

Libros de **Cátedra**

Suelo en el paisaje

PARTE I

Condiciones de dotación

M. M. Alconada Magliano - J. W. Lanfranco - A. E. Pellegrini

n
naturales

FACULTAD DE
CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

SUELO EN EL PAISAJE

PARTE I CONDICIONES DE DOTACIÓN

Margarita M. Alconada Magliano
Jorge W. Lanfranco
Andrea E. Pellegrini

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales



A los alumnos de Edafología

Índice

Presentación	5
 CAPÍTULO 1	 7
El suelo en el paisaje	7
<i>Margarita M. Alconada Magliano</i>	
1.1 Conceptos relativos al estudio del suelo en el paisaje	7
1.2 Los sistemas de flujo de agua subterránea como integrador de los elementos del paisaje	10
1.3 Factores formadores del suelo como base de interpretación de su funcionamiento	15
1.4 Calidad de suelo	24
1.4.1 Definiciones, planteamiento del enfoque de estudio propuesto	24
1.4.2 Pérdida de calidad y sustentabilidad. Ejemplos en Pradera Pampeana; Cuenca sedimentaria Chaco-Paranaense (Chaco) y Cuenca del río Chubut (Chubut)	25
 Bibliografía	 33
 CAPÍTULO 2	 36
Conceptos generales de la fertilidad edáfica	36
<i>Margarita M. Alconada Magliano</i>	
2.1 Suelo y conceptos vinculados a la fertilidad	36
2.2 Dotación y abastecimiento	38
2.2.1 Propiedades Químicas que definen la Dotación	40
2.2.1.1 Elementos esenciales, benéficos y tóxicos para las plantas	40
2.2.1.2 Medio a partir del cual los elementos son tomados por las plantas	43
2.2.1.3 Absorción y movilidad de elementos	44
2.2.1.4 Interacciones iónicas, sinergismo, antagonismo, inhibición competitiva y no competitiva, y electroneutralidad en la relación suelo-planta	45
2.2.1.5 Biodisponibilidad (elemento, suelo, planta)	49
2.2.2 Propiedades fisicoquímicas y físicas que definen el Abastecimiento	50
2.2.2.1 Propiedades fisicoquímicas	51
2.2.2.2 Propiedades físicas	51
2.2.3 Propiedades biológicas	53
2.2.4 Principales restricciones del suelo en el crecimiento vegetal	54

2.2.5	Relaciones entre los tipos de flujos de agua, geomorfología, suelo y planta.	
	Incidencia en la renovación de nutrientes. Ejemplos de secuencias de suelos en Argentina	55
Bibliografía		59
CAPÍTULO 3		62
La materia orgánica en los suelos		62
<i>Jorge W. Lanfranco</i>		
3.1	Introducción	62
3.2	Conceptos y definiciones	63
3.2.1	Composición sobre base seca de la materia orgánica	64
3.2.2	Contenido de materia orgánica del suelo	64
3.2.2.1	Pradera pampeana	66
3.2.2.2	Selva subtropical	68
3.2.2.3	Monte patagónico	68
3.3	Los habitantes del suelo	69
3.3.1	Mónera	71
3.3.2	Protista	72
3.3.3	Fungi	72
3.3.4	Vegetal	72
3.3.5	Animal	73
3.4	Dinámica de la Materia Orgánica del suelo	74
3.4.1	Mineralización	76
3.4.1.1	Mineralización primaria	76
3.4.1.1.2	Relación C/N del material orgánico a mineralizar	77
3.4.1.1.3	Principales sustratos de la mineralización primaria	78
3.4.2	Humificación	79
3.4.3	Mineralización Secundaria	80
3.5	Componentes de la Materia orgánica	80
3.5.1.	Ácidos Fúlvicos	81
3.5.2	Ácidos húmicos	81
3.5.3	Huminas	82
3.5.4	Relación ácidos fúlvicos/ácidos húmicos	82
3.6	Propiedades de la Materia Orgánica	83
3.6.1	Influencia en la génesis	83
3.6.2	Fertilidad de los suelos	84
3.6.2.1	Aspecto físico	84

3.6.2.2 Aspecto bioquímico y fisicoquímico	85
3.7 Clasificación ecológica de la Materia Orgánica	87
3.7.1 Humus Mull	87
3.7.2 Humus Moder	88
3.7.3 Humus Mor	88
3.8 El impacto de la producción sobre la materia orgánica	89
3.9 Compostaje de residuos	93
3.9.1 Los residuos en la naturaleza	93
3.9.2 Identificación de los residuos	95
3.9.3 Compostaje	96
3.9.4 Diferencias entre el humus propiamente dicho y el compost	97
3.9.5 Factores que afectan al compostaje	97
3.9.6 Lombricompostaje	98
3.10 Aumento de contenido de materia orgánica al suelo por adición de compost	100
Bibliografía	101
 Capítulo 4	 103
Macronutrientes del suelo	103
<i>Andrea E. Pellegrini</i>	
4.1 NITRÓGENO	103
4.1.1 Aspectos generales	103
4.1.2 Fijación del N atmosférico	105
4.1.3 Amonificación	106
4.1.4 Nitrificación	107
4.1.5 Desnitrificación	108
4.1.6 Volatilización de NH_4^+	109
4.1.7 Lixiviación o lavado	110
4.1.8 Pérdida por erosión	111
4.1.9 Fijación de amonio	111
4.1.10 Inmovilización microbiana	111
4.1.11 Diagnóstico	112
4.2 FÓSFORO	115
4.2.1 Fosfatos inorgánicos	116
4.2.2 Fosfatos orgánicos	118
4.2.3 Rol de los microorganismos en el flujo de fósforo.	120
4.2.4 Micorrizas	121
4.2.5 Fertilidad fosforada y balance	122
4.3 AZUFRE	124
4.3.1 Flujo del azufre	125

4.3.2 El azufre como nutriente de las plantas	126
4.3.3 Compuestos azufrados orgánicos	127
4.3.4 Compuestos azufrados inorgánicos	128
4.3.5 Movimiento y adsorción de sulfatos	128
4.3.6 Lluvia ácida	129
4.3.7 Disponibilidad y aprovechamiento del azufre	129
4.3.8 Determinación de sulfatos por turbidimetría	130
4.4 POTASIO	131
4.4.1 Dinámica del potasio en el suelo	132
4.4.2 Pérdidas de potasio	133
4.4.3 Diagnóstico de la fertilidad potásica	133
4.5 CALCIO Y MAGNESIO	134
4.5.1 Flujo del calcio y el magnesio en el suelo	135
4.5.2 Diagnóstico de la fertilidad cálcica y magnésica	137
Bibliografía	140
 Capítulo 5	 142
MICRONUTRIENTES DEL SUELO	142
<i>Andrea E. Pellegrini</i>	
5.1 MOLIBDENO	142
5.2 ZINC	143
5.3 CLORO	143
5.4 MANGANESO	144
5.5 BORO	145
5.6 HIERRO	146
5.7 COBRE	147
Bibliografía	149
 Los Autores	 150

Presentación

Margarita Alconada Magliano

Este libro propone el estudio del suelo como un elemento del paisaje local y regional, como base para comprender su funcionamiento y las posibilidades de intervención y manejo sustentable

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO,
ANDREA PELLEGRINI, SUELO EN EL PAISAJE

El suelo se vincula con otros elementos del paisaje natural, vegetación, geomorfología y sistemas de flujo de agua subterránea, así como con el hombre. La sostenibilidad de las prácticas de manejo y su contribución al desarrollo de una región depende de que estas sean implementadas conforme al paisaje local y regional. Desde la edafología se estudia el perfil edáfico y los factores formadores que le dieron origen tras una descripción morfológica y analítica de dicho perfil. Esto en general se realiza hasta un máximo de 1,5-2,0 m de profundidad, y no siempre estos son cabalmente comprendidos al omitir las vinculaciones con otros elementos del paisaje especialmente el agua subterránea. Esto conduce con frecuencia a que no puedan preverse los cambios posibles frente a otros escenarios.

El presente libro pretende dar el marco conceptual y aplicado de los criterios que permiten definir la Fertilidad del suelo local en lo regional. Se busca que las caracterizaciones químicas, físico-químicas, físicas y biológicas del suelo, sean interpretadas de una manera integral donde el valor absoluto de una variable puede resultar relativo al considerar el resto de variables y principalmente el origen de su ocurrencia cuando la misma se constituye en limitante. Esto posibilita prever cambios frente a escenarios naturales o antrópicos, y analizar la factibilidad de una práctica de manejo en la resolución de limitantes productivas o de uso.

Esta publicación, se organiza en dos partes, en la presente, se incluyen temas que hacen a la Dotación (Parte 1), y una segunda parte al Abastecimiento (Parte 2). En ambos volúmenes se da una contextualización temática inicial, incluyendo aquellos aspectos que hacen posible comprender la idea general que se quiere transmitir: *“la comprensión del suelo en el paisaje”*.

CAPÍTULO 1

El suelo en el paisaje

Margarita Alconada Magliano

Se presentan conceptos generales sobre la forma en que se encuadran los estudios de la fertilidad edáfica en esta publicación, donde el suelo integra un paisaje en el cual se vinculan elementos naturales y antrópicos. Se indican los motivos que conduce a plantear la necesidad de estudiar los suelos desde esta visión de paisaje, con ejemplos argentinos donde los descensos de productividad y degradaciones se deben a intervenciones que no consideran el funcionamiento global del sistema suelo-agua-planta.

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO,
ANDREA PELLEGRINI, SUELO EN EL PAISAJE

1.1 Conceptos relativos al estudio del suelo en el paisaje

Se presentan aquí algunos conceptos relativos a la forma en que se plantea estudiar el suelo en relación a su fertilidad de modo que las intervenciones consideren no sólo las características locales del sitio a intervenir sino también como este depende de lo regional. Algunos de estos temas se amplían en otros puntos de la presente publicación.

Paisaje: El paisaje resulta de la interrelaciones de factores naturales y humanos, abarcando un mosaico de ecosistemas y sistemas productivos, dinámicos en su funcionamiento (Benassi, 2015). Los principales elementos naturales que lo integran son: suelo, vegetación, geomorfología, agua superficial y subterránea. Esta última resulta en el elemento no visible integrador del resto de elementos el paisaje.

Formación del suelo: El suelo se forma a partir de un material original (roca, sedimento) que evoluciona en función de cómo inciden los factores formadores (clima, relieve, biota) en un tiempo dado. La acción del hombre varía según el tipo y forma en que se realiza una acción y características de los ecosistemas. Es frecuente que se subestimen las consecuencias de

intervenciones tales como: desmontar, forestar, cultivar, regar, drenar un humedal, establecer un feedlot, entre otras actividades agrícola-ganaderas y forestales debido a que en general no se interpreta el suelo con las relaciones bióticas y abióticas que definen al paisaje.

Ecosistema y Paisaje: Los ecosistemas regulan y son consecuencia de lo que ocurre en el agua subterránea, pudiendo observarse ecosistemas diferentes pero vinculados entre sí e incluso se complementan, tal como plantea la teoría de los sistemas de flujo donde se reconoce la existencia de áreas de recarga y descarga de un tipo de flujo (Tóth, 2000), aspecto que se analiza en punto siguiente (punto 1.2).

La concepción del paisaje como unidad ecológica superior al ecosistema permite abordar objetivos científicos y técnicos a escalas de trabajo en las que se producen importantes interacciones entre los distintos ecosistemas terrestres. Su consideración, análisis y comprensión serán primordiales para diagnosticar los impactos del hombre.

Dentro de este último criterio, la relación suelo – vegetación – geomorfología – agua superficial y subterránea como un *criterio clasificador del paisaje*, dada la interdependencia que poseen, definen los conocimientos que son necesarios considerar a fin de interpretar la fertilidad del suelo, entendida a partir de las potencialidades y limitantes que efectivamente resultan de su comprensión global, el suelo local en lo regional.

Estudios del suelo, perfil edáfico: En general las decisiones sobre el manejo, tipo de intervención, se realizan efectuando consideraciones de superficie y estudios del suelo que como máximo llegan a 2 m de profundidad e incluso con frecuencia sólo se analiza el horizonte superficial en algunas propiedades químicas, tal como, N, P, pH, materia orgánica.

En la cartografía de suelos existente en el país y en el mundo en general, se describen los rasgos morfológicos y propiedades analíticas del perfil edáfico modal, definiendo su aptitud de uso a partir de estas. Sin embargo, no siempre son considerados los orígenes de algunas características edáficas y que estas, son en general la manifestación de algo que puede *haber sucedido, sucede o resulta alternante*. Esto es lo que con frecuencia ocurre al definir el *régimen de humedad* del suelo y la importancia de la superficie freática sobre las propiedades del suelo y el crecimiento de los cultivos. Así por ejemplo, se reconocen moteados o concreciones de Fe y Mn, pero si estos solo se observan en la base del perfil, a más de un metro, se indica que la superficie freática no afecta de manera significativa. Sin embargo, esto varía con todo lo que afecte el funcionamiento hidrológico e hidrogeológico tal como el clima local, regional (alternancias periodos secos-húmedos característicos de algunos ambientes), y global (períodos del Niño o la Niña). Incluso puede haber cambios por acciones del hombre tales como construcción de grandes obras, diques, represas, captaciones de ríos, canalizaciones, entre otras acciones. La fecha en que se efectúan los estudios de suelos (material cartográfico) debe ser considerada.

Un ejemplo ilustrativo de lo comentado puede darse con la discusión reciente presentada sobre el régimen de humedad de los suelos en el ámbito de la Pampa deprimida por el INTA, donde suelos antiguamente calificados como **Natracualf** es propuesto denominar en algunos casos como

Natrudalf, es decir cambiarlos de régimen ácuico a údico, aspecto que podría ser revisado considerando los factores formadores de los suelos, calidad de agua subterránea, y los tiempos que deben considerarse al caracterizar un ambiente. En el *perfil edáfico* no solo los rasgos hidromórficos pueden indicar una superficie freática incidente sino también, propiedades analíticas tales como pH, composición catiónica, aniónica, salinidad y alcalinidad de dicho suelo, que permiten inferir la calidad agua freática y su origen (Alconada *et al.*, 2011; 2014).

La degradación de ambientes frágiles, tal como se han medido en sitios de desmonte, deforestación, incorporación de riego, en diversas regiones del país y del mundo, tal como se ejemplifica en punto 1.3.2 del presente capítulo, tiene en parte origen en lo aquí mencionado.

Se destaca que si bien en los últimos años, han habido significativos avances en el manejo a nivel de cuencas superficiales y por ambientes, principalmente en actividades agrícolas (ejemplo, agricultura de precisión), no siempre resulta suficiente ya que dichas divisiones de superficie no incluyen en general el análisis del agua subterránea que vincula los elementos del paisaje local con el regional. Darwich (com.pers.) presenta ensayos donde la división de lotes por rendimiento y fertilización ajustada a estos, no condujo a uniformar dichos rendimientos.

En la Figura 1.1 se presenta un ejemplo de crecimiento diferencial de trigo en un ambiente superficial uniforme, planicie plana extendida en el partido de Lincoln, Pampa Arenosa, provincia de Buenos Aires. Esto se debe a diferencias en el espesor del depósito superior más arenoso y reciente (Formación Médano invasor, edad post pampeana), sobre el material más antiguo de origen loésico (Formación bonaerense, pampeano) (SAGyP-INTA 1989), con superficies freáticas someras de salinidad y alcalinidad en general elevada, que determinan diferentes tipos de suelo hasta la profundidad frecuente de estudio: **Hapludol típico**, **Hapludol ácuico**, **Hapludol taptó árgico** y **Hapludol taptó nátrico**, y donde el depósito superior desaparece o resulta insuficiente, se definen como **Natracuol típico** y **Natracualf típico** (Alconada *et al.*, 2014). Sobre este ejemplo se amplía en punto 2.3.2 (Capítulo 2).



Figura 1.1 Crecimiento diferencial de trigo en un ambiente superficial uniforme, planicie plana extendida (partido de Lincoln, Pampa Arenosa, provincia de Buenos Aires)

Carrillo Rivera (2000), señala que la relación hídrica subterránea entre cuencas superficiales en la mayor parte de los casos está enmascarada o no es detectada fácilmente. Esto se explica mediante el concepto de continuidad hidráulica regional (Tóth *et al.*, 1995) que se presenta en punto siguiente (punto 1.2).

Multidisciplinario, Interdisciplinario y Transdisciplinario: El estudio del suelo y su manejo debe ser realizado conociendo como se vincula dicho suelo con otros elementos del paisaje, en lo local y regional (topografía, geomorfología, hidrogeología, vegetación). Para lo cual debe disponerse de conocimientos e información básica de cada uno de los elementos del paisaje, tales como relevamientos de suelo, vegetación, calidad de agua, estudios geomáticos supervisados a campo, rendimientos, historia productiva. Cabe destacar que en general, en el país se han realizado numerosos estudios sobre el ambiente desde diversas disciplinas, un primer paso es recopilarla y vincularla a fin de definir que puede ser prioritario analizar a fin de completar la comprensión de funcionamiento del paisaje.

Cabe entonces efectuar una distinción entre estos tres conceptos.

- *Multidisciplinario:* considera diversas disciplinas, pero cada una aporta al conocimiento desde su temática.
- *Interdisciplinario:* diversas disciplina se vinculan en un aspecto puntual, toman una parte de cada una de dichas disciplinas.
- *Transdisciplinario:* surge un nuevo ámbito de acción que resulta superior a cada una de las disciplinas. Se acceden a nuevos conceptos que no se tenían para una disciplina y posibilita por ejemplo, una nueva forma de intervención del paisaje, tal como manejo de inundación-sequia, manejo del riego, implantación de forestación, manejo de humedales en general.

1.2 Los sistemas de flujo de agua subterránea como integrador de los elementos del paisaje

El suelo se vincula con otros elementos del paisaje natural, vegetación, geomorfología y sistemas de flujo de agua subterránea, así como también con el hombre. La sostenibilidad de prácticas de manejo y su contribución al desarrollo de una región depende de que sean implementadas conforme al paisaje local y regional.

Ha sido claramente establecida la necesidad de un enfoque hidrológico en la evaluación de procesos degradativos y manejo sustentable del suelo, definiendo las variables del ambiente y sus relaciones (Pla Sentis, 2005). Esto es, estudiar el suelo en el ambiente local, a partir de sus características morfológicas y analíticas, e inferir el origen de las mismas considerando sus vinculaciones con el paisaje regional.

En general no es lo que comúnmente se realiza ya que se caracteriza al suelo hasta aproximadamente 1,5 m de profundidad y no incluye la calidad del agua subterránea ni se establecen las relaciones entre las características observadas y su origen, que es lo que en definitiva determina la factibilidad de una práctica de manejo. Esto es particularmente importante en ambientes con superficies freáticas someras y se plantean prácticas como desmontar, forestar, drenar, regar, o manejar el agua en exceso a través de la vegetación, técnica conocida como Bio-drenaje (Heuperman, 2003; Tomar, 2007; Alconada *et al.*, 2009).

Son muchos los ejemplos en el país donde este tipo de análisis tiene aplicabilidad, tal como valles y mallines patagónicos, monte chaqueño, y llanura chaco pampeana en general. En la provincia de Buenos Aires, se destaca la Pampa Arenosa y Pampa Deprimida, ya que son las superficies freáticas las que principalmente definen el funcionamiento general del paisaje y sus consecuencias en el régimen hídrico, coadyuvando o agudizando una problemática de déficit-exceso hídrico frecuente (sequía, anegamiento, inundación, lavado, salinización, alcalinización).

La teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea de Tóth (2000) permite vincular los elementos del paisaje e indica que pueden coexistir en un área flujos locales, intermedios o regionales que son definidos por la calidad del agua, suelo, vegetación, geología y geomorfología, tal como se explica en punto siguiente. Alconada *et al.* (2014) se analiza como la historia hidrogeológica de un sitio y funcionamiento del paisaje, puede ser estimado por los suelos.

La teoría de los sistemas de flujo de agua subterránea y de la continuidad hidráulica regional

Flujos: La teoría de los sistemas de flujo de agua de Tóth (2000) señala la existencia de tres tipos de flujos de agua subterránea, **local, intermedio y regional**. Cada uno de estos flujos posee tres zonas, **recarga, tránsito y descarga**, que se complementan en su funcionamiento hidrológico (Figura 1.2). Esto es, dentro de un flujo, la zona de recarga de agua se vincula a su descarga, toda acción que sobre alguna de estas áreas se realice afecta la otra.

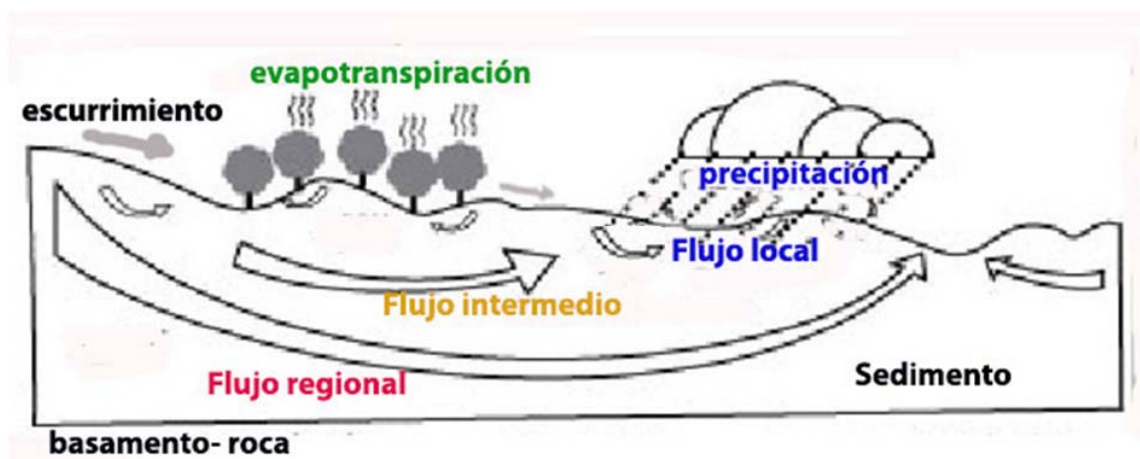


Figura 1.2 Sistemas de flujo subterráneo básicos: local, intermedio y regional

A continuación se explican los **flujos** mencionados y presentados en la Figura 1.2:

El **flujo local**, responde a la precipitación acaecida en el sitio. En la **zona de recarga** el agua de lluvia infiltra como flujo descendente, poco profundo y **descarga** en zonas más baja con flujo ascendente. En su recorrido el agua se carga de sales al intemperizar los materiales geológicos por donde circula. Los flujos locales tienen baja salinidad debido a que el recorrido que efectúan es corto.

Este tipo de flujo se asocia a los denominados “bajos dulces” sin sales o de baja salinidad, característicos de la Pampa Deprimida, tales como el **Argialbol típico**. Ejemplo, Serie Los Hornos, (Aula Virtual Edafología, Guía Interpretación de perfiles parte A).

Por el contrario, en un **flujo regional**, la distancia entre la zona de recarga y descarga es muy grande. El agua penetra profundamente, recorre muy largas distancias, disolviendo y precipitando sales, generándose en la descarga agua con muy alta salinidad. Por ejemplo, zona de recarga en la Cordillera de los Andes y descarga a cientos de kilómetros en zonas bajas (respecto a su origen), tal como en la provincia de Buenos Aires.

Un **flujo Intermedio**, es una situación intermedia en recorrido y profundidad respecto al flujo local (lluvia local) y flujo regional (lluvia ocurrida a grandes distancias). Por ejemplo, la distancia entre la recarga y la descarga puede ser entre provincias vecinas. En general, poseen elevado contenido de sales, dependiendo también de los materiales geológicos por donde circula. En estudios efectuados en el noroeste bonaerense (Pampa Arenosa) se han reconocido estos flujos asociados a suelos **Natracualf típico**, y **Hapludol tpto nátrico** (Alconada *et al.*, 2011) Asimismo, los suelos con elevado contenido de Na en la **Pampa Deprimida** (**Natracuol típico** y **Natracualf típico**) (punto 2.2.5, Figura 2.4) muy posiblemente también asociados a flujos intermedios que explican la elevada alcalinidad de dichos suelos.

Continuidad hidráulica regional: Los flujos de agua descriptos pueden ser explicados por la existencia de la continuidad hidráulica regional (Engelen y Jones, 1986; Tóth, 1995). Esto significa

que existe interdependencia hídrica subterránea entre zonas de una cuenca o entre cuencas vecinas, entre el agua subterránea y agua superficial, y estas, con la vegetación, suelo, relieve y unidades geológicas involucradas. Esto es confirmado por Tóth (2000) respecto a que diferentes sistemas de flujo pueden ocupar una misma unidad acuífera; o por el contrario, que un mismo sistema de flujo puede circular por dos o más unidades acuíferas (Carrillo Rivera, 2000). Este autor, ha definido evidencias de esto en cuencas ígneas superficiales de gran extensión, destacando que en la mayor parte de los casos la relación hídrica subterránea entre cuencas superficiales está enmascarada y no es tan fácilmente reconocida, conduciendo a que en la mayor parte de los diagnósticos no se considere al agua subterránea o la continuidad hidráulica subterránea entre cuencas superficiales adyacentes. Asimismo, indica que es frecuente la argumentación de la presencia de unidades geológicas impermeables que supuestamente limitan lateralmente el flujo subterráneo entre cuencas superficiales, tal como las sierras que limitan las planicies, enfoque que destaca erróneo.

Evolución del agua en los flujos: En la Figura 1.3, se presenta como evoluciona la calidad de las agua desde las zonas de recarga hasta las de descarga, dependiendo de las distancias y profundidades recorridas por las aguas, factores locales y regionales, vinculados a la geología, clima, entre otros (Tóth, 2000). En la **recarga** prevalecen aguas con mayor contenido relativo de HCO_3^- y menor de Cl^- , menor pH, menor salinidad, mayor contenido de oxígeno (medido en potencial redox, Eh^+) y menor temperatura. En la **descarga**, prevalecen los Cl^- , aumenta el pH y la salinidad, disminuye el contenido de oxígeno y aumenta la temperatura.

El agua en su recorrido disuelve e intemperiza los materiales geológicos por donde circula. La *disolución* de sales y salinización adquirida en el agua depende de la superficie y tiempo de contacto, longitud del recorrido, concentración de sales en la roca, temperatura y presión. La *evolución* de sales depende del producto de solubilidad (pK). Así, cuando la concentración de una sal alcanza su pK precipita y comienzan a prevalecer las más solubles. La sal más soluble es el NaCl y es la que prevalece al final de flujos de largo recorrido (Fagundo, 1990).

En forma sintética puede indicarse que la secuencia normal de un agua de reciente infiltración es: cationes $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na}$ y aniones $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4 > \text{Cl}$, y luego de un largo tiempo de residencia, se tiende a invertir a: cationes $\text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca}$ y aniones $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{HCO}_3^-$ (Fagundo, 1990), tal como se aprecia y se esquematiza en Figura 1.3.

En relación a las otras variables presentadas en Figura 1.3, se destaca que el aumento de T° se debe al calor telúrico (a mayor profundidad mayor temperatura), mientras que el pH varía con el tipo de sal que prevalece (NaCl próximo a 7-8, $\text{NaCO}_3 > 9$) (guía Suelos Salinos y Sódicos, Aula Virtual). La **anoxia** depende de diversos factores, materiales geológicos, reacciones ocurridas durante el recorrido del agua, permeabilidad de capas del subsuelo, horizontes edáficos, materiales orgánicos, entre otros (Tóth, 2000).

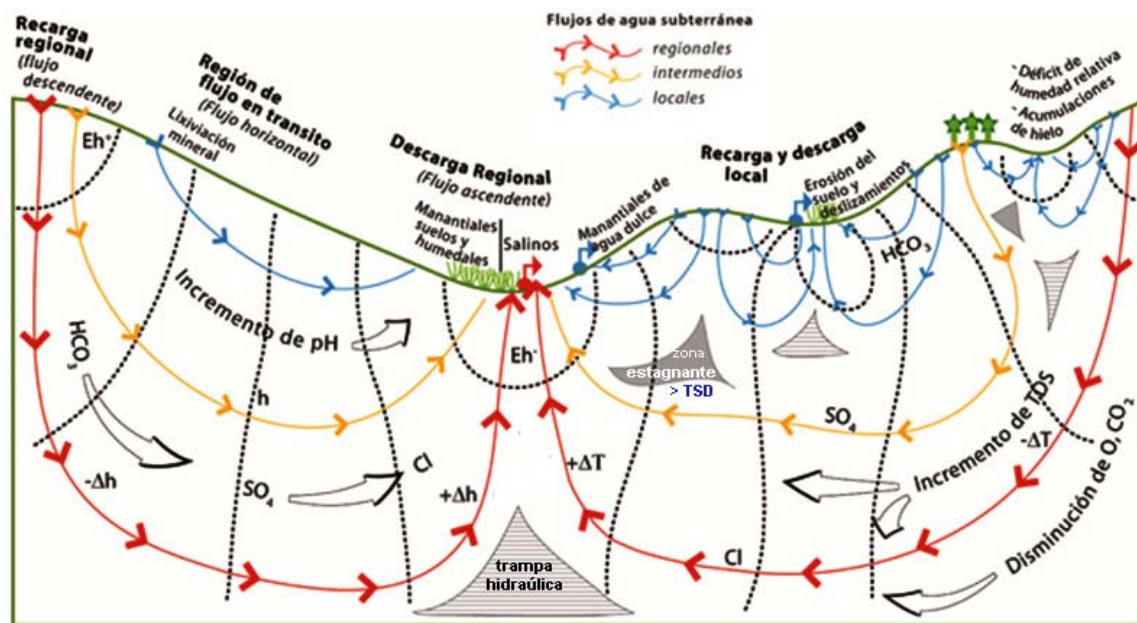


Figura 1.3 Sistemas de flujo subterráneo: zonas de recarga, descarga, e indicadores ambientales asociado (zona estagnante, disminución de O₂ con incremento de total de sólidos solubles; Trampa hidráulica, convergencia y acumulación de material transportado y calor). Modificada de Tóth (2000 en Alconada *et al.*, 2009)

En síntesis, por lo expuesto es factible entender a los sistemas de flujo de agua subterránea como el **elemento integrador del paisaje**, que se relaciona con el tipo de suelo, vegetación, posición topográfica, geología y clima. Asimismo, se aprecia que es posible predecir el tipo de flujo que incide o si más de un tipo de flujo se reconoce en un sitio dado (Figura 1.2), y zonas dentro de estos, en base a la presencia o ausencia de sales (concentración y tipo) y/o rasgos hidromórficos en el perfil edáfico. Así, por ejemplo, en épocas de inundaciones generalizadas regionalmente, un flujo más profundo de tipo intermedio y salino puede incidir más superficialmente aumentando temporalmente la salinidad de flujos locales (Alconada *et al.*, 2011).

Esta teoría de sistemas de flujo de agua subterránea de Tóth (2000), **combina o considera, varios de los ciclos de salinización** que la bibliografía clásica sobre suelos salinos describe Kovda (1965); Porta *et al.* (1994) (en Alconada, 2015), incorporando otros elementos del paisaje en forma dinámica donde la hidrogeología, clima, vegetación, manejo, explica lo que se observa en el suelo principalmente en su hidrohalomorfismo.

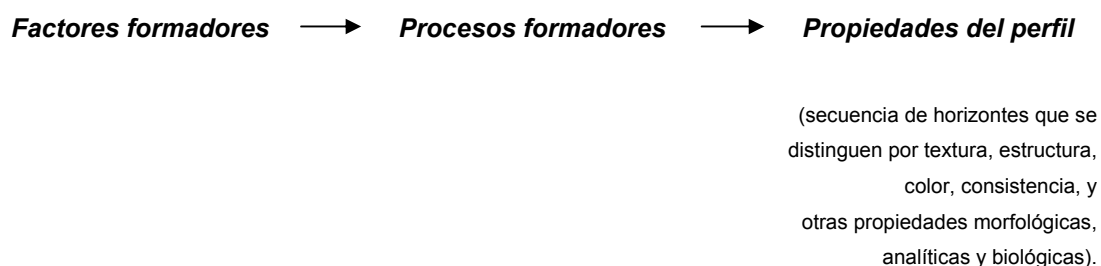
1.3 Factores formadores del suelo como base de interpretación de su funcionamiento

Este punto se desarrolla en detalle en el Libro de Cátedra (Lanfranco *et al.*, 2014) y en el material del Curso de Edafología (Aula Virtual, Edafología). Aquí solo se reiteran algunos lineamientos básicos con hincapié sobre las relaciones que permiten prever el funcionamiento del suelo y explican cabalmente la definición dada del suelo en Porta *et al.* (1994) “*cuerpo natural con propiedades distintivas, repetitivas y previsibles*”, que reafirma la necesidad de estudiar el suelo en el paisaje.

La formación *del suelo* es función de cinco factores principales: material original, tiempo, clima, biota y relieve. Adicionalmente en la bibliografía se indican factores tales como erosión, factores hidrológicos, paleoclimas, influencia del medio global, entre otros, que en última instancia resultan de la interrelación de los principales.

El **suelo** es entonces como se indicó, la resultante de la evolución de un *material geológico* (roca o sedimento), un *tiempo* transcurrido desde su depósito, en un clima imperante (principalmente precipitación y temperatura), una *biota* dada (microorganismos, animales, plantas, hombre) y en una posición del *relieve* donde el agua superficial y subterránea incide como flujos descendentes, laterales o ascendentes (punto 1.2). La interrelación que se produce entre los factores formadores determina la dirección, velocidad y duración de los **procesos formadores edafogénicos**, que definen las propiedades y características del perfil edáfico.

Se esquematiza así:



Si bien todos los factores inciden y las combinaciones posibles son muchas, existe previsibilidad de ocurrencia de sus características (ver definición de suelo en punto 1.1), lo que permite prever el origen y funcionamiento del suelo dentro del paisaje, y asociado a esto, efectuar intervenciones sustentables.

A continuación se describe y presentan ejemplos de la forma en que incide un factor determinado cuando el mismo prevalece o incide marcadamente en las características edáficas.

Material original: Incide principalmente en el color, textura, estructura y nutrición del suelo. La susceptibilidad a la meteorización del material original, clima y tiempo transcurrido desde su deposición en un sitio determina la evolución. Si bien existe una tendencia a que *determinadas rocas den cierto tipo de suelo, esto depende de la ocurrencia de los otros factores formadores*.

Un clima más húmedo y mayor transcurso del tiempo intensifica los procesos edafogénicos y genera una mayor diferenciación del material original. Así, un *mismo tipo de roca puede dar suelos diferentes según las condiciones donde evoluciona*. Por ejemplo basaltos mesopotámicos y patagónicos, que si bien los tiempos en que fueron depositados difieren, es el clima el factor decisivo de su evolución: ambientes tropicales (Oxisoles, Ultisoles) y en ambientes patagónicos (Entisoles y Aridisoles).

Asimismo, *diferentes rocas* pueden dar *suelos análogos* con climas enérgicos y tiempo suficiente. Por ejemplo en región de Pampa Serrana, en los sectores de planicie (interserranos) materiales diversos dan origen a iguales suelos, por ejemplo Hapludoles y Argiudoles. Auge (2004) indica para los ambientes serranos e interserranos la presencia en superficie de materiales limoso arenoso y arcilloso (loess origen eólico) con intercalaciones de tosca, arenas finas a limosas con intercalaciones arcillosas (origen eólico-fluvial), gravas, bloques (variado origen).

No obstante, cada roca en función de su mineralogía, riqueza en nutrientes, características físicas, tiene una *potencialidad evolutiva*. Así, los suelos derivados a partir del *loess* (roca sedimentaria de origen eólico) tienden a una alta fertilidad, por el contrario, un depósito cuarzoso genera suelos pobres de escasa evolución y solo la vegetación capaz de colonizar y clima imperante, definirá la fertilidad del suelo.

Clima: La acción directa del clima es a través de la *humedad y temperatura*, siendo indirecta a través de la vegetación. Controla el tipo e intensidad de los procesos edafogénicos. La relación entre la evapotranspiración (EVT) y la precipitación (P) para un suelo dado, define su régimen de humedad. Son principalmente de 4 tipos y se corresponden con los del sistema clasificatorio *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2010) como sigue: i) *percolante* ($P > EVT$) - régimen **údico**; ii) *no percolante* ($EVT > P$) - régimen **arídico, xérico, ústico**; iii) *ascensional* ($EVT \gg P$) - régimen **arídico, xérico** y iv) *saturado de agua* - régimen **ácuico** (Gerasimov, 1960 en Porta *et al.*, 1994).

Sin embargo, el clima cambia a lo largo del tiempo, así por ejemplo es posible encontrar en climas áridos actuales horizontes con arcilla iluvial (Bt) formados bajo un clima húmedo pasado (paleoclima–paleosuelo). En Figura 1.4 se presenta un suelo del orden Aridisol, subgrupo *Argigysid cálcico*, en la provincia de Neuquén, con discontinuidad litológica (diferentes materiales originales), con cultivo de vid tipo malbec, con secuencia de suelo C-2Btk-2Bck-3Ck (Irisarri, 2013). Se muestra también en Figura 1.4 un detalle del material original basáltico sin alterar (2Bck) y con inicio de alteración (3Ck).



Figura 1.4 Cultivo de vid en suelo Aridisol (*Argigysid cálcico*). Detalle de piedras de basalto a partir de 30 cm de profundidad (extremos superior derecho y su alteración (extremo inferior derecho))

En la Figura 1.5 se presenta un ambiente árido en Santa Cruz y uno subtropical de Corrientes, y en la Figura 1.6 los suelos de dichos ambientes. Si bien en ambos se reconoce basalto, en el ambiente subtropical dicho material original evoluciona hasta formar suelos muy alterados, comúnmente denominados “viejos”, pertenecientes a los órdenes Ultisol y Oxisol. Por el contrario en la aridez, dicho basalto se presenta muy poco alterado y sobre el mismo se han depositado otros materiales coluviales-aluviales que son lo que constituyen el suelo actual, de allí que se describan discontinuidades litológicas con basalto basal poco alterado, tal como se aprecia en el Entisol de la Figura 1.6, denominados comúnmente suelos “jóvenes”. Igualmente, en el suelo Aridisol comentado precedentemente (Figura 1.4) a partir de los 30 cm se reconoce abundante piedra basáltica sin alterar o poco alterada.



Figura 1.5 Ambiente árido de Santa Cruz con vegetación de estepa (izquierda) y subtropical de Corrientes, con cultivo de yerba mate y té

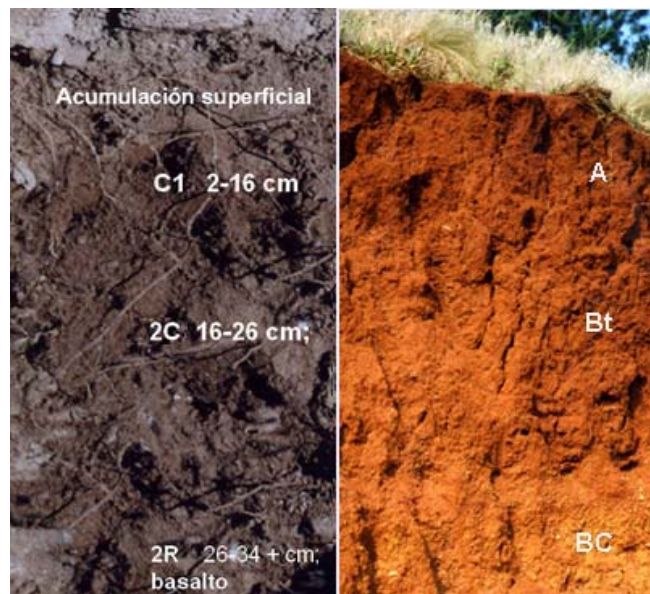


Figura 1.6 Suelos en basaltos: Entisol "joven" con vegetación de estepa en Santa Cruz (izquierda) y Ultisol "viejo" en Corrientes (derecha)

Relieve (geomorfología): La influencia del relieve en la evolución de los suelos se presenta en un ejemplo esquemático en la Figura 1.7 pertenecientes a la Pampa ondulada. En esta figura se muestra una secuencia de suelos desarrollados a partir de loess (edad cuaternaria, Formación bonaerense) (SAGyP-INTA, 1989), en clima templado húmedo, según ocupe posiciones elevadas, medias o bajas del relieve general y consecuentemente, se modifica la forma en que se vincula con el ciclo hidrológico (flujos de agua subterránea). Así, los suelos se presentan en la misma cuenca superficial, pero subsuperficialmente se hayan influenciados por la incidencia de flujos de agua provenientes de otras cuencas (continuidad hidráulica regional), tal como se explicó precedentemente (punto 1.2).

Los suelos de la Figura 1.7 pertenecen todos al orden Molisol, sin embargo, el drenaje y los sistemas de flujos de agua subterránea presentes determinan diferentes tipos de suelo a nivel de Gran grupo, tal como se explica a continuación:

- En la *parte más elevada* (loma) con buen drenaje, el suelo es un **Argiudol típico**, el sitio funciona como zona de recarga de agua de lluvia (flujo descendente) y el régimen de humedad es percolante (údico).
- En *sectores medios*, que podrían ser planos extendidos o medias lomas bajas, la superficie freática asciende en algunas épocas o lo hace en forma parcial por flujos de agua laterales (zonas de tránsito) y/o condiciones de permeabilidad restringida por elevado

contenido de arcillas. El drenaje resulta imperfecto, el régimen de humedad saturado de agua (régimen ácuico) y el suelo **Argiacuol típico**.

- En posiciones *más bajas*, la superficie freática se encuentra próxima al nivel del terreno y el flujo de agua es ascendente (zona de descarga de flujos de agua subterránea), las condiciones son pobremente drenadas, régimen de humedad saturado de agua (régimen ácuico) y el suelo un **Argialbol típico**. Debido a que el agua freática presenta una salinidad y alcalinidad baja, se estima que son flujos locales o intermedios de corto recorrido.

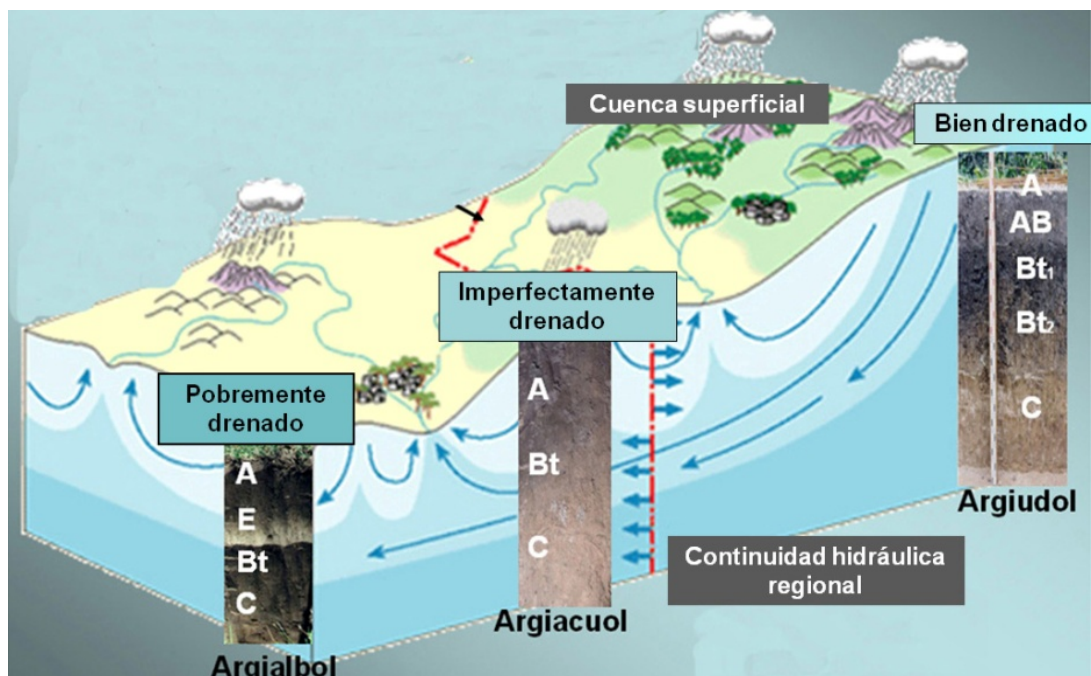


Figura 1.7 Secuencia de suelos a partir de material original loess, clima templado húmedo y diferente drenaje según como inciden los flujos de agua subterránea

Se aprecia entonces en el ejemplo de la Figura 1.7 que para un material original, clima y tiempo transcurrido, el relieve ejerce un marcado efecto en el perfil edáfico, el cual estará condicionado principalmente por la forma en que inciden los flujos de agua subterránea, y sus propiedades químicas. Es de destacar que a un mismo sitio pueden llegar flujos de agua de diferente tipo (local, intermedio o regional, Figura 1.2) y agua de escurrimiento.

En la Figura 1.8, se presenta otro ejemplo de secuencia de perfiles edáficos en un ambiente semejante al de la Figura 1.7 en relación al material original de loess, clima templado húmedo, tiempo transcurrido, pero con condiciones de drenaje más restringidas principalmente en uno de los suelos debido a la incidencia de un agua freática alcalina y salina (flujos de largo recorrido, intermedios o regionales), en el límite de las grandes regiones denominadas Pampa ondulada y Pampa Deprimida. Los suelos que se presentan se explican a continuación:

- En el *sector más alto* la zona es de recarga de agua (flujo descendente), régimen de humedad percolante (údic), moderadamente bien drenado y el suelo **Argiudol vértico**.
- En el *primer ambiente bajo*, la zona es de descarga (flujo ascendente), las condiciones son pobremente drenadas, régimen de humedad saturado de agua (régimen ácuico), el agua freática incidente es de baja salinidad y alcalinidad (flujos locales o intermedios de corto a moderado recorrido), y el suelo desarrollado **Argialbol típico**. Comúnmente se los denomina “bajos dulces”, aunque en profundidad puede aumentar la salinidad-alcalinidad, dependiendo del flujo incidente,
- En el *segundo ambiente bajo*, la zona es de descarga (flujo ascendente), las condiciones son muy pobremente drenadas, régimen de humedad saturado de agua (régimen ácuico), el flujo de agua incidente es de largo recorrido con alta salinidad y alcalinidad, y se desarrolla el suelo **Natracualf típico**, denominado comúnmente “bajo alcalino”.

Para cada uno de los suelos en la Figura 1.8 se presenta un detalle de rasgos morfológicos característicos de cada perfil y que definen sus limitantes principales: en el Argiudol vértico, estructura en prismas, gruesos, fuertes; en el Argialbol típico, estructura masiva con rasgos hidromórficos (moteados y concreciones de Fe y Mn) en horizonte E; y en el Natracualf típico, estructura columnar en el horizonte Bt (ascenso de superficie freática alcalina que se acumula sobre el techo del Bt redondeando las caras de los prismas por acción dispersiva del Na),

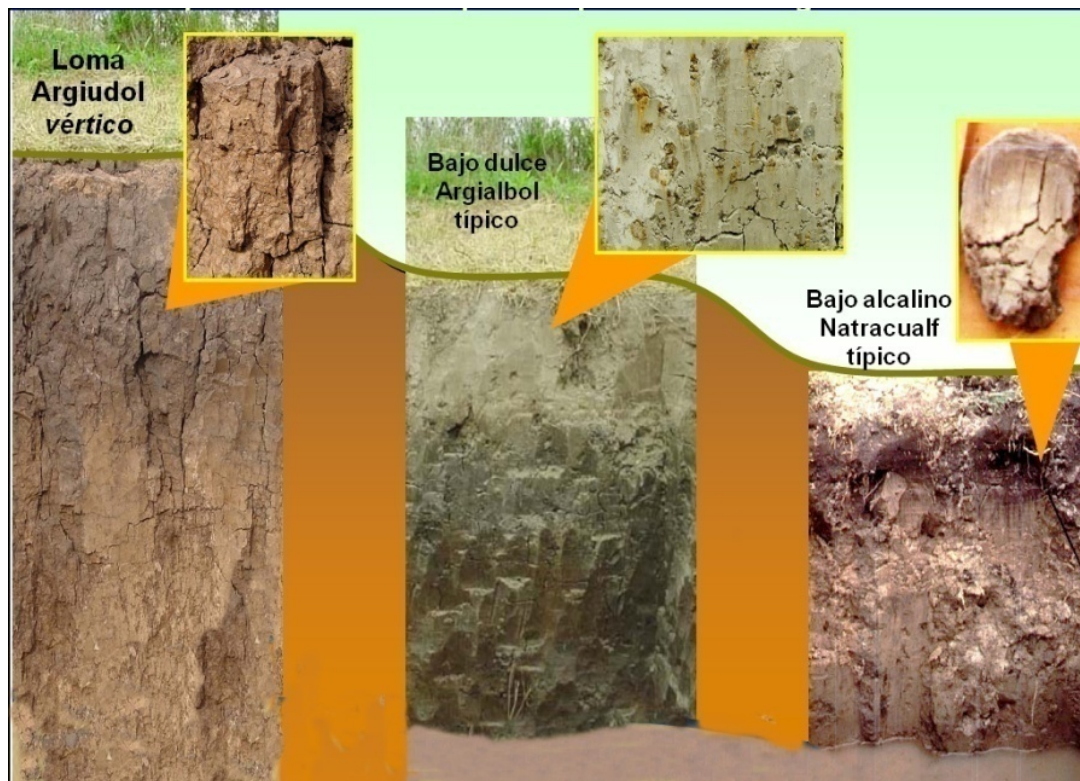


Figura 1.8 Secuencia de suelos, en loma *Argiudol vértico* (detalle de prismas), y en dos bajos, *Argialbol típico* (detalle de estructura masiva con rasgos hidromórficos, moteados y concreciones de Fe y Mn), y *Natracualf típico* (detalle estructura columnar)

De lo observado en Figura 1.7 y 1.8, se aprecia que existen rasgos morfológicos que pueden ser considerados para interpretar el funcionamiento del suelo, siendo *previsibles* si se conoce el resto de factores formadores del suelo y la calidad del agua subterránea incidente o inferirla a partir de la composición catiónica del perfil edáfico. Así en ambos ejemplos, se observan rasgos morfológicos de degradación debido a un elevado hidromorfismo (formación de horizonte E y estructuras columnares) por la presencia de superficies freáticas próximas a la superficie que ascienden por períodos prolongados y adicionalmente, por aguas de escurrimiento. Lo que difiere es el tipo de flujo, en el primer caso de mucha menor salinidad y alcalinidad que en el segundo.

Tiempo: Este factor hace referencia al periodo desde que un material original se deposita y el suelo actual. La evolución del material original varía según su naturaleza y el periodo de tiempo en que los restantes factores inciden. El tiempo puede ser el factor decisivo en las características del suelo si es que el resto de los factores permanece relativamente constante, por ejemplo en ámbitos fluviales. En la Figura 1.9 se presenta el ambiente del *río Oro* en el departamento de Gral. San Martín, provincia de Chaco, y del material sedimentario con muy escaso desarrollo que integra el albardón que rodea a dicho río, y en Figura 1.10 a pocos metros de distancia sobre la planicie del

albardón actualmente desmontada, un suelo de moderado desarrollo, ***Hapludol típico***. Es factible suponer que los materiales originales (sedimentos fluviales) de ambos sitios son semejantes pero han sido depositados en diferentes momentos.



Figura 1.9 Ambiente del Río Oro en provincia de Chaco y material sedimentario con muy escaso desarrollo en el albardón que rodea el río



Figura 1.10 Ambiente de albardón junto al Río Oro, hacia el río (izquierda), planicie desmontada en parte alta del albardón (centro), y suelo en dicha planicie, ***Hapludol típico***

Biota: El desarrollo de organismos vivos, micro-macro flora y fauna, si bien son dependientes del clima, asociado al progreso de la vegetación, y se manifiesta en todas las propiedades asociadas a la materia orgánica edáfica, pueden presentarse algunos ejemplos donde la actividad biótica es muy intensa e imprime rasgos morfológicos que se incluyen en las descripciones de suelos tal como las krotovinas. Estas se forman por el relleno con material orgánico o mineral de otro horizonte por la acción de animales (madrigueras de termitas, nidos de insectos, túneles de lombrices y de animales más grandes) (FAO, 2009).

En la Figura 1.11 se presenta un suelo **Argiudol petrocálcico** en Pampa Serrana con plantación de *Pinus sp.*, se destacan colores muy oscuros en superficie por muy elevado contenido de materia orgánica y actividad biológica, presencia de tosca en profundidad (CaCO_3 origen geológico), y entre ambos sectores formación de krotovina (material de superficie depositado subsuperficialmente por actividad de animales).



Figura 1.11 *Argiudol petrocálcico* en Pampa Serrana con *Pinus sp.* Detalle de suelo con krotovina

En la Figura 1.12 se presenta otro ejemplo de desarrollo de krotovina en un suelo perteneciente al suborden **Rendol** (Orden Molisol) ubicado en la Planicie costera de la localidad de Punta Indio, Buenos Aires (vecina a Planicie continental de la región Pampa Deprimida), desarrollado sobre cordón de conchillas (CaCO_3 de origen biogénico marino). Se observan colores muy oscuros en superficie por elevado contenido de materia orgánica, muy flocculado por Ca, e hidromorfismo por la proximidad de la superficie freática.

Dentro del concepto del Factor Biota, se incluye también al **Hombre**. El hombre incide en el suelo en general en forma negativa, modificando su tipo y uso, y provocando degradaciones tales como:

salinización y alcalinización por la incorporación del riego en ámbitos con superficies freáticas someras, o por deterioro de la estructura con acumulación de agua en el techo de un horizonte poco permeable; erosión; aporte elevado de enmiendas, entre otras tantas acciones que se encuadran en el mencionado concepto de degradación de suelos. Se analiza en punto siguiente.



Figura 1.12 Rendol, formado sobre cordón de conchillas con hidromorfismo.
Detalle de suelo con krotovina (Punta Indio, Buenos Aires)

1.4 Calidad de suelo

La antigua percepción del ambiente a escala local ha sido cambiada en los últimos años considerando a la biósfera como un integrante del “Sistema global”, en cuya durabilidad queda implicada toda la humanidad, consecuentemente el interés particular de una propuesta, sea esta productiva, paisajística u otra, se extiende a la sociedad en su conjunto.

1.4.1 Definiciones, planteamiento del enfoque de estudio propuesto

Diversos términos estrechamente vinculados deben considerarse en este punto: calidad, salud, degradación, contaminación y producción sostenible o sustentable.

Calidad de suelo es la capacidad del suelo para sostener una productividad biológica, funcionando dentro de los límites del ecosistema, manteniendo la calidad del ambiente y

promoviendo la salud de las plantas y animales. La **salud** del suelo hace referencia a mantener su calidad natural (autores en Civeira *et al.*, 2011).

Degradación se define en términos genéricos como una pérdida o modificación de las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo respecto de su *condición natural, su calidad*. Cuando se producen cambios en sus características químicas, físicas o biológicas, que por su naturaleza, dimensión o duración en el tiempo, resulta incompatible con sus propiedades funcionales de uso o suponga una amenaza grave para la salud pública o el medio ambiente se indica que el suelo se encuentra **Contaminado**.

Consecuentemente debe procurarse mantener e incluso mejorar la calidad del suelo a fin de garantizar una **producción sostenible o sustentable**. En esta el manejo del suelo debe ser tal que posibilite obtener el máximo de su función productiva pero también el máximo de sus otras funciones: biosféricas (fertilidad), hidrosféricas (ciclos hidrológicos), atmosféricas (efecto invernadero) y como una geomembrana receptora de flujos de materia, energía e intercambios con otros subsistemas (Porta *et al.*, 1994).

Por lo expuesto, es dable afirmar que la sustentabilidad mencionada es posible si es que se conocen las particularidades del ambiente a intervenir en el contexto regional. Esto que resulta evidente no siempre es considerado al manejar el paisaje por divisiones político-administrativas (países, provincias, localidades) e incluso en el ámbito productivo por establecimiento, potrero, lote, topografía superficial, con consecuencias que hasta incluso se desconocen, y de allí que se continúe en igual sentido.

Es de destacar lo señalado por Pla Sentis (2005, 2011) para América Latina respecto a las políticas de desarrollo y de expansión agrícola de las últimas décadas, que han conducido a la degradación de suelo y agua, afectando cuencas hidrográficas con descenso en la productividad, aumento en el costo de producción, inundaciones, deslizamientos de tierra, sedimentación en embalses y desertificación. Este autor señala que esto tiene su origen en una inadecuada identificación y evaluación de procesos, y de las relaciones causa-efecto, recomendando un enfoque hidrológico al aplicar prácticas de uso y manejo de las tierras. Así, señala que a fin de asegurar la sustentabilidad de tierras deben definirse los procesos hidrológicos involucrados en los procesos de degradación de suelo y agua. Esto es coincidente con lo sucedido en diversas intervenciones realizadas en el país. En punto siguiente se presentan tres ejemplos de degradación en ámbitos diversos desde el punto de vista ambiental, geológico, productivo y socio-económico.

1.4.2 Pérdida de calidad y sustentabilidad. Ejemplos en Pradera Pampeana; Cuenca sedimentaria Chaco-Paranaense (Chaco) y Cuenca del río Chubut (Chubut)

Pradera Pampeana: Esta región involucra diversas regiones con particularidades comunes y marcadamente diferentes. En estas, el manejo sin considerar el paisaje visible y no visible, local y

regional, puede también tener variadas consecuencias. Así, puede no ser tan grave y/o visible en el mediano a corto plazo en ámbitos como la *Pampa Ondulada*, con suelos de alta productividad, superficies freáticas profundas, condiciones climáticas moderadas. Sin embargo pueden resultar muy graves en ámbitos como la *Pampa Arenosa* o *Pampa Deprimida*, que aunque con marcadas diferencias en sus suelos y geomorfología regional, presentan ambas pampas situaciones alternantes de excesos y déficit hídricos, con superficies freáticas someras, con frecuencia salinas y alcalinas (flujos de más largo recorrido).

En diversos ámbitos políticos se plantea actualmente continuar con la construcción de canales para evacuar aguas como principal medida de control de inundaciones, planificando manejar como una unidad hidrológica 17.000Km² de superficie que incluye la Pampa Arenosa, Pampa Deprimida y otras regiones próximas (PMI, Plan Maestro Integral Cuenca del río Salado, 1999). Se destaca que la Cuenca del río Salado para 1977 se consideraba que ocupaba aproximadamente 8.000 Km² (Bellatti *et al.*, 1978) e incluso en fechas previas diversos autores indicaban que era próxima a 6.000 Km². El PMI (1999) hasta la fecha ha ejecutado menos del 10% del total programado. El canal más importante fue iniciado en 1987 y presenta 3 tramos denominados Jaureche, Italia y Mercante, que unen el complejo lagunar Hinojo-Las Tunas en Trenque Lauquen con el río Salado en Bragado, tal como se presenta en la Figura 1.13. En esta se muestra además, el estado de un tramo del canal en una fecha con poca agua, donde el agua que se observa posiblemente provenga de las superficie freática (imagen extremo superior derecho), y en época de excesos hídricos donde el agua ha desbordado a un lado y otro del canal (imagen extremo inferior derecho).

Se destaca también en la Figura 1.13, en la imagen satelital (imagen extremo inferior izquierdo) que dicho canal atraviesa una amplia llanura de pendiente regional suave de 0.25 ‰ caracterizada por la presencia de médanos longitudinales (depósitos eólicos, arena y limo, paralelos a sub-paralelos N-SO, transversales a la pendiente regional, NO a SE), de aproximadamente 100 km de longitud por 5-6 km de ancho y 6 m de altura. Entre sí dejan depresiones intermedanasas de aproximadamente 0,5-5 km de ancho, que en la imagen se aprecia cubierta con agua. En conjunto se reconoce un avenamiento natural endorreico y arreico, con escaso a nulo escurrimiento y con la presencia de 20.000 ha de cuerpos de agua permanentes en cubetas de deflación (Dillon *et al.*, 1985; Dangavs, 2005). En capítulo 2 (punto 2.2.5) se presenta una secuencia de suelos representativa de esta región en la localidad de Trenque Lauquen (noroeste bonaerense, Pampa Arenosa).

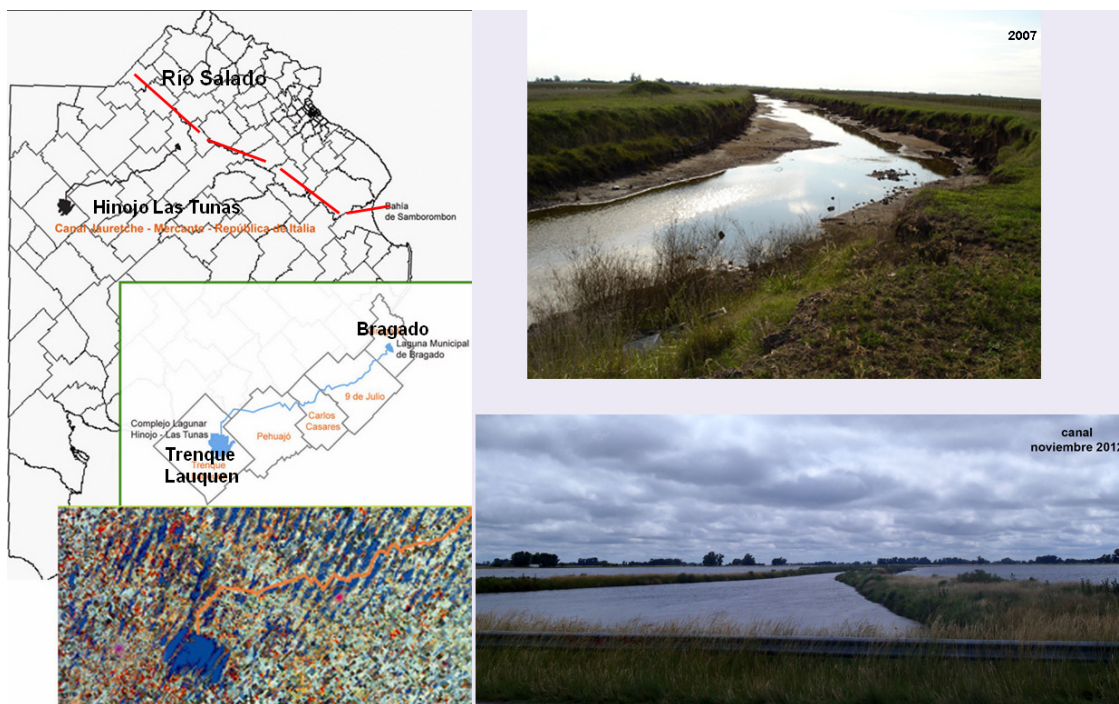


Figura 1.13 Canal entre complejo lagunar Hinojo-Las Tunas (Trenque Lauquen) y río Salado en Bragado. Canal en mapa físico y sobre imagen satelital (izquierda). Vista de canales en época seca (extremo superior derecho) y en época de crecida (extremo inferior derecho)

En el caso que aquí se presenta, se pone en evidencia que si bien puedan ser necesarias canalizaciones estas no son suficientes ni tendientes a abordar el problema de excesos y déficit hídricos característicos de la región. Así, no se considera el paisaje (condiciones naturales y antrópicas), y se soslaya la importancia menos dramática aunque más frecuente y perjudicial en términos ambientales de las prolongadas sequías, tal como señalaban Ameghino (1884), Bellatti *et al.* (1994), Plan CODESA (1984), UNLP (2003), planteándose los excesos hídricos sólo asociados a precipitaciones excepcionales, sin considerar aportes de aguas de otras regiones (Alconada *et al.*, 2011) y acciones antrópicas (UNLP, 2003).

Cuenca sedimentaria Chaco-Paranaense: Esta cuenca es la más grande del país, con sedimentos de diferentes edades (cuaternario, terciarios, trifásico y permocarboníferos) y tipos (alternan arcillas, limos y arenas con algunas intercalaciones de conglomerados) de varios cientos de metros de espesor, a la cual le siguen capas también de gran espesor, más coherentes y duras que se asentarían sobre un basamento cristalino de bloques con fracturas movimientos

diferenciales (Villa Uria, 1972). Los ecosistemas de estas regiones son frágiles, tal como ha sido ampliamente documentado para las zonas de desmonte por Morello y Rodríguez (2009) y Laterra *et al.* (2011). Estos autores señalan para la llanura chaco-pampeana cambios en el régimen hídrico de los suelos, con elevación de la superficie freática y salinización asociada, alterando relaciones sustentables entre los servicios hídricos de los ecosistemas (provisión de agua y regulación hidrológica) con la producción agropecuaria.

En la Figura 1.14 y Figura 1.15 se presenta un ejemplo de degradación edáfica por el reemplazo del monte chaqueño por cultivos en el Dpto. Gral. San Martín, provincia de Chaco. Esta región se caracteriza por un relieve general de lomas (albardones que rodean ríos), interrumpidas por depresiones, ocupadas por esteros, cañadas, lagunas, con escurrimiento lento, en las cuales los excesos hídricos se mueven lentamente en forma de manto y erosionan hasta formar cárcavas poco profundas. Los suelos han sido estudiados hasta aproximadamente 1,5 m, y si bien se indica en general problemas de hidromorfismo profundo (Ledesma y Zurita, 1988), no se vincula esto con la hidrogeología regional que en última instancia es lo que conlleva a las degradaciones mencionadas en relación a la salinidad-alcalinidad en los albardones que rodean los ríos.

En la Figura 1.14 se muestra un ambiente de albardón degradado, se aprecia monte que rodea al río y planicie desmontada donde hubo cultivos (izquierda superior), sobre suelo ***Endoacuíol típico*** (derecha) con bajo contenido de materia orgánica, baja estabilidad estructural, pérdida de estructura y encostramiento superficial (izquierda inferior).

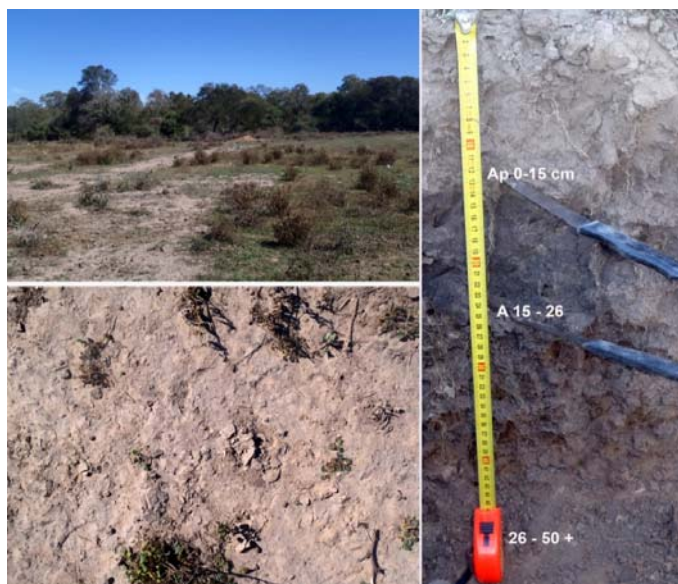


Figura 1.14 Ambiente de albardón degradado, monte que rodea al río y planicie desmontada donde hubo cultivos (izquierda superior). Suelo ***Endoacuíol típico*** (derecha), con escasa materia orgánica, pérdida de estructura y encostramiento superficial (izquierda inferior)

En la **Figura 1.15** se muestra una vista del monte nativo sobre albardón que rodea el *río Oro* en Gral. San Martín, Chaco, y dos sitios con diferentes grado de degradación luego del desmonte. En imagen superior izquierda, pastizal degradado con surcos de erosión, muy pisoteado por animales, y alta proporción de malezas sin valor forrajero. En imagen inferior izquierda, luego de cierto tiempo de recuperación con un renoval de monte.



Figura 1.15 Monte natural bordeando el río Oro (izquierda), pastizal degradado (superior derecha) y renoval de monte (inferior derecha)

Cuenca del río Chubut: El *río Chubut*, nace en la provincia de Río Negro, atraviesa la provincia de Chubut de oeste a este hasta desembocar en el océano Atlántico. Los suelos se distribuyen en patrones complejos que incluyen suelos con variada aptitud de uso, con importantes limitantes. Los suelos de la Cuenca Alta y Media, tienen como principales restricciones de uso las siguientes: hidromorfismo (superficies freáticas próximas), salinidad y alcalinidad (calidad de agua freática y materiales originales), erosión hídrica y eólica.

En la Figura 1.16 se presenta un ejemplo de degradación de un valle sistematizado para riego en un tramo de la *Cuenca Alta del río Chubut* en el sector donde confluye con el *río Gualjaina*. Se observa la planicie con canales de riego donde alternan sectores salinos, alcalinos, vegetación rala de pelo de chancho, matas de *Stipa sp* “corión” e hidromorfismo. Se destacan que en algunos sectores se reconocen áreas de mallines o mallinosas con la superficie freática a poca profundidad

que al regar se eleva y saliniza el suelo. Es frecuente que en estas zonas, las aguas subterráneas poco profundas sean salinas (descargas de flujos lejanos no siempre asociados a la calidad de agua del río).

En la Figura 1.17 se presenta un sector de la Figura 1.16 en el río Gualjaina, donde se observa, el área del río bordeado de árboles y luego hacia la estepa pedregosa, que alteran sectores salinos-alcalinos, salinos e hidromórficos. En las 2 fotografías inferiores de dicha figura (Figura 1.17) se muestran dos sectores con mayor detalle donde se observa: vegetación muy rala con pelo de chancho, matas de coirón, sales en superficie, y suelo desnudo, que alternan con otros sitios con diferente grado de hidromorfismo. Este ambiente se asemeja a las clásicas áreas mallinosas características de los Valles patagónicos donde el riego no resulta en general una práctica adecuada realizado conforme se implementa (riego por inundación o surco).



Figura 1.16 Río Gualjaina, Cuenca Alta del río Chubut, manchones hidromórficos y salinos, áreas de mallines naturales degradadas por la implementación del riego (imagen Google)

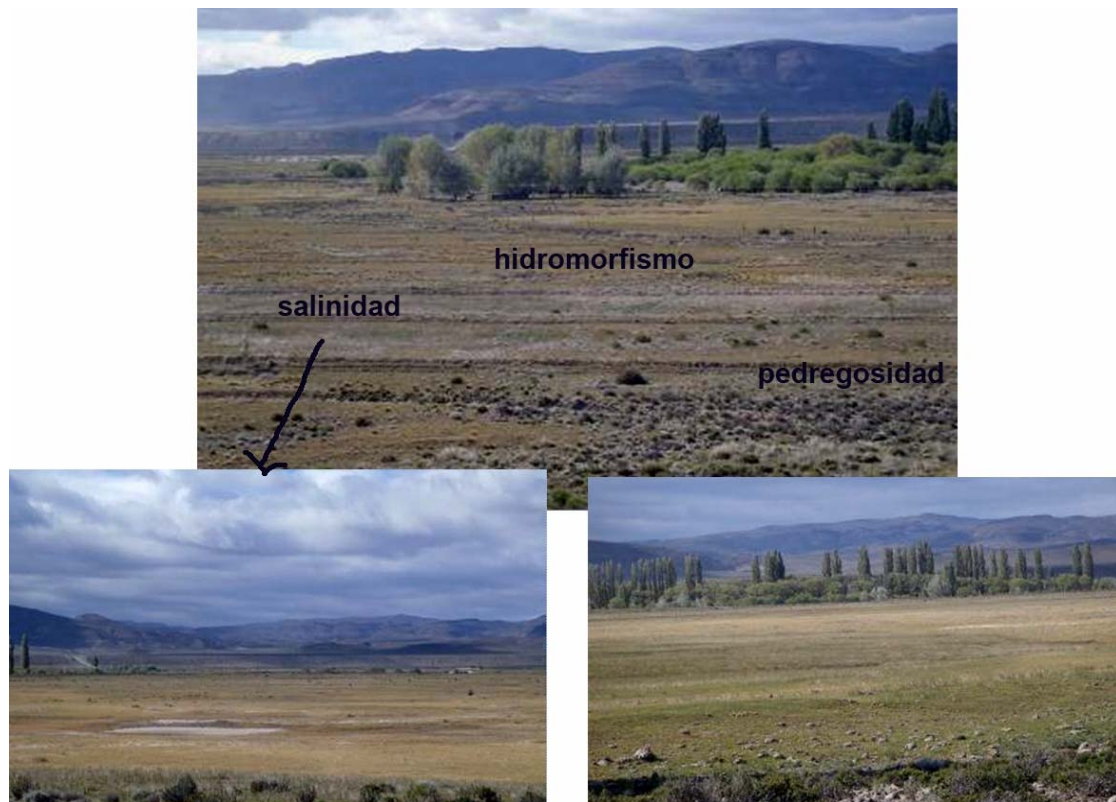


Figura 1.17 Río Gualjaira, Cuenca Alta río Chubut, manchones hidromórficos y salinos, áreas de mallines naturales degradados por riego

En la Figura 1.18 y 1.19 se presentan otros ejemplos de degradación en la región Costa del Chubut, también en la Cuenca Alta del río Chubut. En Figura 1.18, se muestra la degradación por salinización debida al riego por canales e inundación en platabandas. Los sectores blancos en la imagen satelital (extremo superior izquierda) son ámbitos salinizados tal como se presentan en las imágenes tomadas en otros sitios (extremo superior derecha, e imágenes inferiores). En Figura 1.19 se muestra también el sistema de riego con sectores salinizados y encharcados.

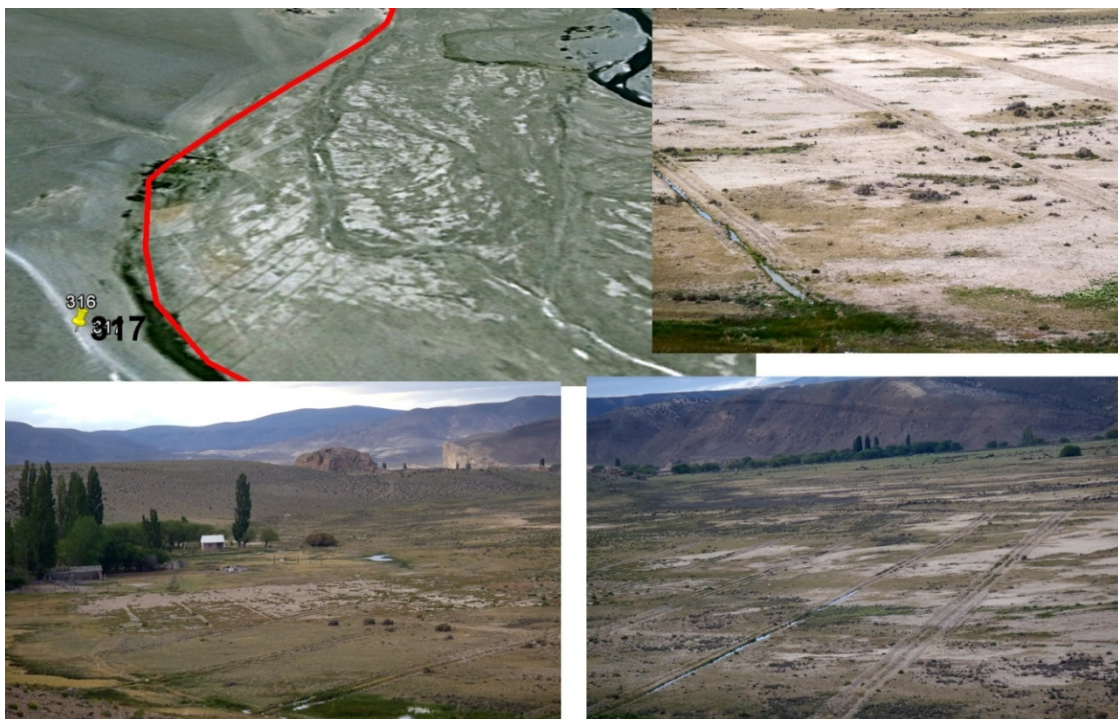


Figura 1.18 Ambiente degradado por riego en Costa del Chubut, Cuenca Alta del río Chubut



Figura 1.19 Ambiente degradado por riego, encharcamiento, salinización, en Cuenca Alta del río Chubut

De lo aquí presentado, se aprecia la necesidad de realizar enfoques integrales y transdisciplinarios en el manejo del suelo y del agua, y como indica Pla Sentis (2005) definir la aptitud de uso y manejo del suelo con un enfoque hidrológico, estableciendo “causa-efecto” de los procesos que suceden por la intervención del hombre.

Bibliografía

- Auge, M. (2004). Regiones hidrogeológicas de la República Argentina. Provincias de, Buenos Aires, Mendoza, Santa Fe. UBA - CONICET. 112 p.
<http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/RegionesHidrogeol.pdf> auge@gl.fcen.uba.ar
- Aula Virtual Edafología, Facultad Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP.
<http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/course/view.php?id=21>
- Alconada MM, A Bussoni, R Rosa, JJ Carrillo Rivera, (2009). El bio-drenaje para el control del exceso hídrico en Pampa Arenosa, Buenos Aires, Argentina. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM (México). 68: 50-72.
- Alconada Magliano, MM; JR Fagundo-Castillo; JJ Carrillo-Rivera; PG Hernández. (2011). Origin of flooding water through hydrogeochemical identification, the Buenos Aires plain, Argentina, Environmental Earth Sciences. V 64 (1): 57-71.
- Alconada, MM; F Damiano, y JR Fagundo. (2014). El suelo en el funcionamiento hidrológico y manejo agropecuario-forestal. XX Congreso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo. Cusco – Perú.
- Alconada, M. (2015). Suelos Salinos y Sódicos. Aula Virtual Edafología, FCAYF. UNLP.
<http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/course/view.php?id=21>
- Ameghino, F. (1884). Las secas y las inundaciones en la provincia de Buenos Aires. 5ª Edición, Ministerio de Asuntos Agrarios de pcia Bs As. 62 p.
- Bellatti, JL, JE Barbagallo y LA Sabella. (1978). Recuperación de áreas deprimidas inundables mediante el ordenamiento y manejo racional del recurso hídrico en cuencas organizadas o módulos. Rev. IDIA 367-372: 94 -115.
- Benassi, AH. (2015). Ciudad botánica –Oasis del desierto urbano- Naturación de ciudades y hábitat Procesos-Modelos-Estrategias-Herramientas-Paisajística. H. Cámara Diputados de la Nación Argentina. Impreso Congreso de la Nación. Buenos Aires.
- Carrillo-Rivera, JJ. (2000). Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins. Hydrogeology Journal. V 8 (5): 503-520.
- Civeira, G; I Paladino; J. Irigoin. (2011). Indicadores de calidad de suelos en distintas series de la región pampeana.<http://inta.gob.ar/documentos/indicadores-de-calidad-de-suelos-en-distintas-series-de-la-region-pampeana/>
- Dillon, AA, M Hurtado, J Giménez y RJ Castillo. (1985). Consideraciones geomorfológicos y estratigráficas como base del carteo de suelos de un sector de la Pampa Arenosa (Pcia. Buenos Aires). Actas Primeras Jornadas Geológicas Bonaerense, Tandil: 737-749.
- Dangavs, N. (2005). Los ambientes acuáticos de la provincia de Buenos Aires. XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata. Capítulo XIII: 219-236.

- Engelen, GB y GP Jones. (1986). Developments in the analysis of groundwater flow systems. IAHS publication No163: 67-106
- Darronsoro, C. (2003). Edafología, Universidad de Granada. España
<http://edafologia.ugr.es>
- Fagundo, JR. (1990). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. Efecto de los factores geológicos, hidrogeológicos y ambientales. Hidrogeología (Granada). V5: 33-46.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Cuarta edición Traducido y adaptado al castellano por Ronald Vargas Rojas. 111 p. <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
- Heuperman A. (2003). Bio-drainage; a situation analysis. Institute of Sustainable Irrigated Agriculture (ISIA) at Tatura, Australia, for the International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage (IPTRID).
www.wcaifonet.org/cds_upload/1058154421850_BIO_DRAINAGE.pdf.
- Irisarri, J. (2013). Geografía de suelos para reconocedores. Guía de Campo. Curso Posgrado. Universidad Nacional del Comahue. Tirada reducida.
- Lanfranco, JW, AE Pellegrini, V Cattani. (2013). Libros de Cátedra "Contenidos de Edafología génesis, evolución y propiedades físico químicas del suelo". Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Edulp
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/37325/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Latterra, P, EG Jobbágy, y JM Paruelo. (2011). Valoración de servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Ediciones INTA. 740p.
<http://www.iai.int/files/LatterraJobbagyParueloValorEcosyst.pdf>
- Ledesma, LL y JJ Zurita. (1988). Los Suelos del Departamento Gral San Martín, Chaco. Carta de suelos de la República Argentina, 1:50.000. Tomo I, texto 477 páginas. Tomo II, mapas. Ed. INTA.
- Morello, JH y AF. Rodríguez. (2009). El Chaco sin bosques: la Pampa o el desierto del futuro. Orientación Gráfica Editora. 432 p.
- Plan CODESA. (1984). Comisión para el Desarrollo de la Zona Deprimida del Salado. Caracterización y Propuesta de Desarrollo. Subsecretaría Programación y Desarrollo, Ministerio Economía, Pcia Buenos Aires. 42 p.
- Pla Sentís, I. (2005). Evaluación de Parámetros y Procesos Hidrológicos en el Suelo. París, Documentos técnicos en Hidrología 71. Programa Hidrológico Internacional, UNESCO. En Deyanira-Lobo, L., D. Gabriels y G. Soto (Editores).
- Pla Sentís, I. (2011). Evaluación y modelización hidrológica para el diagnóstico de desastres naturales. Universidad Nacional de Colombia. Gestión y Ambiente, V 14 (3): 7-22.
- PMI, Plan Maestro Integral Cuenca del Río Salado. (1999). Ministerio de Economía de la Provincia de Buenos Aires-Halcrow-Banco Mundial. Volumen principal y 14 Anexos en CD. 1300 p. Tirada reducida.
- Porta, J, M López Acevedo, y C Roquero. (1994). Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ed. Mundi Prensa. 807 p.

- Soil Survey Staff. (2010). Claves para la Taxonomía de suelos. Departamento de Agricultura de USA, Servicio de Conservación de Recursos Naturales. USDA. Décima Edición. Traducción CA Ortiz Solorio, MC Gutiérrez Castorena y EV. Gutiérrez Castorena. 374 p.
http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- Tomar, OS. (2007). Bio-drainage: Performance of Various Tree Species as Effective Bio-drain Material: 213-221. En: Ambast, S.K., Gupta, S.K. and Singh, Gurbachan. Agricultural Land Drainage: Reclamation of Waterlogged Saline Lands. Central Soil Salinity Research Institute, Karnal, India. 231 p.
- Tóth, J. (1995). Hydraulic continuity in large sedimentary basins. Hydrogeology Journal. V3 (4):4-16.
- Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas procesos y manifestaciones. Boletín Geológico y Minero, Instituto Tecnológico GeoMinero de España. V 111: 49-26.
- SAGyP-INTA, Secretaria de Agricultura, Ganadería y Pesca - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (1989). Mapa de suelos, Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. 525 p.
- UNLP, Universidad Nacional de La Plata. (2003). Inundaciones en la región pampeana. Editores O Maiola, N Gabellone, y M Hernández. Ed. Universidad Nacional La Plata, Argentina. 266 p.
- Villa Uria, CG. (1972). Estudio Integral de la Cuenca del río Oro. MOSP, Subsecretaria de Recursos hídricos. Gobierno de Chaco, Subsecretaria Obras Públicas. Informe Tomo I. 292 p.

CAPÍTULO 2

Conceptos generales de la fertilidad edáfica

Margarita M. Alconada Magliano

Los parámetros que definen la fertilidad edáfica (dotación y abastecimiento), se estudian considerando el paisaje y los sistemas de flujo de agua subterránea como elemento integrador del mismo. En parte 2 del presente libro, se analiza en detalle el abastecimiento e interpretaciones integrales del suelo a fin de lograr intervenciones exitosas en el objetivo buscado.

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO,
ANDREA PELLEGRINI, SUELO EN EL PAISAJE

2.1 Suelo y conceptos vinculados a la fertilidad

Previo a definir los parámetros principales de la fertilidad: *dotación* y *abastecimiento*, se presenta una revisión de conceptos relativos a la fertilidad presentados en detalle en la primer parte del curso de Edafología. Se pretende que el suelo sea comprendido como un sistema dinámico, abierto, donde los factores que lo originaron e inciden en la actualidad, determinen las posibilidades de intervención y sus alcances.

Suelo: El concepto de suelo es muy variado, dependiendo de la finalidad de estudio y uso. Para algunos autores, una arena de desierto, una roca desnuda, pueden ser considerados suelo, para otros, solo cuando el mismo se constituye en un medio para el desarrollo de las plantas. En este último caso, se definen potencialidades y limitantes quedando estas definidas por las características morfológicas y analíticas del suelo en estudio, siendo necesario además, analizar el origen de dichas características, ya que las mismas son la manifestación de uno o varios procesos que interactúan. Por ejemplo, puede suceder que dichas propiedades se deban a: i) condiciones pasadas o presentes; ii) derivan de una posición en el paisaje local o regional; iii) a condiciones naturales o antrópicas.

Lo señalado se corresponde con el criterio de definir al suelo como un “*cuerpo natural con propiedades distintivas, repetitivas y previsibles*” (Porta *et al.*, 1994). Esto es, si se combinan los factores formadores de una manera dada, se prevén determinadas características en el suelo, es decir “*previsible*”, y estas pueden “*repetirse*” si es que dichos factores se combinan en forma análoga.

Puede también definirse al suelo por sus funciones como un “*cuerpo natural tridimensional, integrante de un ecosistema con aplicaciones agronómicas, ecológicas, ambientales, en la arquitectura del paisaje u otras*” (Porta *et al.*, 1994). Esta última definición se vincula a los conceptos desarrollados en Capítulo I sobre calidad, salud, degradación y producción sostenida. Se requiere entonces promover intervenciones en relación a su uso y manejo de modo de que sean compatibles con el origen de las restricciones detectadas (si las hubiera) o que efectivamente el suelo podrá cumplir con las funciones requeridas en cada caso particular, manteniendo su calidad, y si además, las intervenciones perdurarán en el tiempo.

Perfil de un suelo: Se define como un corte vertical del terreno que permite estudiar el suelo en su conjunto desde su superficie hasta el material original. Se estudia efectuando un pozo de observación o calicata, cuya profundidad depende de la naturaleza del suelo, pero que en general puede ser de 1 a 2 m de profundidad (en volumen no menos de 1-1,5 m³). Normalmente se busca llegar hasta el material original o menos alterado y semejante al material original (horizonte C), escasamente explorado por las raíces o hasta alguna impedancia mecánica tal como tosca, piedra, agua freática. Porta *et al.* (1994) señalan que el límite inferior del suelo es la profundidad a partir de la cual las características son constantes con independencia de la distancia a la superficie, o presentan secuencia de carácter estratigráfico.

En el perfil edáfico se reconoce una sucesión de capas/horizontes que en conjunto definen el comportamiento del suelo en relación con la planta, y que se vinculan principalmente con la hidrología (agua superficial y subterránea), y con el ambiente en general. La **capa** es un material original sin evolución, por ejemplo depósitos recientes denominados aluvios en cursos de agua o coluvios en zonas montañosas. En los **horizontes** se reconocen procesos formadores que determinan propiedades morfológicas y analíticas, que resultan de la acción de los factores formadores (principalmente el agua y el tiempo).

De las definiciones precedentes sobre el suelo, es dable afirmar que *el estudio individual de un perfil* en sus primeros horizontes y solo en algunas de sus propiedades, *resulta insuficiente*.

Profundidad efectiva: Queda definida por la presencia de capas u horizontes subsuperficiales que restringen el normal desarrollo de raíces o el crecimiento del cultivo. Se destacan como capas u horizontes que determinan la profundidad efectiva del suelo las siguientes: fragipán, duripán, petrocálcico, pretrogípsico, plintita, contacto lítico, elevado contenido de arcilla (claypan), salinidad, alcalinidad, superficie freáticas cercanas. El reconocimiento a campo de estas capas puede efectuarse consultando Porta *et al.* (1994), Etchevehere (1976); Soil Survey Staff (2010).

Productividad de un suelo: Es la capacidad del mismo para producir *una planta específica bajo un determinado sistema de manejo*, y queda definida por características del suelo, subsuelo, agua subterránea, clima y manejo.

Ningún suelo puede producir todos los cultivos con igual éxito, ni puede un solo sistema de manejo provocar los mismos efectos sobre todos los suelos. Un suelo que naturalmente es improductivo o de baja productividad, puede llegar a ser productivo aplicando tecnología adecuada: riego tecnificado, fertilización, drenaje, etc. Por lo tanto la productividad va asociada a todos los factores que influyen en el crecimiento vegetal, potencialidades y limitaciones. El factor más limitante, determina el nivel de producción.

Consecuentemente, un *suelo productivo* es aquel donde las condiciones físicas, químicas y biológicas son favorables para la *producción económica de los cultivos en un área dada*.

Si bien la productividad se encuentra vinculada al concepto de calidad, salud y degradación edáfica, se diferencia en que la productividad involucra la decisión de alcanzar un resultado para un sistema definido. Se destaca que el rendimiento del cultivo está regulado por 4 factores principales que interactúan entre sí: i) *características y potencial genético vegetal*, ii) *características del suelo*, iii) *condiciones climáticas durante el crecimiento-desarrollo* y iv) *manejo al suelo y cultivo*.

2.2 Dotación y abastecimiento

La fertilidad de un suelo está definida por 2 parámetros principales, **dotación** (propiedades químicas) **y abastecimiento** (propiedades físicas y físico-químicas). Estos parámetros se encuentran estrechamente vinculados y si bien, cada uno debe ser analizado en forma individual, resulta imprescindible además, establecer sus relaciones en el paisaje ya que en general dichas relaciones son las que posibilitan la productividad para un sitio y cultivo dado.

Dotación: Es la cantidad de nutriente que podría ser tomado por los cultivos en el corto, mediano y largo plazo. Es definido por tres factores: *Intensidad - Capacidad - Renovación*.

Se mide por algún procedimiento estandarizado de laboratorio que con frecuencia resultan de los estudios de correlación y calibración (Havlin *et al.*, 1999), donde se establece que método representa más adecuadamente lo que la planta toma del medio. Cada método extrae una fracción del elemento, dependiendo del objetivo se utilizan diferentes extractantes (agua, ácidos, álcalis, entre otros).

Intensidad: Es la cantidad de nutriente disponible en el corto plazo.

Puede ser de 2 tipos:

- *Intensidad absoluta*, es la cantidad del nutriente en el suelo medido por algún procedimiento de laboratorio que solo extrae lo que es fácilmente tomado por la planta. Por ejemplo, valor absoluto de algún elemento soluble (NO_3^- , HPO_4^- ppm, mg/l)
- *Intensidad relativa*, es la cantidad de un nutriente con respecto a otro. Se destacan las siguientes relaciones: N/P; Ca/Mg; K/P, K/Ca, con valores de referencia para los cultivos en general. No obstante algunas relaciones son específicas o adquieren particular importancia en determinados cultivos. Así por ejemplo, se destaca la relación K/N en cultivo de tomate, la misma aumenta hacia la etapa reproductiva y se asocia a calidad del fruto (Nuez Viñals, 1999). En general en cultivos intensivos las relaciones nutritivas adquieren particular importancia (Cadahia López, 1998).

Capacidad: Es la reserva del nutriente en el suelo que puede estar disponible para la planta en el mediano a largo plazo. Por ejemplo, el elemento contenido en fracciones poco solubles de la materia orgánica o formando sales precipitados o en minerales.

Renovación: Es el proceso mediante el cual el factor capacidad se transforma en el factor intensidad. Si bien varía con el elemento, en general se asocia a las condiciones que promuevan la mineralización de la materia orgánica, solubilización de precipitadas, sales, y meteorización de minerales.

A continuación se presenta a modo de ejemplo estos factores en el nutriente Nitrógeno:

- *Intensidad:* cantidad de **nitratos** (NO_3^-) inmediatamente disponibles para la planta.
- *Capacidad:* cantidad de **nitrógeno total** (Nt) medido por Kjeldahl.
- *Renovación:* proceso de mineralización de la materia orgánica que contiene el Nt, este luego se transforma en NO_3^- . Todas estas etapas son realizadas por microorganismos que dependen de factores ambientales tales como temperatura, humedad, aireación, entre otros factores, que están asociados a las condiciones de abastecimiento. Así, puede ser que exista un alto contenido de materia orgánica pero un bajo contenido de NO_3^- *inmediatamente disponible* para las plantas.

Abastecimiento: Condiciones del medio que posibilitan que un determinado nivel de nutriente medido en laboratorio, efectivamente esté disponible para las plantas. Las propiedades del suelo que definen el abastecimiento son las que garantizan que ocurran los procesos responsables de la transformación de las reservas del nutriente a formas asimilables por las plantas (ejemplo materia orgánica a Nt a NH_4^+ a NO_3^- , en cada etapa participan bacterias con condiciones definidas de desarrollo).

Las principales propiedades que determinan al abastecimiento son:

pH, salinidad, alcalinidad, drenaje

En términos generales puede indicarse que representan aquellas propiedades que condicionan la solubilidad de nutrientes, movimiento del agua y aire para la vegetación y biología edáfica.

Cabe destacar lo señalado por Baver *et al.*, (1972) respecto a que no obstante con frecuencia y *erróneamente las propiedades químicas* han sido concebidas como las más íntimamente asociadas a la producción, es la *estructura* (propiedades físicas) la clave de la productividad del suelo.

2.2.1 Propiedades Químicas que definen la Dotación

Respecto a la Dotación se debe considerar y distinguir entre: **Elementos** esenciales, benéficos y tóxicos para las plantas; **Medio** a partir del cual los elementos son tomados por las plantas: suelo, agua o aire; **Forma** en que dichos elementos son absorbidos y movilizados en el suelo y dentro de la planta; **Interacciones** iónicas, sinergismos, antagonismos, inhibición competitiva y no competitiva, electroneutralidad en la relación suelo-planta; y **Biodisponibilidad** (elemento, suelo, planta). Aspectos que se analizan a continuación:

2.2.1.1 Elementos esenciales, benéficos y tóxicos para las plantas

- a) Elementos esenciales: Son aquellos elementos sin los cuales la planta no puede completar su ciclo de vida, la función que cumplen no puede ser realizada por otro elemento y participan directamente en el metabolismo (Arnon y Stout, 1939 en Domínguez Vivancos, 1989).

Para la mayoría de los cultivos, de los 60 elementos químicos constituyentes en general se mencionan *esenciales* 16 que se dividen en **macronutrientes** (C-H-O-N-P-K-Ca-Mg-S, requeridos en grandes cantidades), y **micronutrientes** u oligoelementos (Fe-Mn-B-Mo-Cu-Zn-Cl, requeridos en pequeñas cantidades). El 96% de la materia seca de los tejidos vegetales están compuestos por C, H y O, representando los restantes elementos aproximadamente el 4% de dicha materia seca vegetal (Havlin *et al.*, 1999). No obstante, más recientemente Ortega y Malavolta (2012) citando diversas fuentes *incorporan como esenciales a 3 elementos (Co, Ni y Se)*, quedando así, un total de **19 elementos esenciales**, 9 macronutrientes y 10 micronutrientes.

Los micronutrientes esenciales **Zn, Cu, Fe, Mn, B y Mo** son los más estudiados por su relación con el crecimiento, desarrollo e incidencia sobre el rendimiento de los cultivos (Loué, 1988). Respecto al **Cl**, se destacan estudios realizados en el país en cultivo de trigo (Díaz Zorita *et al.*, 2004, García, 2008a).

- b) *Elementos benéficos*: Ortega y Malavolta (2012) los definen como aquellos que si bien no son imprescindibles para el crecimiento y desarrollo vegetal, aumentan el crecimiento y la producción o la tolerancia a condiciones desfavorables del medio (clima, plagas, enfermedades, presencia de compuestos tóxicos). Se destacan dentro de estos principalmente al **Na** y **Si**, si bien indican que el Na puede resultar esencial para especies halófitas e incluso plantas de metabolismo C4.

En otras fuentes bibliográficas, algunos de los elementos mencionados e incluso otros adicionales, son mencionados como esenciales y/o benéficos (necesarios o útiles), dependiendo del criterio que se adopte para definir “esencialidad”. Así, Ratto (2005) señala la importancia de elementos tales como **Ni, Cr, Co, V, Si, F y I** en algunas plantas, pero destaca que no serían esenciales ya que no lo son para todas las plantas. Domínguez Vivancos (1989) considera definir como esenciales al **Na, Si y Co** aunque lo sean para pocas especies. Esto es coincidente con Havlin *et al.* (1999) quienes consideran esenciales para algunas especies al **Na, Si, Co**, e incluyen al **Se, Ni y V**. Otros autores los señalan como *benéficos* para algunas plantas al **Na, Si, Co, I, V, Se**, incluyendo además **Al y Ti**.

Otro criterio a considerar en relación a los elementos esenciales y benéficos ha sido el presentado por Mengel y Kirby (2000) quienes agrupan a dichos elementos en base a un *criterio estructural* y por sus *funciones bioquímicas o biológicas*:

- Elementos formadores de compuestos orgánicos, en formas generalmente reducidas (excepción H) y unidos de manera covalente: **N, S, C, H, O**.
- Elementos relacionados con la conservación de energía y/o compuestos estructurales existentes en forma de oxianiones: **P, B, Si**.
- Elementos presentes en forma iónica como reguladores osmóticos y/o funciones más específicas en sistemas enzimáticos, generalmente en forma de complejos metal-proteína: **K, Na, Mg, Ca, Mn, Cl**.
- Elementos involucrados en reacciones redox de transferencia de electrones, existentes como quelatos o metal-enzimas: **Fe, Cu, Zn, Mo, Ni** (algunas especies).

- c) Elementos tóxicos: Algunos de los elementos mencionados, junto a otros que no reportan beneficios en las plantas, son considerados elementos trazas potencialmente tóxicos, debido a que pueden superar estándares internacionales relativos a la contaminación y/o provocar una disminución de crecimiento hasta muerte de plantas aún en pequeñas concentraciones.

Ortega y Malavolta (2012) si bien señalan que todo elemento en exceso resulta potencialmente tóxico (desde menor crecimiento hasta senectud) destacan como **tóxicos al Al, Pb, Cr, Cd, Hg**, Malavolta (1987) y Malavolta (1994) describe abonos y enmiendas inorgánicas, indicando el posible aporte de elementos contaminantes dependiendo de su tipo, origen, procesamiento, dosis, suelo y cultivo. La movilización y absorción por los cultivos depende principalmente del suelo (capacidad reguladora, CIC) y del órgano que se cosecha. En áreas periurbanas se han detectado elevadas concentraciones de **Pb, Cd, Zn, Cr y Cu** en el suelo, atribuible a actividades humanas, no encontrando presencia de dichos elementos en cultivos de grano (Lavado *et al.*, 1999; Lavado y Porcelli, 2000).

En *síntesis*, en *macronutrientes* es aceptado un total de 9 *nutrientes esenciales*, mientras que en *micronutrientes* (pequeñas cantidades a trazas) la bibliografía indica entre 7 y 17 elementos, que si bien no son todos estrictamente esenciales, dado que la presencia de un elemento y su efecto benéfico no completa el criterio de esencialidad, permite afirmar que en algunos cultivos es factible considerarlos por su efecto favorable en el rendimiento o calidad de lo producido.

En la Tabla 2.1 se presenta un resumen de los nutrientes mencionados como *esenciales* (Nº1 a 19; Nº17 a 19 no todas las fuentes) y/o *benéficos* para algunos cultivos (Nº 20 a 22), Otras fuentes también indican como benéficos para algunas especies a los elementos Nº 23 a 27. En dicha tabla se indica también, el medio del cual la planta extrae los elementos mencionados.

	Macronutrientes		Micronutrientes		
	Necesarios todas las plantas (esenciales)			Necesarios por algunas plantas	
	1- C	4- N ^{*1}	10- Fe	20- Na	23- I
	2- H	5- P	11- Mn	21- Si	24- F
	3- O	6- K	12- B	22- V	25- Cr
		7- Ca	13- Mo		26- Al
		8- Mg	14- Cu		27- Ti
		9- S ^{*2}	15- Zn		
			16- Cl		
			17- Co		
			18- Ni		
			19- Se ^{*3}		
Extraído	CO ₂ aire/ H ₂ O suelo		sólidos del suelo		

Tabla 2.1 Nutrientes esenciales (Nº1 a 16), esencialidad discutida Nº 17 a 19; benéficos Nº 20 a 27

^{*1}fuentes atmósfera: N fijado en forma biótica y abiótica; ^{*2}S aportado por lluvias, absorbido por hojas, incorporado en materia orgánica, y de minerales. ^{*3}Tóxico para algunas fuentes

2.2.1.2 Medio a partir del cual los elementos son tomados por las plantas

Las plantas sintetizan sus componentes necesarios para cada etapa fenológica de crecimiento y desarrollo a partir de los elementos químicos que toman del aire, agua y suelo.

El **C**, **H**, **O**, las plantas los toman del aire atmosférico y del agua (Tabla 2.1), siendo dicha agua y el CO₂, las fuentes de energía para las reacciones de síntesis (Darronsoro, 2003). El **N**, su fuente si bien es la atmósfera y es fijado por diversas vías, principalmente por bacterias simbióticas y asimbióticas edáficas, las plantas lo toman luego de la mineralización de la materia orgánica edáfica (Capítulo 4). Respecto al **S**, proviene de la atmósfera (absorbido por las plantas, incorporado en la materia orgánica edáfica), y de diversos minerales contenidos en el material original (Capítulo 4). El resto de elementos indicados en Tabla 2.1 provienen de los minerales que

contiene el material original que una vez liberados integran según el elemento considerado algunas de las siguientes formas: *soluble, orgánico, adsorbido, precipitado, ocluido, fijado*, (Capítulos 4 y 5).

2.2.1.3 Absorción y movilidad de elementos

En la Tabla 2.2 se presenta la forma en que los nutrientes esenciales son absorbidos por las plantas. Tal como se aprecia en forma catiónica es absorbido el **K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu**, mientras que en forma aniónica el **N, P, S, B, Mo y Cl** (Havlin *et al.*, 1999).

	Forma de absorción
N	$\text{NH}_4^+ - \text{NO}_3^-$ (amidas, aminoácidos)
P	$\text{H}_2\text{PO}_4^- - \text{HPO}_4^{-2}$
K	K^+
Ca	Ca^{+2}
Mg	Mg^{+2}
S	SO_4^{-2}
Mn	$\text{Mn}^{+2} - \text{quelatos}$
Zn	$\text{Zn}^{+2} - \text{quelatos}$
Cu	$\text{Cu}^{+2} - \text{quelatos}$
Fe	$\text{Fe}^{+2} - \text{quelatos}$
B	H_3BO_3
Mo	$\text{MoO}_4^{-2} - \text{HMoO}_4^-$
Cl	Cl^-
Co	$\text{Co}^{+2} - \text{quelatos}$
Ni	$\text{Ni}^{+2} - \text{quelatos}$
Se	$\text{SeO}_4^{-2} - \text{SeO}^{-2}$
Si	H_4SiO_4

Tabla 2.2 Formas de absorción de elementos esenciales por las plantas

Respecto al *mecanismo* de movilización desde el suelo hacia la planta en general son tomados por **flujo masal** (transpiración), en menor medida por dicho flujo masal e **intercepción radicular (Mn, Zn)**, y por **difusión (P, K)** (Bertsch, 2003).

Dentro de la planta, los elementos también presentan diferente movilidad. En general es definida en la bibliografía de la siguiente manera:

- a) mayor movilidad, N, P, K, Mg, Mo, Cl y Na
- b) moderada, S, Mn, Zn y Ni
- c) baja, Ca, Cu, Fe, B y Co

Esta movilidad diferencial es lo que Malavolta *et al.* (1997) señalan como *Gradiente*, uno de los *cuatro aspectos a considerar* a fin de establecer que una sintomatología observada es debido a un *desbalance nutritivo*:

- d) Ausencia de **plagas u otras afecciones** vinculadas al frío, viento calor, sales (quemaduras, manchas secas grandes en frutos y hojas, lámina inferior de hoja plateada) o herbicidas. Esto es, descartar que lo observado no sea debido a otras causas.
- e) **Generalizada**, las deficiencias aparecen en áreas grandes, no en una u otra planta.
- f) **Gradiente**, en que órgano y edad se presenta la sintomatología. Elementos móviles (**N, P, Mg, Mo y Cl**) suelen presentar **deficiencias** en las *hojas viejas* ya que el elemento se moviliza hacia las hojas jóvenes, mientras que los menos móviles en las *hojas jóvenes* y/o en el *fruto* (**Ca, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn y Ni**). Asimismo este autor indica que en hojas u órganos viejos pueden observarse los **excesos** de **Al, Mn, B, Co y Cu**, que no respondería en forma directa a la movilidad mencionada.
- g) **Simetría**, las hojas de un par o las hojas sucesivas deben presentar los síntomas típicos.

Por lo expuesto, se aprecia que la ocurrencia de deficiencias y excesos nutritivos se asocia a la concentración y movilidad diferencial de los nutrientes en el suelo y en la planta. Adicionalmente se destacan las *interacciones iónicas*, tal como se presenta a continuación. Esto adquiere particular importancia en sistemas intensivos con elevada aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas, que generan deficiencias inducidas debido a *intensidades relativas* inadecuadas para la nutrición de las plantas y fitotoxicidades por *intensidad absoluta* elevada (punto 2.2, y 2.2.1.4).

2.2.1.4 Interacciones iónicas, sinergismo, antagonismo, inhibición competitiva y no competitiva, y electroneutralidad en la relación suelo-planta

Malavolta *et al.* (1989) señalan que algunos elementos en la solución edáfica inciden en el comportamiento de otros elementos afectando la nutrición de los cultivos. Así, a fin de obtener

una planta bien nutrida, con adecuado desarrollo y producción, se requiere que todos los nutrientes sean aportados en forma balanceada.

Existen en las plantas relaciones entre nutrientes definidas como adecuadas (*intensidad relativa*) de modo que el exceso de un nutriente, la falta de otro o la presencia de los dos factores a la vez generan un desbalance. Esto puede deberse a la ocurrencia de alguno de los siguientes efectos (Tabla 2.3):

- a) *Sinergismo*: la presencia de un elemento favorece la absorción de otro.
- b) *Antagonismo*: la presencia de un elemento en una determinada concentración puede impedir la absorción del otro.
- c) *Inhibición competitiva*: debido a que tienen un mismo transportador siendo los más comunes entre MoO_4^{-2} y SO_4^{-2} ; Zn^{+2} y Mg^{+2} ; Zn^{+2} y Cu^{+2} ; Fe^{+2} y Mn^{+2} ; Mg^{+2} y K^{+} .
- d) *Inhibición no competitiva*, la presencia del ión inhibe al otro, tales como: Ca^{+2} y Mg^{+2} ; Zn^{+2} y $\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$.
- e) *Electroneutralidad*: Principio que indica que una solución debe ser eléctricamente neutra (la concentración total de carga positiva debe ser igual a la negativa). Dentro de la planta el balance de cargas se produce mediante el intercambio iónico entre el elemento que absorbe y la liberación de H^{+} u OH^{-} según corresponda a dicho balance.

En la Tabla 2.3 se presentan los *antagonismos* y *sinergismos* más frecuentemente mencionados en la bibliografía (Burt *et al.* 1998 en Malavolta *et al.*, 1997; Havlin *et al.*, 1999; publicaciones varias en INPOFOS). Sin embargo, no todas las relaciones indicadas se producen en todos los cultivos y sistemas productivos o al menos no es tan frecuente que estas ocurran. Esto puede deberse a factores tales como exigencias del cultivo (rendimientos), laboreos, manejo de fertilizantes y enmiendas, y tipo de suelo donde se realiza dicho.

Alpi y Tognoni (1991) en *cultivos intensivos* señala como importante la relación antagónica entre **K** y **Ca**; inhibitoria la del exceso de **Ca** en la absorción de **Fe** y **Mn**, y deficiencias de **Fe** ante elevados contenido de **Cu** y **Mn**. Respecto al **Mg** destaca que se ve favorecida su absorción por los NO_3^{-} e inhibida por el NH_4^{+} , **K** y **Ca**. Por el contrario, elevado contenido de NO_3^{-} favorece carencias de **Mo** y **Zn**. Este último y el **Fe** pueden ser también deficitarios con excesos de **P**. Asimismo indica deficiencias de **Zn** con acumulaciones en hoja de **Fe**, **Mn**, NO_3^{-} y PO_4^{-2} .

Consecuentemente, las relaciones entre nutrientes adecuadas para los cultivos así como la magnitud y tipo de efecto que resulta al modificarse dichas relaciones son variadas y complejas, debiendo manejarse la fertilización considerando lo expuesto. Alpi y Tognoni (1991) indica que si se mantienen las relaciones entre nutrientes recomendadas, en suelos bien provistos en materia orgánica en general no se observan deficiencias de micronutrientes.

En *cultivos extensivos*, también varían las relaciones nutritivas dependiendo del cultivo. Malavolta (2012) destaca las deficiencias inducidas de **Zn** por elevado aporte de **P** en maíz. Ratto y Miguenz (2006) también señalan deficiencias de **Zn** vinculadas a la fertilización con **P** y **N** en maíz. García (2008b) presenta información relativa a sinergismos entre el **Ca** y **Mg** con el **K** en cultivo de alfalfa. En el suelo respecto a estos macronutrientes, se recomiendan las siguientes relaciones: **Ca/Mg** < 10-15; **K/Mg** < 2-5 (Havlin *et al.*, 1999) y **K:Mg:Ca** 1:3:9 a 1:5:25 (Vitti, 2002 en García, 2008b). Se destaca que en otras fuentes bibliográficas se presentan otras relaciones, aspecto que se analiza en capítulos relativos a dichos cationes.

En la Tabla 2.3 se aprecia que si bien ocurren **interacciones iónicas** entre elementos absorbidos con igual carga (aniones o cationes) (Tabla 2.2), tal como se produce entre **Cl⁻** con las formas aniónicas del **P**, **N**, **S** y **N**, son *más frecuentes* las relaciones antagónicas o competitivas entre elementos absorbidos *con iones de diferente carga*. Esto si bien puede tener diversas causas (tipo de absorción pasiva, activa, transportador, movilidad, entre otros) es factible asociarlo también a la *electroneutralidad en la relación suelo-planta*.

Absorción nutriente	Antagonismo/inhibición	Sinergismo
NH ₄ ⁺	Mg, Ca, K, y Mo	Mn, P, S, Cl
NO ₃ ⁻	Fe, Cu, Cl,	Ca, Mg, K, y Mo
P	Cu, Zn, Ca, Fe	Mo
K	Ca, Mg	Mn en suelos ácidos
Ca	K, Mg, NH ₄ ⁺ , Zn, B, P, Zn, Fe, S,	Mn en suelos básicos
Mg	Ca, K	Mo
Fe	Cu, Zn, P	K
Zn	Cu, P, Fe, Mg y S	
Cu	Zn, Mo, P, Mn, Fe	
Mn	Zn, Ca, Mo	
Mo	Cu, Mn	
B	K	
S	K, Cu, B	
Cl	P, N, S, N	

Tabla 2.3 Antagonismos y sinergismos (diversas fuentes)

En relación a la **electroneutralidad**, cabe destacar lo señalado por Havlin *et al.* (1999) sobre la absorción de las formas del **N** (NO_3^- o NH_4^+) y como esto se asocia al pH del medio. Así, si se absorbe alto contenido de NO_3^- , se produce un incremento en la síntesis de aniones orgánicos en planta y un correspondiente incremento en la absorción de cationes (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+), con liberación de OH^- o HCO_3^- a fin de mantener la **electroneutralidad**, el medio tenderá a la alcalinidad. Por el contrario, la absorción de NH_4^+ reduce la de Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , e incrementa la de H_2PO_4 , SO_4^{+2} y Cl^- , con liberación de H^+ a la rizósfera a fin de mantener el balance de cargas en la planta. La disminución de **pH** al absorber NH_4^+ puede llegar a ser de hasta 2 unidades menor respecto al pH que favorecen los NO_3^- .

En general se indica que cuando la relación de **aniones-cationes** absorbidos por las raíces de las plantas es **mayor a 1**, se produce una excreción de OH^- y el pH aumenta, y cuando es **menor a 1**, hay excreción de H^+ y el pH desciende. Así, el pH aumenta en soluciones ricas en NO_3^- y disminuye en las ricas en NH_4^+ (Havlin *et al.*, 1999).

Estos autores destacan también, que el NH_4^+ es una fuente energéticamente más eficiente para producir proteínas y carbohidratos que los NO_3^- . Sin embargo, las relaciones en las formas de N varían para los cultivos, y estas deben ser mantenidas a fin de evitar toxicidades y deficiencias inducidas de otros elementos.

A modo de ejemplo, se mencionan en **tomate** relaciones en las formas de N y consecuencias en la **nutrición cálcica** según diferentes autores (Cadahia López, 1998; Benton Jones, 2007). En las soluciones nutritivas el pH se mantiene estable con relaciones $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ 1:2 - 1:3 - 1:4 en función de la **etapa fenológica**, no debiéndose aplicar NH_4^+ si la T^* edáfica es mayor a 30 °C. En los estados **reproductivos** debe disminuirse el aporte NH_4^+ debido a que puede afectar el crecimiento, rendimiento y favorecer la incidencia del **Blossom end rot** en frutos, (BER, deficiencia de Ca). Se indica que cuando el aporte de NH_4^+ es mayor al 25% se incrementa significativamente la incidencia de BER y se modifican los contenidos de P, Ca, Mg y K, conforme se comentó. Las deficiencias de K en tomate vinculadas a esto, favorecen la ocurrencia del amarillamiento del fruto (**blotchy ripening**). No obstante, cabe destacar que algunos autores no encuentran que estas asociaciones entre BER y formas de N sea tan claramente establecida.

Por lo expuesto, en todos los cultivos, aunque con diferente magnitud dependiendo del propio cultivo, sistema productivo, características edáficas y clima, deben asegurarse relaciones catiónicas y aniónicas que garanticen una adecuada nutrición. Las aplicaciones de fertilizaciones en exceso se constituyen en general en aumento de costos sin mayores rendimientos ni de calidad de fruto.

2.2.1.5 Biodisponibilidad (elemento, suelo, planta)

El concepto de biodisponibilidad resulta de la integración de los conceptos indicados precedentemente y otros que aquí se presentan.

La disponibilidad de iones para la planta está estrechamente ligada a la *forma* química en que se encuentra el elemento en el suelo y de las *condiciones* ambientales que favorecen o disminuyen su presencia. Respecto a las **formas químicas del elemento** en el suelo, si bien varía con cada elemento, puede indicarse como comunes las siguientes: **solubles**, **intercambiable** sobre coloides; asociados con la **materia orgánica**, formando parte de su estructura o como *quelatos*, *asociados con óxidos* (Mn, Fe amorfo, Fe cristalino) y en **minerales primarios**.

La manera en que se distribuyen estas formas en el suelo si bien es compleja y depende del elemento, puede indicarse que está gobernada por una serie de *reacciones* que incluyen:

- Formación de complejos con ligandos orgánicos e inorgánicos,
- Intercambio iónico, procesos de adsorción, desorción, precipitación
- Disolución de sólidos, equilibrio ácido-base

Los principales **factores que determinan la disponibilidad** de los iones para las plantas a partir de las *formas* mencionadas y las *reacciones* que ocurren, se indican a continuación:

- Concentración en la *solución* del suelo
- Grado de *interacción con la fase sólida* del suelo y velocidad de liberación del mismo
- Selección efectuada por la raíz durante la absorción
- Actividad de los *microorganismos* del suelo
- Condiciones de abastecimiento del suelo y condiciones climáticas

En la Figura 2.1 se presenta un esquema general de movilidad de nutrientes a la planta. La vegetación toma los nutrientes principalmente de la solución edáfica. Estos provienen de la liberación de elementos adsorbidos en arcillas y materia orgánica (intercambiables), de los productos de mineralización de la materia orgánica, y de la meteorización y disolución de minerales primarios, secundarios y precipitados. Con el agua de lluvia también se aportan elementos, destacándose el S y en menor medida el N. Asimismo, incide sobre la solución edáfica y la activación de todos los procesos entre fases, la evapotranspiración, aportes de fertilizantes y enmiendas, y las condiciones de *abastecimiento* (drenaje, salinidad, alcalinidad, pH) (Parte 2 del presente Libro).

En el Capítulo 4 se presenta el ciclo de los principales nutrientes, en estos se muestra que cada elemento presenta las formas precedentemente mencionadas y otras que le son propias (ejemplo K fijado, P ocluido).



Figura 2.1 Esquema general del movimiento de nutrientes a la planta

2.2.2 Propiedades fisicoquímicas y físicas que definen el Abastecimiento

Se definió en punto anterior el significado del parámetro de Abastecimiento en la Fertilidad edáfica. Si bien como se indicó dicho parámetro se analizará en detalle en la parte 2 del presente libro, aquí se presenta en forma sintética el marco conceptual que posibilita comprender la necesidad de considerar al decidir intervenciones en el suelo, sus propiedades químicas, físicas, fisicoquímicas y biológicas, y como estas resultan y/o se vinculan con otros elementos del paisaje a través del agua (Capítulo 1.2).

2.2.2.1 Propiedades fisicoquímicas

Son las que derivan de las reacciones de superficie en la interfase suelo-solución edáfica, y son debidas a los *coloides* del suelo (arcillas, materia orgánica, sesquióxidos Fe y Al). Estas se analizan y explican en detalle en la guía de estudio sobre Suelos Salinos y Sódicos disponible en el Aula Virtual Edafología.

Las principales propiedades son:

- *Conductividad eléctrica (CE)* mide sales solubles en agua, en diferentes relaciones suelo: agua aunque más frecuentemente en el extracto de suelo a saturación.
- *RAS* (Relación de Adsorción Sodio), Na soluble, respecto a Ca y Mg solubles.
- *PSI* (Porcentaje de Sodio Intercambiable), Na intercambiable respecto a la CIC (capacidad de intercambio catiónico medido por AcNH₄, pH 7, 1N).

Los procedimientos de medición, relaciones e interpretaciones, puede consultarse en Jackson (1964); Richards (1973); López Ritas y López Melida (1990); y en las recomendaciones efectuadas en la Argentina por el SAMLA (Sistema de apoyo metodológico de laboratorios de Suelos y Aguas; realizado en forma conjunta por diferentes instituciones del país, SAGPyA, INTA, UBA, CONICET, SRA, y TECNOAGRO). Asimismo, como se indicó, se presentan en las guías del Aula Virtual Edafología, Suelos Salinos y Sódicos; y de Interpretación de perfiles edáficos (Alconada, 2015a, 2015b).

2.2.2.2 Propiedades físicas

Son las propiedades vinculadas a la organización de los componentes del suelo (fracción orgánica e inorgánica), y los procesos que resultan con el agua, aire y nutrición. En la Figura 2.2 se presenta un esquema general de las propiedades física, que pueden agruparse en primarias y secundarias o derivadas.

- *Propiedades físicas primarias*: textura, estructura, porosidad, densidad real y aparente, color, profundidad y estratificación (secuencia de capas u horizontes).
- *Propiedades físicas secundarias*: expansión, contracción, compactación, temperatura, capacidad de aire, capacidad de agua, capacidad soporte (aireación, almacenamiento de agua, drenaje, enraizamiento).

Las *propiedades físicas primarias* si bien se relacionan entre sí, y a partir de estas pueden interferirse otras propiedades, dichas relaciones no son inequívocas (Porta *et al.*, 1994). Así por ejemplo, la textura incide marcadamente en la estructura, pero esta también depende del contenido de materia orgánica, cationes que prevalecen y cementantes. Igualmente, la porosidad (porciento y tipo), es definida por la textura pero también por la estructura.

La combinación de una o más propiedades primarias establecen las *propiedades secundarias*, que determinan las fases del suelo, contenido y circulación del aire y agua, y en definitiva, la permeabilidad y drenaje del suelo, tal como se esquematiza en la Figura 2.3 y asociado a esto, la biodisponibilidad nutritiva (punto 2.2.1.5).

No obstante lo comentado, en relación con las propiedades físicas se destaca la importancia del conocimiento de **la textura** como una primera aproximación. Si bien puede ser modificada por la erosión hídrica o eólica (fraccionamiento diferencial de partículas dependiendo de la energía incidente), o en sistemas intensivos por agregados de materiales más gruesos, tal como arenas, es una propiedad de naturaleza más permanente en el tiempo que otras (ejemplo estructura).

La *textura* tiene influencia en un gran número de otras propiedades del suelo, tales como: porosidad, aireación, retención y movimiento de agua en el suelo, escurrimiento superficial e infiltración, drenaje y permeabilidad, desarrollo de la estructura y estabilidad de los agregados; susceptibilidad a la erosión, interviene en la definición de las propiedades físico-químicas del suelo por su capacidad de retención catiónica o aniónica (CIC, CIA respectivamente) y consecuentemente, en la fertilidad química. Cabe destacar a la textura como un criterio de aptitud para la implantación de especies arbóreas.

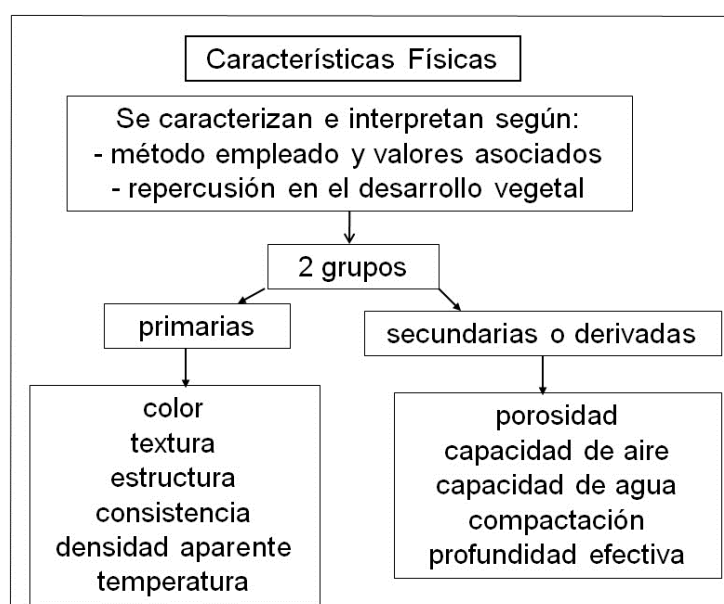


Figura 2.2 Propiedades físicas primarias y secundarias

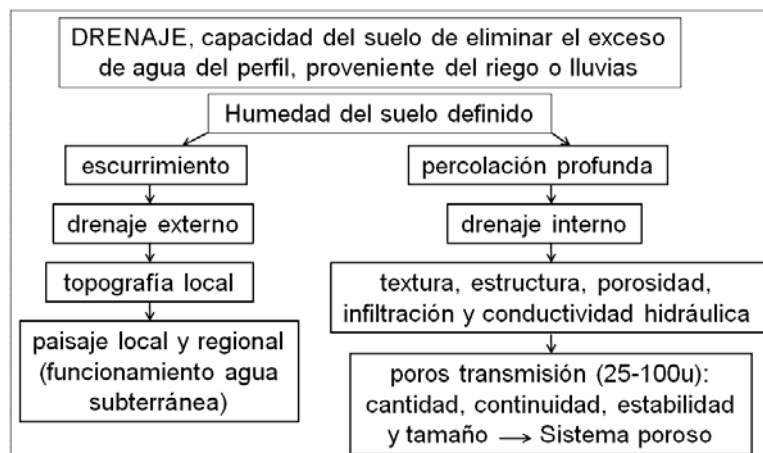


Figura 2.3 Drenaje del suelo

2.2.3 Propiedades biológicas

La evaluación de la micro-flora y fauna edáfica no son estudios de rutina en los suelos. En general, puede indicarse que no requiere ser medida en forma periódica si es que se realizan prácticas de manejo que conservan la *calidad* o *salud* y no han sido *degradados* ni *contaminados*, tal como se define en punto 1.4 del Capítulo 1. Sin embargo, luego de largos periodos en producción, sin efectuar rotaciones, ni realizar prácticas de manejo que procuren preservar la materia orgánica, evitar la erosión edáfica, se va produciendo una pérdida paulatina y progresiva de la biodiversidad con consecuencia en los ecosistemas. Esto se manifiesta en forma marcada en producciones intensivas donde son frecuentes situaciones de extrema degradación con desarrollo de patógenos, plagas y enfermedades (nemátodos, hongos, bacteriosis, etc) y malezas, que hacen hasta inviable la producción, abandonándose los sitios de cultivo.

La desinfección de suelos en producciones flori-hortícolas intensivas es una práctica que se realizada en general anualmente y tiene como finalidad controlar patógenos y malezas. Sin embargo, su implementación puede conducir a alteraciones en la nutrición de los cultivos que en algunos sitios pueden ser importantes, y/o contaminar el ambiente, tal como sucede con productos químicos prohibidos, pero aun ampliamente utilizados como es el Bromuro de Metilo. Una revisión sobre los problemas de nutrición de los cultivos por la desinfección de suelos con vapor, alternativa compatible y deseable para el ambiente, se presenta en Alconada (2004).

2.2.4 Principales restricciones del suelo en el crecimiento vegetal.

Previo a cualquier intervención en el suelo, se requiere conocer las propiedades que condicionan su uso y manejo. Se deben definir las principales limitantes, sus orígenes y si son de naturaleza permanente, semi-permanente o variable.

Si bien, tal como indica Baver *et al.*, (1972) el comportamiento mecánico de la fase sólida determina las *propiedades físicas* del suelo (clave de la productividad), y estas en asociación con las *propiedades químicas* (nutrición) determinan la habilidad para producir cosechas, es necesario caracterizar, ordenar, priorizar y/o definir la factibilidad de intervenir sobre las mismas.

A continuación se presentan las principales limitantes del suelo:

Relativas a las propiedades químicas

- **Deficiencias nutricionales:** intensidad absoluta, uno o varios nutrientes se encuentra en cantidad insuficiente (punto 2.2.1).
- **Desbalances nutricionales:** *intensidad relativa*, la relación entre nutrientes no es adecuada y conduce a la deficiencia de uno de ellos aunque se encuentre en cantidad adecuada. Ejemplo: excesivas cantidad de K conduce a deficiencias de Ca aunque este tenga un nivel adecuado, igualmente K elevado conduce a hipomagnesemias (punto 2.2.1).
- **Presencia de sustancias tóxicas:** por ejemplo las provenientes de un abono orgánico incorporado con insuficiente antelación a la instalación del cultivo, dependiendo el resultado final además del tipo de abono, composición química y relación C/N.
- **Exceso de sales:** toxicidad específica de ión sodio, bicarbonato, sulfato, boratos, y cloruros principalmente (vinculadas al agua de riego).

Relativas a las propiedades físico - químicas

- **Exceso de sales sódicas:** disminuyen el drenaje y favorecen el anegamiento (asfixia).
- **Exceso de sales en general:** generan condiciones de stress hídrico (sequía fisiológica).

Relativas a las propiedades físicas

- **Inadecuado suministro de agua:** escasa retención hídrica en suelos con texturas gruesas o suelo de poca profundidad.
- **Impedimento mecánico a la penetración de raíces:** tamaño de poros. Ejemplo: presencia de tosca, manto rocoso, horizonte Bt muy arcilloso, nivel excesivo de sodio a escasa profundidad.

- Condiciones anaeróbicas: compactación (porosidad total reducida, tamaño y tipo de poros); superficie freática poco profunda (zona de descarga, en Capítulo 1 punto 1.2, Figura 1.2).
- Temperaturas desfavorables.

Luego de definir las limitantes del suelo y/o propiedades a considerar frente a una intervención, se define **cuáles será factible corregir, mejorar o preservar**.

- Si el problema es **químico**, puede ser de más fácil solución, por ejemplo, mediante el agregado de un abono orgánico e inorgánico.
- Si es de tipo **físico-químico**, en general resulta más difícil su corrección, dependiendo principalmente de su origen. Por ejemplo, disminuir el contenido de sodio y sales en general cuando su exceso se debe a la incidencia de flujos de agua subterránea de largo recorrido (Capítulo 1 punto 1.2) implica sistemas de drenaje, vegetación adaptada. Por el contrario, si es por mal manejo del fertirriego y abonos en general, laboreo, es factible efectuar modificaciones en el sistema productivo y/o prácticas que se realicen.
- Si la limitante es **física**, resulta aún de más difícil solución, ya que puede ser necesario eliminar la impedancia removiéndola o mejorándola. Puede requerirse agregado de materia orgánica, material filtrante, laboreos, sistemas de drenaje, manejo de vegetación, etc. La mejora que efectivamente se realice depende del tipo, origen y magnitud de la limitante, así como de los costos, objetivo, y tipo de proyecto.

2.2.5 Relaciones entre los tipos de flujos de agua, geomorfología, suelo y planta. Incidencia en la renovación de nutrientes. Ejemplos de secuencias de suelos en Argentina

En el Capítulo 1 (punto 1.3) se presentaron secuencias de suelos y relaciones entre elementos del paisaje, con hincapié en la incidencia de los factores principales que les dieron origen (clima, material original, relieve). Asimismo, se presentan los sistemas de flujo de agua subterránea como elemento integrador del paisaje (punto 1.2). En este punto, se presentan otras dos secuencias de suelos respecto a los sistemas de flujo donde el factor relieve adquiere relevancia. Esto es particularmente importante en el parámetro de la fertilidad de suelo denominado Renovación, dentro de la Dotación (punto 2.2), aspecto que será aquí comentado.

En la Figura 2.4 se presenta una secuencia de suelos en la provincia de Buenos Aires, en la región denominada **Pampa Deprimida**, en la localidad de Punta Indio, que se inicia en la

planicie aluvial del Río de la Plata y finaliza en la *planicie continental* donde los suelos se desarrollan sobre loess.

Esta secuencia de suelos tiene entonces diversos orígenes. En la planicie aluvial, los suelos se forman a partir de diferentes materiales geológicos depositados durante las ingresiones y transgresiones marinas (avance y retroceso respectivamente de la línea de costa sobre el continente), que dejan dos cordones principales (Tricard, 1973). En el primer cordón arenoso, más próximo al río de la Plata, se reconoce un suelo ***Udipsament típico***. En el segundo cordón de conchillas se describen suelos pertenecientes al orden ***Rendol***. Entre ambos cordones se presentan suelos con diferente grado de hidromorfismo debido a su posición y forma en que incide el agua subterránea, clasificándose como ***Endoacuol*** y ***Endoacuent.***. En la planicie continental, muy próximo a los cordones mencionados, se presentan suelos derivados de loess, ***Natracuolf típico***, con vegetación halófila (prevalece *Distichlis sp*), que intercalan con suelos desarrollados sobre antiguos canales de marea, ***Natracuol típico***, con vegetación *Eryngium sp*. La distancia aproximada entre el primer cordón arenoso hasta los suelos descriptos en la planicie continental es de 300 m.

En ningún caso estos suelos son de uso agrícola por diversas causas. Respecto a la dotación, se destaca que aun siendo elevada o suficiente en superficie en términos absolutos en algunos de estos suelos (tal como *Rendol*, *Endoacuol*, *Natracuol*), el factor renovación de dichos nutrientes se constituye en una limitante y/o las condiciones de hidrohalomorfismo superficial o profundo son las que definen su uso y manejo.

En la Figura 2.4 se superpone a modo de ejemplo y solo con valor ilustrativo, el esquema general de flujos de la Figura 1.2 (Capítulo 1). Se indican posibles relaciones entre el suelo y flujo de agua subterránea. Se destaca que dicha agua subterránea no ha sido analizada, sin embargo, la información disponible de suelos principalmente en el sector continental (Cartas INTA), muestra alcalinizaciones que pueden ser explicadas por flujos de agua de largo recorrido, que se presenta en forma somera, pudiendo asumirse zonas de descarga de dichos flujos.

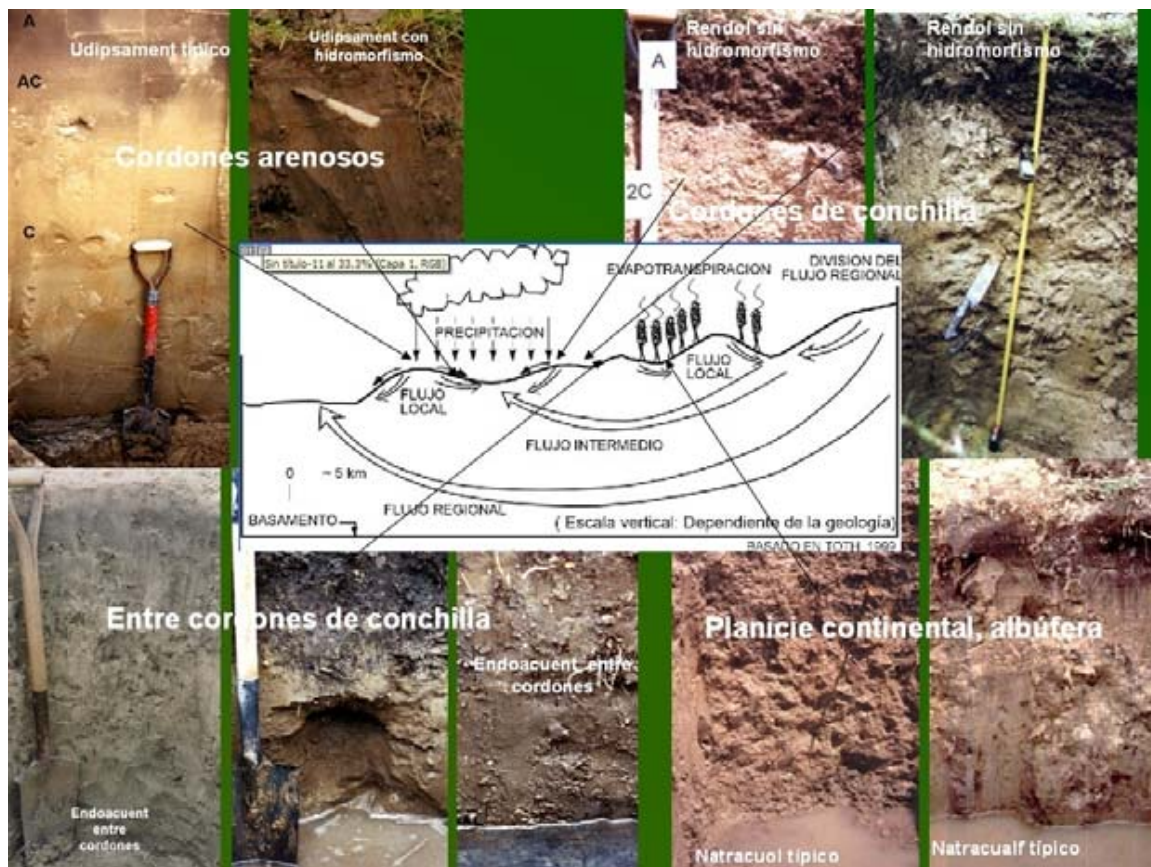


Figura 2.4 Secuencia de suelos, desde la planicie aluvial hasta la planicie continental.
Punta Indio, Pampa Deprimida, Buenos Aires

En la Figura 2.5 se presenta un ejemplo de secuencia de suelos en la denominada **Pampa Arenosa**, en el Noroeste de la provincia de Buenos Aires, en el sector de *Médanos Longitudinales* (ML). Estos médanos tienen aproximadamente 100 km de longitud, 2-5 km de ancho y 6 m de altura, cortan la pendiente regional y posibilitan la existencia de un gran número de cuerpos de agua y un drenaje anárquico, describiéndose dentro de esta unidad geomorfológica mayor (ML), unidades geomorfológicas menores denominadas *Médano*, *Manto*, *Manto somero*, *Depresión intermediana* y *Cubeta de deflación* (Dillon *et al.*, 1985). El ejemplo se presenta en el partido de Trenque Lauquen, entre las localidades de Mari-Lauquen (aproximadamente 100 msnm) y Berutti (aproximadamente 80-90 msnm). En dicha Figura (2.5) se indica para cada suelo la unidad geomorfológica, aspecto de la vegetación, sistema de flujo y zona (Alconada *et al.*, 2011). Se destaca que en punto 1.4.2 del Capítulo 1, se explica y presenta en la Figura 1.13 una imagen satelital donde se aprecia claramente la disposición general de los ML aquí detallados.

En la secuencia de suelos de la Figura 2.5 en los ambientes más elevados se describe un **Udipsament típico** con pradera de *Eragrostis curvula* de baja cobertura (unidad geomorfológica de *Médano*) y **Hapludol éntico** con cultivo de soja (unidad geomorfológica de *Manto*), ambos desarrollados en zonas de recarga de flujos de agua local de baja salinidad. En estos sitios, cuando la dotación de nutrientes es suficiente la renovación “a priori” puede suponerse adecuada. Si existieran deficiencias nutritivas resulta pertinente manejar su fertilidad mediante un uso correcto de fertilizantes y prácticas de manejo que preserven la materia orgánica y propiedades asociadas, principalmente en el suelo *Udipsament típico* (principal limitante es la escasa retención hídrica).

Los suelos **Hapludol ácuico** presentan en este ejemplo una pradera natural hidrófila (unidad geomorfológica *Manto somero*) y se ubican en zonas de descarga de flujos locales, con algo mayor de salinidad que en la recarga. Aún en suelos bien provistos en materia orgánica y nutrientes en general, puede verse dificultada su disponibilidad, siendo más importante un control del hidromorfismo.

Los suelos **Natracuol típico y Natracuall típico**, con vegetación halófila, suelo desnudo con humatos sódicos, se desarrollan en zonas de descarga de flujos de tipo intermedio con elevada salinidad. Estos suelos presentan mayores restricciones en la disponibilidad de nutrientes, siendo el hidrohalomorfismo la limitante determinante de su productividad.

En relación a los flujos de agua mencionados, es de destacar que aún siendo de igual tipo, la calidad del agua puede variar significativamente, tal como se comentó en punto 1.2, así como su efecto en el cultivo. Asimismo se destaca que los valores que se miden en las recargas y descargas para un tipo de flujo, no son valores absolutos sino relativos ya que dependen de las características del ambiente, materiales geológicos por donde circulan, etc.

Si bien el tipo de suelo, vegetación y geoforma, en general permiten identificar zonas de recarga y descarga, no siempre son suficientes para establecer si se corresponden con flujos locales, intermedios o regionales, como así tampoco, si es zona de tránsito, debiéndose además, a fin de definir manejos y prever consecuencias de excesos hídricos locales y regionales (inundaciones) medir la calidad fisicoquímica del agua y si su movimiento es descendente, lateral o ascendente. Sin embargo, si la calidad del agua no se conoce, esta puede ser inferida a partir de la caracterización analítica del perfil edáfico (Alconada *et al.*, 2014).

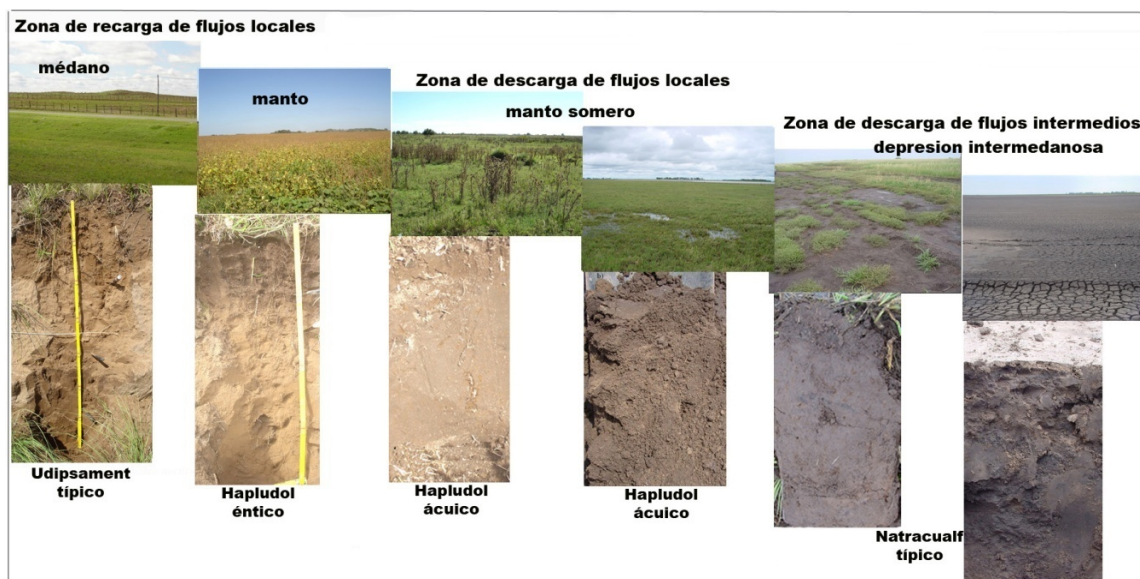


Figura 2.5 Secuencia de suelos entre Mari-Lauquen y Berutti en Trenque Lauquen, Pampa Arenosa, en el sector de Médanos Longitudinales. Sistemas de flujo incidentes y unidades geomorfológicas

Bibliografía

- Alconada, M. (2004). Desinfección del suelo con vapor. Efectos sobre la nutrición de los cultivos. Ediciones, INTA. 123 p.
- Alconada Magliano, MM; JR Fagundo Castillo; JJ Carrillo Rivera y PG Hernández. (2011). Origin of flooding water through hydrogeochemical identification, the Buenos Aires plain, Argentina, Environmental Earth Sciences. V 64(1): 57-71.
- Alconada, MM; F Damiano, y JR Fagundo. (2014). El suelo en el funcionamiento hidrológico y manejo agropecuario-forestal. XX Congreso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo. Cusco – Perú.
- Alconada, M. (2015a). Suelos Salinos y Sódicos. Aula Virtual Edafología, FCAg y Fs. UNLP. <http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/course/view.php?id=21>
- Alconada, M. (2015b). Interpretación de perfiles edáficos. Aula Virtual Edafología, FCAg y Fs. UNLP. <http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/course/view.php?id=21>
- Alpi, A. y F Tognoni. (1991). Cultivo en invernadero. 3ra edición. Ed. Mundi Prensas. Madrid, España. 172 p.
- Aula Virtual Edafología, Facultad Ciencias Agrarias y Forestales. UNLP. <http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/course/view.php?id=21>
- Baver, Gardner, WH y WR Gardner. (1972). Física de suelos. México, CRAT, 520p.
- Benton Jones, J. 2007. Tomato plant culture. In the field, Greenhouse, and Home Garden. CRC Press LLC. 2ª Edición. 399 p.
- Bertsch, F. (2003). Absorción de nutrientes por los cultivos. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 307 p.
- Cadahia López, C. (1998). Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Ed. Mundi Prensas. 475 p.
- Díaz Zorita M, GA Duarte, M Barraco. (2004). Effects of chloride fertilization on wheat (*Triticum aestivum* L.) productivity in the sandy Pampas region, Argentina. Agron. J. 96: 839- 844.
- Dillon, AA, M Hurtado, J Giménez y RJ Castillo. (1985). Consideraciones geomorfológicas y estratigráficas como base del muestreo de suelos de un sector de la Pampa Arenosa (Pcia. Buenos Aires). Actas Primeras Jornadas Geológicas Bonaerense, Tandil: 737-749.
- Domínguez Vivancos, A. (1989). Tratado de Fertilización. Ed. Mundi Prensas. 601 p.
- Etcheverhede, PH. (1976). Normas de Reconocimiento de Suelos. Publicación 152. INTA Castelar. 222 p.
- García, FO. (2008a). Cloro en trigo: Resultados de las experiencias en la región pampeana argentina: Años 2001 a 2006. Informaciones Agronómicas. N°38:17-21. IPNI -Cono Sur. Acaassuso, Buenos Aires. <http://www.ipipotash.org/es/k-center/basic-facts-about-chloride>

- Garcia, FO. (2008b). Dinámica de nutrientes en el sistema suelo – planta. Jornada de Actualización Minga Guazú, Paraguay. IPNI Cono Sur. <http://lacs.ipni.net/>
- Havlin J, J Beaton, S Tisdale y W Nelson (1999). Soil fertility and fertilizers. An Introduction to nutrient management. Sixth Edition. 485 p.
- Lavado, RS, MB Rodríguez, MA Taboada, R Álvarez, M Alconada, MS Zubillaga, y CA Porcelli. (1999). Concentration of trace metals in corn grown in Argentina. 5to. International Conference on the Biogeochemistry of Trace elements. Vienna, Austria.V (I): 564- 565.
- Lavado, R, y CA Porcelli. (2000). Contents and main fractions of trace elements in Typic Argiudolls of the Argentinean Pampas. Chemical Speciation and Bioavailability 12: 67-70.
- López Ritas, J. y J López Melida. (1990). El diagnóstico de suelos y plantas. Métodos de campo y laboratorio. Ed. Mundi Prensa. 363 p.
- Loué, A. (1988). Les oligo-elements en agriculture. Traducción español: Los micronutrientes en la Agricultura. Domínguez Vivancos. 1988. Ed. Mundi Prensa. 354 p.
- INPOFOS. Instituto de la Potasa y el Fósforo. <http://www.ipipotash.org>.
- Jackson, M.L. (1964). Análisis químico de suelos. Ed. Omega. 662 p.
- Malavolta, E. (1987). Manual de Calagem e Adubação das principais culturas. Ed. Agronômica Ceres, San Paulo. 496 p.
- Malavolta, E., GC Vitti, y SA De Oliveira. (1989). Avaliação do estado nutricional das plantas. Princípios e Aplicações. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 201 p.
- Malavolta, E. (1994). Fertilizantes e seu impacto ambiental. Micronutrientes e Metais Pesados, mitos, mistificação e fatos. Ed. Produquímica Indústria e Comércio Ltda. 153 p.
- Malavolta, E, GC Vitti, y SA de Oliveira. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Ed. POTAFOS, 2da ed. Rev. e actual. Piracicaba, Brasil. 319 p.
- Malavolta E. (2012). Relaciones entre fósforo y zinc. Información Agronómica, 63:12-13. [https://ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/\\$webindex/84942875ADCF8D2C05257268004D722E/\\$file/Relaci%C3%B3n+entre+el+F%C3%B3sforo+y+el+Zinc.pdf](https://ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/$webindex/84942875ADCF8D2C05257268004D722E/$file/Relaci%C3%B3n+entre+el+F%C3%B3sforo+y+el+Zinc.pdf) (consultada junio 2016)
- Mengel, K. y EA Kirkby. (2000). Principios de nutrición vegetal. 4ta Ed. Instituto Internacional de la Potasa. Basilea, Suiza. 535 p.
- Nuez Viñals, F. (1999), El cultivo del tomate. Ed. Mundi Prensa. Madrid, España. 793 p,
- Ortega, AE y E Malavolta. (2012). Los más recientes micronutrientes esenciales. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (LACS), 7:16-25. [http://www.ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/232B901BB70122F985257A80005228D7/\\$FILE/16](http://www.ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/232B901BB70122F985257A80005228D7/$FILE/16)
- Porta, J, M López Acevedo, y C. Roquero. (1994). Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ed. Mundi Prensa. 807 p.
- Ratto, SE. (2005). Los microelementos en el sistema productivo. Actas de la Primera Jornada Nacional de Micronutrientes: Diagnóstico y tecnología de fertilización. La Plata, Argentina

- Ratto, SE y FH Miguez. (2006). Cinc en el cultivo de maíz, deficiencia de oportunidad INPOFOS. Información Agropecuaria N° 31: 11-14. [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/1E60ADBCC722B55F85257995007A258C/\\$FILE/4.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/1E60ADBCC722B55F85257995007A258C/$FILE/4.pdf)
- Soil Survey Staff. (2010). Claves para la Taxonomía de suelos. Departamento de Agricultura de USA, Servicio de Conservación de Recursos Naturales. USDA. Décima Edición. Traducción CA Ortiz Solorio, MC Gutiérrez Castorena y EV. Gutiérrez Castorena. 374 p. http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- Tricart J. (1973). Geomorfología de la Pampa Deprimida. Colección Científica XII, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires. 202 p.
- Richards, LA. (1973). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Ed. LIMUSA. México D.F. 172p. Manual 60 USDA. Versión inglés. <http://www.ars.usda.gov/News/docs.htm?docid=10158>

CAPÍTULO 3

La materia orgánica en los suelos

Jorge W. Lanfranco

La materia orgánica es uno de los indicadores más sensibles de la fertilidad de los suelos integrados al paisaje. Su expresión en la naturaleza resulta de un ciclo que se repite permanentemente brindando sustentabilidad ambiental. Estudiaremos su origen, complejidad, comportamiento y el impacto que el hombre genera con sus cosechas. Reflexionaremos sobre algunas propuestas dirigidas a nuestros estudiantes con elementos para crear un futuro mejor.

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO,
ANDREA PELLEGRINI, SUELO EN EL PAISAJE

3.1 Introducción

La evolución de los suelos los ha llevado a formar un sistema heterogéneo, polifásico y disperso constituyendo una matriz articulada, no rígida, que se ha constituido en hábitat de los seres vivos, dentro de ellos debemos incluir al hombre. Los suelos están constituidos por una fase sólida, compuesta por partículas de muy diferentes tamaños, formas y naturaleza, los espacios vacíos o poros dejados entre sí. Estos se hallan frecuentemente interconectados conteniendo y/o transportando aire o agua (Porta *et al.*, 1994).

El sistema adquiere una estabilidad dinámica modificándose las fases y sus relaciones tomando gran importancia los fenómenos de interfase o de superficie en la producción de cosechas y la degradación de los suelos por origen antrópico.

En la fase sólida generalmente predominan materiales de origen mineral y en menor grado materia orgánica.

A lo largo de la historia, el hombre ha asociado la fertilidad del suelo, con el color de tono oscuro que proporciona la materia orgánica humificada. También se ha constatado que los suelos

fértiles y de gran productividad, con el tiempo se convertían en menos productivos, llegando a veces, incluso a dejar de serlo, asociado a la pérdida progresiva de la materia orgánica y el agotamiento del suelo por el uso agrícola-ganadero.



Figura 3.1 Macroporo con conectividad

La necesidad de obtener alimentos, la generación de empresas y el agronegocio, incidieron sobre las características y comportamiento de las fases del suelo por medio de la mineralización de la materia orgánica y exportación de nutrientes. Favoreciendo la erosión, compactación, salinización y contaminación; afectando la salud de los suelos. Estos procesos se vieron acentuados luego de la llamada revolución verde de los años '70, aunque se vienen desarrollando tecnologías para su control.

En este capítulo problematizaremos el papel de la materia orgánica del suelo y sus interrelaciones.

3.2 Conceptos y definiciones

La materia orgánica de los suelos es el producto de la transformación física, química y biológica de residuos de plantas, animales, de las excreciones de animales y microorganismos, tras su muerte. El producto de tal transformación, durante un largo proceso es una mezcla compleja de sustancias coloidales y amorfas de color negro o marrón oscuro denominado genéricamente *humus*. En parte de la materia orgánica puede persistir todavía la composición química e incluso la estructura física de los tejidos animales o vegetales originales siendo considerados como “no húmicos”. Por la tendencia a crear compartimentos definidos no se advierte que entre ambas

expresiones existe una extensa gradualidad que se ha demostrado posee una gran participación en la fertilidad de los suelos. El impacto de uso de sucesivas cosechas refleja sus acciones sobre la fracción más sensible constituida por la materia orgánica en proceso de humificación (Primavesi, 1982).

La materia orgánica del suelo se refiere principalmente a la fracción muerta de la misma que comprende, aproximadamente entre el 65 y el 85 % de la totalidad. El 35 % a 15 % restante incluye organismos vivos y restos orgánicos frescos y sus metabolitos. Estos “residuos de la naturaleza” constituyen los precursores de la materia orgánica transformada por la intervención de organismos vivos.

3.2.1 Composición sobre base seca de la materia orgánica

La materia orgánica contiene los aproximadamente 60 elementos que moviliza la actividad biológica pero está compuesta mayoritariamente por C, H, O, N. En menor cantidad P y S, luego Ca, Mg y K y las trazas de microelementos (Conti, 1998). Todos en cantidades variables según las condiciones ambientales, materiales originarios y cultivos (Edafología, 2015).

Carbono (C)	50 a 60%
Oxígeno (O)	35 a 45%
Nitrógeno (N)	2 a 5%
Hidrógeno (H)	4 a 7%

3.2.2 Contenido de materia orgánica del suelo

Los suelos minerales poseen un contenido de materia orgánica¹ menor del 30 %, ocupando el 95 % de la superficie terrestre. Si bien se presentan en cantidades muy inferiores a la fracción de minerales y rocas, su papel es muy importante para la evolución y propiedades productivas de los suelos. Los suelos con un mayor contenido en materia orgánica del 30% se denominan *suelos orgánicos*.

Generalmente se acumula en la parte superior del suelo, coincidiendo con otros factores que propician la actividad biológica, como aire, agua, luz y temperatura. Disminuye con la profundidad a excepción de suelos ácidos (**Podsol**) o alcalinos (**Natracuol**) donde la materia orgánica es

¹ Se la cuantifica analíticamente en forma indirecta por el carbono orgánico, y aplicando un factor constante, muy cuestionado. Se encuentran en desarrollo metodologías directas por combustión seca o húmeda que se ensayan en nuestra cátedra.

lixiviada. Otras excepciones se encuentran en suelos enterrados, con discontinuidades litológicas, en suelos de origen aluvional (Fluvisoles), en suelos orgánicos (Histosol) y turberas.



Figura 3.2 Izquierda: Haprendoll con 10 % de materia orgánica sobre material originario calcáreo.
Derecha: Udipsament con 0,6 % de materia orgánica sobre material originario de arena.

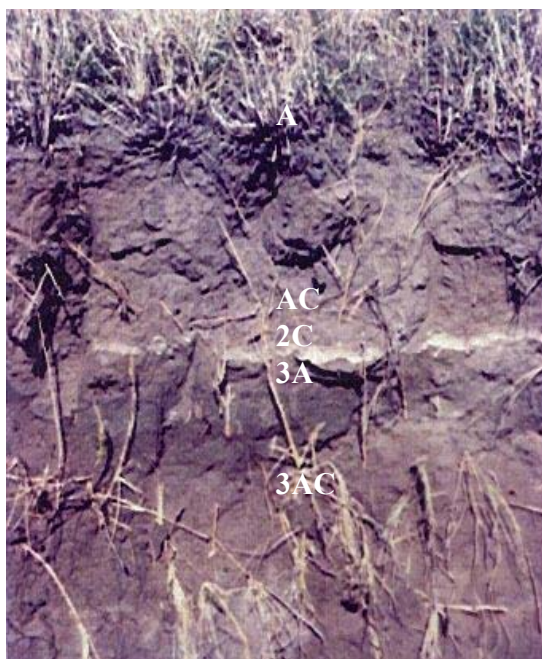


Figura 3.3 Hapludol con discontinuidad litológica en partido de América PBA. Obsérvese capa de ceniza volcánicas 2C y un 3A. Aquí el mayor contenido de materia orgánica se halla en el horizonte superficial disminuyendo paulatinamente con la profundidad pero debido la discontinuidad litológica vuelve a aumentar en el 3A.

Los contenidos de materia orgánica dependen de factores multivariantes que se asocian a la naturaleza del suelo, clima, vegetación y relieve; llegando a un equilibrio entre los aportes para su generación y la degradación para consumo biológico. Se describen tres situaciones ambientales en nuestro país con diferentes balances de la materia orgánica:

3.2.2.1 Pradera pampeana: con predominio de condiciones ambientales moderadas. En los suelos de pradera su contenido puede llegar a 10 %, por el cual se observa el proceso de melanización (Imbellone, 2010), caracterizado macroscópicamente por una coloración con valores bajos, pigmentación muy oscura. Siendo valores habituales en la pampa húmeda entre el 3 % y 5 %. Su contenido se ve disminuido por el uso agrícola sin manejo conservativo.

Las condiciones ambientales templadas a templadas frías y húmedas favorecen la producción de humus con formas poco móviles y de elevado peso molecular, alta densidad, denominados ácidos húmicos y huminas; poco reactivas y muy antiguas, datadas en miles de años. Se favorece en relieves llanos, con suaves lomadas y pendientes donde la napa freática se encuentre fuera del ambiente rizosférico. Para llevar adelante el proceso inciden favorablemente:

- -pH preferiblemente neutro,
- -nutrientes para asegurar una bioproductividad, con predominio de Ca^{++} y Mg^{++}
- suelos de permeabilidad moderada y aireados,
- drenaje suficientemente eficiente como para que los excesos de hídricos se eliminen en menos de 48 horas.
- -tiempo del proceso suficiente como para permitir cumplir todos los procesos en forma completa.

En estas condiciones los coloides se hallan en estado de gel, estable, y se obtienen complejos órgano-minerales, por ejemplo -materia orgánica - Ca^{++} - arcilla-, con predominancia de las estructuras carbonadas de ácidos aromáticos, ácidos húmicos y humina. .



Figura 3.4 Hapludol del Pdo de 9 de Julio PBA, componente de los suelos con mayor capacidad productiva en el centro y norte de la Provincia de buenos Aires.



Figura 3.4 Izquierda: Haplorendol. **Derecha:** Argiudol. Ambos sobre tosca en Norte de la región serrana de la PBA.

3.2.2.2 Selva subtropical

Las altas temperaturas y altas precipitaciones, que caracterizan esta amplia región de América latina, representan condiciones climáticas extremas por lo que se ven afectados algunos de los procesos de aporte mineralización y síntesis. En el ambiente tropical y húmedo puede verse muy favorecido, la mineralización sobre la síntesis obteniéndose materia orgánica que se polimeriza escasamente predominando las fracciones jóvenes del humus poco evolucionadas. Dicho en otras palabras la velocidad de desintegración de los cuerpos orgánicos es mayor que la formación del humus. A su vez las precipitaciones favorecen la disolución, lavado y transporte de las sustancias. Por ese mismo efecto prevalecen los suelos ácidos con pocos cationes, como Fe^{+++} y Al^{+++} en la solución del suelo, generando una pobreza nutricional.



Figura 3.5 Izquierda: ambiente de Selva en Senna Madureira Brasil. Derecha: Haplustox, suelo rojo con predominancia de Óxidos de Hierro y Aluminio.

3.2.2.3 Monte patagónico

Se destaca el déficit hídrico y las bajas temperaturas. Las condiciones de aridez y salinidad de la meseta patagónica con estepas semiáridas y montes xerofíticos determinan valores muy bajos de materia orgánica, que difícilmente superan 0,3 % a 0,8 %.

Las temperaturas son bajas con altas amplitudes, las precipitaciones son bajas y el viento es apreciable por lo que la actividad biológica se limita a organismos adaptados como el monte xerofítico muchas veces en pedestales aislados. En este caso existe un pobre aporte de restos orgánicos y tanto la mineralización y síntesis se ven restringidos por lo que el contenido de materia orgánica es bajo. En todo caso predominan las fracciones jóvenes del humus. En todos los casos

constituye la principal fuente de obtención de nutrientes para las cosechas por lo que se les atribuye una gran responsabilidad en la pérdida de materia orgánica de los suelos.



Figura 3.8 Meseta erosionada con vegetación en pedestales sobre Aridisoles

3.3 Los habitantes del suelo

Los seres que viven sobre el suelo o dentro del mismo son los responsables del factor formador evolutivo llamado “actividad biológica”, y del ciclo la materia orgánica.

Los organismos del suelo encuentran su hábitat en los espacios vacíos que deja la fase sólida o pueden generar sus espacios mediante acciones de desplazamiento de las partículas del suelo como ocurre con los conductos por el crecimiento de raíces, galerías o cavidades por movimiento de animales o anidamiento. Generalmente poseen comunicación entre sí y llegan hasta la atmósfera, lo cual favorece la aireación y el ingreso de agua. Todo lo cual moviliza materia orgánica, deja excrementos, gomas, mucilagos, pectinas que estabilizan esos espacios como elemento de la estructura del suelo resistente al agua.

En los espacios vacíos más pequeños asociados a los paquetes de arcillas llamados microporos de tamaño inferior a 2 micrómetros podemos encontrar moléculas orgánicas, polisacáridos, sustancias húmicas o virus. En los espacios vacíos algo más grandes pero no visibles a simple vista, llamados mesoporos de 2 micrómetros a 50 micrómetros podemos encontrar bacterias, hongos, pelos radicales. En los poros más gruesos, visibles, llamados macroporos se encuentran raíces además de fauna como insectos, arácnidos, lombrices,

nematodos, y microorganismos como algas, bacterias, hongos y protozoos, que representan, aproximadamente, el 2 % del peso de los primeros 15 cm del suelo en una pradera.

Los organismos del suelo, cada uno con condiciones particulares contribuye marcadamente al aporte neto de materia orgánica o a su transformación. Resaltamos dos grandes grupos: Los **autótrofos** que son capaces de obtener la energía del sol o de reacciones químicas para formar su protoplasma generando ganancia neta de materia orgánica al suelo, y los **heterótrofos** que son consumidores y transformadores de la misma. Todos contribuyen a un ciclo de la materia orgánica.

Algunos procesos indicadores de la salud del suelo que se destacan son los siguientes:

- respiración, actúa en la transferencia energética del suelo degradando por combustión húmeda el C orgánico oxidándolo y emitiendo CO₂;
- actividad enzimática, los microorganismos constituyen la fuente principal de enzimas liberadas a los suelos, siendo en la actualidad las más evaluadas como indicadores la deshidrogenasa y ureasa como nivel de actividad microbiana (García, 2003). La deshidrogenasa, se encuentra principalmente en la membrana plasmática de bacterias y membranas mitocondriales de algunos hongos. Reflejan la capacidad oxidativa total de la masa microbiana. La ureasa es producida y secretada por bacterias y hongos, pasando a formar parte de la matriz del suelo como exoenzima.

El hombre, como ser vivo, podría considerarse que interrumpe el ciclo natural al ser consumidor, exportador y concentrador de la materia orgánica en grandes depósitos de basura urbana.
--

Los parámetros biológicos son más sensibles que los químicos como indicadores de cambios en el hábitat. Los más efectivos fueron los nitrificadores, celulolíticos y la respiración del suelo (Abril, 2003).

En su conjunto el suelo es hábitat de los reinos de la naturaleza:

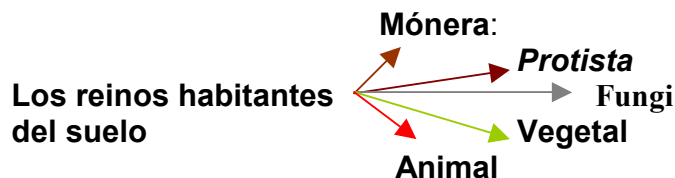


Figura 3.9. Los reinos de la naturaleza activos en el ciclo de la materia orgánica

3.3.1 Mónera: pueden estar presentes en el suelo en cantidades realmente asombrosas: en un gramo de suelo puede haber 15 a 20 millones de actinomicetes; en cuanto a las bacterias pueden alcanzar en un gramo de suelo poblaciones del orden de 3.000 a 4.000 millones de individuos (Buckman y Brady, 1966). Son procariontes unicelulares que comprende a las bacterias y algas verdes azuladas. Si bien son unicelulares conforman colonias que adquieren carácter coloidal que pueden poseer fenómenos de superficie.

Bacterias. Se incluyen por su importancia en el suelo sus variadas características nutricionales, destacándose las simbióticas.

Pueden ser autótrofas por fotosintetizadoras que viven en la superficie del suelo o quimioautótrofas. Las primeras toman energía de la luz. Las segundas toman la energía de reacciones redox y son importantes en la nutrición vegetal del NO_3 , SO_4 y procesos de mineralización y de humificación.

Dentro de las quimioautótrofas cabe mencionar: amilolíticas, pectinolíticas, celulolíticas y hemicelulolíticas (Alexander, 1977).

Las bacterias alcanzan su máxima proliferación en suelos en que el tenor en humedad oscila entre el 50 y 70% de su máxima capacidad de retención, y de suficiente O_2 , dado que la mayoría son aerobias. Las exigencias de temperatura, son entre los 25 y 35 °C, aunque hay especies que se adaptan a temperaturas extremas de 45 a 65 °C. El pH requerido es neutrófilo. Aunque algunas especies viven en suelos de pH 3, (da Silva, 1984)

Actinomicetes. Se los puede describir como un tipo vegetativo intermedio entre las bacterias y los hongos. En el suelo son generalmente menos abundantes que las bacterias y los hongos. Toleran mejor que estos los pH alcalinos. Se desarrollan relativamente bien sobre materia orgánica cuya degradación ya fue iniciada por otros microorganismos.

3.3.2 Protista: son eucariontes; uni o multicelulares. Comprende a los: protozoarios, algas y mohos. Los protozoarios son microscópicos, heterótrofos; la mayor parte se mueven mediante flagelos, cilios o pseudópodos.

Los *protozoarios* son muy abundantes en la superficie o próximo a ella. Requiere un cierto tenor en humedad en el suelo no solo para sus exigencias biológicas sino para su movimiento, lo cual los hizo confundir con animales microscópicos. Su tamaño en general es del orden de algunos micrómetros. Por ello pueden vivir en las películas de agua adheridas al suelo. Se adaptan a cualquier pH, aunque la mayor parte de las especies se desarrolla en pH de 6 a 8. La mayoría son saprofitos consumiendo sustancias orgánicas en vías de descomposición mediante enzimas celulasa y quitinasa. Otros se alimentan de partículas sólidas y otros microorganismos controlando la población de bacterias (da Silva, 1984), un grupo reducido son fotosintetizadores.

Las *algas* son fotosintéticas; algunas tienen pigmentos pardos o rojos además de clorofila. Pueden ser uni o pluricelulares. Son fotoautótrofas por lo tanto son productoras y sintetizan materia orgánica. Forman con musgos y líquenes las costras de muchos suelos de las zonas áridas. Son particularmente resistentes a la sequedad, salinidad y alcalinidad; se adaptan a pH muy alcalino.

Las costras superficiales forman un pavimento que fija el suelo, frena la erosión y reduce la evaporación; aunque favorecen el escurrimiento. Los mucílago que secretan contribuyen a la estabilidad estructural. Las algas tienen la capacidad de retener el nitrógeno de las precipitaciones pluviales y del polvo (da Silva, 1984).

3.3.3 Fungi: son heterótrofos y se desarrollan preferentemente en suelos ácidos. Su cuerpo está compuesto por hifas que constituyen marañas que penetran en el hábitat reordenando las partículas basándose en su exploración. Sus paredes celulares son de quitina que es liofoba y dejan tapizados los canales creados lentificando el humedecimiento y con ello favoreciendo la estabilidad de la estructura.

Los *hongos* utilizan substratos nutritivos variados, como azúcares, ácidos orgánicos, almidón, pectina, celulosa, hemicelulosa y en particular lignina. Esta última es la más resistente al ataque de bacterias pudiendo formar parte de humus sin previa mineralización.

3.3.4 Vegetal: la gran mayoría de los organismos del suelo pertenecen al reino vegetal. Son eucariontes, autótrofos fotosintéticos y con paredes celulares de celulosa. Es por ello que son los más importantes productores de materia orgánica y modeladores del hábitat para su mejor adaptación al medio. En la superficie la cobertura verde del suelo contribuye a la morigeración de la temperatura, fijación de la energía lumínica, interceptación del agua de lluvia, amortiguación del impacto de la gota de agua de las lluvias y erosión. En la interfase superficial y subsuperficial

tendrá diferentes expresiones de anclaje por diferentes sistemas radicales. Las praderas, por ejemplo, producirán una ocupación continua del suelo y sus raíces finas a muy finas explorarán la totalidad del suelo en los primeros centímetros, produciendo aportes importantes y homogéneos de materia orgánica al suelo. Los bosques, en cambio, explorarán el suelo en forma más localizada con raíces medias y gruesas a mayor profundidad.

3.3.5 Animal: los animales son mucho menos abundantes que los vegetales, pero tienen importancia por cuanto ellos actúan en las primeras etapas de la descomposición orgánica. Son eucariontes, consumidores o heterótrofos y multicelulares, poseen diferenciación de tejidos y sistemas orgánicos complejos.

Los grupos más importantes de organismos del suelo cambian en su presencia y cantidad de acuerdo a las condiciones ecológicas.

Los principales animales del suelo son: roedores, insectos, miriápodos, cochinillas, caracoles y babosas, arácnidos y lombrices.

Dentro de los insectos cabe mencionar: himenópteros, coleópteros, lepidópteros, que aprovechan restos vegetales más o menos descompuestos, continuando ellos el proceso de descomposición.

Algunos animales que merecen destacarse en el procesamiento de la materia orgánica:

Lombrices. Las lombrices forman un conjunto taxonomicamente heterogéneo y sus hábitos de vida llegan a diferir apreciablemente. Un grupo ingiere preferentemente restos como saprofitos; otras ingieren suelo conjuntamente con los restos. Necesitan suelos razonablemente aireados, húmedos, ricos en calcio y de pH cercano a la neutralidad.

Las lombrices excavan galerías, redes de canales que airean el terreno apartando las partículas de tierra y o bien aspirándolas. Ingieren en su ambiente subterráneo la tierra, restos vegetales y pequeños insectos que son devueltos al suelo luego de pasar por su aparato digestivo en forma de excremento o humus de lombriz. De esta manera mezclan, modelan, y agrupan la tierra, ayudando a mejorar su estructura. La cantidad de tierra que hacen pasar por sus cuerpos puede llegar a aproximadamente 40 toneladas anuales. Su importancia radica en que disminuyen la densidad aparente, aumenta la infiltración del agua y el espesor de la profundidad efectiva para las raíces.

Las deyecciones poseen mayor riqueza que el suelo o sustrato comido por las lombrices, contienen más materia orgánica mineralizada, mayor concentración de nutrientes, menor acidez y mayor capacidad de cambio de cationes. También incorporan a la tierra que pasa por su tubo digestivo sustancias propias de su metabolismo, como hormonas y sustancias bacteriostáticas.

Algunos ejemplos de las lombrices que más contribuyen al ciclo de la materia orgánica:

- *Grupo Gris*: Se alimenta a cierta profundidad y los excrementos los depositan tanto en la superficie como en profundidad. Se concentran en la región de las raíces de las plantas. Pueden vivir en suelos poco fértiles y con capas compactadas, siendo muy útiles en el acondicionamiento de suelos.
- *Grupo rojo*: Se alimentan cerca de la superficie del suelo y sus excrementos son depositados también sobre la superficie. Otras producen galerías profundas rompiendo el subsuelo y facilitando el transporte de materia orgánica. Pueden llegar hasta 4,5 m de profundidad.
- Su incorporación a suelos cultivados con siembra directa podría mejorar sectores compactados.
- *Nematodos*: Son gusanos relativamente pequeños, de 0,4 a 2 mm de longitud, de forma ahilada que se encuentran en cantidad de hasta cincuenta individuos por gramo de suelo. Tienen aparato bucal chupador o masticador siendo estos los que contribuyen a procesar la materia orgánica. Se los puede separar según sus hábitos alimentarios en predadores que se alimentan de la *fauna* del suelo y los *saprofagos* que se alimentan de tejidos en vías de descomposición contribuyendo al ciclo de la materia orgánica. El grupo de los *fitófagos* es perjudicial para los cultivos pues comen las raíces por lo constituyen una plaga importante en horticultura.

3.4 Dinámica de la Materia Orgánica del suelo

La dinámica se halla implícita en un proceso cíclico o sea que recomienza permanentemente. Se renueva y e incluso finaliza temporalmente en cada nuevo equilibrio al que se alcanza. Es posible encontrar en un mismo suelo elementos de la evolución que así lo demuestran. En algunos meses al comienzo del proceso se observa pérdida de la morfología original de los materiales aportados. En algunos años se evidencia la aparición de nuevos productos de síntesis y posteriormente aparición de estructuras órgano-minerales. Estas últimas pueden perdurar durante milenios.

La materia orgánica muerta que se descompone en un proceso llamado de **mineralización primaria**, donde se transforma en elementos minerales solubles o gaseosos tales como NH_3 , NH_4^+ , NH_2^- , PO_4H^- , POH_2^- , SO_4^- , H_2O , CO_2 y en monómeros de las sustancias complejas o simplificación marcada de las grandes cadenas orgánicas.

Al mismo tiempo parte de esos restos orgánicos, por el proceso de **humificación** originan complejos coloidales por resíntesis y policondensación en el suelo; llamadas sustancias húmicas, complejos húmicos, humus o más ampliamente **materia orgánica** del suelo.

La humificación puede establecer relaciones físico-químicas con la materia mineral, y de esa manera se vuelven más estables y resistentes a la acción microbiana. En este proceso puede observarse la incorporación y fijación del nitrógeno atmosférico. Si bien su capacidad para resistir la actividad biológica ha aumentado, existen partes de esa materia orgánica que ahora es nuevo sustrato de microorganismos, llamado mineralización secundaria.

En la siguiente figura se pueden observar las relaciones de los componentes del sistema. Y la velocidad relativa de los procesos en rangos muy amplios ya que dependen de una importante cantidad de variables.

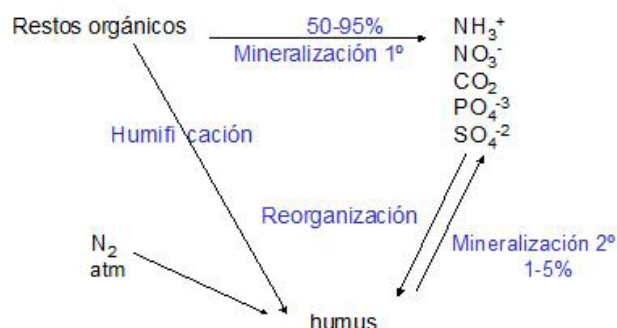


Figura 3.10 Esquema de los procesos que producen materia orgánica en los suelos

Parte de la materia orgánica continúa transformando aumentando su complejidad e interacción con fracción mineral del suelo. En suelos productivos estas aproximaciones pueden ser diferentes.

La transformación inicial es degradativa, reductora del tamaño y aumentado la densidad por compactación espontánea al perderse los espacios del floema y xilema.

La dinámica de la materia orgánica ha adquirido relevancia como indicador de la salud del suelo en el estudio de las fracciones intermedias, llamadas lábiles, particuladas, livianas (Galantini, 2008) o jóvenes que son las más activas

3.4.1 Mineralización

El concepto de mineralización implica simplificación o análisis de sustancias complejas que permite liberar moléculas de bajo peso molecular o iones que pueden permanecer en los lugares de origen, migrar a corta distancia, quedar adsorbidos sobre otros coloides o lavarse en profundidad.

- *Mineralización primaria.* Sobre *restos orgánicos* o sus excrecencias se produce la degradación de las moléculas complejas (análisis) de los hidratos de carbono, proteínas y lípidos. Corresponde al comienzo del ciclo de la materia orgánica del suelo, es rápido transformándose entre un 50-90 % por año de los materiales aportados, salvo residuos con componentes resistentes como tanino, lignina o pectina.
- *Mineralización secundaria.* Sobre el *humus o materia orgánica vieja del suelo*, que comprende productos de alto peso molecular, estables, pueden volver a biodegradarse para liberar sus componentes. Corresponde a una etapa muy avanzada del ciclo de la materia orgánica del suelo, es lenta, transformándose el 1 al 5 % anualmente.

3.4.1.1 Mineralización primaria

Los restos orgánicos antes de caer al suelo sufren ataques climáticos y por los microorganismos y se producen importantes transformaciones en su composición y estructura, comenzando la *mineralización primaria* de la materia orgánica muerta. En el suelo la alteración mecánica de la hojarasca, ramas, tallos y todo otro resto que se acumula sobre la superficie la va destruyendo, reduciendo su tamaño y aumentando la superficie de exposición. En la degradación de los tejidos intervienen diversos agentes abióticos y bióticos. Entre los primeros cabe mencionar la lluvia, viento, cambios químicos por acción del agua, luz, aire que contribuyen con los agentes bióticos en la degradación. A este nivel, actúan macroorganismos, principalmente animales que trituran y mezclan, preparando para la alteración bioquímica. Se produce una intensa transformación de los materiales orgánicos y se propicia su incorporación al suelo. Los restos orgánicos en el suelo pierden rápidamente su estructura macromoléculas. Se despolimerizan y oxidan los compuestos aromáticos con formación de quinonas obteniendo en condiciones aeróbicas productos inorgánicos sencillos como CO_2 , NO_3^- , H_2O , Ca^{++} , Mg^{++} y K^+ . Las sales se pueden perder del sistema por lavado aunque algunos iones pueden quedar retenidos por la superficie adsorbente del suelo sobre las arcillas, óxidos y humus preexistente. Dentro la acción de los agentes bióticos debe mencionarse a las enzimas cuya importancia fundamental se encuentra en los procesos de simplificación y síntesis de sustancias. También cabe mencionar la acción antrópica.

Las enzimas son catalizadores bióticos de reacciones diversas y tienen la propiedad de ser específicas y de facilitar reacciones que sin ellas requerirían condiciones energéticas con pH, temperatura o presión muy diferentes a las ambientales existentes en el suelo, o aun incompatibles con la vida. Las enzimas intervienen tanto en la degradación de los tejidos y de los compuestos orgánicos que los constituyen, como en la síntesis de sustancias húmicas (Kononova, 1966).

El papel de los microorganismos es decisivo para el desarrollo de estos procesos. Los microorganismos necesitan del carbono como fuente de energía, oxidándolo y parte lo devuelven a la atmósfera como CO₂ y el nitrógeno para incorporarlo a su protoplasma. Los heterótrofos y quimioautótrofos toman C, N y todos los demás nutrientes de los restos vegetales o del suelo.

3.4.1.2 Relación C/N del material orgánico a mineralizar

Es un parámetro que evalúa la calidad de los restos orgánicos para el desarrollo del proceso de mineralización.

El C en los restos vegetales es muy abundante, aproximadamente del 60 %, mientras que el N se halla en menor cantidad pero es el nutriente que se consume en mayor cantidad por lo que puede ser un factor limitante al competir las plantas y los microorganismos.

Como pauta general, cuando los restos orgánicos tienen una relación C/N superior a 80/1 se puede afirmar que los organismos vivientes que lo transformaran poseerán a su disposición compuestos energéticos pero de baja capacidad para su adecuada nutrición. Por lo tanto el crecimiento de la actividad biológica se verá restringido. Es el caso de la paja, henos o viruta de madera. Cuando C/N es inferior a 3/0, los restos contienen suficiente nitrógeno para intensificar y mantener la actividad microbiana de hongos, bacterias y actinomicetes. Es el caso pastos verdes, hojas de latifoliadas caducas y excrementos animales.

El tejido microbiano contiene importante cantidad de N con relaciones C/N de 1/20 a 1/10, por lo que las células microbianas se degradan más rápidamente que la celulosa. Esta circunstancia permite que los elementos nutritivos de los organismos muertos se reciclen fácilmente (Alexander, 1977).

En los suelos de condiciones intermedias de humedad y temperatura la C/N oscila en valores muy próximos a 10/1. Este valor difícilmente se modifica ante aportes de nuevos materiales orgánicos, como restos de cosechas por la relación de masas. No obstante cuando estos aportes poseen una relación C/N elevada afectan a la fertilidad del suelo hasta tanto se supere su mineralización primaria. Este proceso puede durar 30 a 90 días según las condiciones estacionales de humedad y temperatura.

El agregado de N inorgánico intensifica la degradación de la celulosa y es un factor de importancia agronómica en el tratamiento de los rastrojos

3.4.1.3 Principales sustratos de la mineralización primaria

Celulosa

El hidrato de carbono probablemente más abundante en la naturaleza es la celulosa. Es un polímero, formando una larga cadena lineal de carbonos de 2.000 a 15.000 moléculas de glucosa. En general forma parte de los tejidos de sostén, constituyendo las paredes celulares de las plantas, formando haces los que a su vez componen unidades mayores.

La degradación de la celulosa es cumplida principalmente por organismos aeróbicos y mesófilos, con actividad óptima entre 25 y 35 ° C. Otros hidratos de carbono más susceptibles a degradarse pueden estimular la síntesis de enzimas celulolíticas que hidrolizan la celulosa. El almidón como la celulosa es polímero de la glucosa pero, por particularidades en la estructura, el almidón es biológicamente más fácilmente degradable.

Hemicelulosa

Está formada por uno varios tipos de azúcares simples como xilosa, manosa, o galactosa. La estructura es compleja, pudiendo ser lineal o ramificada.

Las ramificaciones de la molécula hacen que ofrezcan más superficie de contacto y sean más fácilmente atacables por las enzimas que a la celulosa.

Ligninas

Componen entre el 15 y el 35% de las maderas. Son sustancias incrustantes que acompañan a la celulosa en las paredes celulares de tejidos vasculares cumpliendo funciones de sostén. También impregnan las células esclerenquimáticas en funciones de protección. Presentan pesos moleculares elevados con gran complejidad estructural. Si bien contiene solamente tres elementos C, H y O, presenta anillos aromáticos que le brinda mayor resistencia a la degradación enzimática.

Otras sustancias participantes.

- Otros hidratos de carbono: monosacáridos, disacáridos y pectinas. Estas últimas forman polímeros ácidos y neutros muy ramificados. Son el principal componente de la lámina media de la pared celular de células vegetales. Poseen resistencia a la degradación biológica.
- Compuestos orgánicos nitrogenados como proteínas, albúminas, aminoácidos, amidas y purinas.
- Otras sustancias en que en algunos casos son abundantes: taninos, resinas, terpenos, ácidos orgánicos, compuestos aromáticos, alcoholes.

3.4.2 Humificación

Al unísono de los procesos antes descritos se producen en forma conjunta la polimerización y policondensación de compuestos orgánicos sencillos. Así comienza una nueva etapa de reorganización, conservando sus estructuras para dar nuevo polímeros más estables. Esta nueva etapa de síntesis se caracteriza por la fijación de nitrógeno para originar los ácidos húmicos. El material amorfo formado va adquiriendo tono cada vez más oscuro hasta negro, en un proceso de melanización. Progresivamente aumenta su peso molecular y disminuye su solubilidad en agua. Otros compuestos aromáticos como ligninas, taninos, aminoácidos aromáticos, queratina, pectina o lignina de muy difícil mineralización, por su complejidad y alto peso molecular pueden pasar directamente a constituir parte de las sustancias húmicas. Si bien es un proceso muy lento se puede asumir que anualmente se forma humus en una cantidad variable de 10 % a 50 % de la biomasa aportada en el año. Gradualmente los productos transformados se van incorporando al suelo o integrando con la fracción mineral más fina, arcillas, formando el plasma órgano-mineral. Comenzando así a desarrollar un importante rol como estructurante, ligando a las partículas del esqueleto del suelo, limo y arena.

La naturaleza procede de una forma que incluye una cantidad de variables muy elevada, que los investigadores suelen tratar de reducir para elaborar hipótesis de trabajo abordable para entender un proceso de gran complejidad; así se consideran:

a) Hipótesis polifenolista

La humificación es el proceso mediante el cual las sustancias obtenidas por la mineralización primaria son resintetizadas y policondensadas. La resíntesis de estos compuestos ocurre en el protoplasma biológico mientras que la policondensación ocurre cuando son liberados al medio. La oxidación microbiana puede producir la formación de un anillo bencénico como algunas especies de bacterias generan compuestos aromáticos complejos aprovechando la energía química. Los hongos participan en la síntesis y transformación de compuestos fenólicos hacia ácidos húmicos.

b) Hipótesis ligninista

La materia orgánica proviene de la lignina en mérito a la analogía de comportamiento ante reactivos químicos. La humificación es el resultado de la degradación enzimática incompleta de las ligninas. La fracción de lignina no degradada y polimerizada da lugar a la formación de humus. Su composición se diferencia del humus, salvo el contenido de N que este último posee.

3.4.3 Mineralización Secundaria

La mineralización secundaria es un proceso más lento alcanzando a biodegradarse para liberar sus componentes hasta el 5 % anual de la materia orgánica del suelo. Su rol en la naturaleza es generar un equilibrio en el contenido de materia orgánica, característico de cada sistema ambiental y libera nutrientes para la actividad biológica.

Balance del proceso

Relacionando la cantidad y calidad del material aportado con la intensidad del proceso de mineralización primaria, el de humificación y el de mineralización secundaria obtenemos el balance del contenido de materia orgánica de los suelos. Generalmente se llega a un equilibrio muy estable como se describió anteriormente para los casos ambientales de la pradera pampeana, selva subtropical y monte. Las características del humus obtenido dependerán de las propiedades del suelo, las condiciones ambientales y de la naturaleza de los restos aportados. La producción agrícola ganadera puede afectar radicalmente a uno o todos los componentes del balance y es uno de los indicadores (Giuffré, 2008) de degradación de la salud del suelo.

El hombre ha producido la merma en el contenido de materia orgánica de los suelos por interrumpir el ciclo natural al exportar biomasa² y propiciar la mineralización secundaria mediante intenso laboreo y así obtener nutrientes para los cultivos. Existiendo prácticas conservacionistas que podrían mitigarlo.

3.5 Componentes de la Materia orgánica

Constituyen grupos heterogéneos que no están definidos por una composición determinada sino que se establecen sobre la base de su comportamiento frente a determinados reactivos. El humus al tratarlo con una serie de reactivos extractantes se separa en una serie de fracciones. A cada fracción extraída se le da un nombre.

Mediante los reactivos alcalinos, como la NaOH, se separan las huminas por ser insolubles de los ácidos fúlvicos y húmicos, que son solubles. Estos últimos se separan mediante tratamiento

² Compuesta por los productos orgánicos que consumimos –alimentos, fibras textiles, materiales de construcción– en las ciudades.

ácido, generalmente CIH; los ácidos fúlvicos son solubles en CIH mientras que los húmicos son insolubles.

El comportamiento frente a un electrolito diferencia dos fracciones de ácidos húmicos: ácidos húmicos pardos, solubles y ácidos húmicos grises, insolubles.

En el siguiente figura se presenta la secuencia de procedimientos y sus resultados:

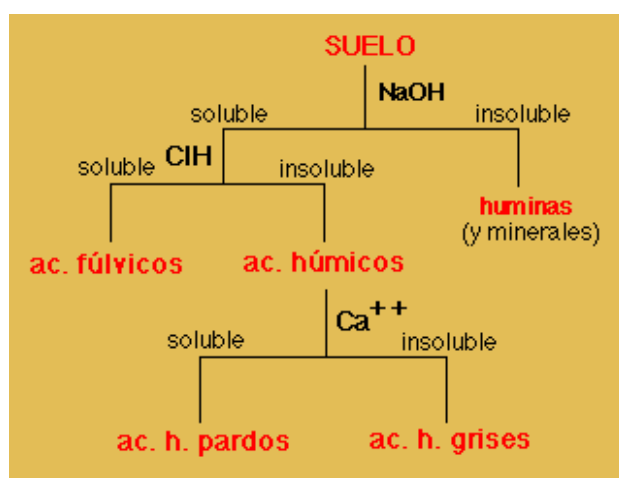


Figura 3.11 Fraccionamiento químico de la materia orgánica

3.5.1 Ácidos fúlvicos

Constituyen una serie de compuestos sólidos o semisólidos, amorfos, de color amarillento y naturaleza coloidal, fácilmente dispersables en agua y no precipitables por los ácidos, susceptibles en cambio de experimentar floculación en determinadas condiciones de pH y concentración de las soluciones de cationes no alcalinos.

3.5.2 Ácidos húmicos

Se presentan como sólidos amorfos de color pardo oscuro, generalmente insolubles en agua, pero fácilmente dispersables en las soluciones de hidróxidos sodio.

Desde el punto de vista estructural, su molécula es un núcleo aromático y radicales alifáticos.

3.5.3 Huminas

Las huminas se hallan retenidas en los agregados de la fracción fina del suelo mediante una serie de enlaces resistentes. Se trata de sustancias amorfas de colores oscuros, polímeros tridimensionales de elevado peso molecular, de carácter ligeramente ácido, constituidos por grupos funcionales:

- grupos aromáticos nitrogenados, como el indólico y el pirrólico,
- grupos bencénicos aromáticos, como el naftaleno y el benceno,
- grupos reactivos: hidroxilo, carboxilo, amino, metoxilo y
- cadenas alifáticas.

En síntesis, queda planteada una secuencia de que se asocia con el nivel de complejidad molecular de la sustancia identificada. Así los ácidos fúlvicos, primeros en solubilizarse se asocian con los ácidos jóvenes, menos polimerizados y de menor peso molecular. Físicamente poseen una baja relación con la fracción mineral por lo que su densidad es relativamente baja, inferior a 2 gr/cm³, lo que le da la denominación de carbono liviano. Si bien es arriesgado realizar un juicio de valor en forma de antípoda, podríamos enunciar que las fracciones insolubles son más estables, por su mayor peso molecular adquirido en un mayor tiempo de para aumentar la polimerización y policondensación, lo que le vale la denominación de carbono viejo. Su integración a la fase mineral es mayor, preferentemente a las arcillas formando complejos órganos minerales. Esta asociación puede determinar una densidad mayor, superior a 2 gr/cm³.

3.5.4 Relación ácidos fúlvicos/ácidos húmicos

Muy frecuentemente se establece que la relación existente entre ácidos fúlvicos/ácidos húmicos nos brinda una idea del estado evolutivo genético y de salud del suelo por efecto del manejo. Representa un estado de maduración de las sustancias húmicas. En una situación inicial o juvenil del proceso la relación será más alta que en un estado de maduración.

Varía considerablemente según las condiciones ambientales o de uso y por ende en los distintos ambientes paisajísticos:

- Pradera Pampeana, se observa un dominio de ácidos húmicos y huminas. Asociado a condiciones ambientales moderadas que lograron cumplirse los lentos procesos de polimerización y policondensación.
- Selva tropical, bosque andino-patagónico predominan los ácidos fúlvicos. Ambientes caracterizados por vegetación boscosa, por altas o bajas temperaturas pero siempre

con elevadas precipitaciones. En ambos casos asociados a la naturaleza original de los precursores húmicos ricos en tanino y lignina. Cabe destacar que en la selva las altas temperaturas, también inciden en la actividad biológica favoreciendo una más rápida mineralización secundaria. En los bosques fríos del sur es la baja temperatura el factor fundamental que controla la actividad biológica que no permite la evolución de la materia orgánica

- Monte patagónico, predominan los ácidos fúlvicos debido a la escasa oferta de material y la baja actividad biológica, condicionado por el déficit hídrico y las bajas temperaturas.

En el caso del uso del suelo durante la historia productiva de nuestro país se ha propiciado la exportación de nutrientes a partir de la mineralización de la materia orgánica, siendo las fracciones más jóvenes las primeras en degradarse haciendo descender la relación. Por otro lado no solo se afecta la relación numérica sino que la disminución de la materia orgánica joven repercutirá en el largo plazo porque no se formará materia orgánica vieja.

3.6 Propiedades de la Materia Orgánica

La Materia orgánica de los suelos es un indicador evolutivo y de la calidad del suelo, especialmente de su fertilidad física relacionado con el enraizamiento de las plantas, la disponibilidad de agua, aire y nutrientes.

La materia orgánica tiene una gran importancia en la **génesis y fertilidad** del suelo.

3.6.1 Influencia en la génesis

En la *génesis* del suelo representa a un factor de su formación y evolución. La actividad biológica actúa durante el proceso, en forma combinada con el material originario, el clima, el relieve propiciando la alteración de los minerales y los flujos de energía durante el tiempo que dure el proceso. Con la alteración de los minerales se produce la liberación de nutrientes como fósforo, calcio y magnesio mediante ácidos orgánicos de cadena corta que favorecen la hidrólisis ácida de los minerales y la quelación con ácidos láctico, butírico y acético o que se forman en solución por la respiración con el burbujeo del CO₂.

Se podría afirmar que el suelo es un sistema adaptativo de la naturaleza para generar un cuerpo natural sustentable, en permanente evolución. La actividad biológica modela al sistema acomodándolo a sus necesidades; reduciendo, reciclando y reutilizando sus estructuras orgánicas residuales. Siendo cada vez más estable y evolucionado, cuanto más veces se repita el proceso.

Taxonomicamente: define la nomenclatura de suelos a diferentes niveles taxonómicos, especialmente en Histosoles, Molisoles, Spodosoles y Alfisoles.

3.6.2 Fertilidad de los suelos

3.6.2.1 Aspecto físico

Desde el punto de vista físico, su efecto está relacionado con la organización de las fases sólida, líquida y gaseosa. La materia orgánica tiende a unirse con la fracción mineral, arcillas, óxidos de hierro y aluminio, formando complejos órgano-minerales, cuyas características se relacionan con importantes propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos. Por ejemplo:

- Estructura del suelo. El humus conforma los complejos arcillo-húmicos donde se une en forma elástica a las partículas coloidales del suelo. Las fracciones minerales y orgánicas organizan unidades estructurales más grandes y más complejas con aglomeración de partículas de diferente tamaño. Crean así un sistema de poros del suelo más estable ante la acción del agua y del pasaje de maquinaria.
- Aumenta porosidad, preferentemente macroporosidad y conectividad de poros, por la actividad de las raíces, canales de insectos y gusanos, lo que implica incremento de la permeabilidad al aire y agua.
- Adecua la consistencia disminuyendo la adhesividad y plasticidad en suelos arcillosos o aumentándolas en suelos arenosos.
- Mejora la infiltración de agua en el suelo y su distribución en el perfil. Aunque algunos componentes liofobos pueden afectar esta propiedad.
- Aumenta la profundidad efectiva del suelo y el mejor desarrollo de los sistemas radicales de las plantas incrementando su volumen de exploración (Henin, 1972).
- Mejora la aeración, favorece la actividad de los organismos aeróbicos del suelo y disminuye los riesgos de erosión.

- Favorece que el suelo retenga agua; la materia orgánica puede retener cantidades de agua superiores a la fracción mineral lo que facilita el asentamiento biológico, y obtención de cosechas. El compost por ejemplo puede retener 2 veces su propio peso en agua.
- Oscurece el color del suelo con lo que aumenta su capacidad de captar radiación solar. Resulta de ello una elevación de la cantidad de calor en el suelo aumentando la velocidad de las reacciones químicas. Es la consecuencia radiométrica de mayor interés la pérdida de reflectancia del suelo en el espectro visible.
- Su contenido atenúa los cambios bruscos de temperatura en el suelo por poseer calor específico más elevado y menor conductividad calórica que la fracción mineral del suelo.
- Es un actor importante en la fijación estable de carbono atmosférico y consiguiente fuente de energía. La materia orgánica de los suelos posee en promedio 58 % de carbono orgánico.
- La materia orgánica es un depurador ambiental al adsorber plaguicidas y otros contaminantes, evitando que estos percolen hacia los acuíferos.

3.6.2.2 Aspecto bioquímico y fisicoquímico

Desde este punto de vista, incide directamente en la nutrición de los seres vivos y en la administración de los iones contenidos en su composición por mineralización. Práctica que se ha explotado para la producción de cosechas y ha contribuido a la degradación de los suelos. Es la fuente de hasta el 98 % del nitrógeno y hasta igual cantidad de azufre y 30% a 50% de fósforo, que pueden necesitar las plantas.

- Forma complejos estables con Cu, Mn, Zn, Fe mediante quelatos que favorecen la movilidad de estos iones.
- Capacidad de cambio. La materia orgánica es un coloide que posee cargas en su superficie. Pudiendo variar su intensidad y signo de acuerdo al pH del medio. Predominan las negativas en la región pampeana, por lo adsorbe iones preferentemente positivos, administrándolos por intercambio catiónico (CIC) con la solución del suelo y las plantas.
- La CIC de la materia orgánica es superior al de las arcillas, debido a su mayor superficie específica (560–800 m²/gr). Por tanto es mejoradora de esta propiedad en todos los suelos y especialmente los de textura arenosa a arenosa franca.

- Influye en el pH. Tanto la respiración de los organismos del suelo como la mineralización de los compuestos orgánicos liberan CO_2 , que tienden a acidificar suavemente el suelo. Posee poder tampón frente a los cambios bruscos de pH.
- Presenta actividad redox, es dadora de electrones posibilitando así la reducción del O_2 durante la respiración y de diversos cationes como hierro y manganeso en el proceso de gleisación. Estos procesos liberan energía que se utilizan en los ciclos biológicos
- Baja o nula solubilidad en el agua lo que evita su pérdida por lavado del suelo que presentan comportamiento coloidal.

Las propiedades enunciadas son generales y su real efecto depende variables ambientales y de la dominancia de las sustancias húmicas presentes como se pretende ejemplificar en la siguiente Figura:

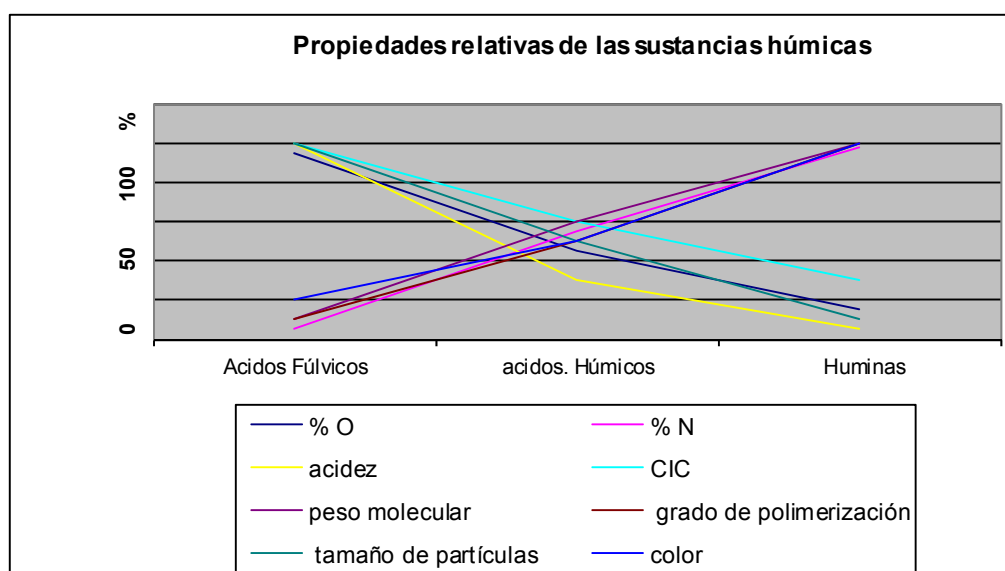


Figura 3.12 Propiedades inducidas por las sustancias húmicas

Los elementos componentes del proceso no responden a etapas que se proponen para su estudio, sino que representan un continuo por ello es conveniente observar sus relaciones presentes en cada caso como se discutió en el balance de la materia orgánica.

3.7 Clasificación ecológica de la Materia Orgánica

La materia orgánica del suelo un producto ambiental de la combinación de los factores formadores. Así es reconocido en los procesos edafogenéticos de humificación, melanización y leucinización por lo que es conveniente su clasificación ecológica siguiendo a Duchaufour, 1970, de simple reconocimiento macroscópico, que adaptamos a la Argentina.

3.7.1 Humus Mull

Es un producto donde no es posible reconocer la estructura de los elementos que lo generaron, de color negro que produce la melanización de los suelos. Es humus formado en clima húmedo-subhúmedo y templado a templado frío, con vegetación de pradera y asociado a suelos que se desarrollan en materiales originales ricos en nutrientes como es el loess pampeano. La pradera ocupa completamente la cobertura del suelo y también sus raíces finas exploran exhaustivamente los primeros centímetros del suelo incorporando material directamente al suelo. Podemos asimilar a la región pampeana productiva de nuestro país con suelos de pH cercanos la neutralidad, con complejos de intercambio ligeramente desaturados y con predominancia de Ca, bien aireados y una fuerte actividad biológica.

La relación C/N de los residuos incorporados, en general es baja, inferior a 25 no limitando la proliferación de los organismos. Tanto la mineralización primaria como la humificación son activas. Existe una proporcionalidad de sustancia húmicas de las ya señaladas como materia orgánica joven que con el transcurrir de muchos años se transforman en sustancias húmicas altamente polimerizadas y en parte ligada a la arcilla en complejos órgano-minerales denominada materia orgánica vieja o humus propiamente dicho.

En superficie es factible encontrar estructura migajosa y estable, adecuada distribución de tamaño de poros que aseguran correctas relaciones interfaciales suelo-agua-aire-plantas.

Estas características de calidad pueden perderse por el impacto agrícola. Podría degradarse por aumento de la tasa de mineralización secundaria y disminución del aporte de biomasa y exportación de nutrientes.

El mull es el tipo de humus que presenta frecuentemente los suelos de la República Argentina, no obstante que sus propiedades pueden declinar cuando las condiciones del medio transicionan hacia situaciones menos favorables. Por ejemplo, en zonas donde cobra importancia la vegetación

arbustiva, la proporción de residuos acumulados en superficie aumenta y la integración de la materia orgánica con el suelo es menos intensa. En este caso el humus puede tener la relación ácidos fúlvicos /ácidos húmicos superior, aunque también pueda obtenerse un humus tipo mull. En zonas templadas a subtropicales la intensa actividad biológica elimina rápidamente los residuos superficiales y el humus de tipo mull obtenido puede ser muy rico en ácidos fúlvicos y más amarillentos.

3.7.2 Humus Moder

Bajo bosque caducifolio, en suelos pobres y de baja saturación de bases y pH fuertemente ácidos, con predominio de hongos acidófilos; se reconoce un horizonte orgánico "O" de pocos centímetros, que pasa a un horizonte A1 oscuro no estructurado. Este humus no presenta complejo arcilla-humus y es posible reconocer algunos componentes originales de la materia orgánica que le dio origen. Las sustancias húmicas están poco polimerizadas predominando los ácidos fúlvicos con ácidos húmicos pardos, muy escasa humina. Estas condiciones suelen darse en las isletas de bosque de la región mesopotámica y chaqueña de Corrientes, Chaco y Formosa (Lanfranco *et al.*, 2011).

3.7.3 Humus Mor

Este tipo de humus es característico de las regiones frías y lluviosas de nuestro país, a lo largo de la cordillera de Los Andes desde Neuquen a Tierra del Fuego. La vegetación predominante es de bosque resinoso de coníferas que producen una acumulación de materia orgánica superpuesta al suelo mineral en forma de mantillo. Está constituido por restos de las partes aéreas, que conservan parte de su estructura original en un horizonte orgánico "O", no integrado con la fracción mineral. Los residuos de las hojas aciculares son acidificantes, producen pH del orden de 3,5-a 4,5; tienen una relación C/N alta de 30/1-40/1, un porcentaje de saturación de bases muy bajo. La circunstancia de ser de forma acicular y resinosa hace difícil su degradación mecánica.

Los organismos que habitan el suelo son abundantes pero su actividad se ve regulada por las bajas temperaturas, la falta relativa de N y las condiciones del medio edáfico. Por lo cual la mineralización primaria es muy lenta y de igual manera la humificación. Predominan los ácidos de cadena corta como compuestos solubles que suelen generar quelatos acomplejados con Fe^{++} que se translocan originando al horizonte B spódico (Bhs). La polimerización es lenta y parcial, formando ácidos fúlvicos y húmicos pardos.

Existen variaciones de este tipo de humus en condiciones de drenaje restringido. La turba es un ejemplo obtenido en extrema condición y responde a un sustrato que es extensamente usado en horticultura y floricultura.

3.8 El impacto de la producción sobre la materia orgánica

El hombre forma parte de la actividad biológica con diferente comportamiento e intencionalidad variando desde el papel de cazador/recolector a productor de alimentos para su consumo y luego para abastecer mercados cada vez más importantes pertenecientes al sector industrial primario llegando prácticamente una extracción minera en aras del agronegocio.

Los nutrientes en el suelo en producción son frecuentemente factores limitantes para el crecimiento de los cultivos³.

Argentina ha incrementado notablemente el uso de fertilizantes en los últimos 15 años aunque en menor cantidad que los nutrientes lo exportados por las cosechas. La estimación indica que se repuso vía fertilización el 28% N, el 42% de P, menos del 2% de K y el 13% de S de la extracción en grano para la campaña 2004/05, (García, 2006). Surgen importantes interrogantes para la producción sustentable:

¿Con solo estos aportes, porque aumenta el rendimiento unitario?

El interrogante se crea ya que la oferta de nutrientes mediante la fertilización de 2 o 3 elementos a lo sumo cuando la planta necesita 16 esenciales entre macro y micronutrientes y moviliza hasta 60 elementos en su fisiología. El déficit es cubierto por el suelo en sus nutrientes adsorbidos en la CIC y en la mineralización secundaria de la materia orgánica.

La materia orgánica es el indicador utilizado con más frecuencia por los investigadores para evaluar impacto de la producción y la salud del suelo.

Es probable que se opere con los nutrientes que mejor respuesta generen en los cultivos pero también es posible que esos mayores rendimientos conlleven a que el suelo entregue una cantidad mayor de los demás elementos que requiere la planta acentuando el agotamiento del suelo y la

³ Macronutrientes: nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S).

Micronutrientes: (Cl), hierro (Fe), boro (B), manganeso (Mn), sodio (Na), zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni) y molibdeno (Mo) y silicio (Si)

Esta clasificación no es necesariamente estricta pudiendo encontrarse nuevos elementos con el avance científico.

degradación de la materia orgánica. De alguna manera se practica la ley del mínimo de Liebig, supuestamente en desuso en donde se fertiliza con el nutriente que está en menor proporción.

Si recordamos el concepto del balance de la materia orgánica aquí quedaría planteado que parte de la oferta de biomasa se exporta del sistema por las cosechas y parte de la mineralización de la materia orgánica proporciona los nutrientes necesarios. El resultado es en general negativo.

Con siembra directa y rotaciones que incluyan ganadería, pasturas y cultivos gramíneos se ha demostrado que el balance de la materia orgánica podría ser positivo. Aunque no se observaría una ganancia neta de nutrientes, que se produciría si se aportaran otros residuos ajenos al sistema.

El agotamiento de nutrientes y degradación por acidificación no ha sido solucionado en ningún caso de cultivos extensivos.

La materia orgánica de los suelos posee en su composición todos los nutrientes que la actividad biológica requirió y movilizó desde la fracción mineral del suelo y de la atmósfera. Las nuevas generaciones de organismos vivos requieren el aporte y la absorción de compuestos químicos necesarios para el crecimiento, metabolismo y desarrollo que se denomina nutrición. La materia orgánica del suelo pone en solución los nutrientes mediante el mecanismo de intercambio iónico y mineralización, especialmente de las fracciones más jóvenes.

Con la mineralización se disminuye el contenido de materia orgánica del suelo que ha sido incentivado por la tecnología de producción. Nuestro país ha desarrollado más de un siglo de agricultura basada en el uso del arado de reja y vertedera, algunos de cuyos objetivos es producir desagregación, forzar la aireación y dejar una superficie desnuda libre de malezas. Desde el punto de vista de su impacto sobre la materia orgánica esto aceleró la actividad microbiana, favoreció la oxidación del C de la materia orgánica propiciado por el aumento de la temperatura del suelo desnudo.

Las cosechas en nuestro país se ven beneficiadas por la degradación de materia orgánica de sus suelos constituyendo un costo oculto de producción.

Sin embargo el efecto dañoso era mitigado por una agricultura de rotación con praderización y ganadería en periodos prolongados, y además obteniéndose rendimientos notablemente inferiores a los actuales, debido a otros factores como genética y sanidad.

En los últimos 25 años se han desarrollado tecnologías más cuidadosas sobre la materia orgánica de los suelos incorporando el sistema de rotación de cultivos continuos con siembra directa. La

inclusión de trigo y/o maíz en la rotación ha mejorado el contenido de materia orgánica del suelo y balance de nutrientes (García, 2007).

Sin embargo por razones de índole económica y falta de control del estado se ha tendido a la siembra directa en monocultivos de soja retrocediendo en el avance logrado.

Probablemente los efectos más notables en el deterioro de la materia orgánica se note en clima subtropical. Así en Formosa, Baridón, 2015, encontró luego de 25 años que la materia orgánica en los primeros 10 cm de suelo disminuyó significativamente comparando la actividad agrícola o frutícola con respecto al monte nativo.

Consecuencias de impactos negativos

- La *erosión* ya sea hídrica o cólica, es una de las pérdidas mecánicas más importantes de la materia orgánica que afecta millones de ha en nuestro país. Por su impacto se pierde la parte más rica del suelo que contiene la materia orgánica. La utilización de prácticas conservacionistas podría evitar que se pierda un mínimo de 6 toneladas/ha.año, considerada erosión leve.

-



Figura 3.13 Izquierda encostramiento laminar en Alfisoles de Formosa. Derecha Cárcava de erosión. Laguna Yema Formosa.

La *decapitación* de suelos representa en áreas periurbanas la mayor degradación del suelo superficial, vendido como tierra negra o de jardín. Deja un suelo sin su horizonte superficial en forma parcial o completa, empobreciéndolo en materia orgánica (Lanfranco *et al.*, 2011).



Figura 3.14 Izquierda decapitación de suelo para venta de tierra “jardín” (prohibida); centro espesor remanente del horizonte superficial en suelo decapitado y derecha cobertura vegetal característica de suelo decapitado. La Plata

- La *quema* de vegetación viva o muerta, incluyendo pastizales, bosques (Mielnicki *et al.*, 2016) y residuos agrícolas, increíblemente es una práctica habitual en el manejo de la producción en muchas regiones. Sus objetivos:
- Aumentar la frontera agrícola en cultivo de soja en NOA (Casas, 2009)



Figura 3.15. Desmonte para soja en Salta

- Convertir montes en pastizales o cultivos, como arrozales en Formosa



Figura 3.16 Eliminación del monte para agricultura, ganadería en Formosa (Baridón, 2012)

- Agricultura itinerante en áreas tropicales (Río Branco, Brasil) para despejar la selva y aprovechar los nutrientes de la ceniza. Agotada esta fertilidad se vuelve a proceder de igual manera en otra área.
- quema prescrita para rejuvenecimiento de pastizales, aprovechando los rebrotes tiernos (Chaco, Formosa).
- quema de residuos de cosechas (forestal en Bragado, hortícola y florícola en Gran La plata)

3.9 Compostaje de residuos

Se tratará el aporte de los residuos de cosecha, industriales y urbanos como materia orgánica compostada.

3.9.1 Los residuos en la naturaleza

En la naturaleza los residuos que generan los seres vivos son generalmente asimilados y transformados biológicamente para afianzamiento de los ecosistemas. Por lo tanto, en el medioambiente los residuos se reciclan continuamente concentrándose en los primeros centímetros del suelo con lo cual se ve aumentada la fertilidad natural y sustentabilidad. El manejo adecuado de los residuos llevaría al hombre a integrarse al ciclo de la materia orgánica en la naturaleza contribuyendo de manera importante a su sostenibilidad en el planeta y por ende al de los sistemas productivos.

Durante la historia de la producción extensiva en la Argentina se puede afirmar que los residuos agrícola-ganaderos y de cultivos intensivos no fueron considerados como elementos de aporte a la fertilidad. Existe una tendencia excrementicia en la conducta del hombre que lo conduce a deshacerse de los residuos ignorando el valor que estos poseen. Es solo apreciar el entorno de actividades modernas como el feedlot, criaderos de aves, criaderos de cerdos, horticultores, floricultores y se percibirán olores, contaminación de suelos, cursos de agua y agua subterránea. Se incluyen a los productos concentrados en las ciudades cuyos restos, residuos sólidos urbanos, se disponen en rellenos sanitarios. Existe una tendencia a revertir esta situación evaluando el estado de situación y para obtener abonos y energía que hasta el presente no se ha generalizado (Sangiaco, 2015).

Aspectos históricos

Desde el inicio de la actividad productiva en nuestro país hasta nuestros días el fuego constituye una herramienta de manejo agrícola- ganadero denominado fuego prescripto. Son históricas las quemas de residuos de cosecha de algodón, bagazo de caña de azúcar y rastrojo de cereales. En la primera década de 1900 Argentina era el primer exportador de trigo con una superficie sembrada de aproximadamente 3 millones de hectáreas que llegó a aproximadamente 9 millones de hectáreas en el año 1928 (Bolsa de Cereales de Buenos Aires, 1939). Prácticamente todos los rastrojos remanentes fueron quemados, por falta de conocimiento, contribuyendo a la pérdida más importante de la materia orgánica de los suelos en la historia agrícola del país, considerado en aproximadamente el 50 % del stock original (Casas, R., 2000).

Se pueden considerar 4 etapas en el tratamiento de los rastrojos de trigo en los últimos 120 años:

- Recolección a mano del trigo, engavillado, acumulación de residuos y quema
- Introducción de maquinaria segadora, hileradora, trilladora estacionaria⁴. La cosecha se trillaba en un solo punto. Luego la introducción de cosechadora automotriz sin cola desparramadora⁵. En todos los casos los grandes volúmenes de residuos dificultaban proseguir con nuevas tareas, por lo que se quemaban.
- Introducción de cosechadora picadora de rastrojo con cola desparramadora. Aproximadamente año 1950. Los rastrojos picados y desparramados eran factibles de incorporarse al suelo en barbechos largos para el monocultivo de trigo. En algunos casos se introducía la ganadería para aprovechar los rastrojos
- Valorización de los rastrojos en siembra directa y recomendación de trigo para rotaciones con soja para atenuar la degradación de la materia orgánica. La incorporación de rastrojos secos de cereales en suelos genera una actividad biológica intensa y con contenidos en nitrógeno relativamente alto resulta beneficiosa pues facilita el desarrollo microbiano e incrementa el contenido orgánico del suelo. Sin embargo ocurre una primera fase depresiva en que el suelo debe ceder N y otros nutrientes para el desarrollo de las poblaciones de microorganismos. Durante ese periodo las plantas deben soportar una competencia que les resta fertilidad.

Otra práctica mejoradora de esa limitación es la incorporación de leguminosas como abonos verdes con una relación C/N aproximada a 15/1 lo cual provoca una liberación inmediata de nitrógeno utilizable por las plantas.

⁴ En Tres Arroyos, provincia de Buenos Aires, Juan Istilart produjo en 1916 la primera trilladora a vapor.

⁵ Antonio Rotania, en 1929 fabrica la primera cosechadora automotriz del mundo.

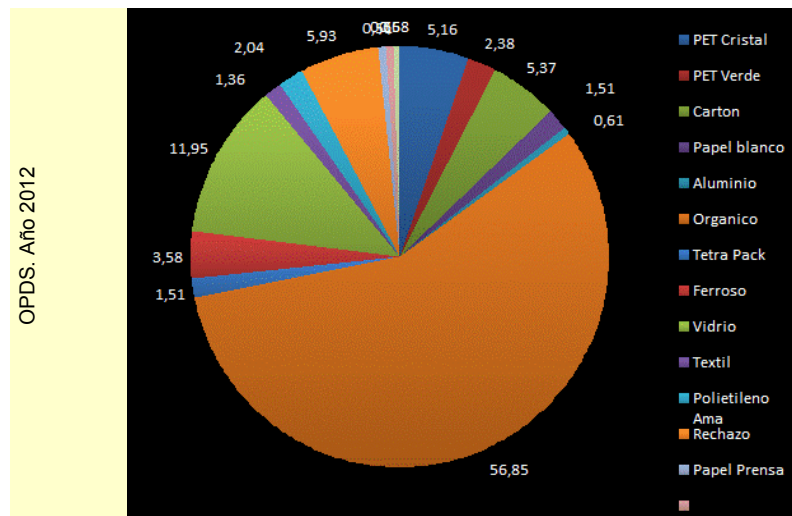


Figura 3.17 Distribución porcentual de los residuos sólidos urbanos. Obsérvese la importancia de los residuos orgánicos.

3.9.2 Identificación de los residuos

En los últimos años se ha incrementado progresivamente el volumen de residuos y la cantidad de materia orgánica que se desecha. Esto plantea graves problemas para la sociedad tales como:

- eliminación de los residuos
- su incidencia en la conservación del medio ambiente.
- contaminación.

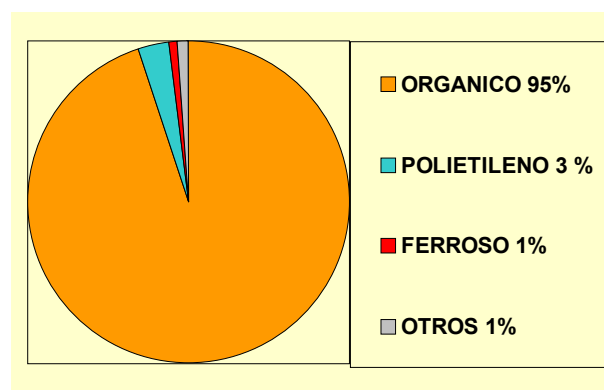


Figura 3.18 Distribución porcentual de los residuos sólidos en feedlot. La participación de los residuos orgánicos es mayoritaria y permitiría tecnificar su aprovechamiento

Fuente propia 2016

Los residuos orgánicos biodegradables en el corto plazo podrían ser utilizados por el hombre para favorecer la dinámica de la materia orgánica mediante el compostaje. Su origen puede ser de tipo animal, vegetal y todos aquellos materiales que contengan básicamente carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno fácilmente degradables:

- Residuos domiciliarios generados en los hogares como papel-cartón, servilletas, toallas de papel, residuos de comidas;
- Residuos municipales como barrido de hojas, veredas y calles, corte de pasto, maderas, podas, aserrín;
- Restos de cosechas como tubérculos, flores, hortalizas y frutas, restos de podas en fruticultura, de actividades forestales;
- Residuos de grandes emisores de restos de alimentos como mercados centralizadores supermercados, restaurantes, comedores universitarios, unidades penitenciarias, comedores comunitarios;
- Cama de animales en studs y criaderos aviares o ponedoras, deposiciones de animales domésticos y de establecimientos;
- Residuos industriales de frigoríficos, conservas, vinos, cerveza, jugos, restos de semillas o de frutos una vez extraído el elemento esencial, carpintería, restos de maderas procesadas;
- Estiércol bovino, caballar, caprino, porcino, aviar y de conejos de productores intensivos.
- Restos de animales, mortalidad aviar;
- Restos industria textil.

3.9.3 Compostaje

La reducción, reutilización y reciclaje de los residuos biodegradables debería ser un objetivo prioritario de las políticas medioambientales.

El objetivo del tratamiento de los residuos orgánicos urbanos, rurales e industriales se basa en favorecer los procesos de la naturaleza para acelerar su transformación y relativa estabilización (Lanfranco *et al.*, 2012).

El compostaje se define como un proceso de transformación aerobia controlada de los materiales orgánicos contenidos en los residuos por medio de la actividad de los microorganismos. Este proceso transcurre en un tiempo variable de aproximadamente 3 a 4 meses cumpliéndose tres fases en función de la temperatura que adquiere cada una: inicialmente mesófila (15 a 45°C), posteriormente termófila (45 a 70 °C) y finalmente de maduración a temperatura ambiente

obteniendo la transformación de un residuo orgánico en un producto estable, que puede estar libre de patógenos y ser aplicado al suelo.

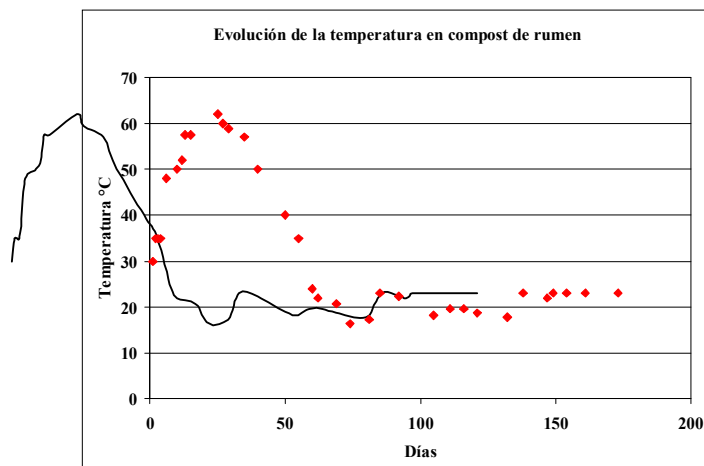


Figura 3. 19 Seguimiento del proceso de compostaje. P. Gelati

3.9.4 Diferencias entre el humus propiamente dicho y el compost

¿El compost es humus?

El humus es un producto ambiental que llega a su expresión inicial o juvenil en aproximadamente 80 años. El compost, obtenido en meses, es una sustancia estabilizada con propiedades similares al humus, con características definidas como son la estabilidad ante el agua, homogeneidad, inocuidad y alto valor para uso agrícola; según las propiedades originarias del residuo.

3.9.5 Factores que afectan al compostaje

- **Humedad:** Es un factor fundamental del proceso de compostaje. Con contenidos menores al 40% la actividad microbiana disminuye y el proceso se vuelve excesivamente lento, y con demasiada humedad (mayor del 80%) se produce una mala aireación que conduce a condiciones anaerobias y a la putrefacción de la materia orgánica.
- **pH:** Es otro de los indicadores del desarrollo del compostaje, debido a su acción sobre los microorganismos. Durante el compostaje hay una sucesión de diversos microorganismos y procesos derivados de su actividad que pueden hacer que el pH varíe considerablemente. Los residuos urbanos pueden presentar un valor bajo de pH, produciéndose durante los primeros días la liberación de ácidos orgánicos debido a la

actividad de las bacterias, con lo que el pH disminuye aún más. Posteriormente, el material compostado sufre una reacción alcalina como consecuencia de la formación de amonio en el proceso de degradación de las proteínas y los aminoácidos. En el período clímax de la fase termófila, se pueden alcanzar valores de pH próximos a 8,5. Es en la última fase de maduración donde el pH disminuye, estabilizándose en valores cercanos a la neutralidad o ligeramente básicos, debido al efecto tampón de la materia orgánica.

- Relación C/N: Como describimos, el carbono y el nitrógeno son dos constituyentes básicos de la materia orgánica y es base para elegir los residuos más apropiados. Durante la transformación de los residuos el C brinda energía a los microorganismos y el N permite la formación de sus proteínas. Teóricamente, la relación C/N 25-35 es la más adecuada.

Papel	170/1
Pasto fresco	10/1
Hojas (según especie)	Entre 40/1 y 80/1
Desechos de fruta	35/1
Estiércol de vaca descompuesto	20/1
Tallos de maíz	60/1
Paja de trigo	80/1
Alfalfa	13/1
Leguminosas en general	25/1
Paja de avena	80/1
Cáscara de papas	25/1
Aserrín	500/1

Figura 3.20 Relación C/N de algunos materiales orgánicos (Pellegrini, 2014)

El compost es un producto es relativamente estable y continúa su proceso de maduración por años. En este estado aparece en la comercialización como tierra enriquecida, sustrato para plantines en huertos y viveros. Los antecedentes en cultivos extensivos son escasos (Gomez, 2004).

3.9.6 Lombricompostaje

El lombricompostaje es una práctica recomendable y beneficiosa en el manejo de los residuos orgánicos para perfeccionar y brindar mayor evolución al material obtenido durante el compostaje, (Pellegrini *et al.*, 2014). Es un procedimiento especial basado en la actividad transformadora de la materia orgánica por medio de distintas especies de lombrices (Ferruzzi, 1987). De esta manera se obtiene una sustancia parecida al humus con un alto grado de transformación, estabilizada, en un

tiempo relativamente corto y con posibilidades de uso inmediato como abono orgánico, acondicionador de suelos o sustrato de cultivos (Pellegrini, 2014).

COMPARACIÓN DE RESULTADOS ANALÍTICOS DE LABORATORIO

Determinación	Unidades	1. Conejo	2. Stud	3. Gallinaza	4. Papel
1 pH (pasta)		6,9	7,0	7,5	7,9
2 C.E.	[dS.m ⁻¹]	2,8	6,7	25,4	s d
3 C	[%]	20,0	19,3	28,7	30,3
4 M.O.	[%]	47,8	46,9	36,2	s d
5 Nt	[%]	1,8	1,4	5,5	0,2
6 C / N		11	13	5	157
7 Pt	[%]	s d	0,2	0,4	s d
8 Kt	[%]	s d	0,4	3,5	s d
9 Na t	[%]	s d	s d	4,3	s d
Retención hídrica					
10 0,3 atm		88	s d	s d	116
1 atm		83	s d	s d	99
11 Densidad real	[gr.cm ⁻³]	1,7	s d	s d	s d

Figura 3.21 Análisis de diferentes compost. P. Gelati.

Eisenia foetida "lombriz del estiércol" o "roja californiana" es la lombriz más utilizada para producir "humus de lombriz". Para vivir necesitan grandes cantidades de materia orgánica. Es capaz de vivir en los residuos y compost sin necesidad de entrar en contacto con la fracción mineral del suelo (Meinicke, 1988). Poseen tendencia a ponerse en contacto por lo que se agrupan, propiedad que se denomina tigmotropismo positivo. Esta propiedad permite alcanzar altas concentraciones (100.000 a 200.000 individuos/m³) de animales consumiendo residuos y acelerando su transformación.

Son hermafroditas de fecundación cruzada. Transcurridos aproximadamente 21 días desde la unión de las gametas y se forman las cápsulas o cocones que contienen los huevos, con unas 2 a 3 lombrices por cocón. En 40-60 días se transforman en adulto y pueden repetir el ciclo. Lo cual asegura un rápido aumento de la población.



Figura 3.22 Izquierda colonización del sustrato por la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) Derecha lombricompost

3.10 Aumento de contenido de materia orgánica al suelo por adición de compost

El agregado de compost constituye una ganancia neta de materia orgánica para el suelo, pero esta materia orgánica no permanece de forma indefinida en el suelo sino que, tras un tiempo, sufre el ataque microbiano y termina mineralizándose y desapareciendo como tal en función del balance entre coeficientes de humificación y de mineralización.

Para mantener el contenido de materia orgánica del suelo mediante la aplicación de enmiendas orgánicas podemos estimar las necesidades, de forma aproximada, conociendo el valor de materia orgánica agregada y su tasa de mineralización. O sea cuanto de lo agregado se perderá en el año. Las variaciones dependerán entre otras cosas de la relación C/N, ya discutida. También puede influir el clima y la textura. Así en climas templados fríos y subhúmedos de textura fina con un menor grado de macroporosidad la tasa de mineralización será menor. En el clima cálido la mineralización puede ser varias veces más alta.

Bibliografía

- Alexander, M. (1977). *Introduction to Soil Microbiology*. Wiley. N. Y. 456 p
- Baridón J. (2015). Cambios físicos, químicos y microbiológicos en suelos Subtropicales de la provincia de Formosa ante el proceso de agriculturización. Un aporte al conocimiento de la Calidad del suelo y sus indicadores. Tesis Doctoral. Inédito. FCAyF. UNLP
- Baridón, E.; A. Pellegrini; J. Lanfranco y V. Cattani. (2012). Variación de la fracción orgánica por agriculturización en Alfisoles subtropicales de Argentina. *CienciAgro, Journal de Ciencia y Tecnología Agraria*, 2 (3): 371-378
- Bolsa de Cereales de Buenos Aires, Número Estadístico García-Mata, Rafael y Emilio Llorens. Argentina económica 1939. Buenos Aires, 1939. 271 p.
- Buckman, H., Brady, N. (1966). *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Montaner y Simón. Barcelona.
- Casas, R. y M.I. Puentes. (2009). Expansión de la frontera agrícola en la región Chaqueña: impacto sobre la salud de los suelos. p 247-270. En "El Chaco sin bosques: La Pampa o el desierto del futuro". Editores: Jorge Morello y Andrea Rodríguez; 2009. Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires, Argentina. 432 p.
- Casas, R. (2000). *La Conservación de los Suelos y la Sustentabilidad de los Sistemas Agrícolas*. INTA Premio Ing. Antonio Prego.
- Conti M. Ed. (1998). *Principios de Edafología con énfasis en suelos argentinos*. Ed. Distribución Orientación Gráfica Editora S.R.L., Buenos Aires, Argentina.
- Da Silva, H. (1985). *Curso de Edafología*. 4. *Materia Orgánica*. UNCA. FCA. Inédito. 46 p.
- Edafología. (2012). *Materia Orgánica. Guía de Trabajos Prácticos*. Vázquez, M., CEA. FCA y F., UNLP.
- Ferruzzi, C. (1987) *Manual de Lumbricultura*, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Galantini, J.A. y Suñer L. (2008). Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina *Agrocientia* vol XXV (1) 41-55.
- García C.; F. Gil; T. Hernández; C. Trasar. (2003). *Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en Suelos: Medida de Actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana*. Mundi-Prensa, 372 pp.
- García Fernando O. (2007). Balance de Nutrientes del sistema Trigo-Soja-Maíz: Balance necesario para un buen cultivo de trigo. *INPOFOS* Número 33.
- Giuffré, L.; S. Ratto y R. Romaniuk. (2008). Indicadores Ambientales. En: *Agrosistemas: Impacto Ambiental y Sustentabilidad*. Lidia Giffre, Editora. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires, pp 1-17

- Henin, S., Gras, R., Monnier, G., (1972). El perfil cultural. Mundi-Prensa. Madrid.
- Imbellone, P., Jiménez, J., Panigatti, J. (2010). Suelos de la Región Pampeana. Procesos de Formación. INTA.
- Kononova M. (1966) Soil Organic Matter. Ed. Pergamon, Press, London.
- Lanfranco, J. y Pellegrini, A. (2011). "Efectos de la decapitación sobre un suelo del Gran La Plata". Ciencia, Vol. 6, Nº 22, pp 113-120.
- Lanfranco, J. y Palancar T. (2012). Reducción de residuos orgánicos. Proyecto de extensión de la UNLP.
- Lanfranco, J.; E. Baridón y A. Aragón. (2011). Manual de pautas y procedimientos para la evaluación y manejo del recurso suelo. Área subtropical norte de Formosa. 1° ed. Formosa: Prodeco 2011. ISBN 978-987-27497-0-5. 94pp
- Meinicke, A. (1988). Las Lombrices, Editorial Hemisferio Sur, Montevideo. Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Mielnicki, D. M., Canziani P.O., Drummond, J., Skalany J.P. (2015). La quema de biomasa en sudamérica vista desde el espacio. Programa de Estudio de los Procesos Atmosféricos en el Cambio Global. Universidad Católica Argentina. University of Toronto – Canada.
- Pellegrini A. y Lanfranco J. (2014). Efecto del lombricompost sobre la producción de alfalfa y raigrás en dos suelos diferentes. El reto del desarrollo sostenible: Estrategias y Acciones. Diálogos y Propuestas. Línea Científica 1a. Ed. Catamarca. Universidad Nacional de Catamarca, 2014. E-Book ISBN 978-950-746-227-6. 1. Medio Ambiente. CDD 577.
- Pellegrini, A., Lanfranco, J., Vacisek, A., Gelati, P., Palancar, T. (2014). Capacitación para el reciclado de residuos orgánicos. ISBN 978-987-05-4990-1. 77. p
- Porta J., López Acevedo M., Roquero C. Eds. (1999). Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente – Ed. Mundi Prensa, Madrid, España.
- Primavesi, A. (1999). Manejo Ecológico del Suelo, El Ateneo, Buenos Aires. 1982.
- Sangiacomo, Miguel Angel, Coordinador programa "Manejo de residuos de producciones animales intensivas (avícola, porcina y bovina), hacia una gestión sustentable", 2015. INTA-AUDEAS - CONADEV, CIAC-940149.

CAPÍTULO 4

Macronutrientes del suelo

Andrea Edith Pellegrini

Todas las plantas en su ciclo vegetativo requieren de elementos nutritivos para un desarrollo favorable y una buena producción.

En este capítulo se presentan los macronutrientes, los que están presentes en el tejido por encima del 0.1% de la materia seca -N, S, P, K, Ca y Mg-.

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO,
ANDREA PELLEGRINI, SUELO EN EL PAISAJE

4.1 NITRÓGENO

4.1.1 Aspectos generales

El suelo hereda de su material originario la provisión inicial de casi todos los nutrientes para las plantas. La meteorización junto con el tiempo pone a disponibilidad los iones nutrientes. El 98 % de nitrógeno se encuentra en las rocas, 2% en la atmosfera y < 1% en el suelo y agua (William y Seese 1996). Sin embargo si hacemos referencia al nitrógeno de las rocas ígneas y metamórficas hay que remarcar que debido a su muy baja disponibilidad no representa una fuente de importancia para la biosfera, se alejan del marco de la evaluación agronómica y por lo tanto no participa en el flujo del nitrógeno del suelo.

En el flujo del nitrógeno en el sistema atmósfera-suelo-planta (Figura 4.1) la principal fuente de este elemento se encuentra en la atmosfera, que contiene 78%, en estado libre como nitrógeno diatómico N_2 , forma no disponible para los vegetales.

La molécula atmosférica es N_2 , presenta un triple enlace covalente ($N \equiv N$), se trata de un gas incoloro, inerte e insípido a temperatura ambiente. Se licua a $-196^\circ C$.

El N tiene estados de oxidación que van desde +5 a -3 (tabla 4.1), siendo las formas más estables en condiciones oxidantes: N_2 y NO_3^-

Las formas en que el N es asimilado por las plantas son NO_3^- y NH_4^+ mediante procesos de flujo masal principalmente.

El conocimiento de los procesos del flujo y como la actividad humana puede modificarlos es fundamental para tomar medidas que cuiden el ambiente y permitan optimizar la producción.

Las cantidades de N presentes en los suelos dependen especialmente de las condiciones climáticas, la vegetación, la actividad microbiana, la topografía, el material parental, la actividad del hombre y el tiempo. La mayor parte del nitrógeno en el suelo se encuentra en combinación orgánica (99%- 95%), como constituyente de la materia orgánica edáfica. Solo una pequeña fracción se encuentra en combinaciones inorgánicas, fundamentalmente como NH_4^+ en su forma catiónica, y como NO_2^- y NO_3^- en su forma aniónica.

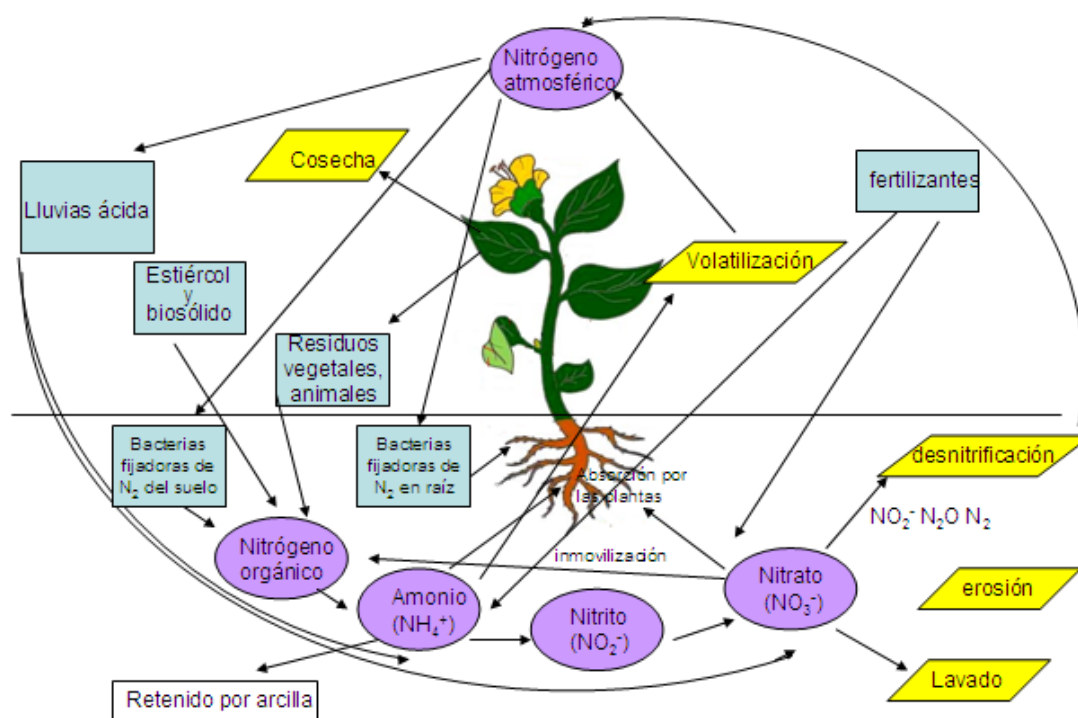


Figura 4.1.1 Flujo del nitrógeno en el sistema atmósfera -suelo-plantas

El N orgánico, se forma a expensas de restos animales y vegetales, aproximadamente, el 50 % es en gran parte de naturaleza química desconocida. La parte restante: proteica, 40 %, principalmente aminoácidos por ejemplo lisina, alanina, glicina, ácido aspártico, treonina entre otros; 5-10% aminopolisacáridos (glucosamina, galactosamina) y 2% ácido nucleico (purinas y

pirimidinas) (Fassbender, 1984). Muchos de estos compuestos orgánicos al formar complejos con el material arcilloso se hacen más resistentes a la descomposición.

A fin de que el nitrógeno este nuevamente disponible para las plantas, la materia orgánica debe seguir la vía de la mineralización, que consiste en pasar de forma orgánica a inorgánica. La tasa de mineralización para zonas templadas es entre el 1 al 3% (FAO, 1995). La acción microbiana descompone la materia orgánica, inicialmente se forma NH_4^+ (amonificación) luego a NO_2^- y NO_3^- (nitrificación). Estas tres especies en general no superan el 2% del N total, de ahí la importancia de la tasa de mineralización desde el punto de vista de la nutrición vegetal.

A través de procesos conocidos como desnitrificación y degradación de NO_2^- pueden aparecer formas gaseosas como N_2O (óxido nitroso de importante efecto invernadero), NO (óxido nítrico), NO_2 (dióxido de nitrógeno). El NH_3 constituye otra forma gaseosa del N edáfico cuando el pH es elevado y la condición es de sequedad. Todos estos procesos se profundizarán en los apartados siguientes.

Compuestos (fórmula)	Estado de oxidación
N orgánico (R-NH_2)	-3
Amoníaco (NH_3)	-3
Nitrógeno gaseoso (N_2)	0
Óxido nitroso (N_2O)	+1
Óxido de nitrógeno (NO)	+2
Nitrito (NO_2^-)	+3
Bióxido de nitrógeno (NO_2)	+4
Nitrato (NO_3^-)	+5

Tabla 4.1.1 Compuestos, formulas y estado de oxidación del nitrógeno

4.1.2 Fijación del N atmosférico

La **fijación** del N atmosférico puede ser:

Sin intervención de microorganismo, llamada fijación **abiológica** ($5\text{-}10 \text{ kg ha}^{-1}$ de N por año). Se da por procesos químicos espontáneos como la oxidación de nitrógeno atmosférico por acción de rayos solares, descargas eléctricas; lluvias ácidas principalmente en zonas industrial contaminadas por gases y humos o por adsorción de N orgánico en partículas de polvo.

La fijación **biológica** de nitrógeno atmosférico es la transformación de la molécula de N inorgánico (N₂) de la atmósfera en molécula orgánica del suelo, dada por microorganismos. Esta transformación puede ser por microorganismos libres o simbióticos.

Bacterias que **viven libremente** en el suelo como el género *Azotobacter* (aerobias y heterótrofas) fijan aproximadamente 10 kg ha⁻¹ de N por año en suelos pobres de este elemento, siempre que exista provisión de materia orgánica como sustrato, una adecuada humedad y pH cerca de 6,5.

Las bacterias del género *Beijerinckia* (aerobias) fijan nitrógeno principalmente en suelos tropicales y de pH ácido. Entre las bacterias anaeróbicas se destaca el género *Clostridium*. Las cianobacterias fueron designadas durante mucho tiempo como algas cianófitas o cianofíceas, o como algas verde-azuladas o azul verdosas, tiene la habilidad de tomar el N₂ del aire y reducirlo a amonio, ejemplo de ello son el *Nostoc* y *Anabaena*.

Las **bacterias simbióticas** son las más importantes en cuanto a la cantidad de nitrógeno fijado (200 kg ha⁻¹ año de N). Las bacterias infectan a las raíces en la zona de los pelos radicales formando un nódulo donde crece y fija el N atmosférico (en este caso nitrógeno capacidad). La planta contiene clorofila y utiliza la luz para producir glúcidos, los microorganismos utilizan parte de los glúcidos como fuentes de energía en el proceso de fijación de nitrógeno. La deficiencia de P y Mo, elevada disponibilidad de N, suelos excesivamente ácidos, como todo factor que limite la actividad fotosintética, afecta la fijación. La simbiosis es óptima a temperaturas de 24 °C; suelos aireados, con 50-60 % de agua útil.

Las bacterias más comunes son del genero *Rhizobium* que invaden las raíces de las leguminosas (alfalfa, trébol, soja, vicia) que pueden aplicarse a la semilla, proceso llamado inoculación.

La simbiosis se produce también con *Actinobacterias* como *Frankia sp* que forma nódulos radicales llamados actinorhizas. Estas actinorhizas fueron encontradas en raíces de muchos árboles y arbustos (más de 140 especies) como en las familias vegetales de *Betulácea*, *Casuarinaceae*, *Myriaceae*, *Rosaceae*, *Eleagnaceae*, *Rhamnaceae*, *Coriaceae* y *Dasticaceae*.

4.1.3 Amonificación

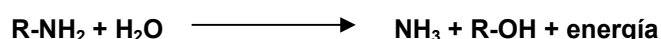
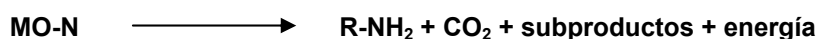
Este proceso consiste en la transformación del nitrógeno de las moléculas orgánicas en amonio. Es llevado a cabo tanto por hongos, actinomicetes, algas y bacterias aeróbicas y anaeróbica. Debido a la falta de una microflora específica y a la diversidad de sustratos, la amonificación es uno de los procesos menos sensibles a los cambios del medio ambiente

El pasaje de componentes orgánicos nitrogenados a amonio ocurre en varios pasos, mediante la acción de enzimas provenientes de microorganismos y animales del suelo.

El N orgánico se encuentra en el suelo en forma fundamentalmente de proteínas. En primer lugar las enzimas extracelulares degradan los polímeros orgánicos nitrogenados: proteínas, ácidos

nucleicos a aminoácidos, los monómeros resultantes atraviesan la membrana celular y son metabolizados hasta la producción de amonio, que posteriormente es liberado a la solución del suelo.

La amonificación de los aminoácidos se produce bioquímicamente a través de proceso de desaminación y decarboxilación, procesos activados por enzimas desaminasas y decarboxilasas.



El amonio resultante puede ser:

- metabolizado por los microorganismos que lo utilizan como fuente de nitrógeno
- incorporarse al humus.
- adsorbidos fuertemente por las arcillas (illitas), humus y los complejos órgano-minerales.
- utilizados en pequeñas porciones por las plantas.
- perderse por volatilización.
- seguir la vía de la mineralización (nitrificación).

Del valor de pH del suelo depende si se encuentra como amoniaco (NH_3) en suelos neutro/alcalino o como ion amonio (NH_4^+) en pH neutro/ácido (Figura 4.2).

4.1.4 Nitrificación

El NH_4^+ producido en la amonificación puede seguir la vía de la oxidación, transformándose primero en NO_2^- (nitritación) y luego en NO_3^- (nitratación), constituyendo en conjunto a lo que se denomina nitrificación. El mismo es de naturaleza biológica, microorganismos quimioautótrofos transforman el C del CO_2 en sus estructuras carbonadas usando como energía la obtenida de la oxidación de compuestos inorgánicos.

La nitritación es llevada a cabo por bacterias del género *Nitrosomonas*, *Nitrosolobus*, *Nitrospira*, etc. Si los suelos tienen pH alcalino y alto nivel de NH_4^+ , se dificulta la nitratación y se acumula NO_2^- . El nitrito es tóxico para las plantas, pero es raro que se acumule (la presencia de nitritos en el agua es un indicador muy claro de contaminación).

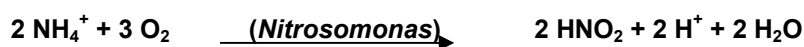
La nitratación la realizan los géneros *Nitrobacter*, *Microderma*, *Bactoderma* etc. Tanto nitritadores como nitratadores son aerobios obligados y son procesos simultáneos, por esta razón,

en suelos anegados, si bien se produce NH_4^+ , se restringe la producción de NO_3^- , ocasionando problemas de disponibilidad para especies que se nutren especialmente con este anión.

Las condiciones óptimas para la nitrificación son temperaturas de 25 a 35 °C, pH neutro/ ligeramente ácido y condiciones intermedias de humedad.

El proceso de nitrificación es una fuente de H^+ hacia la solución del suelo que va provocando paulatina acidificación.

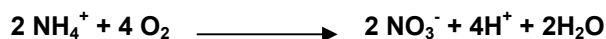
Nitritación



Nitratación

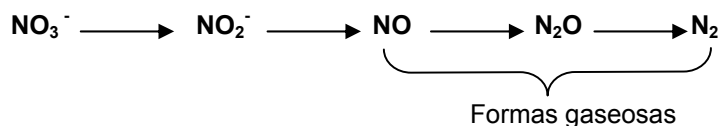


Resumiendo la nitrificación



4.1.5 Desnitrificación

Una gran cantidad de bacterias del suelo son capaces de reducir NO_3^- y NO_2^- , transformándolos en formas gaseosas como NO, N_2O , N_2 , pasan del suelo a la atmósfera. La secuencia es la siguiente:



La mayoría de las bacterias desnitrificadoras son anaeróbicas facultativas, en ausencia de oxígeno utilizan NO_3^- y NO_2^- , como aceptor final de electrones durante la respiración. Por tal motivo todo factor que contribuya al anegamiento del suelo favorecerá la desnitrificación. Es máxima a pH

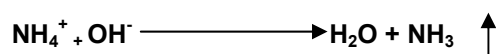
8-8,5 y se ve favorecido con presencia de formas lábiles de carbono, por lo tanto el agregado de abonos verdes estimula la desnitrificación.

Los microorganismos actuantes son:

- Bacterias heterotróficas (*Pseudomonas*, *Xanthomonas*, *Achromobacter*, *Bacillus*, etc.)
- Bacterias quimioautotróficas (*Micrococcus*, *Thiobacillus*).

4.1.6 Volatilización de NH_4^+

Ante condiciones de altas temperaturas ($>18-20^\circ \text{C}$) y pH alcalino el NH_4^+ del suelo tiende a producir la siguiente reacción:



Esta reacción se da cuando el pH del suelo es de 7 o mayor y en particular si está seco. El efecto del pH sobre las proporciones $\text{NH}_4^+ - \text{NH}_3$, puede verse en la siguiente Figura 4.2.

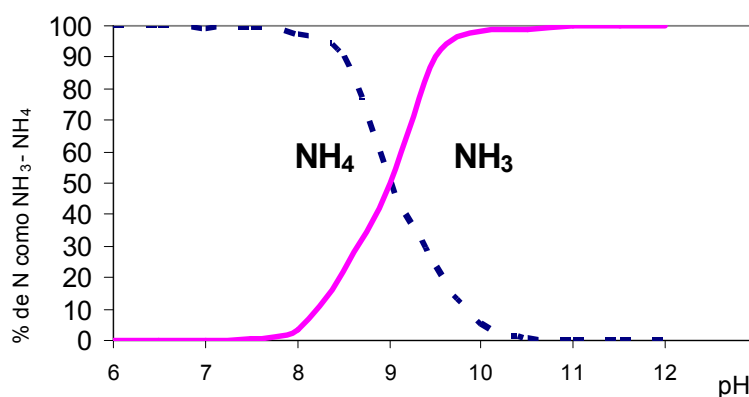
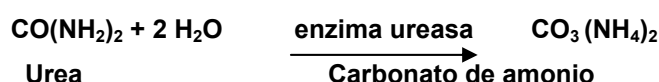


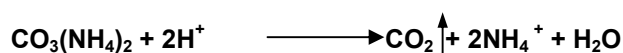
Figura 4.1.2 Proporciones relativas de N-NH_3 y N-NH_4^+ en la solución del suelo con respecto al pH.

Como se sabe el NH_3 es gaseoso y en esta forma puede perderse a la atmósfera. El NH_4^+ al ser un catión tiene la posibilidad de adsorberse a las cargas negativas de los coloides. Esto permite que no se lixivie quedando retenido en el suelo. La volatilización se trata de reacciones que involucran principalmente a fertilizantes nitrogenados. La urea, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ con 46% de N, es el

fertilizante más utilizado y en el suelo sigue la vía de la mineralización cuya primera etapa es la liberación de NH_4^+ . Al inicio la reacción tiene un comportamiento básico (al pasar de amida a carbonato amónico). La hidrólisis es catalizada por una enzima denominada ureasa. Su actividad es muy importante en los residuos de cosecha y en la parte superficial de los suelos. Siguiendo el patrón de distribución de la materia orgánica del suelo, la mayor actividad ureásica se concentra en el estrato superficial y se reduce con la profundidad.



La molécula de $\text{CO}_3(\text{NH}_4)_2$ es inestable y se descompone rápidamente en el suelo a:



Reacción que consume protones por los que se eleva el pH

Posteriormente la forma amoniacal pasa a forma nítrica (liberando H^+ al medio) dado por el proceso de nitrificación, por lo que el comportamiento final de la urea es de carácter ácido. La aplicación en superficie y sin incorporación de urea aumenta considerablemente las pérdidas.

En el caso del amoníaco anhidro (gas), con 82% N, cuando la aplicación se hace en condiciones de suelo seco, a poca profundidad, especialmente en suelos de texturas gruesas, la pérdida como NH_3 son importante.

4.1.7 Lixiviación o lavado

Las formas solubles por excelencia son las inorgánicas, y dentro de estas NO_2^- y NO_3^- , ya que el NH_4^+ es retenido por el complejo de intercambio. El lixiviado se da cuando las formas solubles de nitrógeno se mueven dentro del perfil sin llegar a la napa freática.

El lavado del nitrógeno conlleva la contaminación de las napas, muy frecuentes en zonas de invernáculos donde la fertilización nitrogenada se realiza con altas dosis. En suelos de textura gruesa, con balances hídricos positivos, la pérdida de NO_3^- nativo o derivado de fertilizantes se encontrará favorecida. La presencia de un horizonte Bt saturado reduce la velocidad de pasaje de agua a través del perfil, lo que obviamente reduce la posibilidad de lavado de los nitritos y nitratos.

Este movimiento en fase acuosa hace que el muestreo del suelo, con fines diagnóstico a través de la medida de NO_3^- , sea dependiente en mayor o menor medida de las precipitaciones cercanas al momento del muestreo.

4.1.8 Pérdida por erosión

Cuando se produce pérdida de suelo ya sea por erosión hídrica o eólica se pierde nitrógeno. Por ejemplo la erosión de 1 cm ha^{-1} del horizonte A con $0,3 \%$ de Nt, $1,2 \text{ t.m}^{-3}$ de densidad aparente, produce una pérdida de 120 toneladas de tierra, es decir 360 kg de Nt.

4.1.9 Fijación de amonio

El NH_4^+ es una forma inorgánica de N edáfico de características catiónicas.

Las arcillas de tipo 2:1, especialmente illita, vermiculita y montmorillonita, al tener capacidad de intercambio catiónico permanente tienen la posibilidad de retener superficialmente al amonio. Además de esta adsorción las características del ión NH_4^+ hacen que este penetre en los espacios interlaminares de las arcillas y allí quede “atrapado” por condiciones estéricas más que electrostáticas. Es concretamente a esta forma de retención a la que se denomina específicamente “fijación”. Es en la illita donde altas concentraciones de amonio pueden desplazar al potasio. El NH_4^+ fijado es menos disponible para los vegetales, en términos de equilibrio, que el adsorbido sobre las superficies externas de las arcillas, pero se ha comprobado que entre $100\text{-}300 \text{ kg N ha}^{-1}$, reservado en esta forma, puede entrar en el flujo dinámico del N del suelo durante un período productivo (Menguel y Scherer, 1981).

4.1.10 Inmovilización microbiana

La acción microbiana puede mineralizar o inmovilizar el nitrógeno. Desde el punto de vista de la nutrición vegetal, se entiende por inmovilización microbiana, a la asimilación por los microorganismos de nutrientes inorgánicos. Los microorganismos utilizan el nitrógeno para construir sus propias estructuras y como fuente de energía.

Cuando se entierra un rastrojo o se agregan abonos orgánicos, se produce un decaimiento del contenido de N inorgánico de la solución del suelo, ya que los microorganismos necesitan, para aprovechar la energía contenida en los restos orgánicos y sintetizar sus propias estructuras, más N que el residuo de por sí trae. Por ejemplo pajas de cereales con relaciones C/N de $60\text{-}100/1$ deben transformarse en estructuras microbianas con relaciones de $8\text{-}12/1$, es decir deben enriquecerse

en N, y esto se produce a expensas del N de la solución, provocando una inmovilización microbiana de este elemento. La inmovilización ira desapareciendo a medida que las poblaciones microbianas disminuyan a causa de la degradación de la fuente energética.

Por lo tanto cuanto mayor es la relación C/N del material incorporado al suelo, más largo será el periodo de inmovilización. Relación C/N superiores a 30 dan como resultado una disminución de las reservas de nitrógeno mineral debido a la inmovilización.

Este proceso trae como consecuencia déficit temporario de nitrógeno, principalmente en el estado inicial de cultivos cuando el barbecho ha sido corto y existe gran parte del rastrojo del cultivo anterior sin descomponer.

4.1.11 Diagnóstico

Se ha definido en el capítulo 2 el concepto de dotación como, resumidamente, provisión de nutrientes, y se explicó en esa oportunidad que estos nutrientes quedan definidos por tres parámetros que son:

Capacidad: forma lábil del nutriente.

Intensidad: forma asimilable del nutriente.

Renovación: procesos que transforman la forma capacidad en intensidad.

La fertilidad nitrogenada es evaluada en la mayor parte de los laboratorios a través de dos medidas analíticas, la primera destinada a la cuantificación del factor **capacidad**, N total, y la segunda del factor **intensidad**: NO_3^- .

La determinación de N total generalmente se lleva a cabo a través de una digestión húmeda con catalizadores y alta temperatura, dada la naturaleza fundamentalmente orgánica del mismo, y posterior destilación Kjeldahl.

Las medidas de intensidad se usan ampliamente como medidas de diagnóstico en aquellos nutrientes que son escasamente retenidos por la fase sólida, o sea los que pueden acumularse en la solución del suelo en cantidades importantes en relación a los requerimientos de los cultivos. Tal es en caso del N, donde la medida de NO_3^- solubles, se ha empleado en gran cantidad de trabajos como estimación de la fertilidad nitrogenada de un suelo, y consecuentemente como guía para estimar la necesidad de fertilizaciones nitrogenadas.

La utilización del contenido de NO_3^- puede ser eficiente si se tienen en cuenta una serie de problemas, entre los que se destacan:

- Variabilidad muy alta del contenido de NO_3^- en su distribución horizontal lo que exige muestrear con elevado número de submuestras/muestra compuesta

- Evaluación en todo el perfil útil del suelo dada sus posibilidades de lavado. Muestreo estratificado
- Evitar alteraciones de la muestra en su período de transporte por acondicionamiento, por lo que se recomienda trasladar en frío y evaluar sobre muestra húmeda.

La extracción de nitratos se hace generalmente con CuSO_4 y la determinación puede hacerse también con destilación Kjeldahl y el agregado de reactivos específicos para evaluar solo este anión, ó mediante un método de absorción molecular y el uso de un reactivo colorimétrico, por ejemplo el ácido fenol-2,4-disulfónico.

El análisis de suelos se puede complementar con evaluaciones a campo en planta, ya sea a través de verdor de las hojas mediante un instrumento específico de medición o la utilización de reactivos colorimétricos aplicados a la savia vegetal. En algunos cultivos, generalmente los perennes, se evalúa la fertilidad nitrogenada, así como de otros nutrientes, mediante el análisis de tejidos vegetales de plantas de un cultivo muestreado en un momento o etapa de desarrollo determinados (Correndo y García, 2012).

Renovación de N: poder de mineralización

El parámetro de renovación se puede definir como el poder de mineralización de la fase orgánica en condiciones óptimas de incubación. Así para el caso del N se han estandarizado varios test que miden la cantidad de N mineral producido en determinadas condiciones ambientales. El N mineralizable (N_o) es determinado en incubaciones aeróbicas de larga duración, 224 días (Stanford, Hanway, 1955), lo que constituye un impedimento para su uso en la práctica. Una alternativa la constituye la incubación anaeróbica (N_{an}) de muestras de suelo por 7 o 14 días (Keeney, Nelson, 1982) la que está asociada al N_o , no difiriendo entre años, ni entre sistemas de manejo de cultivos. Por lo tanto, es factible su empleo como una alternativa rápida, económica y sencilla para estimar el N_o (Echeverría *et al.*, 2000).

Echeverría y Bergonzi (1995) estimaron que aproximadamente entre el 7-10% del N_t es N_o , en suelos del SE bonaerense.

Escala orientativa de clasificación del contenido de N total (%)

Muy deficiente	< 0,075
Deficiente	0,075 a 0,124
Moderadamente deficiente	0,125 a 0,149
Moderadamente provisto	0,150 a 0,199
Bien provisto	0,200 a 0,300
Muy bien provisto	> 0,300

Es importante tener en cuenta que la determinación de N total es una medida de capacidad de este elemento, debe analizarse en el marco de las condiciones climáticas de la región y campaña agrícola, tecnología de cultivo y otras propiedades edáficas, para hacer una evaluación de suficiencia o deficiencia en la nutrición nitrogenada. De manera que la escala dada en la Tabla 4.1.2 es solo orientativa.

Muy deficiente	< 20
Deficiente	20 – 39,9
Moderadamente provisto	40 - 79,9
Bien provisto	80 – 99,9
Muy bien provisto	>100

Tabla 4.1.2. Escala tentativa para la calificación en ppm de N-NO_3^- (0-60 cm)

En la actualidad existen tecnologías de diagnóstico basadas en balances del elemento en el suelo, lo que requiere además de las dos determinaciones mencionadas, estimaciones de tasas de fijación biológica, desnitrificación, lixiviación, extracción por los cultivos, entre otros. Estas estimaciones tienen la complejidad de poseer validez local o regional y su dificultad en la determinación misma.

Desde el punto de vista agronómico puede ser útil efectuar balances del elemento en el comportamiento o subsistema suelo.

Dichos balances pueden efectuarse tanto para el contenido de N total del mismo, así como del contenido de las formas asimilables desde el punto de vista de su disponibilidad para las plantas. Pueden detectarse así cambios en la concentración del nutriente disponible que no representen cambios netos del subsistema como un todo y sobre los cuales el agrónomo puede ejercer gran influencia aun sin efectuar fertilizaciones. La remoción del suelo por laboreo, el enterrado y picado de un rastrojo, rotaciones agrícolas-pastoriles son solo algunos ejemplos de ello.

Un balance de N para un ciclo de un cultivo podría definirse bajo la siguiente ecuación:

$$N_f + N_a + N_{om} + N_{ii} = N_p + N_g + N_l + N_e + N_{iin} + N_{if}$$

Donde:

N_f = N aportado por el fertilizante

N_a = N aportado por fijación biológica y abiológica

N_{om} = N orgánico mineralizado

N_{ii} = N inorgánico inicial

N_p = N absorbido por la planta

N_g = N perdido en formas gaseosas (N_2 , N_2O , NH_3)

N_l = N perdido por lavado

N_e = N perdido por erosión

N_{iin} = N inorgánico inmovilizado

N_{if} = N inorgánico final

La formulación de este balance se puede utilizar para estimar las necesidades de fertilización (N_f):

$$N_f = (N_p + N_g + N_l + N_e + N_{iin} + N_{if}) - (N_a + N_{om} + N_{ii})$$

4.2 Fósforo

La fuente original de fósforo en los suelos es el material madre, constituido por roca fosfatada, tales como apatita. La meteorización de la apatita es muy lenta y es considerada prácticamente un resistato (Ollier, 1975). La literatura cita tasas de mineralización inferiores a 1 kg/ha/año (Gardner, 1990, Walker y Syers, 1976). El contenido de fósforo total en el suelo es muy variable. En suelos minerales de áreas templadas varía entre 200 mg.kg⁻¹ y 800 mg.kg⁻¹. En suelos tropicales puede encontrarse valores extremos de 18 mg.kg⁻¹, mientras que en suelos provenientes de cenizas volcánicas llegan a 3.300 mg de P kg⁻¹ (Fassbender, 1984).

En suelos del SO de la provincia de Buenos Aires los contenidos varían entre 200 y 1.000 mg.kg⁻¹ (Galantini *et al.*, 2005; Suñer y Galantini, 2012). Esta variabilidad depende de la naturaleza del material original, su grado de meteorización, de las características climáticas y del manejo agronómico.

El fósforo total (Pt) contempla una parte inorgánica y otra orgánica. La participación del fósforo orgánico puede variar generalmente entre un 5 al 75% del Pt, mientras que en muchos suelos la partición es del 50 %. El porcentaje dependerá de la actividad biológica, temperatura, humedad, acidez del suelo y el grado de desarrollo del suelo. El P total también depende de la textura del suelo. En líneas generales, tanto en áreas cálidas como templadas, cuanto más fina es la textura, mayor es el contenido de Pt.

El P en el suelo se presenta casi exclusivamente como ortofosfato y todos los compuestos son derivados del ácido fosfórico (H_3PO_4).

La cantidad de fósforo que ingresa al suelo desde la atmósfera (adsorbido en las partículas de polvo) es muy pequeña (0,05 a 0,5 kg/ha año).

Las partículas de suelo transportadas por erosión incluyen al fósforo. En la mayoría de las cuencas, la exportación de P ocurre principalmente por escurrimiento, la concentración de P del agua de percolación a través del perfil del suelo son muy pequeña, solo pueden ser considerables en suelos de texturas gruesa y con alta fertilización.

Las plantas absorben al fósforo mayoritariamente como fosfato diácido (H_2PO_4^-) y diez veces más lento y en menor medida como fosfato monoácido (H PO_4^{-2}), la absorción de esta última forma se incrementa a medida que el pH sube a partir de 6,5.

El fósforo en las plantas forma parte de moléculas que proporcionar energía en las reacciones químicas como puede ser la adenosina trifosfato (ATP). Realiza una función clave en la fotosíntesis, la respiración celular y todo el metabolismo energético. Presente en los ácidos nucleicos y en los fosfolípidos. Tiene una función metabólica, en la regulación de la síntesis y transporte de hidratos de carbono. Favorece el desarrollo de las raíces al comienzo de la vegetación.

4.2.1 Fosfatos inorgánicos

Las **formas solubles**, están relacionada con el valor de pH. El ion H_2PO_4^- es favorecido a $\text{pH} < 7$, mientras que el ion H PO_4^{-2} por los pH más altos. A pH 6-7 la concentración de los iones en solución es máxima (Figura 4.2.2).

Fósforo intercambiable es también llamado fósforo adsorbido. La adsorción de fosfatos, como en general toda adsorción aniónica en el suelo, es un fenómeno que depende del pH. A pH ácidos aumentan las cargas positivas de los coloides y por ende, aumenta la adsorción. Estos iones forman parte del enjambre de iones que rodean a las partículas coloidales y están en constante movimiento. Representan del 15 al 30% del fósforo inorgánico. Este fósforo lábil puede estar adsorbido directamente por los bordes de las arcillas como es en el caso de las caolinitas a bajos valores de pH, o por uniones que usan al calcio como puente (en las arcillas de tipo 2:1).

El equilibrio entre los fosfatos adsorbidos y los que están en solución en general es muy dinámico.

Los óxidos de Fe e hidróxidos de Al tienen un papel importantes en la retención del P por los suelos. La superficie de estos minerales tiene carga neta positiva, aunque conviven sitios positivos con negativos, los aniones de fosfatos se ven atraídos. Cuando el ortofosfato es ligado través de un enlace Al-O-P, el H_2PO_4^- es considerado lábil puede ser rápidamente desorbido de la superficie del mineral del suelo. Cuando ocurren dos enlaces Al-O con el H_2PO_4^- se forma un anillo estable de seis elementos (Figura 4.2.1). En consecuencia la desorción es menos factible y se define como **fósforo ocluido**. Los suelos derivados de cenizas volcánicas, típicos de los suelos Andisoles se caracterizan por una alta capacidad de “fijar” el fósforo soluble aplicado, proceso que ocurre instantáneamente, según Fassbender varía entre 9 y 94 %.

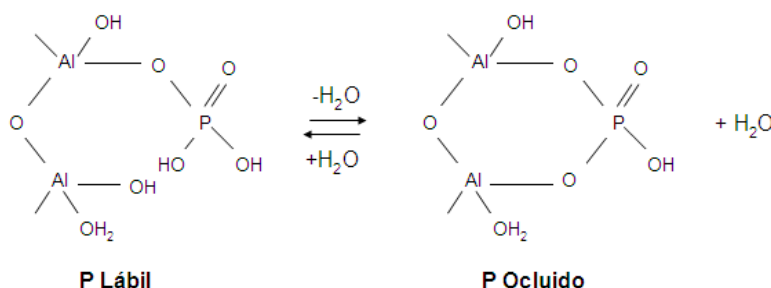


Figura 4.2.1. Mecanismo de adsorción de P en superficies de óxidos de Fe y Al (Tisdale et al., 1993)

El **fósforo insoluble**: es el que está formando parte de los minerales primarios como las apatitas, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$, las cuales son compuesto con calcio, fosfato y además contienen flúor, cloro o hidroxilo, formándose fluorapatita, clorapatita o hidroxapatita respectivamente. También hay minerales con aluminio como la variscita $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y con hierro tales como la vivianita $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ y la metastringita o fosfosiderita $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Todos estos son muy estables respecto a su solubilidad.

Los minerales secundarios que incluyen los fosfatos cálcicos, aluminicos y férricos, son de solubilidad variable según el pH y el tamaño de las partículas. Los iones fosfatos que se liberan a través de la disolución no son estables, sino que son objeto de nuevas transformaciones de adsorción y precipitación, las cuales son de especial importancia. Las precipitaciones se producen fundamentalmente con Ca, a pH superior al neutro; y con Fe y Al en pH ácidos. En pH intermedios coexisten los distintos precipitados (Figura 4.2.2).

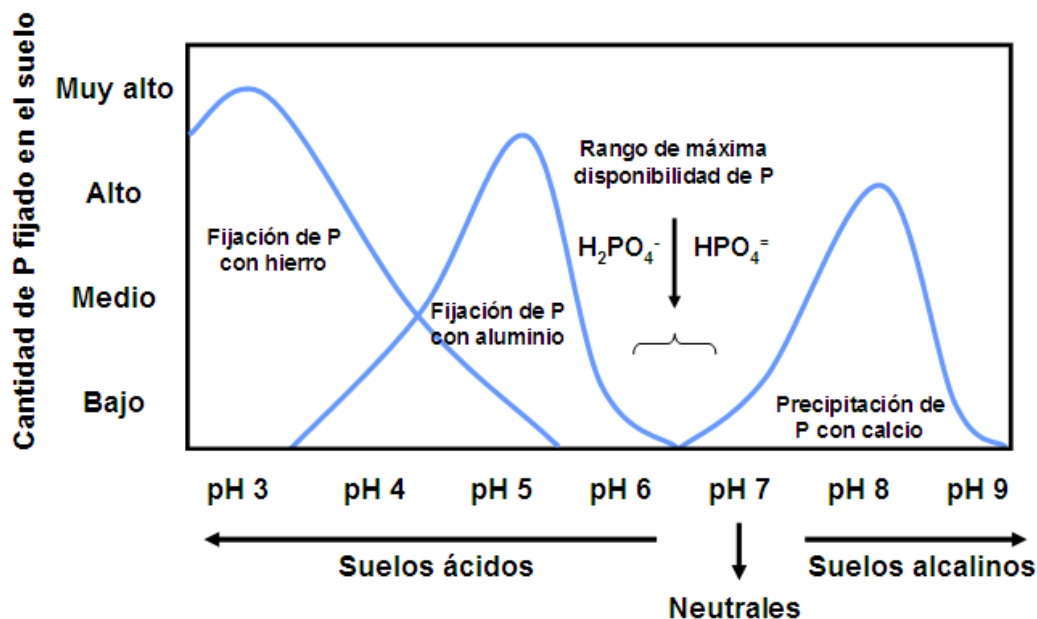


Figura 4.2.2. Formas químicas de P del suelo en función del pH

A título de ejemplos, en suelos vertisólicos de la pcia. de Entre Ríos, los fosfatos de baja actividad u ocluidos constituyen cerca del 50% de los fosfatos inorgánicos totales en horizontes superficiales; el otro 50% se distribuye entre los precipitados de Fe, Al y Ca, aumentando este último en capas inferiores donde alcanza valores de hasta un 30%. En forma contrastante, en los horizontes superficiales de suelos de Tres Arroyos (SE pcia. de Bs. As.) predominan las formas activas (precipitados con Fe, Ca y Al), que constituyen alrededor del 88%, primando los de Ca y en segundo término los de Fe. En la mencionada zona, con el aumento de la profundidad se incrementan los fosfatos unidos al Ca. Un panorama intermedio se presentó en el N de Bs. As. y S de Santa Fe (Conti *et al.*, 1976, Rondini *et al.*, 1963).

Cuando se agrega fósforo soluble al suelo, usualmente ocurre una rápida reacción, de unas pocas horas, que remueve el fósforo de la solución y lo fija. El fósforo recientemente fijado puede ser débilmente solubilizado. La mayor parte de los suelos retiene un 25-35% del P ofrecido, fenómeno muy importante a tener en cuenta en los cálculos de cantidad de fertilizante a aplicar.

4.2.2 Fosfatos orgánicos

Es posible separar al P orgánico en tres fracciones

- En el humus del suelo formando compuestos muy diversos los que varían en contenido y estabilidad frente a agentes degradantes químicos y biológicos. Considerando la

- Restos frescos de cultivos no humificados. También se incluyen excreciones de origen animal.
- Biomasa microbiana del suelo, donde forma parte de las estructuras de los microorganismos del suelo. De las tres esta es la más dinámica.

El P orgánico está asociado al contenido de la materia orgánica por lo tanto es máximo en horizonte superficial. Solo se conoce parte de naturaleza química del P orgánico, entre ella la mayor parte la compone el inositol fosfatos, fosfolípidos y ácidos nucleicos.

[illegible]

119

4.2.3 Rol de los microorganismos en el flujo de fósforo.

Los microorganismos realizan los procesos de solubilización, mineralización e inmovilización.

La **solubilización** del fósforo se realiza mediante un proceso relacionado fundamentalmente con la producción y liberación de ácidos orgánicos por algunos microorganismos del suelo. Es característico de bacterias gram negativas, entre ellas *Pseudomonas cepacia* y *Erwinia herbicola* (Fernández y Rodríguez, 2005).

La descomposición de la materia orgánica es un factor que afecta directa e indirectamente la adsorción de los fosfatos. Por un lado la **mineralización** del P orgánico libera H_3PO_4 a la solución a partir de compuestos polimerizados (nucleoproteínas) se forman compuestos más simples (proteínas, ácidos nucleicos) y así se libera ácido fosfórico. Este P liberado entra a jugar en el equilibrio solución-adsorción. Por otro lado, la mineralización libera CO_2 , y otros ácidos a la rizósfera los cuales colaboran en la solubilización de los fosfatos del suelo.

La solubilización de fósforo orgánico es un proceso dirigido por enzimas, entre ellas tenemos las fosfatasas, que participan en la desfosforilación de los grupos fosfoester unidos a la materia orgánica y las fitasas, que catalizan el proceso de hidrólisis del ácido fítico liberando de forma secuencial hasta seis grupos ortofosfatos libres. La actividad enzimática es usada frecuentemente como un indicador de la actividad microbiana del suelo.

Los microorganismos del suelo tendrán numerosas generaciones de crecimiento y consecuentemente la incorporación a su protoplasma del P frecuentemente excederá al de las plantas superiores. Se procederá entonces la **inmovilización** del fósforo, que deja de estar disponible para la planta. La inmovilización del P por los microorganismos no tiene una larga duración y en el balance puede ser beneficioso para las plantas.

Stevenson (1986) realizó una generalización sobre la relación C/P en la materia orgánica estableciendo: relación > 300 prevalecerá la inmovilización; entre 200-300 la inmovilización es igual a la mineralización y relación < 200 predominará la mineralización.

La actividad microbiana es afectada por diferentes factores entre los que se destacan:

Temperatura: la mineralización del fósforo aumenta marcadamente cuando la temperatura es de $30^{\circ}C$ o mayor.

Humedad: con nivel de humedad cercano al 70% de saturación el fósforo disponible aumenta, aunque parece bastante probable que se confundan las reacciones de mineralización y de solubilización de fósforo inorgánico.

Reacción del suelo: la mineralización más adecuada ocurre en medios próximos a la neutralidad.

4.2.4 Micorrizas

La palabra micorriza significa hongos (“mico”) de las raíces (“rizas”). Este término fue utilizado por primera vez en 1800 para nombrar a los hongos que hacían simbiosis con la raíces de las plantas superiores. La micorrización es un fenómeno ubicuo especialmente importante en especies arbóreas. Las micorrizas se encuentran en la mayoría de las plantas. Este tipo de simbiosis no es tan específica como la de Rhizobios (fijadores de nitrógeno) y las leguminosas. Se las clasifican en:

Endomicorrizas las hifas fúngicas existentes en el terreno invaden las partes jóvenes de las raíces y penetran, a veces, hasta las células del parénquima sub epidérmico (debajo de la epidermis). Esta acción no afecta a las células de los tejidos y se establece el intercambio a nivel celular.

En las ectomicorrizas las hifas fúngicas permanecen en la superficie epidérmica, alrededor de la cual forman una vellosidad que reemplaza a los pelos radicales. Rodean de una densa capa de micelios, las partes más finas de la raíces, hasta envolverlas por completo, incluso en el ápice vegetativo de la misma, penetrando intracelularmente en el parénquima de la corteza, sin infectar sus células.

Las ectoendomicorrizas son similares al grupo de ectomicorrizas, aunque también desarrollan funciones similares a algunas endomicorrizas.

Las plantas con micorrizas absorben y acumulan más fósforo que las plantas sin micorrizas, especialmente si crecen en suelos de baja disponibilidad del nutriente. El fósforo es un nutriente de baja movilidad en el suelo, la raíz debe llegar a él para absorberlo. En raíces con micorrizas el incremento en la absorción de fósforo del suelo se debe a la mayor eficiencia en acceder a este nutriente para luego asimilarlo. Esto se produce por un aumento en la superficie y el volumen de suelo que exploran las raíces logrado gracias a dos razones: por raíces más sanas y por las hifas del hongo que actúan como una extensión de la raíz de la planta. La longitud absorbente de la raíz crece y por consiguiente la exploración de suelo también aumenta.

Cada cultivo tiene diferente grado de dependencia a las micorrizas. Por ejemplo, el maíz y el sorgo tienen alta dependencia micorrícica mientras que el trigo, la avena y la cebada poseen baja dependencia.

Los hongos necesitan oxígeno para vivir, por lo que las poblaciones de micorrizas son muy bajas en suelos de drenaje pobre y anegables. También se ve reducido el crecimiento en suelos salinos y /o sódicos (Abbot y Robson, 1991). Los funguicidas aplicados en la semilla son extremadamente tóxicos para las micorrizas principalmente los de amplio espectro de control. Los herbicidas e insecticidas utilizados normalmente tienen un bajo impacto sobre las micorrizas (Coyne, 1999). Una estrategia para maximizar el efecto beneficioso es cultivar luego de barbechos prolongados especies de alta dependencia a las micorrizas para incrementar la población de hongos en el suelo. La rotación de cultivos tiene un efecto significativo sobre la nutrición vegetal de fósforo y otros nutrientes debido a que la población de micorrizas decrece en el suelo cuando se cultivan especies

de baja dependencia (Coyne, 1999). Los movimientos del suelo ocasionados por las labranzas rompen el entramado de micelio del hongo con lo cual destruyen el efecto benéfico.

Algunos beneficios de las micorrizas para las plantas y el suelo:

Mejoran el estado general de la planta al optimizar la absorción de nutrientes del suelo y por lo tanto incrementan la tolerancia de la planta a enfermedades y permite competir con los microorganismos patógenos por espacio en la raíz. Optimizan el uso del agua y la tolerancia a la sequía. Estimulan la nodulación y fijación de nitrógeno en las leguminosas al incrementar el flujo de fósforo hacia la raíz. Mejoran la estructura del suelo ayudando a mantener unidos a los agregados de suelo gracias al micelio y secreciones de glomalin.

4.2.5 Fertilidad fosforada y balance

Desde el punto de vista de la nutrición vegetal, podemos dividir las fracciones fosforadas en tres grupos (Figura 4.2.4)

1. Fósforo en la solución del suelo (intensidad).
2. Fósforo en la sección lábil (capacidad).
3. Fósforo en la sección no lábil.

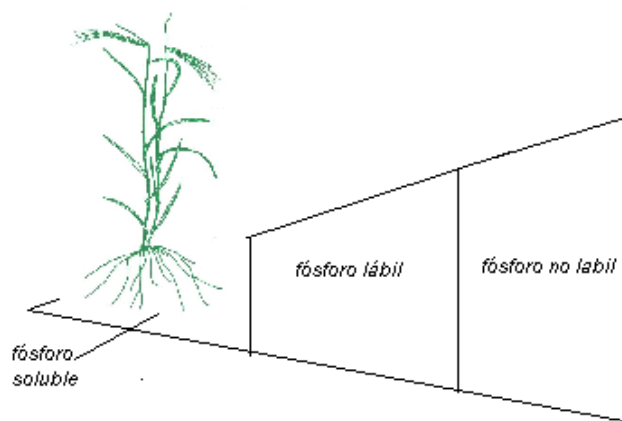


Figura 4.2.4 Esquema de la relación suelo-planta en la nutrición fosforada.

P en solución (intensidad)

El factor intensidad de este nutriente está constituido por los fosfatos diácidos (H_2PO_4^-) y en menor medida como fosfatos monoácidos (HPO_4^{2-}).

Solo un porcentaje muy bajo (entre 0,1 ppm y 0,3 ppm) se encuentra realmente en solución, plenamente disponible para plantas y microorganismos.

Fosfatos en la sección lábil (capacidad)

Esta segunda sección comprende a los **iones adsorbidos**. En minerales arcillosos, el P adsorbido es la fracción dominante de la sección lábil. Las **formas precipitadas** se encuentran en rápido equilibrio con las fracciones en la solución del suelo. En suelos arenosos, calcáreos y especialmente orgánicos, la precipitación juega un rol fundamental. El P orgánico de bajo peso molecular también conforma esta fracción.

Fosfatos en la sección no lábil, de muy escasa disponibilidad para el ciclo vegetativo anual.

Comprende a los minerales primarios.

Fósforo orgánico de alto peso molecular.

Fósforo ocluido.

Considerando la forma capacidad e intensidad del fósforo, los procesos de renovación son:

Desorción de P adsorbido

Solubilización del P precipitado

Mineralización P orgánico

A diferencia del N, los balances del P total en el sistema “suelo” en condiciones de producción agrícola o ganadera, son siempre negativos. No existe forma de reposición natural que sustituya las exportaciones que la actividad productiva va generando. Es decir que la única forma de saldar o moderar las pérdidas del P total del suelo, son exclusivamente las fertilizaciones, ya sean orgánicas o inorgánicas.

La mayor parte de los métodos de diagnóstico, especialmente en zonas templadas, consiste en la evaluación del P intensidad y parte de la capacidad, y han recibido la denominación genérica de “P extractable”. Mediante el empleo de soluciones extractantes de distinta naturaleza según el suelo, se extraen los fosfatos precipitados más solubles, aunque en general también se evalúa el P en solución y en algunos casos el adsorbido, ya que no son lo suficientemente específicos como para identificarlos en forma aislada. A los fines de hacer diagnóstico, los extractantes deben ser elegidos criteriosamente según la naturaleza del suelo. A título ilustrativo en la Tabla 5.1 se mencionan algunas características de los métodos más ampliamente difundidos en el país. Los umbrales son referenciales ya que varían según los cultivos.

Tabla 5.1 Métodos de medición de fósforo extractable. Soluciones extractantes, condición de suelos en los que se emplean y umbrales críticos (García y Ciampitti, 2009).

Método	Solución Extractante	Condición	Umbrales (ppm)		
			bajo	medio	Alto
- Bray-Kurtz N°1	- HCl 0,025N - NH ₄ F 0,03N	- Suelos con CIC medio - Meteorización media - P-Ca medio	< 14	14-20	20-30
- Olsen	- NaCO ₃ H 0,5M pH 8,5	- Suelos con CIC alto - CaCO ₃ libres - P-Ca alto	<10	10-15	15-20
- Mehlich	- H ₂ SO ₄ 0,25N - HCl 0,05N	- Suelos con CIC baja - P-Ca bajo - Meteorización avanzada	<10	10-15	15-30

4.3 Azufre

La mayor parte del azufre en el suelo se encuentra en combinación orgánica, unido a moléculas complejas mediante enlaces covalentes. En muchos aspectos, el azufre se comporta como el nitrógeno. Ambos existen en varios estados de oxidación (Tabla 4.3.1) que tiende a ser máximo (SO_4^{-2} o NO_3^-) en suelos bien drenados. Los dos son inaccesibles a las plantas en estado elemental; estas los utilizan, casi siempre, en su estado más oxidado. Como el nitrógeno, el azufre forma aniones solubles que pueden perderse, por lavado cuando aumenta su concentración en la solución del suelo. Sin embargo, en presencia de mucho calcio, la solubilidad del azufre es limitada, ya que el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) solo es ligeramente soluble y puede precipitar.

Las plantas absorben azufre del suelo en forma de ion sulfato ($\text{SO}_4^{=}$). Los suelos ricos en arcilla almacenan más sulfatos que los arenosos. En comparación con otros suelos, los tropicales suelen poseer una mayor cantidad de coloides cargados positivamente y, por tanto almacenan más azufre en forma de iones sulfatos adsorbidos. Hague y Walmsley (1973) atribuyen la capacidad de adsorción de sulfatos al hierro hidratado y a los óxidos de aluminio. Los suelos de regiones áridas contienen las mayores concentraciones de sulfatos disueltos y de yeso precipitado, gracias a la escasa intensidad del lavado.

A veces los suelos muy mal drenados poseen azufre en forma de sulfuro, a menudo combinado con hierro, formando sulfuro ferroso (FeS). La mayoría de los sulfuros son, prácticamente insolubles. El suelo puede presentar grandes cantidades de FeS y otros sulfuros, sin mostrar efectos perjudiciales mientras se encuentre anegado. Estos suelos no deben drenarse porque los sulfuros se oxidarían a sulfatos y el pH descendería hasta cerca de 2, condiciones demasiado ácidas para permitir el crecimiento de las plantas.

Compuestos (fórmula)	Estado de oxidación
Sulfuro (S^{2-})	-2
Bisulfuro (HS^-)	-2
Azufre elemental (S^0)	0
Sulfito (SO_3^{2-})	+4
Sulfato (SO_4^{2-})	+6

Tabla 4.3.1 Compuestos, formulas y estado de oxidación del nitrógeno

4.3.1 Flujo del azufre

El azufre del material parental es liberado gradualmente, conforme se meteorizan los minerales. Las pérdidas de azufre por lavado, como las de otros materiales solubles, dependen de las condiciones climáticas. Otras pérdidas significativas, pero variables, tienen lugar por erosión y por extracción por las cosechas y forrajes consumidos por los animales.

El intercambio entre el azufre del suelo y plantas, y el dióxido de azufre contenido en la atmósfera, constituye una parte muy importante del flujo del elemento que nos ocupa. Los restos animales y vegetales poseen azufre que puede pasar a la atmósfera, en forma de dióxido, cuando se descomponen. También el petróleo y el carbón contienen azufre y al quemarse producen el mismo dióxido. El uso industrial de esos combustibles, es causa de que la concentración de azufre en la atmósfera sea mucho mayor en la proximidad de los centros fabriles que en otras regiones.

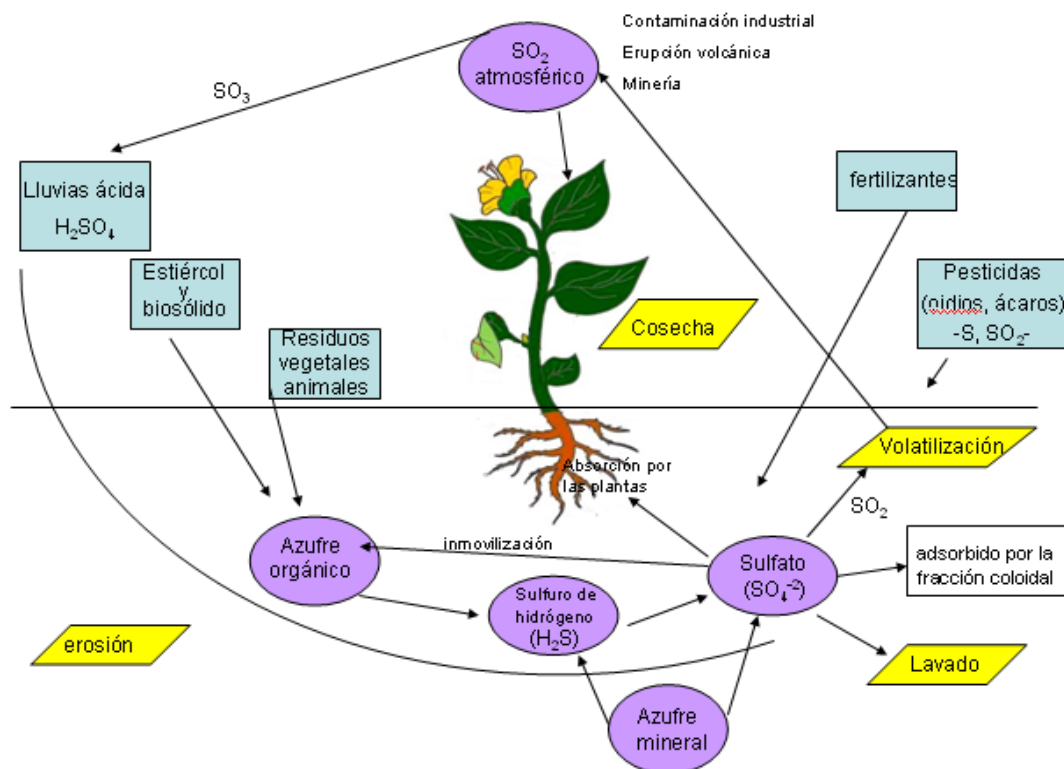


Figura 4.3.1 Flujo del azufre

Normalmente, la concentración de SO_2 en la atmósfera es de 0,05 ppm, pero puede subir a 1 ppm cerca de las fundiciones si no se toman precauciones para controlar la polución. Concentraciones tan altas son tóxicas para la mayoría de las plantas y dan a la lluvia un carácter ácido y corrosivo.

Existen numerosos microorganismos capaces de liberar azufre soluble descomponiendo la materia orgánica. También coexiste la inmovilización de sulfatos por los microorganismos responsables de la mineralización (Figura 4.3.1)

4.3.2 El azufre como nutriente de las plantas

Las plantas absorben azufre del suelo en forma de ion sulfato (SO_4^{2-}) y del aire, en forma de dióxido de azufre (SO_2), por difusión gaseosa. El metabolismo de los vegetales reduce el SO_4^{2-} y el SO_2 a formas que pueden ser incluidas en moléculas orgánicas. El azufre es un componente esencial de todas las proteínas de las plantas y de algunas hormonas vegetales. La Tabla 4.3.2. compara los contenidos de nitrógeno, fósforo, potasio y azufre de varios cultivos. Las plantas

necesitan aproximadamente, cantidades semejantes de fósforo y azufre (la de nitrógeno suele ser de 4 a 10 veces mayores). Las deficiencias de azufre menguan la síntesis de proteínas por dos razones: los aminoácidos con azufre son componentes esenciales de las moléculas proteínicas, en escasez de este elemento pueden acumularse otros aminoácidos; además, el azufre es esencial para la acción de las enzimas implicadas en la reducción de nitratos y su deficiencia dificulta la formación de todos los aminoácidos. Las plantas con deficiencia de azufre tienden, por lo tanto, a acumular nitrógeno nítrico en sus tejidos.

El S es un nutriente poco móvil en la planta, por lo que sus deficiencias suelen observarse inicialmente en las hojas jóvenes. Cuando las deficiencias son severas, la clorosis se generaliza y las deficiencias de S pueden ser confundidas con las de N.

Las leguminosas son, con frecuencia, muy sensibles a las deficiencias de azufre porque la fijación de nitrógeno requiere este elemento (Tisdale, 1974).

	Requerimiento (kg/tn grano)			
Cultivo	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Azufre
Trigo	30	5	19	4,5
Soja	80	8	33	7
Girasol	40	5	28	5
Maíz	22	4	19	4

Tabla 4.3.2 Requerimientos nutricionales de algunos cultivos. (Fuente: INPOFOS 2002)

4.3.3 Compuestos azufrados orgánicos

El S orgánico presente en la materia orgánica proviene de los residuos vegetales, animales y microbianos que se incorporan al suelo; consiste en una parte importante de proteínas y sus derivados, como los aminoácidos que contienen azufre

Las proteínas, péptidos y otros compuestos azufrados orgánicos son depolimerizados hasta llegar a aminoácidos. Los microorganismos que actúan pueden ser bacterias anaeróbicas, aeróbicas, así como hongos. En anoxia se produce SH_2 y en condiciones de oxidación $\text{SO}_4^{=}$, los cuales puede ser consumido por las plantas, inmovilizado por los microorganismos, lixiviados o volatilizado como SO_2 .

Stevenson (1986) realizó una generalización sobre la relación C/S en la materia orgánica estableciendo: relación > 400 prevalecerá la inmovilización; entre 200-400 la inmovilización es igual a la mineralización y relación < 200 predominará la mineralización.

4.3.4 Compuestos azufrados inorgánicos

La mayor parte del azufre inorgánico se encuentra en forma de sulfatos; solo en el caso de anaerobiosis, como ocurre en los suelos anegados y pantanosos, aparecen otras fracciones importantes: por ejemplo los sulfuros, y la pirita (FeS_2). Por lo general al establecer condiciones aeróbicas, los sulfuros se oxidan rápidamente en sulfatos. En aquellos bien aireados solo se encuentran algunos sulfuros poco solubles, derivados principalmente de los minerales primarios.

Los sulfatos en los suelos se pueden dividir en tres categorías:

- Una pequeña fracción en la solución del suelo.
- Una fracción variable adsorbida por la fracción coloidal del suelo, en forma más o menos firme
- Sulfatos poco solubles.

En los suelos de regiones secas hay, frecuentemente, una acumulación de sulfatos solubles y poco solubles.

La segunda fracción puede alcanzar grandes magnitudes, de varios cientos de Mg.kg^{-1} , en suelos ácidos y arcillosos, en los que los sulfatos se encuentran en forma adsorbida, con una moderada disponibilidad para las plantas.

4.3.5 Movimiento y adsorción de sulfatos

La adsorción del sulfato es un proceso importante en los suelos ácidos, particularmente en los caolíníficos. Gran parte de la adsorción del SO_4^{-2} ocurre en sitios con carga positiva; por esto, el pH del suelo y la diferencia entre este valor y el punto de carga cero del suelo son importantes. En este proceso la planta al adsorber el SO_4^{-2} libera OH^- .

De acuerdo con Fox *et al.* (1980) para que se dé una adsorción apreciable de sulfato se requieren tres condiciones que son: la presencia de superficies que reaccionen, la existencia de un ambiente químico favorable y la existencia de sulfato en la solución del suelo. Las cantidades de sulfato adsorbidos pueden ser muy altas, especialmente cuando se abona fuertemente y cuando la concentración de sesquióxidos en el suelo es alta.

El movimiento del sulfato es fomentado tanto por fosfatos como por el encalado. Los autores antes citados observaron, además, que suelos con altos contenidos en óxidos libres de Fe y Al son muy buenos retenedores de sulfatos.

En relación con las arcillas se encontró que la retención varía según la serie:

caolinita > illita > bentonita.

En zonas áridas y semiáridas el movimiento de sulfatos en los suelos es reducido. En cambio en zonas húmedas se ve favorecido el movimiento del sulfato a profundidad, principalmente si los suelos son de textura gruesa y con pH mayor a 6. En la Argentina se acepta como máximo en agua potable de uso domiciliario 400 mg l^{-1} de SO_4^{-2} .

4.3.6 Lluvia ácida

Cuando se quema carbón y petróleo, el azufre contenido en estos se combina con oxígeno para formar gases de azufre (SO_2 y SO_3). Cuando estos gases se mezclan con el agua de la lluvia, forman ácidos de azufre; en otras palabras, la lluvia se vuelve ácida. Algunos ácidos de nitrógeno contribuyen mediante un proceso similar.

Cuando lluvias ácidas caen en lagos montañosos, el ácido disuelve el aluminio, que después obstruye las branquias de los peces. Muchos árboles mueren por la lluvia ácida y los países por donde pasan vientos de áreas industriales del mundo están siendo perjudicados por estas. Si este tipo de lluvia cae sobre piedras calcáreas (carbonato de calcio) o suelos con partículas de sales calcáreas, el ácido se neutraliza.

4.3.7 Disponibilidad y aprovechamiento del azufre

En los suelos altamente meteorizados el S es el cuarto elemento en importancia, limitando el crecimiento de las plantas; pero si se consideran las leguminosas, ocupa el segundo lugar. Varias investigaciones realizadas en el centro-sur de Santa Fe han demostrado que la baja disponibilidad de azufre en los suelos de la zona puede limitar el rendimiento de cultivos tales como trigo, maíz, soja y sorgo. Los mejores rendimientos se observaron con las aplicaciones a la siembra con dosis de $20\text{-}30 \text{ kg ha}^{-1}$ de S (Chiarotti y Pontoni, 2000). Esposito *et al.*, (2009) establecieron como umbral crítico 9 mg kg^{-1}

en suelos del sur de Córdoba. Los ambientes donde se han observado respuestas a la fertilización azufrada poseen características particulares: suelos con extensa historia agrícola, bajos contenidos de MO, altas respuestas a N y P y varios años bajo siembra directa (Gutiérrez Boem, 2006).

Algunos plaguicidas contienen azufre y contribuyen con cantidades pequeñas a las necesidades de las plantas.

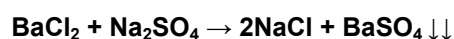
Es poco corriente que el azufre sea tóxico para las plantas. Esto ha sido observado solo en el caso de concentraciones altas de SO₂ en el aire, como ocurre en la vecindad de algunas industrias. Concentraciones muy altas de sulfato en la solución del suelo, como sucede cuando los suelos salinos tienen altas concentraciones de sulfato de magnesio de gran solubilidad, no perjudican a las plantas por sus efectos químicos, aunque pueden causar problemas por su efecto osmótico. La presencia del yeso, poco soluble, aún en el caso de muy altas concentraciones, no causa daños a la vegetación.

4.3.8 Determinación de sulfatos por turbidimetría

Para extraer los sulfatos solubles y los sulfatos adsorbidos, se pueden utilizar soluciones con aniones que pueden desplazar a los sulfatos adsorbidos, por ejemplo: NH₄OAc (0,5-1M), Ca(H₂PO₄)₂ o KH₂PO₄ (500 mg P l⁻¹) (Tabatabai, 1996).

Los métodos turbidimétricos de análisis tienen como fundamento la formación de partículas de pequeño tamaño que causan la dispersión de la luz cuando esta incide sobre dichas partículas. El grado de dispersión de la luz (o turbidez de la solución) es proporcional al número de partículas que se encuentran a su paso, lo cual depende de la cantidad de analito presente en la muestra.

En el caso de determinación de sulfatos por el método turbidimétrico se agrega a un volumen de muestra, cloruro de bario. El bario en presencia de sulfatos precipita como sulfato de bario BaSO₄, formando flóculos que causan un cierto grado de turbidez en la solución y este grado de turbidez es proporcional a la concentración de sulfatos presentes.



En medio neutro o alcalino puede precipitar carbonato y/o fosfato de bario, por eso se efectúa la determinación en medio ácido, (evitándose así la formación de dichos precipitados). El grado de turbidez se determina midiendo la absorbancia con un espectrofotómetro. A mayor concentración de iones sulfato mayor absorbancia.

4.4 Potasio

El contenido medio de potasio presente en la corteza terrestre asciende a 2,5% (Fassbender H.W., 1978). Mientras que potasio total en los suelos varía entre 0,5 y 4% (Thompson y Troeh, 2002) La menor o mayor riqueza dependerá del material parental y el grado de meteorización sufrido. También tiene influencia la textura de los suelos. Predominio de fracciones arcillosas son más ricas que las arenosas, aunque su contenido variara en función de la intensidad de las pérdidas por extracción del cultivo, lavado y erosión (Figura 4.4.1) Son fuente de potasio los feldespatos potásicos, la moscovita y la biotita y minerales secundarios como la silvina ClK , illitas, entre otros.

El potasio interviene en la regulación del potencial osmótico de las células vegetales, en enzimas implicadas en la respiración y fotosíntesis (Taiz y Zeiger, 2006) Es absorbido por la planta como ion K^+ y también directamente desde la superficie del coloide.

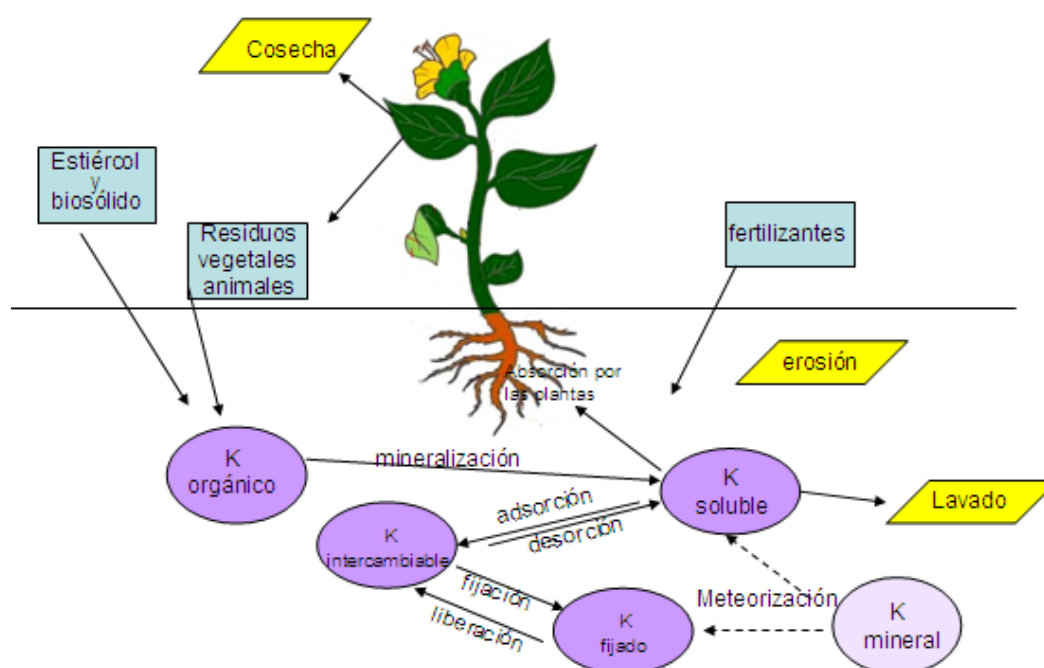


Figura 4.4 1 Flujo del potasio en el suelo

4.4.1 Dinámica del potasio en el suelo

Formas del potasio

En función del aprovechamiento del potasio por las plantas se lo puede clasificar como:

Potasio rápidamente asimilable; potasio lentamente asimilable y potasio no asimilable

El potasio en la solución es la forma inmediatamente disponible y puede ser absorbido por las plantas en forma inmediata. Esta forma se encuentra en pequeñas cantidades. El potasio en solución está en equilibrio con el adsorbido al complejo de intercambio del suelo. El proceso de adsorción-desorción es el que repone y equilibra la concentración de K de la solución del suelo.

El potasio intercambiable es la forma iónica del potasio unido electrostáticamente a los materiales que componen la fase sólida coloidal mineral y orgánica.

El forma rápidamente asimilable representa aproximadamente el 1 al 2 % del K total, la mayor parte de esta (90%) esta intercambiable y el resto (10%) en la solución del suelo.



El K de la solución más el intercambiable, es comúnmente denominado K "disponible" y medido en los análisis convencionales para evaluar la fertilidad del suelo.

Potasio lentamente asimilable

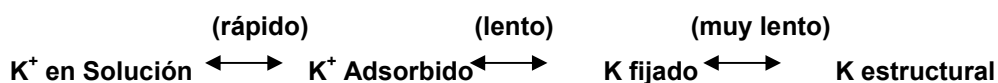
También llamado K fijado el que se encuentra entre en el espacio hexagonal de las láminas de silicio de las arcillas y el cual no queda disponible para la planta. Esta forma es considera como un depósito de potasio lentamente aprovechable ya que con el tiempo o en determinadas condiciones puede liberarse. Alta concentraciones de H^+ o de NH_4^+ y baja de K^+ en la solución favorece la liberación del K fijado.

Potasio no asimilable o de reserva

Está constituyendo la estructuras de los mineral primarios (feldespatos y micas) llamado K estructural. Representa entre 90-98% del potasio en el suelo. Esta forma cristalina al ser muy resistente proporciona cantidades insignificantes al ciclo de los cultivos anuales.

Con el tiempo y por procesos de hidrólisis, acidificación, disolución sufren gradualmente alteración para dar como resultados formas aprovechables

Equilibrio entre las formas del potasio en el suelo:



4.4.2 Pérdidas de potasio

Erosión y lixiviación

La pérdida de suelo por la erosión conlleva la pérdida del potasio.

Predominio de arcillas caoliníticas, con alta precipitaciones promueve el lavado del potasio. La lixiviación se ve favorecida en los suelos de textura gruesa respecto a los arcillosos, justificado por la posibilidad de cada clase textural de retener al catión.

4.4.3 Diagnóstico de la fertilidad potásica

Desde el punto de vista de la nutrición vegetal, potasio pueden calificarse como:

- **factor intensidad:** forma disponible para las plantas, está constituida por los iones en solución
- **factor capacidad:** forma de reserva dinámica en el corto y mediano plazo, está constituida fundamentalmente por la forma intercambiable.
- **factor renovación:** mecanismos de transformación de capacidad en intensidad, Por lo que para estos elementos está constituido por el fenómeno de desorción.

La dificultad de medir el potasio en solución ha desembocado que la medida mas ampliamente difundida en el país con fines de diagnóstico, fuera la concentración de estos elementos en la situación de intercambio. Valores entre 2 y 5 % de la capacidad de intercambio catiónica se los considera adecuados para la provisión de las plantas. Además hay relaciones entre $(Ca+Mg)/K$ y Ca/K (Tabla 4.5.1). Valor superior al umbral indicaría deficiencias relativas del elemento del denominador. También es posible la valoración absoluta INTA 1989 (Tabla 4.4.1). Tanto de los valores relativos como absolutos no existen calibraciones regionales en el país por lo tanto es dable esperar variación de los umbrales según condiciones edafo-climático-culturales.

Los niveles excesivos de potasio pueden causar antagonismos que llevan a deficiencias de otros nutrientes como el magnesio o el calcio. La toxicidad por potasio no existe como tal.

Denominación	K ⁺ intercambiable (cmolc kg ⁻¹)
Muy alto	> 1,2
Alto	1,2 -0,6
Medio	0,6-0,3
Bajo	0,3-0,1
Muy bajo	< 0,1

Tabla 4.4.1 Escala de provisión de K intercambiables

4.5 Calcio y magnesio

Calcio

El contenido medio de calcio presente en la corteza terrestre asciende a 3,64% (Mengel y Kirkby, 2000). Los suelos no calcáreos, de regiones húmedas poseen por lo general entre 0,15 y 1,5 % de Ca total y en promedio alrededor de 1%. Pero en suelos muy meteorizados del trópico húmedo los contenidos varían entre 0,1 y 0,03 % de Ca, independientemente de la textura (Kass, 1998). El contenido en los suelos está relacionado con la riqueza del material parental y el grado de meteorización sufrido por los mismos.

Proveen de Ca al suelo la anortita, mineral perteneciente a la serie de las plagioclasas feldespáticas es una de las principales fuentes de calcio del suelo junto con la augita de los piroxenos y la hornblenda de los anfíboles. También son fuente las diferentes apatitas. Dentro de los minerales secundarios son fuentes de calcio las formas carbonadas tales como la calcita o caliza (CaCO₃) y la dolomita (CaCO₃.MgCO₃). En zonas áridas puede presentarse acumulación de yeso (CaSO₄.2H₂O).

El calcio es un nutriente esencial para las plantas, interviene entre otros procesos en el alargamiento celular, en la regulación estomática, forma parte de la estructura de la pared de las células y afecta la calidad de las frutas.

Es absorbido por las plantas como ion Ca⁺² y en menos proporción mediante intercambio directo entre los pelos radicales y el complejo coloidal al que se encuentra adsorbido. Las leguminosas son plantas que demandan mucho más calcio de la solución del suelo para el proceso

de nodulación. Debido a la interacción entre calcio, potasio y magnesio, su velocidad de absorción puede disminuir cuando hay altas concentraciones de potasio y/o magnesio en la solución del suelo (Kass, 1998).

Magnesio

El contenido medio de magnesio presente en la corteza terrestre asciende a 2,07 % (Mengel y Kirkby, 2000). Los suelos no calcáreos, poseen por lo general entre 0,1 y 1, %. El contenido en los suelos está relacionado con la riqueza del material parental y el grado de meteorización sufrido. Son proveedores de magnesio la biotita, la augita, la hornblenda el olivino. Dentro de los minerales secundarios son fuentes clorita y las formas carbonadas tales como la magnesita (MgCO_3) y la dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). En zonas áridas puede presentarse acumulación en forma de sulfato (MgSO_4), aunque esta sal es mucho más soluble que el yeso.

En las plantas el Mg es constituyente esencial de la molécula de clorofila. La clorofila es el pigmento que da a las plantas su color verde y lleva a cabo el proceso de la fotosíntesis

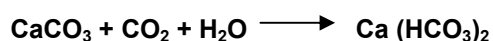
Es absorbido por las planta como ion Mg^{+2} .

4.5.1 Flujo del calcio y el magnesio en el suelo

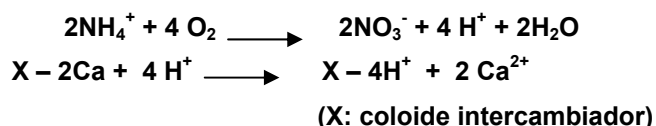
Los vegetales toman calcio y magnesio soluble que se encuentran en equilibrio con el intercambiable (Figura 4.5.1). La magnitud de ambas formas varía en función de lo absorbido por las plantas y del perdido por percolación.

Como el calcio se encuentra en cantidades mayores en el complejo de cambio y en la solución del suelo, se comprende que el elemento se pierde por lavado es mayor que el Mg. Condiciones de aridez anula la posibilidad de lixiviación y en suelos de regiones tropicales donde la precipitación son elevada, la lixiviación también lo es, tal es el caso de los suelos pertenecientes al orden Oxisol.

En zonas húmedas, el CaCO_3 del material parental se solubiliza derivado de la actividad biótica, y el régimen hídrico. La presencia de CO_2 y H_2O , transforman al carbonato de muy baja solubilidad en bicarbonato de calcio el cual puede migrar en el perfil hasta la profundidad en que la presión parcial del CO_2 , disminuye.



La mineralización de la materia orgánica produce NH_4^+ , el que en condiciones redox propicias se oxida a NO_3^- . Esta reacción libera H^+ que puede intercambiarse con el Ca^{2+} en los sitios de adsorción de los coloides del suelo y por lo tanto afectar la lixiviación de Ca^{2+} . La fertilización nitrogenada amoniacal puede actuar de manera equivalente.



Los sitios de adsorción de los coloides inorgánicos no son muy selectivos para los iones Ca, en contrario con lo que ocurre con los de naturaleza orgánica. Sin embargo su bivalencia y una capa de hidratación más bien delgada, hacen que este elemento sea adsorbido fuertemente por los diferentes tipos de minerales de arcilla.

El calcio juega un papel muy importante en la estructuración del suelo. Altos contenidos favorecen la formación de complejos con fracciones húmicas las que inciden en la capacidad estructurante y por ende en la dinámica del aire y el agua.

Los procesos de meteorización de los minerales, el agregado de productos correctores de la acidez, tales como CaCO_3 . MgCO_3 (dolomita) o CaCO_3 (caliza) o fertilizantes conteniendo estos elementos y en menor medida la mineralización de la M.O. producen la liberación del Ca-Mg y Ca respectivamente hacia la solución del suelo. Los elementos así liberados entran en equilibrio con las formas intercambiables, pueden ser absorbidos por las plantas, ser usado por los microorganismos para el proceso de humificación, o perderse por lixiviación hacia capas más profundas o napas.

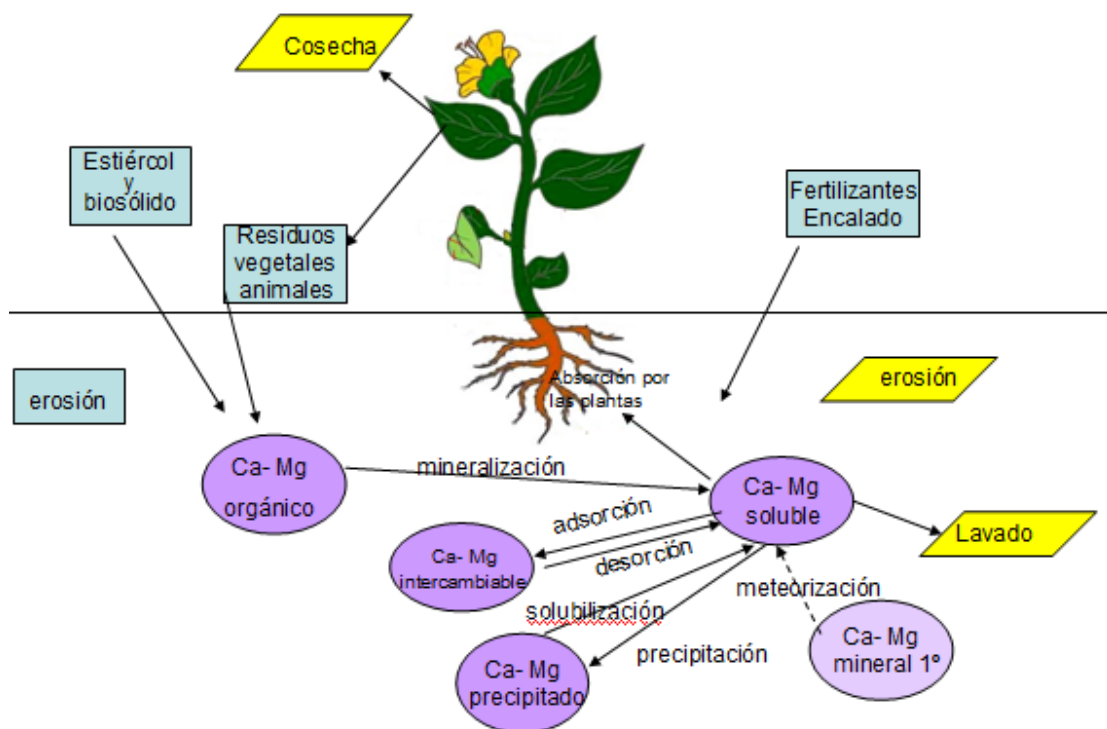


Figura 4.5.1 Flujo del calcio y magnesio en el suelo.

4.5.3 Diagnóstico de la fertilidad cálcica y magnésica

Desde el punto de vista de la nutrición vegetal, las formas edáficas del potasio y el magnesio pueden calificarse como:

- **factor intensidad:** forma disponible para las plantas, está constituida por los iones en solución.
- **factor capacidad:** forma de reserva dinámica en el corto y mediano plazo, está compuesta fundamentalmente para Ca-Mg por las formas intercambiables, para el Ca los precipitados de Ca más solubles y en menor medida por las formas orgánicas conteniendo los dos elementos.
- **factor renovación:** mecanismos de transformación de capacidad en intensidad, por lo que para estos elementos está constituido por fenómenos de desorción, solubilización de precipitados y mineralización de materia orgánica.

La medida más ampliamente difundida en el mundo y en el país con fines de diagnóstico, es la concentración de estos elementos en la situación de intercambio.

Para suelos neutros a ligeramente ácidos, no salinos ni calcáreos, el método más ampliamente difundido es la determinación a partir de extractos de acetato de amonio 1N pH 7. El diagnóstico de las condiciones de suficiencia y deficiencia se realiza a través de valoraciones absolutas INTA 1989 (Tabla 4.5.1) y relativas.

Se puede analizar el contenido porcentual de calcio o magnesio respecto a la CIC. Se considera rangos de suficiencia para calcio entre el 65 - 85% y para Mg 6-12 %.

Solo a título de ejemplo en la Tabla 4.5.2 se detallan otros criterios de diagnóstico de las cuales no existen calibraciones regionales en el país por lo tanto es dable esperar variación de los umbrales según condiciones edafo-climático-culturales. Valor superior al umbral indicaría deficiencias relativas del elemento del denominador.

El calcio presenta antagonismo con el fósforo, por insolubilización de los fosfatos en los suelos calizos; entre el azufre, el exceso de calcio favorece la formación de sulfato de calcio susceptible a ser lavado y entre el calcio y la mayoría de oligoelementos principalmente el hierro. Altos niveles de calcio en el suelo o aplicaciones de enmiendas o fertilizantes que contienen Ca han mostrado inhibir la absorción de Mg. Sin embargo el efecto antagónico parece no ser tan fuerte como el del K sobre la absorción de Mg. La fertilización del suelo con K interfiere la captación de Mg por la planta, puesto que bloquean la fijación.

El magnesio ha probado tener efecto antagónico sobre la absorción de manganeso (Garcia y Garcia, 2013).

Denominación	Ca⁺⁺ intercambiable (cmolc.kg⁻¹)	Mg⁺⁺ intercambiable (cmolc.kg⁻¹)
Muy alto	> 20	> 8
Alto	20 – 10	8 – 3
Medio	10 -5	3 – 1
Bajo	5 – 2	1 – 0,3
Muy bajo	< 2	< 0,3

Tabla 4.5.1. Escala de provisión de Ca y Mg intercambiables

Relación de cationes intercambiables	Umbral crítico
Ca + Mg/K	7 – 13/1
Ca/Mg	5 - 10/1

Tabla 4.5.2 Umbrales críticos de relaciones entre cationes intercambiables

Bibliografía

- Adrián A. Correndo y Fernando O. García. (2012). Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. Archivo agronómico IPNI.
- Chao, T.T.; Harward, M.E.; Fang, A.C. (1962). Movement of S tagged sulfate through soil columns. Soil Science Soc. Am.Proc.26 (1): 27-32
- Chiarotti, S. y Pontoni, C. (2000). Trigo: Ensayo de Fertilización Azufrada. INPOFOS - Informaciones agronómicas del Cono Sur N° 15.
- Cordone, G. y Martínez, F. (2002). Efecto de la aplicación de Azufre y distintas dosis de Nitrógeno sobre el rendimiento del doble cultivo trigo/soja. INPOFOS - Informaciones agronómicas del Cono Sur N° 13.
- Demetrio Mufarrege. (2001). El magnesio en la alimentación del ganado bovino para carne. E.E.A. INTA Mercedes, Corrientes, Noticias y Comentarios N° 354. www.produccion-animal.com.ar.
- Echeverría H E, San Martín N F y Bergonzi. R (2000). Métodos rápidos de estimación de nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos. Ciencia del Suelo 18 (1) 9-16
- Echeverría H., Bergonzi R. (1995). Estimación de la mineralización del N en suelos del SE bonaerense. SAGPyA, INTA. Boletín Técnico N°135. 15 p.
- Esposito G., Castillo C., Balboa G., y Balboa R, C. (2009). Nivel crítico de fósforo y azufre en suelos del sur de Córdoba para el cultivo de soja. INPi - Informaciones agronómicas del Cono Sur N° 43.
- FAO. (1995). Manual técnico de la fijación simbiótica del nitrógeno: leguminosa-Rhizobium. Roma Italia.
- Fassbender H.W. (1984). Química de suelos. Inst. Interamericano de Ciencias Agrícolas.OEA. Turrialba. Costa Rica, 398 p.
- Fassbender, Hans W. y Elmer Bornemisza. (1987). Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 313-325.
- Fox R. L., Asghar M., Cable W.J. (1983). Sulfate in soil of the tropics In Blair, G.J., and Hill Eds Sulfur in S.E. Asian and S. Pacific Agriculture. Armidale, Australia, University of New England. pp 39-53.
- Fox, R.L. (1980). Responses to sulphur by crops growing in highly weathered soils. Sulphur in Agriculture 4: 16-22.
- García Navarro Simón y García Navarro Gines (2013). Química agrícola del suelo y nutrientes esencial. 3° ed Muniprensa. España. 492 pp
- Graciela Cordone y Fernando Martínez (2000). El Azufre en el sistema productivo del Centro-Sur de Santa Fe. INPOFOS 5 p 12.
- Gutiérrez Boem, F H. (2006). Azufre. En: Materia Orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Editorial Facultad de Agronomía 206 pp

- Hague I y Walmsley D (1973). Adsorption and desorption of sulphater in some soil of the wet indies. *Geoderma* 9:269-278
- INPOFOS (2002). Archivo agronómico N° 3 Requerimientos nutricionales de los cultivos.
- INTA. (1989). *Degradación de los Suelos en el Norte de la Región Pampeana*. Publicación Técnica N° 6. Proyecto de Agricultura Conservacionista, 1989.
- Kass C.L D (1998). Fertilidad de suelos. Euned, San José Costa Rica. 232 pp
- Keeney D. R & Nelson D. W. (1982). Nitrogen in organic forms. Pages 645-698 in A L Page eds *Mathods of soil análisis. Part 2 Agronomy N° 9*. Americam Society of Agronomy. Madison.
- Melgar R. (1999). Azufre disponible. La herramienta adecuada. *Fertilizar* N° 17.
- Mengel K., Kirkby E.A. (2000). Principios de Nutrición Vegetal. Ed. Instituto Internacional de la Potasa, Basilea Sueiza. 4^{ta} Ed. 1^{ra} Ed. en español. 6'7 p
- Mengel, K. & Scherer, H. W. (1981). Release of nonexchangeable (fixed) soil ammonium under field conditions during the growing season. *Soil science*, 131(4), 226-232.
- Navarro Blaya S. y Navarro Garcia G. (2003). Química agrícola. Ed MundiPrensa Madrid. 487 pp
- Stanford G, Hanway J. (1955). Predicting nitrogen fertilizer needs of Iowa soils: a simplified technique for determining relative nitrate production in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 19: 74- 77.
- Tabatabai, M.A. (1996). Sulfur. En D.L. Sparks (ed.) *Methods of soil analysis, Part 3, Chemical methods*, SSSA, Madison, WI, USA, pp. 921-960.
- Taiz Lincoln y Zeiger. Eduardo 2006. Fisiología vegetal. Universitat Jaume. 583pp
- Thompson Louis M. y Troeh Frederick R. (2002). Los suelos y su fertilidad. Ed Reverté. S.A. 4ta edición Barcelona. 657pp
- Tisdale, S. L (1974). Sulphur: Part 1 an Introduction *Fert Solutions* 18 (6): 8-16
- Tisdale, S.; Nelson, W.; Beaton, J. y Havlin, J. (1993). *Soil Fertility and Fertilizers*. Ed: Macmillan Publishing Company. Chapter 10: 364-404.
- Vivas H. S., H. Fontanetto R. Albrecht y J. Hotian (2001) Fertilización con Fósforo y Azufre para la producción de Trigo en el departamento San Jerónimo (Santa Fe). INPOFOS 10.
- William Daub y Seese Williams (1996). Química. Pearson educación 7ma ed. México 768.

CAPÍTULO 5

MICRONUTRIENTES DEL SUELO

Andrea Edith Pellegrini

Los suelos fértiles requieren un armónico equilibrio de sus componentes iónicos sobre todo en el caso de los micronutrientes esenciales que actúan en los catalizadores biológicos como son las enzimas.

MARGARITA ALCONADA, JORGE LANFRANCO,
ANDREA PELLEGRINI, SUELO EN EL PAISAJE

5.1 Molibdeno

El contenido de molibdeno total en los suelos varía entre 0,3 y 5 mg kg⁻¹ (Fassbender, 1980). Se encuentra en forma orgánica, asociado al humus y en forma inorgánica formando mineral primario y secundario; adsorbido al complejo coloidal y/o disuelto en la solución del suelo.

La forma soluble y asimilable por las planta es como molibdato en su forma oxidada $\text{MoO}_4^{=}$ (VI), compite a nivel de absorción con sulfatos y fosfatos.

El Mo en las plantas actúan en la síntesis de los aminoácidos pues forma parte de la enzima nitrato reductasa. Este elemento es necesario para el desarrollo de las bacterias fijadoras de nitrógeno.

En el suelo es el único micronutriente cuya solubilidad aumenta con un aumento de pH. A pH 5-6 la especie dominante es HMoO_4^- mientras que a pH más bajo se encuentra el catión MoO^{+2} . Por tal motivo la posible deficiencia del Mo en suelos ácidos se verá disminuida por el encalado.

La presencia de óxidos de hierro y aluminio en los suelos tienden a retener al molibdeno. Esta adsorción es tanto mayor cuanto más alto sea el contenido de estos óxidos a más bajo pH.

La adición de grandes cantidades de fertilizante fosforado a suelos ácidos incrementa la absorción de molibdeno por las plantas. Mientras que un exceso de azufre puede producir antagonismo con el molibdeno esto se explica por una competencia directa entre dos aniones ($\text{MoO}_4^{=}$ y el $\text{SO}_4^{=}$) equivalentes del mismo tamaño y cargas similares, Ronen E. (2008).

5.2 Zinc

El contenido de zinc total en los suelos varía entre 60 y 90 mg kg⁻¹ (Ratto y Miguez, 2006).

El zinc en el suelo se encuentra en forma inorgánica formando mineral como olivino, hornblenda, magnetita, augita, biotita que pueden ser liberados por intemperización; disuelto en la solución del suelo; intercambiable, adsorbido al complejo coloidal y como quelatos.

La forma que es absorbido por la planta es Zn⁺² o como quelato por la vía radicular o foliar.

El Zn en las plantas es un componente clave de muchas enzimas y proteínas.

La disponibilidad de este micronutriente varía según el pH del suelo. En condiciones excesivamente ácidas, pH < 5 el Zn está más disponible pudiéndose perderse por lixiviación. Al aumentar el pH 6-7 la disponibilidad disminuye. Si en el suelo predomina el ion Ca se forma zincato de calcio que es insoluble, pero si en el suelo predomina el Na se forma zincato de sodio soluble.

Los suelos arenosos o de baja materia orgánica, tienden a ser más propensos a las deficiencias de Zn. Suelos de turba u orgánicos, también pueden mostrar deficiencias, dado que la quelación natural puede hacer que el zinc no esté disponible.

Bajas temperaturas producen una disminución en la tasa de liberación de Zn a la solución del suelo (Ratto y Miguez, 2006).

Hay antagonismo entre el P y el Zn ya que en suelos ácidos precipita como fosfato de zinc. La deficiencia de cobre limita la absorción del zinc por las raíces.

En condiciones anaeróbicas puede formarse sulfuro de zinc forma poco soluble.

Gran aporte de nitrógeno pueden provocar deficiencia de zinc a causa del diferente ritmo de absorción por la planta de los dos elementos (García y García, 2013).

5.3 Cloro

En los suelos el cloro se encuentra bajo la forma de cloruro en un amplio margen que varía entre 0 a 1000 kg de Cl⁻ ha⁻¹ (García y García, 2013) Se halla como sales solubles: silvina (KCl), halita (Na Cl), carnalita (KMgCl₂).

Normalmente todos los suelos contienen cloro que pueden provenir de la descomposición de rocas ígneas principalmente, degradación de restos orgánicos, de aportes por lluvias cercanas a zonas marítimas o por aguas subterráneas.

Las plantas absorben el cloruro de la solución del suelo como ión Cl⁻. Desempeña un papel importante en algunas plantas, incluyendo en la fotosíntesis, el ajuste osmótico y la supresión de enfermedades de las plantas. Este nutriente está también involucrado en el transporte de cationes como el potasio, calcio, magnesio dentro de la planta.

A causa de su gran solubilidad y de tener carga negativa es poco retenido por el complejo coloidal a pH neutros a alcalinos. En climas secos donde la evapotranspiración supera al drenaje

los cloruros tienden a acumularse en superficie. Puede precipitar con la presencia de plata, mercurio, cobre o plomo.

Los suelos de textura más gruesas con buen drenaje eliminarán los Cl^- más fácilmente con las aguas de lavado a diferencia de los suelos de texturas más finos que tienden a retener más agua y donde la infiltración es más lenta.

Hay antagonismo entre Cl^- y NO_3^- . Cuando la concentración de cloruros en la solución del suelo aumenta, las plantas toman cloro en vez de los nutrientes esenciales aniónicos, especialmente nitratos. Alto aporte de Cl^- en medio nutritivo, reduce la absorción de nitrato y viceversa (Mengel y Kirkby, 1987).

Excesivas concentraciones de cloruros en el suelo o en el agua de riego, darán como resultado una disminución del rendimiento y de la calidad del cultivo. Por lo tanto, la calidad del agua de riego y el manejo de riego son los principales factores que afectan la concentración de cloruro en el suelo. La toxicidad con el cloro es frecuente y supone un estrés general que limita el crecimiento de plantas sobre todo en zonas áridas y semiáridas (García y García, 2013).

Dado que el cloruro casi no se adsorbe a las partículas del suelo, su nivel en el suelo se mide en un extracto acuoso del suelo, como la pasta saturada o relación 1:2 (1 volumen de suelo - 2 volúmenes de agua destilada).

5.4 Manganeso

El contenido de manganeso total en los suelos varía entre 200 y 300 mg kg^{-1} (Navarro Blaya, Navarro García, 2003).

En el suelos se encuentra en forma inorgánica formando mineral primarios como olivino, hornblenda, augita, biotita, anortita, andesina; óxido como pirolusita (MnO_2), hausmanita (Mn_3O_4) y oxo-hidróxido como manganita (MnOOH); disuelto en la solución del suelo; intercambiable, adsorbido al complejo coloidal y formando quelatos.

La forma que es absorbido por la planta es Mn^{+2} y como quelato tanto por la vía radicular como foliar.

El manganeso en las plantas es un componente de los cloroplastos, influye en la formación de azúcares, participa en la fotosíntesis e interviene en el metabolismo del nitrógeno.

La disponibilidad de este micronutriente varía según el pH del suelo. A pH bajos predomina el Mn^{+2} , pero a medida que el pH del suelos se incrementa se favorece la aparición de forma insoluble (Mn^{+4}) al alcanzar el valor de 8 predominará en la forma MnO_2 . A pH neutro el Mn^{+3} es abundante y son los microorganismos que juegan un papel muy importante ya que los mismos lo pueden reducir a Mn^{+2} que es la forma más soluble y disponible para las plantas. El encalado excesivo puede ser motivo de aparición de deficiencia, mientras que los fertilizantes con efecto acidificante principalmente los amoniacales tenderán a incrementar la solubilidad.

Las condiciones oxidantes (suelos bien aireados) favorece los compuestos más estables, con valencia IV, por lo tanto en suelos encharcados donde el potencial redox es bajo predomina forma más soluble del Mn^{+2} . Si el potencial redox es bajo y el pH del suelos es mayor a 8 se forma carbonato de manganeso (valencia II) insoluble.

La materia orgánica en elevada cantidad, puede provocar deficiencia de manganeso, en suelos de pH alcalinos, ya que se favorece la formación de complejos. Altos contenidos de materia orgánica, en zonas frías y con alta humedad frecuentemente condicionan la deficiencia de manganeso. Esta condición puede estar relacionada a la baja actividad microbológica. La situación cambia si aumenta la temperatura y el suelo se seca.

Hay antagonismo entre el Mn y el Zn ya que son bastantes parecidos para que se de el fenómenos de competencia por la entrada en las raíz, al utilizar las mismas moléculas transportadora (Thompson y Troeh, 2002). El magnesio ha probado tener un efecto antagónico sobre la absorción de manganeso. En suelos muy ácidos con elevado Mn soluble, la aplicación de Mg puede disminuir su efecto dañino (Garcia y Garcia, 2013).

5.5 Boro

El contenido de boro total en los suelos tiene valores entre 20 a 200 mg kg^{-1} mientras que el boro soluble puede variar entre 0,05 y 5 mg kg^{-1} en las capas superficiales de regiones húmedas (Fassbender, 1978).

Las principales fuentes de B están constituidas por depósitos de diferentes minerales como la turmalina, bórax; ulexita, colemita y kernita. También se encuentra adsorbido sobre minerales de arcilla, hidróxido de hierro y aluminio. El boro unido a la fracción orgánica es una parte importante del boro total.

Este elemento no se encuentra libre en la naturaleza existiendo exclusivamente enlazado a oxígeno.

El B es absorbido por las raíces, a partir de la solución del suelo como ácido bórico (H_3BO_3) no disociado. Es de fundamental importancia para el desarrollo de las yemas apicales y de las puntas de las raíces. El 95% de este elemento de una planta se suele encuentra en las paredes celulares. Interviene en la síntesis de compuestos fenólicos, como la lignina. También está relacionado con el transporte de azúcares en planta y facilitaría el paso de la molécula de azúcar a través de la membrana.

El B adsorbido y desorbido por los suelos varía de acuerdo con el contenido de minerales de arcilla, óxidos y materia orgánica y con la afinidad que estos presenten por el elemento. Su disponibilidad se ve afectada por diversos factores tales como pH, textura, humedad y temperatura (Goldberg, 1977).

El ácido bórico [H_3BO_3] es un ácido débil y en solución acuosa de pH < 7 se presenta principalmente con ácido bórico no disociado. A pH mayores el ácido bórico acepta iones hidroxilo

del agua formando un anión borato ($\text{B}(\text{OH})_4^-$). A medida que se incrementa el pH de la solución del suelo, usualmente en un rango de 3 a 9, disminuye la disponibilidad de B para las plantas.

Los óxidos de aluminio fijan más B que los óxidos de hierro. En las arcillas cristalinas, la adsorción sigue al siguiente orden: illita > montmorillonita > caolinita.

Las plantas encuentran reducidas cantidades de B disponible cuando la humedad es extraída desde mayores profundidades a la vez que decrece su difusión a la planta, al disminuir el contenido de agua, reduciéndose así su movilidad durante las condiciones de sequía.

Los microorganismos son los encargados de liberar el boro de los complejos orgánicos del suelo. La actividad disminuye con la sequía y aumenta en suelos templados y húmedos.

El boro puede causar síntomas de toxicidad en determinadas áreas provocando graves daños a las plantas debido por ejemplo, al uso de agua de riego contaminada con una alta concentración de este elemento. Dicha contaminación puede ser provocada por: vertidos urbanos (ricos en detergentes y productos de limpieza); vertidos industriales y productos químicos utilizados en la agricultura.

En un suelo con alto contenido en B total se logra una reducción de su forma soluble adicionando materia orgánica evitando así la toxicidad en la planta; mientras que en suelos arenosos, donde la lixiviación reduce los niveles de B total, la adición de materia orgánica puede reducir la lixiviación e incrementar la nutrición del elemento en la planta (Yermiyahu *et al.*, 2001). Otra alternativa para incrementar la retención del boro en el suelo ácido es mediante la aplicación de carbonato de calcio (encalado) cuyo efecto es aumentar el pH de la solución.

Interacciones con otros elementos nutritivos: las fertilizaciones nitrogenadas en grandes cantidades atenúan los excesos de boro, ya que disminuyen la absorción de boro por las plantas. Del mismo modo, una elevada fertilización nitrogenada podría inducir una deficiencia en boro. Otros estudios muestran una sinergia entre las absorciones de boro y fósforo, potasio, calcio y magnesio, estando estos macroelementos en cantidades no excesivas. Por el contrario, potasio, magnesio, hierro y molibdeno a elevadas concentraciones ejercen un antagonismo en la absorción de boro (Vera, A., 2001).

5.6 Hierro

El contenido de hierro en suelos templados varía entre 1 a 5 %; en lateritas puede alcanzar 10% (García y García 2013). Se encuentra en forma inorgánica formando minerales primarios como olivino, hornblenda, biotita, turmalina que pueden ser liberados por intemperización; minerales secundarios en forma de hidróxidos, óxidos: hematita (Fe_2O_3): magnetita (Fe_3O_4); carbonato: siderita (CO_3Fe) y sulfuro: pirita (S_2Fe); incorporado a la materia orgánica formando quelatos; adsorbidos en el complejo coloidal del suelo y soluble en la solución del suelo.

El hierro puede ser absorbido por la planta mediante su sistema radicular como Fe^{+2} o como quelato de hierro. Es un constituyente de varias enzimas, interviene en reacciones fundamentales

de óxido-reducción, ayuda a reducir los nitratos y sulfatos. Aunque el hierro no se usa en la síntesis de la clorofila (el pigmento verde de las hojas), es esencial para su formación.

En presencia de O_2 el Fe^{+2} es oxidado rápidamente a Fe^{+3} , el cual es poco soluble en agua y precipita como óxidos de Fe. Por lo tanto, en nuestra atmósfera rica en O_2 , la forma termodinámicamente más estable del hierro es también la de más difícil acceso para los organismos. Según Benavides (2000) las plantas tienen dos diferentes vías o estrategias por medio de las cuales son capaces de aumentar la disponibilidad de Fe^{+3} en la solución de agua del suelo. Las monocotiledóneas no gramíneas y las dicotiledóneas pueden disminuir el pH en la rizósfera; la disminución en el pH solubiliza el Fe^{+3} y promueve la reducción del mismo a Fe^{+2} . Las gramíneas excretan fitosideróforos, aminoácidos no proteínicos, que solubilizan los iones Fe^{+3} formando un complejo Fe-fitosideróforo (quelantes en plantas). Los fitosideróforos acarrean también otros cationes como el Zn, Mn y Cu.

La solubilidad del hierro es máxima a pH 3, cuando aumenta el pH del suelo desciende enérgicamente. El suelo por lo general contiene cantidades altas de hierro total, pero una porción muy pequeña es asimilable por la planta. A pH neutro el ion férrico es insoluble. Esta situación es más grave en suelos calcáreos ya que las raíces tenderán a tomar Ca en detrimento del Fe.

La solubilidad del hierro en el suelo también depende del contenido en materia orgánica del mismo. Las asociaciones del hierro con los agentes quelantes de la materia orgánica da lugar a la formación de complejos que incrementan la concentración y movilidad de este nutriente del suelo.

La toxicidad por el hierro es muy poco factible pues en condiciones aeróbicas predominan la insoluble, Fe^{+3} . En la arrocería, en el periodo de inundación, para evitar la absorción de excesos de Fe^{+2} , el cultivo oxigena la zona rizosférica pudiendo así controlar de manera efectiva la toma del elemento gracias a sus estructuras especiales de respiración (aerénquima).

En los suelos ácidos bien meteorizados, típicos de zona tropical los óxidos de hierro tienen a fijar al fósforo lo que posibilita la deficiencia de estos elementos. El hierro presenta sinergismo con el Li y antagonismo con Cu, Zn, Si, Cr, Mn y Co (Zuñiga 1999).

5.7 Cobre

Los niveles medios de cobre en los suelos varían entre 6 y 60 $mg\ kg^{-1}$ (Zuñiga 1999). Se encuentra en forma inorgánica formando mineral como olivino, hornblenda, augita, biotita, anortita, andesina, oligoclasa, albita, ortoclasa, calcopirita, que pueden ser liberados por intemperización.

En el suelo el cobre se adsorbe a las cargas negativas y tiene la particularidad de ser muy fuertemente retenido, formando enlaces muy energéticos que limita su movilidad, forma ocluida. Otras formas del metal en el suelo se asocia con los constituyentes orgánicos formando quelatos orgánicos, disuelto en la solución del suelo y cobre intercambiable, adsorbido al complejo coloidal.

La forma que es absorbido por la planta es Cu^{+2} tanto por la vía radicular como foliar, y como quelatos. Es un componente presente en el proceso de la fotosíntesis, la respiración, la distribución de carbohidratos, en el metabolismo de proteínas y asociado a numerosas enzimas.

La disponibilidad del cobre se ve influenciada por el contenido de la materia orgánica, el pH y la presencia de otros iones metálicos como Fe, Mn y Al.

Al aumentar la cantidad de materia orgánica del suelo mayor es la retención del cobre por la misma, por tal motivo es máximo en turbas y estiércoles (Tisdale y Nelson, 1977)

La escasa movilidad del cobre se reduce aún más a pH superiores a 7,5 aumentando su sorción sobre la superficie de los coloides minerales (Darwich, 2006).

La presencia de Fe, Mn y Al afecta la disponibilidad del cobre para las plantas. Presenta antagonismo con el Zn^{+2} a nivel de absorción.

El Cobre en grandes cantidades es tóxico para las plantas. Alvaro y Ramirez (1979) encontraron la disminución de la toxicidad de cobre con elevada fertilización con fósforo o nitrógeno.

Bibliografía

- Benavides, A. (2000). Absorción y asimilación de hierro en las plantas. *Ciencia UANL*, 3(1), 50-57.
- Cordero Alvaro y Ramirez Gerardo F. (1979). Acumulamiento de cobre en los suelos del pacifico sur de costa rica y sus efectos detrimentales en la agricultura. *Agron. Costarr.* 3(1): 63-78.
- Fassbender, HW. (1978). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Ed. IICA. San Jose, Costa Rica. 398 pp.
- Garcia Navarro Simon y Garcia Navarro Gines (2013). Química agrícola del suelo y nutrientes esencial. 492 pp
- Goldberg, S. (1977). Chemistry and mineralogy of born in soils. In: Gupta, U. C. (ed.). Boron and its role in crop production. Boca Raton: CRC Press, pp. 3-44.
- Mengel K. and E.A. Kirkby. (1987). Principles of plant nutrition. 4th ed. IPI, Bern 687 pp
- Ratto, S. E., y Miguez, F. H. (2006). Zinc en el cultivo de maíz, deficiencia de oportunidad. INPOFOS N° 31. pp 11-14.
- Ronen, E. (2008). Microelementos en la agricultura. Red Hidroponía, Boletín No 38. Lima-Perú
- Navarro Blaya Simon, Gines Navarro Garcia 2003. Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Mundi-Prensa. pp 487
- Thompson, L. M. y Troeh, F. R. (2002). Los suelos y su fertilidad. 4ta edición pp 657.
- Vera, A. L. A. (2001). El boro como nutriente esencial. *Horticultura: Revista de industria, distribución y socioeconomía hortícola: frutas, hortalizas, flores, plantas, árboles ornamentales y viveros*, (155), 36-47.
- Yermiyahu, U., R. Keren y Y. Chen. (2001). Effect of composted organic matter on boron uptake by plants. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65(5): 1436-1441.
- Zuñiga Francisco Bautista (1999). Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. Vol 1 Libro de tecnológicos. 109 pp.

Los Autores

Margarita M. Alconada Magliano es Ingeniera Agrónoma. Doctora en geografía (UNAM). Magister Sc Suelo (UBA). Profesora Adjunta del curso de Edafología de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata

Jorge W. Lanfranco es Ingeniero Agrónomo. Profesor Titular del curso de Edafología de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata.

Andrea E. Pellegrini es Ingeniera Agrónoma. Especialista en medio ambiente. Docente del curso de Edafología de la facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata.

Alconada Magliano, Margarita

Suelo en el paisaje : parte I : condiciones de dotación / Margarita Alconada Magliano ; Jorge Washington Lanfranco ; Andrea E. Pellegrini. - 1a edición para el alumno - La Plata : EDULP, 2018.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-987-4127-48-8

**1. Agua Subterránea. 2. Materia Orgánica. I. Lanfranco, Jorge Washington II. Pellegrini, Andrea E. III. Título
CDD 550**

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP

Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata
47 N.º 380 / La Plata B1900AJP / Buenos Aires, Argentina
+54 221 427 3992 / 427 4898
edulp.editorial@gmail.com
www.editorial.unlp.edu.ar

Edulp integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2015
ISBN 978-987-4127-48-8
© 2017 - Edulp

n
naturales



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA**