerosos problemas que se refieren al transporte de los dos metales y la síntesis de los minerales arcillosos.

Hay que recordar siempre que los problemas del hierro y del aluminio, se tornan dificiles y complicados debido al alto número - de constituyentes presentes en el suelo. Estoy seguro que el -- hierro y el aluminio obedecen siempre a las leyes generales de - la física y la química, es siempre apoyándose en éstas que los - progresos que son esperados podrán cumplirse.

Gráfico 1

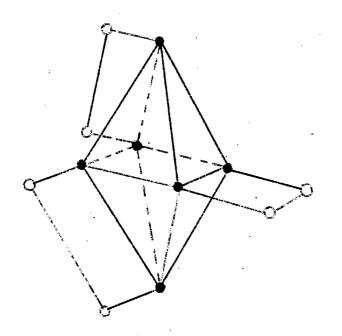
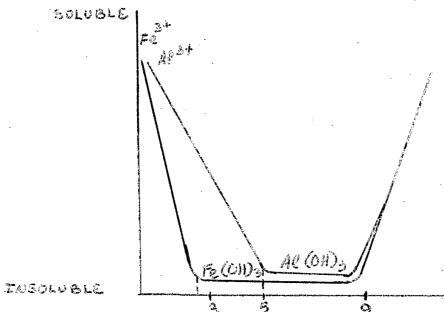


Gráfico 2



• Off O CO

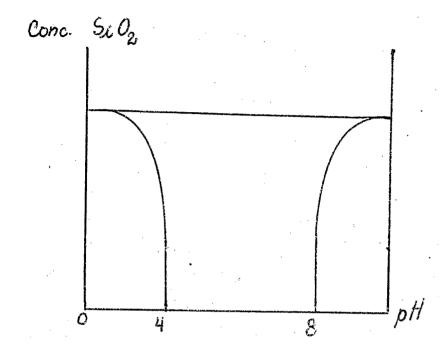
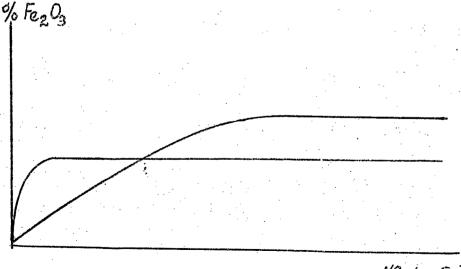
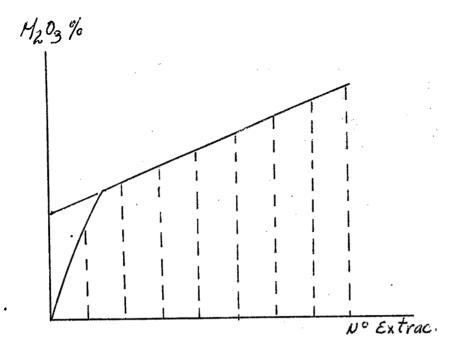
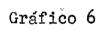


Gráfico 4



No de Extrac.





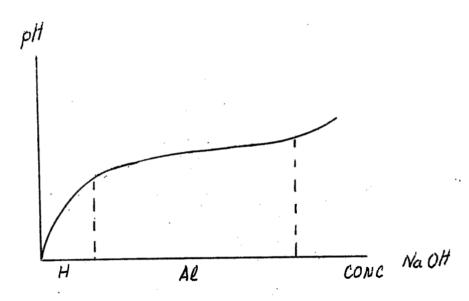


Gráfico 7

