

## SUELOS IDEALES para AGRICULTURA SOSTENIBLE <sup>1</sup>

M. Á. Pilatti<sup>2</sup> y J. A. de Orellana<sup>3</sup>

Fac. de Ciencias Agrarias de la Univ. Nac. del Litoral(FCA, UNL)

Kreder 2805, (3080)Esperanza. E-mail: [mpilatti@fca.unl.edu.ar](mailto:mpilatti@fca.unl.edu.ar)

### SUMMARY

#### IDEAL SOILS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE

To achieve Sustainable Agriculture systems, each soil should satisfy the requirements of the plants according to the climate of the place. That Ideal Soil should be able to sustain physically the crops and, it should also allow them to grow and to accomplish the indispensable vital functions to attain the maximum production levels through the time. This paper describes the functions and associated attributes that must fulfill an ideal soil in the North of the Pampean Region (Argentina). Techniques to measure soil attributes with the critical limits are proposed, and the sensibility of some of them to detect differences between systems and the tendency regarding to the sustainability of several management practices are also analyzed.

KEY WORDS: sustainable agriculture, ideal soil, soil degradation indicators.

### RESUMEN

Para acceder a sistemas de Agricultura Sostenible, conviene que cada suelo pueda satisfacer las necesidades de las plantas que en él se cultivan, según el clima del lugar. Ese *Suelo Ideal* debe ser tal que, "además de sostener físicamente a los cultivos, les permita crecer, desarrollarse y cumplir normalmente todas las funciones vitales indispensables para llevar al máximo los niveles de producción a través del tiempo". En este trabajo se describen las funciones que debe cumplir un suelo ideal en la Región Pampeana Norte y qué atributos se asocian a esas funciones; se proponen técnicas para medirlos, con sus límites críticos, evaluando la sensibilidad de algunos de ellos para detectar diferencias y vislumbrar la tendencia de algunos manejos usuales en dicha región respecto de la sostenibilidad.

PALABRAS CLAVES: agricultura sostenible - suelo ideal – indicadores de degradación de suelos

---

<sup>1</sup> Versión resumida y actualizada de: Orellana & Pilatti (1999), Pilatti & Orellana (2000) y Pilatti et al, (2003); financiados por proyectos CA+ID 2009 (UNL) 12/C114; SECTEI- Ley23877-09-04

<sup>2</sup> Ing. Agrónomo, MSc. Profesor de Edafología en la FCA, UNL.

<sup>3</sup> Études Supérieures Agronomiques. Profesor Honorario de la UNL.

## SUELOS IDEALES PARA AGRICULTURA SOSTENIBLE

### INTRODUCCIÓN

*“THE IDEAL ARABLE SOIL: The farmer makes his arable soil from a natural soil or old arable soil. He develops and maintains a deep rooting zone, easily penetrated by air, water, and roots. It holds water between rains but allows excess to pass through it. It has a balanced supply of nutrients. It neither washes away during rains nor blows away with high winds. The combination of practices to use depends on what is necessary to develop and maintain a soil as nearly as possible to the ideal on a sustained long-time basis. They vary widely among the many kinds of soil.*

*Successful farmers choose the practices for their fields according to two primary considerations: What practices do I need to come near the ideal? How the costs and returns will fit into my farm budget?” Charles E. Kellogg (1957)<sup>4</sup>*

En los últimos 20 años se han acuñado una serie de expresiones como suelo ideal (SI), Calidad del suelo (CS), Uso múltiple de la tierra (UMT) y Agricultura sostenible (AS) entre otros. Reconocemos entre ellas una relación jerárquica que va desde los términos conceptualmente más amplios hasta los más acotados. Se propone la secuencia escalonada UMT - AS- CS y SI, donde el detalle y la especificidad aumenta en el mismo sentido jerárquico propuesto.

EL UMT advierte que la tierra no es sólo para producir sino que es la base de apoyo para múltiples funciones tales como: (1) Producción. (2) Ambiente biótico. (3) Regulación climática. (4) Hidrológica. (5) Almacenamiento. (6) Control de residuos y contaminación. (7) Espacio vital. (8) Archivo o patrimonial y (9) Espacio conectivo (FAO, 1995). En el futuro es probable que esta lista se amplíe, aunque ya contiene varias de las que actualmente se denominan bienes y servicios ecosistémicos.

La AS ya es un caso más concreto, porque su nombre revela el interés por una de las funciones de la tierra, la de producir biomasa vegetal y animal, sólo que en forma sostenida; incorporando exigencias económicas y sociales (no tan explícitas en UMT), llamando la atención también por la preservación de las funciones ecosistémicas. Aquí adoptamos la siguiente noción de AS:

*"Un sistema integrado de prácticas de producción vegetal y animal, aplicable a un sitio determinado, y que en el largo plazo debe: satisfacer las necesidades humanas de alimentos y fibras; realzar la calidad del ambiente y del recurso natural básico; tornar eficiente el uso de los recursos no renovables; utilizar cuidadosamente los ciclos biológicos naturales; mejorar la viabilidad económica de los agrosistemas y la calidad de vida de los productores y de la sociedad toda" (U. S. Congress, 1990).*

Asimismo las distintas definiciones de CS (Karlen et al., 1997, Lal, 1997; Carter et al., 1997) hacen referencia a: 1) Características inherentes del suelo; 2) Aptitud para soportar el crecimiento de las plantas; 3) Sostenimiento de la base de los recursos y mejora de las plantas; 4) Utilidad del suelo para funciones específicas en una escala amplia de tiempo. Siguiendo al Soil Quality Institute de USDA, definimos *Calidad del suelo* como “Cuán bien hace un suelo aquello que se quiere que haga”. El “cuán” es valorado mediante la medición de atributos e indicadores; “aquello que se quiere que haga el suelo” implica establecer

<sup>4</sup> LA TIERRA CULTIVABLE IDEAL: los agricultores tornan cultivables suelos que estaban bajo cultivo o en condiciones naturales. Para ello hacen que tengan una zona enraizable profunda, que sean fácilmente penetrable por raíces, agua y aire. Además de retener el agua de lluvia, permite que drene el excedente y posea un balance adecuado de nutrimentos. El suelo ideal no pierde sus constituyentes por erosión hídrica o eólica. Así, la combinación de prácticas que se debe utilizar depende de "lo que es necesario", en cada caso, para mantener el suelo en una condición lo más próxima posible al suelo ideal a través del tiempo. Estas prácticas varían ampliamente entre suelos. Los agricultores exitosos eligen las prácticas que realizan en base a dos consideraciones básicas: -¿qué prácticas necesitan efectuar para mantener el suelo próximo al ideal? -¿cómo los costos y ganancias se ajustan al presupuesto de la empresa? Charles E. Kellogg, 1957.

prioridades en las funciones edáficas. En síntesis; la *CS* hace referencia a la capacidad o aptitud de un suelo para cumplir con una o varias funciones (Acton & Gregorich, 1991; Larson & Pierce, 1991; Parr et al, 1992).

Definir la *CS* implica vincular al suelo con algún objetivo predeterminado: Por ejemplo: Un suelo afectado por salinidad: ¿Es de buena o de mala calidad? La respuesta correcta sería “depende de para qué”. Si el objetivo del productor fuera la producción cerealera, la respuesta será: “se trata de un suelo de mala calidad por el exceso de sales”. Por el contrario, si lo que se pretende es proteger los distintos ecosistemas, estos suelos serán de buena calidad para un biotopo integrado por plantas halófitas. La escala de valores puede variar. Es este segundo enfoque el que valora la calidad ambiental de un determinado paisaje salino. En cambio si el suelo posee alta concentración de elementos contaminantes será de mala calidad, pues supone riesgos para la salud, para el medio y para la agricultura. Es en este caso donde se impone la intervención remediadora, no necesaria en el caso de los suelos salinos. Por lo tanto hacer referencia a *CS* es ambiguo en tanto no se especifique la calidad con respecto a qué objetivos y funciones, y los criterios para asignarle mayor o menor aptitud.

Por último el *SI* es un aspecto de la *AS* en el que sólo interesa la producción sostenida de los cultivos en el tiempo.

La idea de un *Suelo Ideal* subyace desde antaño en la mente de científicos, técnicos y productores entre ellos recordamos a los ingenieros agrónomos Antonio Piñeiro y Carlos Miaczynski y al Sr. Telmo Trossero<sup>5</sup>. Papadakis (1954), Donahue et al., (1981), Molina (1986), Sys et al. (1991), Cobertera (1993), Shaxson (1994) y Narro (1994) tuvieron expresiones similares, aunque sin terminar de plasmar el concepto, ni desarrollarlo metodológicamente.

Definir el *SI* es útil en lo conceptual, al especificar las funciones que debe cumplir un suelo para ser considerado ideal y los atributos que deben evaluarse para calificarlo como tal. Pero también es valioso metodológicamente, ya que al identificar dichos atributos, la forma de cuantificarlos y sus límites críticos, se establecen niveles de referencia que permiten diagnosticar, orientar los tratamientos para el manejo del suelo y su evolución temporal para evaluar las sostenibilidad de tales prácticas.

Si estudiamos un suelo con fines agronómicos, evaluando sus atributos (Observación, Medición) para saber si reúne las propiedades ideales, o es factible aproximarse a ellas, cabe emitir un Diagnóstico para luego recomendar un Tratamiento.

Obviamente, antes de realizar el estudio hay que determinar cuáles serán los atributos que se evaluarán. Es lo que aquí propondremos, con énfasis en suelos del Norte de la Región Pampeana Santafesina. (*RPNS*)

Se realiza un *diagnóstico* cuando:

a) Se identifica la presencia y magnitud de un **problema**: establecer si hay diferencia entre lo que se pretende y lo que se tiene; en este caso los atributos del *SI* con los del suelo que se está estudiando.

b) Así quedan identificados y jerarquizados los **factores limitantes**, que alejan a ese suelo del ideal.

Debe distinguirse el “*Diagnóstico de la capacidad productiva de un suelo*” del “*Diagnóstico de la sostenibilidad del manejo*” que de él se hace.

(a) *Diagnóstico productivo*: ¿Permiten, los atributos del suelo estudiado, alcanzar los niveles productivos deseados? Aquí el “patrón” o referencia son las condiciones que requiere el *SI* para producir.

(b) *Diagnóstico de la sostenibilidad* es la identificación de la pérdida o merma de la capacidad del suelo para producir través del tiempo y de los atributos afectados. En este caso la referencia para determinar si hay deterioro, mantenimiento o mejoramiento, son los atributos del suelo natural o el nivel que tenía anteriormente el suelo estudiado.

Los objetivos de este trabajo son:

(1) Definir las funciones que debe cumplir un *SI* y los atributos que caracterizan a cada una.

(2) Proponer técnicas de medición y límites críticos para cada atributo.

<sup>5</sup> Productor de Godeken (Prov. de Santa Fe) de avanzadas ideas y acciones conservacionistas desde la década de los 70’.

(3) Evaluar cuáles son limitantes ya en condiciones naturales de Argiudoles en la región pampeana norte santafesina (RPNS).

(4) Identificar cuáles son más sensibles para identificar cambios debido al manejo del suelo.

### MATERIALES Y MÉTODO

Hay dos etapas: en la primera se define el *SI*, se indican las funciones que requiere para considerarse como tal, sus atributos, técnicas de medición y límites críticos, todos a partir de un análisis bibliográfico y del desarrollo conceptual presentado por Pilatti (1990 c); Norero y Pilatti, 2002 ) en su modelo edafológico en el que relaciona las interrelaciones ente suelo y cultivo.

En la segunda se miden la mayoría de esos atributos en diversos Argiudoles santafesinos como se detalla a continuación.

*Suelos*: Argiudoles de la RPNS correspondientes a 3 zonas, ubicadas al *NE*, *Centro* y *Centro-Oeste* de Santa Fe: Reconquista (*Rec*), Hipatia (*Hip*) y San Jorge (*SJo*), respectivamente. El cuadro 1 detalla sus rasgos principales en estado natural. Todos tienen horizontes A franco limosos (18 a 26 % de arcilla, 60 a 70 % de limo, 5 a 12 % de arenas), cuyo estado físico varía de *fuertemente estructurado, granular fino a medio* (en suelos naturales o muy bien manejados) a *masivo o débilmente estructurado en agregados granulares gruesos o bloques subangulares medios a gruesos*, en los degradados (Orellana et al., 1997).

**Cuadro 1. Suelos estudiados en Santa Fe (Argentina) para evaluar cambios según el manejo y la noción de “suelo ideal”.** *Nat*, *LConv*, *SD* y *R* hacen referencia a suelo natural, con labranza convencional, siembra directa y rotación agrícola ganadera en siembra directa.

Localidad	Arcilla % Horiz		Subgrupo de suelo	Espesor enraizable (cm)	Uso del suelo en los últimos 20 años
	A	B			
Reconquista (*) Perfil: A, Bt, BC, C 0 17 85 102	18	39	Argiudol acuértico, Serie Reconquista	37	<i>Nat</i> : parque, con dominio de gramíneas cortadas periódicamente. El material cortado no se retira ni se pastorea. <i>LConv</i> : 12 años algodón y 8 con dominio de trigo y soja. <i>SD</i> : Ídem anterior pero últimos 2,5 años con <i>SD</i> . Aplicación de superfosfato triple de <i>Ca</i> y urea.
Hipatia (*) Perfil: A, AB, Bt, BC, C 0 17 25 55 75	26	44	Argiudol típico, Serie Rincón de Ávila	38	<i>Nat</i> : bosquecillo implantado, domina paraíso y gramíneas. <i>LConv</i> : 14 años lino / girasol y maíz, luego trigo / soja. <i>R</i> : Rotación, 3 ciclos: 3,5 años de pastura base alfalfa + 2,5 años cultivos anuales, principalmente maíz. Aplicación de superfosfato triple de <i>Ca</i> y urea. <i>SD</i> : Ídem <i>R</i> , pero últimos 6 años <i>SD</i> exclusivamente. Aplicación de superfosfato triple de <i>Ca</i> y urea.
San Jorge (*) Perfil: Ap, A, Bt, BC, C 0 20 27 60 80	26	38	Argiudol típico, Serie Los Cardos	36	<i>Nat</i> : Ídem Hipatia. <i>LConv</i> : Agricultura continua > 20 años, predominio de trigo/soja <i>SD</i> : Ídem <i>LConv</i> , pero últimos 6 años <i>SD</i> .

(\*) Perfil: Horizontes y profundidad del límite (cm)

En cada zona se seleccionaron lotes representativos de cada área productiva y con intensidades de uso contrastantes:

(*Nat*) Naturales, no cultivados;

(*LConv*) Labranza convencional: más de 20 años de agricultura continua, con arado de rejas y vertedera;

(*R*) rotación agricultura / pradera artificial base alfalfa;

(*SD*) cultivados en siembra directa.

En lotes de 10 a 20 ha se tomaron muestras al azar a 3 profundidades, a fines de primavera de 1994.

De 0 a 5 cm en *Nat* y *SD*, para tener en cuenta el efecto de la acumulación orgánica superficial.

De 5 a 15 cm, para detectar modificaciones subsuperficiales sólo en *SD* y *R*

De 15 a 30 cm, con el mismo propósito, en todos los casos.

En cada lote, las muestras para análisis químico se compusieron de 30 submuestras al azar, y para las determinaciones físicas, de 15 muestras sin perturbar, según Pilatti & Orellana (1994).

Las técnicas analíticas usadas en el procesamiento de las muestras se detallan en el cuadro 2.

La infiltración del sello consiste en colocar, en un simulador de lluvia, una cama de agregados de 2 cm de espesor; aplicándole una precipitación de  $8 \text{ cm h}^{-1}$ . Debido al tamaño de los agregados (entre 2 y 4 mm) la trama porosa es gruesa y permite, durante algún tiempo, el paso de **toda** la lluvia caída; por eso, en la figura 1, al principio la tasa de infiltración permanece constante e igual a los  $8 \text{ cm h}^{-1}$ . Entretanto, los agregados son destruidos por estallido y por los golpes de las gotas. Las partículas desagregadas obturan gradualmente la trama porosa y forman un *sello superficial*; la tasa de infiltración disminuye y cuando es menor que  $8 \text{ cm h}^{-1}$  la curva de infiltración toma la forma exponencial decreciente típica. Las mediciones registran:

- (1) Minutos transcurridos hasta que se observa acumulación de agua en superficie (encharcamiento).
- (2) Minutos transcurridos hasta que comienza a escurrir.
- (3) La tasa de infiltración a los 20 minutos y
- (4) la lámina infiltrada en una hora.

Llamamos (*IHO*) al tramo del contenido hídrico del suelo dentro del cual: (1) el agua es fácilmente utilizable por el cultivo, (2) la masa sólida del suelo aún es horadable por las raíces, y (3) la aireación no es limitante para la respiración radical. Integra así tres variables: *Porosidad de aireación*, *Agua fácilmente utilizable* y *Resistencia mecánica a la penetración radical*, de modo que durante dicho intervalo las raíces no hallan mayores dificultades para ocupar volúmenes crecientes de suelo ni para absorber agua y disponer de oxígeno suficiente (Pilatti & Orellana, 1993).

Nada dice el *IHO* sobre la capacidad de la estructura edáfica para conducir fluidos (conductividad hidráulica) y para perdurar (estabilidad); por esto es que además del *IHO* se midieron complementariamente esas dos propiedades.

La técnica elegida para evaluar estabilidad de los agregados es la propuesta por Hénin et al. (1960) y simplificada por Monnier et al. (1972), debido a tres particularidades:

- (a) se basa en el fenómeno de estallido, lo cual le confiere mayor sensibilidad que otras -como las de goteo- que son destructivas; cuando los agregados resisten al estallido indican mucha cohesión y vías, macroporos interconectados, por donde el aire puede escapar.
- (b) el pretratamiento con alcohol inhibe el estallido y así evalúa la cohesión de los agregados, lo que permite detectar una de las posibles causas de baja estabilidad: Débil cohesión. A partir de allí se puede indagar sobre los factores que la inhiben o la acentúan.
- (c) la abertura de la malla del tamiz usado en esta técnica es de  $200 \mu\text{m}$ , reteniendo agregados capaces de generar poros, entre agregados, de  $60$  a  $70 \mu\text{m}$  diámetro y mayores. Estos poros son los que garantizan el flujo no capilar interno del suelo, su aireación y la exploración radical. Ese tamaño de agregados y mayores (hasta 2 mm) son los estabilizados por hifas y raíces, cuya existencia está vinculada al manejo del suelo (Primavesi, 1980; Tisdall y Oades, 1982; Pilatti et al., 1987).

Cuando un agregado se moja, puede romperse por estallido, por hinchamiento y dispersión, por dilatación diferencial y por golpeteo: Con esta técnica no se mide el efecto del golpeteo, pero sí -con el pretratamiento en alcohol- la dilatación diferencial, hinchamiento y dispersión; y con agua el efecto del estallido (diferencia entre lo obtenido con alcohol y lo que queda tras el tratamiento con agua). De otro modo: El % de agregados que se rompe por dilatación diferencial, hinchamiento y dispersión es 100- *Eol*. La contribución del estallido sólo es *Eol-Ea*.

**Cuadro 2: Técnicas de análisis físicos y químicos usados para analizar los suelos.**

Determinaciones	Símbolos	Procedimiento utilizado	Fuente bibliográfica
Profundidad enraizable		Por cálculo	Pilatti & Grenón (1995)
Estabilidad de agregados	<i>Ea</i>	Tamizado en agua, por triplicado Pretratamiento con alcohol	Hénin et al. 1960 simplificado.
Índice de estabilidad relativa	<i>Er</i>	Relación suelo estudiado vs. suelo natural	Orellana & Pilatti (1993, 1994)
Infiltración a través del sello	<i>Isello</i>	Descrito en el texto	Nacci & Pla Sentis, 1989
Densidad del horizonte	$\delta$	Cilindro 100 cm <sup>3</sup> , 15 repetit.	Forthsyte, 1975
Densidad de partícula	$\delta_p$	Por cálculo en f(MO)	Pilatti et al., 2006
Agua saturación	$\theta_s$	Por cálculo : $\theta_s = 1 - (\delta_s/\delta_p)$	
Punto de marchitez permanente	<i>PMP</i>	f (contenido de arcilla)	Pilatti, 1989
Agua retenida a -6 kPa	$\theta_6$	Mesa de succión	Bezerra de Oliveira, 1968
Macroporosidad	<i>MPo</i>	Por cálculo ( $\delta$ y $\theta_6$ )	
Cont. hídrico aireación no es limitante	$\theta_a$	Por cálculo $\theta_a = \theta_s - 0,15$	
Límite de agua fácilmente disponible	$\theta_{Fu}$ <i>1700kPa</i>	Por cálculo f(cultivo, suelo y demanda atmosférica)	Norero, 1980 Pilatti et al., 2012
Curva retención hídrica	$\theta(\psi)$	Por ajuste en f ( $\theta_6$ y PMP) $\theta = a \psi^b$	
Resistencia mecánica a la penetración	$\theta_{RP}(\theta)$	Penetrómetro punta cónica 1mm diámetro y 30 ° semiángulo. 15 cilindros.	Orellana et al., 1996
Intervalo hídrico óptimo	<i>IHO</i>	Por cálculo $IHO = \text{Mín}(\theta_{CC}; \theta_a) - \text{Máx}(\theta_{RP}; \theta_{Fu})$	Orellana et al., 1997
Carbono orgánico total	<i>C org</i>	Combustión húmeda Walkley-Black . (Factor de recuperación 0,77)	Jackson, 1982
N total y activo	<i>Nt</i> <i>Nac</i>	Kjeldahl Tamizado en seco	Jackson, 1982 Imhoff et al., 1996
pH (relación 1:2,5 )	<i>pH</i>	Potenciometría	
Fósforo extraíble	<i>P</i>		Bray & Kurtz N° 1 (1945)
Potasio intercambiable	<i>K</i>	Extrac. con acetato de amonio 1N, pH 7	Jackson, 1982

**Análisis estadístico de los datos:** En todos los casos se evaluó la normalidad de la distribución de los datos usando los test: chi-cuadrado de bondad de ajuste, W de Shapiro-Wilks y Z para curtosis y asimetría. Para normalizar el *IHO* se usó  $[\pi/2 \arcsen(IHO)^{0,5}]$ .

Posteriormente se identificaron datos atípicos o extraños usando el test de Grubbs y el de Dixon: ambos asumen normalidad. Cuando hubo datos atípicos se los reemplazó por el valor medio.

Por último se realizó el análisis de varianza y comparación de medias con el test de Tuckey ( $\alpha=5\%$ ).

Cuando para comparar el estado del horizonte superficial se dispone sólo del valor medido sobre una muestra compuesta por 30 submuestras. Se usa la distribución “t” para una probabilidad de 95%, asumiéndose valores típicos del coeficiente de variación (CV) para cada propiedad (Cuadro 3). Se consideran diferencias significativas cuando las diferencias entre los valores de cada muestra compuesta respecto del error típico de la diferencia de medias, supera el valor tabulado para la “t” (Loma, 1980).

**Cuadro 3:** Coeficientes de variación (%) de propiedades edáficas según distintas fuentes de información.

Propiedad Fuente	pH	P	MO	Nt	Ki
Internacional(*)	2 a 15	39 a 157	16 a 41		51 a 53
Local (**)	4 a 8	7 a 65	3 a 30	15 a 25	4 a 43
Adoptado en este trabajo	8	65	30	25	43

(\*)(Imhoff *et al.*, 2000); (Mulla & McBratney, 2000) (\*\*) Todos son Molisoles, algunos muestreos a nivel de grilla en lotes, otros varios lotes a nivel regional, (Rondini & Doval, 1975); (Barberis *et al.*, 1976); (Conti *et al.*, 1978); (Piñeiro *et al.*, 1982); (Vázquez, 1983); (Orellana *et al.*, 1988); (Imhoff & Pilatti, 1995); (Pilatti *et al.*, 2004); (Flores, 2009); (Carrizo *et al.*, 2011), (Alesso *et al.*, 2012).

**Interpretación:** Un atributo será considerado idóneo como indicador de sostenibilidad cuando sea sensible para detectar diferencias entre el límite crítico del *SI* y los valores obtenidos en los casos estudiados. Para ello se evaluarán cambios, en las variables, realizando las siguientes comparaciones:

- Entre los distintos suelos, en su estado Natural (*Nat*), con respecto a los requisitos del *SI*.
- Entre el *SI* y los valores en lotes con intensidades de uso contrastantes.

Se admite que, si debido al uso del suelo, los valores de las propiedades críticas medidas se alejan con respecto al estado natural, ello indica un deterioro. Por el contrario, si se mantienen o acercan indican inocuidad de las prácticas de manejo o recuperación del suelo en cuestión.

Además, la comparación de los valores obtenidos, con respecto a los requeridos por el *SI*, informa sobre la factibilidad de su uso sostenible.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### *Concepto de Suelo Ideal (SI)*

Llamamos *Suelo Ideal* al que, “*además de sostener físicamente a los cultivos, les permite crecer, desarrollarse y cumplir normalmente todas las funciones vitales indispensables para llevar al máximo los niveles de producción a través del tiempo*”. Esto conlleva el desafío de mantener –a la vez– un agroecosistema *productivo y sostenible*.

De cumplirse las exigencias del *SI*, los rendimientos dependerán del clima, del potencial genético de los cultivos y de las prácticas agrícolas, ya que el suelo no será nunca restrictivo.

Para simplificar, en nuestro caso, referimos el concepto de *SI* a las necesidades de los cultivos agrícolas más usuales en la Región Pampeana Norte Santafesina (*RPNS*): maíz, soja, trigo, sorgo, alfalfa, etc.

### **Exigencias de los cultivos para con el suelo. Funciones del Suelo Ideal**

El Cuadro 4 presenta las cuatro funciones básicas que el suelo debe cumplir para con los cultivos y describe (columna 2) los requisitos que específicamente debe llenar para ser considerado ideal. La 3ª columna enumera *atributos* medibles para detectar en qué grado un suelo se acerca o aleja de la noción de *Suelo Ideal*, según las técnicas utilizadas para medirlos (columna 4)

- El suelo actúa como INTERMEDIARIO entre la oferta meteorológica y la demanda de los cultivos, en especial en lo concerniente al aporte de agua, oxígeno y radiación (temperatura). Aquí se pretende que el suelo no entorpezca un suministro hídrico normal y que amortigüe, si ocurren, los efectos de excesos y deficiencias (Orellana, 1988).
- Debe ser PROVEEDOR de nutrimentos orgánicos y minerales en cantidad y oportunidad acorde con las exigencias del cultivo durante las diversas etapas de su ciclo vital.

- Además debe constituir un **HÁBITAT** adecuado para las raíces y los organismos benéficos de la biota edáfica, compatible con los límites de tolerancia ambiental de cada cultivo.
- Debe ser **ESTABLE** respecto de las propiedades necesarias para cumplir con las anteriores funciones. Este carácter se refiere a la integridad y permanencia del suelo, sin pérdida de material por erosión ni desgaste por el uso. Parr et al. (1992) denominan **INTEGRIDAD** a esta función.

Dentro de la función de **ESTABILIDAD** cabe diferenciar dos servicios distintos:

**a) Resistir, oponerse al deterioro que pueden provocar elementos exógenos, como:**

- 1) **Precipitaciones**, que pueden originar erosión, sellado superficial y/o lavado de nutrientes.
- 2) **Viento**, con sus efectos negativos: la erosión eólica y el "vuelco" de los cultivos.
- 3) **Agroquímicos**, cuando **acidifican, alcalinizan, salinizan o contaminan**, alterando o impidiendo la actividad biológica.
- 4) Acciones mecánicas ejercidas por la maquinaria agrícola, como **amasado, compactación, formación de microrrelieve, pulverización de la estructura, reducción de la biodiversidad**.

**b) Automejoramiento de propiedades perdidas o disminuidas**, denominado **resiliencia** por Rodríguez (1996) y otros autores, a través de mecanismos como: **agregación, mullimiento, bioporosidad, agrietamiento, capacidad amortiguadora o tampón, reciclado de plaguicidas, retención de nutrientes, migración ascendente, biodiversidad**.

En los Cuadros 5 a 9 se presentan los valores de los atributos físicos y químicos medidos en esta experiencia.

**(1) Comparación entre los suelos en estado natural, y respecto del SI** (Nat vs. límites críticos del SI)

Aunque los tres suelos estudiados son Argiudoles, muestran algunas diferencias entre ellos debido a la influencia de los factores formadores:

- a) El material de origen (loess) es más fino en *Rec* y en *Hip* que en *SJo*.
- b) El relieve en general es subnormal.
- c) El clima local y el régimen meteorológico, con precipitaciones que aumentan de 80 cm/año en *SJo* a 100 cm/año en *Rec*, pero con una distribución más regular en *SJo*, y más intensa en *Rec*, donde generan excedentes hídricos y mayor eluviación de arcilla; esto hace que en *Rec* haya más proporción de limo en el horizonte *A* y más arcilla en el *Bt* que en *SJo*. Por eso en *Rec* no hay horizonte *AB* de transición y el límite entre *A* y *Bt* es abrupto. Su drenaje interno está algo impedido (Régimen ácuico); *SJo* tiene horizonte *AB*, menos arcilla en el *Bt* que *Rec* y buen drenaje (Régimen údico). *Hip* tiene propiedades y composición intermedias.
- d) El C Org en el horizonte *A* de Argiudoles naturales es de 1,8 % en *Rec* y asciende hasta 2,4% en *SJo*; incrementando desde el norte hacia el sur.
- e) El K intercambiable es elevado, siempre superior a 1 cmolc/kg en todos los horizontes; por lo que en general no hay limitaciones por deficiencia de K.
- f) La dotación de P en los primeros 5 cm es alta, indicando enriquecimiento superficial de origen biológico. Más abajo los contenidos son menores y muy diversos; los suelos ubicados en el norte de la Región están debajo del límite crítico y -como en *Rec*- presentan tenores no compatibles con altos rendimientos, requiriendo su corrección. En otros suelos (caso de *SJo*) la dotación es alta, necesitando - si se usan con fines agrícolas - prácticas de mantenimiento de la fertilidad si el P baja hasta el límite crítico. Esas diferencias de riqueza natural en P fueron atribuidas a apatita en el material de origen, derivado de las sierras pampeanas (Pocoví, 1947) y decrecería de SO a NE. Al N y E del río Salado ejerció influencia el material aportado por el río Paraná, proveniente del Brasil y pobre en P.

**Cuadro 4 : Funciones y características del Suelo Ideal; mediciones para su contralor y límites críticos.**

Función general	Servicios del suelo ideal	Mediciones sugeridas	Límites críticos propuestos	Técnicas utilizadas en este trabajo
<b>INTERMEDIARIO</b>	<p>a) Ofrece un adecuado espesor útil</p> <p>b) Mantiene condiciones térmicas propicias</p> <p>c) Posee una aeración suficiente</p> <p>d) Amortigua la intermitencia e irregularidad del agua útil para los cultivos</p>	<p>1) Profundidad enraizable</p> <p>2) Densidad del suelo</p> <p>3) Resistencia mecánica a la penetración</p> <p>4) Intervalo hídrico óptimo</p> <p>5) Act. biológica total y de biodegradación</p> <p>6) Macroporos, especialmente bioporos</p> <p>7) Porosidad textural y estructural</p> <p>8) Meso y macrofauna</p> <p>9) Sello superficial</p> <p>10) Intervalo hídrico óptimo</p> <p>11) Tasa de infiltración</p> <p>12) Perfil cultural y exploración de las raíces</p> <p>13) Cobertura vegetal (viva y muerta)</p> <p>14) Capacidad de almacenamiento de agua</p> <p>15) Lámina de agua fácilmente utilizable</p>	<p>60 a 150 cm. Variable según cultivo.</p> <p>1350 a 1420 kg m<sup>-3</sup> según contenido Arcilla</p> <p>2 a 8 MPa</p> <p>0,11 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup></p> <p>Sin definir</p> <p>0,15 cm<sup>3</sup> / cm<sup>3</sup> porosidad de aireación</p> <p>Sin definir</p> <p>Sin definir</p> <p>2 cm/h post 20<sup>min</sup>, encharcamiento post 10<sup>min</sup></p> <p>0,11cm<sup>3</sup> / cm<sup>3</sup></p> <p>2 cm/h</p> <p>-----</p> <p>&gt; 40%</p> <p>&gt; 125mm en prof. enraizable.</p> <p>Varía seg. cultivo y demanda atmosférica.</p>	<p>Pilatti &amp; Grenón, 1995.</p> <p>Con cilindros, Forsythe, 1975</p> <p>Orellana, Grenón &amp; Quaino, 1996.</p> <p>Orellana, Pilatti &amp; Grenón, 1997.</p> <p>Biomasa microb. (Chausson , Nicolardot,1982, Jenkinson, Powlson, 1976) Respiración global</p> <p>Mesa de succión (Bezerra de Oliveira, 1968)</p> <p>Stengel, 1979.</p> <p>Recuento en microscopio y con lupa.</p> <p>Pla Sentis, 1977, 1996.</p> <p>Orellana, Pilatti &amp; Grenón, 1997.</p> <p>Doble anillo, Forsythe, 1975. Tensiofiltrómetro</p> <p>Tardieu, 1984, Manichon, 1987</p> <p>Intersección en cuadrículas</p> <p>En campo o curva de retención hídrica</p> <p>Norero, 1980</p>
<b>PROVEEDOR</b>	<p>e) Suministra nutrientes a las plantas y demás organismos edáficos</p>	<p>16) N activo o potencialmente mineralizable</p> <p>17) Disponibilidad de P, K, Ca, etc.</p> <p>18) Tasa de mineralización del N</p>	<p>350 ppm en 30cm</p> <p>Según cultivo y rendimiento</p>	<p>N<sub>t</sub>-N agregados&gt;0,1mm, Andriulo et al. 1991</p> <p>Bray &amp; Kurtz, 1945, K interc., Ca interc.</p> <p>Stanford &amp; Smith, 1972.</p>
<b>HÁBITAT</b>	<p>Idem a), b), c), d)</p> <p>f) Carece de sustancias tóxicas o nocivas</p> <p>g) Permite la fijación activa de N</p> <p>h) Favorece eliminación de toxinas radicales</p> <p>i) Carece de movilidad</p>	<p>19) Costra superficial y emergencia</p> <p>20) Reacción del suelo (pH)</p> <p>21) compl.. intercambio, en especial PSI</p> <p>22) Carbono orgánico</p> <p>23) Al y Mn solubles</p> <p>24) Salinidad</p> <p>25) Tasa de fijación simbiótica y asimbiótica</p> <p>26) Capacidad de intercambio catiónico</p> <p>27) Macroporosidad</p> <p>28) Coeficiente de extensibilidad lineal</p>	<p>2 MPa</p> <p>6,3 a 7,3</p> <p>15-20 cmolc/kg; PSI&lt;10 %, varía s/cultivo</p> <p>1,9 %</p> <p>2 ppm y 0,5 ppm</p> <p>2 dS/m , variable según cultivo</p> <p>No definido</p> <p>Sin definir</p> <p>15 %</p> <p>2</p>	<p>Orellana, Grenón, Quaino, 1996.</p> <p>Potenciometría, relación Suelo/agua = 1/2,5.</p> <p>Con Ac. NH<sub>4</sub> pH 7 (MAG, 1982)</p> <p>Walkley-Black (Jackson, 1982)</p> <p>Aún no determinados</p> <p>Richards, 1954</p> <p>Con Ac. NH<sub>4</sub> pH 7, MAG, 1982</p> <p>Mesa succión (Bezerra de Oliveira, 1968)</p> <p>Franzmeier &amp; Ross, 1968.</p>
<b>ESTABLE</b>	<p>j) Es resistente a la degradación física</p>	<p>29) Estabilidad de agregados (Ea;Er)</p> <p>30) Ecurrimiento superficial</p> <p>31) Ecuación universal (USLE)</p>	<p>Er &gt; 0,54</p> <p>Sin definir</p>	<p>Orellana &amp; Pilatti (1993, 1994).</p> <p>Relación cubierta vegetal / pendiente</p> <p>Wischemeier &amp; Smith, 1978</p>

El espesor enraizable (Pilatti & Grenón, 1995) de estos suelos se acerca a los 40 cm (Cuadro 2), lo cual es apropiado para muchos cultivos, pero escaso para obtener altos rendimientos cuando el *límite crítico* exigido por el cultivo es 60 cm o más. Tal limitación coincide con el límite abrupto del techo del *Bt* y su importancia regional motivó ensayos para superarla por medios mecánicos sin éxito (Pilatti & Antille, 1985), biológicos (Pilatti et al., 1987; 1988) con éxito parcial y químicos (Orellana, 1989; Orellana & Pilatti, 1990) con resultados promisorios pero inconclusos.

En general, se destaca que  $\delta$ , *MPO*, *IHO* e *Isello* presentan valores muy aceptables con respecto al límite crítico (Cuadro 5).

**Cuadro 5. Datos físicos de suelos sin cultivar y con intensidades de uso contrastantes en el centro (Hipatia: Hip), centro sur (San Jorge: SJo) y noreste (Reconquista: Rec.) de Santa Fe.** Letras distintas indican diferencias significativas a nivel del 5%. Se comparan sólo pares de valores: (1) Límite crítico vs. Natural: letras minúsculas. (2) Natural vs. Distintos manejos: letra mayúscula. (3) Labranza convencional vs. Siembra directa o Rotación: letra cursiva. En Estabilidad de agregados (*Ea*) se compara ente manejos. *MPO* = macroporosidad; *IHO* = Intervalo Hídrico Óptimo; *Er* =Estabilidad relativa (de agregados) en agua.

Variables	Sitio	Natural			L. Conv.		Siembra Directa			Rotación		Límite Crítico	
		0-5	5-15	15-30	0-15	15-30	0-5	5-15	15-30	0-15	15-30		
<i>Densidad suelo</i> (kg m <sup>-3</sup> )	<i>Rec</i>	1140 b A	1260 a A	1380 a A	1390 B a	1360 A a	1300 B	1360 B a	1350 A a			1350 a	
	<i>Hip</i>	1020 b A	1210 b A	1280 a A	1070 B a	1460 B a	1100 A	1260 A a	1320 A b	1310 B b	1360 B b		
	<i>SJo</i>	1010 b A	1250 a A	1320 a A	1190 B a	1350 A a	1250 B	1290 A b	1270 A a				
<i>MPO</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	<i>Rec</i>	0,14 a A	0,12 b A	0,10 b A	0,11 A a	0,12 A a	0,12 A	0,10 A a	0,12 A a			0,15 a	
	<i>Hip</i>	0,14 a A	0,10 b A	0,10 b A	0,15 B a	0,08 A a	0,15 A	0,11 A b	0,09 A a	0,10 A b	0,09 A a		
	<i>SJo</i>	0,19 a A	0,12 a A	0,11 b A	0,13 A a	0,07 B a	0,12 B	0,11 B a	0,11 A b				
<i>IHO</i> (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	<i>Rec</i>	0,19 b A	0,11 a A	0,11 a A	0,16 B a	0,10 A a	0,19 A	0,12 A b	0,12 A a			0,11 a	
	<i>Hip</i>	0,19 b A	0,14 a A	0,11 a A	0,08 B a	0,03 B a	0,16 B	0,11 B b	0,09 A b	0,09 B a	0,09 A b		
	<i>SJo</i>	0,16 b A	0,16 b A	0,10 a A	0,15 A a	0,07 B a	0,13 B	0,08 B b	0,09 A a				
<i>Ea</i> (%)	<i>Rec</i>	32 C			6 A		10 B					Varía en c/ suelo	
	<i>Hip</i>	53 C			9 A		42 C			17 B			
	<i>SJo</i>	52 C			8 A		12 B						
<i>Er</i> (%)	<i>Rec</i>	100 A			19 B a		31 B b					> 52	
	<i>Hip</i>	100 A			17 B		79 A b			32 B b			
	<i>SJo</i>	100 A			15 B a		23 B b						

**Densidad del suelo ( $\delta$ ) y macroporosidad (*MPO*):** La densidad aumenta con la profundidad sin superar el límite crítico, presentando en superficie valores muy bajos que indican mullimiento superficial (0-5 cm) producto de los niveles de materia orgánica, actividad de raíces y biota edáfica. La *MPO* es inferior al límite crítico después de los primeros centímetros poniendo en evidencia esta problemática en estos suelos aún en su condición natural.

**Estabilidad de agregados (*Ea*):** La estabilidad de agregados muestra tendencia a aumentar de noreste a sudoeste. La baja estabilidad en *Rec* no condice con su tenor orgánico, aquí debe afectar más el hinchamiento que en *SJo* debido a la presencia de arcillas expansibles (acuértico). Llama la atención el alto valor en *Hip* y

su alta resistencia al estallido. En todos casi la mitad de los agregados (un tercio en SJo) es destruido por el efecto de dilatación diferencial, hinchamiento y dispersión.

**Cuadro 6: Estabilidad de agregados (Ea) con pretratamientos de Argiudoles naturales en el centro (Hipatia: Hip), centro sur (San Jorge: SJo) y noreste (Reconquista: Rec) de Santa Fe.** (Letras distintas significan diferencias significativas al nivel del 5% en las columnas). DD, H y Di =: dilatación diferencial, hinchamiento y dispersión.

Localidad	Ea con alcohol (%)	Ea con agua (%)	Agregados destruidos por DD, H y Di %	Agregados destruidos por estallido %
Rec	54 b	32 b	46	22
Hip	58 b	53 a	42	7
SJo	64 a	52 a	36	12

**Intervalo hídrico óptimo (IHO):** El IHO se muestra sensible para detectar diferencias entre estratos y entre suelos, observándose valores de  $0,1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  hasta  $0,19 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ . Todos los casos superan o son muy cercanos al límite crítico de  $0,11 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , sugiriendo que, en estado natural, estos suelos ofrecen buen estado físico para el establecimiento, exploración y actividad radical, con tendencia a disminuir en profundidad (empeoran las condiciones). En superficie (0-5 cm) los valores son altos.

Si interpretamos en conjunto el IHO con al Ea obtenemos que el mejor es Hip, luego SJo y por último Rec.

**Infiltración del sello (Isello, Cuadro 7 y 8):** Tanto la tasa de infiltración a través del sello a los 20 minutos, como el peligro de encharcamiento en condiciones naturales, están por encima de los límites críticos. Pero si el suelo está descubierto, sin protección del golpe directo de la lluvia, minutos más tarde comienza la destrucción de agregados, mermando paulatinamente la infiltración. Se destaca Rec, donde la lámina infiltrada en 1 hora es de sólo 4,6 cm, poco más de la mitad de lo precipitado (8 cm). Por lo tanto, aún en condiciones naturales, esos suelos son frágiles si quedan sin cubierta vegetal. Esto indica que, para responder a las exigencias del SI, aún en su estado natural, requieren protección superficial para evitar la formación del sello y de la posterior costra.

**Cuadro 7. Infiltración del sello en suelos sin cultivar y con intensidades de uso contrastantes en el centro (Hipatia: Hip), centro sur (San Jorge: SJo) y noreste (Reconquista: Rec) de Santa Fe.**

Tiempo:	Sitio	Natural		Convencional		Siembra directa		Límite crítico
		Protegido	No proteg.	Protegido	No proteg.	Protegido	No proteg.	
Para encharcamiento (min)	Rec	No	No	No	10	No	15	> 10
	Hip	No	No	No	11	No	22	
	SJo	No	No	No	7	No	6	
Para escurrimiento (min)	Rec	No	No	No	37	No	47	> 60
	Hip	No	No	No	24	No	38	
	SJo	No	No	No	20	No	35	
<b>Lámina de agua infiltrada</b>								
Isello a los 20 min ( $\text{cm h}^{-1}$ )	Rec	8	8	5,0	0,8	8,0	1,1	> 2
	Hip	8	8	5,2	0,8	7,9	2,4	
	SJo	8	8	0,8	0,7	7,2	0,6	
		8						
Isello acumulada en 1 hora (cm)	Rec	7,9	4,6	5,2	1,2	7,3	1,4	8
	Hip	7,9	7,6	5,2	1,0	7,3	2,3	
	SJo	8	7,5	6,4	1,3	7,5	1,2	

**Cuadro 8: Importancia relativa de los mecanismos de golpeteo y estallido + hinchamiento + dispersión + dilatación diferencial por agua de lluvia en la disminución de la infiltración de cama de agregados, Argiudoles con intensidades de uso contrastantes en el centro (Hipatia: *Hip*), centro sur (San Jorge: *SJo*) y noreste (Reconquista: *Rec*) de Santa Fe.**

Mecanismo de destrucción de agregados		Natural	Labranza convencional	Siembra directa
% pérdida infiltración				
Todos	<i>Rec</i>	43	85	83
	<i>Hip</i>	5	88	71
	<i>SJo</i>	6	84	85
Estallido y otros	<i>Rec</i>	1	35	9
	<i>Hip</i>	1	35	9
	<i>SJo</i>	0	20	6
Golpeteo	<i>Rec</i>	41	50	74
	<i>Hip</i>	4	53	63
	<i>SJo</i>	6	64	79

Comparando los tres suelos en su estado natural, observamos que *Rec* es más denso en superficie que los otros, lo cual se corresponde con una menor *MPo*, pero también con una muy inferior *Ea* (en agua). Eso concuerda con su bajo tenor de arcilla, que para generar agregación por sí misma debería rondar el 33 %, aproximadamente (Orellana, 1988b) o no menos de 20 % si *C Org.* supera el 1,74 % (Orellana y Pilatti, 1994). En los otros dos suelos se cumple con esos requisitos, ya que la arcilla existente (26 %) es bien complementada por el *C. Org.*

Cabe agregar que los suelos aquí estudiados poseen poca arena (5 %, a lo sumo 10 %) y el resto es limo (60 a 70 %) el cual suele contener alto tenor de fitolitos (Pecorari et al, 1990); esto, agregado a la mineralogía de las arcillas, predominantemente ilítica, justifica los resultados encontrados.

También se confirma la influencia negativa de las labranzas convencionales, representada aquí por *L. Conv.* Aunque no se evidencia con fuerza en el caso del IHO.

### Composición química (Cuadro 9)

**Reacción del suelo (pH):** En todos los casos se observa una clara tendencia a la acidificación, de origen natural, más acentuada en *Rec*. Sólo en *SJo* el *pH* superficial se aproxima al *límite crítico*. En general se aprecia la necesidad de corregir el *pH* para responder a los requisitos del *SI*.

***C orgánico total (C org).*** La acumulación superficial de *C org* es, entre 0 y 5cm, 70 a 90 % mayor que en el espesor subyacente. Orellana & Pilatti (1993; 1994) hallaron coincidencia entre contenidos de *C org*  $\geq 1,8$  % y satisfactoria estabilidad de agregados en horizontes superficiales de los suelos regionales, cuyo tenor en limo (60 a 70 %) es alto y desfavorable para la agregación.

***N total (Nt) y relación N activo vs. N total (Nt/Nac):*** Los suelos *Nat*, contienen de 5,5 a 6,5 Mg/ha de *Nt* en los primeros 30 cm, lo cual representa una buena reserva para las plantas; pero bajo cultivo tradicional durante no menos de 30 años se redujo a casi un 40 % (2,1 a 2,8 Mg/ha). Los manejos conservacionistas, más recientes y con menos tiempo, insinúan una recuperación, todavía insuficiente. En general, los suelos *Nat* guardan una relación *Nac/Nt* próxima al *límite crítico*. Esa relación disminuye bajo cultivo (el consumo de *N* es superior al biodegradado), con tendencia a recuperarse bajo *SD* (mayor reposición de materia orgánica bruta) y en el caso de rotación estudiado.

**Cuadro 9: Datos químicos de Argiudoles naturales y con intensidades de uso contrastantes en el centro (Hipatia: Hip), centro sur (San Jorge: SJo) y noreste (Reconquista: Rec) de Santa Fe.** Letras distintas indican diferencias significativas al nivel del 5%. Se comparan sólo pares de valores: (1) Límite crítico vs. natural: letras minúsculas. (2) Natural vs. distintos manejos: letra mayúscula. (3) Labranza convencional vs. siembra directa o rotación: letra cursiva. Para comparar 0 a 5 y 5 a 15 cm de Nat con 0 a 15 de Lab. Conv. y Rotación; se calculó el valor correspondiente a 0 a 15 cm Nat (datos no mostrados). Ídem para comparar Lab. Conv con SD.

Atributo ↓	USO	Natural			Convencional		Siembra directa			Rotación		Límites críticos
	Prof.	0-5	5-15	15-30	0-15	15-30	0 - 5	5-15	15-30	0-15	15-30	
<i>pH</i> (1:2,5)	Rec	5,7 <b>b A</b>	5,4 <b>b A</b>	5,5 <b>b A</b>	5,6 <b>A a</b>	5,7 <b>A a</b>	5,3 <b>B</b>	5,3 <b>A b</b>	5,4 <b>A b</b>	5,6 <b>A a</b>	5,8 <b>B a</b>	6,3 <b>a</b>
	Hip	5,7 <b>b A</b>	5,8 <b>b A</b>	6,1 <b>a A</b>	5,6 <b>A a</b>	5,8 <b>B a</b>	5,4 <b>B</b>	5,3 <b>B b</b>	5,3 <b>B b</b>			
	SJo	6,3 <b>a A</b>	5,9 <b>b A</b>	5,9 <b>b A</b>	5,7 <b>A a</b>	5,7 <b>A a</b>	5,8 <b>B</b>	5,7 <b>A a</b>	5,8 <b>A a</b>			
<i>C org.</i> (%)	Rec	3,6 <b>b A</b>	1,9 <b>a A</b>	1,3 <b>b A</b>	1,2 <b>B a</b>	0,9 <b>B a</b>	1,7 <b>B</b>	1,1 <b>B a</b>	0,9 <b>B a</b>	1,4 <b>B a</b>	1,2 <b>A b</b>	1,8 <b>a</b>
	Hip	2,5 <b>b A</b>	1,6 <b>b A</b>	1,3 <b>b A</b>	1,3 <b>B a</b>	0,9 <b>B a</b>	2,3 <b>B</b>	1,7 <b>A b</b>	1,0 <b>B a</b>			
	SJo	2,9 <b>b A</b>	1,7 <b>a A</b>	1,2 <b>b A</b>	1,0 <b>B a</b>	0,9 <b>B a</b>	1,9 <b>B</b>	1,3 <b>B b</b>	1,1 <b>A a</b>			
<i>Nt</i> (g.Mg <sup>-1</sup> )	Rec	3070 <b>A</b>	1290 <b>A</b>	1040 <b>A</b>	1160 <b>B a</b>	980 <b>A a</b>	1400 <b>B</b>	1090 <b>B a</b>	940 <b>A a</b>	1440 <b>B a</b>	1290 <b>A b</b>	ND
	Hip	2500 <b>A</b>	1680 <b>A</b>	1330 <b>A</b>	1310 <b>B a</b>	940 <b>B a</b>	2010 <b>B</b>	1650 <b>A b</b>	1310 <b>A b</b>			
	SJo	2740 <b>A</b>	1730 <b>A</b>	1340 <b>A</b>	1600 <b>B a</b>	1270 <b>A a</b>	1630 <b>B</b>	1230 <b>B b</b>	1170 <b>B a</b>			
<i>Nac/Nt</i>	Rec	0,24	0,29	0,08	0,24	0,07	0,26	0,12	0,06	0,18	0,15	0,22
Hip	0,33	0,25	0,15	0,13	0,19	0,25	0,24	0,12				
SJo	0,26	0,16	0,08	0,12	0,09	0,10	0,18	0,06				
<i>K</i> (g.Mg <sup>-1</sup> )	Rec	400 <b>b A</b>	365 <b>a A</b>	350 <b>a A</b>	150 <b>B a</b>	120 <b>B a</b>	180 <b>B</b>	140 <b>B a</b>	132 <b>B a</b>	429 <b>B b</b>	507 <b>A b</b>	300 <b>a</b>
	Hip	642 <b>b A</b>	624 <b>b A</b>	546 <b>b A</b>	195 <b>B a</b>	178 <b>B a</b>	507 <b>B</b>	390 <b>B b</b>	390 <b>B b</b>			
	SJo	890 <b>b A</b>	858 <b>b A</b>	624 <b>b A</b>	670 <b>B a</b>	450 <b>B a</b>	730 <b>B</b>	690 <b>B a</b>	580 <b>A b</b>			
<i>P</i> (g.Mg <sup>-1</sup> )	Rec	21 <b>b A</b>	11 <b>b A</b>	10 <b>b A</b>	9 <b>B</b>	12 <b>A</b>	29 <b>A</b>	12 <b>A</b>	25 <b>B</b>	20 <b>B</b>	16 <b>B</b>	30 <b>a</b>
	Hip	86 <b>b A</b>	21 <b>b A</b>	19 <b>b A</b>	6 <b>B</b>	5 <b>B</b>	46 <b>B</b>	15 <b>B</b>	13 <b>B</b>			
	SJo	140 <b>b A</b>	83 <b>b A</b>	52 <b>b A</b>	87 <b>A</b>	65 <b>A</b>	104 <b>A</b>	87 <b>A</b>	59 <b>A</b>			

\*ND: No determinado

**Fósforo extraíble (P):** La dotación de P en los primeros 5 cm es alta, sugiriendo enriquecimiento superficial de origen biológico. En profundidad los contenidos son menores y variados; los suelos ubicados más al norte muestran estar debajo del *límite crítico*, con tenores incompatibles con altos rendimientos; requieren prácticas de corrección. En SJo la dotación P es alta por influencia del material de origen proveniente de las sierras pampeanas, rico en apatita en el SO y decreciente hacia el NE (Pocoví, 1947).

**Potasio intercambiable K:** En todos los casos el tenor de potasio está muy por encima del *límite crítico* con valores en el A de 850, 690 y 350 g.Mg<sup>-1</sup> para *SJo*, *Hip* y *Rec* respectivamente.

Estos datos confirman los publicados por Stephan et al. (1977) y los del Mapa de suelos de la provincia de Santa Fe (Mosconi et al., 1981, INTA, 1990,1991,1992) donde se observa que en el horizonte A, el K<sup>+</sup> oscila entre 320 y 770 ppm. También Cerana & Panigatti (1966) y Orellana et al. (1988) habían señalado que el K no era limitante en Molisoles del centro santafesino.

## (2) Variación de las propiedades entre suelos debidas a distintos manejos. (Cuadros 5 a 9)

Al momento de interpretar los resultados debe tenerse presente que en *Hip* la *SD* –a diferencia de los otros que sólo es una secuencia de cultivos anuales- es una secuencia de cultivos plurianuales (pastura alfalfa) con anuales. Es también el caso en que más fertilizante fosforado se utilizaba y el único en el que había animales en pastoreo con bosteo en la franja.

### **Densidad del suelo ( $\delta$ ):**

*Rec:* *LConv* muestra compactación por sobre el *límite crítico* desde la superficie y la *SD* no mejora esa situación. En ambos manejos hay un deterioro en los primeros 15 cm, con respecto al estado natural. A mayor profundidad hay evidencias de compactación natural, propia de horizontes con alto contenido de limo y secado lento fenómeno ya señalado por Cerana (1978), que no son modificadas por el manejo.

*Hip:* *LConv* y *R* presentan mayor densidad subsuperficial con valores críticos de compactación; *SD* es mejor que ambos siendo similar al *Nat*. Por su parte la *LConv* en los primeros 15 cm tiene valores que varían de 1070 kg m<sup>-3</sup> antes de la siembra y por efecto del laboreo mecánico, incrementándose hasta 1290 kg m<sup>-3</sup> cuando la cosecha del cultivo estival.

*SJo:* No hay valores críticos, sólo *LConv* presenta tendencia a la compactación en la profundidad de 15 a 30 cm, lo que se refleja en una reducción de la macroporosidad más allá del *límite crítico*.

### **Macroporosidad:**

En general se observan valores inferiores al *límite crítico* indicando una clara tendencia del uso del suelo a agravar los problemas de aireación subsuperficial, especialmente en *Hip*. En *SJo* la *LConv* ha provocado una manifiesta reducción de los macroporos, siendo revertido por la *SD*.

### **Intervalo Hídrico Óptimo (IHO):**

El *IHO* es un tramo del contenido hídrico edáfico en el cual el agua es fácilmente utilizable por el cultivo; la masa sólida del suelo es horadable por las raíces y la aireación no es limitante para la respiración (Pilatti & Orellana, 1993).

*Rec:* En superficie de *LConv* se ve que el efecto de la reciente labor mecánica mejora esta condición física el suelo, aunque se va perdiendo a través del ciclo del cultivo quedando –después de la cosecha del maíz- en peores condiciones que el *Nat* (datos no mostrados). *SD* no difiere de *Nat*.

*Hip:* *LConv* presenta un gran deterioro en todos los estratos, tanto con respecto a la condición natural como del *SI*; los valores son muy críticos de 15 a 30 cm. Los otros usos de la tierra también se alejan de la situación original pero no tan marcadamente.

*SJo:* En *LConv* es desfavorable de 15 a 30 cm; también se observa en *SD*, aunque sin decrecer significativamente respecto de *Nat*.

### **Estabilidad relativa de agregados (Er):**

*Rec:* Este sensible indicador señala un gran deterioro por el efecto de ambos manejos, aunque cabe considerar que acá la *SD* es incipiente (2,5 años) y comienza a mostrar tendencia al mejoramiento.

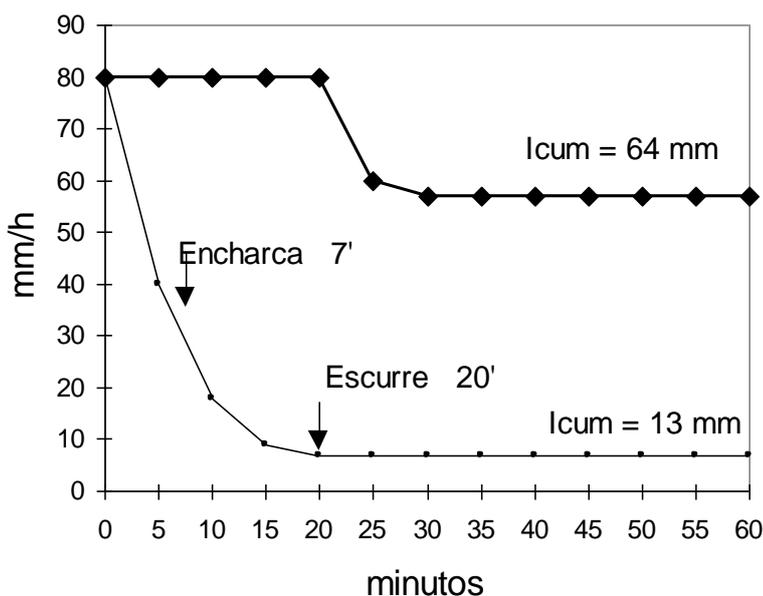
*Hip:* Nuevamente se presenta muy sensible, marcando claramente la degradación del estrato superficial de *LConv*. Es importante observar que la *SD* practicada sobre un suelo no muy degradado previamente (ver datos de *R*) es capaz de mejorar el deterioro del manejo anterior. Esto ratifica que el punto de partida (“Suelo

Natural”, “Cultivado sin deterioro” o “Degradado”), amplía -en ese orden- el tiempo necesario para la recuperación.

*SJo*: Importante deterioro por el efecto del uso de la tierra, con tendencia a mejorar en *SD*; debe tenerse presente que se practica desde hace sólo 6 años.

**Infiltración del sello (*Isello*)** (Cuadro 7 y 8)

Atentos a que en la evaluación de *Isello* intervienen 2 grupos de mecanismos de ruptura de agregados: por un lado hinchamiento, dilatación diferencial, dispersión y estallido; por otro el por golpe directo de las gotas. En la representación gráfica (Figura 1) la curva superior refleja la pérdida de infiltración por efecto del estallido y otros, y la inferior integra ambas causas de destrucción. Si se desea cuantificar la importancia relativa de cada uno puede suponerse que ambos mecanismos de desagregación son aditivos y así valorar su acción en forma independiente.



**Figura 1: Infiltración a través del sello con protección superficial (trazo superior) y sin ella (trazo inferior); horizonte superficial del Argiudol del noreste de Santa Fe (Reconquista) con labranza convencional. (*Icum* = lámina acumulada en 60 minutos)**

*Rec*: Se observa un claro deterioro con respecto a la condición natural. La *SD* se comporta mejor que *LConv*: ya que el suelo se encharca y escurre más tarde, la infiltración acumulada es mayor, aunque ambos usos de la tierra están muy por debajo del *límite crítico*. (Ver Figura 1).

*Hip*: Hay deterioro con el uso respecto de la condición natural, pero *SD* con suelo protegido permite mantener los valores por encima del *límite crítico*. No ocurre lo mismo en *LConv* donde la degradación es tan grande que aún con protección a los 20 minutos decae notablemente la tasa de infiltración, iniciándose el encharcamiento y posterior escurrimiento.

*SJo*: Tanto *LConv* como *SD* presentan comportamientos similares, ambos muy deteriorados respecto al estado natural. Sin embargo, en *SD* con protección superficial al golpeteo del agua de lluvia no presenta ni encharcamiento ni escurrimiento superficial, estando dentro de los requisitos del *SI*.

El Cuadro 7 muestra los resultados de *Rec* y *SJo*; se consideró la infiltración acumulada en una hora, de modo que (siendo la precipitación en el ensayo de 8 cm h<sup>-1</sup>) si infiltra 7,2 cm cuando está protegido, significa que ingresó el 90% del total; luego, por efecto de estallido y otros hubo un deterioro del 10%. De igual modo, si el tratamiento sin protección infiltra 4 cm, se interpreta que por golpeteo y estallido hubo un

deterioro del 50% -en la capacidad del estrato- para conducir agua. Ya que el 10 % fue responsabilidad del estallido y el 50 % es conjunto, el golpeo afectaría en un 40 %.

Los *Nat* (Cuadro 8) resisten bien ambos mecanismos de destrucción excepto en *Rec* donde el golpeo hace disminuir casi a la mitad.

En cambio con el uso de la tierra se debilita muchísimo la capacidad de resistir los mecanismos de destrucción infiltrando menos del 20% de la precipitación. La diferencia entre manejos se da en que *SD* es mucho más resistente que *LConv* al accionar del estallido y otros; en cambio no resiste al golpeo.

Nótese la mayor importancia del golpeo sobre la pérdida de capacidad de infiltración. Es interesante advertir también como en *SD* hay mayor resistencia al deterioro por estallido, por lo tanto como en este manejo la protección contra el golpeo está asegurada por la presencia de rastrojo en superficie, es muy favorable que además resista mejor el estallido lo que evita la formación de sello y costra superficial.

### **Reacción del suelo (pH):**

*Rec:* En general es ácido con tendencia a empeorar en *SD*.

*Hip:* Hay mayor acidificación subsuperficial (15 a 30 cm) que en el suelo natural. *SD* se presenta como el más ácido en todos los estratos.

*SJo:* Tendencia acidificante con el uso, los lotes bajo cultivo están debajo del *límite crítico*.

### **Carbono orgánico (C Org):**

(entre corchetes: Mg/ha en 30 cm; letras distintas indican diferencias signif. al 5% con *Nat*; *LConv* y *SD* respectiv.)

En todos los sitios en superficie es similar al límite crítico y aún superior, siendo inferior entre 15 y 30 cm.

*Rec:* El uso ha hecho decrecer significativamente el tenor orgánico hasta los 30 cm; no habiendo diferencias entre manejos.

[123,0a – 74,8b – 76,3b]

*Hip:* Decreció el *C Org* en los primeros 30 cm, excepto en *R* donde se mantiene igual al *Nat* de 15 a 30 cm. Tanto *SD* como *R* tienen en alguna profundidad mayor *C Org* que *LConv*.

[ 98,4 a – 70,0 b – 92,9a ]

*SJo:* Disminuye el *C Org* con el uso hasta los 15 cm, manteniéndose a mayor profundidad sólo en *SD*.

[ 102,8 a – 62,2 b – 85,5 b ]

### **N total (Nt):**

(entre corchetes: Mg/ha en 30 cm; letras distintas indican diferencias signif. al 5% con *Nat*; *LConv* y *SD* respectiv.)

*Rec:* Disminuye significativamente en los primeros 15 cm, no habiendo diferencias entre manejos.

[55,3a - 44,2a - 43,0a]

*Hip:* Lo mismo ocurre aquí, sólo que la disminución llega hasta los 30 cm en *LConv*, quien tiene -además- menor valor que *SD* y *R* entre los 15 y 30 cm.

[58,6a - 41,6b - 57,8a]

*SJo:* En ambos manejos decrece significativamente hasta los 15 cm, pero esta disminución llega hasta los 30 cm en *SD*. Según este atributo el peor manejo es *SD* quien tiene menor tenor que *LConv* en los primeros 15 cm.

[62,0a - 54,3b - 48,3b]

### **N activo (Nac):**

(entre corchetes: kg/ha en 30 cm; letras distintas indican diferencias signif. al 5% con *Nat*; *LConv* y *SD* respectiv.)

*Rec:* El *Nac* entre 0 y 30 cm muestra el elevado consumo de ambos manejos siendo mayor en *SD*.

[1064a - 720b - 529b]

*Hip*: Gran disminución en todos los manejos; pero en *SD* no es tan importante posiblemente por la alta proporción de leguminosas en la rotación.

[1312a - 664b - 1087a ]

*SJo*: Se ha consumido entre el 30 % y 40 % del *Nac* que naturalmente había, aunque en *SD* es menor. Tanto *LConv* como *SD* están por debajo del *límite crítico*.

[918a - 574b - 521b ]

#### **Fósforo extraíble (P):**

(entre corchetes: kg/ha en 30 cm; letras distintas indican diferencias signif. al 5% con Nat. *Nat*; *LConv* y *SD* respectiv.)

*Rec* e *Hip*: La dotación de fósforo disponible en *LConv* (0- 30 cm) (kg *P/ha*) muestra el gran consumo, sin reposición suficiente; con tenores muy por debajo del *límite crítico*. El aporte que se realiza en *SD* ha restituido parcialmente aproximándose al *límite crítico*.

[47a – 43a - 86 b *Rec* ] [106a – 21b – 70b – 105a *Hip*]

*SJo*: A diferencia de las otras zonas no es tan grande la reducción en *LConv* respecto del Natural; en *SD* puede apreciarse un mantenimiento del tenor por la aplicación de fertilizante. Todas las situaciones están muy por encima del *límite crítico*.

[277a – 287a – 290a ]

#### **K intercambiable (K):**

(entre corchetes: kg/ha en 30 cm; letras distintas indican diferencias signif. al 5% con Nat. *Nat*; *LConv* y *SD* respectiv.)

*Rec*: El consumo hace que estén por debajo del *límite crítico* habiendo disminuido significativamente con respecto del *Nat*. No hay diferencias entre *LConv* y *SD*.

[1412a - 558b - 575b]

*Hip*: Todos disminuyeron significativamente hasta los 30 cm con respecto del *Nat*; excepto *R* que lo hizo sólo en los primeros 15 cm. Se destaca el gran consumo y extracción realizada por los cultivos; siendo muy superior en *LConv* con respecto a *SD* y *R*.

[2122a - 703b - 1542b]

*SJo*: Si bien los valores son todos altos disminuyen significativamente en los primeros 15 cm con respecto a *Nat*.

[2757a - 2107b - 2451a]

## **CONCLUSIONES**

### **Suelos Naturales y Suelo Ideal**

Las ventajas y limitaciones de los suelos Naturales con respecto al *SI* son:

- a) Tendencia natural en *Rec* a la compactación subsuperficial, pudiendo llegar a valores críticos.
- b) La macroporosidad está, después de los primeros 5 cm, por debajo del *límite crítico*.
- g) Adecuada *Isello*. Pero como la estabilidad de los agregados no soporta gotas de lluvia que golpeen sobre ellos, tendiendo a reducir el *Isello*. Luego, se debe mantener una cubierta superficial.
- h) Aceptable estado físico que permita la exploración y actividad radical, según lo señala el *IHO*.
- i) Tendencia natural a la acidificación.
- j) Tenores de *P* y *Nac* variable, en casos con altos tenores y en otros cerca o por debajo del *límite crítico*.
- h) Elevada disponibilidad de potasio.

### ***Influencia del manejo y atributos edafológicos sensibles al cambio***

Se observa un claro deterioro (con respecto al estado Natural) y falta de sostenibilidad en todos los indicadores edáficos, del uso convencional de la tierra. La *SD* en varios casos presenta una tendencia a mejorar; habrá que especificar mejor las acciones a tener en cuenta para perfeccionar la *SD*. La *SD* mejor es la de *Hip*; la que consiste en una rotación agrícola ganadera con pasturas base alfalfa, deyecciones bovinas y adición de abonos nitrogenados y fosforados. La Rotación, fue evaluada en una sola zona porque es una práctica habitual en *Hip* pero no en las otras. En el Cuadro 5 y 9 se ve que *R* se aproxima más a *Nat* aunque también con degradación del estado físico y decrecimiento en el nivel de nutrimentos. Presenta mayor compactación y menor *MPO* en superficie que los otros manejos. Las otras propiedades físicas son intermedias entre *LConv* y *SD*; sin embargo las propiedades químicas se asemejan a *SD* y superiores a *LConv*. Pilatti et al. (1988) evaluando sobre Argiudoles típicos el efecto de 6 años de pasturas seguidos por 6 años de agricultura destaca el efecto recuperador del período con pasturas con respecto al de degradación causado por el período agrícola.

*Ea*, *Er* e *Isello* fueron sensibles para detectar diferencias de sostenibilidad entre manejos distintos; algo menos sensible resultó el *IHO*. La mayoría de las variables químicas fueron sensibles, en especial *Nac*.

Si bien un sistema de manejo del suelo puede tener el mismo nombre en una zona que en otra, la modalidad concreta con que se practica, así como la antigüedad de su adopción pueden alterar totalmente los resultados obtenidos; aunque *LConv* siempre degrada y *SD* tiene comportamientos dispares, a veces mejoran y a veces es similar a *LConv*.

Todos los atributos tratados en este trabajo son modificables por el manejo a través de diversas prácticas agrícolas, labores e insumos. Todos tienen un costo monetario, por lo tanto puede medirse económicamente el costo de la sostenibilidad. Puede avanzarse en la estimación del beneficio económico de la sostenibilidad para evaluar su conveniencia en escala comercial. Un intento ha sido realizado por Cursack de Castignani et al. (1997).

Se confirmó que las prácticas conservacionistas son favorables para lograr manejos de *AS*, pero también se advierte que los requisitos del *SI* podrían ser mejor que la del mismo suelo en estado *Nat*. Esto implica *construir* el *SI* modificando propiedades "actuales". A veces los *límite crítico* del *SI* pueden ser alcanzados o hasta superados, usando técnicas adecuadas. Si tales técnicas no existen, no son factibles o su aplicación es muy onerosa, cabe reconsiderar el uso agrícola del agroecosistema y su manejo.

### ***Integración y superación***

Con los atributos propuestos y sus límites críticos sólo puede emitirse un juicio agronómico cualitativo o semicuantitativo. Ante un caso dado, sólo puede aseverarse: "*hay dificultades o no*"; "*evolucionan para mejor o para peor*". Y no es posible evaluar en qué medida se reduce la producción de los cultivos cuando un atributo se aleja más o menos de su estado ideal. Además, sólo se considera un atributo independientemente de los demás y no es posible jerarquizar la importancia de unos respecto de otros.

Para superar esa barrera se debe complementar enfoques, el analítico y reduccionista: que ha guiado a estas investigaciones; con el holístico y sistémico para hacer posible: *a)* La cuantificación de los efectos respecto del rendimiento, *b)* la interacción entre variables y *c)* su dinámica. Para esto se ha desarrollado un modelo de simulación de cultivos con énfasis en lo que ocurren en el suelo (Pilatti, 1986; 1990a, 1990b, 1990c; Pilatti et al., 1993; Pilatti & Norero, 2001; Norero & Pilatti, 2002 y Pilatti et al., 2011) y propuesto indicadores globales de capacidad productiva y degradación (Pilatti et al., 2006).

Es así como esta línea de investigación materializa y cuantifica el concepto de Charles Kellogg expuesto en el epígrafe y lo convierte en una herramienta valiosa para acceder a sistemas de agricultura sostenible.

**BIBLIOGRAFÍA**

- ACTON, D.E. & L.J.GREGORICH (Eds.). 1991.** The Health of our Soils. Toward Sustainable Agriculture in Canada. *Centre for Land and Biological Resources Research, Res. Branch. Agriculture and Agri-Food. Canada. Public.1906/E. 14 pp*
- ANDRIULO, A.; J. GALANTINI, C. PECORARI & E. TORIONI. 1991.** Materia orgánica del suelo en la región pampeana I. Un método de fraccionamiento por tamizado. *INTA, EEA Pergamino. Inf. Técnico N° 250, 18 pp.*
- ARNOLD, R.W.; I. SZABOLCS & V.C. TARGULIAN (eds). 1990.** Global soil change. *Report of an IIASA-ISS-UNEP task force of the role of soil in global change. International Institute for Applied System Analysis. Luxembourg, Austria. 22 pp*
- AUSTRALIAN AGRICULTURAL COUNCIL. STANDING COMITEE ON AGRICULTURE AND RESOURCE MANAGEMENT, 1993.** Sustainable Agriculture: Tracking the Indicators for Australia and New Zealand. *SCARM Report 51. 62 pp.*
- BEZERRA DE OLIVEIRA, L. 1968.** Determinação da macroporosidade pela "mesa de tensao" en mostras do solo com estrutura indeformada. *Pesquisa agropecuaria brasileira, 3:197-200.*
- BRAY, R. & L. KURTZ. 1945.** Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soils. *Soil Sci. 59:29- 45.*
- CERANA, L.A. 1978.** La resistencia mecánica de los suelos y el crecimiento de los tallos subterráneos y raíces. *Facultad de Edafología. Santa Fe. Argentina. 61 pp.*
- CERANA, L.A. & J.L. PANIGATTI. 1966.** Fertilidad del suelo y funciones de los elementos que utilizan las plantas. *INTA. EERA Rafaela. Boletín Interno de Divulgación N° 8. 22 pp.*
- CHAUSSON, R., & B. NICOLARDOT. 1982.** Mesure de la biomasse microbienne dans les sols cultivés. *Rev. Ecol. Biol. Sol 19:501-512.*
- COBERTERA, E. 1993.** Edafología aplicada. Suelos, producción agraria, planificación territorial e impactos ambientales. *Ed. Cátedra Geografía Menor. 326 pp.*
- CURSACK DE CASTIGNANI, A.M.; J.A. de ORELLANA, M.A. PILATTI, C. D'ANGELO, D.A. GRENÓN, D. SÁNCHEZ & C. BOUZO. 1997.** Metodología para evaluar la rentabilidad y sostenibilidad de agrosistemas en la Cuenca Lechera Santafesina. *FAVE 11 (1): 5-14.*
- DONAHUE, R.L.; R.W. MILLER & J.C. SCHICKLUNA. 1981.** Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas. *Prentice Hall. 624 pp.*
- DUMANSKI, J.; E. PUSPARAJAH, M.LATHAM & R. MYERS (eds.). 1991.** Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World. *Publ. International Board for Soil Research and Managment, Bangkok, Thailand. Vol. 2:175-204*
- FORSHYTE, W. 1975.** Física de suelos. Manual de Laboratorio. *IICA. San José de Costa Rica. 212 pp.*
- FRANZMEIER, D.P. & S.J. ROSS. 1968.** Soil swelling. Laboratory measurement and relation to other properties. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc. 32:573-577.*
- HABERERN, J. 1992.** A soil health index. *J. Soil and Water Conservation. 47:6*
- HAMBLIN, A. 1991.** Sustainable Agricultural Systems: What are the appropriate measures for Soil Structure? *Austr. J. Soil Res. 29:709-715.*
- HAMBLIN, A. 1992.** Environmental indicators for sustainable agriculture. Report on a national workshop, November 28-29, 1991 *Bureau of Rural Resources, Land and Water Resource Research and Development Corporation, Grains Research and Development Corporation. Canberra. 96 pp.*
- HÉNIN, S.; R. GRAS & G. MONNIER. 1960.** Le profil cultural. *La Maison Rustique , París, 340 pp.*
- IMHOFF, S.; M.Á. PILATTI & M. E. SOSA. 1996.** Nitrógeno orgánico en Molisoles del Centro de Santa Fe. *FAVE, 9(1): 10-18.*

- IMHOFF, S.; M. Á. PILATTI, P. GHIBERTO & Á. PIRES DA SILVA. 2004.** Propiedades físicas de Suelos de Santa Fe: Funciones de edafotransferencia. *XIX Congreso Argentino de la Ciencia el Suelo (Paraná, Entre Ríos). Resumen, p. 45. Presentación oral. Trab. completo en CD adjunto a Actas 5 pp.*
- INTA. 1990.** Carta de Suelos de la República Argentina, Hojas 3163-36 y 35, San Jorge - Las Petacas. *INTA, Rafaela, 130 pp.*
- INTA. 1991.** Carta de Suelos de la República Argentina. Hojas 3160-25 y 26, Esperanza-Pilar. *INTA, Rafaela, 135 pp.*
- INTA. 1992.** Carta de Suelos de la República Argentina, Hoja 3160-14. San Justo. *INTA, Rafaela, 151 pp.*
- JACKSON, M. L. 1982.** Análisis químico de suelos. 4a. edición. *Edit. Omega, Barcelona. 663 pp.*
- JENKINSON, D.S. & D.S. POWLSON. 1976.** The effects of biocides treatment on metabolism in soil. V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem, 8:209-213.*
- KELLOG, C. E. 1957.** The Ideal Arable Soil. *En: USDA: SOIL. The Yearbook of Agriculture 1957(Guarda) The United States Government Printing Office. 544 pp.*
- LAL, R. 1991.** Soil Structure and Sustainability. *J. Sustainable Agriculture, 1(4)67-91.*
- LAL, R. 1993.** Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil & Tillage Res. 27:1-8.*
- LARSON, W. E. & F. J. PIERCE. 1991.** Conservation and enhancement of soil quality. *En. Dumanski et al.(1991) Op. Cit. Vol. 2:175-204.*
- LOMA J.L. de la. 1980.** Experimentación Agrícola. UTEHA, México. 493 pp.
- LÓPEZ, R. & F. DELGADO. 1996.** Suelos con limitaciones físicas. Evaluación, diagnóstico y manejo. Impacto en la productividad de los sistemas agrícolas de Venezuela. *Memorias Curso-Taller Soc. Venez. de la Ciencia del suelo y CIDIAT, Mérida 19 a 23 de junio de 1995.*
- MAG. 1982.** Toma de muestras y determinaciones analíticas en suelos y aguas. *Santa Fe, Min. de Agric. y Ganad., Dir. Gral. Extensión e Investigación Agropecuaria, 152 pp.*
- MANICHON, H. 1987.** Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. *En Monnier et Goss, 1987, op. cit.*
- MOLINA, J. S. 1986.** Tranqueras abiertas. *El Ateneo, 231 pp.*
- MONNIER, G. AND M. J. GOSS, 1987.** Soil Compaction and Regeneration. Proceedings of the Workshop on Soil Compaction. Avignon, September 1985. *A. A. Balkena, Editor. 167 pp.*
- MOSCONI, F.; L. J. PRIANO, N. HEIN, G. MOSCATELLI, J. L. SALAZAR, T. GUTIERREZ & L. CÁCERES. 1981.** Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe: zonas centro y sur. *INTA-MAG. 246 pp.*
- NACCI, S. & I. PLA SENTIS. 1989.** Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas del suelo. *Fondo Nac. de Inv. Agr. Venezuela. 67 pp.*
- NARRO, F.E. 1994.** Física de Suelos, con enfoque agrícola. *Trillas, 195 pp.*
- NORERO, A. 1980.** Concepto dinámico de "humedad disponible", y su estimación para fines técnicos. *CIDIAT, Venezuela. 26 pp.*
- NORERO, A.L. & M.A. PILATTI. 2002.** Enfoque de sistemas y modelos agronómicos: Necesidad y método. *Ed. Universidad Nacional del Litoral, 161pp. ISBN 987-508-203-12 (Cátedra: Ciencias Agrarias)*
- ORELLANA, J. A. de. 1988a.** El tercer rol del suelo. *Bol. Inf. Técn. FAVE (1):1-5.*
- ORELLANA, J.A. de, 1988b.** "Mezcla de horizontes". *FAVE 3(1-2), 92-101*
- ORELLANA, J. A. de. 1989.** "Expansibilidad y penetrabilidad de un horizonte B2t con enmiendas cálcicas. *Ciencia del Suelo 7(1-2):107-111.*
- ORELLANA J. A. de; D. A. GRENÓN & O. QUAINO. 1996.** Un penetrómetro de escala milimétrica: calibración y uso. *FAVE 9(2):19-26.*
- ORELLANA, J. A. de & M. A. PILATTI. 1990.** "Aplicación de enmiendas cálcicas en un horizonte B2t". *Ciencia del Suelo 8(2):127-139*
- ORELLANA, J. A. de & M. A. PILATTI. 1993.** Posibles indicadores edáficos de sostenibilidad. I: la estabilidad de agregados. *Actas XIV Cong. Arg. de la Ciencia del Suelo:19-20. Mendoza.74 pp.*

- ORELLANA, J. A. de & M. A. PILATTI. 1994.** La estabilidad de agregados como indicador edáfico de estabilidad. *Ciencia del Suelo* 12(2):75-80.
- ORELLANA, J. A. de & M. A. PILATTI. 1999.** The Ideal Soil. I: An Edaphic Paradigm for Sustainable Agriculture. *J. Sustainable Agriculture* 15(1) 47-59.
- ORELLANA, J. A. de; M. A. PILATTI & D. A. GRENÓN. 1997.** Soil Quality: an approach to the physical state assessment. *J. of Sustainable Agriculture*. 9(2-3):91-108.
- ORELLANA, J. A. de; L. J. J. PRIANO & M. A. PILATTI. 1988.** Niveles de pH y nutrimentos en Argiudoles de Las Colonias (Santa Fe). *Rev. FAVE III (1-2)*, 51 a 57.
- PAPADAKIS, J. 1954.** Ecología de los cultivos. I. Ecología general. *Min. Agr. Gan. Bs. Aires*: 223 pp.
- PARR, J.F.; R.I. PAPENDICK, S.B. HORNICK & R.E. MEYER. 1992.** Soil Quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Amer. J. Alternative Agriculture* 7(1-2):5-11.
- PECORARI, C., J. GUÉRIF & P. STENGEL, 1990.** Fitólitos en los suelos pampeanos: influencia sobre las propiedades físicas determinantes de la evolución de la estructura. *C. del Suelo* 8 (2):135-141.
- PILATTI, M. Á. 1986.** Análisis agrofísico de la relación entre la dinámica hídrica en la fitosfera y el desarrollo y producción de los cultivos. *Tesis Magister Scientiae en "Riego y Drenaje de Tierras Agrícolas. CIDIAT, Universidad de Los Andes. Venezuela. 209 pp. y anexos.*
- PILATTI, M. Á. 1989.** Estimación del punto de marchitez permanente en Molisoles de Santa Fe. *Ciencia del Suelo* 7(1-2)103-106.
- PILATTI, M.A. 1990 a)** Elaboración de modelos de simulación. *INTA, EEA Rafaela, Publ. Miscelánea* 51:6-97
- PILATTI, M. A. 1990 b)** La solución de problemas y los modelos en agronomía. *INTA, EEA Rafaela, Publ. Miscelánea N° 51:72-85*
- PILATTI, M. Á. 1990 c).** Interpretación de las relaciones entre el suelo y la producción de cultivos. Primera aproximación a un modelo edáfico. *INTA, EEA Rafaela, Publ. Miscelánea* 51:98-109
- PILATTI, M. Á. & R. L. ANTILLE. 1985.** Labores profundas en Argiudoles del NE santafesino. *TecniCrea (5)*16-22.
- PILATTI, M. Á. & D. A. GRENÓN. 1995.** La profundidad enraizable de los suelos. Su estimación a partir de información edáfica. Segunda versión, corregida, ampliada, software y manual para el usuario. *Comunicaciones FAVE, C-003-AD-003, 29 pp.*
- PILATTI, M. Á.; D. A. GRENÓN, J. A. de ORELLANA & O. M. FELLI. 1993.** Modelos de regresión y simulación para interpretar la influencia de suelo, clima y manejo sobre la producción de la soja. *FAVE* 7(2)93-121.
- PILATTI, M. Á. & A. L. NORERO. 2001.** Simulación del desenvolvimiento de cultivos anuales. Necesidad, método y formulaciones básicas. *Univ. Nac. Litoral*.187 pp.
- PILATTI, M. Á. & J. A. de ORELLANA. 1993.** Posibles indicadores edáficos de sostenibilidad. II: El Intervalo Hídrico Óptimo. *Actas XIV Congr. Arg. de la Ciencia del Suelo: 21-22. Mendoza. 474 pp.*
- PILATTI, M. Á. & J. A. de ORELLANA. 1994.** Instrucciones para tomar muestras de suelos. 2ª. Ed., corregida y ampliada. *Comunic. FAVE, C-002-AD-002, 10 pp.*
- PILATTI, M. Á. & J. A. de ORELLANA. 2000.** The Ideal Soil. II: Critical Values of the Ideal Soil, for Mollisols in the North of the Pampean Region (In Argentina). *J. of Sustainable Agriculture* 17 (1): 89-111.
- PILATTI, M.A., A.L. NORERO & D. A. GRENÓN. 2011.** Enfoque de sistemas y modelos de simulación de cultivos: Necesidad, formulaciones, usos y evaluación. *Editorial Académica Española. 140 pp. ISBN: 978-3-8454-9930-7.*
- PILATTI, M. Á., ORELLANA J. A. de & O. M. FELLI. 2003.** The Ideal Soil: III. Fitness of edaphic variables to achieve Sustenance in Agroecosystems. *J. Sustainable Agriculture* 22(2):109-132.
- PILATTI, M.A., D. GRENÓN, J. DE ORELLANA & S. IMHOFF, 2006.** Global Interactive Index for Soil Production and Degradation Assessment. *18º Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo. Philadelphia, USA. 116-55.*

- PILATTI, M. Á.; J. A. de ORELLANA, L. J. J. PRIANO, O. M., FELLI & D. A. GRENÓN. 1988.** Manejos tradicionales y conservacionistas: incidencia sobre propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Estudio de casos sobre Argiudoles del sur de Santa Fe. *Ciencia del Suelo* 6(2):19-29.
- PILATTI, M. Á.; L. J. J. PRIANO & J. A. de ORELLANA. 1987.** Modificaciones producidas en el suelo por plantas forrajeras. *Ciencia del Suelo* 5(2):150-157.
- PLA SENTIS, I. 1977.** Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Curso de posgrado en Ciencia del suelo. Univ. Central de Venezuela. Fac. de Agron., Maracay, 93 pp.*
- PLA SENTIS, I. 1996.** Propiedades físicas del suelo. Relaciones con la productividad y procesos de degradación. Métodos de evaluación y modelaje. En R. López y F. Delgado, 1996 op.cit.:19-54.
- POCOVÍ, A. 1947.** Petrología de los suelos de la provincia de Santa Fe. *Instituto Experimental de Investigación y Fomento Agrícola-Ganadero. Publ. Tecn.. N° 59.107 pp.*
- RICHARDS, L.A. (ed.). 1954.** Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de Agricultura N°. 60. Dep. de Agricultura de los EE. UU. de América. Ed. Limusa (México) 174 pp.
- RODRIGUEZ O., 1996.** Resiliencia - Automejoramiento de suelos. En R. López y F. Delgado, 1966 op.cit., 111 a 113.
- SHAXSON, T.F. 1994.** Introducción al concepto moderno de manejo integrado y conservación de suelos. En: Memorias del taller sobre planificación participativa de conservación de suelos y aguas. *FAO, GCP/RLA/107/JPN, Doc. de campo (5) 27-89*
- STANFORD, G. & S. J. SMITH. 1972.** Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.* 36:465-472.
- STEPHAN, S., A. A. DE PETRE, J. A. de ORELLANA & L. J. PRIANO, 1997.** Brunizem Soils of the Centre of the Santa Fe Province, Argentine. *Pédologie* 27 (3):255-283.
- STENGEL, P. 1979.** Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité, pour la caractérisation de l'état physique du sol "in situ". *Ann Agron., 30 (1):27-51.*
- SYS, C.; E. VAN RANST & J. DEBAVEYE. 1991.** Land Evaluation (3 T.) *FAO, Agricultural Publ. N°. 7.*
- TARDIEU, F. 1984.** Influence du profil cultural sur l'enracinement du maïs. *Thèse. DDI, INA-PG. Paris.pp*
- U. S. CONGRESS. 1990.** Food, Agriculture, Conservation and Trade Act of 1990: 3705-3706. Public Law 101-624. *U.S. Government Printing Office. Washington D.C.*
- VOLKER, K. 1994.** Can agricultural practices contribute to functional landscapes in Europe ? En: *D. J. Stobbelaar, D. J. & J .D. Van Mansuelt. "The landscapes and nature production capacity of organic/sustainable types of agriculture." Proceedings of the first plenary meeting in the E.U.- Concerted action. Dep. of Ecological Agriculture. Agric. Univ. Wageningen . Holanda.*
- WALKLEY, A. & I. BLACK, 1945.** En *Jackson, M. L., 1982. Op. Cit.:300-303.*
- WISCHMEIER, W.H. & D. SMITH. 1978.** Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *U.S.D.A., Agric. Handbook Nro. 537. Washington, 58 pp.*