

Serie Didáctica N° 8

# Facultad de Ciencias Forestales

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO



CATEDRA DE  
EDAFOLOGÍA FORESTAL

## GUÍA DE EVALUACIÓN ECOLÓGICA DE SUELOS



**Guido LORENZ**

Marzo 2004

Diseño de tapa por Fabián Zubrinic con un dibujo de Virginia Lorenz  
Tipografía por el autor con el sistema de documentación L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Impreso en Santiago del Estero, Marzo 2004

Lorenz, Guido. 2004. Guía de Evaluación Ecológica de Suelos.  
Nº 8 en la Serie Didáctica de la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina.

*Autor:*

Dr. Guido Lorenz  
Profesor de Edafología Forestal  
Facultad de Ciencias Forestales  
Universidad Nacional de Santiago del Estero  
Av. Belgrano (S) 1912  
4200 Santiago del Estero  
Argentina  
e-mail: [glorenz@unse.edu.ar](mailto:glorenz@unse.edu.ar)

---

## PRÓLOGO

Esta guía está destinada a estudiantes, docentes y usuarios de suelos, que desean evaluar las funciones del suelo como componente de ecosistemas.

La metodología presentada se basa principalmente en la escuela alemana de evaluación de suelos, representada por mis profesores Dr. Ernst Schlichting<sup>†</sup> y Dr. Karl Stahr, autores de un libro abarcativo sobre descripción, análisis, interpretación y evaluación ecológica de suelos (Schlichting y Blume, 1966; Schlichting et al., 1995). Estos libros y una “guía de práctica” para estudiantes de edafología, del profesor Reinhold Jahn (1992), se usaron como principales fuentes de este texto. Una serie de otros trabajos se consideró para complementar ciertos aspectos de la evaluación. Fueron introducidas adaptaciones, necesarias para compatibilizar algunos métodos con otros sistemas de medición o para considerar condiciones locales.

Un nuevo enfoque incorporado en esta guía, es la creación de connotaciones ecológicas con nombres o adjetivos taxonómicos de suelos, con la idea de fomentar un afianzamiento con la nomenclatura específica y despertar el interés en la génesis del suelo cuyo conocimiento nos facilita tanto su interpretación funcional. Ello ha sido posible gracias a la reciente aparición de la “Base Referencial Mundial del Recurso Suelo” (ISSS Working Group RB, 1998), un sistema moderno de clasificación de suelos que considera criterios que inciden en la funcionalidad de los mismos y que es fácil de aprender debido a su estructura relativamente simple.

Quisiera agradecer en este lugar a la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, que me proporcionó el marco para elaborar la guía y la posibilidad de aplicarla en la docencia a nivel de grado y post-grado. Naturalmente merece una mención especial la comunidad educativa, que es el motor que promueve y retroalimenta nuestra actividad docente.

Esta guía se encuentra bajo una revisión y ampliación continua, sugerencias y observaciones al presente trabajo serán bienvenidas.

Santiago del Estero, marzo 2004

Guido Lorenz

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Matriz de evaluación . . . . .	2
<b>2. Densidad aparente y porosidad total</b>	<b>5</b>
<b>3. Espacio de enraizamiento</b>	<b>7</b>
3.1. Profundidad límite de enraizamiento . . . . .	7
3.2. Arraigabilidad . . . . .	8
3.3. Nomenclatura taxonómica relacionada con las condiciones de enraizamiento . . . . .	8
<b>4. Balance de agua y aire del suelo</b>	<b>9</b>
4.1. Sistema poroso del suelo - importancia . . . . .	9
4.2. Estimación de las fracciones de agua o poros . . . . .	11
4.3. Evaluación de la porosidad total . . . . .	14
4.4. Balance de aire . . . . .	14
4.5. Balance de agua del suelo . . . . .	15
4.5.1. Evaluación de la capacidad de campo . . . . .	15
4.5.2. Evaluación de la capacidad de agua útil . . . . .	15
4.5.3. Estimación y evaluación de la conductividad hidráulica del suelo . . . . .	16
4.5.4. Disponibilidad de agua para plantas . . . . .	16
<b>5. Evaluación del balance de elementos</b>	<b>23</b>
5.1. Conceptos generales . . . . .	23
5.1.1. Cálculo de cantidades de nutrientes en el espacio de enraizamiento . . . . .	24
5.2. Materia orgánica del suelo (MOS) y nitrógeno orgánico (Nt) . . . . .	25
5.3. Complejo adsorbente . . . . .	27
5.3.1. Capacidad de intercambio de cationes (CIC) . . . . .	27
5.3.2. Saturación de bases y valor S . . . . .	28
5.4. Evaluación de cantidades disponibles y reservas movilizables . . . . .	30
5.5. Condiciones adversas relacionadas con el balance de elementos . . . . .	31
5.5.1. Salinidad . . . . .	31
5.5.2. Sodicidad . . . . .	33
<b>6. Capacidad filtro de suelos</b>	<b>35</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>37</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Esquema de descripción e interpretación de suelos en el terreno . . . . .	1
1.2. Cadena causal de pedogénesis y pedofunción . . . . .	2
1.3. Ficha edáfica sintética para registrar los datos de observación <i>in situ</i> de suelo y ambiente y de la evaluación ecológica del suelo . . . . .	4
2.1. Evaluación de la densidad aparente (Dap) en función del contenido de arcilla . . . . .	6
4.1. Curva de retención de agua y distribución de los tamaños de poros . . . . .	10
4.2. Clases texturales según el sistema estadounidense . . . . .	12
4.3. Regiones hídricas de la Argentina de acuerdo a diferentes clasificaciones (bio)climáticas	21
5.1. Esquema de la movilización de elementos a partir de un pool de reservas . . . . .	23
5.2. Estimación del contenido de materia orgánica (humus) del suelo en función de color, pH y textura . . . . .	25
5.3. Rangos de capacidad de intercambio catiónico (CIC) en función del tipo de mineral de arcilla . . . . .	28
5.4. Relación entre pH del suelo y la saturación de bases . . . . .	29

## ÍNDICE DE CUADROS

1.1. Matriz de la evaluación del suelo como factor de sitio de la vegetación . . . . .	3
2.1. Clave para la estimación de la densidad aparente (Dap) de suelos minerales . . . . .	5
2.2. Clave sencilla para la estimación de la densidad aparente (Dap) de suelos minerales . . . . .	6
3.1. Evaluación de la profundidad límite (fisiológica) de enraizamiento . . . . .	7
3.2. Estimación de la arraigabilidad . . . . .	8
4.1. Rangos de tamaños de poros y su importancia ecológica . . . . .	9
4.2. Estimación de porosidad (P), capacidad de aire (CA), agua útil (AU) y capacidad de campo en función de textura y densidad aparente . . . . .	13
4.3. Correcciones de porosidad, capacidad de aire, agua útil y capacidad de campo en función del contenido de materia orgánica y de arcilla . . . . .	13
4.4. Evaluación del volumen total de poros (porosidad P) . . . . .	14
4.5. Evaluación de la capacidad de aire (CA, poros con $\phi > 50\mu\text{m}$ ) . . . . .	14
4.6. Evaluación de la capacidad de campo (CC, poros con $\phi < 50\mu\text{m}$ ) . . . . .	15
4.7. Evaluación de la fracción de agua útil (AU, poros con $\phi = 0.2 - 50\mu\text{m}$ ) . . . . .	15
4.8. Estimación de la conductividad hidráulica de suelos de acuerdo a densidad aparente y textura . . . . .	16
4.9. Evaluación de la conductividad hidráulica de suelos . . . . .	16
4.10. Interpretación de la clase de agua útil para zonas húmedas . . . . .	18
4.11. Interpretación tentativa de la clase de agua útil para zonas áridas y semiáridas con vegetación natural adaptada . . . . .	18
4.12. Interpretación tentativa de la clase de agua ligada ( $pF > 4.2$ ) para zonas semiáridas y áridas con vegetación natural adaptada . . . . .	18
4.13. Evaluación integral de la disponibilidad de agua en función suelo y relieve . . . . .	19
4.14. Regiones hídricas de acuerdo al índice hídrico ( $I_m$ ) según Thornthwaite (1948) . . . . .	20
4.15. Regímenes de humedad del suelo definidos en la clasificación norteamericana de suelos <i>Soil Taxonomy</i> . . . . .	22
5.1. Caracterización cualitativa de las reservas de nutrientes en suelos de acuerdo al tipo de roca y grado de meteorización . . . . .	24
5.2. Evaluación del contenido de materia orgánica del suelo . . . . .	26
5.3. Evaluación de las reservas de materia orgánica del suelo (MOS) . . . . .	26
5.4. Estimación de reservas ( $N_t$ ) y fracción disponible ( $N_d$ ) de N en función de la forma de humus . . . . .	26
5.5. Evaluación de las reservas ( $N_t$ ) y fracciones disponibles ( $N_d$ ) de N . . . . .	27
5.6. Evaluación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) . . . . .	28
5.7. Evaluación de la saturación de bases . . . . .	29
5.8. Evaluación del valor S en el espacio de enraizamiento . . . . .	30
5.9. Evaluación de cantidades de nutrientes disponibles . . . . .	30
5.10. Evaluación de reservas movilizables de nutrientes . . . . .	31
5.11. Evaluación de la conductividad eléctrica (CE) en la solución del suelo . . . . .	32
6.1. Clases de efecto de filtro de horizontes o capas homogéneos para sustancias coloidales e iones en dispersión . . . . .	36

# EVALUACIÓN ECOLÓGICA DE SUELOS

## 1. INTRODUCCIÓN

Suelos son sistemas abiertos y dinámicos, que cumplen diferentes funciones en la ecosfera. El estudio de suelos generalmente tiene como objetivo principal comprender los suelos de un paisaje (Schlichting et al., 1995). Ello significa observar las características de los suelos, deducir la pedogénesis en función de los factores ambientales y, finalmente, comprender las funciones que desempeñan en su ambiente (fig. 1.1).

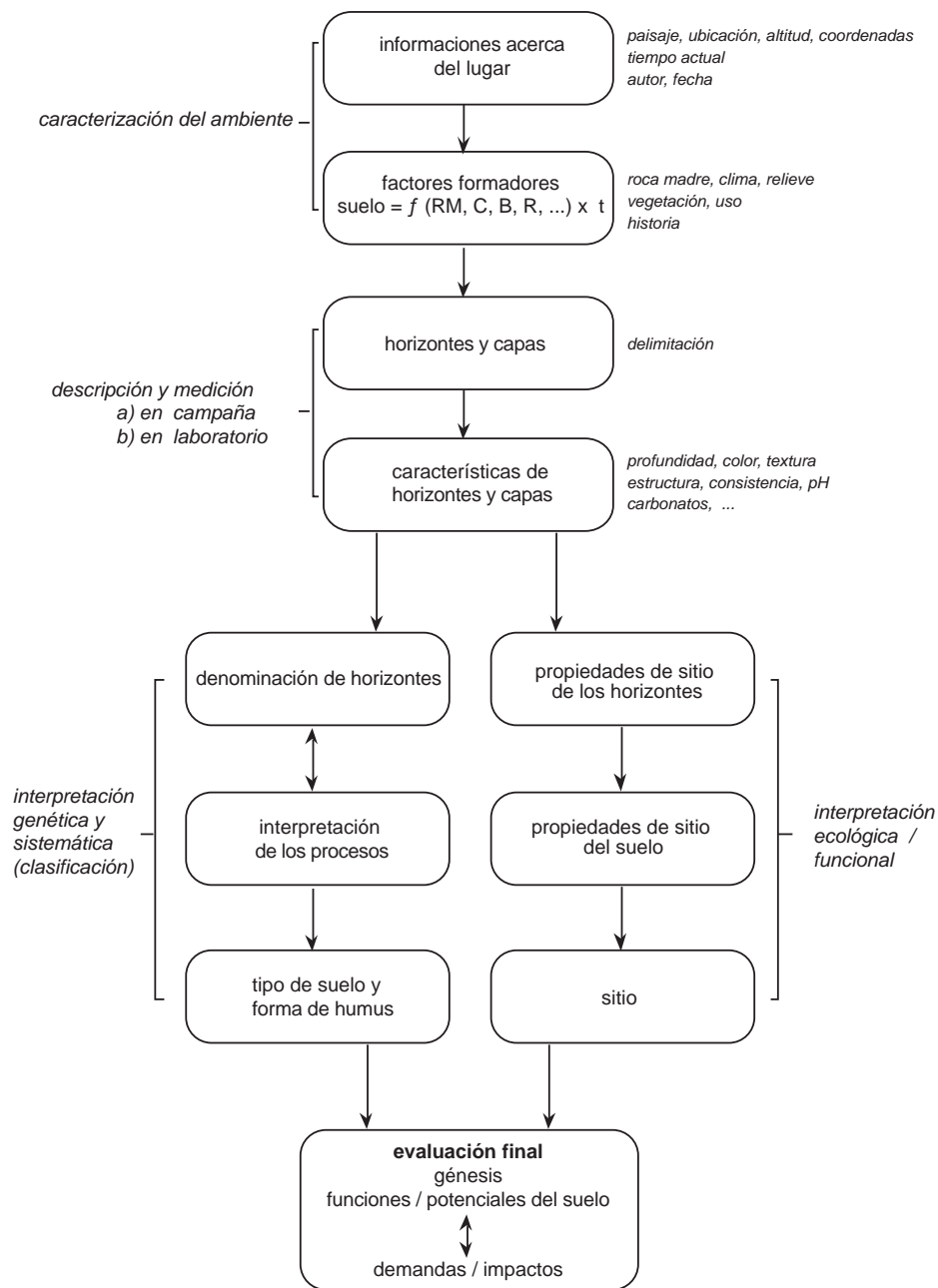


Figura 1.1: Esquema de descripción e interpretación de suelos en el terreno (según Schlichting et al., 1995, adaptado)

Si bien al ecólogo o usuario de suelo le interesan en primer lugar las funciones que desempeñan los mismos en el ambiente, se enfatiza en este lugar la importancia la génesis del suelo, como modelo que nos formamos en base a nuestros conocimientos, que permite entender los procesos que causan las propiedades del suelo, que a su vez determinan sus funciones (fig. 1.2).

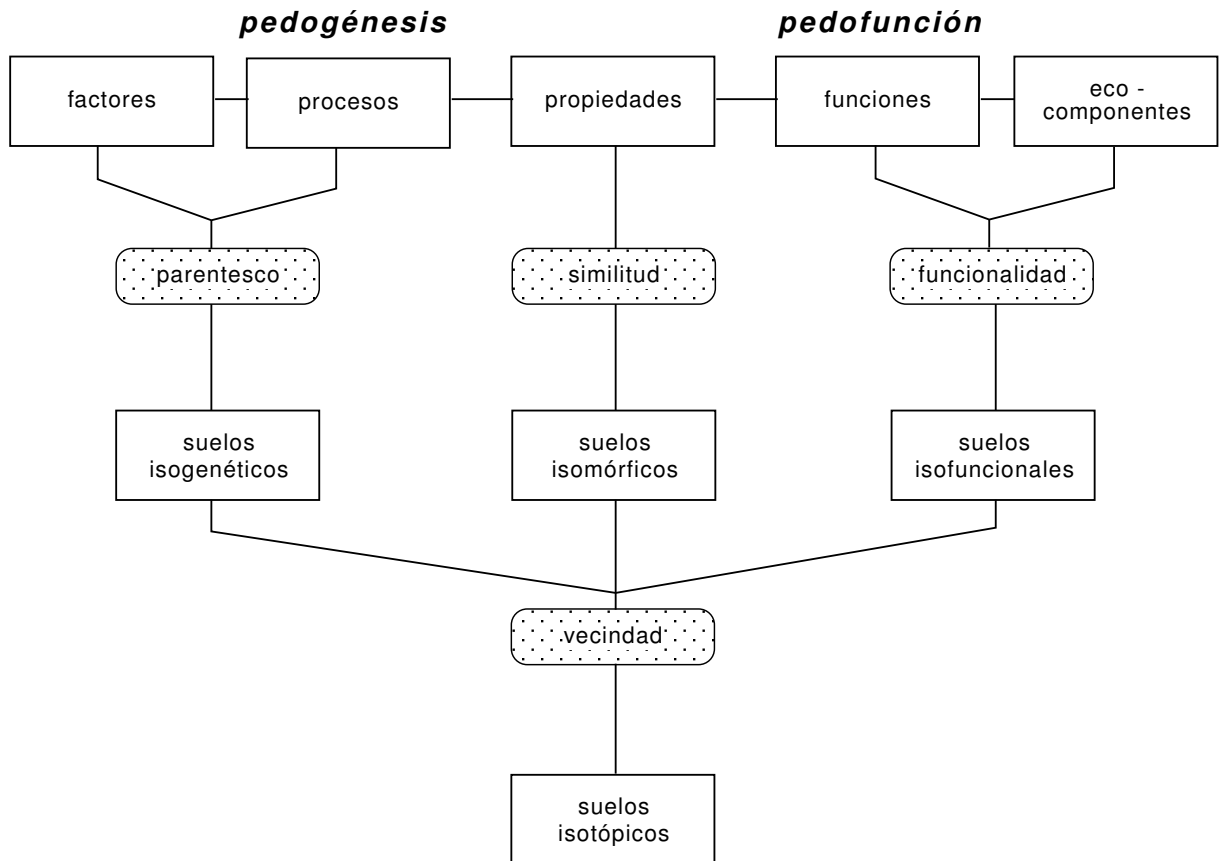


Figura 1.2: Cadena causal de pedogénesis y pedofunción (según Schroeder, 1992)

Objetivo de esta guía es, presentar los aspectos y métodos de la evaluación funcional de suelos, con énfasis en la función del suelo como componente de ecosistemas. Por tal razón, se habla en el contexto de este documento de evaluación ecológica del suelo.

### 1.1. Matriz de evaluación

Conociendo la evolución del suelo y sus propiedades físicas, químicas y biológicas, el suelo se puede evaluar de acuerdo a una determinada función o demanda en consideración. Para cada demanda definida, se puede definir una matriz de requerimientos o sub-funciones específicos y un conjunto correspondiente de parámetros que son indicadores de ellos y que permiten su evaluación. Una matriz de este tipo, referida a las calidades de suelos como factor de sitio de la biota, se ve en cuadro 1.1.



Cuadro 1.1: Matriz de la evaluación del suelo como factor de sitio de la vegetación

requerimientos de crecimiento	parámetros de evaluación	
enraizamiento	profundidad límite de enraizamiento arraigabilidad	
humedad	retención de agua = $f$ (suelo) balance de agua = $f$ (relieve, suelo) balance de agua total = $f$ (clima, relieve, suelo)	
aireación	porosidad, estructura capacidad de aire hidromorfismo	
nutrientes	MOS	reservas forma, calidad
	N	reserva = $f$ (MOS) dispon. = $f$ (act. microb.)
	P	reserva = $f$ (RM, MOS) dispon. = $f$ (act. microb., pH)
	K	reserva = $f$ (RM) dispon. = $f$ (CIC, pH)
	Ca	reserva = $f$ (RM) dispon. = $f$ (pH, CIC)
	Mn, Fe, Cu, Zn	reserva = $f$ (RM, MOS) dispon. = $f$ (pH, act. microb., potencial redox)
	<i>ausencia de toxicidades</i>	
salinidad / sodicidad	conductividad eléctrica % Na en CIC	
otras toxicidades	Al, metales pesados, B	

RM=roca madre, MOS=materia orgánica del suelo, dispon.=disponibilidad, act. microb. = actividad microbiana

Tanto los registros de la descripción de suelo y ambiente *in situ*, como los resultados de la evaluación ecológica se pueden colocar en forma sintética en una ficha edáfica correspondiente (fig. 1.3).

**descripción del suelo**

perfil Nº: _____	mapa Nº: _____	relieve (posición, forma): _____	tiempo actual: _____	uso de la tierra: _____	paisaje: _____										
lugar: _____	longitud: _____	exposición: _____	Ø P: _____ mm	vegetación: _____	materiales originarios, geología: _____										
fecha: _____	autor: _____	altura: _____ m snm	Ø T: _____ °C												
escurrimiento: <input type="checkbox"/> 0 nulo <input type="checkbox"/> 1 m. bajo <input type="checkbox"/> 2 bajo <input type="checkbox"/> 3 medio <input type="checkbox"/> 4 alto <input type="checkbox"/> 5 m. alto <input type="checkbox"/> 6 extr. alta	prof. napa freática: _____ m	drenaje: <input type="checkbox"/> 0 m. escaso <input type="checkbox"/> 2 imperfecto <input type="checkbox"/> 4 bueno <input type="checkbox"/> 6 exc.													
permeabilidad: <input type="checkbox"/> 1 m. baja <input type="checkbox"/> 2 baja <input type="checkbox"/> 3 regular <input type="checkbox"/> 4 alta <input type="checkbox"/> 5 m. alta <input type="checkbox"/> 6 extr. alta	frec. de anegamiento: _____														
prof. [cm]	textura	rocos Vol-%	color (húmedo/seco)	Munsell nombre	pH	humus carbonatos m-%	humedad	pF	estructura (tipo, clase, grado)	formas especiales	poros	estab. estruct.	densidad aparente	límite raíces	horizonte
prof. del solum _____ cm	sales / álcali: <input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4	forma de humus: _____													
prof. de enraizamiento efectivo: _____ cm		tipo de suelo: _____													

**evaluación ecológica**

espe-sor dm	arraigab. Vol-%	porosidad total Vol-%	capacidad de aire (CA) Vol-%	agua útil (AU) fact pond l/m²	Capacidad de campo (CC) Vol-%	kg/d	kg/m²	mmol <sub>e</sub> /kg	mmol <sub>e</sub> /kg	valor S	humus kg/m²	Nt kg/m²	S fact pond mol <sub>e</sub> /m²	humus kg/m²	Ni kg/m²	N disp g/m²
														Σ ponderadas: Σ S: mol <sub>e</sub> /m² Σ humus: kg/m² Σ Ni: kg/m² Σ N disp: g/m²		
														Σ totales (hasta max 1m): Σ humus: kg/m² Σ Ni: kg/m²		
														Σ CC: (hasta 1m max) l/m² evaluación: _____		
														Tasa de ascenso capilar: x _____ días = _____ l/m² Σ AU (hasta 1m max): _____ l/m² evaluación: _____		
														prof. límite de enraizamiento: _____ cm causa: <input type="checkbox"/> mecánica <input type="checkbox"/> fisiológica evaluación: _____ erodibilidad (A) valor k: _____ evaluación: _____		

Figura 1.3: Ficha edáfica sintética para registrar los datos de observación *in situ* de suelo y ambiente y de la evaluación ecológica del suelo

## 2. DENSIDAD APARENTE Y POROSIDAD TOTAL

La densidad aparente se define como la masa del suelo referida a su volumen en su ordenación estructural natural, llamado volumen aparente. Es un parámetro importante para la evaluación del balance de agua y nutrientes, porque permite la transformación de valores analíticos referidos a la masa del suelo a otros referidos al volumen. Además es un criterio para evaluar la penetrabilidad del suelo para raíces.

$$D_{ap} = \frac{M_s}{V_{ap}} \quad (2.1)$$

Dap densidad aparente [g/cm<sup>3</sup>]  
 Ms masa del suelo [g]  
 Vap volumen aparente [cm<sup>3</sup>]

La medición de la densidad aparente generalmente se realiza mediante la extracción de una muestra no disturbada de volumen definido (cilindro de metal) y la determinación de la masa seca (105°C). Si no existen valores medidos de la densidad aparente, se la puede aproximar a través de los siguientes métodos de campo (cuadros 2.1 y 2.2).

Cuadro 2.1: Clave para la estimación de la densidad aparente (Dap en [kg/dm<sup>3</sup>]) de suelos minerales (Schlichting et al., 1995)

características	estructuras frecuentes	Dap estimada <sup>1</sup>
<b>A) suelos limosos, franco-limosos, francos y arenosos (seco a fresco)</b>		
1) muestra se desmenuza ya al sacar el material de la pared de la calicata, en la pared se observan muchos macroporos	grano suelto, migajoso, granular	0.9 - 1.2
2) muestra se desmenuza bajo leve presión en muchos fragmentos o partículas singulares	grano suelto, bloques subangulares, (y angulares)	1.2 - 1.4
3) cortaplumas penetra con facilidad al suelo, muestra se deshace en pocos fragmentos que pueden ser divididos en la mano	bloques subangulares y angulares, prismas, láminas	1.4 - 1.6
4) cortaplumas penetra difícilmente 1-2cm al suelo, muestra se deshace en pocos fragmentos que apenas se dejan dividir en la mano	prismas, láminas, de puente, (bloques angulares)	1.6 - 1.8
5) cortaplumas penetra al suelo sólo con mucha fuerza, muestra no se desmenuza	de puente, coherente, prismas	1.8 - 1.9
<b>B) suelos franco-arcillosos y arcillosos (secos a frescos)</b>		
1) al caer en el piso, la muestra se desmenuza en muchos fragmentos que se pueden subdividir bajo presión moderada	bloques angulares, fragmentos	1.0 - 1.2
2) al caer en el piso, la muestra se desmenuza en pocos fragmentos que se pueden dividir bajo moderada presión	bloques angulares, prismas, columnas, láminas, lenticular	1.2 - 1.4
3) al caer en el piso, la muestra apenas se desmenuza; subdivisión posible bajo presión fuerte	coherente, prismas, (columnas, bloques angulares)	1.4 - 1.6
4) al caer en el piso, la muestra no se desmenuza; subdivisión a mano apenas posible	coherente, prismas, columnas	1.6 - 1.7

<sup>1</sup> en caso de un contenido de materia orgánica de >2%, disminuir la Dap por 0.03 kg/dm<sup>3</sup> por % de humus

Cuadro 2.2: Clave sencilla para la estimación de la densidad aparente (Dap) de suelos minerales; vale para suelo en estado seco (Schlichting y Blume, 1966)

característica	densidad del suelo
cortaplumas penetra al suelo con mucha fuerza	muy denso
cortaplumas penetra difícilmente 1-2cm al suelo	denso
cortaplumas penetra totalmente al suelo con poca fuerza	moderadamente denso
muestra se desmenuza ya bajo escasa presión	blando

Los valores medidos o estimados de la densidad aparente se evalúan según las clases en fig. 2.1, en términos que circunscriben la porosidad y la resistencia a la penetración.

Evaluación de la densidad aparente

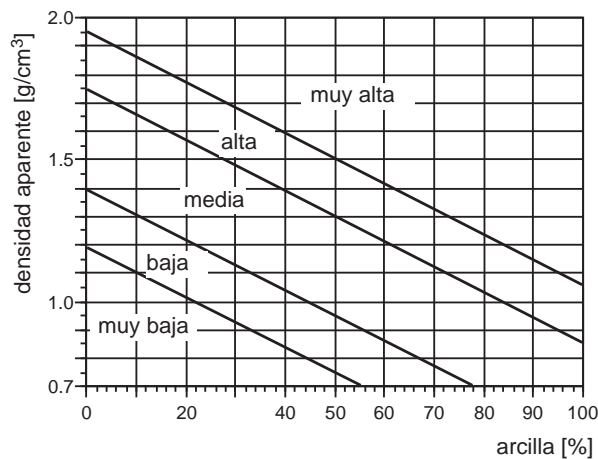


Figura 2.1: Evaluación de la densidad aparente (Dap) en función del contenido de arcilla (AG Bodenkunde, 1982; Jahn, 1992)

La densidad aparente permite también calcular la porosidad del suelo según las siguientes ecuaciones:

$$P = \frac{V_{por}}{V_{ap}} \times 100 \tag{2.2}$$

$$V_{ap} = V_{por} + V_s \tag{2.3}$$

$$P = 1 - \frac{D_{ap}}{D_r} \tag{2.4}$$

- P porosidad [cm³/cm³] ó [%-vol]
- V<sub>por</sub> volumen de poros [cm³]
- V<sub>ap</sub> volumen aparente [cm³]
- V<sub>s</sub> volumen del suelo [cm³]
- D<sub>ap</sub> densidad aparente [g/cm³]
- D<sub>r</sub> densidad real [g/cm³]

En caso que no exista un valor medido de la densidad real, se puede utilizar la del cuarzo:  $D_r = 2.65 \text{ g/cm}^3$ ; sin embargo, la  $D_r$  disminuye con un aumento del contenido de materia orgánica (MOS), lo que se puede aproximar mediante la siguiente ecuación empírica (Arbeitskreis Standortskartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, 1980):

$$D_r = 2.65 - 0.0135 \times \%MOS \quad (2.5)$$

Evaluación de la porosidad ->ver cuadro 4.2

### 3. ESPACIO DE ENRAIZAMIENTO

#### 3.1. Profundidad límite de enraizamiento

Para la evaluación de la calidad de sitio del suelo, hay que definir primero el volumen y las condiciones de enraizamiento, porque todas las estimaciones respecto a la disponibilidad de agua, aire y nutrientes se refieren al espacio radicular. Se entiende por límite de enraizamiento la profundidad hasta donde se pueden desarrollar las raíces en función de las condiciones mecánicas y fisiológicas del suelo.

Como limitaciones mecánicas se denominan:

- roca maciza
- capas endurecidas de carbonatos (toba) u otras sustancias;
- pedregosidad alta (>70 %);
- condiciones desfavorables de agregación;

La profundidad fisiológica de enraizamiento describe hasta donde las raíces pueden penetrar el suelo efectivamente, considerando criterios fisiológicos. Una restricción fisiológica del enraizamiento se puede dar por:

- un cambio abrupto en las propiedades químicas, como pH, contenido de carbonatos, contenido de nutrientes, ...;
- condiciones reductoras;
- horizonte con escasa capacidad de aire o agua;

La profundidad límite de enraizamiento se define finalmente por el límite fisiológico, al ser de igual o menor profundidad que el mecánico.

Cuadro 3.1: Evaluación de la profundidad límite (fisiológica) de enraizamiento (Schlichting et al., 1995)

prof. [cm]	15	30	70	120	
evaluación	muy delgada	delgada	mod. profunda	profunda	muy profunda

### 3.2. Arraigabilidad

La arraigabilidad describe la posibilidad de las raíces vegetales de desenvolverse en el volumen potencial de enraizamiento. La arraigabilidad puede ser restringida por alta pedregosidad, densidad aparente alta, escasa proporción de macroporos y propiedades desfavorables de estructuración. De tal manera, estructura laminar, prismática y bloques angulares gruesos influyen negativamente en la arraigabilidad. En cambio, horizontes blandos, migajosos y libres de piedras son bien arraigables.

Cuadro 3.2: Estimación de la arraigabilidad (Jahn, 1992)

evaluación <sup>1</sup>	restricciones
muy buena	sin restricciones, densidad aparente baja
buena	pedregosidad escasa y densidad aparente moderada
regular	estructura desfavorable (prismática, bloques angulares gruesos) o pedregosidad intermedia, densidad aparente alta
escasa	múltiples o fuertes limitaciones
nula	limita la profundidad de enraizamiento

<sup>1</sup> evaluación cualitativa para cada horizonte

### 3.3. Nomenclatura taxonómica relacionada con las condiciones de enraizamiento

Algunos nombres de suelos y un gran número de adjetivos usados en la clasificación de suelos (ISSS Working Group RB, 1998; Grupo de Trabajo Base Referencial ISSS, 1999), nos permiten deducir restricciones en el espacio de enraizamiento:

**impedimentos mecánicos:** se desprenden para los grupos de suelos *Leptosols* (→ suelos someros debido a roca maciza cerca de la superficie) y *Vertisols* (→ suelos de alto contenido de arcilla expandible, con una dinámica estructural que produce ruptura de raíces), y para suelos con los adjetivos, p.ej. esquelético, vértico (ver *Vertisol*), pétrico (→ capa endurecida), petricálcico, lítico, gélico (→ presencia dehielo), léptico (→ somero debido a roca subyacente) ...;

**impedimentos fisiológicos:** indican adjetivos como sódico, sálico (→ alto tenor de sales), tóxico (→ problemas de toxicidad por iones diferentes a Al, Fe, Na, Ca, Mg), alúmico (→ alta proporción de Al en complejo adsorbente), reductico (→ medio reductor, en suelos antropogénicos), stágnico (→ agua estancada), ...;

## 4. BALANCE DE AGUA Y AIRE DEL SUELO

### 4.1. Sistema poroso del suelo - importancia

El suelo (también sedimentos y algunas rocas) representa un sistema poroso que es caracterizado por tamaño, forma y proporción de los poros. Este sistema poroso es de gran importancia ecológica, porque determina el almacenamiento y movimiento de agua y aire en el suelo y es el espacio físico para el desarrollo de los organismos del suelo y las raíces vegetales (cuadro 4.1).

Cuadro 4.1: Rangos de tamaños de poros y su importancia ecológica

tipo de poros	diámetro de poros [ $\mu\text{m}$ ]	tensión de agua [pF]	importancia
macroporos, anchos	>50	0 - 1.8	aireación, drenaje rápido
macroporos, estrechos	50 - 10	1.8 - 2.5	drenaje lento, agua disponible, espacio para raíces de plantas y organismos del suelo
mesoporos	10 - 0.2	2.5 - 4.2	agua disponible, espacio para microorganismos
microporos	<0.2	>4.2	agua no disponible, espacio no accesible para la biota

Tamaño, proporción y morfología de los poros dependen de la textura del suelo, que proporciona un sistema primario de poros, y de la estructura, que superpone un sistema secundario. El sistema poroso retiene agua, debido a fuerzas capilares y de adsorción, que son tanto más altas cuanto más finos los poros. La fuerza de retención, que corresponde a un estado energético del agua, se llama potencial matricial (o tensión) del agua del suelo. Para expresar el potencial se usa la unidad de presión, en [MPa] o [bar], la unidad de distancia [cm], correspondiendo a la presión que ejerce una columna de agua. En edafología, a menudo se usa el logaritmo del valor del potencial en [cm], el llamado valor  $pF$ .

De acuerdo a la distribución de los tamaños de poros, se observa una variación del potencial matricial ( $\psi$ ) en función del contenido de agua ( $\theta$ ) en el suelo (fig. 4.1). Esta relación es conocida como curva de retención de agua, característica del agua del suelo o relación  $\psi - \theta$ , siendo específica para cada horizonte de un suelo. Debido a la relación entre potencial matricial y diámetro de poros, esta función proporciona a su vez la distribución de los tamaños de poros del suelo (fig. 4.1).

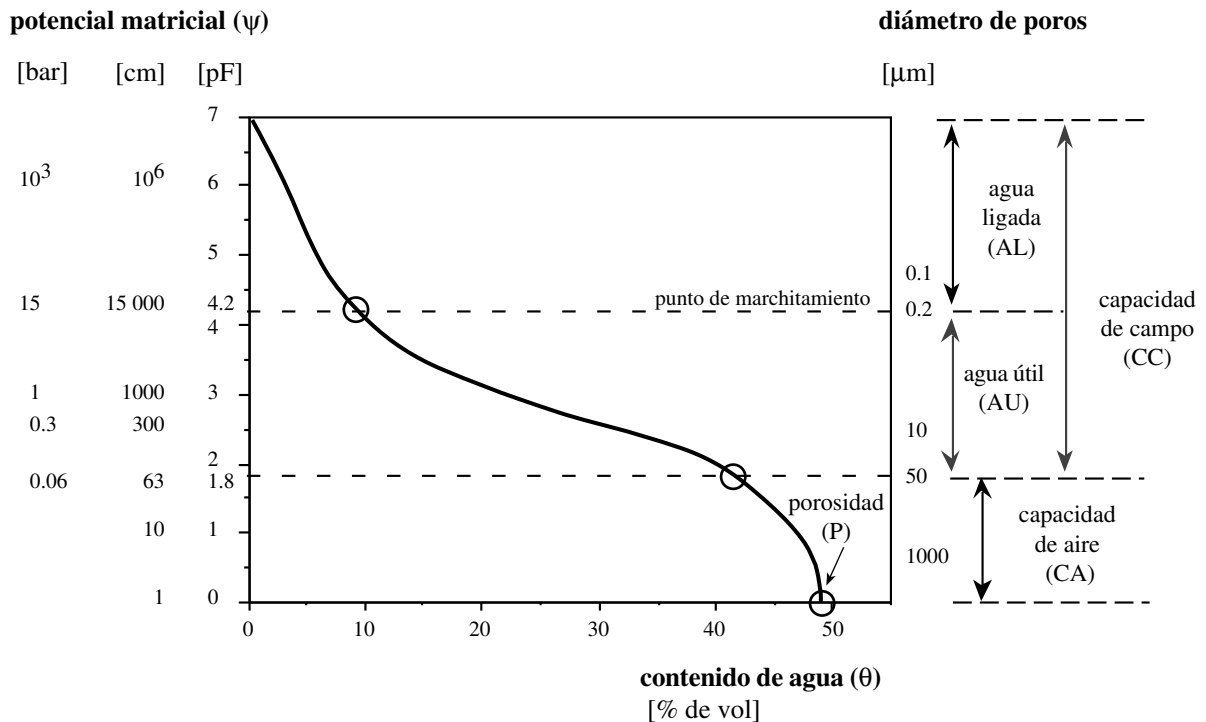


Figura 4.1: Curva de retención de agua y distribución de los tamaños de poros

Se distinguen diferentes fracciones de agua, que se caracterizan por su movilidad y su disponibilidad para las plantas, y que corresponden a una cierta clase de poros:

**porosidad (P):** volumen total de poros; corresponde a la capacidad máxima de agua que cabe en el suelo;

**capacidad de campo (CC, pF >1.8, poros con  $\phi < 50 \mu\text{m}$ ):** la fracción de agua que retiene el suelo contra la gravedad después de haber estado saturado totalmente con agua. Es un estado de equilibrio *in situ*, regulado por el drenaje de los macroporos. Para la estimación de la capacidad de campo, se usa comúnmente la retención de agua en pF 1.8, correspondiendo a la proporción de poros con diámetro  $< 50 \mu\text{m}$ ;

**capacidad de aire (CA, pF 0-1.8, poros con  $\phi > 50 \mu\text{m}$ ):** fracción de macroporos que se drena rápidamente después de saturar el suelo con agua; corresponde al volumen de aire en la situación de la capacidad de campo; es el volumen de poros para la percolación rápida de agua y la circulación de aire;

**agua ligada (AL, pF >4.2, poros con  $\phi < 0.2 \mu\text{m}$ ):** fracción no disponible para plantas (por definición), ligada con una succión mayor de pF 4.2 (15bar) en los microporos del suelo; es la diferencia entre la porosidad y la capacidad de campo;

**agua útil (AU, pF 1.8-4.2, poros con  $\phi = 0.2 - 50 \mu\text{m}$ ):** es la fracción de agua que retiene el suelo contra la gravedad y que es a su vez disponible para las plantas; corresponde a la proporción de macroporos finos y mesoporos; es la diferencia entre la capacidad de campo y el agua ligada;



$$P = CA + CC \quad (4.1)$$

$$CC = AU + AL \quad (4.2)$$

$$CC = P - CA \quad (4.3)$$

$$AU = CC - AL \quad (4.4)$$

P	porosidad [cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> ] o [%-vol]
CA	capacidad de aire
CC	capacidad de campo
AU	agua útil
AL	agua ligada

## 4.2. Estimación de las fracciones de agua o poros

Las diferentes fracciones de agua del suelo se pueden estimar (p/ suelos minerales), en caso de que no existan valores medidos, en función de textura y densidad aparente (fig. 4.2, cuadro 4.2), siendo el último parámetro un descriptor de la estructura. Como la materia orgánica del suelo y la fracción de arcilla influyen marcadamente en el sistema poroso, al ser factores de la estructuración, se corrigen los valores de acuerdo a ellos (cuadro 4.3). Cabe aclarar, que con esta estimación se trata de aproximar la curva de retención de agua a través de los 3 puntos cardinales que limitan las clases de poros (ver fig. 4.1).

La porosidad y la capacidad de aire en [%-vol] se evalúan según cuadros 4.4 y 4.5 para cada horizonte.

Los valores de CC y AU sacados de las tablas, que se dan en [%-vol], hay que referir al suelo sin piedras al multiplicar con el factor:

$$\text{fracción de tierra fina} = \frac{100 - \%vol(\text{piedras})}{100} \quad (4.5)$$

Después se expresan los valores para cada horizonte en [l/m<sup>2</sup>] o [mm], al multiplicar con el volumen del horizonte por unidad de área (correspondiente al espesor del mismo en [mm]: 1mm = 1 l/m<sup>2</sup> = 1 dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>):

$$CC [l/m^2] = \frac{CC [\%vol]}{100} \times \frac{(100 - \%vol(\text{piedras}))}{100} \times \text{espesor [mm]} \quad (4.6)$$

Se muestra como ejemplo el cálculo de la capacidad de campo para un horizonte de textura arcillosa (espesor 500mm), de densidad aparente baja, de un contenido de materia orgánica de 6% y de una rocosidad de 30% de la siguiente manera:

$$CC = \frac{70}{100} \times \frac{(100 - 30)}{100} \times 500mm = 245 [l/m^2] \quad \text{ó} \quad [mm]$$

Los valores de los horizontes se suman hasta la profundidad de 1m, o límite mecánico de enraizamiento, si éste fuese menor, y los totales se evalúan según las pautas dadas en los cuadros 4.6 y 4.7.

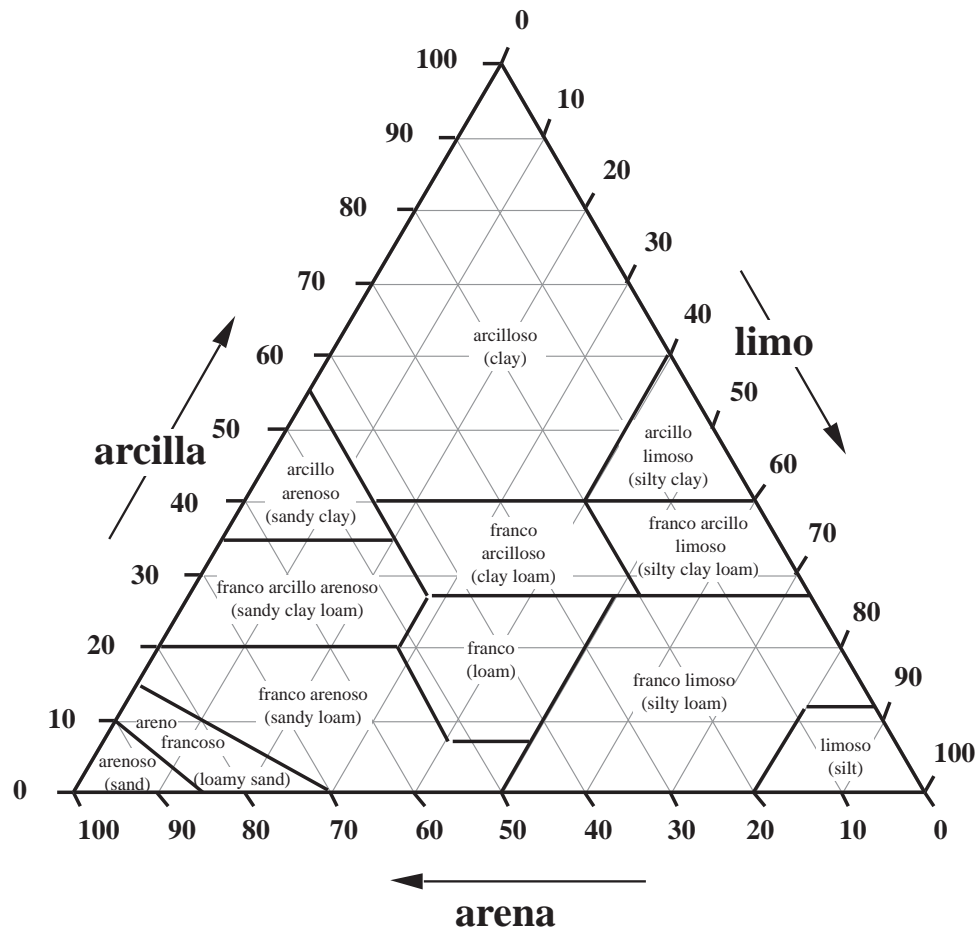


Figura 4.2: Clases texturales según el sistema estadounidense (Soil Survey Division Staff, 1993); en el texto se usan las siguientes siglas para las clases texturales principales: arcilla (Ac), arcillo limoso (AcL), arcillo arenoso (AcA), franco (F), franco arcillo arenoso (FACa), franco arcilloso (FAC), franco arcillo limoso (FACL), franco arenoso (FA), franco limoso (FL), arenoso (A), areno francoso (AF), limoso (L)

Cuadro 4.2: Estimación de porosidad (P), capacidad de aire (CA), agua útil (AU) y capacidad de campo (CC) en función de textura y densidad aparente (Dap); valores en [%- vol]; según AG Boden (1996)

textura <sup>1</sup> Dap <sup>2</sup>	porosidad					capacidad de aire					agua útil					capacidad de campo				
	mb	b	m	a	ma	mb	b	m	a	ma	mb	b	m	a	ma	mb	b	m	a	ma
<i>arenosa</i>																				
g.A	46	42	38	33	27	37	33	29	24	18	6	6	6	6	6	9	9	9	9	9
A	43	39	36	33	29	28	26	24	21	17	10	10	9	9	9	15	13	12	12	12
f.A	56	48	38	32	26	29	25	20	15	11	17	15	12	12	12	27	23	18	17	15
AF.l	53	47	41	36	30	20	18	17	10	6	22	20	18	17	17	30	32	24	24	24
FA	54	48	42	37	33	20	18	15	11	7	25	21	17	16	14	34	30	27	26	26
<i>limosa y francosa</i>																				
L	53	49	44	39	35	15	13	10	7	5	29	27	25	24	22	38	36	34	32	30
FL.l	56	50	44	41	37	15	11	7	6	4	28	26	24	21	19	41	39	37	35	33
FL.a	52	48	44	38	34	16	14	11	8	6	27	25	22	20	18	36	34	33	30	28
F	55	49	43	39	35	15	13	10	7	5	24	20	17	15	13	40	36	33	32	30
FAC, FACL	59	53	48	43	37	11	9	7	5	3	20	18	15	13	11	48	44	41	38	34
<i>arcillosa</i>																				
AcA, AcL	59	53	48	43	37	11	9	7	5	3	20	18	15	13	11	48	44	41	38	34
Ac.f	66	60	53	49	45	9	7	4	3	1	22	18	14	12	10	57	53	49	46	44
Ac	69	63	58	53	48	8	6	4	2	1	22	18	15	12	10	61	57	54	51	47

<sup>1</sup> clases y subclases: g.A = arenoso grueso, f.A = arenoso fino, AF.l = Areno Francoso limoso, FA = Franco Arenoso, L = Limoso, FL.l = Franco Limoso limoso, FL.a = Franco Limoso arenoso, F = Franco, FAC = Franco Arcilloso, FACL = Franco Arcillo Limoso, AcA = Arcillo Arenoso, AcL = Arcillo Limoso, Ac.f = Arcillo francoso, Ac = Arcilloso;

<sup>2</sup> Dap en 5 clases: mb = muy baja, b = baja, m= media, a = alta, ma = muy alta;

Cuadro 4.3: Correcciones de porosidad (P), capacidad de aire (CA), agua útil (AU) y capacidad de campo (CC) en función del contenido de materia orgánica (MOS) y de arcilla; valores en [%- vol]; según AG Boden (1996)

arcilla MOS	0-5 %		5-12 %		12-17 %		17-35 %		35-65 %		>65 %	
	P	CA	P	CA	P	CA	P	CA	P	CA	P	CA
aumento o rebaja en [%-vol] o [mm]												
2	+1	±0	+1	±0	±1	±0	±0	-1	±0	±0	±0	±0
4	+2	-1	+2	-1	+1	-1	±0	-1	+1	±0	+1	±0
6	+5	-2	+4	-2	+4	-2	+3	-1	+2	±0	+2	+1
8	+9	-3	+8	-2	+7	-2	+6	-1	+5	+1	+5	+2
10	+11	-4	+10	-3	+9	-3	+8	-1	+8	+3	+8	+4
12	+14	-5	+13	-4	+11	-4	+11	-1	+11	+4	+11	+6
14	+17	-6	+16	-5	+15	-5	+14	-1	+13	+4	+13	+7
MOS	AU	CC	AU	CC	AU	CC	AU	CC	AU	CC	AU	CC
2	+2	+1	+1	+1	+1	+1	±0	±0	±0	±0	±0	±0
4	+4	+3	+3	+3	+2	+2	+1	+1	+1	+1	+1	+1
6	+7	+7	+5	+6	+5	+6	+4	+4	+2	+2	+2	+2
8	+10	+12	+8	+10	+8	+9	+6	+7	+3	+4	+3	+3
10	+12	+15	+10	+13	+10	+12	+8	+9	+4	+5	+4	+4
12	+14	+19	+13	+17	+12	+15	+10	+12	+6	+7	+5	+5
14	+16	+23	+15	+21	+15	+20	+12	+15	+8	+9	+6	+6

### 4.3. Evaluación de la porosidad total

La porosidad total permite obtener una primera impresión sobre el sistema poroso, caracterizando en forma general las condiciones para el desarrollo de la biota, al almacenamiento de agua y la aireación. Se evalúa según cuadro 4.4.

Cuadro 4.4: Evaluación del volumen total de poros (porosidad P), (Jahn, 1992)

porosidad [%-vol]	30		40		50		60	
evaluación	muy escasa	escasa	regular	alta	muy alta			

### 4.4. Balance de aire

Balance de agua y aire del suelo se encuentran estrechamente relacionados entre sí, debido a que agua y aire comparten el espacio poroso del suelo.

Una buena aireación del suelo es importante para permitir la actividad biológica (aeróbica) del suelo, es decir de raíces vegetales, microorganismos y la fauna del suelo. El balance de aire depende del por un lado del volumen poros llenos de aire y por otro lado de las condiciones de transporte de aire (principalmente difusión).

Con fines de evaluar la aireación, se valora la llamada capacidad de aire (CA), correspondiente al volumen de poros con un diámetro  $>50\mu\text{m}$  (macroporos gruesos), es decir poros de un drenaje rápido. Este volumen se establece en la situación de equilibrio de drenaje (capacidad de campo, ver arriba), representando el volumen mínimo promedio de aire en suelos bien drenados. La evaluación de la capacidad de aire (cuadro 4.5) se basa en la necesidad de plantas superiores para su desarrollo.

Cuadro 4.5: Evaluación de la capacidad de aire (CA, poros con  $\phi > 50\mu\text{m}$ ), (Schlichting et al., 1995)

CA [%-vol]	3		7		12		18	
evaluación	muy escasa	escasa	regular	alta	muy alta			

Aparte de la capacidad de aire, hay una serie de observaciones que nos permiten complementar la caracterización del balance de aire. Muchas de ellas están, como ya mencionado, relacionadas con el balance de agua. Criterios a tomar en cuenta son:

- presencia de rasgos de hidromorfismo (marmoleado, olor a  $\text{H}_2\text{S}$ , formas semiterrestres de humus, ...);
- presencia de barreras de difusión, como costras superficiales, piso de arado;
- frecuencia y duración de fases de anegamiento;
- nivel y fluctuación de la napa freática;
- la permeabilidad hidráulica del suelo;
- la valoración general del drenaje del suelo;

- nombres del grupo taxonómico del suelo: tipos de suelos y elementos formativos de nombres que pueden indicar problemas de aireación (ISSS Working Group RB, 1998; Grupo de Trabajo Base Referencial ISSS, 1999):

**grupos taxonómicos:** Histosol, Gleysol, Planosol, Fluvisol; grupos con una influencia del factor agua muy específica (más detalle en apartado 4.5.4.4, pág. 22);

**elementos formativos de nombres:** stágnico (→ agua estancada), gléyico (→ influencia de napa freática), tiónico (→ procesos de oxidación-reducción de azufre), hístico (→ formas hidromórficas de humus), redúctico (→ reducción en suelos antropogénicos), (en inglés: *stagnic, gleyic, thionic, histic, reductic*);

## 4.5. Balance de agua del suelo

### 4.5.1. Evaluación de la capacidad de campo

La capacidad de campo es la cantidad de agua que puede ser retenida por el suelo contra la gravedad. Corresponde a un estado de equilibrio *in situ*, que se ajusta después de saturar el suelo completamente, a través del drenaje de agua de los macroporos, en un lapso de 1-3 días. La succión, con la cual el agua está retenida en la situación de la capacidad de campo, se ubica entre pF 1.8 y pF 2.5, dependiendo de diferentes factores de drenaje *in situ*. En esta guía, de acuerdo a los conceptos de la escuela alemana (AG Boden, 1996; Schlichting et al., 1995), se considera la retención de agua en pF 1.8 como capacidad de campo, correspondiendo a la proporción de poros con  $\phi < 50\mu\text{m}$ .

La capacidad de campo se calcula para una profundidad del suelo de 1m o hasta el límite mecánico de enraizamiento, si éste fuese menos profundo.

Cuadro 4.6: Evaluación de la capacidad de campo (CC, poros con  $\phi < 50\mu\text{m}$ ), (AG Boden, 1996)

CC [l/m <sup>2</sup> ]	130	260	390	520	
evaluación	muy escasa	escasa	regular	alta	muy alta

### 4.5.2. Evaluación de la capacidad de agua útil

El agua útil designa aquella fracción de agua, que está retenida en el suelo y que es disponible para las plantas. Corresponde a la diferencia de la capacidad de campo (pF 1.8) y de la fracción de agua ligada (pF 4.2). La retención de agua disponible se realiza en los macroporos finos y mesoporos ( $\phi = 0.2 - 50\mu\text{m}$ ). Se evalúa la cantidad de agua hasta 1m de profundidad (o límite mecánico de enraizamiento, si éste fuese  $< 1\text{m}$ ). En caso de una napa freática alta se considera también el ascenso capilar durante el período de vegetación.

Cuadro 4.7: Evaluación de la fracción de agua útil (AU, poros con  $\phi = 0.2 - 50\mu\text{m}$ ), (Schlichting et al., 1995)

AU [l/m <sup>2</sup> ]	50	90	140	200	270	
evaluación	muy escasa	escasa	regular	alta	muy alta	extr. alta

### 4.5.3. Estimación y evaluación de la conductividad hidráulica del suelo

Estimación y evaluación de la conductividad hidráulica del suelo La permeabilidad (conductividad hidráulica) del suelo es un parámetro de mucha incidencia en el balance de agua y aire del suelo. Se requiere, en caso de que no existan valores medidos, una estimación de la misma. Al depender la conductividad hidráulica saturada también de las características del sistema poroso, se la estima, como en el caso de las fracciones de agua, en base a la clase textural y la densidad aparente (cuadro 4.8) y se valúa según cuadro 4.9.

Cuadro 4.8: Estimación de la conductividad hidráulica de suelos de acuerdo a densidad aparente (Dap, ver fig. 2.1) y textura, (según AG Boden, 1996; Schlichting et al., 1995, adaptado); ver clases de conductividad en cuadro 4.9

Dap	clase textural <sup>1</sup>							
	grava, g.A, A,	f.A	AF.f, FA.l	A.f	AF.ac, FA	FA.ac	FL.ac	FL.a, FL.l, FAcA, AcA, FAc, Ac
m.baja - baja	6	5	4	5	5-4	5	4	5-4
regular	6	4	3	4	4-3	4-3	3	3
alta - m.alta	5	3	2	3-2	2	2-1	2-1	2-1

<sup>1</sup> definición de clases y subclases: g.A = Arenoso grueso, A = Arenoso, f.A = Arenoso fino, AF.l = Areno Francoso limoso, FA.l = Franco Arenoso limoso, AF.ac = Arenoso Francoso arcilloso, FA.ac = Franco Arenoso arcilloso, FL.a = Franco Limoso arenoso, FL.l = Franco Limoso limoso, FAcA = Franco Arcillo Arenoso, AcA = Arcillo Arenoso, FAc = Franco Arcilloso, Ac = Arcilloso;

Cuadro 4.9: Evaluación de la conductividad hidráulica de suelos, (según AG Boden, 1996; Schlichting et al., 1995)

$k_f$ [cm/d]	1	10	40	100	300	
evaluación	muy baja	baja	regular	alta	muy alta	extrem. alta
clase	1	2	3	4	5	6

### 4.5.4. Disponibilidad de agua para plantas

La disponibilidad de agua para vegetales depende de factores que actúan a diferentes escalas: (i) a nivel general (escala pequeña a mediana), es el clima que define las condiciones para el desarrollo de la biota, lo que se expresa en asociaciones biológicas típicas de una zona (biomas, ecosistemas, zonas bioclimáticas). (ii) a escala de paisaje, es el relieve que modifica las condiciones climáticas y el flujo de agua, en estrecha interacción con (iii) los suelos como sistemas de absorción y repartición de agua a un nivel de detalle.

$$\text{balance de agua} = f(\text{clima, relieve, suelo})$$

En las guías de evaluación existentes (AG Boden, 1996; Schlichting et al., 1995), se considera el balance de agua en función de estos tres factores, y a nivel de suelo, se asigna una disponibilidad de agua directamente proporcional con la fracción de agua útil. Sin embargo, Walter y Breckle (1991)

demuestran, que este concepto no es válido para zonas (semi)áridas, donde una capacidad de agua útil alta del suelo puede ser ecológicamente desventajosa: en suelos de alta capacidad de retención de agua, ésta se almacenará, después de una lluvia, sólo en los primeros estratos superficiales, en lugar de percolar a profundidad. Ello significa, que en el tiempo posterior, se produce una evaporación relativamente alta a expensas de una transpiración productiva. Otro factor es el menor lavado de sales hacia afuera del espacio de enraizamiento. En estas condiciones climáticas, suelos de textura más gruesa, con una capacidad de retención de agua regular a baja, ofrecerán una mayor protección de agua y un mejor lavado de sales, representarían entonces mejores sitios en comparación con suelos de textura fina.

Respecto a la capacidad de extracción de agua por la planta, también hay que diferenciar entre las zonas húmedas, donde los vegetales poseen un punto de marchitez correspondiente aproximadamente al valor de 15 bar (1.5MPa, pF 4.2) y las zonas (semi)áridas, donde se encuentran muchas especies adaptadas que logran producir potenciales hídricas en sus células que superan los 70 bar (7MPa, pF 4.8) (Mitlöhner, 1990; Walter y Breckle, 1991)

En el siguiente esquema, se tratan de considerar estos conceptos, aplicando una evaluación diferencial de las fracciones de agua del suelo en función del clima. Este procedimiento tiene carácter cualitativo o semi-cuantitativo y requiere de la validación a través de datos analíticos o de simulación.

Esquema de evaluación de la humedad disponible(HD) p/ vegetales:

$$\begin{array}{ccc}
 f(\text{suelo}) & \Rightarrow & HD_s \\
 & \Downarrow & \\
 f(\text{suelo}, \text{relieve}) & \Rightarrow & HD_{sr} \\
 & \Downarrow & \\
 f(\text{suelo}, \text{relieve}, \text{clima}) & \Rightarrow & HD
 \end{array}$$

#### 4.5.4.1. Humedad disponible en función del suelo ( $HD_s$ )

Como expuesto anteriormente, la importancia ecológica de las fracciones de agua del suelo depende de las condiciones climáticas y requiere de una interpretación diferencial:

**zonas de clima húmedo** *evaluación del agua útil (AU, pF 1.8 - 4.2, poros de  $\phi$  0.2 - 50  $\mu$ m)*

- el agua útil designa aquella fracción de agua retenida en el suelo que es disponible para las plantas;
- se evalúa la cantidad de agua hasta 1m de profundidad o límite mecánico de enraizamiento si éste fuese <1m;
- en caso de una napa freática alta, se considera también el ascenso capilar durante el tiempo de vegetación;

Cuadro 4.10: Interpretación de la clase de agua útil para zonas húmedas (idéntico a cuadro 4.7)

AU [l/m <sup>2</sup> ]	50		90	140	200	270	
evaluación	muy escasa	escasa	regular	alta	muy alta	extr. alta	
HD <sub>s</sub>	1	2	3	4	5	6	

**zonas de clima árido y semiárido** <sup>1</sup> Se evalúan tanto la fracción de agua útil (a) como la de agua ligada (b) y se calcula HD<sub>s</sub> como suma de ambas índices:  $HD_s = HD_s(a) + HD_s(b)$ ;

(a) evaluación del agua útil (AU, pF 1.8 - 4.2, poros de  $\phi$  0.2 - 50  $\mu$ m)

- se evalúa la cantidad de agua hasta 1m de profundidad o límite mecánico de enraizamiento, si éste fuese <1m;
- se ponderan las clases intermedias con la máxima valoración, debido a las desventajas ecológicas de valores muy altos (ver arriba);

Cuadro 4.11: Interpretación tentativa de la clase de agua útil para zonas áridas y semiáridas con vegetación natural adaptada

AU [l/m <sup>2</sup> ]	50		90	140	200	
evaluación	desfavorable	regular	favorable	regular	desfavorable	
HD <sub>s</sub>	1	3	5	3	1	

(b) evaluación del agua ligada (AL, pF >4.2, poros  $\phi$  <0.2  $\mu$ m)

- el agua ligada está retenida en el suelo con una succión mayor de 15 bar (pF 4.2);
- ésta fracción no es disponible para la vegetación higrófila de zonas húmedas;
- a diferencia, en ecosistemas de zonas áridas y semiáridas existen muchas especies adaptadas, que pueden extraer agua a potenciales mayores;
- con la siguiente clave, se da una evaluación cualitativa a las clases de agua ligada; de todas maneras, al ser la posible extracción de agua de la fracción de agua ligada muy pequeña, se dan valoraciones muy bajas;

Cuadro 4.12: Interpretación tentativa de la clase de agua ligada (pF &gt;4.2) para zonas semiáridas y áridas con vegetación natural adaptada

AU [l/m <sup>2</sup> ]	50		90
evaluación	no significativo	muy poco aprovechable	algo aprovechable
HD <sub>s</sub>	0	0.5	1

<sup>1</sup> propuesta de un esquema de evaluación; modelo requiere de ajuste y validación



**4.5.4.2. Humedad disponible en función de suelo y relieve ( $HD_{sr}$ )**

Los parámetros de retención de agua determinan únicamente las condiciones del agua dentro del suelo. Para una descripción más completa del balance de agua, hay que considerar los aportes y pérdidas de agua en función del relieve. La posición fisiográfica y la forma del terreno definen por gran parte pérdidas o aportes por escurrimiento superficial y subsuperficial y cambios en la evapotranspiración debidos a la exposición al sol y al viento. En caso de una napa freática alta, hay que considerar el aporte por ascenso capilar en el período de vegetación en forma aparte.

Cuadro 4.13: Evaluación integral de la disponibilidad de agua en función suelo y relieve ( $HD_{sr}$ ). Corrección del valor  $HD_s$  en función del relieve

posición típica en el relieve	condición resultante del relieve o exposición	clasificación $HD_{sr}$
planicie alta	ni aporte ni pérdida evapotranspiración normal	$HD_s$
ladera media	aporte y pérdida por escorrentía equilibrados evapotranspiración normal	$HD_s$
ladera baja, depresión, ladera sombreada	aporte neto de agua por escorrentía super y subsuperficial evapotranspiración reducida	$HD_s + 1 (+2)$
ladera alta, cumbre, ladera soleada	pérdida neta por escorrentía super y subsuperficial, evapotranspiración elevada	$HD_s - 1 (-2)$

**4.5.4.3. Humedad disponible en función de suelo, relieve y clima (HD)**

La disponibilidad de agua en un sitio determinado depende en primer lugar de las condiciones climáticas. La evaluación del balance de agua del suelo según los criterios de retención de agua y relieve, realizado en los pasos anteriores, permite una diferenciación de los suelos según la humedad disponible dentro de una zona climática dada. Para una evaluación ecológica completa del balance de agua del suelo, se precisa la consideración del clima de la zona.

En esta guía se presenta un concepto resumido de la clasificación de la humedad climática según Thornthwaite (1948). Sin embargo, hay una gran variedad de clasificaciones climáticas que se pueden aplicar. Thornthwaite (1948) define los siguientes índices hídricos en base a la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETp) (MOPT, 1992):

- índice de humedad ( $I_h$ ) para un clima húmedo, en el que la precipitación de un mes determinado (P, en [mm]) excede la necesidad de agua, expresada como evapotranspiración potencial (ETp, en [mm]);

$$I_h = \frac{(P - ETp)}{ETp} \times 100 \quad \text{para } P > ETp \quad (4.7)$$

- índice de aridez ( $I_a$ ), aplicable cuando la precipitación, en un mes dado, es inferior a la evapotrans-

piración potencial:

$$I_a = \frac{(ETp - P)}{ETp} \times 100 \quad \text{para } P < ETp \quad (4.8)$$

Teniendo en cuenta la heterogeneidad de la precipitación en las distintas épocas del año y, en consecuencia, la influencia desigual de los índices de aridez y humedad, Thornthwaite define un índice hídrico anual ( $I_m$ ), que se obtiene en función del exceso y déficit de agua de todos los meses, según:

$$I_m = \Sigma I_h - 0.6 \Sigma I_a \quad (4.9)$$

El índice hídrico ponderado ( $I_m$ ) permite caracterizar diferentes ecoregiones (fig. 4.3), que se caracterizan detalladamente en cuadro 4.14.

En base a los conceptos presentados, se propone caracterizar la humedad disponible en el suelo de una cierta región climática mediante un descriptor combinado, que integra el índice hídrico según Thornthwaite ( $I_m$ ) y el índice de humedad en función de suelo y relieve ( $HD_{sr}$ ), de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \text{p.ej.} & : I_m = D; HD_{sr} = 5 \\
 & \Downarrow \\
 \text{Humedad Disponible (HD)} & = \begin{cases} f(\text{suelo, relieve}) \Rightarrow \text{muy alta;} \\ f(\text{clima}) \Rightarrow \text{semiárido;} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Cuadro 4.14: Regiones hídricas de acuerdo al índice hídrico ( $I_m$ ) según Thornthwaite (1948)

Símbolo	Designación	Vegetación	Índice hídrico $I_m$		
A	perhúmedo	selva	$\geq 100$		
B4	húmedo IV	bosque	100	-	80
B3	húmedo III	bosque	80	-	60
B2	húmedo II	bosque	60	-	40
B1	húmedo I	bosque	40	-	20
C2	subhúmedo	pradera de pastos altos	20	-	0
C1	seco subhúmedo	pastos bajos	0	-	-20
D	semiárido	estepa	-20	-	-40
E	árido	desierto	-40	-	-60

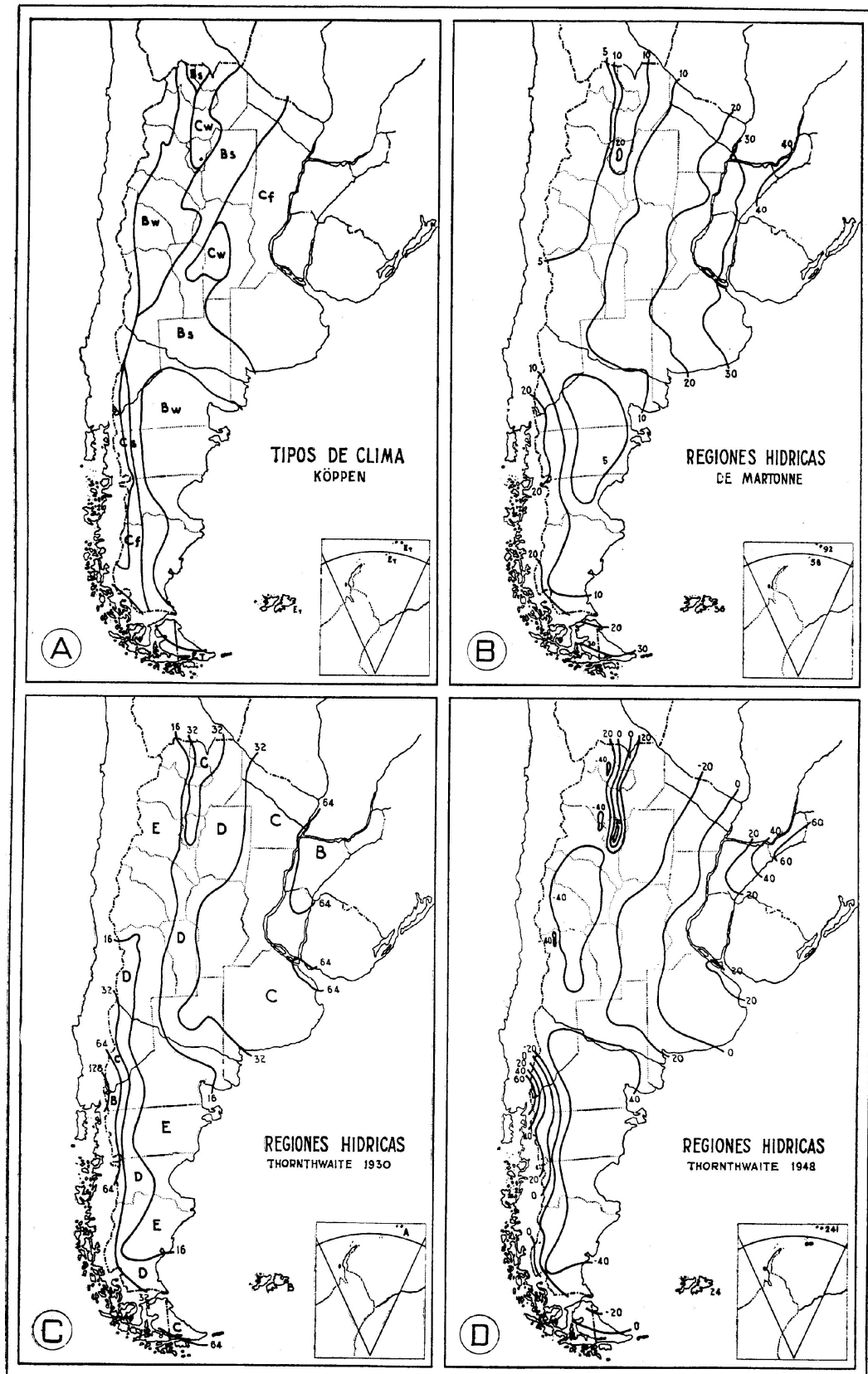


Figura 4.3: Regiones hídricas de la Argentina de acuerdo a diferentes clasificaciones (bio)climáticas (Burgos y Vidal, 1951)

#### 4.5.4.4. Apreciaciones sobre el balance de agua desde la clasificación taxonómica de suelos

##### Nombres en la Base Referencial del Recurso Suelo (Grupo de Trabajo Base Referencial ISSS, 1999)

Siendo el clima un factor predominante en la formación de suelos, en muchas clases taxonómicas del suelo se reflejan ciertas condiciones sobre el balance de agua. Se muestran algunos ejemplos:

- suelos, en los cuales el agua predomina como factor de formación sobre otros: Histosol (→ suelos orgánicos, típicamente por saturación con agua, falta de oxígeno), Gleysol (→ napa freática alta), Planosol (→ reducción fuerte por agua estancada) y Fluvisol (→ influencia del río);
- los elementos formativos stágnico, gléyico, tiónico, hístico, redúctico, designan subunidades de suelos, donde el drenaje es desfavorable, de tal manera resultando en problemas de aireación (ver arriba);

**Régimen de humedad del suelo** El concepto del clima del suelo, disgregado en el régimen de humedad y de temperatura, fue introducido por el sistema de clasificación Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999). Dado que la designación del régimen de humedad se plasma como sílaba formativa en el nombre del suelo, mapas de suelos elaborados bajo este sistema proporcionan esta información ecológicamente muy importante sobre las condiciones de humedad del suelo.

En cuadro 4.15 se desprenden los diferentes regímenes, que se definen en base de duración acumulativa y/o continua de diferentes estados de humedad. Como tales se distinguen

(I) **suelo húmedo**

- a. saturado con agua
- b.  $\psi < 1500\text{kPa}$  (pF 4.2)

(II) **suelo seco**  $\psi \geq 1500\text{kPa}$  (pF 4.2)

Cuadro 4.15: Regímenes de humedad del suelo definidos en la clasificación norteamericana de suelos *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1999)

régimen de humedad	raíz del nombre	connotación
ácuido	l. <i>aqua</i> - agua	saturado con agua, sin O <sub>2</sub>
árido o tórrico	l. <i>aridus</i> - seco l. <i>torridus</i> - seco + caliente	bajo clima árido / semiárido, humedad limitante
údico	l. <i>udus</i> - húmedo	bajo climas húmedos, c/ distribución favorable de lluvia
ústico	l. <i>ustus</i> - quemado	humedad limitante, pero presente en verano
xérico	l. <i>xeros</i> - seco	humedad limitante, pero presente en invierno (clima mediterráneo)

Los diferentes regímenes permiten deducir tres situaciones pedogenéticamente y ecológicamente relevantes,

- a. suelos sin O<sub>2</sub>, anaeróbicos;
- b. suelos con lixiviación;
- c. suelos sin lixiviación;

situaciones que determinan tipo y actividad biológica, el balance de elementos y las vías de transformación de los componentes minerales y orgánicos del suelo.

## 5. EVALUACIÓN DEL BALANCE DE ELEMENTOS

### 5.1. Conceptos generales

La oferta de elementos nutritivos (también: tóxicos) en un suelo es una función de las reservas y su movilización a corto o mediano plazo (fig. 5.1):

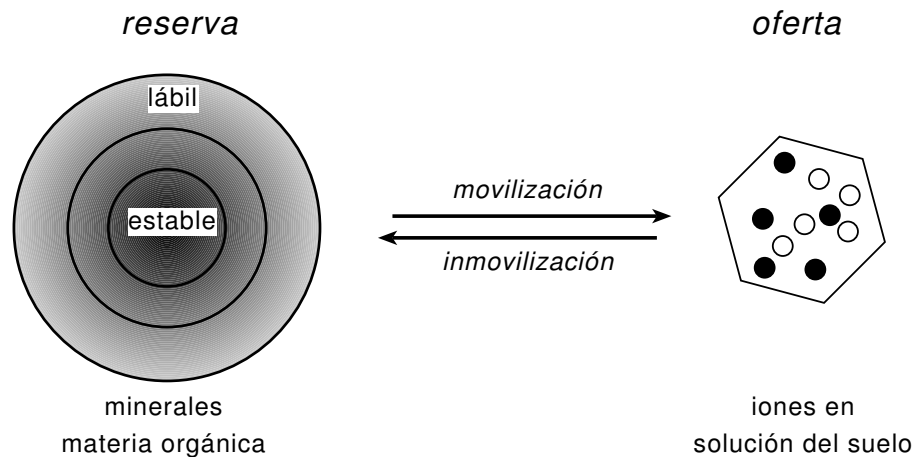


Figura 5.1: Esquema de la movilización de elementos a partir de un pool de reservas. Los elementos en la solución del suelo representan la oferta respectivamente la fracción inmediatamente disponible

Las reservas de nutrientes dependen de la composición mineralógica y la materia orgánica del suelo (MOS). Principalmente aumentan con la presencia de minerales meteorizables y con la cantidad de humus en el suelo. Las reservas resultan del contenido original en la roca madre y las pérdidas o acumulaciones durante la evolución del suelo. Las reservas más importantes para (i) los macronutrientes Ca, Mg, K y P se encuentran en los carbonatos de Ca y Mg, los feldespatos (K, Ca), apatita (P) y micas o ilitas (K) y (ii) para Fe y otros microelementos (Mn, Cu, Co) en los minerales ferromagnesianos (rocas oscuras). Tanto para los elementos P y S como para los microelementos, puede haber grandes reservas en la materia orgánica del suelo. Por ende, casi el total del N ( $\geq 95\%$ ) se encuentra en forma orgánica, es decir en la MOS.

En la movilización de nutrientes se distinguen (i) la liberación de elementos de las reservas minerales por procesos de meteorización, (ii) procesos de intercambio en la superficie de adsorbentes y (iii) la liberación de reservas en la materia orgánica por la mineralización microbiana. La movilización de

los nutrientes es entonces una función de las condiciones de meteorización (clima, clima del suelo, balance de agua, tipo de minerales), de las características químicas actuales del suelo (pH, humedad, tipo de adsorbentes, mineralogía) y bioquímicas y biológicas (contenido de materia orgánica, tipo de humus, actividad microbiana, potencial redox).

Una aproximación para estimar el balance de nutrientes en el suelo se obtiene mediante los parámetros: mineralogía de la roca madre, grado de meteorización, contenido de carbonatos, pH, capacidad de intercambio de cationes, contenido de materia orgánica y forma de humus. Una primera evaluación cualitativa de las reservas de nutrientes movilizables se obtiene de cuadro 5.1, que toma en cuenta la roca madre y el grado de meteorización.

Cuadro 5.1: Caracterización cualitativa de las reservas de nutrientes en suelos de acuerdo al tipo de roca y grado de meteorización (según Schlichting et al., 1995, adaptado)

	<i>Grado de meteorización física y química</i>			
	<i>alto</i>	<i>medio</i>	<i>débil a moderado</i>	<i>no a escaso</i>
suelos terrestres (ejemplos, no para todas las clases de rocas posibles)	Podzol, Lixisol, Acrisol ??	Dystric Cambisol, Podzol-Cambisol	Eutric Cambisol, Chernozem, Phaeozem y Kastanozem, Luvisol, Regosol, Arenosol	Leptosol, Rendzic Leptosol
<i>tipo de roca</i>	<i>reserva de nutrientes</i>			
arena, arenisca, cuarcita	muy baja (1)	baja (2)	baja (2)	muy baja (1)
marga arenosa, lutita, granito	baja (2)	baja (2)	media (3)	baja (2)
marga, loess, caliza, lodo, sedimentos fluviales francosos	baja (2)	media (3)	alta (4)	media (3)
arcilla, marga arcillosa, pizarra, filita	media (3)	alta (4)	muy alta (5)	alta (4)
gabro, basalto	media (3)??	extr. alta (6)	extr. alta (6)	muy alta (5)

### 5.1.1. Cálculo de cantidades de nutrientes en el espacio de enraizamiento

Si existen datos analíticos de los elementos nutritivos, se pueden calcular las cantidades de los mismos en el suelo hasta el límite de enraizamiento referido al área según:

1. transformación de concentración del nutriente por masa a una concentración por volumen de suelo:

$$\text{conc. por volumen [g/dm}^3] = \text{conc. por masa [g/kg]} \times \text{densidad aparente [kg/dm}^3] \quad (5.1)$$

2. corrección por la pedregosidad (referencia únicamente a la tierra fina):

$$\text{conc. por volumen [g/dm}^3] \times \frac{(100 - \%vol(piedras))}{100} \quad (5.2)$$

3. cantidad de nutriente por horizonte y unidad de área:

$$\text{cantidad de nutriente [g/m}^2] = \text{conc. por volumen [g/dm}^3] \times \text{volumen horizonte [dm}^3/\text{m}^2] \quad (5.3)$$

observe: volumen del horizonte por área [dm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>] = espesor de horizonte [mm]

4. sintetizando (1), (2) y (3) y expresando la cantidad de nutriente en  $[g/m^2]$

$$\begin{aligned}
 \text{cantidad de nutriente } [g/m^2] &= \\
 & \text{conc. de nutriente} \times Dap \times \frac{(100 - \%vol(\text{piedras}))}{100} \times \text{volumen horizonte} \\
 & [g/kg] \times [kg/dm^3] \times [1/1] \times [dm^3/m^2]
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Las cantidades se calculan de esta manera para cada horizonte hasta la profundidad límite de enraizamiento. La cantidad total del nutriente en cuestión es la suma de las cantidades de los horizontes individuales.

Si se trata de fracciones disponibles de nutrientes, conviene considerar la disponibilidad decreciente con la profundidad, debido a la disminución del enraizamiento. Por tal razón, se calcula una suma ponderada, usando los siguientes factores de ponderación:

- horizontes A y O, enteros o profundidad hasta 30 cm: factor 1
- otros horizontes o profundidad >30cm: factor 0.5

## 5.2. Materia orgánica del suelo (MOS) y nitrógeno orgánico (Nt)

### Concentración de materia orgánica en el suelo

El contenido de materia orgánica del suelo en horizontes A se puede estimar según el tono gris en el color (value) según el siguiente diagrama:

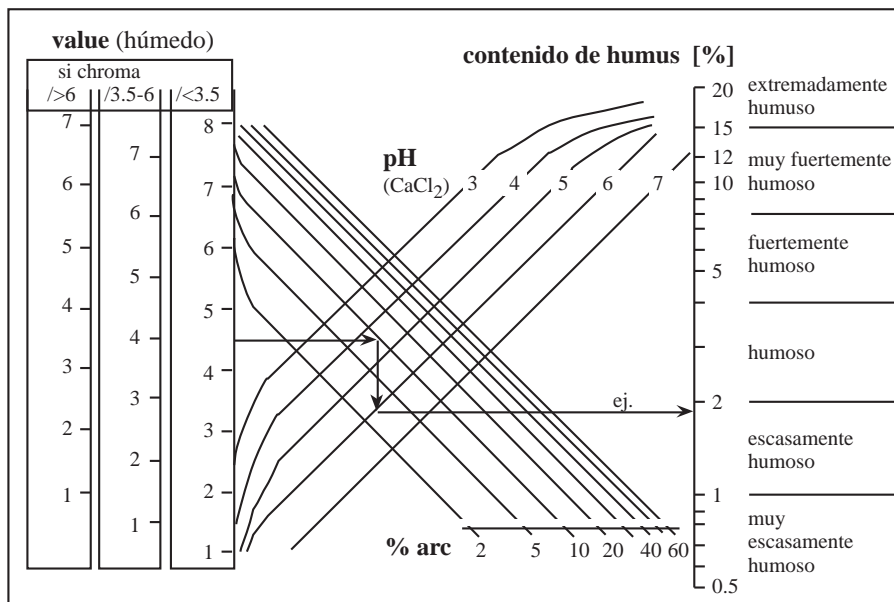


Figura 5.2: Estimación del contenido de materia orgánica (humus) del suelo en función de color (según Munsell), pH y textura (contenido de arcilla), según Renger (1987)

Cuadro 5.2: Evaluación del contenido de materia orgánica del suelo (humus), según Schlichting et al. (1995)

MOS [%]	evaluación	símbolo
	sólo parcialmente humoso	(h)
<1	muy escasamente humoso	h1
1 - 2	escasamente humoso	h2
2 - 4	humoso	h3
4 - 8	fuertemente humoso	h4
8 - 15	muy fuertemente humoso	h5
15 - 30	extremadamente humoso (anmoor en suelos semiterrestres)	h6
>30	turbera	H

**Reservas de materia orgánica en el suelo**

La cantidad de materia orgánica del suelo (MOS) se calcula por unidad de área hasta la profundidad límite de enraizamiento:

$$\begin{aligned}
 \text{cantidad de MOS} &= \text{concentración de MOS} \times Dap \times \frac{(100 - \%vol(piedras))}{100} \times \text{volumen horizonte} \quad (5.5) \\
 [g/m^2] &= [g/kg] \times [kg/dm^3] \times [1/1] \times [dm^3/m^2]
 \end{aligned}$$

Cuadro 5.3: Evaluación de las reservas de materia orgánica del suelo (MOS)

MOS [kg/ha]	20000	50000	100000	200000	
evaluación	muy baja	baja	regular	alta	muy alta

**Reservas de nitrógeno orgánico**

En caso de que no existan valores analíticos de  $N_t$ , las reservas del mismo pueden ser estimadas en función de las reservas de materia orgánica y la forma de humus según:

Cuadro 5.4: Estimación de reservas ( $N_t$ ) y fracción disponible ( $N_d$ ) de N en función de la forma de humus; relaciones C/N supuestas: mull=10, moder=20, mor=33; tasas de mineralización anual: mull=0.5 %, moder=0.32 %, mor=0.2 %; según Jahn (1992)

forma de humus	reserva de N ( $N_t$ ) = [kg / ha]	N disponible ( $N_d$ ) = [kg / ha]
mull	MOS [kg/ha] $\times 0.050$	MOS [kg/ha] $\times 0.25 \times 10^{-3}$   $N_t$ [kg/ha] $\times 5.0 \times 10^{-3}$
moder	$\times 0.025$	$\times 0.08 \times 10^{-3}$   $\times 3.2 \times 10^{-3}$
mor	$\times 0.015$	$\times 0.03 \times 10^{-3}$   $\times 2.0 \times 10^{-3}$



Cuadro 5.5: Evaluación de las reservas ( $N_t$ ) y fracciones disponibles ( $N_d$ ) de N, según Jahn (1992); Schlichting et al. (1995)

$N_t$ [kg/ha]	1000		2500		5000		10000		
evaluación	muy baja	baja	regular	alta	muy alta				
$N_d$ [kg/ha]	5		10		20		40		
evaluación	muy baja	baja	regular	alta	muy alta				

### 5.3. Complejo adsorbente

Los coloides del suelo, mayormente la materia orgánica y minerales de arcilla, poseen cargas negativas y pueden adsorber cationes, tanto nutritivos como tóxicos, en su superficie. Estos cationes pueden ser intercambiados por cantidades equivalentes de otros cationes, de acuerdo a tipo y concentración de iones en la solución del suelo y en el adsorbente. Cationes adsorbidos están protegidos contra la lixiviación, pero pueden ser extraídos por las plantas, representan por eso una fracción disponible de elementos.

El intercambio de cationes se caracteriza por un parámetro cuantitativo, que es la suma de los cationes intercambiables por unidad de masa del intercambiador, la llamada capacidad de intercambio de cationes (CIC, en  $[\text{cmol}_c/\text{kg}]^1$ ), y un parámetro cualitativo, que es la composición catiónica del adsorbente.

$$\text{complejo adsorbente} \begin{cases} \text{aspecto cuantitativo} & \Rightarrow \text{CIC, } \text{CIC}_{ef}, \text{ superficie específica} \\ \text{aspecto cualitativo} & \Rightarrow \text{composición aniónica, } S, SB, PSI \end{cases}$$

#### 5.3.1. Capacidad de intercambio de cationes (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico del suelo es determinada por la cantidad y calidad de los materiales coloidales del suelo, es decir, los minerales de arcilla y la materia orgánica. Ambos componentes se destacan por su gran superficie específica, calidad que favorece la adsorción de sustancias en general, y una carga negativa, que provoca específicamente la atracción de cationes.

$$\text{CIC} = f \left( \begin{array}{l} \text{minerales de arcilla, tipo y proporción} \\ \text{humus, cantidad y forma} \end{array} \right)$$

La CIC atribuida por la fase mineral se permite estimar a través de la clase textural y la mineralogía (fig. 5.3). En caso de que no existan datos analíticos del último parámetro, se pueden deducir los minerales de arcilla predominantes en base a la roca madre y la evolución del suelo.

La materia orgánica posee valores máximos de CIC, que oscilan entre 200 a 300  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ . Para fines de estimación, se usa el valor máximo, de tal manera, por cada 1 % de humus, la CIC aumenta por 3  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ .

Los valores de CIC, ya sean obtenidos por análisis o estimados, se evalúan de acuerdo a cuadro 5.6.

<sup>1</sup>  $\text{cmol}_c \rightarrow$  subíndice c de carga

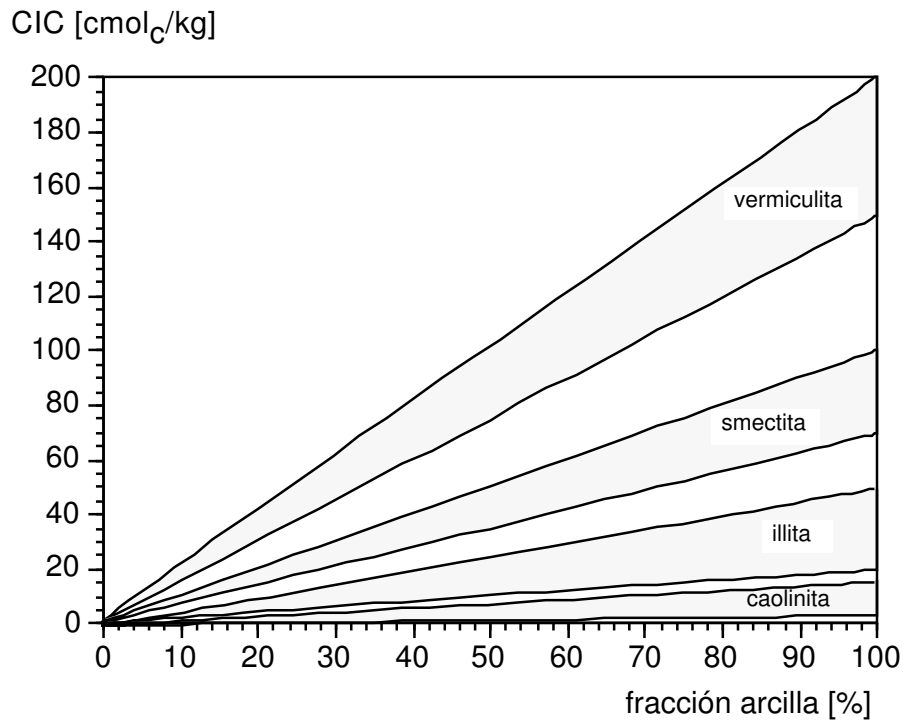


Figura 5.3: Rangos de capacidad de intercambio catiónico (CIC) en función del tipo de mineral de arcilla y su proporción en la tierra fina. La CIC se incrementa por 3cmol<sub>c</sub>/kg por cada 1 % de arcilla

Cuadro 5.6: Evaluación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), para cada horizonte (Schlichting et al., 1995)

CIC [cmol <sub>c</sub> /kg]	5	10	20	40	80	
evaluación	muy escasa	escasa	moderada	regular	alto	muy alta

### 5.3.2. Saturación de bases y valor S

La suma de los llamados “cationes básicos”, Ca, Mg, K, Na, en el complejo adsorbente, se denomina valor S (en [cmol<sub>c</sub>/kg]). La proporción de estos cationes en la superficie del intercambiador se conoce como saturación de bases (SB o valor V en [%]). La diferencia entre valor S y la CIC es ocupada por cationes ácidos, H<sup>+</sup> y Al<sup>3+</sup>, fracción designada como valor H (en [meq/kg]).

$$S = \sum (Na, K, Mg, Ca)_{int} \quad [cmol_c/kg] \quad (5.6)$$

$$SB = \frac{S}{CIC} \times 100 \quad [%] \quad (5.7)$$

$$CIC = S + H \quad [cmol_c/kg] \quad (5.8)$$

La saturación de bases se encuentra en 100 % al inicio de la evolución del suelo, cuando el pH es neutro o alcalino. Con la acidificación progresiva del suelo, proceso típico en zonas húmedas, la

saturación de base disminuye, siempre en equilibrio con el pH del suelo (fig. 5.4). Conociendo entonces el pH y la CIC del suelo, se pueden estimar la saturación de bases respectivamente el valor S.

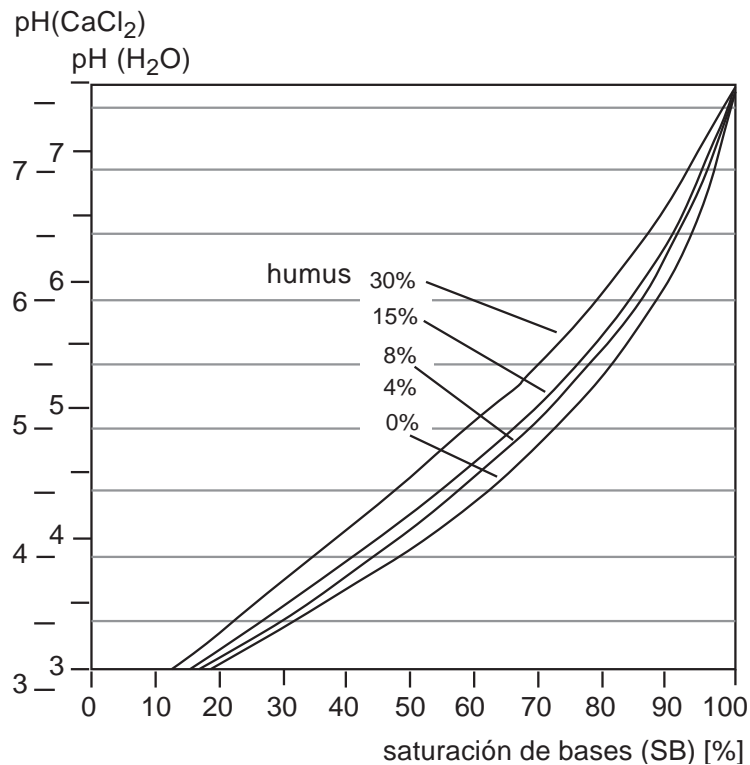


Figura 5.4: Relación entre pH del suelo y la saturación de bases, para diferentes contenidos de humus

La estimación del valor S es de suma importancia, porque los cationes básicos intercambiables representan nutrientes (excepción: Na) que se encuentran disponibles para las plantas, pero protegidos contra la lixiviación. En zonas de climas húmedos, el valor S caracteriza la fracción de los macroelementos Ca, Mg, K y Na disponibles. A diferencia, para climas semiáridos o áridos, donde a menudo no existe una lixiviación completa de carbonatos, yeso y sales, hay que considerar, aparte del valor S, el extracto de saturación y la proporción de Na intercambiable (PSI).

Cuadro 5.7: Evaluación de la saturación de bases (Schlichting et al., 1995)

SB [%]	7.5	20	50	80	
evaluación	muy baja	baja	media	alta	muy alta

Cálculo del valor S: para cada horizonte y después sumar valores de todos los horizontes del espacio de enraizamiento:

$$S [\text{cmol}_c/\text{kg}] = \frac{SB [\%]}{100} \times CIC [\text{cmol}_c/\text{kg}] \quad (5.9)$$

$$S [\text{mol}_c/\text{m}^2] = \frac{S [\text{cmol}_c/\text{kg}]}{100} \times Dap [\text{kg}/\text{dm}^3] \times \frac{(100 - \%vol(\text{piedras}))}{100} \times vol. \text{ horizonte } [\text{dm}^3/\text{m}^2] \quad (5.10)$$

Cuadro 5.8: Evaluación del valor S en el espacio de enraizamiento (según Schlichting et al., 1995)

S [mol <sub>c</sub> /m <sup>2</sup> ]	10	25	50	200	
evaluación	muy escaso	escaso	regular	alto	muy alto

#### 5.4. Evaluación de cantidades disponibles y reservas movilizables de nutrientes

De acuerdo al concepto de la oferta de nutrientes a partir de la movilización de la reserva total (fig. 5.1), existen diferentes sub-fracciones del nutriente, que se distinguen en su resistencia a la movilización. En base a ello, se han elaborado muchos métodos analíticos que tratan de extraer fracciones de nutrientes que sean disponibles a corto o mediano plazo (meses a un año), circunscribiendo con ello una “fracción disponible”.

En los siguientes cuadros, se muestran fracciones disponibles a corto plazo (cuadro 5.9), y otras disponibles a largo plazo (o reservas, cuadro 5.10). Cabe destacar, más que nada para las fracciones lábiles, que los valores de las valoraciones están estrechamente ligadas al método analítico usado. En caso de usar valores de otros métodos, se recomienda una revisión bibliográfica sobre el análisis y, específicamente, la correlación de los resultados con los de otras técnicas.

Cuadro 5.9: Evaluación de cantidades de nutrientes disponibles en el espacio efectivo de enraizamiento; valores en [kg/ha] (Schlichting et al., 1995)

elemento	cantidad disponible [kg / ha]					
N <sup>1)</sup> <sub>min</sub>	1	20	45	120	800	
N <sup>2)</sup> <sub>z</sub>	2	10	20	80	200	
P <sup>1)</sup> <sub>disp</sub>	-	100	250	400	600	
K <sup>4)</sup> <sub>int</sub>	80	240	480	800	1200	
Mg <sup>4)</sup> <sub>int</sub>	50	150	300	600	1200	
Ca <sup>4)</sup> <sub>int</sub>	150	500	1000	2000	6000	
S <sup>5)</sup> <sub>min</sub>	20	80	200	400	-	
evaluación	1	2	3	4	5	6
	muy bajo	bajo	regular	mod. alto	alto	muy alto

1) N mineral (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> + NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) en extracto 1:4 de 0.025 N CaCl<sub>2</sub>; 2) N mineralizado en incubación a 20°C, 60 % cap. max. H<sub>2</sub>O, 6 semanas; 3) P disponible según Olsen, extracto en NaHCO<sub>3</sub>, pH 8.5; 4) cationes intercambiables según método de NH<sub>4</sub>Ac a pH 7.0; 5) SO<sub>4</sub><sup>-</sup> en extracto 1:5 de NaCl (1 %)

Un marco de evaluación de las reservas de nutrientes que se movilizan a largo plazo da cuadro 5.10, tomando como referencia un clima templado-atlántico (ϑT=7°C, P=700mm). Para condiciones climáticas diferentes, hay que recurrir a extractantes más o menos agresivos o ajustar la evaluación realizada.

Cuadro 5.10: Evaluación de reservas movilizables de nutrientes en el espacio efectivo de enraizamiento; valores en [kg/ha] (Schlichting et al., 1995)

elemento	reservas movilizables [kg / ha]					
$N_t^{1)}$	1000	2500	5000	10000	20000	
$P_w^{2)}$	250	1250	1750	2500	5000	
$K_w^{2)}$	1000	5000	10000	15000	30000	
$Mg_w^{2)}$	500	2500	3500	5000	10000	
$Ca_w^{2)}$	500	2500	3500	5000	10000	
evaluación	1	2	3	4	5	6
	muy bajo	bajo	regular	mod. alto	alto	muy alto

1) N total según Kjeldahl u otro método; 2) extracto 1:5 con HCl (30%) de una muestra incinerada a 500°C

## 5.5. Condiciones adversas relacionadas con el balance de elementos

Los mismos nutrientes, pero también otros elementos, pueden provocar efectos adversos en los vegetales, cuando se presentan en cierta concentración. Entre los problemas más comunes podemos encontrar (i) la salinidad y sodicidad en climas áridos y semiáridos, y (ii) la toxicidad de aluminio en zonas húmedas.

### 5.5.1. Salinidad

Salinidad designa una elevada concentración de sales más solubles que yeso en la solución del suelo, resultando en una elevada presión osmótica, lo que impide a las plantas la extracción de agua. Aparte de ello, puede haber efectos tóxicos específicos de ciertos iones.

La medición estándar de la salinidad es la conductividad eléctrica (CE) en el extracto de saturación, dado que iones solubles en agua permiten la conducción de corriente eléctrica. El extracto de saturación se aproxima a la solución del suelo en estado de capacidad de campo. La presión osmótica ( $\pi$ ) correspondiente a una cierta conductividad eléctrica (CE) en la solución del suelo puede ser estimada a través de la siguiente relación empírica:

$$\pi = 0.036 \times CE \quad (5.11)$$

$\pi$  presión osmótica [MPa]; 1 MPa = 10 bar  
 CE conductividad eléctrica [dS/m];  
 1 dS/m = 1mS/cm = 1 mmohs/cm

Si no se dispone de la conductividad en el extracto de saturación, la misma puede ser estimada en base a un análisis rápido de la CE en un extracto suelo:agua 1:2.5 ( $EC_{2.5}$ ), con la referencia de CE al volumen de agua de capacidad de campo:

$$\hat{EC}_s [dS/m] = \frac{250 \times EC_{2.5}}{CC} \quad (5.12)$$

- $\hat{EC}_s$  conductividad eléctrica estimada para estado de capacidad de campo [dS/m]
- $CE_{2.5}$  conductividad eléctrica en extracto suelo : agua = 1 : 2.5 [dS/m]
- CC capacidad de campo [%]

Este método rápido da estimaciones satisfactorias de la conductividad en estado de saturación del suelo, siempre cuando no haya sales poco solubles como  $CaSO_4$  o  $CaCO_3$ . En presencia de éstas, la CE es generalmente sobreestimada.

Los valores de conductividad eléctrica en la solución del suelo son evaluadas según cuadro 5.11.

Cuadro 5.11: Evaluación de la conductividad eléctrica (CE, [dS/m], estandarizada a 25°C) en la solución del suelo (extracto de saturación respectivamente situación de capacidad de campo) (Soil Survey Division Staff, 1993)

CE [dS/m]	evaluación	descripción
0 - 2	no salino	libre de influencia, no existen limitaciones a los cultivos
2 - 4	muy ligeramente salino	casi libre de influencia, algunos cultivos muy sensibles muestran afectaciones
4 - 8	ligeramente salino	cultivos afectados, pero no impedidos
8 - 15	moderadamente salino	cultivos muy afectados, incluso impedidos, excepto los resistentes
>15	fuertemente salino	todos los cultivos impedidos; sólo vegetación halófila natural

Como la presencia de sales es también un criterio importante en la clasificación del suelo, la designación taxonómica del suelo nos permite deducir si el suelo tiene o no problemas de salinidad. A continuación se detallan definiciones de la “Base Referencial Mundial del Recurso Suelo” (Grupo de Trabajo Base Referencial ISSS, 1999).

En primer lugar existe la definición del horizonte sálico, cuya presencia en la parte superior del suelo lleva a la clasificación de un Solonchak:

**Horizonte sálico** (Grupo de Trabajo Base Referencial ISSS, 1999)

**Descripción general.** El horizonte sálico (del L. *sal*) es un horizonte superficial o subsuperficial somero que contiene un enriquecimiento secundario de sales fácilmente solubles, es decir, sales más solubles que el yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ; log Ks = - 4.85 a 25°C).

**Criterios de diagnóstico.** Un horizonte sálico debe tener, en todo su espesor:

1. a. una conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación de más de 15 dS m<sup>-1</sup> a 25°C en algún momento del año; o
  - b. una CE de más de 8 dS m<sup>-1</sup> a 25°C si el pH (H<sub>2</sub>O) del extracto de saturación excede 8.5 (para suelos con carbonato alcalino) o menos de 3.5 (para suelos con sulfato ácido); y
2. como mínimo 1 por ciento de sales; y

3. el producto del espesor (en cm) por el porcentaje de sales es de 60 o más; y
4. espesor de 15 cm o más.

**Identificación en el campo.** Son evidencias circunstanciales las que usualmente señalan la presencia de un horizonte sálico. La vegetación halofítica como Tamarix y cultivos tolerantes a sales son los primeros indicadores. Las capas afectadas por sales con frecuencia exhiben estructuras 'infladas'. Las sales precipitan sólo después de la evaporación de la humedad del suelo. Estas precipitaciones no necesitan estar presentes si el suelo está húmedo o mojado. Las sales pueden precipitar en la superficie ("Solonchaks externos") o en profundidad ("Solonchaks internos"). Una costra de sales en la superficie es parte del horizonte sálico.

Aparte de ello, existen definiciones de "elementos formativos", que caracterizan los suelos a niveles taxonómicos inferiores. Respecto a salinidad, se distinguen (Grupo de Trabajo Base Referencial ISSS, 1999):

**Sálico:** que tiene un horizonte sálico dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo.

**Endosálico:** que tiene un horizonte sálico entre 50 y 100 cm desde la superficie del suelo.

**Episálico:** que tiene un horizonte sálico entre 25 y 50 cm desde la superficie del suelo.

**Hiposálico** que tiene una conductividad eléctrica del extracto de saturación de más de 4 dS m<sup>-1</sup> a 25°C en por lo menos algún subhorizonte dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo.

**Hipersálico:** que tiene una conductividad eléctrica del extracto de saturación de más de 30 dS m<sup>-1</sup> a 25°C en por lo menos algún subhorizonte dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo.

De tal manera, de nombres taxonómicos como p.ej. Solonchak, Vertisol sálico, Fluvisol sálico, Calcisol endosálico, se desprende mucha información acerca de la salinidad.

### 5.5.2. Sodicidad

Sodicidad designa la elevada presencia de sodio, o sodio más magnesio, en el complejo adsorbente. Suelos sódicos típicamente no poseen salinidad, es decir la conductividad eléctrica es <4dS/m, y se caracterizan por una reacción alcalina. Sin embargo, existen transiciones con suelos salinos, que reúnen aspectos de salinidad y sodicidad.

La alta proporción de sodio en el complejo adsorbente provoca los siguientes inconvenientes en suelos:

- (I) una reacción fuertemente alcalina, con pH encima de 8.5, lo que genera problemas de nutrición con ciertos elementos y de toxicidad;
- (II) una baja estabilidad estructural, debido a la fuerte dispersión de partículas por Na<sup>+</sup>, resultando en problemas de aireación y de permeabilidad, y
- (III) toxicidad del sodio para ciertas especies vegetales.

Los parámetros de evaluación son el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) respectivamente la suma de sodio y magnesio intercambiable, y el pH (criterios usados por la Base Referencial, Grupo de

Trabajo Base Referencial ISSS, 1999), mientras que la escuela norteamericana (Soil Survey Division Staff, 1993) prefiere la relación de adsorción de sodio (RAS) en el extracto de saturación:

$$PSI = \frac{Na_{int}^+}{CIC} \times 100 \quad [\%] \quad (5.13)$$

$$RAS = \frac{Na_{int}^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad [cmol_c/l] \quad (5.14)$$

Los criterios de sodicidad se usan en la clasificación de suelos a distintos niveles, así que del nombre taxonómico se pueden deducir los grados de sodicidad. El suelo sódico típico es el Solonetz, que posee un horizonte nátrico con las siguientes características:

**Horizonte nátrico** (Grupo de Trabajo Base Referencial ISSS, 1999)

**Descripción general.** El horizonte nátrico (del holandés natrium, sodio) es un horizonte denso subsuperficial con mayor contenido de arcilla que el o los horizontes suprayacentes. El incremento en contenido de arcilla entre el horizonte nátrico y el horizonte suprayacente debe cumplir los mismos requisitos que en un horizonte árgico. Además, tiene un elevado contenido de sodio y/o magnesio intercambiables.

**Criterios de diagnóstico.** Un horizonte nátrico debe tener (*se hace referencia únicamente a criterios relacionados con el sodio intercambiable y el pH*):

1. ...; y
2. ...
  - a. ...; o
  - b. ...; o
  - c. ...; y
3. ...; y
4. ...; y
5. ...;
6. ...; y
7. un porcentaje de sodio intercambiable (PSI) de más de 15 dentro de los 40 cm superiores, o más magnesio más sodio intercambiables que calcio intercambiable más acidez de intercambio (a pH 8.2) dentro de la misma profundidad si la saturación con sodio intercambiable es más de 15 por ciento en algún subhorizonte dentro de los 200 cm desde la superficie; y
8. ...

**Identificación en el campo.** El color del horizonte nátrico va de pardo a negro, especialmente en la parte superior. La estructura es columnar o prismática gruesa, a veces en bloques, o puede incluso ser masiva. Son características las cabezas redondeadas de los elementos estructurales y con frecuencia de color blancuzco.

Ambas características de color y estructurales dependen de la composición de los cationes intercambiables y el contenido de sales solubles en las capas subyacentes. Con frecuencia



ocurren cutanes de arcilla gruesos y de color oscuro u otras separaciones plásmicas, especialmente en la parte superior del horizonte. Los horizontes nátricos tienen una pobre estabilidad de agregados y muy baja permeabilidad en mojado. Cuando seco el horizonte nátrico se vuelve duro a extremadamente duro. La reacción del suelo es fuertemente alcalina; el pH (H<sub>2</sub>O) es más de 8.5.

**Características adicionales.** Los horizontes nátricos se caracterizan por un alto pH (H<sub>2</sub>O) el que frecuentemente es mayor de 9.0. Otra medida para caracterizar al horizonte nátrico es la relación de adsorción de sodio (RAS) que debe ser 13 cmol<sub>c</sub> l<sup>-1</sup> o más. El RAS se calcula a partir de datos de la solución del suelo:  $RAS = Na^+ / [(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2]^{0.5}$  cmol<sub>c</sub>/l.

Frecuentemente, ocurre una capa afectada por sales debajo del horizonte nátrico. La influencia de sales puede extenderse dentro del horizonte nátrico el cual además de ser sódico también se vuelve salino. Las sales presentes pueden ser cloruros, sulfatos o (bi-)carbonatos.

Para otros suelos, las definiciones de *elementos formativos* de los taxones proporcionan una buena guía para la evaluación de la sodicidad (Grupo de Trabajo Base Referencial ISSS, 1999):

**Sódico:** que tiene más del 15 por ciento de sodio intercambiable o más del 50 por ciento de sodio más magnesio intercambiables en el complejo de intercambio dentro de los 50 cm desde la superficie del suelo.

**Endosódico:** que tiene más del 15 por ciento de sodio intercambiable o más del 50 por ciento de sodio más magnesio intercambiables en el complejo de intercambio entre 50 y 100 cm desde la superficie del suelo.

**Hiposódico:** que tiene más del 6 por ciento de saturación con sodio intercambiable en por lo menos algún subhorizonte de más de 20 cm de espesor dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo.

## 6. CAPACIDAD FILTRO DE SUELOS

Suelos funcionan como filtros ambientales efectivos, en su más amplio sentido. Se integran en esta función procesos de retención mecánica, adsorción en coloides, reacciones de precipitación y transformación química y la transformación biológica.

Aquí se presenta una estimación de la capacidad filtro, que enfoca la filtración física y la adsorción en coloides. Las características de filtración se deducen de propiedades mecánicas y físico-químicas, concretamente, de parámetros que circunscriben la permanencia del agua en el suelo ( $\Rightarrow$  tiempo de reacción) y la capacidad del complejo adsorbente. Transformaciones microbianas pueden afectar la función de filtro en forma positiva o negativa (AG Boden, 1996).

Cuadro 6.1: Clases de efecto de filtro de horizontes o capas homogéneos para sustancias coloidales e iones en dispersión en función de la capacidad de aire (CA) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (AG Boden, 1996)

CA (poros >50 $\mu$ m) [%-vol]	CIC1 <sup>a</sup> <4	CIC2 4 - 8	CIC3 8 - 12	CIC4 12 - 20	CIC5 20 - 30	CIC6 >30
	[cmol <sub>c</sub> /kg suelo]					
<2	3	3 - 4	4	4 - 5	5	5 - 6
2 - 4	2 - 3	3	3 - 4	4	4 - 5	5
4 - 12	2	2 - 3	3	3 - 4	4	4 - 5
12 - 20	1 - 2	2	2 - 3	3	3 - 4	4
>20	1	1 - 2	2	2 - 3	3	3 - 4

<sup>a</sup>cinco niveles de 1 = bajo a 5 = muy alto; en caso de sustratos gravosos o agrietados el efecto filtro se reduce por 1 o 2 clases

## BIBLIOGRAFÍA

- AG Boden. 1996. Bodenkundliche Kartieranleitung. 4<sup>o</sup> ed<sup>ón</sup>. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter Deutschland, Hannover, 392 págs.
- AG Bodenkunde. 1982. Bodenkundliche Kartieranleitung. 3<sup>o</sup> ed<sup>ón</sup>. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter Deutschland, Hannover, 331 págs.
- Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung. 1980. Forstliche Standortaufnahme. 4 ed<sup>ón</sup>. Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, Münster-Hiltrup, Germany, 188 págs.
- Burgos, J.J. y Vidal, A.L. 1951. Los climas de la república Argentina, según la nueva clasificación de Thornthwaite. *Meteoros* 1:3–32.
- Grupo de Trabajo Base Referencial ISSS. 1999. Base referencial mundial del recurso suelo. N<sup>o</sup> 84 en *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos*, FAO, ISRIC, ISSS, Roma, 90 págs.
- ISSS Working Group RB. 1998. World Reference Base for Soil Resources. N<sup>o</sup> 84 en *World Soil Resources Reports*, FAO, ISRIC, ISSS, Rome, 88 págs.
- Jahn, R. 1992. Praktikumsanleitung zur Beschreibung, Deutung und ökologischen Bewertung von Böden. Institut für Bodenkunde und Standortlehre, Universität Hohenheim, Hohenheim, Deutschland.
- Mitlöhner, R. 1990. Die Konkurrenz der Holzgewächse im regenrünen Trockenwald des Chaco Boreal, Paraguay. Tesis Doctoral, Universität Göttingen, Göttingen.
- MOPT. 1992. Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología. Monografías de la Secretaría del Estado para las Políticas del Agua y del Medio Ambiente, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid, 809 págs.
- Renger, M. et al. 1987. Beziehungen zwischen Bodenfarbe und Humusgehalt. *Mitteilgn. Dtsch. Bodenkdl. Gesellsch.* 55:821–826.
- Schlichting, E. y Blume, H.-P. 1966. *Bodenkundliches Praktikum*. Paul Parey Verlag, Hamburg, Berlin, 209 págs.
- Schlichting, E., Blume, H.-P. y Stahr, K. 1995. *Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler*. Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin, 295 págs.
- Schroeder, D. 1992. *Bodenkunde in Stichworten*. Gebrüder Bornträger, Stuttgart, 175 págs.
- Soil Survey Division Staff. 1993. *Soil survey manual*. N<sup>o</sup> 18 en *Agriculture Handbook*, United States Department of Agriculture, Washington, 437 págs.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2<sup>o</sup> ed<sup>ón</sup>. N<sup>o</sup> 436 en *Agricultural Handbook*, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, 869 págs.

Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38:55–94.

Walter, H. y Breckle, S.W. 1991. *Ökologie der Erde. Band 1: Ökologische Grundlagen in globaler Sicht*. 2<sup>o</sup> ed<sup>ón</sup>. Fischer Verlag, Stuttgart, 238 págs.