

AGR

**DIAGNÓSTICO
EDAFOLÓGICO**
MIRANDO AL SUELO
CON OJOS DE PLANTA

Miguel Ángel Pilatti
Pablo Javier Ghiberto
Jorge Alberto de Orellana
(Editores)

DIAG-
{NÓSTICO
, EDAFO
LÓGICO-



*Al Dr. Aldo Norero por sus muchas,
valiosas y variadas enseñanzas
que se encuentran en este libro.*

*Al profesor Rubén Pilatti por su revisión
de los aspectos fisiológicos y ecofisiológicos;
además de su gran paciencia por tener
un hermano que pretende, como él, ayudar
a otros a ser mejores ingenieros agrónomos.*

Diagnóstico edafológico

Mirando al suelo con ojos de planta

*Miguel Ángel Pilatti
Pablo Javier Ghiberto
Jorge Alberto de Orellana*

EDITORES

*Carlos Alesso
Jorge Alberto de Orellana
Osvaldo Felli
Pablo Javier Ghiberto
Silvia Imhoff
Daniel Grenón
María Miretti
Miguel Ángel Pilatti
Gabriel Quaino
Cristian Abel Zorzón*

ediciones UNL

CÁTEDRA

**UNIVERSIDAD
NACIONAL DEL LITORAL**



Consejo Asesor
Colección Cátedra
Miguel Irigoyen
Bárbara Mántaras
Gustavo Martínez
Isabel Molinas
Héctor Odetti
Ivana Tosti

Dirección editorial
Ivana Tosti
Coordinación editorial
María Alejandra Sedrán
Coordinación diseño
Alina Hill
Coordinación comercial
José Díaz

Corrección
Ma. Alejandra Sedrán
Diagramación interior y tapa
Anaía Drago

© Ediciones UNL, 2022.

—

Sugerencias y comentarios
editorial@unl.edu.ar
www.unl.edu.ar/editorial

Diagnóstico edafológico : mirando el suelo con
ojos de planta / Carlos Agustín Alesso ... [et al.]
; editado por Miguel Ángel Pilatti ; prólogo de
Jorge Alberto de Orellana. – 1a ed. – Santa Fe :
Ediciones UNL, 2022.
Libro digital, PDF/A – (Cátedra)

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-749-350-4

1. Edafología. 2. Ciencias Naturales. 3. Ingeniería
de Suelos. I. Alesso, Carlos
Agustín. II. Pilatti, Miguel Ángel, ed. III. Orellana,
Jorge Alberto de, prolog.
CDD 631.401

© Carlos Alesso, Jorge Alberto de Orellana,
Osvaldo Felli, Pablo Javier Ghiberto,
Silvia Imhoff, Daniel Grenón, María Miretti,
Miguel Ángel Pilatti, Gabriel Quaino,
Cristian Abel Zorzón, 2022.



Índice

PRÓLOGO ~ JORGE DE ORELLANA / 8

INTRODUCCIÓN / 10

CAPÍTULO 1. LAS DIRECTRICES ~ MIGUEL PILATTI / 13

1.1. Justificación del estudio de suelos en agronomía / 13

1.1.1. Universitario ingeniero agrónomo / 13

1.1.2. Objetos de estudio de la agronomía / 16

1.2. Objetivos de la enseñanza de suelos en agronomía / 25

1.3. Objetivos de aprendizaje / 27

CAPÍTULO 2. LO CONCEPTUAL ~ MIGUEL PILATTI Y JORGE DE ORELLANA / 28

2.1. Necesidad de conocer las condiciones de un suelo ideal / 28

2.2. Requisitos exigidos al suelo por la mayoría de los cultivos agrícolas / 36

Referencias bibliográficas / 65

CAPÍTULO 3. LO METODOLÓGICO

PARTE 1. MÉTODO EN GENERAL. PROCESO DE IDENTIFICACIÓN Y RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS (PIRP) ~ MIGUEL PILATTI / 67

3.1. Pasos del PIRP / 72

3.2. Pasos ampliados del PIRP / 80

Referencias bibliográficas / 83

PARTE 2. MÉTODO EN PARTICULAR. DIAGNÓSTICO DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LOS SUELOS ~ MIGUEL PILATTI Y PABLO GIBERTO / 84

3.1. Variables críticas y procedimiento / 84

3.2. ¿Cómo realizar un diagnóstico edafológico? / 85

PARTE 3. DIAGNÓSTICO EDAFOLÓGICO: PROCEDIMIENTO ~ MIGUEL PILATTI Y PABLO GIBERTO / 101

3.1. Diagnóstico genérico: válido para muchos cultivos / 101

3.2. Diagnóstico específico / 104

Referencias bibliográficas / 143

CAPÍTULO 4. TOMA DE MUESTRAS Y PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULOS

Introducción / 145

PARTE 1. TOMA DE MUESTRAS EN SUELOS ~ MIGUEL PILATTI, CARLOS ALESSO, OSVALDO FELLI Y MARÍA MIRETTI / 147

Introducción / 147

4.1. Exactitud y precisión / 148

4.2. La variabilidad del suelo / 152

4.3. Distribución espacial / 156

4.4. Estrategias de muestreo / 159

Referencias bibliográficas / 181

PARTE 2. DATOS DEL PERFIL EDÁFICO: CONTROL DE SU COHERENCIA ~ MIGUEL PILATTI,
OSVALDO FELLI Y GABRIEL QUAINO / 182

4.1. Secuencia de horizontes y granulometría / 182

4.2. Relación carbono / nitrógeno / 184

4.3. Salinidad / 185

4.4. Capacidad de Intercambio Catiónico / 186

4.5. Reacción del suelo / 187

4.6. Estructura / 188

PARTE 3. ESTIMACIÓN DE DATOS EDAFOLÓGICOS ~ MIGUEL PILATTI, OSVALDO FELLI,
SILVIA IMHOFF, CRISTIAN ZORZÓN Y PABLO GIBERTO / 195

4.1. Granulometría / 198

4.2. Densidad de partículas / 198

4.3. Densidad del suelo / 199

4.4. Porosidad total / 201

4.5. Macroporosidad y espacio aéreo / 201

4.6. Contenidos hídricos / 202

4.7. Curva de retención hídrica / 205

4.8. Agua útil para los cultivos / 206

4.9. Precipitación efectiva o agua infiltrada / 207

4.10. Conductividad hidráulica a saturación (Ks) / 213

4.11. Resistencia mecánica / 214

4.12. Nitrógeno activo o potencialmente mineralizable / 214

Referencias bibliográficas / 217

PARTE 4. CALIDAD ENRAIZABLE DEL SUELO ~ MIGUEL PILATTI Y DANIEL GRENÓN / 218

4.1. Procedimiento: normas básicas y cálculos / 219

4.2. Utilidad / 226

PARTE 5. DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA LOS CULTIVOS ~ PABLO GIBERTO Y MIGUEL PILATTI / 228

4.1. Curva de retención hídrica / 228

4.2. Contenidos hídricos relevantes / 233

4.3. Disponibilidad de agua para los cultivos / 235

Referencias bibliográficas / 242

CAPÍTULO 5. INTEGRACIÓN. USO DE MODELOS DE SIMULACIÓN PARA EL DIAGNÓSTICO (FITOSIM)

~ MIGUEL PILATTI, DANIEL GRENÓN Y JORGE DE ORELLANA / 243

Introducción / 243

5.1. Materiales y método / 245

5.2. Método / 249

5.3. Resultados / 250

5.4. Discusión / 251

5.5. Uso complementario del diagnóstico edafológico y fitosim / 254

Introducción / 254

5.5.1. Materiales y métodos / 255

5.5.2. Resultados / 260

5.5.3. Conclusiones / 267

Referencias bibliográficas / 270

SOBRE LAS AUTORAS Y LOS AUTORES / 274

PRÓLOGO

JORGE DE ORELLANA

«Debemos mirar al suelo con ojos de planta», decía en su clase José Weber¹ años atrás, explicando la relación planta/suelo en su cátedra de la FAVE.²

Entre los alumnos se hallaba Miguel Pilatti, quien retuvo esa frase, la comentó tiempo después con sus colegas de Edafología y desde entonces subyace en los trabajos de dicha Cátedra. Así, las investigaciones apuntaron a un objetivo: hacer que la edafología detectara las restricciones que los suelos ejercen sobre el crecimiento y/o el desarrollo de los cultivos y, de ser posible, atenuarlas o corregirlas.

Eliminar dichas restricciones constituiría disponer de un suelo ideal para cada cultivo. En pos de ello hubo que medir y evaluar propiedades y componentes edáficos, adoptando o adaptando técnicas o elaborando otras *ad hoc* según las metas perseguidas. De resultas de ello aparece un rosario de temas no previstos al principio, pero vistos como indispensables para tender hacia un uso adecuado y conveniente de los suelos.

Hallazgos y desarrollos marcaron el sendero que hemos recorrido, pues, como dice Antonio Machado: «Caminante: no hay camino; se hace camino al andar».

Un lema nos inspira y mueve: «Producir mejorando, en armonía con el ambiente». Desde siempre se *produce degradando*; para paliar esto se propuso *producir conservando*. Este objetivo ya no es suficiente frente a un recurso deteriorado o con limitaciones naturales: hay que mejorarlo y no solo para producir con beneficio económico, sino para optimizar el uso productivo con los otros bienes y servicios ambientales que ofrece el suelo.

1 José A. Weber: Ingeniero Agrónomo (M.Sc.). Fue Docente de las Universidades Nacionales del Litoral y de Entre Ríos, Ministro de Agricultura y Ganadería de Santa Fe y Coordinador Regional del INTA.

2 Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Católica de Santa Fe, hoy Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral (FCA, UNL).

Profesionalmente, estamos convencidos de que hay que ayudar a actuar, anticipándose para controlar los problemas —antes que responder a ellos— y gestionar los riesgos en vez de tratar las crisis.

Hay que actuar y ayudar a hacerlo con lo que mejor se disponga (¡y no con menos!). Para ello es imprescindible: 1) integrar las ideas preexistentes en un bosquejo teórico, 2) diseñar un método para el uso profesional basado en el método científico y 3) recopilar los criterios para juzgar agrónomicamente los datos disponibles: de todo esto trata este libro.

INTRODUCCIÓN

Este no es un texto clásico de edafología ni pretende serlo. Tiende a ser un «puente» entre la *edafología* y el *manejo de suelos*, haciendo hincapié en el diagnóstico edafológico; en ese sentido sería comparable con lo que es la *semiología* en medicina: el diagnóstico a partir de las causas de un problema.

En tal sentido, pretende ser útil a los ingenieros agrónomos, es decir a profesionales universitarios, ante problemas agropecuarios que involucran al suelo, visto según los requerimientos de las plantas que sostiene, en un clima específico.

Aunque hay antecedentes bibliográficos valiosos, entendemos que esta es una tentativa superadora por cuanto incorpora el enfoque sistémico y aborda el diagnóstico aplicando el método científico.

Asimismo, esta publicación responde a la necesidad de difundir conceptos novedosos, resultantes de las investigaciones realizadas en la cátedra de Edafología —de la carrera de Agronomía de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral— durante 50 años. Ello permitirá su uso y aplicación por parte de profesionales, además de servir como material de consulta para los alumnos —principalmente de agronomía— y permitirles acceder a nuevos conocimientos y enfoques originales de otros temas conocidos.

Esta obra contiene algunos de esos trabajos e investigaciones, en su mayoría originales, tales como:

- PIRP: Proceso de Identificación y Resolución de Problemas es un método para guiar el accionar tanto de profesionales como de investigadores en el reconocimiento de problemas de diversa índole, los factores causales y su tratamiento.
- El modelo edafológico: es un modelo cualitativo que reúne a los principales componentes y relaciones entre el suelo y la producción de los cultivos: la fitosfera y se enuncian los factores, mecanismos e interacciones que permiten comprender el modo en que el suelo controla la generación diaria de biomasa vegetal.

- El suelo ideal propone un paradigma edáfico hacia el cual tender para alcanzar sistemas de agricultura sostenible, apuntando a los mejores rendimientos viables en cada situación agronómica, además de la conservación del recurso suelo.
- Diagnóstico edafológico de la capacidad productiva: expone la metodología y criterios que permiten reconocer si hay problemas productivos originados por el suelo y los factores que lo provocan; así como su jerarquización según el grado de limitación que imponen. La referencia a alcanzar es el suelo ideal.
- Calidad enraizable de los horizontes edáficos y profundidad enraizable: propuesta de criterios, procedimiento que permite estimar —a partir de la información edafológica publicada en las Cartas de Suelos— tanto la profundidad de enraizamiento como la enraizable (espesor de mayor actividad radical y mínimas limitaciones); valorando para cada estrato edáfico su aptitud para contener raíces activas durante el ciclo del cultivo.
- Estimadato: estimación de datos edafológicos faltantes a partir de información básica de suelos usualmente disponible.
- Fitosim: modelo matemático —de elaboración propia— que simula diariamente el crecimiento y desarrollo de cultivos anuales poniendo énfasis en los aspectos edáficos. Integra los principales procesos que ocurren en la fitosfera: captación de energía, flujo de vapor, fotosíntesis y respiración, reparto, cambio de forma, demanda y consumo de agua y nutrimentos, especialmente exploración y actividad radical en suelos con limitaciones.

Los capítulos de este libro se ordenan teniendo en cuenta desde los aspectos más generales hasta los específicos. Primero se define qué interesa y qué necesita el ingeniero agrónomo en materia de suelos: son las *directrices* que guían al posterior desarrollo temático. Luego se hace explícito el *método* para resolver problemas (PIRP), haciendo hincapié en la primera etapa: el diagnóstico. A continuación, se desarrollan esquemas de *integración conceptual* haciendo uso del conocimiento fisiológico y ecofisiológico de los cultivos para que emerjan las funciones vitales del modelo edafológico, suelo ideal. Así aparecen qué datos son necesarios y con ellos la toma de muestras, y los procedimientos de cálculo

(profundidad enraizable). Por fin, los criterios para emitir juicios agronómicos, diagnóstico edafológico, tanto desde una óptica exclusivamente analítica —interpretando cada dato—, como de su integración y dinámica usando modelo de simulación de cultivos.

1 Las directrices

MIGUEL PILATTI

1.1. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO DE SUELOS EN AGRONOMÍA

Reflexionaremos acerca del sentido y significado de ser a la vez universitario e ingeniero agrónomo, para luego presentar cuáles son los principales objetos de estudio y atención profesional: los sistemas agropecuarios. Con mayor detalle se trata de la fitosfera o ecosistema específico de las plantas cultivadas, ya que es a este nivel sistémico donde el suelo afecta directamente a la producción de los cultivos. Posteriormente se describe cómo ocurre el desenvolvimiento de los cultivos para deducir qué es lo que debe aportar el suelo. Se pone énfasis en definir qué necesitan las raíces del suelo, para que no se limite el crecimiento del cultivo. Luego se reconoce que a niveles sistémicos superiores (territorio) el interés por el suelo no se agota en su aptitud productiva o en su estado de conservación, sino que hay otras funciones muy importantes que cumple y son vitales para el logro de un desarrollo sostenible. Por último, se concluye enumerando cuáles deben ser los conocimientos y habilidades que, en materia de suelos, deben tener los ingenieros agrónomos.

1.1.1. Universitario ingeniero agrónomo

El futuro profesional con formación agronómica encuentra su definición sintética en la siguiente expresión: universitario ingeniero agrónomo. Cualquier esfuerzo para orientar a las disciplinas que constituyen su currículum debe pasar por especificar y relacionar esa trilogía con los objetivos de la asignatura en cuestión. Aquí se trata de definir la orientación para la enseñanza de la edafología en la universidad y para ingenieros agrónomos.

El estudio y enseñanza de la edafología dispone de abundante y variada información, y puede abordarse desde diversas ópticas, con distintos procedimientos y grado de detalle. Considerando que el tiempo y capacidad de aprendizaje son limitados, se impone realizar un esfuerzo de síntesis y de precisión de objetivos que orienten a la enseñanza.

Ser un profesional universitario implica esencialmente que el individuo posee en su personalidad rasgos distintivos respecto de otras personas no

universitarias, porque ha tenido la posibilidad de «estar a la altura de los tiempos» (Ortega y Gasset). Es decir, pudo conocer las principales ideas (teorías) que el hombre ha elaborado de sí mismo, de la sociedad, del mundo físico, espiritual y axiológico. Esto le da perspectiva para poder orientar sus actos vitales no solo a partir de sus vivencias, sino aprovechando toda la experiencia y conocimiento almacenado en la cultura universal.

En el ámbito profesional, estar a la «altura de los tiempos» implica acceder a las teorías y tecnologías que le permiten comprender y controlar el comportamiento de sus objetos de estudio y atención profesional: los sistemas agropecuarios.

Además, está presente en él un rasgo que le da permanencia como universitario y profesional: es la capacidad de mantenerse actualizado —y en algunos aspectos anticiparse— en el nivel de conocimientos y habilidades que les son imprescindibles. Esto lo logra porque es capaz de aplicar un procedimiento que, hasta el presente, es el mejor desarrollado por el hombre: el método científico.

Los calificativos agrónomo e ingeniero manifiestan, en el primer caso, el ambiente biofísico, tecnológico y social para el cual ejerce la actividad profesional: el agro. Y en el segundo, el carácter del servicio: ayudar a identificar y resolver problemas.

La existencia de un problema³ implica siempre una valoración humana.⁴ Cuando algo es valioso para el hombre tratará de conseguirlo, para ello define objetivos, metas a alcanzar de tal modo que al lograrlas obtiene lo que desea. En el ámbito agropecuario se reconocen al menos dos niveles en los cuales se explicitan objetivos:

- Comunidad, territorio o región
- Agrosistema: sea empresa familiar o de capital

A escala regional es frecuente encontrar los siguientes objetivos: optimizar la capacidad de los recursos naturales para 1) producir, manteniendo y resguardándolos del deterioro, de modo de asegurar su capacidad de producción a través del tiempo, 2) su uso múltiple, como ser de recreación, urbanización, control del ciclo hidrológico, entre otros, y 3) asegurar la inocuidad o minimizar la contaminación.

En los agrosistemas son otras las metas, a veces contrapuestas con las que se expresan a nivel regional. Si bien cabría distinguir la Empresa de Capital —cuyo objetivo es obtener dividendos hoy sin priorizar el futuro ni

3 Un problema existe cuando hay diferencia entre una situación actual con respecto a otra que se considera como más deseable.

4 Los valores son estados finales que guían el esfuerzo humano. Un valor es lo que nos permite diferenciar lo que nos interesa de lo que no nos interesa.

la trascendencia— de la Empresa Familiar —en la cual la actividad rural es considerada como un medio de vida, en el que se busca trascender generación tras generación, para lo cual se acepta a la reinversión como elemento fundamental—, hay objetivos que son comunes a ambos:

- Obtener el máximo beneficio neto
- Disminuir los riesgos
- Lograr que el esfuerzo físico no sea penoso
- Evitar la erosión y la degradación en la medida en que es compatible económicamente.

Es importante advertir que los objetivos presentados no solo varían de acuerdo con su origen (el territorio o el agrosistema), sino que abarcan espacios y tiempos diferentes, tal como puede apreciarse en la Figura 1.1. Allí quedan manifiestos los distintos niveles de intervención del ingeniero agrónomo, en los que presta su servicio para ayudar a resolver problemas.



FIGURA 1.1. ÁMBITOS DE INTERVENCIÓN PROFESIONAL DEL INGENIERO AGRÓNOMO SEGÚN NIVELES CRECIENTES DE COMPLEJIDAD

1.1.2. Objetos de estudio de la agronomía

«Sistema es un arreglo de componentes, cosas unidas o relacionadas de tal manera que forman y/o actúan como una unidad o un todo».

Hay dos palabras clave en esta definición: arreglo y actúan, esto implica dos características de cualquier sistema: estructura y función. Todo sistema tiene una estructura relacionada con el arreglo de los componentes que forman el sistema y tiene una función, relacionada con «cómo actúa» el sistema y «para qué». Este para qué supone la noción de propósito en los sistemas intervenidos o generados por el hombre.

Cuando se piensa de manera sistémica acerca de cosas que interesan, se encuentra lo que se denomina nivel de organización, de integración o jerarquía de sistemas.

Esa noción fue introducida por los biólogos hace más de medio siglo, cuando advirtieron que su ciencia se ocupa de cosas pertenecientes a diferentes niveles, desde la célula y sus componentes hasta los ecosistemas y biomas, pasando por los organismos multicelulares. Hoy, la noción se utiliza en todas las ciencias, desde la física hasta la sociología y —por supuesto— agronomía.

Ejemplos de niveles sistémicos son: ecosistemas–comunidades–poblaciones–organismos–tejidos y células, en el caso de la biología; o país–provincia–departamento–distrito–etc., en el caso de organizaciones políticas.

Pueden distinguirse, al menos, cinco niveles en la realidad: físico, químico, biológico, social y técnico; muchos adicionan el espiritual. A su vez cada uno puede subdividirse en varios subniveles. Por ejemplo, la familia, la pequeña empresa y la escuela de barrio pertenecen al nivel microsocioal; la gran empresa y la gran universidad, al mesosocioal; las empresas transnacionales y las Naciones Unidas, al megasocioal.

Utilizando el criterio de mayor complejidad en componentes se dice que un nivel precede al otro si todos los componentes del segundo pertenecen al primero. Todos los niveles, junto con la relación de precedencia entre ellos, constituyen lo que puede llamarse el sistema de estratificación de la realidad.

Otro criterio consiste en definir niveles de organización según la complejidad creciente de objetivos de los sistemas, de forma tal que aquellos sistemas cuyos propósitos abarquen a otros más simples ocupan un nivel superior.

La Figura 1.1. es un resumen gráfico de niveles de organización de sistemas agrícolas dentro de una región. Se observan tres ejes, en uno incrementa tanto la complejidad de la composición, expresada a través del número y/o naturaleza de las partes del sistema; como su estructura reconocida por la colección de interacciones entre los componentes del sistema (endoestructura) como entre las partes y el contexto (exoestructura). En el segundo eje aumenta la complejidad funcional: las actividades que realizan los sistemas —entendidas como procesos— son cada vez más complejas y contienen a los

niveles anteriores. Por último, en el tercer eje se ubica la finalidad u objetivo que hace que cada nivel sistémico se comporte como una unidad, un todo.

Para facilitar la interpretación de la figura se han omitido algunos niveles intermedios, caso de agrupaciones de productores, cadenas de valor, cooperativas y los niveles superiores a la región: provincia, país.

La complejidad de composición y estructura (eje horizontal de la figura) abarca la fitosfera (lote cultivado) en la cual predomina un solo suelo y una sola población vegetal en un ámbito meteorológico; luego en la herbivósfera se adiciona el componente pecuario (bovinos para cría, carne o leche; porcinos...). En el agroecosistema, o rotación, se reúnen lotes cultivados (fitosferas) y ganado con similares aptitudes y requerimientos de manejo (aumenta el número de componentes y sus relaciones). En el agrosistema se agregan componentes técnicos, sociales y económicos, hasta llegar a la región, donde pueden existir hasta diferencias climáticas y se encuentran otros componentes propios del sector urbano, industrial, etcétera.

¿Cuál es el nivel inicial de complejidad propiamente agronómico? En el eje z, se reúnen objetivos que van desde incrementar la producción vegetal, animal, conservar los recursos naturales, maximizar el beneficio económico o mantener la inocuidad ambiental, entre otros.

Saber cuánto producto vegetal se va a generar, cómo y con qué, es un conocimiento indispensable para evaluar en qué medida se pueden lograr objetivos más complejos como: producción animal, conservación, estabilidad, beneficio económico, inocuidad o bienestar de la comunidad rural.

Ese producto se obtiene en un determinado lugar: ámbito mínimo donde ocurre la producción agrícola el cual constituye el nivel de integración más reducido que estudia, investiga y atiende profesionalmente el agrónomo. Este sistema fue denominado por Norero en 1977 como fitosfera.

En la fitosfera el objetivo es único: maximizar el producto vegetal útil, y no se confunde con los de otros niveles de integración. A modo de ejemplo: no es posible definir la eficiencia económica si no se sabe —al menos— cuánto producto se obtendrá y cuántos insumos serán necesarios para lograrlo. Algo similar ocurre si consideramos los objetivos vinculados con la conservación y la contaminación: no es posible evaluar riesgos o tendencias ambientales si no se conoce qué se va hacer, cómo, con qué y cuándo, y esto depende del plan de manejo que se instrumentará en la fitosfera. Nótese que sea cual fuere el objetivo en el ámbito agropecuario todos tienen un factor que les es común: el producto vegetal. Siempre es necesario y debe tenerse en cuenta ya sea para saber cuánto se debe producir, o para conocer qué y cuántos insumos son necesarios para lograrlo. En cada nivel su importancia e influencia es evaluada según diversos criterios: de naturaleza biofísica (productividad), económica (beneficios), conservacionista (riesgos de degradación) o humana (rudeza de las labores o preferencias por un tipo de producción en vez de otro).

Así, al nivel de fitosfera (comúnmente lote o potrero) interesa la producción biofísica, es decir la magnitud de cosecha de productos vegetales. Recién a nivel de agrosistema se toma en cuenta la rentabilidad o beneficio neto y riesgos económicos. En este eje se indica además que las decisiones tomadas en un nivel deben revisarse considerando los objetivos planteados en los otros niveles. De este modo se evitan o reducen los conflictos entre objetivos contrapuestos de diferentes niveles. Se toman decisiones de compromiso para satisfacer, al máximo posible y en forma simultánea (optimización), los objetivos de todos los niveles. Por ejemplo, a nivel de fitosfera puede interesar alcanzar el máximo de producción, pero para lograrlo se debe incurrir en excesivos gastos de fertilizantes y pesticidas que hacen antieconómica su aplicación, debiéndose optar en consecuencia por un uso restringido de agroquímicos de modo que el rendimiento adicional obtenido compense el gasto realizado.

Sin embargo, es en el agrosistema (se refiere tanto a la empresa agropecuaria como a la finca de subsistencia) donde se reúnen por primera vez todos los niveles de la realidad: físico, químico, biológico, social y técnico; constituyéndose, en nuestra época, en el eje alrededor del cual giran todas las consideraciones y actividades de los productores y profesionales agropecuarios.

Los sistemas de menor nivel al de fitosfera, por ejemplo, el suelo o la planta, no consideran algunos aspectos que conforman la esencia de la agronomía, mientras que los de mayor nivel que el agrosistema involucran procesos y/o componentes que no son de exclusiva atención de la ciencia agronómica; como el desarrollo integral sostenible.

Un agrosistema representa un tipo particular de sistema socioeconómico. Como tal posee ciertas singularidades derivadas especialmente de los subsistemas biológicos, de las tecnologías de producción específicas y del supersistema ecológico al cual pertenece.

Una de las características diferenciales más obvias es el rol que juegan las plantas y los animales en el proceso productivo. La producción agrícola coincide con los procesos vitales de plantas y animales, y sus atributos biológicos y fisiológicos son determinantes para el productor que trata de controlar el proceso productivo.

Otra consecuencia específica del ámbito productivo es la incidencia de una importante cantidad de factores aleatorios, la cual es mayor que en otros tipos de sistemas económicos. La agricultura también es afectada por fluctuaciones inesperadas del ambiente económico y por eventos políticos y macroeconómicos inciertos. Pero, en el caso de los sistemas agrícolas, las fuentes más importantes de incertidumbre derivan de las condiciones climáticas, además de otras inherentes a los subsistemas biológicos (enfermedades, plagas, posibilidad de diferentes respuestas ante los mismos estímulos, etc.).

El factor tiempo es de especial importancia para los agrosistemas, no solo por el dinamismo de los procesos productivos (irreversibilidad), sino también por ser estos predeterminados y por su duración. El proceso productivo puede tener lugar en ciertos períodos del año y no en otros; tiene una secuencia y una duración que no pueden ser alteradas; la alta dependencia de las variaciones climáticas y de los subsistemas biológicos impide anticipar con precisión qué tipos de labores serán necesarias, su cantidad, intensidad u oportunidad de ejecución, lo cual requiere ir ajustando el manejo a medida que se desenvuelve el proceso productivo.

Por último, todo agrosistema está asentado en un ámbito ecológico específico definido por el clima, suelo y comunidades vegetales y animales naturales. El ambiente natural puede tener sus aspectos favorables y desfavorables, pero es el marco a partir del cual el productor debe ajustar el tipo e intensidad de producción a desarrollar en su empresa.

En resumen, el universitario ingeniero agrónomo profesionalmente se caracteriza porque:

- Tiene conciencia de cómo debería ser la agricultura y de cómo es en la actualidad.
- Ayuda eficaz y eficientemente en la identificación y solución de los problemas del agro.
- Dispone del método científico para aplicar y actualizar su conocimiento.
- Su unidad básica de estudio y atención profesional es la fitosfera.

1.1.2.1. La fitosfera o célula agronómica

Interesan a la agronomía los ecosistemas agrícolas y pecuarios donde el conjunto biótico está constituido básicamente por poblaciones vegetales uniformes (sembradíos, plantaciones y pasturas monofíticas) o comunidades vegetales mixtas (tales como cultivos múltiples, plantaciones heterogéneas y mezclas forrajeras).

El hábitat o biotopo de estos sistemas abarca simultáneamente los factores poco alterables por el hombre y aquellos que pueden ser profundamente modificados por las prácticas agrícolas. Los primeros constituyen el macroambiente o el medio más alejado de la vegetación: los segundos, el microambiente, medio en estrecha proximidad de las plantas.

Los factores microambientales son todos aquellos que constituyen o se expresan en las capas atmosféricas que rodean a las partes aéreas y subterráneas de las plantas. Este ambiente, en íntimo contacto con ellas, resulta de la mutua influencia entre la población vegetal, el suelo y la atmósfera.

El desenvolvimiento de la población vegetal depende en gran medida de los estímulos que recibe de este microambiente. La reciprocidad de influencias

entre las plantas y este hábitat hace que la vegetación pueda considerarse simultáneamente como producto y productora de un microambiente edafoclimático. Este ecosistema específico de las plantas cultivadas se define como fitosfera y gráficamente puede observarse en la Figura 1.2. Este es el ecosistema agrícola de menor nivel de organización que investiga, describe, manipula y en el cual interviene científicamente el ingeniero agrónomo.

En la fitosfera, como en todo ecosistema, es posible identificar límites, entradas, salidas, componentes e interrelaciones, lo que da origen a su función y estructura.

1.1.2.2. Función

Con el objetivo de maximizar la generación de productos vegetales útiles al hombre, la función principal de este sistema es la producción vegetal. Para lograr aquel objetivo esa función se debe conceptuar y predecir cuantitativamente, de este modo no solo se comprenderá mejor cómo ocurre, sino que se podrá controlar para incrementarla.

1.1.2.3. Estructura

Límites

Espacial: este ecosistema está situado en la interfase litosfera-atmósfera, ocupando la parte superior de la primera (desarrollo vegetal hipogeo) y la inferior de la segunda (desarrollo vegetal epigeo). Debido a que sus fronteras verticales cambian con el tiempo y es difusa su ubicación, sus límites inferiores son difíciles de definir con exactitud. Pero en términos aproximados abarca verticalmente todo el espesor del suelo en el que ha existido, existen o pueden existir raíces, y las capas atmosféricas adyacentes a la superficie del suelo que ocupa o puede ocupar el follaje de los cultivos. Horizontalmente abarca el área ocupada por la población o comunidad vegetal que interesa, asentada en un mismo suelo.

Temporal: en general comprende el lapso que va desde la siembra hasta la cosecha, aunque en casos especiales pueda anticiparse o posponerse el inicio y el fin respectivamente.

Componentes

Los principales componentes de la fitosfera son:

- Cultivo, la población de plantas cultivadas. En el caso de que fuera más de un cultivo, cada uno conforma un componente. También pueden incluirse como componentes vegetales a las plantas no cultivadas (malezas).
- Suelo, todos los estratos que contienen o pueden contener raíces.
- Fitoclima, comprende las características meteorológicas que manifiesta la fase gaseosa en torno a los órganos aéreos y subterráneos. El comportamiento meteorológico en esta región de la atmósfera difiere en gran medida del que domina varios metros por encima del cultivo. Por esta razón, es más apropiado denominar como *micrometeorología* el estudio de los fenómenos físicos atmosféricos que toman lugar en la capa aérea ocupado por un cultivo. Puede reconocerse en la parte epigea un «atmoclima» y en la parte hipogea un «edafoclima». Interesan en la primera los factores radiación solar y terrestre, viento, temperatura, tensión de humedad y composición gaseosa. Y, en la segunda, temperatura, aireación, contenido y potencial hídrico. Ver Figura 1.2.

Por lo tanto, el sistema fitosfera puede incluir desde lotes cultivados, muy simples en su estructura porque están constituidos por un solo cultivo, suelo y fitoclima; en los que otros posibles componentes (plagas, malezas) son removidos o impedidos. Hasta situaciones de fitosfera más compleja en la cual se asocian varios cultivos o pasturas polifíticas, incluyendo árboles, con malezas, diversas plagas animales y microorganismos patógenos.

En el Cuadro 1.1. se exponen las principales entradas, salidas e interacciones en la fitosfera. Las interacciones entre los componentes hacen referencia a su mutua disposición tanto espacial como temporal.

CUADRO 1.1. COMPONENTES, ESTRUCTURA Y PROCESOS DE LA FITOSFERA

Sistema	Componentes	Entradas	Interrelaciones		Salidas
			Mecanismos	Procesos	
FITOSFERA	Fitoclima	RADIACIÓN VIENTO CALOR SENSIBLE CO ₂ , N ₂ , O ₂ AGUA	Captación y emisión de radiación Transferencias turbulentas de gases y calor Precipitación Difusión y conducción de gases y calor	IRRADIACIÓN REFLEXIÓN TRANSMISIÓN ABSORCIÓN CONVECCIÓN	Radiación Agua Calor Viento CO ₂ , N ₂
	Cultivo	Semilla	Fotólisis Difusión de gases (vapor de agua, CO ₂ , O ₂) Acción enzimática y hormonal	FOTOSÍNTESIS RESPIRACIÓN TRANSPIRACIÓN TRANSLOCACIÓN REPARTO MORFOGÉNESIS ABSORCIÓN DE IONES Y AGUA ↓ CRECIMIENTO Y DESARROLLO ↓ PRODUCCIÓN	Biomasa vegetal CO ₂
	Suelo	N ₂ , O ₂ , H ₂ O RADIACIÓN ABONOS ENMIENDAS PLAGUICIDAS SALES RESTOS VEGETALES ANIMALES, INDUSTRIA ALIMENTARIA	Movimiento y almacenamiento de calor, gases, iones y agua	EXPLORACIÓN RADICAL MINERALIZACIÓN Y HUMIFICACIÓN FIJACIÓN BIOLÓGICA DE N ACTIVIDAD BIÓTICA EROSIÓN Y OTROS DEGRADACIÓN	Agua Nutrientes, Sales y Minerales Contaminantes CO ₂ Otros gases efecto invernadero

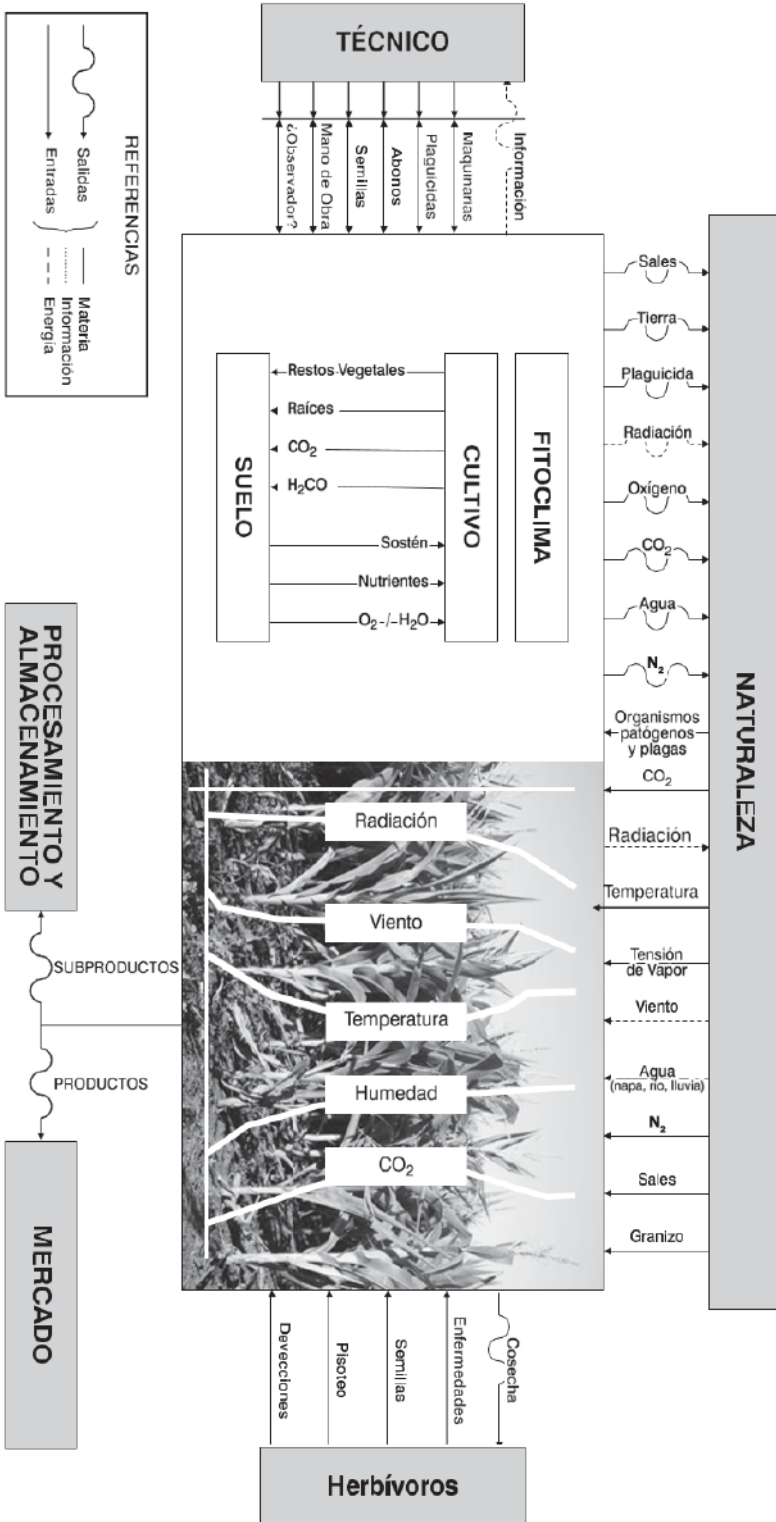


FIGURA 1.2. LA FITOSFERA, ECOSISTEMA ESPECÍFICO DE LAS PLANTAS CULTIVADAS, CON DETALLES DE LA EXO Y ENDOESTRUCTURA

Espacialmente, en un momento dado, los componentes exhiben cierta disposición el uno con respecto a los otros, por ejemplo, los horizontes que componen un perfil de suelo. Esta forma de ubicarse interesa porque puede modificar el tránsito de los elementos que ingresan y circulan por el sistema.

A través del tiempo hay componentes que aparecen, otros desaparecen o cobran formas muy distintas. Por ejemplo, la semilla que se convierte en plántula y luego se desarrolla; la maleza que aparece en determinado período y no en otros; estratos de suelo que inicialmente no están, pero se forman durante el cultivo (costras) o son ocupados a medida que se extienden las raíces.

1.1.2.4. Relación estructura–función

En la fitosfera ocurren muchas actividades, o más apropiadamente funciones, en su mayoría no observables a simple vista y —varias de ellas— son de naturaleza abstracta, conceptual, pero que, al articularse, análogamente a lo que ocurre con las operaciones de una compleja fábrica, dan origen a un proceso: el proceso productivo, cuya función general es recibir entradas materiales y energéticas para transformarlas en productos vegetales útiles al hombre.

La recepción, acumulación, translocación y transformación de estímulos ocurre en determinado lugar, tanto de naturaleza física o biótica: los componentes del sistema. Los flujos de materia y energía son incorporados dentro de los límites del sistema, distribuidos, almacenados y transformados (todas funciones) en cierta magnitud, la magnitud de ello también está determinada por alguna de las características relevantes de los componentes (propiedades), cada uno de esos ciclos de materia o energía puede conceptualizarse como un subsistema de la Fitosfera. Es importante advertir que un mismo componente puede cumplir una o más funciones y por lo tanto encontrarse involucrado en más de un subsistema. En determinado subsistema participará con alguna de sus propiedades y en otro con otras.

Como consecuencia del funcionamiento de la fitosfera se producen los siguientes cambios en los componentes básicos durante el ciclo de cultivo:

- Evolución fitométrica (*phito*, planta y *metro*, medida), específicamente modificaciones que se denominan con los siguientes neologismos:
 - *Auxométricas* (*auxo*, crecer), variación en el peso de la biomasa y minerales.
 - *Fenométricas* (*pheno*, aparecer o hacerse ver), inicio y fin de los estadios fenológicos.

- *Morfométricas* (*morpho*, forma), evolución de: área foliar, altura y profundización radical.
- Cambios diurnos y nocturnos en las *condiciones micrometeorológicas*: atmoclíma: perfiles de radiación, viento y gases.
- Y cambios en las *condiciones edáficas*: las que incluyen cambios en el contenido hídrico, de nutrimentos, en el régimen térmico, resistencias mecánicas; y también cambios estructurales ocasionados por labores o por el accionar de las lluvias (sellado superficial).

Entonces, lo que interesa comprender básicamente es la producción vegetal y el proceso que da origen a tal producción: el desenvolvimiento de los cultivos.

1.1.2.5. El componente suelo

La visión sistémica propone integrar a suelo, clima y vegetación en un todo para comprenderlos y controlarlos; reconociendo distintos niveles de organización en el ámbito agropecuario. El primer nivel lo ocupa la fitosfera o ecosistema específico de las plantas cultivadas. Es aquí donde aparece inicialmente el interés por el suelo, no como un sistema en sí mismo sino como un subsistema de un todo que lo contiene y le da sentido: la fitosfera. En niveles de organización superiores aparece el agrosistema (empresa agropecuaria) y la región, en los cuales también el suelo constituye un subsistema de interés para el agrónomo.

1.2. OBJETIVOS DE LA ENSEÑANZA DE SUELOS EN AGRONOMÍA

El estudio de suelos, en agronomía, interesa en tres campos distintos: A) profesional, B) cognoscitivo y C) axiológico.

- A) Profesionalmente se reconocen al menos tres niveles sistémicos que estudia y atiende el agrónomo:
 1. A nivel de fitosfera interesa para: comprender el fenómeno productivo, identificar los problemas de producción y jerarquizar los factores limitantes.
 2. A nivel de agrosistema interesa para: diagnosticar las aptitudes y dificultades que ofrece el suelo, para permitir una aceptable y sostenida producción, orientar la elección y dosificación de técnicas de manejo, diferenciar en el terreno aquellas zonas con similar aptitud o problemática, las que requerirán un manejo común.

3. A nivel regional interesa para: identificar áreas con problemas de degradación y contaminación, y conocer las potencialidades que ofrece este recurso para el uso múltiple del territorio.
- B) El conocimiento edafológico sirve también como sustrato para el entrenamiento de operaciones intelectuales relacionadas con lo complejo y lo dinámico, siendo un medio para ilustrar y entrenar en el uso del método científico y en el proceso de identificación y resolución de problemas (PIRP).
- C) En el campo de los valores, el contacto con las problemáticas presentadas por, la «conservación de los suelos», el «subuso» y la contaminación da la oportunidad para ampliar y reafirmar conductas coherentes con el espíritu universitario y la ética profesional.

En resumen, resulta claro entonces que al ingeniero agrónomo le interesa adquirir los conocimientos y habilidades aportados por las ciencias del suelo, no como un fin en sí mismos, sino en la medida que ellos permitan:

- A) Evaluar las potencialidades y limitaciones para el uso múltiple en escala regional.
- B) Detectar e identificar problemas productivos de origen edáfico.
- C) Jerarquizar los factores edáficos que limitan a la producción de los cultivos.
- D) Superar las limitaciones a través de la generación y uso de edafotécnicas.
- E) Controlar la evolución edáfica para prevenir la degradación y contaminación de este recurso natural, y que sea posible habilitarlo para mejores usos.

A, B y C constituyen lo que denominamos *diagnóstico edafológico*, y es temática propia de las asignaturas: Diagnóstico y Tecnología de Aguas y Diagnóstico y Tecnología de Tierras; los aspectos prácticos y aplicados se desarrollan en el *Nodo de Integración II*.⁵

D y E se refieren a las medidas de control técnico que permiten superar o prevenir la aparición de restricciones o revertirlas; también son temas de las mencionadas asignaturas y del *Nodo II*. *Edafología* en la carrera precede a aquellas y brinda conocimientos y destrezas básicos para conocer la composición de los suelos, su denominación taxonómica, comprender

5 Se denominan *Nodos de Integración* a los espacios académicos de integración conceptual y práctica interdisciplinaria, en los cuales los estudiantes se abocan al estudio de casos en niveles agrosistémicos cada vez más complejos (desde lote hasta región), donde los conocimientos y habilidades específicas de cada disciplina se complementan y articulan haciendo uso del enfoque sistémico y del proceso de identificación y resolución de problemas, para resolver problemas que requieren el quehacer profesional.

su funcionamiento y evolución; así como una introducción al *diagnóstico edafológico* que luego debe ser aplicada y profundizada en las asignaturas siguientes.

A partir de las consideraciones anteriores se enuncian los siguientes objetivos finales de aprendizaje de edafología.

1.3. OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

En edafología se pretende que los alumnos sean capaces de:

- Diagnosticar, a nivel de fitosfera, las restricciones edáficas a la producción de los cultivos. Esto comprende la capacidad de:
 - a) Identificar la presencia y magnitud de problemas productivos cuyos factores determinantes sean edáficos.
 - b) Reconocer los factores edáficos que limitan a la producción, ordenándolos según el grado de restricción que imponen.
- Separar, a nivel de agrosistema, los suelos con similares aptitudes o limitaciones.
- Reconocer a nivel de cuenca las funciones no productivas del suelo y los indicadores para evaluarlas: uso múltiple de la tierra.
- Valorar al suelo como un recurso natural con funciones sociales trascendentes, susceptible de degradación, contaminación y con posibilidades de habilitación o rehabilitación.

2

Lo conceptual

MIGUEL PILATTI Y JORGE DE ORELLANA

2.1. NECESIDAD DE CONOCER LAS CONDICIONES DE UN SUELO IDEAL

Cotidianamente el hombre se enfrenta con problemas. El científico lo hace para descubrirlos o para comprender por qué son problemas; el tecnólogo para encontrar una solución técnica; el productor, empresario y sus asesores profesionales para resolverlos y así obtener beneficios. Es este el caso que aquí nos ocupa.

Cuando el agrónomo planifica el uso de las tierras de un predio especifica cuáles son las condiciones necesarias para:

- satisfacer los requerimientos vegetales oportunamente,
- conservar o mejorar las condiciones productivas y
- evitar la contaminación.

Para ello debe ser capaz de realizar un diagnóstico, expidiéndose acerca de cuáles son los principales «cuellos de botella» y proponer soluciones técnicas.

El profesional realiza un diagnóstico cuando:

- Identifica la presencia y magnitud del problema e
- Identifica y jerarquiza los factores limitantes.

Para identificar un problema se compara entre un estado de cosas deseables, o de referencia, y otra que es el estado actual. Cuando no coinciden se dice que hay un problema. Por ejemplo, se aspira obtener 40 quintales de trigo por hectárea y solo se obtienen 23 quintales por hectárea.

Si hay un problema: ¿cuáles son los factores limitantes y qué importancia relativa tiene cada uno? Para esto se debe comparar el estado que presenta el suelo con respecto a un conjunto de características que se reconocen como ideales porque no ocasionan dificultades y permiten obtener el rendimiento esperado. Esa comparación es análoga a la que realiza el médico entre los signos vitales que debe presentar un hombre para considerarlo sano, con respecto a los que presenta el paciente que está atendiendo.

Es por la necesidad de hacer un diagnóstico que debe conocerse cuál es el conjunto de características que hacen que un suelo sea catalogado como *ideal* para la productividad de los cultivos y perdurable a través del tiempo.

A continuación, se deducen las principales condiciones físicas, químicas y biológicas necesarias para considerar a un suelo como ideal, presentándose los indicadores que pueden ser útiles para reconocerlas, así como un resumen de las principales medidas agronómicas correctivas de las situaciones que alejan de ese ideal, constituyéndose en limitantes para la producción.

En los últimos 25 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 solo para producir, sino que es la base de apoyo para múltiples servicios 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, solo 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. (US Congress, 1990)

Asimismo, las distintas definiciones de CS (Karlen et ál., 1997, Lal, 1997; Carter et ál., 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 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 y Gregorich, 1991; Larson y Pierce, 1991; Parr et ál., 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 s1 es un aspecto de la As en el que solo 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.¹ Papadakis (1954), Donahue et ál. (1981), Molina (1986), Sys et ál. (1991), Cobertera (1993), Shaxson (1994) y Narro (1994) tuvieron expresiones similares, aunque sin terminar de plasmar el concepto, ni desarrollarlo metodológicamente. El concepto de suelo ideal (s1) es elaborado por los autores de este trabajo desde años (Orellana, 1988; Pilatti, 1990; Orellana y Pilatti, 2000), aquí se presenta una versión, todavía perfectible (Pilatti y Orellana, 2012).

Una referencia especial y homenaje debe hacerse a Charles E. Kellog quien en el Handbook de 1957 definía al suelo ideal así:

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.

1 Productor de Godeken (prov. de Santa Fe) de avanzadas ideas y acciones conservacionistas en la década del 70.

Successful farmers choose the practices for their fields according to two primary considerations: What practices do I need to come near the ideal? How will the costs and returns fit into my farm budget?

También a Millar, Turk y Foth, quienes en 1971, en su primera edición en castellano de *Fundamentos de la Ciencia del Suelo*,² hacen referencia explícitamente al concepto de un suelo ideal.

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 necesito efectuar para mantener el suelo próximo al ideal?, ¿cómo los costos y ganancias se ajustan al presupuesto de la empresa?

Si bien hay coincidencias entre los distintos autores, algunos omiten ciertas características deseables y otros destacan más unas que otras; pero todos indican qué propiedades son deseables sin fundamentar por qué ello es así. En este trabajo se intenta sentar las bases de cuáles son los atributos de un suelo que podría denominarse: ideal; para ello se utiliza el conocimiento de la fisiología de los cultivos, de su ecofisiología y también de los requerimientos que tienen los órganos vegetales que más en contacto están con el suelo: las raíces.

2 Esta edición en nuestra lengua correspondía a la cuarta en inglés, cuyo texto original tenía ya más de una década.

Servicios que presta el suelo

El suelo presta innumerables servicios a la sociedad (Cuadro 2.1.). Independientemente de los usos que se le da en Ingeniería Civil, donde actúa como soporte de edificios, carreteras, y otras obras, desde el punto de vista biológico se le pueden asignar por lo menos 3 servicios importantes:

- *Sostiene la producción vegetal* y con ella la producción de alimentos para el hombre y los animales, fibras para elaboración de otros productos útiles; además de aceites, leña, madera, aromáticas, especias, flores.
- *Es depositario y procesador*, a través de su actividad biológica, de residuos que se le agregan, reciclando los de origen orgánico. Por esto se lo denomina «reactor biológico».
- *Cumple funciones estéticas*, al condicionar —con su calidad y la del clima correspondiente— las características del paisaje natural.

Uso múltiple de la tierra

Los múltiples servicios de la tierra se describen en un estudio de la FAO (1995). La tierra es la base de apoyo para múltiples sistemas biológicos a través de:

- La producción de biomasa que proporciona alimentos y forrajes, fibras, combustibles, maderas y otros materiales bióticos para el uso humano, ya sea directa o indirectamente a través del buen manejo de los animales incluyendo acuicultura y pesca costera (o sea el servicio de producción);
- La tierra es la base de la biodiversidad proporcionando el hábitat biológico y las reservas genéticas para plantas, animales y microorganismos, debajo y encima de la superficie (o sea el servicio de ambiente biótico).
- La tierra y el uso que se hace de ella son una fuente y un depósito de gases de invernadero y forman parte de los codeterminantes del balance de energía global —reflexión, absorción y transformación de la energía solar y del ciclo hidrológico global (o sea el servicio de regulación climática);
- Regula el almacenamiento y el flujo de los recursos hídricos superficiales y subterráneos (o sea el servicio hidrológico);
- Es un depósito de materias primas y minerales para uso humano (o sea el servicio de almacenamiento);
- Tiene una función receptiva, filtrante, amortiguadora y transformadora de compuestos nocivos (o sea el servicio de control de residuos y contaminación);
- Proporciona la base física para la colonización humana, las estructuras industriales y las actividades sociales tales como la recreación y el deporte (o sea el servicio de espacio vital);

- Es un medio para almacenar y proteger la evidencia de la historia de la humanidad y una fuente de información de las condiciones climáticas y uso de la tierra del pasado (o sea la función de archivo o patrimonial).
- Proporciona espacio para el transporte de las personas, de los insumos y de la producción y para el movimiento de las plantas y los animales dentro de áreas limitadas de los ecosistemas naturales (o sea el servicio espacio conectivo);

En resumen, las múltiples funciones de la tierra son:

- (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
- (9) Espacio conectivo

CUADRO 2.1. NIVELES DE ORGANIZACIÓN CRECIENTE DE LOS SISTEMAS AGROPECUARIOS Y PRINCIPALES FUNCIONES QUE CUMPLE EL SUELO EN CADA UNO

Nivel Sistema Agropecuario	Propósito del sistema	Funciones del suelo
Fitosfera	Maximizar productos vegetales útiles al hombre	Ver funciones productivas del suelo ideal. Almacén y reciclado de nutrientes.
Herbivosfera	Maximizar productos animales	Piso para el pastoreo directo. Calidad del forraje, especialmente en composición mineral.
Agroecosistema	Conservar capacidad productiva de los RR.NN.	Leyes de restitución, mantenimiento, reposición. Capacidad de regenerar funciones disminuidas. Resistencia a la erosión.
Agrosistema	Generar beneficio económico. Aceptables condiciones de vida ⁽¹⁾ Confortables condiciones de trabajo ⁽²⁾	Reciclado desechos animales y otros. Captación y almacenamiento orgánico del gas co2 y de elementos biotóxicos. Capacidad de asimilación de plaguicidas. Transitabilidad.
Cadena agroalimentaria	Equidad en la distribución beneficios. Calidad. Diferenciación.	Reciclado desechos industriales, de embalaje, etc. Capacidad de asimilación plaguicidas y otros. Depuración. Transitabilidad.
Cuenca	Fuente de ocupación. Forma de vida. Recreación. Calidad ambiental ⁽³⁾	Amortiguar riesgos naturales, especialmente climáticos. Purificar agua. Captación, almacenamiento, uso eficiente, reservorio superficial de agua. Demora del tránsito superficial. Captación y almacenamiento orgánico del gas co2. Transitabilidad. Minería. Autodepurador, biofiltro: filtrar, amortiguar, degradar, inmovilizar y detoxificar materiales orgánicos e inorgánicos. Soporte actividades de ocio. Base para construcciones. Mitigar la acumulación en la atmósfera de co2; NOx, CH4 Regular ciclo C, N, P, S Amortiguar oscilaciones de temp. y humedad. Amortiguador ambiental: regula el flujo de elementos y la composición del aire y del agua. Reservorio información genética: microorganismos y semillas.

(1) Libertad, participación, acceso a servicio de salud, educación, seguridad social.

(2) Ambiente físico: ruido, vibraciones, temperatura, olor, contaminación. Carga mental: consideración, atención, estímulo, riesgo de permanecer en el trabajo.

(3) Grado de conservación de los ecosistemas, paisaje, pureza del aire, agua, estado y limpieza del suelo.

Concepto de suelo ideal para los cultivos

Llamamos Suelo Ideal (si) a aquel que, además de sostener físicamente a los cultivos, les permite germinar, emerger, crecer, desarrollarse y cumplir normalmente todas las funciones vitales indispensables para lograr *máximos niveles de producción a través del tiempo* (productividad y sostenibilidad). Al cumplirse esas condiciones, los rendimientos que se logren dependerán *del clima y del potencial genético* de los cultivos, ya que el suelo no contiene factores limitantes.

De otro modo, un suelo ideal es aquel que:

- No limita el rendimiento potencial que podrían lograr una determinada combinación de condiciones meteorológicas y genotipo vegetal (cultivo): Provee de agua y nutrimentos, es inocuo para el cultivo, no restringe la exploración ni la actividad de raíces.³
- Amortigua las adversidades tanto *meteorológicas*: excesos y deficiencias hídricas, extremos térmicos, viento excesivo —peligra el sostén—; como *bióticas*: enfermedades, fitotoxicidad; o provocadas por un *manejo inadecuado*: acidificación por fertilizantes, sodificación y/o salinización por agua de riego o freática.
- Resiste a los agentes que intentan alejar a sus propiedades de las de un suelo ideal: degradación.

Obviamente, un suelo que resulta ideal para un cultivo puede no serlo para otros; o dejar de serlo para el mismo cultivo si se lo ubica en otras condiciones meteorológicas.

Si bien existen diferencias en los requerimientos de distintos cultivos es necesario tener claro cómo ocurre el desenvolvimiento⁴ vegetal y cuáles son las funciones que el suelo debe cumplir para que sea considerado ideal. Las diferencias más importantes entre cultivos son:

- Distinto requerimiento interno de nutrimentos tanto durante el ciclo vital como en madurez fisiológica. Así, por ejemplo, mientras la alfalfa requiere de 3,5 kilogramos de nitrógeno por cada 100 kilogramos de materia seca, el arroz solo necesita poco más que 0,7 kilogramos. El tabaco necesita 2,5 kilogramos de potasio por cada 100 kilogramos de materia seca, pero el trigo solo 1,2 kilogramos.
- Algunos cultivos pueden tomar nitrógeno directamente del aire mediante fijación simbiótica mientras que otros no lo pueden hacer.
- Ciertas plantas presentan mayor densidad de raíces lo que les permite una mayor absorción de fósforo y potasio.

3 Grado de conservación de los ecosistemas, paisaje, pureza del aire, agua, estado y limpieza del suelo.

4 *Desenvolvimiento* alude simultáneamente al crecimiento (aumento en peso y tamaño) y al desarrollo vegetal (envejecimiento).

- Hay vegetales que se adaptan a la falta de oxígeno en el suelo, como es el caso del arroz; otros son más o menos sensibles a la duración del encharcamiento.
- Algunos tienen absorción diferencial de iones y protección para el ingreso de otros (por ej. plantas calcícolas o el arroz que absorbe varias veces más silicio que otros).
- Hay especies más o menos adaptadas a la salinidad, así como el agropiro tolera importantes niveles de sales, la frutilla es muy sensible y prontamente reduce su crecimiento y producción.
- También hay cultivos que toleran concentraciones de aluminio, sodio o manganeso que son tóxicas para otros.
- Hay diferencias varietales en la resistencia a parásitos y enfermedades de la raíz.
- Ciertos cultivos tienen menos dificultades para vencer resistencias mecánicas en el suelo, ya sea al momento de emerger como para explorarlo en profundidad.
- Existe mejor adaptación a la deficiencia hídrica de las plantas xerofíticas que otras comunes de climas más húmedos.
- Lo mismo ocurre con la adaptación a temperaturas extremas, ya sea durante la emergencia, floración o llenado de granos.
- También hay cultivos que padecen más fácilmente que otros de alelopatía: toxinas emitidas por las propias raíces o por la de otras plantas.

2.2. REQUISITOS EXIGIDOS AL SUELO POR LA MAYORÍA DE LOS CULTIVOS

Para desarrollar esta temática avanzaremos por aproximaciones sucesivas, comenzando desde una óptica macroscópica —al nivel de todo el cultivo—, luego por una fisiológica y ecofisiológica, donde se expone cómo se desenvuelven los cultivos y qué requieren del medio circundante, especialmente del suelo. Por último, se presta especial atención a los requerimientos que tienen las raíces para explorar el suelo y funcionar normalmente.

Primera aproximación: macroscópica, cuantitativa

1. Cuando se siembra maíz se utilizan aproximadamente 20 kg semilla/ha y a los 120 días obtenemos 10 000 kg grano/ha o más!
2. Lo que se cosecha (Cos) es solo una parte (p) de toda la masa vegetal que se produce (BT, biomasa total), es decir:

$$\text{Cos} = p \times \text{BT}$$

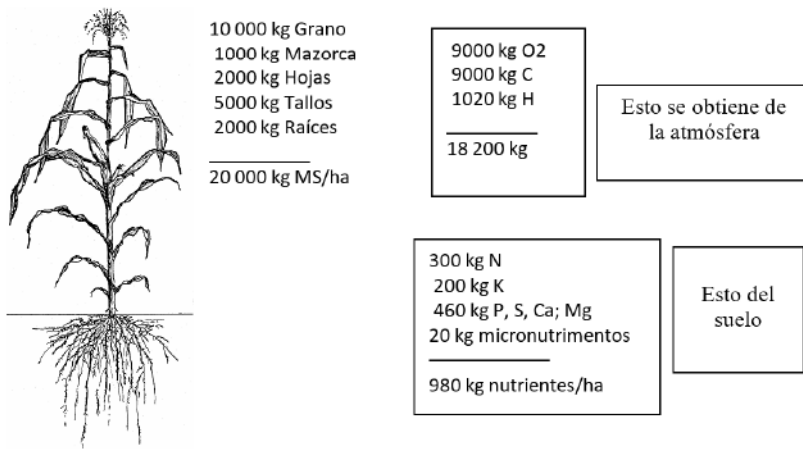
La proporción útil, p , que se cosecha se conoce como índice de cosecha y es un valor característico de cada cultivo cuando crece en condiciones normales. Por ejemplo, el trigo tiene un índice de cosecha algo superior a 0,35 es decir, el 35 % de toda la planta de trigo es grano. Toda la biomasa que logra el cultivo durante su ciclo es el resultado de lo que ha crecido diariamente (c) desde la emergencia (T_e) hasta la madurez fisiológicas (T_m), en símbolos:

$$\text{Cos} = p \times \int_{T_e}^{T_m} c \, dt$$

El símbolo de la integración matemática que está entre “ t_m ” y “ t_e ” indica que lo que aumenta de peso en cada momento ($c \, dt$) la planta se suma desde que emerge (T_e) el cultivo hasta que llega a su madurez fisiológica (T_m).

3. Según esa sencilla expresión matemática, si se desea incrementar la producción que se está obteniendo, por ej. 10 000 kg grano/ha, podría actuarse incrementando uno o varios de los siguientes factores:
 - Duración del ciclo ($T_m - T_e$)
 - Tasa de crecimiento (c)
 - Reparto hacia grano (p)
 - Configuración del cultivo⁵ que aumenta la habilidad para captar recursos: ya sea radiación o gas carbónico por las hojas; o agua y nutrimentos por las raíces.
4. Esos son los 4 grandes mecanismos fisiológicos sobre los que podemos actuar para aumentar la producción. Pero, ¿cuál es la primera condición que fija el techo de producción?
5. Debe considerarse que 10 000 kg/ha de maíz se obtienen aproximadamente de una masa vegetal total de 20 000 kg ms/ha (ver figura):

5 Incorrectamente denominado en muchos textos como «arquitectura del cultivo», ver su significado en el diccionario de la Real Academia Española.



Adviértase que esos 20 000 kg de MS se han construido con 9000 kg de C y otro tanto de O₂; solo algo menos de 1000 kg proviene del suelo.

- ¿La atmósfera provee el 95 %, el suelo el 5 %!
 Es oportuno preguntarse: ¿somos agricultores o atmocultores?
- Por lo tanto, lo que hay que hacer es cosechar C y O, pero para que se transformen en material orgánico (hidratos de carbono, azúcares...)

¿qué se necesita?
Luz

Se necesita:

- $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow (\text{H}_2\text{OC})_6 + 6 \text{ O}_2$
- Gas carbónico (CO₂) y
- Energía lumínica de la atmósfera y agua desde el suelo.

Estos 3 factores constituyen las primeras limitantes para la fotosíntesis. Analicemos cada uno.

Agua

- El maíz próximo a madurez fisiológica tiene, aproximadamente, 25 % de materia seca, el resto es agua. Quiere decir que en 20 000 kg MS/ha, hay además en la planta 60 000 kg H₂O/ha.
 Si bien cuantitativamente el valor es importante, ya que hay 3 veces más agua que de materia seca, esos 60 000 kg equivalen a solo una precipitación de ¡6 mm/ha! Pero sabemos que durante un ciclo el cultivo absorbe muchísima más agua.
- Considerando que durante un ciclo de 120 días la transpiración promedio es de 3mm/día el consumo total de agua:
 $3\text{mm/día} \times 120 \text{ días} = 360 \text{ mm Transp./ha}$
 = ¡3 600 000 kg/ha se evaporan desde las hojas!
 Aquí se pone en evidencia la importancia de la transpiración.

Energía lumínica

10. ¿Cuánta energía se requirió para evaporar esa cantidad? Para evaporar 1 kg de agua se necesita 580 kcal, por lo tanto:

$$3\,600\,000 \text{ kg H}_2\text{O} \times 580 \text{ kcal / kg H}_2\text{O} \sim 2,1 \times 10^9 \text{ kcal}$$

Pero el cultivo recibió en término medio durante su ciclo 300 cal/cm² de terreno / día. Por lo tanto, la energía solar que ingresa a una hectárea durante los 120 días del ciclo es:

$$300 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ día}} \times \frac{120 \text{ días}}{\text{ciclo}} \times \frac{10^8 \text{ cm}^2}{1 \text{ ha}} \times \frac{1 \text{ kcal}}{1000 \text{ cal}} = 3,6 \times 10^9 \text{ kcal /ha / ciclo}$$

Por lo tanto, $2 \times 10^9 / 3,6 \times 10^9 \sim 60 \%$, aproximadamente el 60 % de la energía solar que recibió el lote se utilizó para evaporar el agua desde las plantas.

11. El «todo» es importante, pero no debemos olvidar que hay jerarquías:
- La energía solar y el CO₂, ya han sido destacados, pero también debemos proveer jerárquicamente de:

- Agua
- N
- K, P, K, Ca, Mg, S
- Otros minerales (Fe, Zn, B, Mo, Cu, Mn, Co, Ni y Cl)

Así también quedan jerarquizados los principales procesos fisiológicos:

- Fotosíntesis
- Respiración (aún falta por describir su fundamental función)
- Transpiración
- Nutrición Mineral

La provisión de agua y de minerales es lo que, en principio, vincula al cultivo con el suelo.

Segunda aproximación. Fisiología y ecofisiología de los cultivos: funciones del suelo

Teniendo presente que el propósito principal de la fitosfera es optimizar la generación de productos vegetales útiles al hombre, se requiere comprender el fenómeno de la producción vegetal a fin de determinar cuáles son las funciones que cumple el suelo y a partir de esto definir el interés de los agrónomos por él. En la Figura 2.1 se muestran los principales componentes e interrelaciones que intervienen en la generación diaria de biomasa de los cultivos agrícolas.

La cosecha o producto útil de un cultivo, Cos, expresado en kg/ha, es una parte p de la biomasa o crecimiento total del cultivo, Bt. Esa fracción cosechable, p, es un valor característico del genotipo cultivado y depende de su

constitución genética más que de las condiciones ambientales; se lo conoce también como índice de cosecha.

Por su parte la biomasa Bt es la integración de las tasas de crecimiento diario, c , desde que se inicia el crecimiento autotrófico del cultivo (terminada la germinación y emergencia), t_e , hasta la madurez fisiológica, t_m .

El crecimiento o incremento de peso diario, c , se manifiesta físicamente en el vegetal a través de tres estructuras: Sostén–Reservas–Protoplasma.

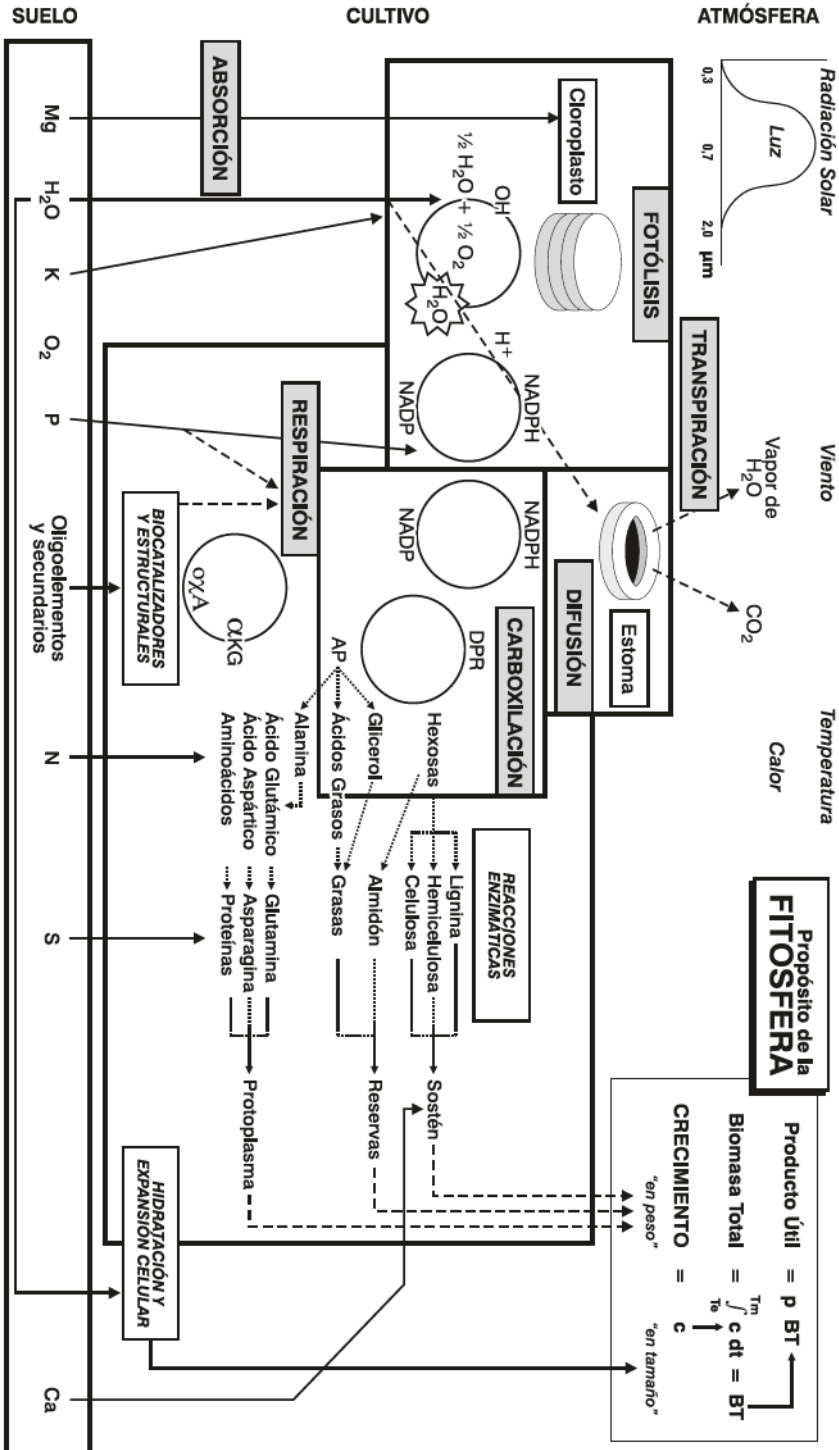
1. Cada estructura tiene distinta composición química, así:
 - Sostén: está conformada por lignina, hemicelulosa, celulosa.
 - Reservas: en su mayoría son almidón, grasas (glicerol y ácidos grasos), glutamina (ácido glutámico), asparagina (ácido aspártico).
 - Protoplasma: está constituido por proteínas (aminoácidos)

Por lo tanto, el crecimiento c , usualmente expresado como incremento de biomasa por unidad de superficie y tiempo (kg materia seca/ha/día), consiste en producir las sustancias químicas mencionadas.

2. El precursor de la glutamina es la alanina, la cual en su composición química tiene N. En general, los aminoácidos contienen aproximadamente 18 % de N y algunos tienen en su constitución S, como la cistina, la cisteína y metionina (tioaminoácidos). Este es uno de los motivos por el cual el N es importante en la nutrición mineral de los cultivos. Este elemento es comúnmente el cuarto en orden de abundancia en las plantas, después del Carbono y de los elementos constituyentes del agua. Hasta un 70 % del total del N está en las hojas, o casi la mitad del presente en todo el vegetal puede estar en plástidos, especialmente en los cloroplastos. El Mg es otro elemento que, proveniente del suelo, forma parte de las moléculas de clorofila, que son porfirinas de magnesio. Sin embargo, solamente el 10 % del Mg presente en la hoja forma parte de la clorofila. Esto no es inesperado ya que la conversión y conservación de energía son las funciones principales del cloroplasto y el magnesio es el activador más común de enzimas, participando así en el metabolismo de la energía.

FIGURA 2.1. PRINCIPALES FACTORES AMBIENTALES Y MECANISMOS FISIOLÓGICOS DEL CULTIVO QUE INTERVIENEN EN SU CRECIMIENTO DIARIO

FITOSFERA



3. Las hexosas son el producto de un mecanismo fisiológico denominado carboxilación y la alanina proviene de la respiración teniendo como

antecesor al ácido pirúvico. La actividad respiratoria está gobernada por enzimas —en cuya constitución intervienen numerosos minerales denominados oligoelementos— y está directamente afectada por la temperatura.

El ácido pirúvico, al igual que las hexosas y el glicerol proviene de la carboxilación; para que ésta ocurra es indispensable el suministro de anhídrido carbónico. El gas carbónico penetra al interior del vegetal a través de los estomas. Este hecho nos relaciona con la apertura y cierre estomático cuya relación está estrechamente vinculada con el K y la disponibilidad de agua.

La carboxilación ocurre, además, porque existe un suministro de energía química (ATP→ADP; NADPH+ /H+→NADP+), que se origina en la fotólisis la cual depende de dos factores: agua y luz.

El P juega un papel importante en el metabolismo de la energía —incorporado en el trifosfato de adenosina (ATP)—: la fosforilación de compuestos orgánicos interviene tanto en la Fotosíntesis como en la Respiración. El ATP es el medio de transporte de energía usado por todas las células vivientes. Además, el P aparece en fosfolípidos, incluyendo los de las membranas, en azúcares fosfatados y en diferentes nucleótidos y coenzimas. El ácido fítico, el ester hexofosfato de mio-inositol, y sus sales de Ca o de Mg (fitina) sirven como formas de almacenaje del fosfato en las semillas. En general es uno de los tres nutrimentos cuantitativamente prominentes que son absorbidos —desde el suelo— como aniones complejos. Los otros dos son N (nitratos) y S (sulfatos). Las plantas se hallan inmersas en un ambiente energético, y si bien el sol provee el 100 % de la energía para el crecimiento y producción de los cultivos, toda la radiación no es utilizada para la fotosíntesis. Mayormente, la carga energética diaria que afecta al cultivo, debe disiparse. La transpiración es la forma de disipación de energía que involucra el flujo de vapor desde el interior de las hojas hasta el aire circundante. Casi toda el agua que los cultivos extraen del suelo pasa a la atmósfera como transpiración. Por esta causa, la intensidad con que el agua se evapora desde la planta determina más que nada la intensidad con que el suelo la debe proveer al cultivo.

La transferencia del agua desde las hojas a la atmósfera circundante supone un cambio de estado de líquido a vapor, y este cambio de fase requiere un alto consumo de energía (580 cal/g).

La energía necesaria para la vaporización del agua y la capacidad de remoción del aire húmedo de las cubiertas vegetales provienen del ambiente externo a la planta. Por consiguiente, las condiciones meteorológicas ejercen una influencia determinante en la intensidad de transpiración: los requerimientos del agua del cultivo son, por lo tanto, altos en días de sol brillante, cálido, seco y ventoso; por el contrario, las necesidades son bajas en días nublados, fríos, húmedos y calmos.

Estas son —esquemáticamente— las principales relaciones entre los procesos fisiológicos vinculados con la producción de los cultivos y los elementos atmosféricos, y especialmente, los edáficos. Así se hacen evidentes las dos funciones más importantes del suelo a nivel de fitosfera: la provisión de agua y nutrientes.

Entonces esas son las principales intervenciones del suelo en el proceso productivo, funciones vitales del suelo para el crecimiento de los cultivos.

Tercera aproximación. Necesidades de las raíces: lo que requieren del suelo

Es a través del sistema radical que el suelo ejerce su influencia sobre la producción de los cultivos. Por tal motivo, a continuación, se enumeran aquellos aspectos relevantes para un buen funcionamiento de las raíces, identificando el conjunto de condiciones edáficas imprescindibles para que las raíces operen adecuadamente, se denominan: requisitos edafológicos (Cuadro 2).

CUADRO 2.2. REQUISITOS QUE DEBE REUNIR EL SUELO PARA PERMITIR UNA ÓPTIMA ACTIVIDAD RADICAL

Característica de las raíces	Requisitos edafológicos
Se abren paso, exploran y anclan a la planta	Baja resistencia mecánica. Espacio poroso de adecuadas dimensiones.
Aeróbicas: Energía metabólica Heterótrofas Permeabilidad celular	Sincronización con crecimiento epigeo. Oxígeno. Intercambio gaseoso $\text{CO}_2 - \text{O}_2$
Poikilotérmicas	Temperatura apropiada
Acuáticas	Balance hídrico equilibrado
Activas: Absorben agua Absorben nutrientes: N, K, P, S, ...	Alta cantidad y baja energía de retención del agua Disponibilidad (cantidad, calidad y oportunidad) $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+ / \text{PO}_4\text{H}_2^- / \text{K}^+ / \text{SO}_4=$
Susceptibles a competencia, parasitismo y predación.	Condición fitosanitaria adecuada.
Simbiontes (fijación de N)	Permitir una nodulación eficaz.
Susceptibles al envenenamiento	Bajos niveles de Al^{+++} y otros elementos tóxicos.

Para que estos órganos vivos del vegetal funcionen adecuadamente es necesario que:

- Exploren y sostengan en su lugar a la planta. Para que las raíces puedan profundizar y ocupar cada vez mayor volumen de suelo es necesario que encuentren un sistema poroso acorde con las dimensiones radicales, que les permita pasar a través de él; si ello no ocurre, deben horadar la masa edáfica. El suelo ofrece una gama de resistencias mecánicas para la penetración radical algunas de fácil superación y otras no, pudiendo quedar reducido el espesor del suelo a muy pocos centímetros —caso del piso de arado—. Sin embargo, resistencias mecánicas muy débiles no son siempre deseables especialmente cuando el cultivo ya está en pleno crecimiento y ha ganado en altura, pudiendo por efecto del viento perder su postura erecta, volcándose.
- Como la mayoría de los organismos vivos, el sistema radical es aeróbico. De allí la necesidad de intercambio gaseoso entre atmo y edafoclima, de modo que se aseguren los requerimientos de oxígeno para las raíces. Además, para que ocurra la absorción de agua se requiere de permeabilidad celular, la cual depende de la disponibilidad de oxígeno. Además, la absorción activa de minerales requiere de energía metabólica, necesitando oxígeno para ello.
- Temperaturas edáficas apropiadas ya que las raíces son poikilotérmicas: no regulan su temperatura, sino que se equilibran con la existente en el ambiente circundante. La actividad radical depende estrechamente del nivel térmico reconociéndose una temperatura óptima a la cual la actividad es máxima y otras dos: máxima y mínima, a las que la actividad cesa; se denominan temperaturas cardinales. También la tasa de desarrollo (envejecimiento) está controlada por la experiencia térmica.
- Al igual que otros órganos vegetales, las raíces son acuáticas, en el sentido de que sus células contienen soluciones y están inmersas en un medio líquido; además requieren agua para la elongación celular. Sin embargo, por ser acuáticas y aeróbicas a la vez es necesario que exista una adecuada relación entre el agua y el oxígeno presente en la atmósfera edáfica, lo que en muchas ocasiones es motivo de perturbaciones en su normal funcionamiento.
- Actividad continua: el crecimiento y desarrollo radical es continuado y armónico, lo cual impone una sincronización con el crecimiento epigeo ya que, al ser las raíces heterótrofas (la fuente de energía para su metabolismo es externa) dependen de las tasas de crecimiento del cultivo y del reparto de azúcares sin los cuales se reduce su funcionamiento. Una vez que recibe esos hidratos de carbono requiere, para transformarlos en energía o en otros compuestos, de oxígeno para la respiración. Además, la formación de nuevo tejido radical necesita de la nutrición mineral en cantidad y oportunidad de suministro de nutrimentos, al igual que cualquier otro órgano vegetal.
- La absorción mineral: se destaca que el nitrógeno se recibe principalmente como nitrato y/o amonio disueltos en el agua (flujo en masa), mientras que el fósforo y el potasio se obtienen mayoritariamente por difusión.

- En las inmediaciones de las raíces: rizosfera, se producen importantes transformaciones e intercambios con los microorganismos que allí habitan. Las raíces en su zona de activo crecimiento (meristemática) excretan azúcares y algunos minerales que favorecen aquella actividad microbiana. En condiciones ambientales de crecimiento radical adverso, los hongos, bacterias y otros se tornan agentes parásitos o vectores de enfermedades, depredadores del tejido radical. Las zonas radicales más viejas que ya se han suberizado están relativamente más resguardadas de este ataque. Para que las enfermedades y depredaciones no afecten las raíces en activo crecimiento es necesario que en el suelo existan buenas condiciones fitosanitarias y edafoclimáticas, especialmente en lo que se refiere a oxigenación.
- Otras plantas (malezas) que ocupan el mismo volumen de suelo que el cultivo, absorben agua y nutrimentos, liberando —algunas— toxinas que perjudican el normal funcionamiento de las raíces. Un adecuado control fitosanitario reduce al mínimo la mencionada competencia (alelopatía).
- Ciertos microorganismos establecen con las raíces una relación simbiótica, donde ambos aportan elementos para mutuo beneficio. Es el caso, por ejemplo, de la relación existente entre las leguminosas y las bacterias del género *Rhizobium*. Para que ello ocurra el suelo debe ofrecer una adecuada reacción (pH), niveles de oxigenación y nutrición mineral.
- Como cualquier organismo vivo, las células radicales son susceptibles al envenenamiento, tal como es frecuente, por ejemplo, en suelos muy ácidos donde el Al está disponible en proporciones tóxicas.

Relaciones entre el suelo y la producción de los cultivos: modelo edafológico

La comprensión del crecimiento, desarrollo y producción de cultivos en diversas condiciones edafoclimáticas requiere disponer de un modelo conceptual que oriente acerca de cuáles son los procesos e interacciones más relevantes a ser investigados y expresados en términos numéricos.

Aquí se presenta un modelo cualitativo que reúne a los principales componentes y relaciones entre el suelo y la producción de los cultivos: la fitosfera y se enuncian los factores, mecanismos e interacciones que permiten comprender el modo en que el suelo controla la generación diaria de biomasa vegetal.

La investigación en temas agronómicos puede encontrar, en interpretaciones como la que aquí se presenta, un esquema concreto para ordenar e integrar en una labor multidisciplinaria a edafólogos, fisiólogos vegetales y micrometeorólogos, entre otros.

La Figura 2.2 es un esquema que relaciona mecanismos, factores e interacciones para interpretar el modo en que el suelo controla la producción de los cultivos:

1. En un día dado el cultivo se encuentra a una cierta edad fisiológica, como consecuencia de la experiencia térmica y fotoperiódica acumulada hasta entonces. Esta edad se expresa con un determinado nivel de desarrollo de las estructuras vegetales (fenología y alometría).
2. En ese día se presentarán determinadas condiciones meteorológicas y los órganos vegetales tendrán un cierto tamaño y forma (fitometría).
3. La interacción entre la fitometría existente y la meteorología hace que los factores microambientales varíen no solo temporalmente si no espacialmente dentro de la cubierta vegetal. Esto da origen a «perfiles» radiante, térmico, hídrico, gaseoso y aerodinámico (Figura 2.3) resultantes de la mutua influencia entre la población vegetal y la atmósfera: el fitoclima.
4. El crecimiento y demanda máxima de agua del cultivo dependen de los estímulos que recibe este microambiente. Estos estímulos son diferentes en los diversos estratos foliares y por eso es también distinta la contribución de cada uno de ellos en el crecimiento y transpiración totales del cultivo.

Desde un punto de vista cuantitativo, el crecimiento de las plantas depende del excedente de carbohidratos sintetizados en relación con los que sirven de sustrato a la respiración.

La fotosíntesis tiene lugar solo durante el período diurno mientras que la respiración procede ininterrumpidamente las veinticuatro horas del día. Además de las hojas, órganos principales de la fotosíntesis, otra parte considerable de las plantas, por ejemplo: raíces, tejidos de sostén y de reproducción, etc., respira día y noche, contribuyendo nada o poco, por la vía fotosintética, a la captación neta de gas carbónico de la atmósfera. A escala diaria el crecimiento, c , puede representarse como un balance entre las intensidades de síntesis y de consumo de carbohidratos, expresadas éstas como flujo de dióxido de carbono entre la atmósfera y la vegetación:

$$c = (B - rh) - rs - cn$$

$$c = FN - rs - cn$$

$$c = cd - cn$$

En estas ecuaciones, B representa la fotosíntesis bruta del follaje; rh la respiración de las hojas durante el día y rn la respiración total nocturna del cultivo, que comprende tanto tejidos foliares como no foliares.

La diferencia entre fotosíntesis bruta y respiración foliar diurna es la fotosíntesis neta, FN . Ella representa la producción neta de material vegetal por parte del follaje. Si se le sustrae la cantidad consumida durante el día por los tejidos no foliares en su mayoría tejidos de sostén, rs , se obtiene el crecimiento neto y diurno, cd . Durante la

noche no existe acopio de gas carbónico, por lo cual la respiración total nocturna representa un crecimiento negativo, $-cn$.

5. El aporte diario de fotosintetizados y las reservas que se remobilizan desde los tejidos, constituyen la fuente para el crecimiento de raíces, hojas, tallos, frutos, etc. En cultivos que se desenvuelven sin restricciones materiales, energéticas o fitosanitarias, el reparto se efectúa de acuerdo con relaciones alométricas características del cultivo en consideración y según su edad fisiológica o grado de desarrollo. Aún en cultivos donde el crecimiento se ve limitado, la proporción de él que corresponde a cada órgano vegetal, continúa siendo función de la edad fisiológica, pero, la cantidad absoluta de biomasa obtenida dependerá de la que ha sido fotosintetizada y respirada durante el día en cuestión. Por este motivo, por ejemplo, los índices de cosecha que se logran en cultivos que han crecido en condiciones limitantes son diferentes a los que se han desenvuelto sin restricciones.
6. El crecimiento máximo diario será el producto de interacciones entre los factores meteorológicos que condicionan la fotosíntesis y respiración en los distintos estratos foliares de las plantas y la fitometría de un cultivo plenamente dotado de agua, fitonutrientes y libre de pestes y plagas. En la fotosíntesis bruta influyen: (a) el área foliar; (b) la luz, que es una fracción de la radiación solar, y (c) el anhídrido carbónico, el cual debe difundirse desde la atmósfera sobre el cultivo hasta los distintos estratos foliares que comprende la cubierta vegetal. Las características aerodinámicas de la vegetación, interactuando con el viento crean un régimen particular de turbulencia determinando la mayor o menor facilidad con que se realiza esa difusión de dióxido de carbono. La turbulencia que así se establece afecta también simultáneamente los intercambios de calor sensible y de vapor de agua entre la vegetación y el aire circundante.

7. Además, el cultivo está permanentemente sometido a un intercambio de energía con su ambiente, cuyo saldo es la radiación neta, o radiación absorbida por la vegetación. Esta energía es mayormente utilizada en evaporar agua: transpiración, y/o en la transferencia de calor sensible al aire que la rodea. El balance de energía se expresa en la temperatura del follaje, la cual representa así el efecto neto de todos los procesos de intercambio de energía (radiación, calor) y materia (vapor) entre la vegetación y su ambiente. En la temperatura foliar se entrelazan los procesos del desarrollo, la respiración, de la fotosíntesis y de la transpiración. Por ejemplo, ella gobierna la intensidad de la respiración, así como la de algunos mecanismos de la fotosíntesis (carboxilación, fotorrespiración) y determina la presión de vapor en las hojas, cuya diferencia respecto a la presión de vapor en el exterior normalmente inferior impulsa el movimiento transpiracional. Cuando la humedad del suelo es suficiente para mantener una adecuada hidratación en los tejidos vegetales, los estomas estarán plenamente abiertos. En esta condición no solo la transpiración será máxima sino también lo será la fotosíntesis y, por ende, el crecimiento. Si no existen influencias restrictivas en el suelo, tales como insuficiencia hídrica, mineral y de oxígeno, ni efectos de plagas, el crecimiento y la demanda de agua alcanzarán su máximo valor.
8. En condiciones de desenvolvimiento normal del cultivo una proporción del crecimiento diario se destina a las raíces utilizándose para engrosar y/o elongar raíces existentes y para formar nuevas raíces las que explorarán y ocuparán nuevos volúmenes de suelo.
9. Así se conformará una cabellera radical que, de no mediar impedimentos edáficos, mostrará una típica distribución espacial y temporal. Por eso, si un cultivo crece sin restricciones es posible caracterizar experimentalmente tanto la profundidad como el reparto vertical relativo de biomasa radical.

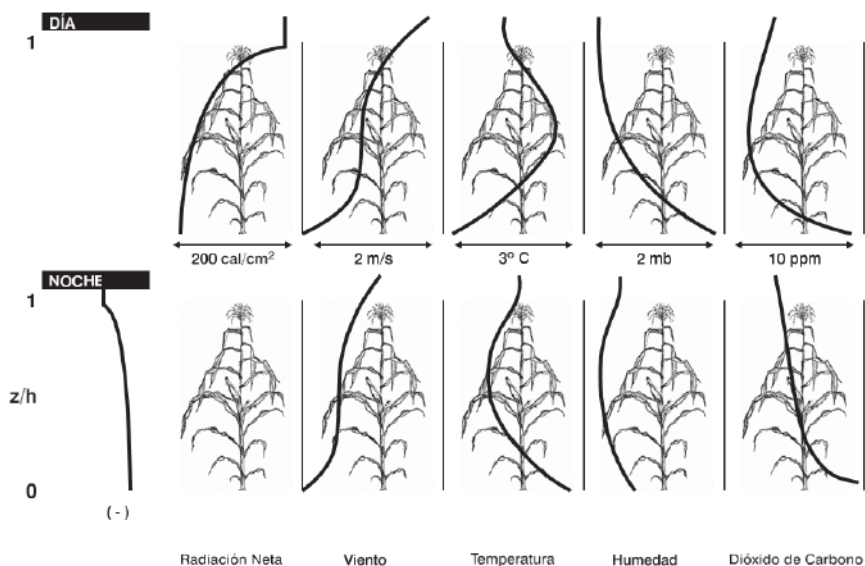


FIGURA 2.3. EJEMPLOS DE PERFILES MICROMETEOROLÓGICOS PRODUCIDOS POR LA INTERACCIÓN ENTRE EL CULTIVO Y LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS (Z/H: ALTURA RELATIVA DENTRO DE LA CUBIERTA VEGETAL)

10. Sin embargo, algunos de los horizontes o estratos que constituyen un suelo, pueden presentar rasgos, más o menos permanentes, que impiden o restringen la expansión radical, alterando la profundización y distribución típicas de las raíces del cultivo. Ejemplos de factores limitantes son la presencia de roca consolidada, endurecimientos edafogénéticos, salinidad, napa freática permanente y minerales en cantidades tóxicas (ej.: aluminio en suelos ácidos).
11. Además, alguna condición mecánica del suelo, relacionada con la resistencia a la penetración, o con la oxigenación puede inhibir temporalmente la exploración y ocupación radical de una zona en el interior del suelo, contribuyendo también a distorsionar el patrón característico de enraizamiento. Tanto la resistencia a la penetración como la disponibilidad de oxígeno dependen, por motivos distintos, del estado hídrico del suelo:
 - a) Más o menos recientemente se ha reconocido que elevadas resistencias mecánicas no solo disminuye o impide la elongación de raíces, sino que aumenta notablemente la respiración radical y
 - b) puede modificar el reparto de hidratos de carbono, favoreciendo el envío hacia raíces en detrimento de los órganos aéreos: el cultivo, visto desde afuera, parece que ha detenido el crecimiento.
 - c) En condiciones extremas en que las raíces no pueden elongarse y, sin embargo, el flujo de fotosintatos está dirigido hacia ellas, puede saturarse la concentración en floema y cloroplastos reduciéndose o

- deteniendo la fotosíntesis. Esto conduce a un hecho llamativo: los estomas están abiertos, hay transpiración pero no hay flujo de CO_2 .
- d) Además, hay evidencias que, se reduce notablemente la elongación tanto foliar como del tallo: las plantas quedan con menor altura.
- e)⁶ Si el volumen edáfico afectado por elevadas resistencias mecánicas es importante se reduce mucho la proporción de raíces nuevas que elongan y por lo tanto es menor la longitud de raíces con elevada conductividad hidráulica radical: puede limitarse por este mecanismo la absorción de agua y el cultivo entrar en estrés hídrico.
12. Evidentemente, la absorción de agua y de minerales se verá alterada al modificarse por motivos edáficos el momento y proporción de raíces que ocupan los distintos horizontes del suelo.
Una consecuencia importante de este hecho es que cambiará sustancialmente la cantidad y oportunidad en que serán extraídos los nutrientes y el agua de cada estrato de suelo.
13. La absorción de agua y de minerales se coarta en condiciones de baja provisión de oxígeno en el suelo, o por una concentración excesivamente alta de gas carbónico. En estas condiciones se reduce la actividad metabólica de las células radicales incrementándose la resistencia al flujo de agua a través de membranas y citoplasma. Además, se alteran los mecanismos activos de absorción mineral los cuales suponen un consumo de energía por el mecanismo acumulador, que debe operar contra un gradiente de concentración. Esta energía deriva de la respiración aeróbica de las células radicales, y por lo tanto su intensidad depende directamente del suministro de oxígeno.
La respiración aeróbica de las raíces comprende un proceso continuo de absorción de oxígeno y liberación de gas carbónico. Si este intercambio de oxígeno y anhídrido carbónico se reduce o interrumpe, se deterioran casi de inmediato los procesos metabólicos de las raíces. Un intercambio gaseoso inadecuado puede no solo reducir la absorción sino provocar la muerte de una parte o de todo el aparato radical.
14. La demanda de oxígeno para la respiración radical, en un horizonte determinado, está sujeta a múltiples y complejas circunstancias biológicas, histológicas y fisiológicas a nivel celular; pero una de las variables de la rizosfera que más influye en la intensidad respiratoria es la temperatura del suelo en contacto inmediato con los tejidos radicales. La demanda total de oxígeno será por lo tanto función de la tasa respiratoria y de la cantidad de raíces presentes.
15. La temperatura del suelo próxima a las raíces es el resultado de los intercambios de energía sensible que se producen entre el ambiente aéreo o «atmoclíma», en inmediato contacto con la superficie del

6 Este ítem no está representado en la Figura 2.2.

suelo, y la porción de suelo ubicada por debajo de la zona enraizada. El resultado de ese balance de energía depende de las características conductoras de calor de los estratos edáficos, particularmente de los enraizados y los enraizables.

Debe destacarse que los parámetros térmicos de cada estrato del suelo varían con la textura y el contenido de materia orgánica y muy principalmente con la humedad. Por ser ésta variable en el tiempo, las propiedades termales exhiben un marcado dinamismo.

16. La oferta de oxígeno para las raíces es también un proceso dinámico y su intensidad está determinada por los factores que gobiernan la velocidad del intercambio gaseoso entre la atmósfera y el suelo. A pesar de existir continuidad entre la fase gaseosa del suelo y la atmósfera, es decir entre atmoclima y edafoclima, la composición cuantitativa de ambos es diferente. Esto revela que no existe un rápido equilibrio y que continuamente se consume oxígeno y se genera gas carbónico. La ausencia de equilibrio promueve la transferencia de estos gases entre el suelo y la atmósfera. La presión total del aire del suelo es prácticamente constante, e igual a la presión atmosférica, y por esta razón, no ocurren movimientos convectivos de gases entre el atmo y edafoclima. La transferencia, en cambio se realiza por difusión. De acuerdo con la ley de Fick, la difusión es impulsada por los gradientes de concentración de cada gas en particular y está controlada por la difusividad neumática a través del intrincado espacio poroso edáfico. Así, gradiente y difusividad, determinan la disponibilidad de oxígeno y concentración de anhídrido carbónico a distintos niveles dentro del suelo.
17. En el suelo, y en particular en cada horizonte, el valor de la difusividad de los gases es variable debido a que las partículas sólidas y las películas de agua bloquean el paso y restringen el área de flujo.
18. El agua de cada horizonte enraizado que logra ingresar al cultivo por los mecanismos de absorción activa o pasiva constituye el agua ofrecida por el suelo para suplir las demandas originadas en la foliosfera (sistema microatmosférico ocupado por el follaje del cultivo)
La absorción activa de agua, es decir la que requiere energía metabólica, no es desde un punto de vista cuantitativo importante, ya que en general no es capaz de aportar más del 5 % de la transpiración total. Habría así motivo para desdeñar la importancia del metabolismo radical en la absorción y consiguiente oferta hídrica. Sin embargo, la absorción pasiva, principal mecanismo de aporte hídrico, también se reduce significativamente cuando disminuye la actividad metabólica por que se altera la permeabilidad de las membranas y se incrementa la resistencia al flujo. La absorción pasiva del agua se inicia con la transpiración en las hojas. La energía para este proceso proviene de la radiación solar y/o calor de la atmósfera: la planta actúa solo

como un conducto de agua desde el suelo a la atmósfera, de aquí la denominación de absorción «pasiva».

En las plantas, el agua forma un «continuum» porque las paredes celulares están constantemente bañadas por ella. Debido a esta continuidad hídrica, los cambios de energía son transmitidos de célula a célula, de tejido a tejido y de órgano a órgano. Así se establece el flujo desde el suelo hasta la atmósfera a través de la planta.

Para que el flujo de agua entre la rizosfera y la foliosfera no se restrinja es necesario que el sistema radical permanezca siempre permeable. El paso del agua desde el exterior de la raíz hasta los vasos del xilema tiene un movimiento obligado a través de la endodermis, caracterizada por células cuyas paredes se encuentran recubiertas y soldadas entre sí por las bandas de Caspari. En esta zona, el paso del agua solo puede realizarse a través de membranas celulares y citoplasma. La permeabilidad del protoplasma se ve afectada por la aireación y, en general, por cualquier factor que actúe sobre el metabolismo. A esta causa se atribuye la influencia de la oxigenación en la absorción del agua, a pesar de ser éste un fenómeno fundamentalmente regido por principios físicos.

19. El agua situada en los intersticios del suelo está sometida a diversas fuerzas que tienen su origen en la presencia de sales disueltas en el agua, en fenómenos de interfase en los poros y entre partículas coloidales; otras fuerzas exógenas como la gravedad, presión hidrostática y barométrica. Estas fuerzas hacen que el agua sea absorbida y retenida temporalmente por el suelo; que sea transferida o distribuida de un punto a otro en el perfil; que drene o percole, que fluya hacia la superficie y sea evaporada; y que se desplace hacia las raíces de las plantas y sea transpirada hacia la atmósfera.

La cantidad total y grado de aprovechamiento del agua del suelo por los cultivos dependen estrechamente del nivel energético o potencial del agua en el suelo. La fuerza con que el agua es retenida por el suelo depende de su contenido. Contenido que, según ya se mencionó, afecta simultáneamente al flujo calórico y gaseoso, y además altera la consistencia de las estructuras edáficas, modificando la resistencia a la penetración radical.

20. Cuando la demanda de agua supera la oferta se produce estrés hídrico, deficiencia de agua que produce alteraciones metabólicas. Esta situación va acompañada por una reducción en la tasa de crecimiento diario por varias razones, entre las que se destacan las siguientes: se produce un incremento en la temperatura foliar y con ella modificaciones en la tasa respiratoria; que normalmente reducen la fotosíntesis neta, se altera la actividad enzimática por disminución del potencial foliar, provocando perturbaciones en la respiración y fotosíntesis; aumentan

las resistencias estomáticas, del mesofilo y bioquímicas vinculadas al flujo del gas carbónico; y se limita la expansión foliar.

21. La tasa de crecimiento, máxima si el cultivo ha estado plenamente abastecido de agua o restringida si fue afectado por deficiencia hídrica, establece una exigencia cuantitativa de fitonutrientes para permitir ese crecimiento de biomasa. Esto constituye la demanda biosintética diaria de minerales.
22. El requerimiento mineral podrá ser total o parcialmente suplido por las reservas que ofrece el suelo en ese momento.
La cantidad de fitonutrientes obtenibles de cada horizonte enraizado dependerá de la actividad radical y de la fertilidad aprovechable. Esta última es el resultado de la dinámica particular que presenta cada nutrimento en el suelo.
23. De acuerdo con la dotación de agua y nutrientes del suelo se conseguirá materializar el crecimiento de un día en la vida del cultivo. Este crecimiento será el máximo posible, según la interacción fitoclimática, si no experimenta estrés hídrico ni mineral.
24. La biomasa que diariamente se genera será repartida a los diversos órganos: hojas, tallos, inflorescencia y raíces, según una distribución que depende del desarrollo de cada estructura.
25. El incremento en peso de los diversos tejidos de la planta va acompañado por cambios en otros atributos de la vegetación como, por ejemplo, altura, ancho y área foliar y profundidad de enraizamiento. Se modifica así continuamente, la fitometría del cultivo.
26. La secuencia de eventos se reitera al día siguiente con una nueva fitometría, bajo distintas condiciones meteorológicas, y circunstancias hídricas y minerales en el suelo.

Cuarta aproximación: cualidades deseables del suelo durante un ciclo agrícola

Durante un ciclo agrícola (Figura 2.4) pueden distinguirse 5 etapas: I) Siembra, II) Germinación y emergencia, III) Crecimiento y desarrollo del cultivo, IV) Cosecha, V) Rastrojo, barbecho.

Para que un suelo sea considerado en buen estado físico y fértil es necesario que presente otras condiciones, además de las que se detallaron en párrafos anteriores, las cuales correspondían mayoritariamente a la etapa III.

Durante las etapas I (siembra) y V (barbecho) se requieren buenas condiciones mecánicas del suelo para el laboreo: mínima necesidad de tracción, patinaje, amasado y pulverización de la tierra.

Solo si el suelo, en su horizonte superficial, ofrece adecuadas condiciones térmicas, hídricas y de oxigenación, la germinación es óptima; si las plántulas no tienen resistencias mecánicas en la superficie (costra), puede emerger (Etapa II).

Las condiciones necesarias para la etapa III son expuestas en el Cuadro 2.3, este período finaliza cuando el cultivo llega a la madurez fisiológica, es decir cuando cesa el acopio de biomasa. Recién allí se inicia la etapa IV que culmina con la cosecha del grano o producto útil. Para que esta cosecha pueda realizarse eficientemente y sin dificultades es indispensable contar con un «buen piso» para el pasaje de la maquinaria. Condición necesaria pero no siempre adecuadamente encontrada en los suelos.

Resumiendo: las principales funciones y condiciones favorables que debe ofrecer un suelo durante un ciclo agrícola, adicionales a las mencionadas con anterioridad son:

- Permitir una fácil emergencia de las plántulas
- Asegurar un fuerte anclaje del cultivo
- No es deseable que presente: Falta de piso para permitir trabajos de pulverizaciones, de cosecha del cultivo e inadecuadas condiciones para el laboreo y preparación de la cama de siembra.

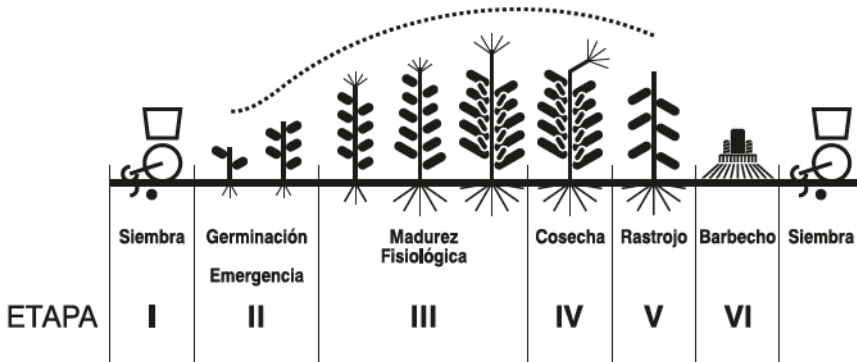


FIGURA 2.4. ETAPAS DURANTE UN CICLO AGRÍCOLA CON INTERÉS PARA EL MANEJO DEL SUELO

Sinopsis de los requisitos del suelo ideal

Para sintetizar, podemos diferenciar funciones directas del suelo sobre el crecimiento diario vegetal, funciones indirectas que contribuyen o limitan al cumplimiento de las funciones directas y una función de continua regeneración (sistemogénesis) de las propiedades y condiciones edáficas deseables.

1. Funciones directas: proveedor, afectan directamente al crecimiento del cultivo. Son:
 - 1.1. Provisión de agua fácilmente disponible.
 - 1.2. Suministrar nutrimentos en cantidad, oportunidad y proporciones adecuadas.
2. Funciones indirectas:

- 2.1. Afectan al funcionamiento de raíces y otros órganos: tales como las semillas durante la germinación, las plántulas durante la emergencia, la biomasa aérea por falta de anclaje, la exploración y actividad absorbente radical, *hábitat*
- 2.2. Afecta a la disponibilidad de los recursos necesarios, *intermediario*
 - 2.2.1. Actividad de organismos benéficos: fijadores de nitrógeno atmosférico, mineralización, agregación, perforadores (generadores de huecos) y transportadores de materiales y microorganismos.
 - 2.2.2. Ingreso, egreso, circulación, almacenamiento de materia y energía en el suelo que afectan a los anteriores.
3. Permanencia temporal de las funciones directas e indirectas: estable y resiliente.

CUADRO 2.3. PRINCIPALES FUNCIONES EDÁFICAS PARA LA PRODUCCIÓN SOSTENIDA DE LOS CULTIVOS (LOS NÚMEROS ENTRE PARÉNTESIS HACEN REFERENCIA A QUÉ FUNCIÓN, DIRECTA O INDIRECTA, REPRESENTA)

Función básica	Requisitos
Intermediario = (2.2.1)	Ofrecer un adecuado espesor útil Mantener condiciones térmicas propicias Garantiza aireación suficiente Amortiguar la intermitencia e irregularidad del suministro hídrico
Proveedor = (1)	Suministrar agua y nutrientes en cantidad, oportunidad y proporciones adecuadas
Hábitat = (2.1 y 2.2.2)	Ídem 1,2,3,4 Carecer de sustancias tóxicas Permitir activa fijación biológica de N Favorecer la eliminación de toxinas radicales Carecer de movilidad
Estable = (3)	No ser susceptible a la degradación y auto-mejorarse (resiliente)

Atributos del suelo ideal

Un suelo nace cuando su material de origen queda expuesto, en la superficie terrestre, a la acción de los agentes del medio al cual pertenece desde ese momento.

Los cambios térmicos, las lluvias, las excreciones y secreciones de su incipiente biota y las reacciones químicas entre los productos resultantes de dichas acciones y el propio material original alteran a este material; la actividad biológica crece y sus restos biodegradados se transforman en humus, enriqueciendo orgánicamente al suelo, especialmente en su superficie y cerca de ella y si las lluvias producen, en ciertos momentos, excedentes

hídricos sobre un material permeable, comienzan a migrar en profundidad los componentes solubles y pseudosolubles.

Como resultado de tales acciones el suelo se estratifica (evoluciona); sus propiedades cambian e influyen sobre la biota; aumenta la biodiversidad. Las sucesiones vegetales reflejan esos cambios: predominan, en cada etapa, distintas especies, en función de su mejor adaptación a las nuevas condiciones.

Sin embargo, la aptitud agrícola de un suelo no siempre concuerda con su grado de evolución. Algunos son más fértiles o productivos (desde el punto de vista agronómico) durante las primeras etapas de su evolución; otros lo son al final o en un punto determinado de su evolución. Por eso interesa conocer el proceso evolutivo de cada suelo cultivado y averiguar si los efectos antrópicos de su uso aceleran, retardan o desvían el curso del proceso natural, para actuar en consecuencia.

Sea cual fuere el caso, para saber si un «paquete» tecnológico conduce a una agricultura sostenible es necesario controlar periódicamente la evolución de variables críticas. En Australia y Nueva Zelandia (Hamblin, 1992, Australian Agr. Council, 1993) discriminan, para ello, dos niveles: indicadores y atributos.

Un indicador es un conjunto de atributos o mediciones que permiten emitir un juicio acerca de un aspecto particular por ejemplo de la calidad del suelo para sostener la producción o del agua (si es para riego).

Los atributos son indicadores numéricos de parámetros individuales. Ej.: tenor de materia orgánica, pH, densidad del suelo, etc. En la jerga cotidiana muchos utilizan el término «indicadores» para referirse a los «atributos».

En trabajos anteriores (Orellana y Pilatti, 1996; Pilatti y Orellana, 2012) seleccionaron un conjunto de atributos de probable idoneidad para controlar efectos degradantes o recuperadores de la «calidad del suelo».

Cuando se adopta un «paquete» tecnológico y se lo aplica a determinado agroecosistema es necesario saber si esa tecnología conduce a un sistema de Agricultura Sostenible (AS) o nos aleja de él. Esto implica, entre otras cosas, controlar si la calidad del suelo mejora o —por el contrario— se deteriora. Para ello es menester recurrir a elementos de control (atributos); estos orientarán acerca de si corresponde mantener, acentuar o modificar la tendencia evolutiva de esos indicadores.

Cabe hacer una salvedad: para lograr la sostenibilidad total del sistema productivo, aunque se parta del agroecosistema (lote o fitosfera), deberá luego evaluarse en otros niveles de organización como el agrosistema (predio, establecimiento) y la región.

Requisitos edáficos para cultivos agrícolas

En el Cuadro 2.4 se diferenciaron cuatro funciones básicas que debe cumplir el suelo en orden a favorecer altos niveles de producción sostenible:

- *Intermediario* entre la oferta meteorológica y la demanda de los cultivos, especialmente referido al aporte del agua, oxígeno y radiación (temperatura): Se pretende que el suelo no entorpezca un suministro normal y que amortigüe excesos o deficiencias.
- *Proveedor* de elementos que provienen de la constitución orgánico–mineral del suelo (nutrimentos) en cantidad y oportunidad acorde a las exigencias que el cultivo requiere.
- *Hábitat* de raíces y demás organismos benéficos, ofreciendo condiciones compatibles con los límites de tolerancia ambiental y favoreciendo la eliminación de toxinas.
- *Estable* con respecto al mantenimiento de las propiedades edáficas necesarias para cumplir las anteriores funciones. Se destaca, en especial, la resistencia a la erosión y su capacidad para automejorarse cuando se ha degradado (resiliencia).

Requisitos que debe cumplir el suelo ideal

En el Cuadro 2.4 además de las cuatro funciones básicas del suelo se enumeran los requisitos que específicamente debe cumplir para ser considerado ideal y se sugieren los atributos a evaluar.

1. Ofrecer un adecuado espesor útil

La utilidad de un espesor de suelo para los cultivos puede presentar tres variantes, según para qué se requiera:

- a) Útil para sostener al cultivo en pie, resistiendo el empuje del viento sobre la parte epigea del vegetal sin que se vuelque.
- b) Útil para permitir una adecuada calidad del producto y facilidad de cosecha cuando el interés económico es por un órgano hipogeo, caso del maní, espárrago, papa o zanahoria.
- c) Útil para que se extiendan normalmente las raíces, en busca de agua y nutrimentos.

Los ítemes *a* y *b* dependen estrechamente de la consistencia del suelo. El primero, en húmedo y mojado, el segundo —principalmente— en seco y húmedo.

El requisito *c* depende tanto de características del cultivo (puede variar entre 30 cm de profundidad de enraizamiento hasta más de 200 cm) como de atributos del suelo, ya que un menor espesor puede ser suplido —en parte— por una mayor capacidad de almacenamiento de agua y disponibilidad de nutrimentos.

CUADRO 2.4. ATRIBUTOS PARA IDENTIFICAR SI SE CUMPLEN LAS FUNCIONES (SERVICIOS) DEL SUELO IDEAL

Función básica	Servicios del suelo ideal	Atributos a evaluar
	a) Ofrecer un adecuado espesor útil	1) Profundidad enraizable 2) Densidad del suelo 3) Resistencia mecánica a la penetración radical 4) Perfil cultural 5) Intervalo hídrico óptimo
Intermediario	b) Mantener condiciones térmicas propicias	6) Actividad biológica total y de biodegradación
	c) Suficiente aireación	7) Macroporos, especialmente bioporos 8) Porosidad textural y estructural 9) Meso y macrofauna 10) Sello superficial (formación potencial)
	d) Amortiguar intermitencia e irregularidad del agua útil para los cultivos	11) Intervalo hídrico óptimo 12) Tasa de infiltración 13) Perfil cultural y exploración de las raíces 14) Cobertura vegetal (viva y muerta) 15) Capacidad de almacenamiento de agua 16) Lámina de agua fácilmente utilizable
Proveedor	e) Suministrar nutrimentos	17) N activo o potencialmente mineralizable 18) Disponibilidad de P, K, Ca, etc. 19) Tasa de mineralización del N
	Idem a), b), c), d)	20) Costra superficial y emergencia
Hábitat	f) Carecer de sustancias tóxicas o nocivas	21) Reacción del suelo (pH) 22) Complejo de intercambio catiónico, especialmente % Na intercambiable 23) Carbono orgánico 24) Al y Mn solubles 25) Salinidad
	g) Permitir una activa fijación de nitrógeno	26) Tasa de fijación simbiótica y asimbiótica
	h) Favorecer la eliminación de toxinas radicales	27) Capacidad de intercambio catiónico 28) Macroporosidad
	i) Carecer de movilidad	29) Coeficiente de extensibilidad lineal
Estable	j) No ser susceptible a la degradación y resiliente	30) Estabilidad de agregados 31) Escurrimiento superficial 32) Ecuación universal (USLE)

2. Mantener condiciones térmicas propicias

Las semillas, raíces y otros órganos hipogeos son poikilotérmicos, es decir no autorregulan su temperatura, sino que se equilibran con la existente en el ambiente circundante. Su actividad depende estrechamente del nivel térmico, reconociéndose una temperatura óptima a la cual la actividad es máxima, y otras dos temperaturas, máxima y mínima, a las cuales la actividad cesa (temperaturas cardinales).

El suelo como tal no genera energía térmica, sino que aporta la que recibe del ambiente externo, y su función como intermediario es la de lograr que pueda mantenerse lo más próxima posible del nivel óptimo y evitar que exceda los niveles de tolerancia térmica vitales del cultivo (máxima y mínima).

Las fluctuaciones térmicas son máximas en el espesor del horizonte A. Este debe poseer propiedades que le permitan mantener temperaturas aptas para la germinación, emergencia, elongación y funcionalidad de las raíces, así como para el resto de la biota edáfica.

Los principales elementos de regulación térmica son: (a) cubiertas vegetales, vivas y muertas, (b) albedo del suelo, que depende del color, (c) textura y contenido de materia orgánica, (d) contenido hídrico y (e) rugosidad superficial.

En climas o estaciones cálidas, el color del suelo debe ser claro (para reflejar la mayor parte de las radiaciones), el contenido hídrico, elevado (para permitir una transmisión más profunda del calor y moderar la amplitud térmica) y con poca rugosidad superficial (para que no disminuya el efecto ventilante del viento y también para que no se reduzca el albedo). En cambio, para condiciones frías, los requerimientos son los inversos.

3. Garantizar suficiente aireación

Como la mayoría de los organismos vivos, las raíces son aeróbicas. He aquí la necesidad de un adecuado intercambio gaseoso entre la atmósfera y el aire del suelo, de modo de asegurar que se cumpla el requerimiento de oxígeno de las raíces.

Este requisito depende estrechamente del régimen pluviométrico y de la trama porosa del suelo. Particularmente:

- a) Una equilibrada distribución de macro y microporos.
- b) Continuidad vertical de los macroporos para facilitar el ingreso de oxígeno, la recarga hídrica de horizontes superficiales y el avenamiento interno ante excesos de agua.

4. Amortiguar la intermitencia e irregularidad del suministro de agua útil para los cultivos

Consiste en la aptitud del suelo para captar agua (infiltración), retenerla (almacenamiento) y eliminar excedentes (drenaje), almacenando una alta proporción de agua accesible y fácilmente utilizable por los cultivos.

Esta función ubica al suelo como intermediario entre las precipitaciones (discontinuas) y la absorción de agua por las plantas (continua) cumpliendo el rol de amortiguar la discontinuidad.

Si esto se cumple, se reducen o eliminan los lapsos con estrés hídrico (por falta de agua) o de oxígeno (por anegamiento interno del espesor enraizable).

5. *Suministrar agua y nutrimentos en cantidad, oportunidad y proporciones equilibradas*

Para cumplir con esta condición, el material de origen debe estar formado por minerales ricos en los principales elementos de la nutrición vegetal (K, P, Ca, Mg, etc.) y tener una reacción del suelo (pH) próxima a neutra ya que de ella depende la disponibilidad de varios nutrimentos. En cuanto al N, S y también de P requerirá la dotación de una apreciable reserva de materia orgánica en condiciones de ser liberadas gradualmente y en cantidad suficiente para abastecer a los vegetales.

También es necesario que los distintos nutrimentos mantengan entre sí determinadas proporciones a fin de evitar el bloqueo en la absorción de uno porque hay demasiado del otro (antagonismo).

6. *Carecer de sustancia tóxicas*

Las fitotoxicidades más comunes, de origen edáfico, se deben a:

- a) La presencia de sales, particularmente de cloro y sodio.
- b) Exceso de alcalinidad sódica.
- c) Acidez muy alta, que genera alta solubilidad del Al y Mn (ambos tóxicos).

7. *Permitir activa fijación biológica del N*

En el aire hay gran cantidad de N (76 %), elemento esencial para la nutrición vegetal; sin embargo, no está disponible directamente. De allí la importancia de los fijadores biológicos en el suelo, tanto simbióticos como asimbióticos. Este ingreso «gratis»⁷ de N es fundamental en muchas rotaciones de cultivo para mantener el balance de ese mineral y obtener elevados rendimientos sin recurrir a los abonos que incrementan los costos empresariales, presentan riesgos de acidificación o de alcalinización y de contaminación de aguas subterráneas.

8. *Favorecer la eliminación de toxinas radicales*

Algunas raíces vivas excretan toxinas que impiden o dificultan el crecimiento de otras raíces de la misma planta o de otras. Este hecho fue demostrado por

⁷ En realidad, no es gratis ya que el vegetal utiliza una importante cantidad de energía fotosintetizada para intercambiar con el simbionte.

Pickering (Papadakis, 1954) y hoy se lo denomina alelopatía. Las sustancias tóxicas son inestables oxidándose rápidamente en contacto con el aire. En suelos profundos (raíces no confinadas), aireados y con muchos coloides (absorberían a las toxinas) el efecto alelopático es nulo o mínimo.

9. Carecer de movilidad

Los suelos que presentan arcillas expandibles al contraerse cuando se secan y expandirse al humedecerse adquieren una movilidad que causa daño al cultivo ya que muchas raíces son —literalmente— podadas y no solo se reduce la cabellera radical, sino que esos sitios son propicios para el ataque de variadas enfermedades.

Además, la movilidad de los suelos, es contraproducente para la durabilidad de las labores profundas ya que una vez efectuado —por ejemplo— un subsolado, bastarán unos pocos ciclos de hinchamiento y contracción para que desaparezca totalmente el efecto de la labranza.

Además, cuando por movilidad se generan grietas horizontales se produce una discontinuidad en los capilares del suelo, interrumpiéndose el movimiento vertical del agua.

10. Estable: no ser susceptible a la degradación, especialmente a la erosión

Al quedar descubierto, el suelo solo puede resistir a la erosión eólica si posee una superficie rugosa (aterronada), con agregados de alta estabilidad. En caso de posible erosión hídrica debe —además— tener facilidad para captar agua con rapidez desde la superficie (macroporosidad superficial abierta) y no presentar pendientes que lo tornen susceptible de ser erosionado. En ambos casos, ello implica ser capaz de sostener una cubierta vegetal protectora (viva o muerta), alternativa que puede faltar o ser deficitaria, al menos temporariamente, entre labranzas y postemergencias.

Finalmente debe ser estable con respecto a las propiedades necesarias para cumplir con las anteriores funciones. El carácter de *estable* 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 a esta función: integridad. Contribuyen a caracterizarla: 22) Estabilidad de agregados; 23) Peligro de erosión.

Adicionalmente pueden diferenciarse dos servicios distintos para la función de estabilidad:

1. Resistir, oponerse al deterioro que pueden provocar elementos exógenos al suelo tales como:
 - Precipitaciones que originan erosión, sellado superficial y/o lavado de nutrimentos.
 - Viento, con su efecto negativo: la erosión eólica y el vuelco de los cultivos.

- Agroquímicos que pueden dañar ya sea porque
 - Acidifican o alcalinizan.
 - Salinizan.
 - Contaminan, impidiendo la actividad biológica.
 - Acciones mecánicas ejercidas por la maquinaria agrícola, como por ejemplo el amasado, compactación, pérdida de porosidad, formación de microrelieves, pulverización de la estructura, reducción de la biodiversidad.
2. Automejoramiento de propiedades perdidas o disminuidas, denominado *resiliencia* por Rodríguez (1996) a través de mecanismos como: Agregación, Mullimiento, Bioporosidad, Agrietamiento, Capacidad amortiguadora, Reciclado de plaguicidas, Retención de nutrimentos, Migración ascendente y Biodiversidad.

Recuérdese que los primeros centímetros del suelo son los que tienen mayor concentración de nutrimentos, y que su recuperación es lenta y difícil. Para lograr la sostenibilidad del recurso suelo debe tenerse presente que es necesario:

- Mantener los niveles de minerales (restitución). Durante muchos años se ignoró la Ley de Restitución que indica que deben reponerse todos los minerales que son extraídos por las cosechas o quedan no disponibles para los cultivos por diversos motivos. Ese desconocimiento se manifiesta tanto en el manejo habitual de las tierras, a las que no se le repone lo que se les extrae; y en la evaluación económica que se realiza del resultado empresarial, al no contabilizar como gasto la disminución del stock de minerales.
- Proteger físicamente la superficie del terreno (protección).
- Mejorar y posteriormente mantener las propiedades físicas y biológicas relevantes del horizonte A (mantenimiento).
- Corregir la creciente acidez y la compactación superficial (reparación)
- Evitar la salinización y/o alcalinización.

En el Cuadro 2.5 se presenta cuáles funciones pueden alterarse por la degradación y qué repercusión económica puede tener cada una.

CUADRO 2.5. SERVICIOS CON VALOR ECONÓMICO QUE PRESTA EL SUELO PARA LA PRODUCCIÓN VEGETAL

Servicios que presta el suelo para la producción vegetal	Modificaciones negativas del servicio a causa del uso y/o evolución natural	Consecuencias indeseables con impacto en el resultado económico
Ofrece un adecuado espesor útil	Aumento de las resistencias mecánicas. Costra superficial. Inadecuada estructura del horizonte A (pisoteo, amasado)	Incremento en el número de labores. Incremento en el uso de fertilizantes. Menores oportunidades de realizar labores
Mantiene condiciones térmicas propicias	Alta temperatura máxima superficial en verano.	Problemas en germinación y emergencia. Menor tasa de mineralización y actividad biológica en general.
Aireación suficiente	Disminución de macroporos, en particular bioporos. Sello superficial.	Menores oportunidades de realizar labores. Reducción en el número de plántulas. Menor actividad biológica y radical.
Amortiguar intermitencia e irregularidad del agua útil a los cultivos	Menor infiltración (captación) Menor conducción dentro del espesor útil. Menor capacidad de almacenamiento superficial y en horizonte A	Ineficiente uso del aporte natural de agua (baja relación transpir/ precipit). Incrementa los lapsos con deficiencias y excesos hídricos.
Suministra nutrimentos	Reducción del stock de N, P, K, Ca, etc. Reducción de la fijación de N.	Disminución de rendimientos o subuso de las otras propiedades favorables. Mayor fertilización.
Hábitat adecuado para muchos cultivos	Acidificación.	Toxicidades. Menor disponibilidad de nutrimentos. Menor actividad biológica y fijación del N
Resistente a la erosión	Erosión	Pérdida de suelo
Libre de contaminación	Contaminación	Toxicidades. Reducción de la actividad biológica y fijación del N

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACTON, D.E. Y 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
- 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.
- CERANA, L.A. (1978). *La resistencia mecánica de los suelos y el crecimiento de los tallos subterráneos y raíces*. Facultad de Edafología. Universidad Católica de Santa Fe. Santa Fe. Argentina. 61 pp.
- COBERTERA, E. (1993). *Edafología aplicada. Suelos, producción agraria, planificación territorial e impactos ambientales*. Cátedra Geografía Menor. 326 pp.
- DONAHUE, R.L.; R.W. MILLER Y J.C. SCHICKLUNA (1981). *Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas*. Prentice Hall. 624 pp.
- DUMANSKI, J.; E. PUSPARAJAH, M.LATHAMY 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.
- HABERERN, J. (1992) A soil health index. *J. Soil and Water Conservation*. 47:6
- 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.
- HÈNIN, S.; R. GRASY G. MONNIER (1960). *Le profil cultural. La Maison Rustique*, Paris, 340 pp.
- KELLOG, C. E. (1957). *The Ideal Arable Soil*. 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*. *Soily Tillage Res*. 27:1-8.
- LARSON, W.E. Y F.J. PIERCE (1991). *Conservation and enhancement of soil quality*. Dumanski et ál. Vol. 2:175-204.
- LÓPEX, R. Y 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.
- MOLINA, J.S. (1986). *Tranqueras abiertas*. El Ateneo, 231 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.
- ORELLANA, J.A. DE (1988). *El tercer rol del suelo*. *Bol. Inf. Técn. FAVE* (1):1-5.
- ORELLANA, J.A. DE Y M.A. PILATTI (1994). *La estabilidad de agregados como indicador edáfico de estabilidad*. *Ciencia del Suelo* 12(2):75-80.

- ORELLANA, J.A. DE Y 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 Y D.A. GREÑÓN (1997). Soil Quality: an approach to the physical state assessment. *J. Sustainable Agriculture* 9(2–3):91–108.
- PAPADAKIS, J. (1954). Ecología de los cultivos. I. *Ecología general*. Min. Agr. Gan. Buenos Aires: 223 pp.
- PARR, J.F.; R.I. PAPENDICK, S.B. HORNICKY R.E. MEYER (1992). Soil Quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Amer. J. Alternative Agriculture* 7(1–2):5–11.
- PILATTI, M.A. Y J.A DE ORELLANA (2012). Suelos ideales para agricultura sostenible. *FAVE sección Ciencias Agrarias*, Vol.11 N° 1– 65–87.
- PILATTI, M.A. (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.A. (1990). Interpretación de las relaciones entre el suelo y la producción de cultivos. Primera aproximación a un modelo edáfico. *Miscelánea* 51:98–109 INTA, EEA Rafaela.
- PILATTI, M.A., ORELLANA J.A. DE Y O. M. FELLI (2003). The Ideal Soil: III. Fitness of edaphic variables to achieve Sustenance in Agroecosystems. *J. Sustainable Agriculture* 22(2):109–132.
- 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. *Memorias del taller sobre planificación participativa de conservación de suelos y aguas*. FAO, GCP/RLA/107/JPN, Doc. de campo (5) 27–89.
- US CONGRESS (1990). *Food, Agriculture, Conservation and Trade Act of 1990*: 3705–3706. Public Law 101–624. U.S. Government Printing Office. Washington D.C.

3 Lo metodológico

PARTE 1. MÉTODO EN GENERAL. PROCESO DE IDENTIFICACIÓN Y RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS (PIRP)

MIGUEL PILATTI

Los agrosistemas, sean empresas agropecuarias o fincas de subsistencia, son las unidades económicas donde se integran las aspiraciones y el esfuerzo humano con el uso de los recursos naturales y la técnica, en pos de la obtención de productos agrícolas, pecuarios y otros servicios de la Naturaleza, para satisfacer las necesidades del hombre.

Lo frecuente es que en los agrosistemas haya «problemas», es función del ingeniero ayudar a identificarlos, resolverlos y controlar que las soluciones sean efectivas y duraderas. Para ello cuenta con un cúmulo de conocimientos y experiencias que forman parte del *saber técnico*: saber qué hacer, saber cómo hacer. Ese método de trabajo no está explícito, no se lo encuentra detallado en ninguna disciplina agronómica.¹

Asesores exitosos cuando se enfrentan una situación problemática suelen aconsejar tomar las decisiones adecuadas. Detectan deficiencias o causas de errores en forma intuitiva producto de su extensa experiencia. Si se les pregunta cuál es el método, es decir la secuencia de pasos que utilizaban en tales situaciones, la respuesta no es clara.

Por esto no es frecuente que se *enseñe* a identificar y resolver problemas a los agrónomos; suele transmitirse la «experiencia» a partir de los casos resueltos, pero frente a una nueva situación la actitud es: «prefiero hacerlo yo», puesto que es más fácil y rápido «hacer» que «enseñar a cómo hacerlo».

Los primeros intentos para elaborar tal método para agrónomos es la Metodología clínica predial (Gastó, 1983), imitando en sus etapas fundamentales al quehacer del médico; y también en el Proceso de Identificación y Resolución de Problemas (PIRP; Pilatti, 1990). Anteriormente, la resolución de problemas en matemáticas fue desarrollada por George Pólya de quien

1 Aunque sí en la administración de organizaciones y planeación de empresas.

hemos heredado las etapas de su plan: *How to Solve It* o, en castellano, «Cómo plantear y resolver problemas».

Es deseable y necesario contar con una secuencia ordenada de pasos y las herramientas para dar cada uno que puedan aprenderse con vistas a lograr un resultado final: la solución de problemas, es un proceso.

Tal proceso no es un sustituto del juicio propio, de la experiencia o de los conocimientos específicos, sino una forma de quehacer y comprender más rápido, de utilizar más eficazmente las experiencias, conocimientos, habilidades e inteligencia.

El presente trabajo tiene como objetivo presentar el proceso que un ingeniero agrónomo puede utilizar para identificar y resolver problemas en los sistemas agropecuarios. A continuación, se presenta un ejemplo de cómo procede el profesional, analizándose el procedimiento y datos que usó para dar cada paso; advirtiendo que hay varias alternativas.

Un «ejemplo»

1. El productor, asistido por un ingeniero agrónomo, dice que le interesa lograr mayores niveles de producción en sus cultivos agrícolas.
2. Para un lote que va a ser destinado a maíz, se sabe que, para el tipo de suelo en el cual se efectuará la siembra y considerando las condiciones meteorológicas típicas de la zona, es probable que el rendimiento en grano sea de 4500 kg maíz/ha.
3. Se sabe que el «techo» de producción para el área es de 14 000 kg maíz/ha.
4. Por lo tanto, si se remueven todos los factores que actualmente limitan su producción, es posible obtener hasta en 9500 kg /ha más: $14\ 000 - 4500 = 9500$.
5. Se sabe que las principales limitantes abióticas en esa zona son: (a) el agua y (b) el fósforo.
6. También es sabido que si se eliminara totalmente la deficiencia de agua se obtendría un rendimiento de 9200 kg/ha. Si solo se corrigiera la deficiencia de P se lograría una producción de 6600 kg/ha. Aún se desconoce qué ocurriría si se solucionaran ambas limitantes a la vez, pero se supone que incrementaría el rendimiento a más de 9200 kg/ha.
7. El profesional ha sugerido varias alternativas técnicas para intentar resolver el problema (el orden en el que se enumeran no indica que una es más importante que otra).

Alternativa 1: efectuar un largo período de barbecho para acumular agua antes de la siembra, realizando labores verticales que favorezcan el ingreso del agua de lluvia.

Alternativa 2: instrumentar un sistema de labranza reducida que deje una importante cantidad de rastrojo del cultivo antecesor en superficie y genere grietas verticales, todo ello para disminuir la evaporación directa del agua desde la superficie del suelo y mejorar la captación *in situ* de la precipitación.

Alternativa 3: aplicar, en una sola dosis de riego, 7 cm de agua, al inicio de la floración del maíz. El método de riego sería por surcos.

Alternativa 4: efectuar dos riegos, cada uno de 3,5 cm de agua por surcos, el primero antes de la floración y el otro 15 días después.

Alternativa 5: fertilizar, con 180 kg/ha de superfosfato tricálcico, 20 días antes de la siembra.

Alternativa 6: combinar la alternativa 2 con la 5, pero aplicando la mitad de P como fosfato di amónico, en bandas al momento de la siembra.

8. Se sabe que probablemente el resultado productivo de cada alternativa será el siguiente:

ALTERNATIVA	Rendimiento estimado (kg maíz/ha)
1	5750
2	5960
3	6900
4	7350
5	6200
6	6600

9. Estos datos son presentados al productor, conjuntamente con la siguiente información:
- Estado en que se encuentra el lote y expectativa de incrementos máximos en el rendimiento.
 - Requerimientos de maquinaria: tipo, cantidad y momento.
 - Insumos necesarios: tipo, cantidad y momento.
 - Necesidad de mano de obra: cantidad, época y especificación de las destrezas o habilidades requeridas para ejecutar las operaciones de cultivo.
 - Especificación de equipos, máquinas o infraestructura a incorporar.
 - Comentarios sobre ventajas y dificultades adicionales de cada alternativa considerando el estado actual del predio.
10. Finalmente el productor toma la decisión y elige la alternativa que él considera superior, en este caso, la alternativa 5.
11. Luego, el asesor prepara una programación detallada para guiar la ejecución de la alternativa 5 y los diversos controles que deben realizarse

- durante la ejecución para detectar y corregir posibles errores, desfases o prevenir diversos incidentes (plagas, etc.).
12. El productor lleva adelante las tareas previstas y toma decisiones cotidianas, puede realizar consultas a su asesor para compatibilizar acciones y ajustar detalles.
 13. Una vez cosechado el cultivo se compara el rendimiento esperado con el efectivamente obtenido, así como el estado en que quedó el lote: análisis poscampaña. Si hay coincidencia se incrementa la confianza en la eficacia de la asistencia técnica y en la destreza para la ejecución de las tareas. En caso contrario se analiza detalladamente cada acontecimiento ocurrido, desde la preparación inicial del cultivo hasta su recolección, buscando los motivos de la discrepancia para corregirlos en el futuro.

Análisis

Así puede intuirse que el proceso de identificación y resolución de problemas (PIRP) es una sucesión de etapas. A continuación, se analizan detalladamente los pasos dados, cómo se realizaron, de qué conceptos, información e instrumentos se valió el ingeniero para cumplir acabadamente con su asistencia técnica.

En el cuadro 3.1 se resumen las distintas etapas del PIRP mostrando en qué momentos del ejemplo se cumplían.

CUADRO 3.1: ETAPAS DEL PROCESO DE IDENTIFICACIÓN Y RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS (PIRP), CON SU CORRELATO NUMÉRICO PARA EL EJEMPLO DESARROLLADO EN EL TEXTO

Etapa	Subetapa	Ejemplo
Examen	0- Analizar el sistema	
Definición de objetivos y diagnóstico	I - Identificar y determinar la magnitud del problema	1 - 2 - 3 -4
	II - Identificar y jerarquizar los factores limitantes	5 6
	III - Elaborar alternativas de solución	7
Tomar la decisión	IV - Evaluar las alternativas de solución: (evaluación ex ante)	8
	V - Seleccionar la mejor alternativa	9 - 10
Ejecución	VI - Elaborar un plan detallado de ejecución y control de corto y mediano plazo	11
	VII - Ejecutar plan de acción y controlar durante el proceso (Monitoreo)	12
Rever resultados, ejecución, diagnóstico	VIII - Evaluar post ejecución (evaluación ex post) y elaborar plan de mejoras	13

Si bien la secuencia es única, no lo es la forma de resolver cada una. Diferentes profesionales pueden llegar al final de cada paso de un modo distinto, eso no sería muy importante si llegaran a un resultado similar. Lo grave es que lleguen a resultados disímiles, siendo algunos erróneos o muy deficientes: aquí se muestra la capacidad profesional. Ello puede deberse a:

1. Examen del «paciente», etapa que no estaba originalmente en este trabajo, referirse a un lote como en este ejemplo o a todo un predio. El examen consiste en analizar el sistema que se está estudiando con el fin de conocerlo y comenzar a comprender qué relación hay entre la estructura que se observa y las funciones que se ejecutan. Muy importante es aquí también identificar qué pretende el productor de ese sistema y qué necesita del asesor. Realizar equivocadamente o incompletamente el análisis del sistema es una fuente de error muy importante.
2. Incorrecta definición y/o identificación del problema, frecuentemente por deficiente especificación de los objetivos.
3. Equivocada identificación los factores limitantes: faltan varios o están mal jerarquizados debido a la interpretación del fenómeno productivo que se hace (parcial vs. integral).
4. Propuesta de alternativas de solución para aspectos que no lo requieren o cuya repercusión es ínfima. Suele deberse a distinta capacidad para describir y valorar la capacidad actual y potencial de los recursos.
5. Falta de resultados de ensayos o de una predicción adecuada acerca del efecto de determinado «paquete» técnico: puede deferir el nivel de actualización acerca de las técnicas disponibles y su eficacia.
6. No se exponen todos los criterios necesarios para ayudar en la selección de qué alternativa aplicar: tal vez falte el monto de la inversión, la necesidad de capacitación del personal, la disponibilidad de insumos o equipos, entre otros.
7. Hay errores, confusiones u omisiones en el plan que detalla tanto las acciones a realizar como su control.
8. Es deficiente el seguimiento operativo, la aplicación de protocolos o la interpretación de los datos obtenidos.
9. No se cuenta con el marco teórico que permita explicar cómo ocurren las cosas y encontrar las fallas o desvíos.

La diferencia entre una mejor o peor asistencia profesional estriba, en gran parte, en estas razones mencionadas.

En el ejemplo muchos datos e información fueron presentados como conocidos, sin explicar cómo se obtuvieron: tal es el caso del rendimiento potencial o de la mejora esperada en la producción por la aplicación de tal o cual técnica. Nótese que no se plantearon dudas o desconocimiento sobre algunos tópicos: ¿por qué será? En la descripción siguiente se comentan los diversos modos a través de los que puede obtenerse tal información, exponiéndose en detalle cada etapa del PIRP.

3.1. PASOS DEL PIRP

1. Examen o Análisis del Sistema

Al analizar un sistema se indaga acerca de sus límites temporales (desde cuando existe o para qué periodo interesa realizar el análisis, por ejemplo, durante el ciclo de un cultivo) y espaciales tanto horizontales (qué superficie abarca) como verticales (hasta qué altura y profundidad interesa, por ejemplo, altura del cultivo y profundidad hasta donde llegan las raíces). Es importante conocer quién es el productor y qué pretende de él. También históricamente qué ha producido y con qué rendimientos. Cuáles son las principales entradas y salidas, tanto de materia, energía, información y dinero. Se debe prestar atención a la exoestructura: ¿con qué sistemas se relaciona, para qué y a través de qué? Internamente hay que describir la endoestructura, esto es, sus componentes, las relaciones o lo que fluye entre ellos y qué controla tanto los flujos como lo que hay en los componentes. Importante es detectar las funciones que ocurren y cuál es su relación con los componentes estructurales, tangibles. El desarrollo detallado de para qué, por qué y cómo analizar un sistema excede las posibilidades de este capítulo y se trata en libro aparte. Aquí puede consultarse en el Capítulo 1 el ítem «Fitosfera».

2. Identificar el problema y determinar su magnitud

Existe un problema cuando lo que se desea no coincide con lo que se tiene o se obtendrá en un futuro probable. Gráficamente el concepto puede expresarse como se muestra en la Figura 3.1.

Tomando como referencia al ejemplo previo, el objetivo de máxima es *lograr la producción potencial de grano* o 14 000 kg de maíz por hectárea. Pero es probable que el rendimiento sea de solo 4500 kg por hectárea si se tiene en cuenta:

- a aptitud y fertilidad actual del suelo,
- las plagas que frecuentemente se presentan,
- las condiciones meteorológicas típicas del área y
- el manejo que en los últimos años ha realizado el productor.

Cuando no coincide lo deseable con lo que se obtiene habitualmente porque no se realizan cambios, se dice que hay un problema, cuya magnitud se expresa como la diferencia entre ambos estados: $14000 - 4500 \text{ kg/ha} = 9500 \text{ kg/ha}$. Esta es la brecha a acortar.

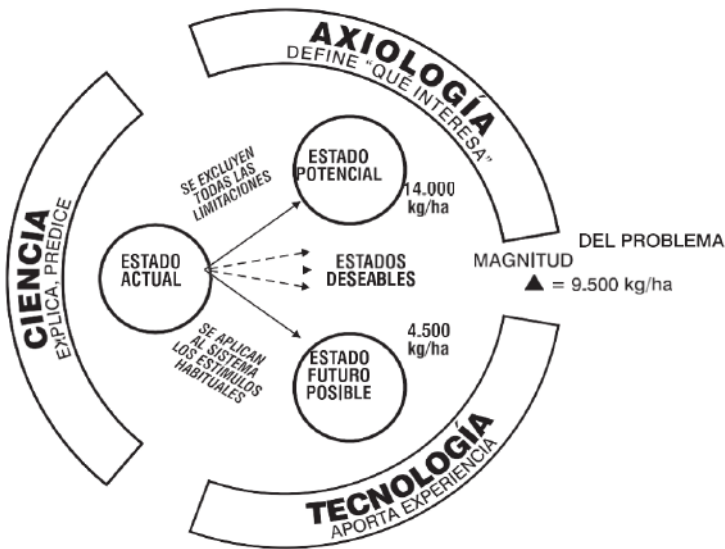


FIGURA 3.1. NOCIÓN GRÁFICA DE PROBLEMA Y RELACIONES ENTRE LA AXIOLOGÍA, LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA (PARA MÁS DETALLES VER «ADVERTENCIAS Y COMENTARIOS ADICIONALES» Y APÉNDICE)

Advertencias y comentarios adicionales

- * Así expuesta, queda clara la noción de «problema»: existe cuando no coincide lo que se pretende con lo que se logra o se está obteniendo. Sin embargo, en la jerga corriente es muy común utilizar el término en otro sentido: haciendo referencia a aquello que molesta, obstruye o dificulta. Es decir, se usa como sinónimo de factor limitante lo cual es un error y trae confusión. Se pone énfasis en distinguir con claridad ambos conceptos: «problema» de «factor limitante»
- * En el EJEMPLO se indicó como estado deseado: «lograr la producción potencial de grano», esta definición le corresponde exclusivamente al productor y expresa un objetivo de su empresa. Nótese que debe estar explicitado —al menos cualitativamente— antes de que se inicie la búsqueda o reconocimiento de la existencia de un problema.
En el EJEMPLO se hizo coincidir el objetivo deseable con la producción potencial. Pero, es el productor quien estipula el nivel de producción que desea; por ejemplo, incrementarla en 50 %, duplicarla, etc. Si bien es cierto que, para la tecnología disponible, existe un máximo al cual se puede acceder y que coincide con lo que aquí se denomina rendimiento potencial, al productor podría interesarle un rendimiento inferior por diversos motivos: evitar gastos, disminuir riesgos, inseguridad en la comercialización posterior, etc.
- * A nivel de un lote cultivado es más sencillo enunciar el objetivo deseable ya que siempre estará vinculado con el producto vegetal. En cambio, a nivel

de predio o agrosistema, están presentes otros objetivos que, aunque los incluyen, van más allá de lo productivo y suelen ser los deseos económicos, de pertenencia, de reconocimiento, de orden y estética, de bienestar, de autorrealización, etc. Es importante que este marco de referencia se haga explícito porque ayuda a medir el grado de logro, a planear mejoras futuras... Adviértase que dentro de las capacidades del asesor está su habilidad (y técnica que utiliza) para ayudar a identificar y a definir esos objetivos.

Todo ello hace que, al momento de elegir un determinado plan de acción, la decisión se tome considerando muchos objetivos y no solo el productivo. Entre algunos objetivos puede existir conflicto, por ejemplo, maximizar la producción y también la conservación del recurso natural: no es posible maximizar ambos a la vez; luego hay conflicto y es necesario llegar a un acuerdo, a un punto de equilibrio: optimizar. Este acuerdo debe estar explícito en los objetivos.

* Ahora bien, cuando los objetivos hacen referencia al ámbito productivo (kg/ha) o al económico (\$/ha):

¿De qué modo es posible cuantificar el nivel máximo al cual puede aspirarse?

¿Cómo o con qué se hace esta estimación?

Las mismas preguntas pueden formularse para estimar cuál será el resultado más probable y los riesgos en los que se incurre. Una importante diferencia entre los profesionales se establece según la capacidad que tengan para responder acertadamente a tales interrogantes.

En cuanto al rendimiento potencial existen, al menos, tres modos para definirlo.

- a) Información experimental o antecedentes locales. Cuando en el área existe una estación experimental o datos sobre ensayos conducidos en campos de productores, se toman como referencia los rendimientos mayores observados en tales situaciones, considerándolos «techos de producción».
- b) Extrapolación desde otras regiones, suponiendo que son condiciones Agroecológicas similares a la que interesa. Este caso se puede utilizar cuando no se dispone información local suficiente.
- c) Estimación agrofísica: Si se dispone de una teoría integral del desenvolvimiento vegetal y de un modelo de simulación que permita imitar las múltiples relaciones que ocurren entre el cultivo y su ambiente, es posible estimar para un cultivo específico cuánto puede esperarse como rendimiento potencial.

Esta forma de estimar la producción, recién en nuestra época ha sido posible instrumentarla, gracias a los avances en la comprensión cuantitativa del fenómeno y a las facilidades instrumentales aportadas por la informática. Del mismo modo, para estimar el rendimiento probable, es decir aquel que ocurrirá si no se modifica en nada el manejo habitual del cultivo, puede

utilizarse la estimación agrofísica, a que se hizo referencia en el ítem c). Cuando no se dispone de esta vía, o complementariamente a ella, se usan datos propios del establecimiento (información histórica). En última instancia, si no hay antecedentes propios, se considera la información disponible en la región o se extrapola de otras regiones.

3. Identificar y jerarquizar los factores limitantes

Aquellas condiciones que impiden el logro del objetivo deseable: se conocen como factores limitantes. Es importante identificarlos y luego jerarquizarlos por orden de importancia de acuerdo con el grado de limitación que imponen.

¿Qué se necesita para identificar y jerarquizar a los factores limitantes?

- a) Es necesario un cuerpo teórico operacional (modelo matemático de simulación) en el cual se ha reunido y sintetizado, todos los componentes estructurales y funcionales relevantes, del fenómeno que interesa, en este caso, el productivo.

A este modelo de simulación es posible operarlo como si fuera realmente el lote cultivado, pero en forma muchísimo más económica que efectuar directamente los ensayos en el lote —tanto en dinero como en tiempo.

Usando tal modelo de la realidad, se simula, como si se estarían realizando ensayos en el terreno, modificando diversos factores, de a uno a la vez o en grupos. En cada simulación se estima la producción resultante. Así, por sucesivas comparaciones, se descubren los factores que restringen y su importancia relativa.

- b) Si no se dispone de suficiente basamento teórico o no es posible utilizarlo para obtener resultados cuantitativos ya que solo se cuenta con un modelo conceptual (cualitativo), suelen utilizarse indicadores que señalan el estado en que se encuentran diversos componentes del sistema. Ejemplos de estos indicadores son: contenido de nitratos a la siembra, reacción del suelo (pH), grado y tipo de enmalezamiento, espesor de suelo útil para las raíces, salinidad, etc.

Esta información se usa para detectar factores que limitan acentuadamente a los rendimientos, por ejemplo, una baja densidad de plantas o alto contenido de Al en la solución del suelo.

- c) Alternativamente se acude a la opinión experta de asesores con muchos años de experiencia y buen nivel de información; así como a las observaciones de grupos de productores del área.
- d) En forma complementaria, se solicita la opinión de especialistas: fitopatólogos, edafólogos, fisiólogos, etc.
- e) Cuando todo lo anterior es insuficiente: se plantea la cuestión a los investigadores.

Una vez finalizadas las dos etapas iniciales del PIRP se ha completado el diagnóstico, cuyo resultado se expresa a través de:

- la descripción del estado deseable,
- la descripción del estado actual o futuro probable,
- la magnitud del problema,
- la enumeración de los factores limitantes y
- la jerarquización.

En esto consiste la actividad de diagnosticar. A su producto lo llamamos: *diagnóstico*.

4. *Elaborar alternativas de solución*

Una vez reconocidos y jerarquizados los factores limitantes se está en inmejorables condiciones para detectar alternativas técnicas que tiendan a mejorar la situación actual para acercarse al estado deseable.

Un factor puede limitar por exceso o por deficiencia. Este caso puede deberse a que naturalmente la provisión es escasa y por lo tanto, con adicionarlo como un insumo se resuelve el inconveniente.

También puede ocurrir que haya una dificultad interna que redujo la provisión del elemento (por ejemplo, agua o nutrimentos) para los cultivos. Ello puede deberse, a que está bloqueado, o precipitado, o fuera del alcance de las raíces. O, porque la forma de ingreso natural ha sido alterada negativamente: caso del agua de lluvia que entra por infiltración y que con un manejo inadecuado del suelo se favorece el sellado superficial del terreno, disminuyendo marcadamente el agua que penetra y favoreciendo el escurrimiento. O, también porque han sido modificados negativamente ciertos procesos biológicos indispensables para la provisión de nutrimentos en cantidad y oportunidad.

En resumen, el factor negativo puede dejar de limitar ya sea adicionándolo como un insumo (abono, enmienda) —el caso más frecuente en la agricultura contemporánea: tecnología de insumos—, o bien modificando la estructura o el funcionamiento interno del sistema: —tecnología de proceso—. Las medidas técnicas que se aconsejan tomar en uno y otro caso pueden no ser las mismas.

La cuestión consiste, entonces, no solo en reconocer cuál es el factor restrictivo sino, además, en establecer ¿por qué no se halla en cantidad y oportunidad adecuada?

El asesor suele encontrar la solución a través de alguna de las siguientes vías:

- a) Apela a su experiencia previa, recomendando soluciones que él mismo ha probado o que ha leído y que fueron exitosas para resolver la dificultad en otras situaciones supuestamente similares.
- b) Solicita la opinión experta de especialistas acerca de por qué el factor es limitante y cómo se lo elimina (técnica).
- c) Otra forma de proceder consiste en realizar ensayos de prueba y error para encontrar la solución.

- d) Lo ideal es contar con un modelo con el cual se comprende e interpreta el comportamiento de todo el sistema y pueda imitarse su funcionamiento día tras día (dinámica). Así es posible seguir la evolución de diversas variables y su efecto sobre el crecimiento diario del cultivo. Con esa capacitación teórica e instrumental el asesor puede responder correctamente.
- e) Cuando no es posible usar ninguna de las anteriores posibilidades —o fallan— se deriva la cuestión al ámbito de la investigación científica si se trata de una dificultad en la comprensión del fenómeno, o se informa a los generadores de tecnología, si no se sabe qué hacer para superar la dificultad o lo que se ha intentado es probadamente deficiente.

Así se reconoce por qué cada factor es limitante y se recomiendan las soluciones.

El conjunto de medidas técnicas que se recomienda pueden diferenciarse entre sí porque:

1. Toman en cuenta solo algunas de las limitaciones (visión especializada).
2. Las soluciones se diferencian entre sí porque se sugieren técnicas alternativas para lograr el mismo efecto.
3. Algunos profesionales se restringen a proponer soluciones atendiendo exclusivamente a la maquinaria, infraestructura y destrezas del personal ya existente en el predio.

Muchas veces se conocen las dificultades, las limitantes, pero no se las comprende.

Se entiende por conocer al hecho de tener datos y observaciones sobre un fenómeno determinado, en cambio comprender es la capacidad de explicar el comportamiento del fenómeno a partir de aquel conocimiento. Suele ocurrir que hay asesores que conocen mucho porque tienen gran cantidad de datos, o experiencia acumulada, pero su comprensión es limitada o deficiente.

5. *Evaluar las alternativas de solución (evaluación ex ante)*

Cada una de las posibles alternativas técnicas es evaluada, a priori, para cuantificar en qué medida es capaz de acercarse a la situación deseada. Es decir, en qué medida reduce o elimina a las limitaciones.

¿De qué modo y con qué recursos se hacen estas evaluaciones?

- a) Otra vez, si se cuenta con un modelo de simulación que permita imitar el efecto de las técnicas sobre el sistema, puede estimarse la respuesta productiva. En general estos modelos comienzan a encontrarse a disposición del asesor; siendo usados en investigación y docencia.
- b) Información local o experimental.
- c) Ensayos del tipo: prueba y error.
- d) Opinión experta.

6. Tomar la decisión

Decidir significa elegir entre varias alternativas aquella que se considere más conveniente. El decisor es el productor. El asesor colabora presentando las diversas alternativas y su evaluación en término de los resultados productivos esperados en cada caso; además acompaña esta información con un detalle de los principales requerimientos de tiempo, maquinaria, dedicación, insumos y riesgos que tiene una y otra alternativa.

¿Cómo expresa, el asesor, cada resultado productivo esperado? Hay diversas modalidades:

- a) Rendimiento esperado. Por ejemplo: 73 quintales/ ha
- b) Intervalo de rendimiento esperado. Por ejemplo: se espera entre 68 y 81 quintales/ha
- c) Rendimiento y riesgo de producción probable. Por ejemplo: (c1) es probable que 1 de cada 5 años la producción no cubra los costos; (c2) 3 de cada 5 años se espera una producción que, por lo menos, duplique los costos y (c3) en 1 de cada 5 años el rendimiento obtenido triplicará a los costos.

Pero, ¿por qué se responde de una u otra forma? Ello depende básicamente de la información disponible y de la capacidad predictiva del profesional. El que responde del modo a) o b) suele utilizar:

1. su parecer —opinión no fundada científicamente— o bien,
2. su opinión experta —basada en diversos casos registrados en la bibliografía o ensayados por el asesor.

La respuesta tipo c) requiere en cambio disponer de registros históricos locales. Esto supone tener datos de varios años con resultados de rendimientos obtenidos para el cultivo en cuestión, en el suelo de interés y con la alternativa de manejo que se propone. Es evidente que esta disponibilidad de información es excepcional. Además, cultivos o posibilidades técnicas de aparición reciente, no cuentan con los datos históricos requeridos. Una posibilidad de superar esta dificultad la ofrecen los modelos de simulación de cultivos: pueden imitar el comportamiento y resultados del fenómeno real cuantas veces se quiera y bajo las circunstancias de cultivo, técnicas y edafoclimáticas que se desee considerar.

Es claro que para el decisor resulta mucho más valiosa la alternativa c), porque no solo conoce el rendimiento medio esperado sino también los riesgos productivos.

Si bien decidir es en gran medida un arte, elegir entre una u otra cosa es un comportamiento y por lo tanto se puede aprender a decidir. El asesor ayuda a mejorar la capacidad para decidir del productor que —centrado en sus necesidades y objetivos— se basa en su intuición y experiencia, el profesional le aporta información, rigor metodológico y facilidades instrumentales.

Esta etapa del proceso de identificación y resolución de problemas culmina con la elección de una alternativa de acción la que se instrumentará en la práctica.

7. Elaborar plan detallado de ejecución y control de las acciones de corto y mediano plazo (monitoreo, evaluación de proceso)

Aquí se prepara una descripción detallada de todas las acciones resultantes de la decisión tomada, los medios a utilizar y fechas en que deben efectuarse las tareas. Es frecuente especificar en un cronograma los siguientes ítems:

- a) Insumos: combustible, semillas, fertilizantes, plaguicidas, etcétera.
- b) Maquinaria, incluyendo compras y reparaciones.
- c) Mano de obra: cantidad, época, capacitación.
- d) Necesidad de nuevas obras o infraestructura, reparación y mantenimiento.
- e) Contratación de servicios: cosecha, labores especiales, etcétera.
- f) Controles a efectuar en: el personal, maquinaria, suelo, cultivo, registro periódico de datos, etc. Muchas de estas suelen denominarse acciones de monitoreo.

Si el asesoramiento al productor abarca, además de los aspectos productivos, los económicos, se prepara adicionalmente una estimación de necesidad de créditos, evolución financiera, registros económicos, entre otros.

8. Ejecutar y controlar

Consiste en llevar a cabo el plan de acción tal como estaba previsto. Si, como resultado de los controles que se realizan (evaluación de proceso), surge la necesidad de acciones correctivas, se decide sobre la conveniencia de efectuarlas.

9. Evaluar después de efectuado el plan de acción y elaborar plan de mejoras

Esta importante y última etapa, llamada también evaluación *ex post*, se realiza para comparar los resultados esperados con los efectivamente logrados. Su utilidad radica en que se analiza detenidamente el plan de acción llevado a cabo; las condiciones ambientales, de prestación de servicios y de mercado que efectivamente ocurrieron, a fin de detectar los motivos por los cuales hubo discrepancias entre lo programado y lo realizado, lo esperado y lo logrado. Pueden darse tres casos:

- a) No hubo mayores diferencias. Luego es posible emprender planes para el logro de objetivos más ambiciosos.
- b) Se obtuvo menos de lo previsto. En este caso se estudian las causales, las correcciones y controles que serán necesarios en el futuro, las posibilidades de mejorar la capacidad de predicción y ejecución.

Si el proceso general de identificación y resolución de problemas ha sido desordenadamente llevado a cabo por el asesor, le será difícil detectar los errores, omisiones o cambios no previstos que ayudan a explicar las diferencias en los resultados, pudiendo estar comprometida la continuidad de su labor.

- c) Se logró más de lo previsto. Esto hace posible hallar potencialidades hasta ahora ignoradas, tanto en los recursos naturales como en los humanos, y tenerlas en cuenta para el futuro. O bien, corregir los instrumentos de predicción que utiliza la empresa.

En resumen, es una etapa básicamente de retroalimentación para proponerse objetivos futuros y emprender acciones.

En conclusión: resulta posible y útil ordenar la intervención agronómica profesional en los sistemas agropecuarios, a fin de hacerla más eficaz y eficiente.

3.2. PASOS AMPLIADOS DEL PIRP

1. Examen, caracterización a través del análisis de sistemas.
2. Misión y Visión.
3. Especificación de *objetivos* y, si es posible, la estructura de objetivos. Analizar el sistema (para detectarlos si no están definidos)
4. Identificación de problemas
5. Magnitud del problema
6. Identificación de factores limitantes, aquí nuevamente el análisis del sistema ayuda.
7. Jerarquización de los factores limitantes. Aquí termina el *diagnóstico*.
8. Elaboración de alternativas de solución. Aquí prestar atención a nuevas oportunidades, por ejemplo, otros cultivos
9. Evaluación ex ante de las alternativas propuestas. El análisis FODA puede ser útil en esta etapa, además de las técnicas de análisis económico.
10. Toma de *decisión*.
11. Elaboración detallado plan de ejecución (incluye capacitación del personal)
12. Elaboración plan de control (monitoreo)
13. *Ejecución*.
14. Monitoreo y auditoria.
15. Evaluación *ex post* y elaboración de un plan de mejoras.

Apéndice

Comentarios adicionales de la Figura 3.1

Para estimar la magnitud de un problema productivo puede utilizarse un modelo matemático de simulación que evalúe el comportamiento conjunto y a través del tiempo de: a) los recursos naturales: condiciones edafoclimáticas, cultivos y animales, b) los artificiales, como insumos y maquinaria agrícola y c) los humanos, estos son los operarios.

Para que la identificación de problemas sea útil y oriente la búsqueda de soluciones es necesario estar en capacidad de Explicar el funcionamiento del sistema a fin de detectar los estímulos, componentes y/o interacción entre componentes que están limitando. Es propósito esencial de la ciencia aumentar incesantemente la comprensión de la naturaleza, del hombre y de sus interrelaciones.

Por lo tanto, para efectuar las dos primeras etapas del PIRP, referidas a la Identificación y Jerarquización (= Diagnóstico), es necesario estar en capacidad de predecir y explicar cuantitativamente el comportamiento de los sistemas agropecuarios. La provisión del conocimiento necesario es una actividad esencialmente científica.

Cuando se dispone de un diagnóstico, es decir, se han detectado los factores limitantes y su orden de importancia, se está en posición ventajosa para ingeniar uno o más proyectos alternativos de solución. Si no existe una técnica que haga posible eliminar total o parcialmente un factor o grupo de factores limitantes, surge la necesidad de buscar soluciones. A la tecnología le corresponde ocuparse de proveer las técnicas requeridas: generación tecnológica. Aún más, la tecnología se dedica a generar métodos para salvar la brecha entre lo «que es» y lo «que se quiere». Basándose sobre el conocimiento adquirido por la ciencia, aunque no exclusivamente sobre esta base, la tecnología intenta construir modelos para alcanzar los objetivos deseados.

Es frecuente que se conciba y proponga más de una solución a un problema. Por eso, a menudo surge la necesidad de evaluar alternativas, lo cual obliga a definir un conjunto de criterios que permita compararlos. Estos normalmente incluyen aspectos técnicos, económicos y administrativos, pero a menudo implican también aspectos intrínsecamente extracientíficos, es decir, valores.

La axiología es la teoría general de los valores. Los valores son estados finales que guían el comportamiento humano. Un valor es lo que permite discernir entre lo que interesa y lo que no interesa.

La inclusión de distintos valores, en la definición de los criterios de selección, explica por qué dos personas, aun usando los mismos instrumentos racionales para resolver un problema, pueden proponer diferentes soluciones.

Es importante destacar algunas diferencias y relación entre los valores y el conocimiento científico.

Ante un problema las disciplinas científicas pueden proyectar dos afirmaciones: primero pueden decir qué decisiones parecen conducir a una solución, y segundo, dirán cómo quedará organizado el futuro en relación con la decisión tomada.

Las proposiciones de valor por su parte, enjuician los posibles estados futuros. Sin juicios de valor una elección entre alternativas es imposible. Las disciplinas científicas pueden decir solamente que tales y cuales estados parecen viables o factibles, pero ellas no discernen entre estados deseables e indeseables. Por su parte, los juicios de valor son en sí mismos insuficientes. Ellos ayudan a decidir cuál estado elegir, una vez que se han establecido cuáles estados son posibles. La valoración de un estado nada dice acerca de su factibilidad ni qué acciones en el presente conducirán a ese deseable estado futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DUEK, J.J. (1979). *La teoría de sistemas generales y su aplicación para resolver problemas ambientales*. Cidiat. Mérida, Venezuela.
- GASTÓ, J. (1983). Metodología clínica para el desarrollo del ecosistema predial. *Tecnología y ciencia en agroecología. Año 1 nº4, CIAL. Santiago, Chile.*
- PILATTI, M.A. (1990). La solución de problemas y los modelos en agronomía. *Miscelánea* 51:72-85. Inta, EEA Rafaela.
- PÓLYA G. (1965). ¿Cómo plantear y resolver problemas? Trillas. México. (Primera edición inglesa en 1945. *How to solve it?*)

PARTE 2. **MÉTODO EN PARTICULAR. DIAGNÓSTICO DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA DE LOS SUELOS**

MIGUEL PILATTI Y PABLO GIBERTO

3.1. VARIABLES CRÍTICAS Y PROCEDIMIENTO

Esta aplicación del conocimiento edafológico para uso agronómico fue generada porque:

Hasta promediar 1960–1970 era escasa la información de suelos en Argentina, esa situación cambió notablemente: hay cada vez más datos y más diversos. Existen cartas de suelos en escala 1:50.000 para gran parte del país.

Antes de 1970 era prácticamente nula la asistencia técnica al productor y escasas las acciones de extensión; hoy, un gran número de profesionales prestan esos servicios.

Desde 1990 hay un notable incremento en el uso de insumos (abonos, enmiendas cálcicas), maquinarias (siembra directa) y riego suplementario, en orden a incrementar la productividad de los cultivos. Ya se aplica la agricultura de precisión (o «manejo de sitio específico») la cual depende de certeros criterios tanto para el diagnóstico como para la recomendación de tratamientos.

Las decisiones agrícolas basadas sobre criterios de «productividad» y «sostenibilidad» requieren de permanente actualización profesional.

Avanza una teoría general del desenvolvimiento de los cultivos que se materializa en modelos de simulación y disponibilidad de potentes ordenadores.

Se concibe a la tierra no solo para producir, sino desde la óptica del uso múltiple del territorio. La degradación del suelo alerta sobre la necesidad de una mejor comprensión de los procesos tanto de deterioro como de recuperación, de mayor cuantificación y decidida acción.

La formación y experiencia en materia de suelos de los ingenieros agrónomos es variada siendo necesario ordenar los procedimientos y compartir los criterios de interpretación.

Los datos de suelos, su procesamiento, así como los criterios para interpretarlos agrónomicamente están en permanente evolución y se hallan dispersos en innumerables publicaciones. Reunirlos, ordenarlos y exponerlos

detalladamente son objetivos de este Capítulo, como lo es también proponer un método para realizar un diagnóstico agronómico del estado y evolución de la capacidad productiva del suelo.²

Se pretende aquí sentar los fundamentos³ para una clínica de suelos: proceso agronómico de diagnóstico de la/s enfermedad/es del suelo basado en la integración de síntomas (apreciación subjetiva) y signos (evaluación objetiva), con vista a la definición del tratamiento más adecuado; emulando así al procedimiento usado en medicina.

3.2. ¿CÓMO REALIZAR UN DIAGNÓSTICO EDAFOLÓGICO?

A continuación, se propone y desarrolla un método para diagnosticar acerca de la capacidad productiva de un suelo. También se presentan los atributos más valiosos para ello, sus límites críticos o niveles en los cuales no limitan y el modo de interpretarlos.

Debe distinguirse entre la acción: diagnosticar y el producto de dicha acción: el diagnóstico.

Al diagnosticar se realizan 5 pasos:

1. Caracterizar el estado deseable: definir
 - a) qué rendimiento se pretende obtener y
 - b) cuánto o qué debe aportar el suelo para lograrlo.
2. Describir el estado actual del suelo en estudio
3. Identificar el problema determinando su magnitud
4. Detectar los factores limitantes y jerarquizarlos.
5. Informar si existe o no problema; indicar su magnitud y los factores que lo causan según su orden de importancia: éste informe es el diagnóstico.

Siguiendo éste esquema, para realizar un diagnóstico edafológico, se procede según se expone a continuación. Nótese que este Diagnóstico es un caso particular —aplicado al suelo— del Diagnóstico general presentado en el Proceso de Identificación y Resolución de Problemas (PIRP).

1. Caracterización del estado deseable

Aquí hay que hacer explícito qué se pretende del suelo. Pueden distinguirse 2 modalidades:

2 Distinguímos dos diagnósticos edafológicos, uno referido a la capacidad productiva del suelo en general o bien para determinado cultivo y otro que evalúa cuánto ha cambiado esa capacidad a través del tiempo comparándolo con el suelo natural; determinando así el grado de conservación, degradación o mejoramiento.

3 Equivale a semiología en medicina.

- a) Cuando se hace referencia a las necesidades de un cultivo en particular indicar: Cuál es el cultivo y qué rendimiento se quiere lograr.
- b) A veces solo interesa conocer cuál es la «capacidad productiva del suelo y cuáles sus principales limitaciones» para los cultivos en general. (ver Cuadro 3.8)

En ambos casos hay que definir cuáles son los requisitos del suelo ideal para luego compararlo con el suelo en estudio. Es de lo que se trata más adelante.

2. Descripción del estado actual del suelo estudiado

Se efectúan cuatro pasos.

2.1. Recolección de datos edafológicos preexistentes

Se obtienen de las Cartas de Suelos, interesa especialmente:

1. Capacidad productiva y aptitud de uso, (Registrar en Cuadro 3.2)
2. Descripción del paisaje. (Registrar en Cuadro 3.2)
3. Características morfológicas del perfil de suelo (Registrar en Cuadro 3.4)
4. Datos analíticos de los horizontes edáficos. (Registrar en Cuadro 3.4)

Inicialmente se recopila (o calcula si no está) el índice de productividad (IP, o también llamado, índice de aptitud de las tierras en Santa Fe: IAT); la capacidad de uso —especialmente la subclases—. Además, se indica si la Unidad Cartográfica de suelos corresponde a una Consociación, Asociación, Complejo o Grupo Indiferenciado de suelos.

Estos datos son muy útiles tanto al inicio como al final, una vez emitido el diagnóstico porque:

Al principio da una idea «a priori» si es un suelo:

- con mucha capacidad productiva (IP de 75 o más; Capacidad de uso I o II);
- intermedia (IP entre 50 a 75; Capacidad de Uso entre II y III);
- baja (IP de 20 a 50; Capacidad de uso IV a VI) o
- muy baja (IP menor a 20 y capacidad de uso VI a VIII).

También informa si hay limitaciones graves por erosión, mal drenaje (anaerobiosis); toxicidad por sales y/o sodio; compactación.

Al final, una vez emitido el diagnóstico se lo revisa para ver si hay coincidencia entre lo que en él se dice y estas valoraciones.

A medida que nos desplazamos de una Consociación de suelos (predomina un solo suelo) hasta un Complejo aumenta la heterogeneidad de la Unidad Cartográfica y las posibilidades de que haya manchones porque contiene suelos contrastantes. Adviértase que el Diagnóstico Edafológico se hace para la serie de suelos predominante en el lote. Pero, cuanta más proporción haya

de suelos distintos será necesario hacer dos o más diagnósticos: uno para cada suelo que ocupe el 25 % o más de la unidad de manejo.

2.2. Examen edafológico

2.2.a) Anamnesis⁴ o estudio de la historia del lote

No es frecuente que se recopilen e interpreten los valiosos datos que se indican a continuación (Cuadro 3.2), por lo tanto, éste ítem podría ser de gran utilidad para iniciar su registro y utilización.

Reunir datos de los últimos 5 a 10 años sobre secuencia de cultivos y rendimientos. Para cada cultivo y año indicar:

- si durante el ciclo la provisión de agua fue excesiva, suficiente o hubo escasez;
- qué labranzas y aplicaciones de agroquímicos se efectuaron,
- cantidad de rastrojo remanente y deyecciones (mucho, medio, poco, nada) y
- enmalezamiento (escaso, medio, alto)

A partir de estos datos es posible tener idea de antemano (elaborar supuestos = hipótesis) acerca de la capacidad productiva del suelo y sus posibles limitaciones. Para ello es necesario conocer los niveles medios de rendimiento y compararlos con los que se obtienen en la zona o en campos experimentales. En Argentina (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca) existe registro histórico (al menos de 10 a 20 años) por Departameno de cada Provincia del área sembrada y rendimientos para los cultivos más importantes (<http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>).

- Conocer cuánto produce en años contrastantes: muy húmedos, normales o muy secos.
- Usar las plantas adventicias predominantes como (a) indicadores de fertilidad nitrogenada, azufrada, de compactación, de acidez, salinidad o anegamiento (b) orientación acerca de la calidad de la materia orgánica que con ellas se aporta al suelo.
- Disponer de detalles acerca de cómo es el manejo del pastoreo y distribución de las deyecciones.
- Prever la tendencia del balance de C y con él de otras propiedades.
- Estimar el nivel de reposición/extracción de nutrimentos.

Datos anteriores de análisis del suelo estudiado: aquí es muy importante constatar si la profundidad de muestreo ha sido siempre la misma.

2.2.b) Observaciones directas

4 «ana» significar hacer y «mnesis» memoria: hacer memoria, supone llevar algunos registros del manejo del cultivo y rendimientos logrados. A diferencia de «amnesia», donde «a» significa «no o sin»: sin memoria.

Se recorre el lote identificando posibles cuellos de botella haciendo uso de poca información, de carácter general, de rápida y de fácil obtención in situ. Ver ejemplos en el Cuadro 3.6.

Con el contenido de ambos puede construirse una «Base de datos edafológicos predial para uso agronómico».

Lote Nº	Capacidad de Uso	IP
Unidad Cartográfica	Suelo Dominante	

PAISAJE Y APARIENCIA ACTUAL DEL LOTE

Dato u observación	Indicar lo que corresponde	Probable limitación
Pendiente	< 1 % 1 – 2 % > 2 %	Erosión Disponibilidad de agua
Sales, humatos sódicos en superficie	No o menos del 20 % 20 a 40 % > 40 % del lote	Toxicidad
Manchón con menor densidad de plantas (>20 % del lote)	Muchos (> 40 % lote) Algunos (20 a 40 %) Pocos o ninguno (< 20 %)	Toxicidad Anaerobiosis
Drenaje	Pobremente drenado o peor Imperfectamente drenado Moderadamente bien drenado o más	Anaerobiosis
Freática	> 250 cm 250 a 100 cm < 100 cm	Disponibilidad de agua Anaerobiosis
Crecimiento des-uniforme, distinta coloración (>20% del lote)	Muchos Algunos Pocos o ninguno	Deficiencia nutrientes Resistencia mecánica
Huellas de maquinaria y/o pisoteo	No o menos del 20 % 20 a 40 % > 40 % del lote	Captación de agua Resistencia mecánica
Costra o sello superficial	NO Por sectores y/o incipiente Sí: > 7 mm	Captación de agua Resistencia mecánica Anaerobiosis

Estos datos se recopilan e interpretan en la primera parte del Cuadro 3.5.
 (2) Datos Históricos: Año y secuencia de cultivos, indicar mes implantación entre paréntesis.

Por ejemplo: 2019: trigo (6), soja (12) – 2020: alfalfa (5) – 2021: maíz (9). Para cada cultivo indicar:

Año	Cultivo	Labores especiales						Labranza					
		Riego suplem.	Drenaje superf.	Drenaje subsuperf.	Terrazas	Curvas a nivel	Otro	Descompactar	Incorporar rastrojo	Favorecer mineraliz.	Nivelar	Romper costra	Desmalezar

sí marcar con X

Año	Cultivo	Abono							Enmienda				
		N	P	K	S	Deyecciones	Efluentes	Abono orgánico	Cálcica	Dolomítica	Azufre	Yeso	

Indicar: Tipo (P.ej. fosfato de amónico, FDA...), Cantidad (kg/ha), %Ms

Año	Cultivo	Rendimiento			Malezas			Rastrojo				Condiciones meteorológicas		
		Alto	Medio	Bajo o Nulo	Alto	Medio	Bajo o Nulo	Pastorea	Enrolla	Quema	Queda en superficie	Húmeda	Media	Seca

2.3. Estimación de datos faltantes

En el Cuadro 3.3 se indica qué datos son poco variables, pudiendo utilizarse la información publicada o estimarlos según los criterios propuestos en el capítulo 4.3 («Estimadato»)

2.4. Toma de muestras y análisis de laboratorio

Para completar los datos del suelo previos a la siembra (Cuadro 3.2), deben efectuarse mediciones en el campo y determinaciones en el laboratorio; la toma de muestras de suelos, ya sea alterada como sin alterar, se realiza siguiendo los procedimientos indicados en el capítulo 4.1.

Especialmente se debe cuantificar la disponibilidad de nitrógeno, fósforo, potasio y azufre antes de la siembra. Adicionalmente el pH, conductividad eléctrica del extracto de saturación. Si el pH es menor de 5,8 o mayor de 7,8 se solicita además el complejo de intercambio catiónico.

Después de cada ciclo de rotación se debe cuantificar, para controlar su evolución: materia orgánica total y particulada, nitrógeno total, pH, estabilidad de agregados al agua, densidad del suelo y tasa de infiltración total y por macroporos.

En un Cuadro como el 3.4 reúna todos los datos y observaciones obtenidas del perfil de suelo.

CUADRO 3.3. DATOS EDAFOLÓGICOS DEL PERFIL DE USO AGRONÓMICO, FUENTE DE DATOS Y FRECUENCIA DE MEDICIÓN

Determinación	Origen de los datos y frecuencia de medición
Límite inferior (cm)	(1) corroborar en el campo espesor del horizonte A
Densidad del suelo (g/cm ³)	(2)
Densidad partículas (g/cm ³)	(3)
Capacidad de campo (cm ³ /cm ³)	(2)
Macroporosidad (cm ³ /cm ³)	(2)
Marchitez permanente (cm ³ /cm ³)	(3)
Pendiente del terreno (%)	Plancheta IGM(*) o medición con nivel óptico
Agua útil max (cm)	(3)
Agua útil inicial (cm)	(5)
Carbono Orgánico Total (g/kg)	(2)
Nitrógeno total (g/kg)	(2)
Nitrógeno activo o particulado ² (g/Mg)	(4)
Arcilla, limo y arena (%)	(1) y corroborar con textura al tacto
Capac. de Interc. Catiónico (cmolc/kg)	Medir solo para estudios especiales o (1)
Cationes intercambio (cmol/kg)	Medir solo para estudios especiales o (1)

continúa en página siguiente

Determinación	Origen de los datos y frecuencia de medición
pH (rel. 1:2,5)	(2)
Conductiv. eléct. extracto saturac (dS/m)	(2)
Moteados	(1)
Nódulos Fe Mn	(1)
Estructura	(1) y observaciones periódicas en la superficie
Consistencia	(1)
Barnices	(1)
Raíces	(1) y (2)
Roca, Cementaciones, freática	(1)
N-Nitratos (g/Mg)	(4)
P extraíble (g/Mg)	(4)
S-Sulfatos (g/Mg)	(4)
Retención hídrica f (contenido hídrico)	Solo para estudios especiales, si no (3)
Resistencia mecánica f (conten. hídrico)	Solo para estudios especiales, si no (3)
Conductividad hidráulica saturada (cm/h) 3	Solo para estudios especiales, si no (3)
Curva «número» 11, CN del USDA	(3)
Estabilidad de agregados (%)	(2) en horizonte superficial

(1) Tomar del perfil modal de la Carta de Suelos.

(2) después de cada ciclo de rotación o cada 3 a 6 años en prof. enraizable.

(3) estimar a partir de otras propiedades, ver Capítulo 4.3.

(4) en presiembra a la prof.enraizable, calculada con los datos de este cuadro, según el Capítulo 4.4.

(5) ídem hasta prof. Enraizamiento.

(*) IGM: Instituto Geográfico Militar, hoy Instituto Geográfico Nacional (IGN).

CUADRO 3.4. CUADRO MODELO PARA REUNIR LOS DATOS EDAFOLÓGICOS DE UN PERFIL DE SUELO

Suelo:		Antecedentes de uso:			
Ubicación:					
Horizonte					
Límite inferior (cm)					
Densidad del suelo (g/cm ³)					
Densidad de partícula (g/cm ³)					
Porosidad total (cm ³ /cm ³)					
Capacidad de campo (cm ³ /cm ³)					
Macroporosidad (cm ³ /cm ³)					
Marchitez permanente (cm ³ /cm ³)					
Agua útil inicial (cm)					
Agua útil max (cm)					
Ídem fácilmente utilizable max (cm)					
Carbono Orgánico Total (g/kg)					
Nitrógeno total (g/kg)					
N activo o particulado (g/Mg)					
Arcilla (%)					
Limo (2 a 50 µm, %)					
Arenas (%)					
Textura					
Moteados					
Nódulos Fe Mn					
Estructura					
Consistencia					
Barnices					
Raíces					
Roca, Cementación, Napa					
N-Nitratos (g/Mg)					
P extraíble (g/Mg)					
S de so4 (g/Mg)					
Ca intercambiable (cmol _c /kg)					
Mg intercambiable (cmol _c /kg)					
Na intercambiable (cmol _c /kg)					
K intercambiable (cmol _c /kg)					

Continúa en página siguiente

Suelo:		Antecedentes de uso:			
Ubicación:					
H intercambiable (cmol _c /kg)					
cic (cmol _c /kg)					
Saturación de bases (%)					
PSI (%)					
pH (rel. 1:2,5)					
cees (dS/m)					
α curva retención hídrica					
β curva retención hídrica					
a curva resistencia mecánica					
b curva resistencia mecánica					
c curva resistencia mecánica					
Conductividad hidráulica (cm/h)					
Curva «número» II, CN del USDA					
Profundidad enraizable (cm)		Profund.dad enraizamiento (cm)			

Ecuación de curva de retención hídrica $\theta = \theta_s / (1 + \alpha |\psi|^\beta)$ y Resistencia mecánica $RP = a \theta^b Ds^c$

θ y θ_s : contenidos hídricos volumétricos en un momento dado y a saturación.
 ψ : potencial hídrico mátrico. Ds , densidad del suelo. RP resistencia a la penetración medido con penetrómetro. α , β , a , b , c , parámetros ajuste de ecuaciones.

3. Análisis agronómico de los datos edafológicos

En este paso se procesa e interpreta cada atributo (dato) considerado individualmente y con otros, obteniendo el máximo de información para responder: ¿hay problema? ¿Limita o no? ¿Mucho o poco?

Inicialmente se informa de los datos básicos del suelo, cultivo y clima, tales como:

Cultivo: cuál es, qué rendimiento se pretende lograr, cuánto es su índice de cosecha⁵ y los requerimientos internos de nutrientes.⁶

Suelo: Indicar la profundidad desde donde se extraen mayoritariamente los nutrimentos (enraizable) y el agua (enraizamiento);⁷ profundidad a la que se encuentra la freática y el valor de la curva II⁸ para estimar infiltración.

5 Cuadro 3.13.

6 Cuadro 3.13.

7 Ver su cálculo en capítulo 4.4.

8 Para estimar la proporción de escurre o infiltra de la lluvia, ver en capítulo 4.3.

Para realizar el Análisis Agronómico se completa el Cuadro 3.5. utilizando los criterios que se presentan en las páginas siguientes.

La primera columna del Cuadro 3.5. muestra sobre qué condición del «suelo ideal» se está diagnosticando: toxicidad, aireación, agua, nutrientes, etc.

La segunda columna presenta cuáles son los Atributos edáficos que se tienen en cuenta para emitir un juicio acerca de si hay limitaciones o no. Todos estos datos están ya reunidos en el Cuadro 3.4.

En la tercera columna se anota cuánto sería el «valor ideal» (o Nivel de Referencia) para que el Atributo analizado no sea limitante.

En la cuarta columna se registra qué valor presenta el suelo estudiado —por ejemplo, su pH—, ya sea dentro de la profundidad enraizable (la más explorada por las raíces) o en la de enraizamiento (hasta donde llegan las raíces). Atención: ésta se utiliza solo cuando se analiza la capacidad de almacenamiento de agua; en cambio la enraizable se usa en todos los otros casos.

En la quinta columna se destaca si hay limitación o no. Para ello se compara el valor de referencia con el del suelo estudiado y se pinta el rectángulo con color verde si no hay limitación, amarillo si la limitación es moderada, anaranjado si es severa o rojo si es extrema.

Además, podría agregarse otra columna en la que se indicaría —si hay limitación— qué práctica agronómica edafotécnica aplicaría para resolver total o parcialmente la limitante.

Se destaca que en el Cuadro 3.5. se jerarquizan las limitantes, así primero se presenta a la toxicidad: si ella está presente es inútil que haya en cantidad suficiente agua o nutrientes. Después está la posibilidad de muerte por anaerobiosis; luego la disponibilidad de agua, nutrientes y así sucesivamente.

4. Síntesis agronómica o diagnóstico

En esta instancia el profesional se expide (escribe su informe) refiriéndose a:

1. ¿Hay o no problema productivo? Para ello ver el Cuadro 3.5., si está todo verde no hay problema si no es así: hay limitaciones edáficas; muchas, algunas, pocas.

También debe compararse el diagnóstico genérico (Cuadro 3.5 primera hoja, hace referencia a «los cultivos en general») con el específico para detectar si hay alguna inconsistencia o posible error (Cuadro 3.5. segunda hoja, se refiere a un cultivo en particular y a un determinado rendimiento que se espera, por ejemplo, 80qq/ha de maíz).

2. Luego escribe cuáles son los factores edáficos limitantes, cuál es el origen de la limitación, dónde se encuentran (en qué horizonte/s) y cuáles son los más importantes (jerarquización). También, en algunos casos, es posible indicar cuándo se manifiesta esa limitación: durante todo el ciclo, en emergencia, en floración, etc.

Si el suelo presenta varias limitantes graves (varios cuadros rojos), el diagnóstico primero hace referencia a los más importantes según la siguiente jerarquía (comenzando por arriba y continuando hacia abajo):

- Tóxicos
- Aireación
- Agua
- Nutrientos
- Fijación de nitrógeno
- Resistencias mecánicas

Además, se indica si hay limitaciones moderadas (color anaranjado, amarillo) y cuáles son, las más importantes son las de arriba y luego las de abajo. Todos estos juicios se anotan, en ese orden, a continuación del Cuadro 3.5.

Cuando se dispone de un diagnóstico con ese detalle, resulta fácil identificar los posibles tratamientos correctivos.

Frecuentemente los desvíos con respecto al suelo ideal orientan acerca de cómo realizar un manejo del suelo para:

- Reponer los minerales que se extraen (N, P, K, Ca, Mg, S)
- Reparar las propiedades que se deterioran (densificación, macroporos, resistencia mecánica, tasa de infiltración).
- Reparar las propiedades físico-químicas como el pH cuando se acidifica o alcaliniza (rehabilitar).
- Proteger la superficie del suelo de la influencia negativa de factores meteorológicos como la precipitación (erosión hídrica o formación de costra), el viento (erosión eólica) o temperaturas extremas, o de la presión ejercida por maquinaria y pisoteo de animales.
- Favorecer los mecanismos naturales de reorganización (agregación) y buen funcionamiento (bioporos, resiliencia y homeostasis).
- Adicionar agua (riego) o nutrientes (fertilización).
- Extraer excesos hídricos (drenaje); de sales (lavado) u otros tóxicos.
- Acondicionar (mullir) un estrato para una rápida emergencia o exploración radical.
- Mantener adecuados niveles de materia orgánica.
- Remediar la contaminación.

CUADRO 3.5. EJEMPLO DE ORDENAMIENTO DE LOS DATOS EDAFOLÓGICOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA CAPACIDAD PRODUCTIVA

Diagnóstico edafológico: Datos básicos de cultivo y edafoclimáticos

Suelo:			
Ubicación geográfica:			
IP: Capacidad de Uso:		Consociación – Asociación – Complejo	
Profundidad enraizable cm		Profundidad de enraizamiento: cm	
Profundidad freática: m		Pendiente terreno: m/m	
Curva número II (CN USDA):		Promedio agua útil perfil ⁽¹⁾ (durante el ciclo) :	
Cultivo		Clima	
Rendimiento esperado:	kg/ha	Precipitación modal: cm /h	
Humedad comercial: %		Temperatura media ciclo: °C	
Índice de cosecha:		Evapotranspiración Máxima= cm/ciclo	
Fecha siembra:			
Duración ciclo: días			
Requerimiento interno de	N: % K: %		
Biomasa de Referencia:	kg MS/ha		

(1) En tanto por uno. Por ejemplo 0,8 se interpreta como 80% de agua útil.

Otros de anamnesis y aspecto actual del lote (según lo indicado en Cuadro 3.2)

Dato u observación	Resultado
Pendiente	
Sales, humatos sódicos en superficie	
Manchón < densidad plantas (>20 % del lote)	
Freática	
Drenaje	
Crecimiento desuniforme, decolorado (>20% lote)	
Huellas maquinaria y/o pisoteo	
Costra o sello superficial	

Dato	SÍ	NO
N y/o P > 100 kg/ha/ año		
Aplicación de S		
Enmienda cálcica últimos 3 años		
Abono verde		
Cultivo de servicio		
Nochero		
Aplicación de efluentes, purines		
Curva nivel		
Terrazas		
Rabasto		
Labranza vertical		
Drenaje superficial		
Drenaje subsuperficial		

**Diagnóstico edafológico: Análisis agronómico de los datos
Suelo:**

Requisito suelo ideal	Atributo	Nivel de referencia suelo ideal	Dato del suelo estudiado	¿Limita?
(1) Tóxicos	Sales, Humatos Sódicos			
	Manchones < plantas			
	PSI			
	Mn, Al			
	Sal			
(2) Aireación	Drenaje			
	Freática			
	Fa ⁽¹⁾			
(3) Agua	Infiltración			
	L.A.U. a la siembra			
	A.A.F.U. ⁽²⁾			
(4) Nutrientes	Pobre crecimiento, color anormal			
	N			
	S			
	P			
	K			
	Ca			
	Mg			

continúa en página siguiente

Requisito suelo ideal	Atributo	Nivel de referencia suelo ideal	Dato del suelo estudiado	¿Limita?
(5) Fijación de Nitrógeno	pH			
	N-Nitratos			
	P			
	Ca			
	S			
	Fa			
	Fe ⁽³⁾			
	Sal			
(6) Impedimentos Mecánicos	Huellas, Pisoteo			
	Encostramiento			
	Emergencia plántula IC ⁽⁴⁾			
	Proliferación raíces (Fe ³)			
(7) Nutrientes indicadores indirectos y antagonísticos	pH			
	Materia orgánica			
	Ca/Mg			
	Ca/K			
	K/Mg			

(1) Factor de Aireación.

(2) Almacenamiento Agua Fácilmente Utilizable.

(3) Factor Mecánico o Estructural.

(4) Índice Encostramiento.

Diagnóstico de la capacidad productiva del suelo

Responder:

- 1) ¿Existe un problema productivo? ¿Hay diferencia entre el lote estudiado y el suelo ideal? ¿Cuán importante es?
- 2) ¿Cuáles son las limitaciones principales? ¿Cuáles las limitaciones secundarias?
- 3) ¿Cuáles son las limitantes más importantes que restringen la profundidad enraizable? (Cuando es menor a 30 cm y de 100 cm la de enraizamiento)
- 4) ¿Principales objetivos que guiarán al manejo de este suelo?
- 5) A partir de los datos de la anamnesis: ¿Ya están haciendo algo para reducir las limitantes? ¿Qué? ¿Alcanza?

CUADRO 3.6. REQUISITOS DEL SUELO IDEAL Y ATRIBUTOS PARA REALIZAR UN DIAGNÓSTICO EDAFOLÓGICO

Requisitos suelo: ideal	Observaciones directas	Análisis detallado
Ofrecer un adecuado espesor útil y fuerte anclaje	Observación de raíces Tenor materia orgánica Barreras o napa permanente Morfología perfil Compactación, Cl ₂ Ca Anclaje – Consistencia	Profundidad enraizable Densidad del suelo Resistencia mecánica a la penetración radical Perfil cultural Intervalo hídrico óptimo
Amortiguar intermitencia e irregularidad del agua útil para los cultivos	Sello superficial Prof. enraizamiento Textura, arcilla dispersable Estabilidad agregados Infiltración Capacidad de campo	Intervalo hídrico óptimo Tasa de infiltración Profundidad de enraizamiento Cobertura vegetal (viva y muerta) Capacidad de almacenamiento. Lámina de agua fácilmente utilizable
Suministrar nutrimentos	Textura y materia orgánica CO ₃ Ca pH N, P y K por colorimetría	N activo o potencialmente mineralizable Disponibilidad de P, K, Ca, Tasa mineralización N
Suficiente aireación	Colores, moteados, concreciones Fe Mn Raíces Napa freática Drenaje Compactación Sello superficial Estructura	Macroporos, especialmente bioporos Porosidad textural y estructural Meso y macrofauna Sello superficial
Mantener condiciones térmicas propicias	Observar cultivo: estrés térmico T ₉ superficie del suelo	Actividad biológica total y de biodegradación
Carecer de sustancias tóxicas o nocivas	Salinidad, conductividad eléctrica pH Manchas sódicas Al y Mn solubles	Reacción del suelo (pH) % Na intercambiable Carbono orgánico Salinidad
Permitir una activa fijación de nitrógeno	Nodulación pH	Tasa de fijación simbiótica y asimbiótica. Disponibilidad de P, S y Ca

Continúa en página siguiente

Requisitos suelo: ideal	Observaciones directas	Análisis detallado
Favorecer eliminación toxinas radicales	Textura, materia orgánica	Capacidad de intercambio catiónico Macroporosidad
Carecer de movilidad	Textura y grietas	Coefficiente de expansividad lineal
No ser susceptible a la degradación	Cárcavas, erosión digital o en manto Tallo plántula Relieve Cobertura Estabilidad agregados Arcilla dispersa	Estabilidad de agregados Ecuación universal (USLE) Niveles de contaminantes Materia orgánica Tensioinfiltrómetro
Permitir fácil emergencia plántulas	Costra superficial	Índice de encostramiento Resistencia mecánica de la costra
Asegurar adecuado piso para labores, cosecha	Consistencia	Límites de Atterberg

A continuación, se detallan los procedimientos y criterios para juzgar la presencia o no de limitantes.

PARTE 3. **DIAGNÓSTICO EDAFOLÓGICO: PROCEDIMIENTO**

MIGUEL PILATTI Y PABLO GIBERTO

3.1. DIAGNÓSTICO GENÉRICO: VÁLIDO PARA MUCHOS CULTIVOS

Inicialmente se realiza un diagnóstico preliminar en el que se rescata, de los datos obtenidos en la anamnesis y observaciones directas en el lote, señales de importantes limitaciones; las que serán corroboradas durante el diagnóstico detallado.

CUADRO 3.7. CRITERIOS DE REFERENCIA PARA LA DETECCIÓN PRELIMINAR DE LIMITACIONES EDÁFICAS PARA LOS CULTIVOS A PARTIR DE DATOS DEL PAISAJE Y ESTADO DE LA SUPERFICIE DEL LOTE

Dato u observación	Evaluar si	Calificación	Probable limitación
Pendiente	< 1 %	Verde	Erosión
	1 - 2 %	Amarillo	Disponibilidad de agua
	> 2 %	Rojo	
Sales, humatos sódicos en superficie	No o menos del 20 %	Verde	- Toxicidad
	20 a 40 %	Amarillo	
	>40 % superficie del lote	Rojo	
Manchón con menor densidad de plantas (>20 % del lote)	Mucho (> 40 % lote)	Rojo	Toxicidad Anaerobiosis
	Alguno (20 a 40 % lote)	Amarillo	
	Pocos o ninguno (< 20 % lote)	Verde	
Freática	> 250 cm	Verde	Disponibilidad de agua Anaerobiosis
	250 a 100 cm	Amarillo	
	< 100 cm	Rojo	
Drenaje	Pobrementemente drenado o peor	Rojo	- Anaerobiosis
	Imperfectamente drenado	Amarillo	
	Moderadam. bien drenado o más	Verde	

continúa en página siguiente

Dato u observación	Evaluar si	Calificación	Probable limitación
Crecimiento des-uniforme, distinta coloración (>20% del lote)	Muchos (> 40 % lote)	Rojo	Deficiencia nutrientes Resistencia mecánica
	Algunos (20 a 40 %)	Amarillo	
	Pocos o ninguno (<20 %)	Verde	
Huellas de maquinaria y/o pisoteo	No o menos del 20 %	Verde	Captación de agua Resistencia mecánica
	20 a 40 %	Amarillo	
	>40 % superficie del lote	Rojo	
Costra o sello superficial	No	Verde	Captación de agua Resistencia mecánica Anaerobiosis
	Por sectores y/o incipiente	Amarillo	
	Sí: > 7 mm	Rojo	

(*) Si da amarillo o rojo hay que hacer el diagnóstico edafológico completo del otro/s suelo/s acompañante y ver si a una escala mayor de mapeo es posible separarlos espacialmente y así tratarlos independientemente. Una alternativa es, dentro de una misma unidad cartográfica, separar zonas con producciones distintas (monitor de cosechadora) o índices verdes (análisis de imágenes).

Si esto no es posible, habrá que identificar cuáles son las limitaciones predominantes en ambos suelos para tratarlas en toda la unidad cartográfica.

Cuando solo se desea tener una idea acerca de si hay limitaciones o no para los cultivos —en general— se usan los niveles que se exponen en el siguiente cuadro. Esas referencias también son útiles cuando se está diagnosticando para un cultivo en particular, pero, antes de comenzar un «diagnóstico detallado», se descartan del análisis aquellos atributos que muestran claramente no ser limitantes, asignando «verde» en el Cuadro 3.5. (segunda página) a aquellos indicadores que así lo demuestran. Para esto se usan los criterios expuestos en el Cuadro 3.8.

CUADRO 3.8. NIVELES DE ATRIBUTOS EDÁFICOS QUE NO SUELEN LIMITAR A LA MAYORÍA DE CULTIVOS

Requisito Suelo Ideal	Atributo	No limitante VERDE	Moderada limitación AMARILLO	Limitante rojo
(1) Tóxicos	PSI	< 7 %	7 a 15 %	>15 %
	Mn, Al	pH > 5,5	5 a 5,5	< 5
	Sal	< 2 dSm	2 a 4 dS/m	>4 dS/m
(2) Aireación	Fa ⁽¹⁾	< 1,5	1,5 a 2,5	>2,5
(3) Agua	Infiltración	entre 4 y 6 cm/h	1,5 a 4 cm/h o 6 a 8 cm/h	< 1,5 cm/h o > 8 cm/h
	A.A.F.U. ⁽²⁾	> 125 mm	70 a 125 mm	< 70mm
(4) Nutrientos	N	N activo × Pr. Enr/ 30 cm > 250 ppm	120 a 250 ppm	< 120 ppm
	S	S-so ₄ × Pr. Enr / 30 cm > 15 ppm	8 a 15 ppm	< 8 ppm
	P	P × Pr. Enr/ 30 cm > 30 ppm	10 a 30 ppm	< 10 ppm
	K	> 1,5 cmolc/kg x Pr.Enr /30cm	0,6 a 1,5 cmolc/ kg	< 0,6 cmol/kg
	Ca	> 65 % de cic	65 % a 45 % de cic	< 45 % de cic
	Mg	> 15 % de cic	7 a 15 % de cic	< 7 % de cic
(5) Fijación de Nitrógeno	pH	6 a 7,5	5,5 a 6 ó 7,5 a 8,5	< 5,5 o > 8,5
	N-Nitrato	<10 ppm	10 a 20 ppm	>20 ppm
	P	> 12 ppm	7 a 12 ppm	< 7 ppm
	Ca	> 65 % de cic	65 % a 45 % de cic	< 45 % de cic
	S	> 15 ppm	6 a 15 ppm	< 6 ppm
	Fa ⁽¹⁾	< 1,5	1,5 a 2,5	>2,5
	Fe ⁽⁴⁾	< 1,5	1,5 a 2,5	>2,5
	Sal	< 6 dS/m	6 a 9 dS/m	> 9 dS/m
(6) Impedimento Mecánico	Emergencia plántula ic ⁽³⁾	< 0,2	0,2 a 2	> 2
	Proliferación raíces ⁽⁴⁾	< 1,5	1,5 a 2,5	>2,5

Continúa en página siguiente

Requisito Suelo Ideal	Atributo	No limitante VERDE	Moderada limitación AMARILLO	Limitante ROJO
(7) Nutrimentos, indicador indirecto y antagonicos	pH	6 a 7,5	5,5 a 6 o 7,5 a 8,5	>5,5 o > 8,5
	Mat.org.	> 3 %	2 a 3 %	< 2 %
	Ca/Mg	entre 4 y 7,5 de Ca por 1 de Mg	entre 3 y 4 o 7,5 y 9	< 3 o > 9
	Ca/K	entre 15 y 38 de Ca por 1 de K	entre 9 y 15 o 38 y 45	< 9 o > 45
	K/Mg	< 1,3 de K por 1 de Mg	1,3 a 2,5	>2,5

(1) Factor de Aireación.

(2) Almacenamiento Agua Fácilmente Utilizable.

(3) Índice Encostramiento.

(4) Factor Mecánico o Estructural.

Atención: para «Tóxicos y Aireación» se considera el peor dato dentro de la prof. enraizable.

En el resto, excepto Agua, N y S, el valor ponderado de todos los horizontes de la prof. enraizable.

3.2. DIAGNÓSTICO ESPECÍFICO

Esta modalidad se realiza para un cultivo determinado y un nivel de rendimiento: por ejemplo, 35 qq/ha de girasol.

1) Carecer de sustancias tóxicas o nocivas

Aluminio y manganeso

Si bien no existen experiencias que hayan determinado el límite fitotóxico para los suelos y cultivos de la Región, se conoce que cuando el pH es inferior a 5 tenores de 1 a 2 ppm de Al intercambiable puede resultar perjudicial para los cultivos (Adams, 1981; Segalen, 1973).

La presencia de Mn soluble con pH de 6,5 a 8,5 es siempre muy baja y en suelos de textura arenosa su deficiencia se manifiesta incluso a pH 6. Sin embargo, a pH menor de 5,5 los tenores pueden ser muy altos pudiendo presentar problemas de fitotoxicidad a partir de 0,5 ppm en cultivos sensibles como la cebada (*Hordeum vulgare*) a 10 ppm para especies resistentes como el *Phaseolus vulgaris* (Adams, 1981). En pH entre 5,5 y 5 es el Mn y no el Al el que, probablemente, sea fitotóxico; en cambio a pH más ácidos es el Al.

- Interpretación:
 [VERDE] pH mayor a 5,5
 [AMARILLO] pH entre 5 a 5,5 toxicidad por Mn.
 [ANARANJADO] pH entre 4,5 y 5.
 [ROJO] pH menor a 4,5 toxicidad por Al

Toxicidad aluminio: inhibe la división celular de meristemas apicales, las raíces no crecen. En cambio, el Mn afecta a la parte aérea, distorsionando a las hojas jóvenes.

Sodio

Las plantas absorben sodio del suelo con el agua. A medida que es transpirada el Na se acumula en las hojas y cuando se concentra produce efectos tóxicos. El límite de tolerancia de cada cultivo es distinto, pero para muchas especies arbóreas la toxicidad se presenta con porcentaje Na superior al 0,25–0,50 % respecto al peso seco de la hoja.

El efecto tóxico del sodio no depende solo de la acumulación de este catión en el suelo, sino de su proporción respecto del calcio. Por tal razón la tolerancia de los cultivos se relaciona con el PSI del suelo. En el Cuadro 3.9 se informa acerca de la tolerancia de algunos cultivos. Si el cultivo que interesa no está en el cuadro tomar como valor crítico al que se muestra para cultivos «sensibles».

- Interpretación:
 [VERDE]: PSI por debajo de la mitad del intervalo indicado en el Cuadro 3.9 .
 [AMARILLO]: PSI por encima de la mitad del intervalo indicado en el Cuadro 3.9 .
 [ROJO] PSI por encima del límite superior

CUADRO 3.9. TOLERANCIA DE LOS CULTIVOS AL PORCENTAJE DE SODIO INTERCAMBIABLE (PSI) (ADAPTADO DE PEARSON, 1960; AYERS Y WESCOTT, 1986; CHHABRA, 1996)

Tolerancia	Cultivo	Nombre científico
muy sensible (PSI = 2 – 10)	Aguacate	Persea americana
	Durazno	Prunus persica
	Frutos de cáscara	
	Mandarina	Citrus reticulata
	Naranja	Citrus sinensis
	Nogal	Juglans regia
	Pomelo	Citrus paradisi

continúa en página siguiente

Tolerancia	Cultivo	Nombre científico
sensibles (PSI = 10 – 20)	Algodón (germin.)	Gossypium hirsutum
	Arveja o Guisante	Pisum sativum
	Cajan	Cajanus cajan
	Caupí	Vigna sinensis y unguiculata
	Frijol	Phaseolus vulgaris
	Frijol negro	Phaseolus mungo
	Garbanzo	Cicer arietinum
	Lenteja	Lens culinaris
	Maíz	Zea mays
	Maní	Arachis hypogaea
	Sésamo o Ajonjolí	Sesamun indicum
	Soja	Glicine max
	Soja verde	Phaseolus aurus
moderadamente tolerantes (PSI = 20 – 40)	Ajo	Allium sativum
	Arroz	Oryza sativa
	Avena	Avena sativa
	Caña de azúcar	Saccharum officinarum
	Cártamo	Carthamus tinctorus
	Cebolla	Allium cepa
	Festuca alta	Festuca arundinacea
	Girasol	Helianthus annuus
	Lechuga	Lactuca sativa
	Lino	Linum usitatissimum
	Mijo perla	Pennisetum typhoides
	Mostaza parda	Brassica juncea
	Nabo	Brassica rapa
	Pasto miel	Paspalum dilatatum
	Rábano	Raphanus sativus
	Trébol Alejandrino	Trifolium alexandrinum
	Trébol amarillo	Melilotus parviflora
	Trébol blanco	Trifolium repens
	Zanahoria	Daucus carota

continúa en página siguiente

Tolerancia	Cultivo	Nombre científico
tolerantes (PSI = 40 – 60)	Alfalfa	Medicago sativa
	Algodón	Gossypium hirsutum
	Cebada	Hordeum vulgare
	Centeno	Secale cereale
	Espinaca	Spinacia oleracea
	Gramilla o Pasto Bermuda	Cynodon dactylon
	Remolacha azucarera	Beta vulgaris
	Rye grass	Lolium multiflorum
	Sorgo	Sorghum vulgare
	Teosinte	Euchlaena mejicana
	Tomate	Lycopersicon esculentum
	Trébol persa	Trifolium resupinatum
	Trigo	Triticum vulgare
	Vicia	Vicia sativa
	Agropiro	Agropyron elongatum
	Agropiro crestado	Agropyron cristatum
muy tolerantes (PSI = > 60)	Gramma Rhodes	Chloris gayana
	Pasto de Karnal	Leptochloa fusta
	Pasto Pará	Brachiaria mutica

Salinidad

En gran parte de las regiones donde la evapotranspiración potencial excede a la precipitación, o donde el nivel freático se encuentra cerca de la superficie (menos de un metro) se presentan acumulaciones de sales en la superficie del suelo o próxima a ella. También, la calidad del agua de riego influye considerablemente sobre el peligro potencial de salinizar los suelos cuando su aplicación y manejo no son adecuados.

Los suelos afectados por sales suelen tener alto contenido de sodio intercambiable. La vegetación natural o cultivada se presenta en manchones debido a la heterogeneidad de esa acumulación. En algunos casos, la sal se evidencia por una eflorescencia blanca en superficie, y en otros el alto contenido de sodio ha digerido la materia orgánica del suelo, dándole un color negro; el «álcali blanco» y el «álcali negro», respectivamente, con que se identificó a los suelos afectados en los primeros trabajos técnicos.

Las principales sales solubles están integradas por CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ o Na^+ , con menores concentraciones de otros elementos (N, B, Se).

El efecto de las sales sobre las plantas es muy variado y se relaciona con agua menos disponible para los cultivos por presión osmótica elevada, efectos tóxicos, desbalances iónicos y condiciones físicas desfavorables,⁹ lo cual repercute en la selección de cultivos y en el decrecimiento de los rendimientos.

La determinación de la salinidad se lleva a cabo a partir de los valores del extracto de saturación expresados en dS/m a 25°C.

Fórmula de Maas–Hoffman (1977): estos investigadores informaron que entre la salinidad del suelo y la producción de los cultivos existe una relación lineal, que se puede expresar por la fórmula siguiente (modificada en este trabajo al introducir FC):

$$Pr = 100 - b \times [CEEs \times (1 \pm FC) - a]$$

Donde:

Pr es la producción del cultivo en % respecto del máximo (Producción relativa).

CEEs, salinidad del suelo expresada como conductividad eléctrica del extracto de saturación, en dS/m, del horizonte más salino dentro de la profundidad enraizable.

a y b son dos «parámetros» que cambian según el cultivo (Cuadro 3.11).

FC, factor de corrección según la naturaleza de las sales (Cuadro 3.10).

La fórmula de Mass–Hoffman puede representarse gráficamente como lo indica la Figura 3.2 expresando en ordenadas los valores de Pr y en abscisas los de CEEs. Como se puede ver, existe un primer tramo horizontal, de longitud «a» en el que Pr=100. Esto quiere decir que mientras la CEEs sea igual o menor que «a» dS/m, el cultivo no experimenta disminución en los rendimientos por causa de la salinidad. El parámetro «a» se puede definir como el valor umbral de la salinidad para cada cultivo; en el ejemplo de la figura su valor es de 5 dS/m.

Luego se observa un tramo recto e inclinado, dibujado en la Figura 3.2 que se prolonga hasta la ordenada. La inclinación está dada por la pendiente de la recta: «b», esta indica que por cada aumento en una unidad de CEEs la PR decrece «b» veces.

La recta avanza hasta cortar el eje de abscisas en el punto A en el cual el cultivo es totalmente inviable y la producción nula; en este caso ocurre a los 10 dS/m.

9 Poca sal y mucho sodio: dispersión.

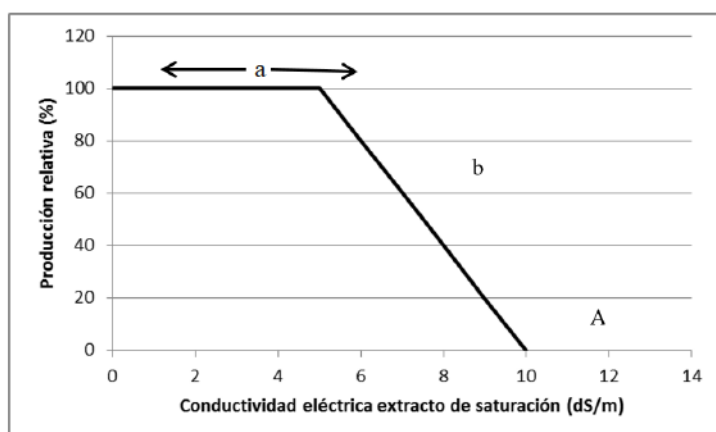


FIGURA 3.2. RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL EXTRACTO DE SATURACIÓN DEL SUELO Y LA PRODUCCIÓN RELATIVA DE LOS CULTIVOS.

CUADRO 3.10. FACTOR DE CORRECCIÓN (FC) A UTILIZAR EN LA ECUACIÓN DE MASS Y HOFMANN PARA CONSIDERAR EL EFECTO DEL ANIÓN PRESENTE EN LA SAL DEL AGUA EN EL SUELO SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS.

Aniones predominantes (más del 20 % del total)	Factor de Corrección (Fc)
Bicarbonatos y carbonatos	+ 0,50
Bicarbonatos y cloruros	+ 0,37
Bicarbonatos y sulfatos	+ 0,25
Cloruros	+ 0,13
Sulfatos y cloruros	0,00
Cloruros y sulfatos	- 0,25
Sulfatos	- 0,50

Valores de los parámetros a y b

Aplicando la fórmula de Maas–Hoffman a la gran cantidad de datos recopilados por Ayers y Westcot, se calcularon los valores de los parámetros a y b para los distintos cultivos. Estos valores se indican en el Cuadro 3.11.

Resistencia y sensibilidad de las plantas a la salinidad

La fórmula de Maas–Hoffman permite una nueva definición de la característica «resistencia a la salinidad» de las plantas, y la introducción de un concepto nuevo: sensibilidad a la salinidad. ^a

a) Resistencia a la salinidad

Como se ha dicho antes, el parámetro «a» se puede considerar como el umbral de salinidad para cada cultivo: si la *cees* es menor que «a», el cultivo no es afectado. Es una buena medida de la resistencia de la salinidad de las plantas.

b) Sensibilidad a la salinidad

A diferencia de la resistencia, que relaciona la producción con la salinidad, la sensibilidad se refiere a cuánto la producción se ve afectada por pequeñas variaciones de salinidad. Observando la fórmula de Maas-Hoffman se interpreta que el valor de la sensibilidad de $b=9,80$. Quiere decir que, si la CEEs aumenta 1 dS/m, la producción de tomate disminuye un 9,8 % respecto a la producción máxima.

Una planta es muy sensible cuando ligeras variaciones de la CEEs dan lugar a variaciones fuertes de Pr, es decir cuando, «b» es alto.

• Interpretación del Resultado de Producción Relativa (Pr):

[VERDE] Mayor a 90

[AMARILLO] Entre 70 y 90

[ANARANJADO] Entre 50 y 70

[ROJO] Menor a 50

Apéndice

Antiguamente se utilizaba mmhos/cm como unidad de conductividad, hoy ha sido reemplazada por dS/m; los valores expresados de una u otra forma son numéricamente iguales.

Relaciones de interés

1. La relación, aproximada, entre la conductividad y el contenido de sales en solución del extracto de suelo es:
 $\% \text{ de sales en solución} = 0,064 \times \text{Conductividad en dS/m.}$
2. La relación entre la concentración de cationes o aniones en el extracto y la conductividad es:
Cationes en extracto saturación $\text{cmolc /L} = 10 \times \text{Conductividad en dS/m.}$
Aniones en extracto saturación $\text{cmolc /L} = 10 \times \text{Conductividad en dS/m.}$
La conductividad eléctrica puede multiplicarse por 10 para obtener los cmolc /L de las sales presentes.
3. La relación entre la presión osmótica del extracto del suelo y su conductividad es:
Presión osmótica en bares = $0,36 \times \text{Conductividad en dS/m.}$
Se consideran tóxicas las concentraciones, en el extracto de saturación, mayores a:
HCO₃⁻ más de 5 meq¹⁰/L B más de 1,5 ppm Cl⁻ más de 10 meq/L

10 Conversión: 1 mmol = 1 mEq x valencia o 1mmolc = 1meq

CUADRO 3.11. PARÁMETROS PARA ESTIMAR LA REDUCCIÓN DEL RENDIMIENTO RELATIVO DE LOS CULTIVOS A PARTIR DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL EXTRACTO DE SUELO SATURADO

Cultivo		a (dS/m)	b (dS/m)
Nombre común	Nombre científico		
CULTIVOS EXTENSIVOS			
Algodón	Gossypium hirsutum	7,7	5,4
Arroz	Oryza sativa	3,0	11,9
Caña de azúcar	Saccharum officinarum	1,7	5,9
Cártamo	Carthamus tinctorius	5,3	10,9
Cebada	Hordeum vulgare	8,0	5,0
Girasol	Heliantus annus	1,7	5,9
Habas	Vicia faba	1,6	9,6
Lino	Linun usitatissimum	1,7	11,9
Maíz	Zea mays	1,7	11,9
Maní	Arachis hypogea	3,2	29,4
Remolacha	Beta vulgaris	7,0	6,2
Soja	Glycine max	5,0	20,0
Sorgo	Sorghum bicolor	4,0	7,1
Trigo	Triticum aestivum	6,0	7,1
HORTALIZAS			
Alcaucil o Alcachofa	Cynara scolymus	6,1	11,5
Apio	Apium graveolens	1,8	4,8
Batata	Ipomoea batatas	1,5	11
Berenjena	Solanum melongena	1,1	6,9
Brócoli	Brassica olerácea botrytis	2,8	9,3
Calabaza	Cucurbita spp.	1,2	13
Cebolla	Allium cepa	1,2	16,1
Chaucha o Judía verde	Phaseolus vulgaris var. vulgaris	1,6	9,6
Col	Brassica olerácea	1,8	9,6
Espinaca	Spinacia olerácea	2,0	7,6
Lechuga	Lactuca sativa	1,3	12,8
Maíz dulce	Zea mays	1,7	11,9
Melón	Cucumis melo	2,2	7,3
Papa o Patata	Solanum tuberosum	1,7	11,9
Pepino	Cucumis sativus	2,5	13,2

Continúa en página siguiente

Cultivo		a (dS/m)	b (dS/m)
Nombre común	Nombre científico		
CULTIVOS EXTENSIVOS			
Pimiento	Capsicum annum	1,5	11
Poroto o Frijol	Phaseolus vulgaris	1,0	19,2
Rábano	Raphanus sativus	1,2	10,2
Sandía	Citrullus lanatus	0,9	9
Tomate	Lycopersicon esculentum	2	7,5
Zanahoria	Daucus carota	1	14
FRUTALES			
Almendro	Prunus dulcis	1,5	19,2
Caqui	Diospyros kaki	1,7	21,0
Cerezo	Prunus avium	1,5	22,0
Ciruelo	Prunus doméstica	1,5	17,9
Damasco o Albaricoque	Pyrus armeniaca	1,6	23,8
Durazno	Prunus persica	1,7	21,0
Frambuesa	Rubus idoeus	1,0	22,7
Frutilla o Fresa	Fragaria spp.	1,0	33,3
Granada	Puncia granatum	2,7	8,8
Higuera	Ficus carica	2,7	8,8
Limonero	Citrus limón	1,7	16,1
Mandarina	Citrus reticulata	1,7	16,0
Manzano	Malus sylvestris	1,7	16,1
Mora	Rubus ursinus	1,5	22,0
Naranja	Citrus sinensis	1,7	16,1
Níspero	Eriobotrya japonica	1,6	24,0
Nogal	Juglans regia	1,7	16,1
Olivo	Olea europea	2,7	8,8
Palmera datilera	Phoenix dactilifera	4,0	4,5
Palta o Aguacate	Persea americana	1,3	20,8
Peral	Pyrus communis	1,7	16,1
Pomelo	Citrus paradisi	1,8	16,1
Vid	Vitis spp.	1,5	9,6
Zarzamora	Rubus spp.	1,5	21,7

continúa en página siguiente

Cultivo		a (dS/m)	b (dS/m)
Nombre común	Nombre científico		
CULTIVOS EXTENSIVOS			
FORRAJERAS			
Agropiro crestado	Agropyron cristatum	7,5	6,7
Agropiro alargado	Agropyron elongatum	7,5	4,2
Agropiro del desierto	Agropyron desertorum	3,5	4,0
Alfalfa	Medicago sativa	2,0	7,4
Alfalfa Chilota o Lotera	Lotus uliginosus	2,3	19,2
Algodón	Gossypium hirsutum	7,7	5,2
Avena	Avena sativa	1,7	12
Ballica o raigrás perenne	Lolium perenne	5,6	7,6
Caupí	Vigna unguiculata	1,3	14,0
Cebada, heno	Hordeum vulgare	6,0	7,1
Centeno salvaje	Elymus triticoídes	2,7	6,0
Cola de Zorro	Alopecurus pratensis	1,5	9,6
Eragrostis	Eragrostis spp.	2,0	8,4
Falaris	Phalaris tuberosa	4,6	7,7
Festuca	Festuca elatior	3,9	5,3
Gramilla o Pasto de Bermudas	Cynodon dactylon	6,9	6,4
Lotus o Loto	Lotus corniculatus	5,0	10,0
Maíz forrajero	Zea mayz	1,8	7,4
Pasto llorón	Eragrostis spp.	2,0	8,3
Pasto oville	Dactylis glomerata	1,5	6,2
Sorgo forrajero	Sorghum Sudanense	2,8	4,3
Trébol ladino, rojo, fresa	Trifolium spp.	1,5	11,9
Trébol de Alejandría	Trifolium alexandrinum	1,5	19,2
Vicia	Vicia sativa	3,0	10,9

2) Garantizar suficiente aireación

El factor por aireación, Fa, permite reconocer horizontes con limitaciones por anaerobiosis; se basa en la proporción de macroporos del suelo (P), e indicio de niveles freáticos fluctuantes, o de anegamientos temporarios, tales como la presencia de moteados (M) o concreciones ferromangánicas (U). Se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$Fa = \sqrt[3]{P \times M \times U}$$

• Interpretación

Los índices que se asignan a cada rasgo edáfico surgen del Cuadro 3.12., en el que Fa es:

[VERDE] 1,5 indica sin limitaciones importantes,

[AMARILLO] 1,5 a 2,5 limitación considerable y

[ROJO] > 2,5 muy limitante.

Se diagnostican considerando los horizontes de la profundidad enraizable.

CUADRO 3.12. GRADO DE RESTRICCIÓN A LA PROLIFERACIÓN DE RAÍCES (ÍNDICE) POR DEFICIENTE AIREACIÓN.

Símbolo	Propiedad	Valor o Categoría	Índice
M	Moteados	a) Ninguno, pocos, no se informa (< 2 %)	1
		b) Comunes, frecuentes, regulares	2
		c) Abundantes, muchos (>20 %)	3
U	Nódulos o concreciones ferromagnésicas	a) Ninguno, pocos, no se informa	1
		b) Comunes, frecuentes	2
		c) Abundantes, muchos	3
P	Macroporosidad	a) > 0,15	1
		b) 0,05 – 0,15	2
		c) < 0,05	3

3) Amortiguar la intermitencia e irregularidad del agua útil

Captación de agua (infiltración)

Interesa que la mayor parte del agua que se aporta, sea como riego o precipitación, ingrese en el perfil y se almacene en él; así queda disponible para el cultivo.

Valores de referencia

Teniendo en cuenta la tasa de infiltración básica o conductividad hidráulica saturada (Ks) del horizonte superficial se considera:

- Interpretación de la Tasa de Infiltración Básica o Ks horizonte superficial.
[VERDE] 40 a 60 mm/h: No es limitante.
[AMARILLO] 20 a 40 mm/h o entre 60 y 80 mm/h: Moderadamente limitante.
[ANARANJADO] 10 a 20 mm/h u 80 a 120 mm/h: Baja o excesiva captación.
[ROJO] < 10 mm/h: Muy baja captación o muy alta: > 120 mm/h.

Medición de la captación de agua

Lo que interesa es medir la capacidad que tiene un suelo que se encuentra a capacidad de campo, para infiltrar agua durante una hora. Para ello existen las siguientes técnicas:

- Doble anillos
- Simulador de lluvia
- Infiltrómetro de surco
- Tensioinfiltrómetro

• Estimación de la capacidad de infiltración

Si no se dispone de la medida de la capacidad de infiltración,¹¹ puede estimarse; para ello consultar el capítulo 4.3 ítem 9. Allí se utiliza el método de la Curva Número para aplicarlo solo hace falta conocer la intensidad de precipitación más frecuente durante el ciclo de cultivo¹² y la textura del horizonte superficial.

Al valor así obtenido se lo corrige por susceptibilidad a la formación del sello superficial (costra). Para ello se aplica el siguiente índice, utilizando los datos del horizonte superficial:

$$I_c = \frac{1,5 \times L_f + 0,75 \times L_g}{A + (10 \times M_O)}$$

Donde:

I_c es índice de encostramiento – L_f: limo fino (2 – 20 mm) – L_g: limo grueso (20 – 50 mm) – A: % de arcilla – M_O: % de materia orgánica. Si solo se tiene el dato de limo total, se supone que la mitad es grueso y la mitad fino.

¹¹ Siempre debe preferirse el dato medido –si se dispone de él– que el estimado.

¹² Si no se conoce adoptar 60 mm.

Factor de corrección por susceptibilidad al sello (FCS):

Si el índice de encostramiento es superior a 2, $FCS = 0,4$; es decir solo el 40 % de lo que podría infiltrar en ese suelo ingresará a él porque se formará un sello en superficie.

Si I_c está entre 1 y 2, $FCS = 0,6$

Si I_c está entre 0,2 y 1, $FCS = 0,8$

Si es menor que 0,2 la infiltración no se deberá corregir, $FCS = 1$.

Por lo tanto, la lámina que infiltra en una hora será

Infiltración = precipitación modal (por hora) x proporción que infiltra según $CN \times FCS$

Atención: un error frecuente en este cálculo es que se ingresa el valor de I_c en vez del Factor de Corrección por sello (FCS).

Almacenamiento de agua

Agua fácilmente utilizable

La lámina de agua fácilmente utilizable en la profundidad de enraizamiento se utiliza para reconocer limitaciones en la capacidad de almacenamiento. Se calcula sumando, para los horizontes incluidos en la profundidad de enraizamiento, el 66 % o 50 % del agua útil. Esos porcentajes estiman al agua fácilmente aprovechable para cultivos que crecen con bajas demandas atmosféricas (otoños invernales) o altas (primavera estivales).

Para evaluar capacidad de almacenamiento de agua fácilmente utilizable del suelo en estudio se considera que el periodo crítico para un cultivo sensible a la deficiencia hídrica, como el maíz, es de aproximadamente 3 semanas con evapotranspiración potencial de 6 mm/día; por lo tanto, si hay 12 cm fácilmente disponibles el cultivo no tendrá estrés hídrico; en caso contrario habrá deficiencia creciente. Para calificar al suelo según su capacidad de almacenamiento de agua se usan los siguientes criterios:

• Interpretación:

[VERDE] Igual o superior al a 12,5 cm: no es limitante.

[AMARILLO] Entre 9,0 y 12,5 cm.

[ANARANJADO] Entre 7,0 y 9,0 cm.

[ROJO] Menos de 7,0 cm es extremadamente limitante

Lámina de agua útil en presembrado

Corresponde cuantificar la lámina de agua útil en la profundidad de enraizamiento en pre siembra. Para interpretar se compara el agua útil almacenada con respecto a la de manda total de agua del cultivo durante el ciclo (evapotranspiración potencial, EVT): usar los siguientes criterios.

- Interpretación: el agua útil almacenada en la siembra permite abastecer
[VERDE] Mayor 65% de EVT
[AMARILLO] 50 a 65% de EVT
[ROJO] Menor 35% de EVT

cm de agua útil almacenada a la siembra / cm de EVT que se requiere en el ciclo x 100

4) Suministrar nutrientes

Nitrógeno

Para reconocer si hay deficiencia o no de N se estima, por un lado, la demanda de N del cultivo para lograr el rendimiento buscado y, por otro, la oferta desde el suelo: Luego se compara y se identifica si hay necesidad de abono o no.

Para realizar ambas estimaciones se procede así:

1º) *Especifique el rendimiento esperado: R_x*

2º) *Estime cuánta biomasa en total (BT_x) habría que producir para llegar a R_x ; use la siguiente ecuación:*

$$BT_x = \frac{R_x \times (1 - \frac{HC}{100})}{IC_{BT}}$$

Donde:

BT_x es la biomasa total máxima en kg MS/ha que debe generarse para obtener el rendimiento esperado (R_x);

HC es la humedad comercial del grano o producto útil.

IC_{BT} es el índice de cosecha respecto de la biomasa total producida (ver cómo se calcula al pie del Cuadro 3.13). Así se tiene en cuenta la proporción de fruto comercializable con respecto a la biomasa total producida y no solo a la biomasa aérea.

En el Cuadro 3.13 se ofrecen índices de cosecha que consideran solo la parte aérea (IC) para distintos cultivos. Los valores de la última columna indican la proporción de raíces (PR) en biomasa total.

Generalizando puede considerarse que PR para cultivos invierno–primaverales oscila entre 0,15 a 0,25; cultivos estivales varía entre 0,08 y 0,18. En ambos casos debe adoptarse el valor menor cuanto más alta sea la expectativa de rendimiento.

Atención:

Normalmente la bibliografía informa el IC (índice de cosecha); éste es la relación entre el fruto comercializable con respecto a la biomasa aérea y no a la biomasa total. Aquí interesa estimar la biomasa total y no solo la aérea para cuantificar la demanda total de nutrientes del cultivo.

La biomasa total incluye, además de la parte aérea, a las raíces y a los mucílagos, excreciones y exudados radicales.

PR es la proporción de raíces en la Biomasa Total pero no tiene en cuenta las sustancias orgánicas que salen de las raíces: En términos generales por cada 100 kg de materia seca que se deriva para el crecimiento radical; 70 kg son raíces y 30 kg son secreciones.

Por lo tanto, la biomasa adicional que va hacia las raíces y que no es medida usualmente puede estimarse con el siguiente factor:

$$100/70 = 1,43$$

PRce (Proporción de raíces considerando los exudados) es = PR x 1,43

Aquí no se utiliza esta corrección, aunque puede ser de gran utilidad cuando se estudia el balance de C en el suelo y –especialmente– la generación de meso y macroagregados.

El índice de cosecha que corresponde a la biomasa total (y no solo a la aérea), lo denominamos IC_{BT} y se calcula así: $IC_{BT} = IC \times (1-PR)$

Donde:

IC_{BT} , índice de reparto respecto a la BT.

IC, índice de cosecha respecto a la biomasa aérea.

CUADRO 3.13. ÍNDICES DE COSECHA (IC), PROPORCIÓN DE RAÍCES (PR) Y REQUERIMIENTOS INTERNOS DE NITRÓGENO, FÓSFORO, POTASIO Y AZUFRE (RI N, RI P, RI K, RI S) EXPRESADOS EN PORCENTAJES DE LA BIOMASA AÉREA PARA LOS PRINCIPALES CULTIVOS. VALORES ENTRE PARÉNTESIS () SON APROXIMADOS.

Cultivo	Biomasa aérea ¹³ (kg/ha) (¹)	RI N (%)	RI P (%)	RI K (%)	RI S (%)	RI Ca (%)	RI Mg (%)	IC	PR
Alfalfa	11.000	2,30	0,22	1,90	0,24	1,40	0,30	0,60 a 0,85	0,15 a 0,30
Algodón	6.000	2,7	0,28	0,83	0,2	0,13	0,27	0,4 a 0,5 (*)	0,12
Arroz	18.100	0,90	0,17	1,40	0,12	0,21	0,19	0,44 a 0,52	0,12
Avena grano	12.000	1,20	0,17	1,20	0,21	0,15	0,17	0,44 a 0,39	(0,20)
Avena forrajera	13.800	2,30	0,23	1,50	0,21	0,17	0,2	0,60 a 0,85	(0,20)
Blue grass heno	11.000	1,50	0,22	1,25	0,13	0,40	0,18	0,6 a 0,85	(0,20)
Canola o Colza	15.000	1,20	0,20	1,20	0,20	1,0	0,70	0,20 a 0,33	0,15
Caña de azúcar	70.000	0,20	0,04	0,37	0,04	0,05	0,04	0,75 a 0,9	0,15
Caupí	10.000	3,00	0,27	1,66	0,33	1,38	0,38	0,40 a 0,50	0,12
Cebada (grano)	13.300	1,30	0,17	1,10	0,18	0,23	0,10	0,45 a 0,49	(0,20)
Centeno	5.250	1,10	0,17	0,62	0,21	0,21	0,11	0,36	(0,20)
Coastal heno	21.000	1,90	0,19	1,40	0,22	0,37	0,15	0,60 a 0,85	(0,20)
Falaris - Trébol sub.	4.000	2,30	0,21	1,50	0,14	0,15	0,20	0,60 a 0,8	(0,20)
Garbanzos	5.700	2,50	0,20	1,60	0,20	0,80	0,50	(0,35)	(0,15)
Girasol	12.500	1,50	0,20	1,90	0,30	1,80	1,10	0,25 a 0,36	0,14
Haba	7000	2,5	0,20	1,80	0,20	1,20	0,45	0,35	0,15
Lentejas	5.400	2,50	0,20	1,80	0,20	0,90	0,65	0,35	(0,12)
Lino	8.500	1,00	0,60	1,30	0,40	0,30	0,20	0,27 a 0,35	0,18
Maíz grano	32.600	1,00	0,17	1,00	0,14	0,20	0,20	0,43 a 0,55	0,10 a 0,18
Maíz silo	18.000	1,50	0,23	1,20	0,14	0,28	0,18	0,75 a 0,90	0,10 a 0,18
Maní	7.000	2,30	0,24	1,75	0,36	1,00	0,38	0,33 a 0,40	0,16
Papas	15.400	1,70	0,18	1,30	0,03	0,015	0,03	0,65 a 0,80	(0,12)
Poroto (Frijol)	9.000	2,30	0,20	1,80	0,20	1,15	0,43	0,33	(0,12)
Pradera mixta	6.000	2,30	0,18	1,40	0,13	0,28	0,19	0,60 a 0,75	(0,20)
Pradera natural	3.000	1,50	0,25	1,50	0,25	0,20	0,15	0,45 a 0,75	(0,25)
Raigrás	15.000	2,30	0,23	1,50	0,15	0,21	0,18	0,65 a 0,85	(0,20)
Remolacha azuc.	24.600	1,10	0,16	1,50	0,03	0,20	0,16	0,65 a 0,80	(0,15)
Soja	13.500	2,30	0,28	1,35	0,50	1,60	0,90	0,46	0,12
Sorgo graníf.	14.000	1,20	0,20	1,20	0,28	0,37	0,26	0,40 a 0,33	0,15
T. blanco + raigrás	13.800	3,20	0,23	1,50	0,16	0,30	0,20	(0,60 a 0,85)	(0,20)

continúa en página siguiente

Cultivo	Biomasa aérea ¹³ (kg/ha) (1)	RI N (%)	RI P (%)	RI K (%)	RI S (%)	RI Ca (%)	RI Mg (%)	IC	PR
Tabaco	9.600	3,80	0,16	2,50	0,70	3,70	0,90	0,54	0,10
Trébol rosado	7.000	3,50	0,30	2,00	0,14	1,40	0,34	(0,60 a 0,75)	(0,20)
Trébol subterráneo	6.000	3,20	0,23	2,10	0,14	1,0	0,30	(0,60)	(0,20)
Trigo	17.800	1,20	0,17	1,20	0,15	0,13	0,17	0,42	0,15
Vicia	10.000	3,00	0,27	1,66	0,33	1,38	0,38	0,65	0,15

(1) Esta es la biomasa sobre la que se midió cuánto, N, P, K y S había a madurez fisiológica del cultivo por cada 100 kg M.S.

En algunos casos está subestimado porque se midió a cosecha (paja o rastrojo más grano) habiéndose perdido –entonces– una importante cantidad de hojas, parte del fruto en el proceso de cosecha (como la mazorca en el maíz para grano).

(*) algodón, índice de cosecha de semilla más fibra. Solo fibra entre 0,15 y 0,20.

CUADRO 3.14. EXTRACCIÓN DE NITRÓGENO, FÓSFORO, POTASIO Y AZUFRE POR LA COSECHA DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS.

Cultivo	Ext N (%)	Ext P (%)	Ext K (%)	Ext S (%)	Ext Ca (%)	Ext Mg (%)
Alfalfa	2,70	0,25	2,10	0,35	1,20	0,30
Algodón	7,00	1,30	3,30	1,20	0,10	0,27
Arroz	1,50	0,30	0,30	0,06	0,01	0,10
Avena grano	2,00	0,30	0,30	0,18	0,08	0,12
Avena forrajera	2,30	0,23	1,50	0,21	0,17	0,2
Blue grass heno	1,50	0,22	1,25	0,13	0,40	0,18
Canola (Colza)	3,8	0,10	0,30	0,70	1,00	0,7
Caña de azúcar	0,34	0,06	0,30	0,02	0,05	0,05
Cebada grano	1,50	0,30	0,50	0,20	0,21	0,10
Cebada forrajera	1,30	0,17	1,10	0,18	0,23	0,10
Centeno grano	1,50	0,3	0,50	0,16	0,20	0,10
Coastal heno	1,90	0,19	1,40	0,22	0,37	0,15
Falaris –Trébol subt.	2,30	0,20	1,50	0,14	0,15	0,20
Garbanzos	4,60	4,00	3,30	0,60	1,50	0,70
Girasol	2,40	0,70	0,60	0,20	0,10	0,30
Haba	3,70	0,30	1,20	0,55	0,33	0,30
Lentejas	5,30	0,50	3,50	0,25	1,00	0,70
Lino	3,00	0,60	0,80	0,30	0,20	0,09
Maíz grano	1,50	0,30	0,40	0,10	0,02	0,20

continúa en página siguiente

Cultivo	Ext N (%)	Ext P (%)	Ext K (%)	Ext S (%)	Ext Ca (%)	Ext Mg (%)
Maíz silo	2,20	0,20	1,00	0,14	0,28	0,18
Maní	4,40	0,40	1,10	0,30	0,20	0,22
Papa	0,33	0,06	0,52	0,025	0,01	0,025
Poroto (frijol)	3,50	0,40	1,50	0,50	0,30	0,30
Pradera mixta	2,30	0,18	1,4	0,13	0,28	0,19
Pradera natural	1,50	0,25	1,05	0,25	0,20	0,15
Raigrass	2,30	0,23	1,50	0,15	0,21	0,18
Remolacha azucarera	0,20	0,20	0,20	0,02	0,11	0,06
Soja	5,50	0,60	2,00	0,30	0,30	0,40
Sorgo granífero	1,20	0,21	1,20	0,28	0,37	0,26
Sorgo forrajero	2,00	0,40	0,40	0,20	0,09	0,10
T.blanco + Raigrás	3,2	0,23	1,50	0,16	0,3	0,2
Tabaco	3,8	0,33	4,2	0,7	2,7	0,9
Trébol rosado	3,50	0,30	2,0	0,14	1,4	0,34
Trébol subterráneo	3,2	0,23	2,1	0,14	1,00	0,30
Trigo	2,00	0,40	0,3	0,20	0,04	0,20

3º) Demanda de N del cultivo

Debido a que la composición nitrogenada del cultivo varía a medida que la biomasa total aumenta; es decir: RIN no es un valor único para cada cultivo, sino que cambia según BT como puede verse en la Figura 3.3.

Obsérvese que en los primeros estadios la concentración en la plántula se mantiene (Ntula) y luego decrece. La ecuación que describe este comportamiento es:

$$RIN = Ntula \times \left(\frac{BT}{1000} \right)^{-\alpha N} \dots \dots BT < 1000 \dots RIN = Ntula$$

Donde:

RIN es el requerimiento interno de N (gN/gms);

Ntula concentración de N en el cultivo al estadio de plántula: suele ser 0,057 y 0,041 gN / gms en plantas C3 y C4 respectivamente;

αN es la pendiente de la curva que se obtiene a partir de datos empíricos; ver más abajo

BT biomasa total del cultivo (kg Ms/ha).

La cantidad de N que debe absorber el cultivo (N cultivo) para lograr BTX se calcula así:

$$N_{\text{cultivo}} = \frac{RIN}{100} \times BTX$$

Donde:

Ncultivo, demanda total de nitrógeno del cultivo, al finalizar el ciclo (kg N/ha).

BTX, biomasa total al finalizar el ciclo (kg MS/ha).

RINX, concentración de nitrógeno en el cultivo, a madurez fisiológica (kg N/100kg MS).

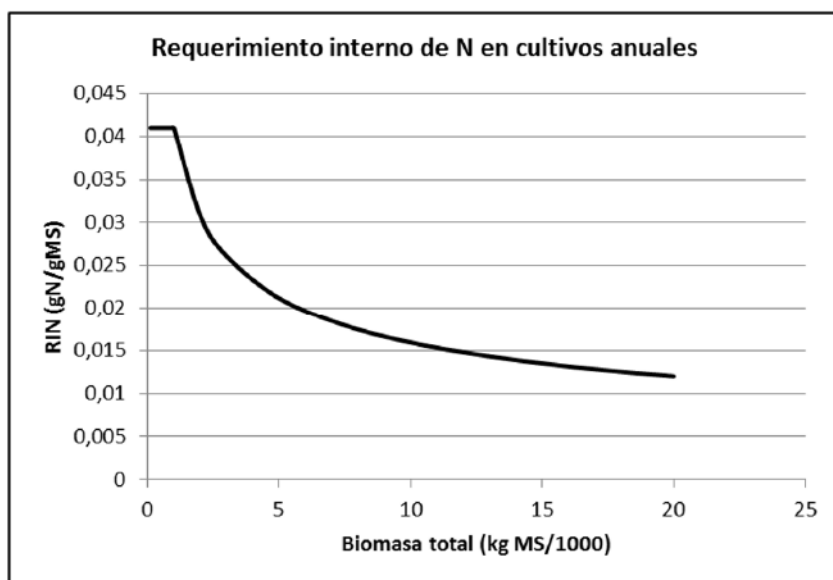


FIGURA 3.3. CAMBIO EN LA COMPOSICIÓN DE NITRÓGENO DEL CULTIVO (RIN) SEGÚN AUMENTA LA BIOMASA TOTAL.

Debido a que el RIN que se muestra en el Cuadro 3.13 se obtuvo para una determinada biomasa a madurez fisiológica (BIOREF), para estimar cuánto será el RIN para otra biomasa —en este caso la necesaria para lograr el rendimiento objetivo— deben realizarse las siguientes correcciones para así conocer el RINX: el requerimiento de N correspondiente al rendimiento objetivo.

Primero estimar cuánto es la pendiente de la ecuación anterior (α_N); para ello se utiliza el RIN y BIOREF del Cuadro 3.13

$$\alpha_N = \frac{-\ln\left(\frac{RIN}{NTULA}\right)}{\ln\left(\frac{BIOREF}{1000}\right)}$$

Donde:

Biomasa medida en el campo a madurez fisiológica (BIOREF, Cuadro 3.13);
RIN es requerimiento interno de N (gN/ g MS Biomasa aérea; Buscar en Cuadro 3.13 y dividir por 100);
Ntula concentración de N en el cultivo al estadio de plántula: 0,057 y 0,041 gN / gMS en plantas C3 y C4 respectivamente.

Segundo estimar el requerimiento interno de N que corresponde para la biomasa total objetivo (BTX); es decir, aquella que permite lograr el rendimiento deseado.

$$RIN_x = Ntula \times \left(\frac{BT_x}{1000} \right)^{-\alpha N} \quad \dots \dots BT < 1000 \dots \dots RIN_x = Ntula$$

Donde:

A diferencia de la ecuación general que se presentó más arriba; aquí RINx es el requerimiento interno de N correspondiente a la biomasa total objetivo (BTX): la que permite alcanzar el rendimiento deseado.
Ahora se está en condiciones de estimar la demanda de N del cultivo (Ncultivo) aplicando la ecuación presentada al inicio de este ítem (3º).

4º) Oferta de N por el suelo

Se determina a partir del contenido de nitratos a la siembra ya disponible para el cultivo, más el que se mineraliza durante el ciclo en el espesor enraizable y, en los cultivos que corresponda, se adiciona el N aportado por fijación simbiótica. Entonces la oferta de nitrógeno para el cultivo se calcula partir de:

$$OFERN = N_{disp} + \sum_{t=1}^{t=tc} N_{min} + N_{simb}$$

Donde:

OFERN es la oferta de nitrógeno desde el espesor enraizable durante todo el ciclo (kgN/ha).
Ndisp es el contenido de N-NO₃ en el espesor enraizable a la siembra (kg N/ha).
Nmin es el nitrógeno que se mineraliza desde la siembra hasta la madurez fisiológica a partir del nitrógeno activo (Nac).
tc: duración del ciclo del cultivo en días.
Nsimb es el nitrógeno fijado por simbiosis durante el ciclo del cultivo (kg N/ha/ciclo).

- a) La cantidad de nitrógeno disponible a la siembra para el cultivo (N_{disp} en kg/ha) se calcula sumando los nitratos presentes en cada horizonte de la profundidad enraizable »h«.

$$N_{disp} = \sum_{h=1}^{h=enraizable} (N - NO_3 \times H \times \delta \times 0,1)$$

Donde:

$N-NO_3^-$, contenido de nitrógeno de nitratos en el espesor enraizable (ppm).

H, es el espesor de cada horizonte (cm).

δ , es la densidad del horizonte considerado (g/cm^3)

- b) La cantidad de nitrógeno que se mineralizará durante el ciclo del cultivo se obtiene así:
- b1) Calcular la cantidad de N potencialmente mineralizable (N_{potmin} en kg/ha) es decir, el nitrógeno almacenado en forma orgánica en el suelo y que podrá mineralizarse pasando a formas disponibles para el cultivo.

$$N_{potmin} = \sum_{h=1}^{h=enraizable} (N_{ac} \times H \times \delta \times 0,1)$$

Donde:

N_{ac} , contenido de nitrógeno activo en el espesor enraizable (ppm).

H, es el espesor de cada horizonte (cm).

d, es la densidad del horizonte considerado (g/cm^3).

Atención si N_{ac} está en g % para pasar a ppm multiplicar por 10.000

- b2) Calcular la cantidad de N que se mineralizará durante el ciclo de cultivo (N_{min} en kg/ha). Depende de la duración del ciclo, la temperatura, humedad del suelo y del pH.

$$N_{min} = N_{potmin} \times [1 - \exp(-K_m \times t)] \times F_{H_2O} \times F_{pH}$$

Donde:

N_{potmin} son los kg/ha de N potencialmente mineralizable que hay en la profundidad enraizable.

K_m , es la tasa de mineralización en función de la temperatura (T).

t, es el tiempo que dura el ciclo del cultivo, en semanas.

La cantidad mineralizable se corrige según el contenido hídrico (F_{H_2O}) y el pH (F_{pH}), usando las siguientes ecuaciones.

$$K_m = \exp\left(17,75 - \frac{6352}{273 + T}\right)$$

$$F_{H_2O} = -0,08 + 0,88 \times \frac{\theta}{\theta_{cc}}$$

$$F_{pH} = -3,01 + 0,9575 \times (pH + 0,7) - 0,057 \times (pH + 0,7)^2$$

Donde:

exp, es la base del logaritmo natural;

T, temperatura media diaria del suelo en el espesor enraizable en °C (Simplificación: Se utiliza la temperatura media del aire durante todo el ciclo).

θ / θ_{cc} contenido hídrico volumétrico y a capacidad de campo (cm^3 / cm^3) (Simplificación: se usa un valor medio para todo el ciclo. Usar 0,85 ó 0,6 ó 0,4 si se considera un año húmedo o con riego, condiciones medias de provisión de agua, o un período seco, respectivamente)

pH es la reacción del suelo del estrato con mayor Nac en el espesor enraizable.

Atención: La corrección por contenido hídrico F_{H_2O} y por pH, F_{pH} deben dar valores entre 0 y 1

- c) El nitrógeno fijado por simbiosis durante el ciclo del cultivo (N_{simb} en kg/ha) se estima según lo indicado más adelante en el ítem 6 «Fijación biológica de N».

Por lo tanto, para conocer la oferta de N para el cultivo desde el suelo: sumar los resultados del ítem a); b) y c) según se indicó más arriba en la ecuación de OFERN.

52) Rendimiento obtenible sin la aplicación de abonos nitrogenados

Se compara la demanda de N ($N_{cultivo}$, ítem 3) con la oferta (OFERN, ítem 4): si la oferta es mayor o igual que la demanda se obtendrá el rendimiento objetivo (ítem 1) sin adicionar abono nitrogenado.

Si la oferta es menor que la demanda: hay deficiencia de N.

El rendimiento a obtener «sin aplicar abono» se estima suponiendo que al momento de llenado de granos se removiliza N desde los otros órganos hacia el fruto.

El rendimiento comercial (R) que se obtendrá con la oferta de N del suelo –sin aplicar abonos– más lo que se removiliza se estima así:

$$BT_{SA} = \left(\frac{OFERN \times 1,2}{NTULA} \times 1000^{-\alpha N} \right)^{\left(\frac{1}{1-\alpha N} \right)}$$

$$R = \frac{BT_{SA} \times IC \times (1 - PR)}{1 - \frac{HC}{100}}$$

Donde:

BT_{SA} es la biomasa total (incluye raíces) que se obtiene Sin aplicar Abono.
OFERN es la oferta de nitrógeno desde el espesor enraizable durante todo el ciclo (kgN/ha).

1,2 supone que el 20 % del N absorbido se removiliza hacia el fruto.

Atención: Para el caso de forrajeras o maíz para silo se usa OFERN sin multiplicar por 1,2

También cuando OFERN/NCULT es > 0,75

Ntula concentración de N en el cultivo al estadio de plántula: 0,057 y 0,041 gN/gms en plantas C₃ y C₄ respectivamente.

αN es la pendiente de la curva que se obtiene a partir de datos empíricos y en «Primero» se mostró cómo se calcula.

IC, índice de cosecha respecto a la biomasa aérea

PR es la proporción de raíces en la Biomasa Total

HC es la humedad comercial del grano o producto útil (fardo, rollo, tubérculos u otros).

• Interpretación

Se compara el rinde sin aplicar abonos (R) con el rendimiento objetivo (Rx); haciendo la relación (R/Rx) x100, efectuando la siguiente apreciación:

[VERDE] Se obtendría 90% o más respecto del rendimiento objetivo.

[AMARILLO] Entre el 70 y 90%, hay leve limitación por deficiencia de N.

[ANARANJADO] Entre el 50 y 70 %, limitante.

[ROJO] Menos del 50%, es muy limitante.

Azufre

El ciclo del azufre es similar al del N: ambos dependen del contenido orgánico del suelo.

Para estimar la demanda de S del cultivo se utiliza el requerimiento interno de azufre (RIS, Cuadro 3.13) y la BTX que se calculó antes para la demanda de N.

$$S_{\text{cultivo}} = \frac{RIS}{100} \times BT_x$$

Oferta desde el suelo es similar al N.

- 1) Calcular la oferta al momento de la siembra se utilizan los sulfatos disponibles en cada estrato de la profundidad enraizable, a los que deben realizarse las siguientes correcciones:

Transformar ppm de sulfato a ppm de azufre, si los datos están en forma de sulfato.

Al S así corregido multiplicarlo por el Factor de corrección (FC) según se indica más abajo.

$$S_{\text{disp}} = \sum_{h=1}^{h=\text{enraizable}} (S - SO_4 \times H \times \delta \times 0,1) \times FC$$

Donde:

- S-SO₄⁻, contenido de azufre de sulfatos en el espesor enraizable (ppm).
Si S-SO₄⁻ < 3 hacer = 3 ; si es menor de 6 adoptar el valor del análisis, en ambos casos FC=1; si está entre 6 y 10 multiplicar por FC=0,8 pero si es mayor de 10 multiplicar por FC=0,7
H, es el espesor de cada horizonte (cm).
δ , es la densidad del horizonte considerado (g/cm³)

- 2) Para estimar el aporte de la mineralización de la materia orgánica, se utiliza el valor, previamente calculado, de Nmin al que se divide por 14. Ello se debe a que la relación N:S de la materia orgánica activa o particulada puede considerarse un valor medio de 14.

Por lo tanto, la oferta total será la suma del azufre disponible como sulfato al momento de la siembra más los generados por mineralización de la materia orgánica durante el ciclo del cultivo.

$$OFERS = S_{\text{disp}} + S_{\text{min}}$$

• Interpretación

Se compara la oferta respecto a la demanda de S,

(OFERS/Scultivo) x 100 efectuando la siguiente valoración:

[VERDE] La oferta es igual o superior al 90 % de la demanda: no limita.

[AMARILLO] Entre el 70 y 90%, es levemente limitante.

[ANARANJADO] Entre el 50 y 70 %, limitante.

[ROJO] Menos del 50%, es muy limitante.

Disponibilidad de P y K

Para estimar si hay deficiencia de fósforo y potasio en el suelo también se utiliza un balance entre demanda y oferta, para ello se procede así:

1º) *Demanda de P por el cultivo (Pcultivo)*. Se realizan los mismos 3 pasos que para el N (ver ítem anterior), pero en lugar de utilizar el requerimiento interno de N (RIN) se usa el de P (RIP) calculando:

$$P_{\text{cultivo}} = \frac{RIP}{100} \times BT_x$$

Donde:

Pcultivo, demanda total de P del cultivo, en kg P/ha.

BT_x, biomasa total al finalizar el ciclo, en kg MS/ha.

RIP, concentración de fósforo en el cultivo, a madurez fisiológica, en kg P/100 kg MS (Cuadro 3.13).

Demanda de K por el cultivo (Kcultivo): Ídem que para el P, pero usando el requerimiento interno de potasio (RIK) del Cuadro 3.13.

$$K_{\text{cultivo}} = \frac{RIK}{100} \times BT_x$$

2º) *La oferta P (Pofer) y de K (Kofer) en el suelo*, se obtiene de la siguiente manera:¹³

- a) Según la densidad de raíces del cultivo que se trate, por cada 1 ppm que mide la técnica analítica, lo que el cultivo absorberá se especifica en el Cuadro 3.15.

$$P_{\text{ofer}} = P_{\text{suelo}} \times (FAP \pm ES) \times \left(\frac{\text{Profenr}}{30} \right) \dots \dots \text{Profenr} \leq 30$$

Donde:

Psuelo: fósforo extraíble (ppm) en la profundidad enraizable.

FAP: factor de absorción de fósforo (ver Cuadro 3.15)

ES: Eficiencia del suelo para absorber P (Cuadro 3.16)

Profenr: Profundidad enraizable (cm). Atención: si es mayor a 30 cm considerarla igual a 30 cm.

El factor FAP (Factor de Absorción de Fósforo, Cuadro 3.15) expresa la mayor o menor facilidad que un sistema radical puede absorber el nutriente y depende de las características de proliferación radical del cultivo: algunos tienen una concentración de raíces de 4 cm de raíz por cada cm³ de suelo; mientras otros apenas tienen 1 cm por unidad de volumen. Esto es así si no hay restricciones del suelo para que las raíces lo exploren, si hay limitaciones debe corregirse el FAP según el estado físico que presenta el suelo, por esto

13 P medido con la técnica de análisis químico Bray y Kurtz N°1, K intercambiable.

se debe sumar o restar al FAP la eficiencia o facilidad que ofrece el suelo para contener raíces: ES. Para determinarlo ingrese al Cuadro 3.16 con el dato de macroporosidad menor de los horizontes incluidos en la profundidad enraizable y seleccione una fila según el grado de compactación o mullimiento que presente el estrato, según lo observado en el perfil: si no dispone de este dato lo frecuente es que sea Normal o Compacto.

CUADRO 3.15. CANTIDAD DE FÓSFORO (FAP) O POTASIO (FAK) ABSORBIDO DURANTE EL CICLO DEL CULTIVO DESDE LOS PRIMEROS 30 CM DE SUELO SEGÚN LA CONCENTRACIÓN TÍPICA DE RAÍCES.

Cultivo	FAP kg P/ ppm			FAK kg K / ppm	concentración de raíces cm/cm ³
	< 5 ppm	5 a 10 ppm	> 10ppm		
maíz, trigo, cereales en general	2,1	1,9	1,7	1,7	>4
leguminosas, girasol, etc.	1,7	1,5	1,3	1,3	2-3
papa y algunas hortalizas	1,5	1,3	1,1	1,1	<2

CUADRO 3.16. VALORES SUGERIDOS PARA ESTIMAR LA EFICIENCIA SUELO (ES) A PARTIR DE LA MAYOR O MENOR FACILIDAD PARA EXPLORAR LA PROFUNDIDAD ENRAIZABLE POR LAS RAÍCES

Grado de compactación	ES
Mullido	0,2
Normal	0
Compacto	-0,15
Muy compacto	-0,3

Disponibilidad de K

La oferta de potasio, (Kofer) en kg/ha se obtiene así:

$$\text{Kofer} = \text{Ksuelo} \times (\text{FAK} \times \text{FLK}) \times (\text{Profenr}/30)$$

Donde:

Ksuelo: Potasio intercambiable (ppm); para pasar de cmolc/kg a ppm de potasio multiplicar por 390.

Profenr: Profundidad enraizable (cm). Atención: si es mayor a 30 cm considerarla igual a 30 cm.

FLK: factor de labilidad de K según capacidad de intercambio catiónico del horizonte superficial, obtener por interpolación en la Figura 3.4 o usando la siguiente ecuación. CIC es capacidad de intercambio catiónico (cmolc/kg)

$$\text{FLK} = 8 \times \text{CIC}^{-0.8}$$

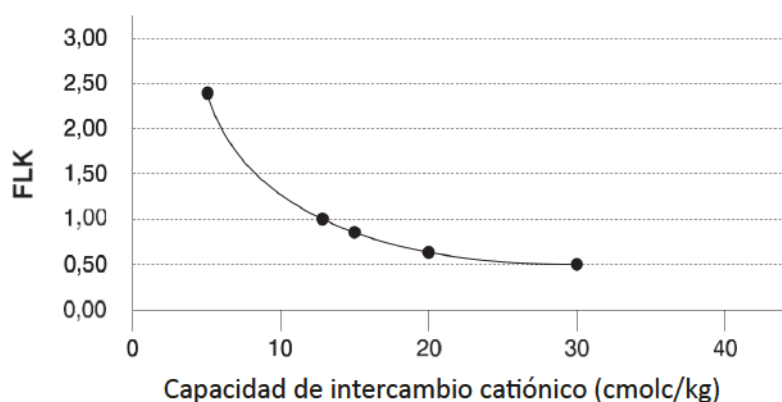


FIGURA 3.4. FACTOR DE LABILIDAD DEL K (FLK) SEGÚN LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO.

3º) Producción que se obtendrá sin aplicar abonos:

Se aplica la siguiente ecuación:

$$\%R = \frac{n \times (P_{\text{ofer}} \times 1,2)}{P_{\text{cultivo}} + [m \times (P_{\text{ofer}} \times 1,2)]} \times 100$$

Donde:

%R es el porcentaje del rendimiento deseado que se obtendrá si el cultivo se provee solo de los nutrientes que están en el suelo, es decir, sin aplicar abonos.

P_{ofer}, es la oferta de P del suelo (kg/ha). 1,2 supone que el 20 % del fósforo se removiliza desde hojas y otros órganos hacia el fruto. Si el cultivo no es para grano, por ejemplo, maíz para silo o alfalfa, usar 1 en vez de 1,2.

P_{cultivo} es la demanda de P del cultivo en kg P/ha calculado previamente.

n es un parámetro cuyo valor es 2 para el P y 1,5 para el K.

Por fin, m=n-1.

La ecuación es útil también para el K usando la "n" respectiva, K_{cultivo} y K_{ofer} en el espesor enraizable. Atención: No multiplicar por 1,2.

• Interpretación para P y K

[VERDE] El % R es igual o superior al 90%: no hay limitación.

[AMARILLO] Entre el 70 y 90%, es levemente limitante.

[ANARANJADO] Entre el 50 y 70 %, limitación intermedia.

[ROJO] Menos del 50%, es muy limitante.

Atención: La disponibilidad de K puede verse afectada adicionalmente por antagonismos con Ca o Mg. Ver detalles en el ítem siguiente.

Calcio y Magnesio

La oferta de Ca y Mg se evalúa teniendo en cuenta su cantidad en el complejo de intercambio dentro de la profundidad enraizable, según los criterios que se exponen en el Cuadro 3.17. Si en la profundidad enraizable hubiera más de un horizonte considerar el menor valor de Ca y de Mg.

CUADRO 3.17. ABUNDANCIA RELATIVA DE CALCIO Y MAGNESIO EN EL SUELO PARA LOS CULTIVOS. (CIC, CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO)

	Ca ⁺⁺ (% cic)	Mg ⁺⁺ (% cic)	Interpretación
alto	>65	>15	Verde
moderado	55-65	10-15	Amarillo
bajo	40-55	5-10	Anaranjado
muy bajo	< 40	< 5	Rojo

La relación Ca/Mg debe estar entre 4:1 y 7,5:1 ése es el intervalo normal para que no presenten antagonismos. Si es menor hay demasiado Mg y puede bloquear la absorción de Ca, si la relación es mayor el Ca puede afectar la absorción de Mg. Por lo tanto asignar:

[VERDE] Si la relación está entre 4 y 7,5 a 1.

[AMARILLO] Si está entre 2 y 4 ó entre 7,5 y 10.

[ROJO] Otra relación.

La relación Ca/K entre 15:1 y 38:1 es normal; presenta problemas en la nutrición potásica si es mayor. La saturación debida al calcio provoca bloqueos en el fósforo y en el hierro asimilable, circunstancia que analíticamente se comprueba, más que con esta determinación, mediante la valoración del calcio activo. Asignar:

[VERDE] Si la relación está entre 15 y 38 a 1.

[AMARILLO] Si está entre 8 y 15 ó entre 38 y 45.

[ROJO] Otra relación.

Relación K/Mg mayor de 1,3 probable deficiencia de magnesio. Por lo tanto:

[VERDE] Menor a 1,3.

[AMARILLO] de 1,3 a 2.

[ROJO] Mayor a 2.

Microelementos

Según cultivos y expectativa de rendimientos, se acepta como valores medios a abundantes, los indicados en el Cuadro 3.18:

CUADRO 3.18. VALORES CRÍTICOS SUGERIDOS PARA MICRONUTRIMENTOS Y TÉCNICAS ANALÍTICAS UTILIZADAS EN CADA CASO.

Nutrimento	Tenor	Técnica analítica
Fe	< 2 ppm [Rojo] 2 a 4,5 ppm [Amarillo] > 4,5 ppm [Verde]	Extracción acetato de amonio 1 N a pH 4,8 y reducción clorhidrato de hidroxilamina
Mn	< 25 ppm [Rojo] 25 a 100 ppm [Amarillo] > 100 ppm [Verde]	Extracción con acetato de amonio como en el complejo de cambio
Cu	< 0,5 ppm [Rojo] 0,5 a 1 ppm [Amarillo] > 1 ppm [Verde] >2 ppm fitotoxicidad	Extracción: acetato de amonio con ácido acético (pH 4,8) o quelación con EDTA 0,5 M
Zn	< 1 ppm [Rojo] 1 a 1,4 ppm [Amarillo] > 1,4 ppm [Verde]	Ídem Cu
B	< 0,1 ppm [Rojo] 0,1 a 0,7 ppm [Amarillo] > 1 ppm [Verde] La deficiencia puede provocar a su vez deficiencia de Ca.	Extracción: agua caliente
Mo	< 0,04 ppm [Rojo] 0,04 a 0,2 ppm [Amarillo] > 0,1 ppm [Verde]	Extracción: ácido oxálico y oxalato amónico o Tham pH 3,3

Reacción del suelo (pH)

La reacción del suelo evaluada potenciométricamente en relación suelo: agua de 1:2,5.

La importancia del pH es indirecta. Influye en la disponibilidad de la mayor parte de los nutrientes, en las propiedades físicas de los suelos y en la actividad microbiana. Cuando no se dispone de medidas directas sobre la disponibilidad de un mineral puede usarse el pH para tener una idea genérica acerca de qué nutrimento puede ser deficitario o estar en niveles tóxicos.

Suelos con pH 5,7 o inferiores indican, salvo en el caso de que sea muy rico en materia orgánica, que el contenido de bases es muy bajo, y por lo tanto debemos prestar especial atención ante posibles deficiencias de calcio, magnesio, fosfatos, molibdeno y boro. También se pueden presentar toxicidades como las de manganeso, cinc, hierro y aluminio.

En suelos calcáreos con pH altos, superior a 8 se puede presentar clorosis inducidas por el exceso de cal. En el caso de que el pH sea elevado y sin presencia de carbonato de calcio libre debe sospecharse de la presencia de cantidades elevadas de sodio y magnesio en el complejo de cambio.

• Interpretación

Usar el dato más ácido o básico dentro de la profundidad enraizable, asignar:

[VERDE] Cuando pH está dentro del intervalo óptimo del cultivo.

[AMARILLO] Una unidad por encima o debajo del intervalo óptimo.

[ROJO] Diferencia mayor.

Valores de referencia para otros cultivos: Para cultivos que no se encuentren el Cuadro 3.19 se considera que el intervalo óptimo se encuentra entre 6,2 y 7,5.

CUADRO 3.19. INTERVALOS ÓPTIMOS DE pH PARA DIVERSOS CULTIVOS

Nombre común	Nombre científico	pH
CULTIVOS EXTENSIVOS		
Algodón	Gossypium hirsutum	5,6 – 6,0
Arroz	Oryza sativa	5,0 – 6,5
Caña de azúcar	Saccharum officinarum	*6,0 – 8,0
Colza	Brasica napus	6,0 – 7,5
Girasol	Helianthus annus	6,0 – 7,5
Haba	Vicia faba	6,0 – 7,5
Lino	Linun usitatissimum	5,0 – 7,0
Maíz	Zea mays	5,5 – 7,5
Maní	Arachis hypogea	6,0 – 7,5
Maní	Arachis hypogea	5,3 – 6,6
Ray Grass	Lolium multiflorum	5,8 – 6,7
Remolacha azucarera	Beta vulgaris	6,5 – 8,0
Soja	Glycine max	6,0 – 7,0
Sorgo	Sorghum bicolor	5,5 – 7,5
Tabaco	Nicotiana tabacum	*5,5 – 7,5
Trigo	Triticum aestivum	5,5 – 7,5
HORTALIZAS		
Apio	Apium graveolens	5,8 – 7,0
Batata, camote	Ipomea batatus	5,8 – 6,0*
Brócoli	Brassica olerácea	6,0 – 7,0
Cebolla	Allium cepa	5,8 – 7,0

Continúa en página siguiente

Nombre común	Nombre científico	pH
CULTIVOS EXTENSIVOS		
Espinaca	Spinacia olerácea	6,0 – 7,5
Lechuga	Lactuca sativa	6,0 – 7,0
Melón	Cucumis melo	6,0 – 7,0
Papa	Solanum tuberosum	4,8 – 6,5
Pepino	Cucumis sativus	5,5 – 7,0
Remolacha	Beta vulgaris	6,0 – 7,5
Repollo	Brassica olerácea	6,0 – 7,5
Tomate	L. esculentum	5,5 – 7,5
Zanahoria	Daucus carota	5,5 – 7,0
FRUTALES		
Ananá	Ananás comosus	5,0 – 6,0
Cereza	Prunus avium	6,0 – 7,5
Damasco	Prunus armeniaca	6,0 – 7,0
Durazno	Prunus pérsica	6,0 – 7,5
Frambuesa	Rubus idoeus	5,5 – 7,0
Frutilla	Fragaria sp.	5,0 – 6,5
Manzano	Malus sylvestris	5,0 – 6,5
FORRAJERAS		
Alfalfa	Medicago sativa	6,2 – 7,8
Avena	Avena sativa	5,0 – 7,0
Cebada	Hordeum vulgare	*6,5 – 7,8
Centeno	Secale cereale	5,0 – 7,0
Sorgo de escoba	Sorghum vulgare var. technicum	5,0 – 6,0
Sorgo forrajero	Sorghum Sudanense	5,5 – 7,5
Trébol de olor	Melilotus albus	6,5 – 7,5
Trébol rojo	Trifolium pratense	*6,0 – 7,5
Trifolium repens	Trébol blanco	5,6 – 7,0

Aclaración: El asterisco (*) delante del pH indica que la planta se desarrolla bastante bien cuando la diferencia en el valor pH es inferior al indicado en una unidad completa. Si el asterisco va después del pH, indica bastante buen crecimiento, aunque el valor de pH sea superior al indicado en toda una unidad.

Materia orgánica

Cuando no se dispone de información sobre el contenido de N, S o P de un suelo puede utilizarse el tenor de materia orgánica para apreciar la riqueza del horizonte superficial en aquellos nutrimentos usando la clasificación del Cuadro 3.20.

CUADRO 3.20: CLASIFICACIÓN DEL TENOR ORGÁNICO DEL SUELO (0 A 20 CM), SEGÚN TÉCNICA ANALÍTICA DE WALKLEY-BLACK

Clase	Materia orgánica %	Interpretación
Extremadamente bajo	0,00 – 0,60	Rojo
Pobre	0,61 – 1,20	Rojo
Medianamente pobre	1,21 – 1,80	Rojo
Mediano	1,81 – 2,40	Anaranjado
Medianamente rico	2,41 – 3,00	Amarillo
Rico	3,01 – 4,20	Verde
Extremadamente rico	Mayor de 4,21	Verde

5) Mantener condiciones térmicas propicias

La temperatura del suelo tiene un papel de vital importancia para las plantas, pues afecta el crecimiento y desarrollo de raíces y partes vegetativas subterráneas; también es esencial para toda la actividad de la biota edáfica, transporte de solutos, absorción de agua y nutrimentos, difusión de gases, entre otros. En general se acepta que debajo de 5 a 10 °C la mayoría de cultivos presentan procesos fisiológicos muy lentos en la raíz, vale también para otros organismos del suelo, luego incrementan la actividad y alcanzan un óptimo alrededor de los 20 °C el cual se mantiene hasta los 30 °C. Luego la tasa de los procesos disminuye, cesando por encima de 40 °C.

Si las condiciones térmicas del área en la que se encuentra el suelo estudiado presentan épocas con temperaturas extremas que se alejan del nivel óptimo; por ejemplo por debajo de 15°C o de superior a 35°C, allí es cuando deben considerarse propiedades o estados que presenta el horizonte superficial que pueden hacer empeorar la situación o amortiguar los extremos térmicos permitiendo que la superficie se mantenga dentro de valores óptimos.

Para evitar temperaturas diarias extremas en la superficie del suelo, así como una gran amplitud diaria es recomendable tener en cuenta los criterios que se ofrecen en el Cuadro 3.21.

CUADRO 3.21. MODIFICACIONES SUGERIDAS PARA ALTERAR FAVORABLEMENTE LA TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE DEL SUELO

Factores a controlar	El manejo debe tratar de modificar en época de Temperaturas	
	Bajas	Altas
Exposición de la superficie a los rayos solares	Aumentar	Disminuir
Color	Más oscuro	Más claro
Rugosidad	Aumentar	Disminuir
Coefficiente de reflexión o albedo	Disminuir	Aumentar
Contenido de humedad	Intermedio	Aumentar
Cantidad de materia orgánica.	Intermedio	Aumentar

En épocas de bajas temperaturas es deseable que la temperatura sea lo mayor posible, especialmente en los primeros centímetros de suelo que es donde se registra la mayor actividad biológica. Por tanto, se debe favorecer la captación de radiación: exposición directa de la superficie, colores oscuros, bajo albedo, contenido de humedad intermedio. Al contrario, en épocas estivales de altas temperaturas son ideales las condiciones siguientes: suelo con cobertura superficial, colores claros, alto albedo, suelo húmedo y altos contenidos de materia orgánica.

6) Permitir una activa fijación de nitrógeno

Tasas de fijación simbiótica

La fijación simbiótica de N puede llegar a 3 kg N/ha/día si no tiene limitaciones. Esta fijación potencial ($N_{simbpot}$) ocurre cuando la temperatura está entre 25 y 30 °C; si no es así calcularla usando la siguiente ecuación:

$$N_{simbpot} = 3 \times \frac{T_{med}^2}{27^2} \times \left[3 - \left(2 \times \frac{T_{med}}{27} \right) \right]$$

Donde:

27 supone que es la temperatura óptima para la fijación (en ° Celsius) y 3 los kg de N/ ha/día de fijación máxima.

T_{med} es la temperatura media del aire en el periodo de crecimiento del cultivo.

Para estimar cuánto, como máximo, se puede fijar de N durante el ciclo de un cultivo ($N_{simbmax}$) debe tenerse presente lo siguiente:

- (a) Después de emergido, el periodo de infestación de la bacteria es de 3 semanas (aproximadamente): tiempo necesario para que ocurra una fijación máxima.
- (b) Las bacterias simbiotas necesitan de la provisión de hidratos de carbono por parte del cultivo; esto ocurre normalmente hasta que comienza el crecimiento acelerado de los frutos y no se distribuye más fotosintatos hacia otros órganos (tampoco para la fijación simbiótica): puede suponerse que esto ocurre cuando el cultivo ha llegado al 75 % de su ciclo vital.

• Caso 1: Cultivo recién implantado

El número de días durante los cuales habrá activa fijación (Dñj) se calcula así:

$$Dñj = \text{ciclo} \times 0,75 - 21$$

Donde:

«ciclo» es la duración del ciclo del cultivo desde emergencia hasta madurez fisiológica (días).

Así, la cantidad de N que se puede fijar como máximo durante la vida de un cultivo anual es:

$$N_{\text{simbmax}} = N_{\text{simbpot}} \times Dñj$$

Por ejemplo, una soja con un ciclo de 120 días y temperatura media durante el ciclo de 20°C daría:

$$N_{\text{simpot}} = 2,5 \text{ kg Nfij} / \text{ha} / \text{día} \text{ ya corregido por temperatura}$$

$$Dñj = 69 \text{ días}$$

$$\text{Por lo tanto fijará como máximo: } N_{\text{simbmax}} = 172 \text{ kg Nfij} / \text{ha} / \text{ciclo}$$

• Caso 2: Cultivo ya implantado

Para evaluar una forrajera por ejemplo, alfalfa, la tasa máxima diaria a través del año cambiará de acuerdo con la temperatura y los días que fija, entre corte y corte es igual a esa duración menos una semana. Así si desde el pastoreo hasta el siguiente corte transcurren 35 días y la temperatura es de 17°C se tiene:

$$N_{\text{simpo}} = 1,9 \text{ kg Nfij} / \text{ha} / \text{día} \text{ ya corregido por temperatura}$$

$$Dñj = 35 - 7 = 28 \text{ días}$$

$$N_{\text{simbmax}} = 53 \text{ kg Nfij} / \text{ha} \text{ entre cortes}$$

Es importante advertir que, si aquella sería la temperatura durante todo el año y se realizan 10 cortes por año, la fijación simbiótica podría superar los 500 kg N/ha/año si no hay limitaciones. Ese valor ha sido mencionado para la alfalfa en la bibliografía (ver Cuadro 3.22) y también el calculado para la soja.

Hasta aquí se ha supuesto que no hay limitaciones en el suelo para la fijación simbiótica, esto ocurre cuando dentro de la profundidad enraizable se dan las siguientes condiciones:¹⁴

1. El cultivo se encuentra dentro de su gama óptima de pH (Cuadro 3.19). Si el pH en la profundidad enraizable está dentro del intervalo óptimo del cultivo, asignar [VERDE]; si es más o menos una unidad por encima o debajo del intervalo óptimo [AMARILLO]; pero si se aleja más [ROJO].
2. El P es mayor de 12 ppm [VERDE]; entre 6 y 12 decrece [AMARILLO]; y menor de 6 disminuye marcadamente [ROJO].
3. El Ca intercambiable es superior a 5 cmolc/kg y supera al 65 % en la capacidad de intercambio [VERDE]; de 50 a 65 % [AMARILLO] y menor: [ROJO]
4. El S disponible es mayor a 15 ppm [VERDE]; entre 8 y 15 [AMARILLO]; entre 5 y 8 ppm [ANARANJADO] y menos de 5 ppm limita mucho la fijación [ROJO].
5. No hay anaerobiosis. Cuando hay anaerobiosis por 3 o más días hay muerte de nódulos.

Con fines diagnósticos se utiliza alguno de los dos siguientes criterios; el que da peor.

Si el factor de aireación (F_a , ver ítem 3). Si F_a es $< 1,5$ indica sin limitaciones importantes [VERDE]; de 1,5 a 2,5 limitación considerable [AMARILLO] y $> 2,5$ muy limitante [ROJO].

Suelo muy pobremente a pobremente drenado: [ROJO]; Suelo imperfectamente drenado: [ANARANJADO]; Suelo moderadamente bien drenado: [AMARILLO]; Suelo bien drenado o más: [VERDE]

6. No hay deficiencia de agua, si ella ocurre se retrasa la infestación y es menor la provisión de hidratos de carbono por el cultivo.
7. La resistencia mecánica del suelo no supera 1 MPa. Para evaluar si hay limitación puede utilizarse el Factor mecánico o estructural (F_e , ver el siguiente ítem). Si F_e es $< 1,5$ indica sin limitaciones importantes [Verde], 1,5 a 2,5 limitación considerable [Amarillo] y $> 2,5$ muy limitante [Rojo].
8. La salinidad es menor de 6 dS/m no hay grandes limitaciones [Verde], entre 6 y 8dS/m [Amarillo] y > 8 dS/m muy limitante [Rojo].
9. No hay mucha disponibilidad de nitratos; la fijación se reduce cuando hay más de 20 ppm de $N-NO_3$ en la solución del suelo.
Menos de 10 ppm $N-NO_3$ [Verde] Entre 10 y 20 ppm de $N-NO_3$ [Amarillo]
Más de 20 ppm $N-NO_3$ [Rojo]

14 Son escasas las investigaciones que informan acerca de lo que se expone a continuación; la mayoría de ellas son solo cualitativas: Muchos de estos criterios son arbitrarios y deberán mejorarse en el futuro.

Para corregir la fijación simbiótica según las limitaciones que hay dentro de la profundidad enraizable se sugiere utilizar los siguientes criterios.

Ninguna limitante, fija el 100 % (Fcor = 1)

1 amarillo, fija 75 % (Fcor = 0,75)

2 o más amarillos, fija 60 % (Fcor = 0,6)

1 rojo, fija solo 50 % (Fcor = 0,5)

1 rojo y 1 amarillo, fija 40 % (Fcor = 0,4)

1 rojo y varios amarillos, fija 35 % (Fcor = 0,35)

2 o más rojos, fija solo el 30 % (Fcor = 0,3)

Varios rojos y amarillos, fija 20 % (Fcor = 0,2)

$$N_{\text{simb}} = N_{\text{simbmax}} \times F_{\text{cor}} \times \left(\frac{\text{Profenr}}{30} \right) \dots \dots \text{Profenr} \leq 30$$

Donde:

Nsimb es la fijación simbiótica durante todo el ciclo teniendo en cuenta las limitaciones en el suelo (kg N fijado por simbiosis/ha/ciclo);

Nsimbmax es la máxima cantidad de N que se puede fijar durante el ciclo del cultivo;

Fcor es un factor de corrección que tiene en cuenta las limitaciones edáficas; Profenr es la profundidad enraizable si es mayor de 30 cm considerar solo 30 cm.

Como referencia téngase en cuenta lo fijado por distintos cultivos: Cuadro 3.22.

CUADRO 3.22. FIJACIÓN SIMBIÓTICA DE N POR DIVERSOS CULTIVOS

Cultivo	kg N ₂ /ha /año (*)	kg N ₂ /ha /año (**)
Alfalfa	128 – 300	60 – 500
Arroz	10 – 55	
Garbanzos	84	120
Habas	50 – 60	60 – 300
Lenteja Guisante	85	30 – 200
Lotus sp.	85	
Lupino	150 – 169	
Maní	47	
Melilotus	110	
Pastura de leguminosas	118	
Soja	84 a 250	65 – 180
Trébol blanco	200	
Trébol rojo	130	
Tréboles	105 – 220	60 – 330

(*) Fuentes varias. (**) Villalobos *et al.* (2002)

7) Carecer de impedimentos mecánicos

Emergencia de plántulas: costra superficial

Para cuantificar la tendencia al encostramiento del horizonte superficial se emplea el siguiente índice:

$$IC = \frac{1,5 \times Lf + 0,75 \times Lg}{A + (10 \times MO)}$$

Donde:

Lf, Lg son (%) limo fino (2–20 µm) y grueso (20–50 µm). Si solo se tiene el dato de limo total, se supone que la mitad es grueso y la mitad fino.

A % de arcilla y

MO % de materia orgánica

• Interpretación

[VERDE] Cuando IC es menor de 0,2 los suelos no forman costras.

[AMARILLO] entre 0,2 y 2.

[ROJO] cuando es superior a 2, fuerte tendencia a encostrarse.

Proliferación radical

La aparición de nuevas raíces y la exploración de un horizonte edáfico pueden estar más o menos impedida por limitaciones mecánicas del estrato, principalmente resistencias mecánicas. Para evaluar el grado de limitación se calcula el «factor mecánico o estructural» (Fe) teniendo en cuenta: la estructura, la consistencia, la presencia de película de arcilla o barnices, la expansibilidad, densificación y sodicidad. Para ello se asigna valor 1, 2 o 3 según el grado de limitación que imponga la propiedad evaluada según los criterios indicados en el Cuadro 3.23.

Una vez asignado un valor a cada índice estructural se calcula Fe usando:

$$F_e = \sqrt[6]{E \times S \times I \times X \times D \times O}$$

Los suelos que presentan arcillas expandibles al contraerse cuando se secan y expandirse al humedecerse adquieren una movilidad que causa daño al cultivo ya que muchas raíces son —literalmente— podadas y no solo se reduce la cabellera radical, sino que esos sitios son propicios para el ataque de variadas enfermedades.

Además, la movilidad de los suelos, es contraproducente para la durabilidad de las labores profundas ya que una vez efectuado —por ejemplo— un subsolado, bastarán unos pocos ciclos de hinchamiento y contracción para que desaparezca totalmente el efecto de la labranza.

Cuando por movilidad se generan grietas horizontales se produce una discontinuidad en los capilares del suelo, interrumpiéndose el movimiento vertical del agua.

Pilatti y Grenón (1995) utilizan un índice (Ex) para evaluar la mayor o menor expansividad de un horizonte, que tiene en cuenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC) el porcentaje de arcilla (A) y el de carbono orgánico (C).

$$E_x = \frac{0,1 \times A \times \left(\frac{CIC - 4 \times C}{A} \right)^{0,42}}{C}$$

Para estimar el grado de densificación de un horizonte se calcula la «densidad crítica» aquella sobre la cual la densidad es excesiva y limita en gran medida la exploración de las raíces, para ello se usa la siguiente fórmula: donde «A» es el porcentaje de arcilla.

$$\delta = 1,52 - 0,006 \times A$$

El porcentaje de sodio intercambiable crítico o desfavorable (PSICRIT) para la estructura del suelo se calcula con:

$$PSICRIT = 10,7 \times CEES - 2,1$$

Donde:

CEES es la conductividad eléctrica del extracto de saturación (dS/m)

• Interpretación

[VERDE] Fe < 1,5: indica pocas limitaciones.

[AMARILLO] Fe entre 1,5 y 2,5: moderadas limitaciones.

[ROJO] Fe > 2,5: muy limitante.

CUADRO 3.23. GRADO DE RESTRICCIÓN A LA PROLIFERACIÓN DE RAÍCES (ÍNDICE) POR IMPEDIMENTOS MECÁNICOS

Símbolo	Propiedad	Valor o Categoría	Índice
E	ESTRUCTURA	a) Masiva, laminar, gruesa, columnar, prismática	3
		b) Blocosa muy gruesa, laminar fina o moderada	2
		c) Otras	1
D	DENSIDAD	a) Mayor que densidad crítica	3
		b) Entre 0,9 d _{crit} y d _{crit}	2
		c) Menor de 0,9 d _{crit}	1
S	CONSISTENCIA	a) Plástica, firme, y dura (o más)	3
		b) Plástica y firme (o más)	2
		Plástica y dura (o más) Firme y dura (o más)	1
I	PELÍCULAS DE ARCILLA (barnices)	a) Pocas, no se informan	1
		b) Comunes, frecuentes	2
		c) Muchas, abundantes (o más)	3
O	SODICIDAD	a) $PSI \geq PSICrit \times 1,3$	3
		b) $PSI > PSICrit$	2
		c) $PSI \leq PSICrit$	1
X	EXPANSIBILIDAD	a) < 2	1
		b) 2 – 6,7	2
		c) > 6,7	3

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYERS, R.S. Y WESTCOT, D.W. (1987). La calidad del agua en la Agricultura. Serie FAO Riego y Drenaje Nº 29 rev1. Roma, Italia.
- 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.
- COBERTERA, E. (1993). Edafología aplicada. Suelos, producción agraria, planificación territorial e impactos ambientales. Cátedra Geografía Menor. 326 pp.
- CHHABRA, R. (1996). Soil Salinity and Water Quality. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield. 284 pp.
- DONAHUE, R.L., MILLER, R.W. Y SCHICKLUNA, J.C. (1981). Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas. Prentice/Hall. 624 pp.
- GALLEGOS DEL TEJO, A. (1997). La aptitud agrícola de los suelos. La pedología aplicada a las actividades agropecuarias. Trillas México. 207 pp.
- HENIN, S., GRAS, R. Y MONNIER, G. (1972). El perfil cultural. El estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Mundi Prensa, 342 pp.
- LÓPEZ, R. Y 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.
- LÓPEZ RITAS, J. (1967). Diagnóstico de los suelos y plantas. Métodos de campo y laboratorio. Mundi-Prensa 268 pp.
- MAAS, E.V. Y HOFFMAN, G.J. (1977). Crop salt Tolerance-Current Assessment. J. Irrig. and Drainage, División ASCE 103(IRZ): 115-134.
- NACCI, S. E 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 FARIÁS, E. (1994). Física de suelos con enfoque agrícola. Trillas, 195 pp.
- NORERO, A. (1977). La fitosfera: el ambiente físico de las plantas. Ciencia e Investig. Agraria, 4 (4):263-272.
- NORERO, A. (1980). Concepto dinámico de humedad disponible y su estimación para fines técnicos. CIDIAT, Venezuela. 26 pp.
- ORELLANA, J.A. DE (1988). El tercer rol del suelo. Bol.Tec.FAVE (1):5-11.
- ORELLANA, J.A. DE, M.Á. PILATTI (1999). The Ideal Soil. I: An edaphic paradigm for sustainable agriculture. J. Sustainable Agriculture 15(1):45-59.
- PAPADAKIS J. (1954). Ecología de los cultivos. I. Ecología general. Min. Agr. Gan. Bs. Aires: 223 pp.
- PEARSON, G.A. (1960). Tolerance of crops to exchangeable sodium. USDA. Inform. Bull. 216. 4 pp.
- PILATTI, M.Á. (1990). Interpretación de las relaciones entre el suelo y la producción de cultivos. Primera aproximación a un modelo edáfico. Public.Misc.nro. 51:98-109. EEA INTA, Rafaela.
- PILATTI, M.Á., GIBERTO, P.J. Y IMHOFF, S. (2011). Estimación de datos faltantes a partir de información básica de suelos. Cátedra de Edafología, FCA, 16 pp (Primera versión en 1996)

- PILATTI, M.Á. Y GRENÓN, D.A.** (1995). La profundidad enraizable de los suelos. Su estimación a partir de información edáfica (Segunda Versión, corregida, ampliada y manual para el usuario) Comunicaciones FAVE; C-003-AD-003, 29 pp.
- PILATTI, M.Á., ORELLANA, J.A. DE** (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 Agricul.* 17 (1): 89-111.
- PILATTI, M.Á., ORELLANA, J.A. DE** (2012). Suelos ideales para agricultura sostenible. FAVE sección Ciencias Agrarias, Vol.11 N° 1- 65-87.
- PILATTI, M.Á., ORELLANA, J.A. DE, PRIANO, L.J.J., FELLI, O.** (2003). The Ideal Soil: 3. Fitness of edaphic variables to achieve Sustenance in Agroecosystems. *J. Sustainable Agriculture* 22(2):109-132.
- PIZARRO, F.** (1985). Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Edit. Agrícola Española, 542 pp.
- PORTA CASANELLAS, J.; LÓPEZ-ACEVEDO REGUERÍN, M. Y ROQUERO DE LABURU, C.** (1994). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. Madrid. 807 pp.
- SHAXSON, T.F.** (1994). Introducción al concepto moderno de manejo integrado y conservación de suelos, Memorias del Taller sobre planificación participativa de conservación de suelos y aguas, FAO, GCP/RLA/107/JPN doc. de campo 5, 27 - 80.
- SOIL SURVEY STAFF** (1965). Manual de levantamiento de suelos. Trad. J.B. Castillo. Min. Agr. y Cria de Venezuela. 628 pp.
- SYS, C.; VAN RANST, E.; DEBAVEYE, J.** (1991). Land evaluation: principles in land evaluation and crop production calculations. P. I (Agricultural Publications; 7). Central Administration for Development Cooperation. Bruselas.
- VILLALOBOS, F., MATEOS, L., ORGAZ, F. Y E. FERERES** (2002). Fitotecnia. Bases y tecnologías de la producción agrícola. Mundi Prensa. 496 pp.
- WILD, A. (coord.)** (1992). Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Mundi-Prensa. Madrid.

4 Toma de muestras y procedimientos de cálculos

INTRODUCCIÓN: PLANIFICACIÓN Y USO DE LAS TIERRAS: NECESIDAD DE DATOS EDAFOLÓGICOS

En los agrosistemas se distinguen tres niveles de planificación: estratégico, táctico y operativo. Las decisiones que se toman sobre el uso y cuidado del suelo son distintas en cada uno de ellos y los datos edafológicos que se requieren como sustento de esas decisiones también lo son.

A continuación (Cuadro 4.1) se resume para cada nivel de planificación, cuáles son las principales decisiones que se toman en las que el suelo está involucrado, también qué tipo de dato y procesamiento edafológico se requiere.

Para la **planificación estratégica** (mediano a largo plazo) es necesario responder a cuestiones como las siguientes:

¿Cuál es la capacidad y aptitud productiva de los suelos del agrosistema? (Agrícola, tambo, invernada, cría, forestal). Definir secuencia de cultivos, rotaciones.

¿Qué niveles productivos pueden esperarse?

¿Cuáles son los requerimientos de insumo, mano de obra, maquinaria?

¿Cuáles son los requisitos para producir sin deteriorar el recurso suelo?

¿Qué modificaciones hay que introducir para mejorar los rendimientos, estabilizarlos o iniciar otro rubro productivo?

Por lo tanto, estratégicamente, se decide sobre principales rubros productivos, intensidad o niveles de rendimientos a alcanzar e infraestructura hacia la cual evolucionará la empresa. Esto se mantendrá como política de inversión y orientación productiva y técnica durante varios años.

En la planificación táctica se definen los cultivos a realizar en el próximo ciclo agrícola: proporción de cada uno, cultivares, objetivos de rendimientos; superficie a asignar, insumos, maquinarias y mano de obra involucrada. Además, se tiene muy en cuenta los resultados de monitoreos de campañas anteriores a fin de mejorar, haciendo más eficaces y eficientes las acciones. Y en la operativa se especifica y controla las acciones a realizar en el corto plazo: asignación de personal a cada tarea y maquinaria, dosis a aplicar, necesidad de reparaciones.

Todos los niveles de planificación requieren de la identificación de problemas y factores limitantes, esto es: diagnósticos confiables para guiar las decisiones y el posterior manejo.

Para esto se debe contar con datos confiables, de los que se conozca no solo su valor medio sino también el grado de exactitud y precisión; temas que se tratan en este capítulo.

CUADRO 4.1: NIVELES DE PLANIFICACIÓN EN UN AGROSISTEMA Y PROCESAMIENTO DE DATOS EDAFOLÓGICOS NECESARIOS

Nivel de Planificación	Selecciona	Aplicación Edafológica Requerida	Ejemplos de Obras, Prácticas Edafotécnicas
Estratégica (Largo plazo)	¿Qué rubro producir? ¿Con qué intensidad y calidad de productos? ¿Se procesarán los productos? Plan general para el uso de las tierras 4.1 Nivel de recuperación, mantenimiento: control degradación 4.2 Nivel de mejoramiento. Dimensionamiento tecnoestructura Contabilidad ambiental: contralor	Inventario de tierras: Aptitud para variados cultivos Capacidad productiva Principales limitaciones Nivel de degradación Diagnóstico de cada suelo representativo	Sistema de labranza. Riego. Drenaje. Control erosión. Desalinización. Desodificación – corrección de pH. Uso de efluentes. Corrección fertilidad química. Incremento materia orgánica y actividad biológica. Descompactación.
Táctica (Anual, estacional)	Secuencia de cultivos, proporción de cada uno, rendimiento esperado. Programa general de tareas, uso maquinaria, personal e insumos	Diagnóstico de fertilidad química y física de cada lote Agua disponible en el perfil	Superficie a regar. Rendimiento objetivo. Nivel de abonos. Nivel de enmiendas, efluentes. Labores presiembra.
Operativa (Diario, semanal, mensual)	Inicio y fin de tareas Dosis, detalles labranza Modificaciones al plan táctico Control de ejecución y monitoreo	Monitoreo suelos y aguas	Dosis de abonos. Dosis de enmiendas, efluentes. Profundidad y orientación labor. Acondicionamiento superficie terreno y rastros. Lámina de riego. Mantenimiento obras control erosión, drenaje, riego, tránsito.

PARTE 1. TOMA DE MUESTRAS EN SUELOS

MIGUEL PILATTI, CARLOS ALESSO,
OSVALDO FELLI Y MARÍA MIRETTI

INTRODUCCIÓN

El análisis no puede ser mejor que la muestra
Jackson, 1960

El análisis de suelos es indispensable para (1) determinar la necesidad de fertilizantes y/o enmiendas, (2) diagnosticar limitantes concretas (compactación, salinidad, toxicidad), (3) monitorear la evolución de algunas propiedades indicadoras del estado de conservación de un suelo tales como materia orgánica, estabilidad de agregados o pH, (4) clasificar y mapear (cartografiar) según, —por ejemplo— la disponibilidad de nutrientes o las limitaciones (salinidad, compactación...), (5) detectar contaminación y/o resultados de la remediación.

El punto de partida para disponer de un buen dato es el muestreo en el campo: éste es la fuente de error más común de un análisis de suelo y por lo tanto debe prestársele mayor atención (Petersen y Calvin, 1986). Según Cline (1944), la confiabilidad de los resultados analíticos dependerá de la correcta toma de muestras y acondicionamiento más que de los errores de las técnicas de laboratorio.

Esto es así ya que el suelo es un cuerpo natural complejo y heterogéneo, cuya variabilidad dificulta la obtención de valores medios que representen adecuadamente sus propiedades en determinada área, más aún cuando en general el tamaño de la muestra de suelos que se remite al laboratorio es muy reducido en comparación con el de la población de la cual se pretende obtener información (Roberts y Henry, 2000). Por ejemplo, para estimar el contenido de nutrientes en los primeros 20 cm de 1 ha que pesa 2.600 Mg se envía solo 1 kg de muestra, es decir una cantidad insignificante.¹

Aquí se tratan los principios básicos para una correcta toma y acondicionamiento de muestras de suelos.

¹ Asumiendo una densidad de suelo de $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$, el peso de los primeros 20 cm de una hectárea es igual a: $10.000 \text{ m}^2 \times 0,2 \text{ m} \times 1,3 \text{ Mg m}^{-3} = 2.600 \text{ Mg}$.

4.1. EXACTITUD Y PRECISIÓN

La calidad de los datos analíticos obtenidos mediante el muestreo y análisis de suelos se deben medir en términos de exactitud y precisión. Comúnmente estos términos son empleados como sinónimos, sin embargo, representan conceptos distintos: la exactitud es una medida de cuan cerca está el valor observado en la muestra (estimador muestral) de aquel valor considerado como verdadero (parámetro poblacional), mientras que la precisión es el grado de repetitividad de dicho análisis.

En la Figura 4.1 se observa gráficamente esta diferencia. Suponiendo que el valor verdadero se encuentre en el centro, la exactitud es representada por la mayor o menor distancia a la cual se encuentra el promedio de los puntos (punto gris), mientras que la precisión es el grado de dispersión de los valores observados (puntos negros) en torno al promedio (punto gris).

De estas cuatro situaciones hipotéticas, la ideal es aquella en la cual se obtiene ambas cosas (B, en la Figura) y la peor es aquella donde no hay exactitud ni precisión (C). Situaciones intermedias representarían datos exactos pero imprecisos (A) o a la inversa, datos precisos, pero no exactos (D). El control de las fuentes de error durante el muestreo y análisis de suelo determinan la probabilidad de caer en alguna de estas cuatro situaciones.

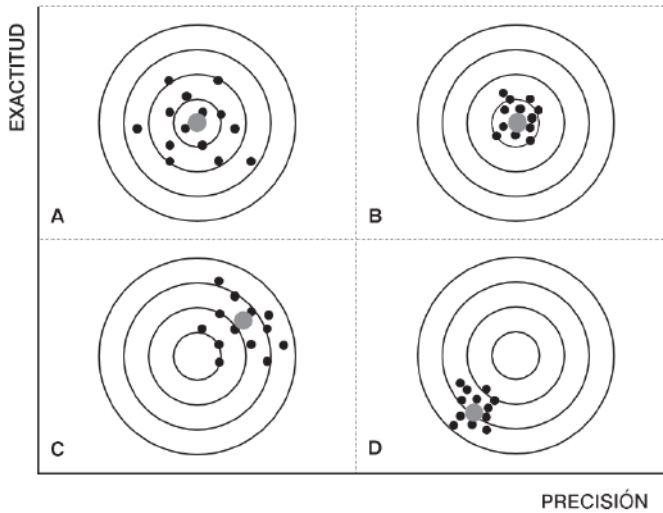


FIGURA 4.1. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS CONCEPTOS DE EXACTITUD Y PRECISIÓN

En la práctica es difícil de lograr estimaciones totalmente exactas y precisas, ya que resultaría en el aumento de los costos, tanto de esfuerzo (trabajo físico en el campo) como en dinero. Por ello, es preferible obtener estimaciones

que sean precisas tolerando un cierto error o inexactitud (situación D). En general, se fijan como objetivos una precisión superior al 95 % manteniendo el error lo más bajo posible, dependiendo de la propiedad en estudio (ver Cuadro 4.2).

Dado que el verdadero valor medio de la variable (media poblacional, μ) es desconocido, si existe una estimación de la varianza de la muestra, es conveniente expresar el resultado obtenido junto a una medida del error de estimación de la media (error de muestreo). Para ello, se recurre al cálculo del intervalo de confianza (ic) en torno al valor medio observado:

$$L_{IC95} = \bar{y} \pm t_{1-\alpha/2, n-1} \quad EE = \bar{y} \pm t_{1-\alpha/2, n-1} \sqrt{\frac{S^2}{n}} \quad [1]$$

Donde:

$L_{IC95\%}$ son los límites del intervalo de confianza al 95 %,

\bar{y} es el valor medio de la muestra,

$t_{1-\alpha/2, n-1}$ es el valor de la t de Student para un nivel de confianza $1 - \alpha/2$ con $n - 1$ grados de libertad (los valores de t estándar son 1,96 para una confianza de $1 - \alpha = 95\%$ cuando la muestra es numerosa), EE es el error estándar de la media el cual se obtiene a partir de la varianza de las muestras (S^2) y el número de muestras n .

Ejemplo: Se tomaron 10 muestras de suelo para estimar el contenido de materia orgánica (%MO) del suelo en los primeros 20 cm. Los resultados fueron los siguientes:

1,93 2,25 2,83 2,50 2,79 2,31 2,42 2,42 2,01 2,33

$\bar{y} = 2,51\%$; $S^2 = 0,084\%$

Esto significa que el verdadero valor de mo del suelo en los primeros 20 cm estaría entre 2,72 y 2,30 % en el 95 % de las veces que repitamos el muestreo. La inexactitud o error del dato estimado es de $\pm 8,3\%$.

La ecuación [1] implica asumir que la variable presenta una distribución normal de frecuencias y no tiene valores extremos. También de la ecuación se desprende que para aumentar la exactitud del intervalo (ej. disminuir EE) se debe aumentar el número de muestras (n).

¿Muestras simples o compuestas?

A menudo se recurre a la toma de muestras compuestas como una forma de abaratar costos. En este caso, las submuestras recolectadas se reúnen en una única gran muestra la cual es acondicionada y enviada al laboratorio para realizar una sola determinación. La ausencia de repeticiones, y por lo tanto la estimación de la variabilidad, limita la aplicación de muestras compuestas solo en aquellas situaciones donde no se requiere esta información (ej. estimación del nivel de un nutrimento en el lote).

El supuesto básico para este procedimiento es asumir que una sola determinación analítica es una buena estimación del parámetro poblacional (valor real), lo cual puede ser válido si las submuestras cumplen las siguientes condiciones: (i) deben pertenecer a la misma población (ej. no mezclar suelos diferentes); y (ii) cada una debe contribuir equitativamente al total de la muestra compuesta, esto significa que se está usando un calador que toma siempre el mismo volumen de muestra y no —por ejemplo— una pala donde las cantidades pueden ser muy diferentes).

En situaciones donde se requiere determinar si las diferencias en el dato analítico entre dos muestras compuestas se deben a cambios significativos de la propiedad en estudio (ej. nivel de P extraíble) o a la variabilidad en el lote, es posible sortear la dificultad de ausencia de repeticiones y adaptar el test de comparación de medias. Para ello se necesitan: (I) los datos analíticos a comparar, (II) una estimación del coeficiente de variación (cv) para la propiedad (Cuadro 4.2), y (III) el número de submuestras que se tomaron para la muestra compuesta.

Primero se calculan los desvíos estándares de cada muestra compuesta (s_x y s_y) utilizando el cv y la media de cada muestra (\bar{X} e \bar{Y}) a partir de la siguiente relación:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \Rightarrow S = \frac{\bar{X} \times CV}{100} \quad [2]$$

Luego, se calcula el error típico de cada muestra compuesta (ET_x y ET_y) a partir del desvío y el número de submuestras que la componen (n y m):

$$ET_x = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad ET_y = \frac{S_y}{\sqrt{m}} \quad [3]$$

Y el error típico medio:

$$ET_{xy} = \sqrt{(ET_x)^2 + (ET_y)^2} \quad [4]$$

Finalmente, se calcula el cociente entre la diferencia de las medias de las muestras compuestas y el error típico medio. El valor resultante se contrasta con el estadístico t de la distribución Student para un nivel de confianza $1-\alpha/2$ y $n+m-2$ grados de libertad. Si el cociente es mayor que t teórico (1,96 o próximo a él), entonces la diferencia entre las muestras compuestas sería significativa.

Ejemplo: Se tienen valores de P extraíble provenientes de 2 muestras compuestas de 30 submuestras ($n = 30$) recolectadas en años diferentes (1978 y 2006 $P_{78} = 23$ ppm y $P_{06} = 12$ ppm) y se desea saber si los valores son diferentes. Se sabe que el cv del P extraíble en la zona es $cv = 50\%$ (cuadro 4.2), entonces:

1. Se estiman los desvíos estándar de cada muestra (ej. 1978 y 2006):

$$S_{78} = \frac{23 \times 50}{100} = 11,5 \quad S_{06} = \frac{12 \times 50}{100} = 6$$

2. Se calculan los errores típicos de cada media:

$$ET_{78} = \frac{11,5}{\sqrt{30}} = 2,10 \quad ET_{06} = \frac{6}{\sqrt{30}} = 1,10$$

3. Se calcula el error típico medio:

$$ET_{78-06} = \sqrt{2,1^2 + 1,1^2} = 2,37$$

4. Se obtiene el cociente entre la diferencia entre muestras compuesta y el error típico medio:

$$\frac{d_{78-06}}{ET_{78-06}} = \frac{23-12}{2,37} = 4,64$$

5. Finalmente, el estadístico t teórico (confianza $1-\alpha/2 = 0,975$ y 58 grados de libertad) es aproximadamente 2, por lo tanto, se concluye que el nivel de fósforo disminuyó significativamente entre los años 1978 y 2006.

Fuentes de error

El error contenido en un análisis de suelo es el producto de las siguientes fuentes de inexactitud:

a) heterogeneidad propia del suelo,

- b) procedimiento empleado en el muestreo,
- c) acondicionamiento de la muestra,
- d) errores analíticos, y
- e) errores de interpretación.

La primera fuente de error es prácticamente ineludible. En cambio, el procedimiento de muestreo y el acondicionamiento pueden ser controlados por el profesional o la persona encargada de realizar la labor (Orellana, 1987).

Dentro de los errores analíticos se incluyen las manipulaciones realizadas sobre la muestra en las diversas etapas de los análisis, tales como pesadas, medición de volúmenes, temperatura, calidad de las drogas, calibración de equipos, por lo que su control excede el alcance del profesional que remite la muestra.

Finalmente, los errores de interpretación provienen de la imperfecta correlación y calibración entre los resultados de los análisis y la respuesta de los cultivos. Esta tarea es menester de organismos de investigación, los cuales llevan a cabo ensayos a campo con distinto nivel de extrapolabilidad a las condiciones particulares de cada explotación.

El error (a) y (b) se denomina «error de campo», mientras que los restantes son «error de preparación», «error de laboratorio» y «error de ajuste», respectivamente. Está demostrado que el error de campo es netamente superior al error de laboratorio, siendo 3 a 6 veces mayor (Cline, 1944).

4.2. LA VARIABILIDAD DEL SUELO

Interesa tratar este tema porque ayuda a definir cuánto es el nivel de error aceptable y sobre todo cuántas deben ser el número de submuestras o el «n».

La heterogeneidad es una característica intrínseca de todo suelo, tanto en sentido horizontal como vertical, abarcando a todas las propiedades ya sean químicas, físicas o biológicas (Orellana, 1987). Asimismo, algunas propiedades cambian marcadamente con el paso del tiempo (años) o estacionalmente.

Por ejemplo, en un muestreo en grilla de 10 x 10 m realizado por la Cátedra dentro de una hectárea aparentemente uniforme se determinaron los cv de la densidad de suelo (Ds), potasio intercambiable (K) y fósforo extraíble (P), siendo del orden de 5,5 %, 23,3 % y 43,7 %, respectivamente (Alesso y Pilatti, 2008). En la Figura 4.2 se presenta la distribución espacial de los resultados de los datos analíticos de fósforo. Nótese que a pocos metros de distancia se pueden encontrar valores tan dispares como 11 y 66 ppm.

En profundidad, algunas las propiedades del suelo varían de acuerdo al perfil que presenta el suelo como resultado de su proceso de formación, actividad de las raíces, profundidad de labores y aplicación de fertilizantes, etc.

En el tiempo, por ejemplo, el pH entre otoño e inicio de verano puede cambiar hasta en 0,5 unidades. Los nitratos en 2 meses de barbecho pueden aumentar 20 ppm o más; en cambio el P extraíble es más estable pudiendo aumentar 2 o 3 ppm en el mismo lapso (datos no publicados).

Comúnmente, la variabilidad de una propiedad se expresa en términos de coeficiente de variación (cv) el cual expresa la proporción de la variabilidad de la muestra en torno a la media. Según Wilding (1985), la magnitud de la variabilidad de las propiedades del suelo puede clasificarse según su cv en: baja ($cv < 15\%$), moderada ($16 < cv < 35\%$) y alta ($cv > 36\%$). En el cuadro 4.2 se resumen los cv de algunas propiedades obtenidas en distintos trabajos a nivel local e internacional.

Es importante conocer que cuando el cv supera el 25 o 30 % la distribución suele no ser «normal» y allí hay que tomar otras consideraciones que van más allá de este trabajo; por ejemplo, la necesidad de convertir variables.

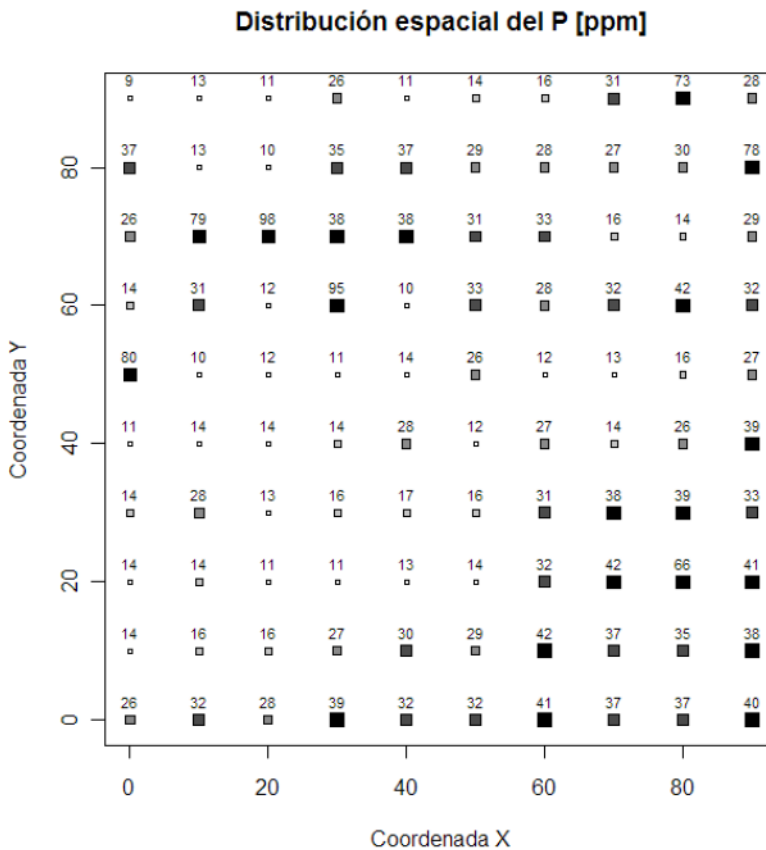


FIGURA 4.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS VALORES DE P EXTRAÍBLE DENTRO DE UNA HECTÁREA. LA DISTANCIA EN LOS EJES ESTÁ EXPRESADA EN METROS. CV = 44 % (ADAPTADO DE ALESSO Y PILATTI, 2008)

Fuentes de variabilidad

La variabilidad del suelo puede ser natural o inducida. La primera es el resultado de la acción de los factores y procesos formadores del suelo, que operan e interactúan durante distintas escalas de tiempo y espacio. (Trangmar *et al.*, 1985). La variabilidad inducida es el producto de la acción humana que a través del manejo del suelo y los cultivos (labores, cobertura, fertilización, drenaje, riego, etc.) provoca cambios de diversa magnitud a las propiedades del suelo original.

Los factores antes mencionados actúan a distintas escalas en el tiempo y espacio, por lo que la magnitud de la variabilidad de una propiedad depende de la escala de observación. Así, el aumento de la escala (ej. menor extensión del área de estudio o intervalo de tiempo) reduce la variación esperable de aquellos factores que actúan a lo largo de grandes distancias (ej. clima) o largos períodos de tiempo (ej. alteración del material de origen) y por lo tanto la variabilidad solo es producto de los factores que actúan localmente o en intervalos de tiempo menores.

CUADRO 4.2. TAMAÑO DE MUESTRA RECOMENDABLE (n) PARA DISTINTAS PROPIEDADES EDÁFICAS CON INFORMACIÓN SOBRE COEFICIENTES DE VARIACIÓN (CV), MAGNITUD DE VARIABILIDAD Y ERROR ACEPTABLE.

Propiedad	Coeficiente de Variación (cv)				% Sugerido	Magnitud de la Variabilidad	% Error sugerido	"n" según cv sugerido
	Local		Internacional					
	min	max	min	max				
Densidad del suelo	4	10	3	26	10	baja – mod.	5	16
Porosidad Total	4	10	7	11	10	baja	5	16
Contenido hídrico a saturación	4	10	–	–	10	baja	5	16
Macroporos	20	48	–	–	30	mod – alta	15	16
Estabilidad de agregados	14	39	–	–	25	mod – alta	15	11
Conductividad hidráulica	36	190	48	352	100	alta	75	7
Tasa de infiltración	26	65	23	97	50	mod – alta	30	11
Contenido hídrico gravimétrico	7	15	–	–	15	baja	10	9
Capacidad de campo	12	23	4	20	20	baja – mod	10	16
Punto de marchitez permanente	6	15	14	45	15	baja	8	14
Granulométrico	8	21	–	–	20	baja – mod	10	16
% Arena	6	11	3	37	15	mod – alta	10	9
% Arcilla	8	14	16	53	15	mod – alta	10	9
Límite plástico inferior	16	24	–	–	20	mod	10	16
Nitratos	21	85	25	58	50	alta	20	25
P extraíble	38	79	39	157	80	alta	30	28
K intercambiable	25	34	39	157	35	alta	20	12
C y N	12	15	21	41	20	baja	10	16
Conductividad eléctrica extracto saturación	38	135	91	263	100	alta	40	25
Reacción del suelo (pH)	2	13	2	15	15	baja	5	36
Capacidad de Intercambio catiónico	3	21	–	–	20	baja – mod	10	16

4.3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

A menudo, los valores de las propiedades edáficas no se distribuyen en el terreno de manera aleatoria. Por el contrario, si se toman muestras de dos sitios próximos probablemente los valores serán similares o estarán espacialmente correlacionados, mientras que muestras tomadas a mayor distancia hay más posibilidades de que resulten en valores distintos (Mulla y McBratney, 2000). Por ejemplo, en la Figura 4.3 se puede comparar visualmente un conjunto de datos de P extraíble que presenta dependencia espacial respecto de un conjunto generado artificialmente de manera aleatoria pero conservando la misma media y desvío que el original.

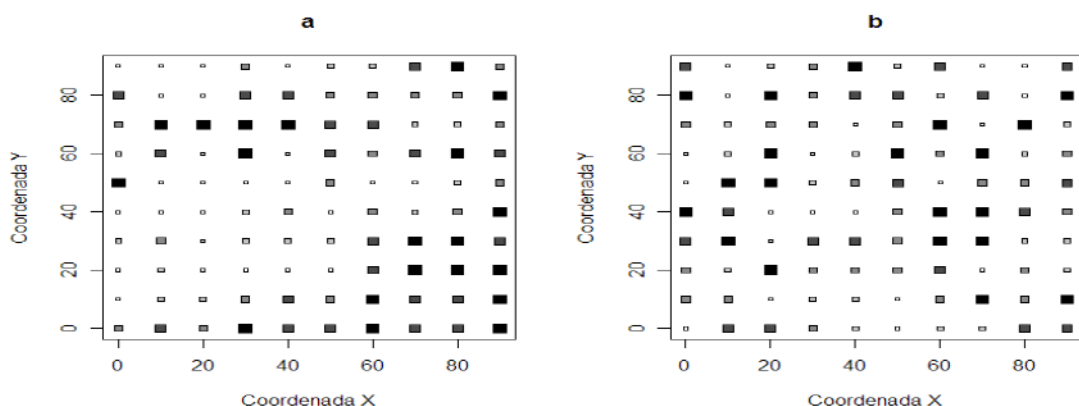


FIGURA 4.3. EJEMPLO DE DATOS CON DEPENDENCIA ESPACIAL (A) Y DATOS SIN DEPENDENCIA ESPACIAL (B).

En la Figura 4.3a se observa que los valores de P próximos son más parecidos entre sí mientras que en la Figura 4.3b (datos aleatorios) existen grandes diferencias de abundancia de P tanto entre los vecinos más próximos como los más alejados. La semejanza entre los valores en función de la distancia que los separa se denomina *dependencia* o *continuidad espacial*.

La Geostatística es una rama aplicada de la estadística que cuantifica la dependencia y modela la estructura espacial a los efectos de optimizar la predicción (interpolación) de variables en sitios no muestreados (Mulla y McBratney, 2000). La principal herramienta que utiliza para describir la continuidad espacial es el *semivariograma*, una función que resume la relación de la varianza entre las observaciones con distancia de separación (h) entre ellas, la cual se expresa en la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z_i - z_{i+h}]^2 \quad [5]$$

Donde:

h es la distancia de separación entre las muestras de los sitios x_i y x_{i+h} , Z_i y Z_{i+h} son los valores medidos de la variable regionalizada en los sitios x_i y x_{i+h} , y (h) es el número de pares para cada distancia h .

Por ejemplo, a partir de los datos de un muestreo sistemático en grilla con una distancia de separación $h = 100$ m (Figura 4.4), se comienza calculando la semivarianza para el primer intervalo de distancia, para el ejemplo solo se considera la dirección este-oeste. Para ello se computan los cuadrados de las diferencias entre todos los pares posibles de observaciones separadas por 100 m y luego se las divide por 2 veces el número de pares (fórmula anterior). Luego se procede de la misma manera con las distancias $2h = 200$ m, $3h = 300$ m, sucesivamente.

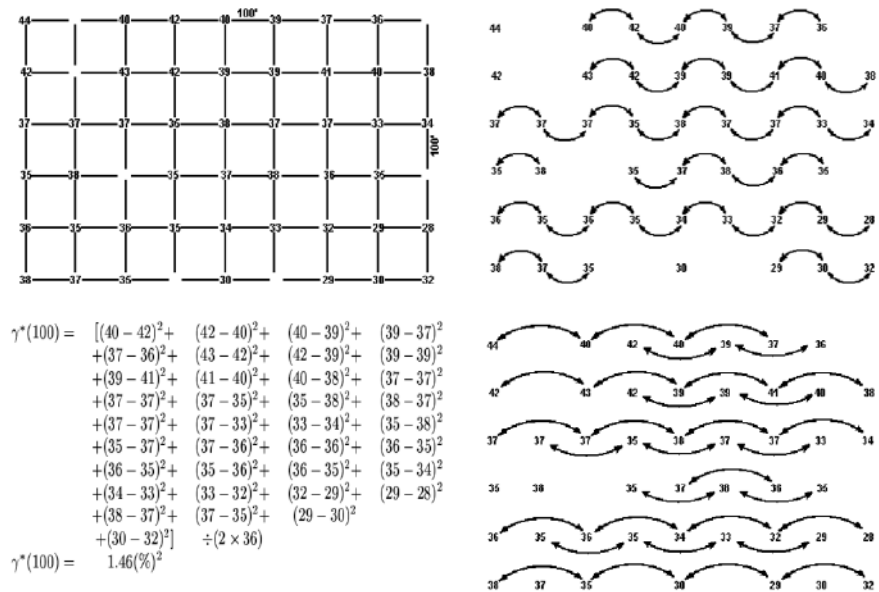


FIGURA 4.4. EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA SEMIVARIANZA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DE SEPARACIÓN

Una vez calculadas las semivarianzas para todas las distancias posibles se obtiene el semivariograma experimental, el cual representa las diferencias promedio entre los datos para cada espaciamento. El caso ejemplificado corresponde a un semivariograma direccional (solo considera distancias en sentido E-O), mientras que los omnidireccionales se obtienen cuando el cálculo de la semivarianza tiene en cuenta todos los pares posibles a h metros de distancia en todas las direcciones.

Dado que los semivariogramas experimentales solo describen el incremento de la varianza para distancias que son múltiplos del espaciamento mínimo entre las muestras. Para poder modelar la continuidad espacial de la variable en todo el intervalo de distancias, es necesario obtener una función continua. Para ello se busca ajustar modelos teóricos a los datos experimentales. Los modelos más comunes son: esférico, gaussiano, y exponencial. Cada uno de ellos presenta propiedades particulares, pero algunos parámetros son comunes a todos: *pepita*, *meseta* e *intervalo*. (Ver Figura 4.5)

- *Pepita o nugget* (C_0): es una medida de la cantidad de varianza debida a errores de medición, muestreo o fuentes de variación no explicadas. La proporción de pepita respecto a la varianza total es un indicador de la estructura espacial de los datos. A mayor efecto pepita, mayor proporción de varianza no explicada o aleatoria, por lo tanto menor estructura espacial y viceversa.
- *Meseta o sill* ($C_0 + C_1$): es el límite del semivariograma cuando la distancia h tiende a infinito, lo que equivale a la varianza de la población. La meseta se denota por $C_0 + C_1$ cuando la pepita es diferente de cero. Al contrario que el parámetro C_0 , C_1 representa la cantidad de varianza debida a la estructura espacial.
- *Intervalo* (a): es la distancia a partir de la cual dos observaciones son independientes. En el modelo exponencial y en el gaussiano este parámetro es asintótico por lo que se llama intervalo efectivo a la distancia para la cual el semivariograma alcanza el 95 % de la meseta. Entre más pequeño sea el intervalo, más cerca se está del modelo de independencia espacial.

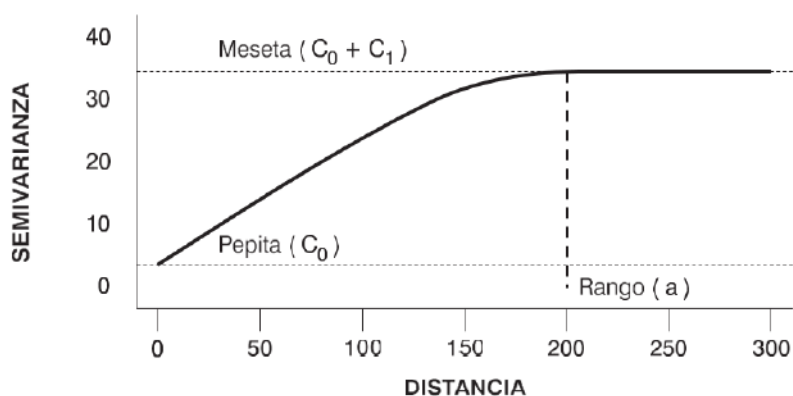


FIGURA 4.5. EJEMPLO DE SEMIVARIOGRAMA TEÓRICO (MODELO ESFÉRICO) DONDE SE INDICAN LOS PARÁMETROS MÁS RELEVANTES: PEPITA, MESETA Y INTERVALO

El parámetro del semivariograma que presenta mayor interés para el muestreo es el intervalo. En el Cuadro 4.3 se presentan algunos valores orientativos del intervalo de algunas propiedades edáficas. Este valor determina la distancia mínima a partir de la cual se puede esperar que dos muestras sean independientes. Si el objetivo del muestreo es caracterizar el valor medio

del lote, es preciso que las muestras obtenidas sean independientes, por lo tanto, la distancia que se debe recorrer en el terreno entre los puntos de muestreo debe ser mayor al intervalo. Por el contrario, si se busca describir los patrones de distribución espacial de alguna propiedad de suelo, conviene que las muestras estén separadas entre el $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ del intervalo.

Para el centro de Santa Fe cuando el relieve es subnormal la dependencia espacial es corta a muy corta, del orden de los 20 a 30 m (datos no publicados por autores del capítulo).

CUADRO 4.3. INTERVALOS DE DEPENDENCIA ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES EDÁFICAS INFORMADOS EN LA BIBLIOGRAFÍA (MULLA Y MCBRATNEY, 2000)

Propiedad	Intervalo (m)	Dependencia espacial
Conductividad hidráulica saturada	1 – 34	intervalo corto
%Arena	5 – 40	intervalo corto
Contenido hídrico saturado	14 – 76	intervalo corto a moderado
pH	20 – 260	intervalo corto a largo
Nitratos	40 – 275	intervalo moderado a largo
Potasio extraíble	75 – 428	intervalo moderado a largo
Fósforo extraíble	68 – 260	intervalo moderado a largo
Materia orgánica	112 – 250	intervalo largo

4.4. ESTRATEGIAS DE MUESTREO

La variabilidad y estructura espacial de las propiedades edáficas son de gran importancia en el desarrollo de esquemas de muestreo de suelos ya que determinan el número óptimo de muestras y el arreglo espacial de los puntos donde se tomarán las muestras (Mulla y McBratney, 2000).

Si bien el tipo de muestreo a efectuar depende del atributo que se pretende estimar y del uso final que se le dará al dato, el mejor diseño de muestreo es aquel que provee la mayor exactitud y precisión a un costo dado, o bien el que resulta menos costoso para alcanzar los niveles de exactitud y precisión deseados (Petersen y Calvin, 1986).

Número de muestras

El número de muestras a tomar depende de tres factores:

- a) variabilidad de la propiedad en estudio;
- b) el nivel de exactitud deseado en la estimación de la media poblacional y
- c) el nivel de precisión del intervalo de confianza de la estimación de la media poblacional. (Mulla y McBratney, 2000).

No obstante, debido a que en la práctica la obtención de muestras de suelo resulta costosa (ej. tiempo, esfuerzo y dinero) esto debe ser considerado especialmente en la determinación del número mínimo de muestras.

Cálculo del número de muestras a partir de la ecuación del intervalo de confianza

Cuando se espera que la variable en estudio se distribuya normalmente y no presente autocorrelación (independencia espacial), el número teórico de muestras (N) para alcanzar una determinada precisión y exactitud en la estimación de la media poblacional, se calcula con la siguiente fórmula:

$$N = \left(\frac{t \times S}{d} \right)^2 \quad [6]$$

Donde:

N es el número teórico de muestras,
 t es el estadístico de la distribución de Student que usualmente se considera (1,96 para un nivel de confianza 95 % y muestras grandes),
 S el desvío estándar de la muestra y
 d el error o desviación admitida entre la media muestral y la media poblacional.

Frecuentemente, los valores de desvío son expresados en términos de cv (porcentaje), para lo cual la ecuación [6] puede adaptarse de la siguiente manera introduciendo el error d % como porcentaje de la media.

$$N = \left(\frac{t \times CV}{d\%} \right)^2 \quad [7]$$

Como se observa en la Figura 4.6, para un mismo cv %, el número de muestras crece marcadamente a medida que el error o inexactitud admitida disminuye. Del mismo modo, a medida que la variabilidad de la propiedad aumenta, el número de muestras para lograr una exactitud deseada se incrementa.

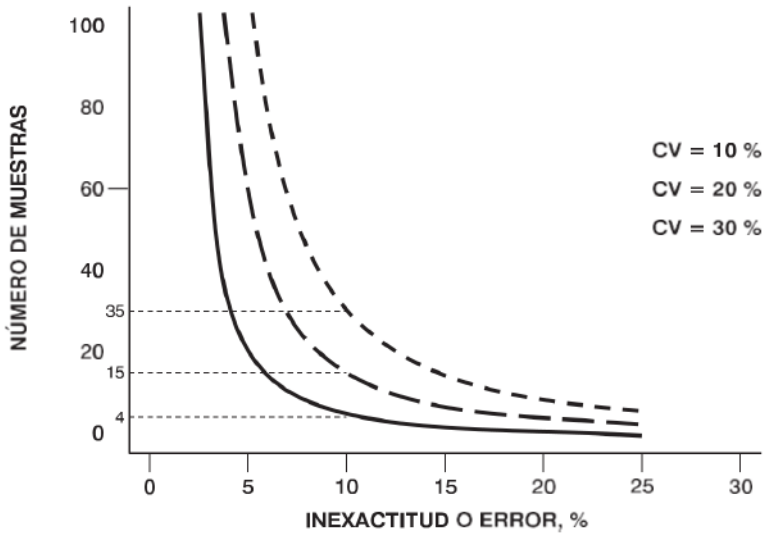


FIGURA 4.6. RELACIÓN ENTRE LA INEXACTITUD Y EL NÚMERO DE MUESTRAS PARA DISTINTOS COEFICIENTES DE VARIACIÓN

Ejemplo: Se desea calcular el número de muestras necesarias para estimar la densidad del suelo (D_s) con un error máximo de 6 % y una precisión del 95 %. Tomando el cv % sugerido en el Cuadro 4.2 se aplica la fórmula [3], entonces:

$$N = \left(\frac{1,96 \times 7}{6} \right)^2 \approx 5$$

Tamaño del lote

Varios trabajos han demostrado que el número de muestras requeridas para alcanzar una exactitud y precisión dada se incrementa muy poco a medida que se incrementa el tamaño de lote (Figura 4.7). Sin embargo, considerando la heterogeneidad de los suelos cultivados, es conveniente tomar más de una muestra si la superficie de la unidad de muestreo es mayor a 30 a 50 ha.

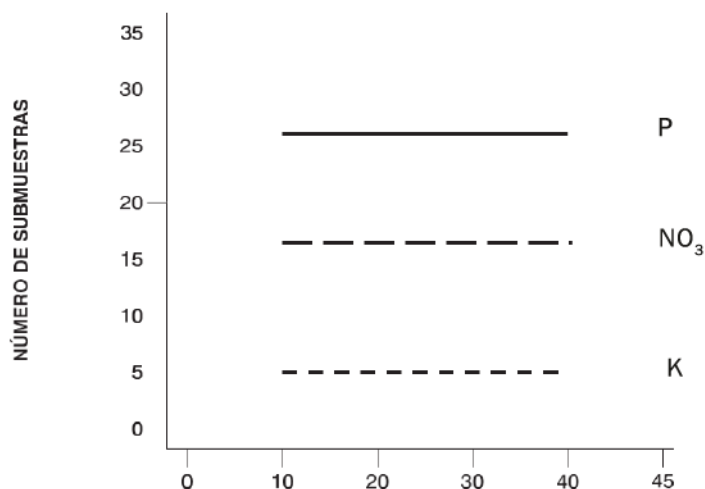


FIGURA 4.7. RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO DEL LOTE Y EL NÚMERO DE SUBMUESTRAS NECESARIAS PARA OBTENER UNA MUESTRA DE SUELOS CON UN NIVEL DE EXACTITUD DEL 15 % Y UNA PRECISIÓN DEL 80 % (SWENSON ET AL., 1984)

Profundidad de muestreo

Según el objetivo que se tenga para muestrear un suelo variará la profundidad desde la cual se obtendrán las muestras. Puede reconocerse al menos los siguientes objetivos:

- conocer la fertilidad química y recomendar fertilizantes,
- evaluar el estado de conservación, o degradación del lote y su evolución,
- medir la disponibilidad de agua útil para los cultivos antes de la siembra o en otro momento considerado de interés (perfil de agua en el suelo) y
- estudios de génesis de suelos.

A continuación, se considerarán solo los dos primeros:

Diagnóstico de fertilidad química:

Si bien usualmente se adopta tomar muestras a 20 cm (por rutina, esfuerzo...) aquí se recomienda utilizar la Profundidad Enraizable que se determina según lo expuesto en el capítulo 4.4 que varía entre 10 y 50 cm o más.

Para los nutrientes muy móviles como es el caso de los nitratos se indica hasta los 60 cm (Conti, 2005).

Según el cultivo —cuando el suelo no ofrece grandes limitaciones—, es conveniente que se corresponda con la mayor densidad de raíces. En el Cuadro 4.4 se detallan las profundidades de exploración radical de algunos cultivos.

Cuando en el espesor a muestrear hay dos o más horizontes claramente diferenciados en su textura, estructura, color, etc., convendrá muestrearlos separadamente. También si la profundidad incluye un solo horizonte y éste es mayor de 30 cm, se deberán tomar de él dos muestras de igual espesor.

CUADRO 4.4. ZONA DE MAYOR DENSIFICACIÓN DE RAÍCES Y PROFUNDIDAD MÁXIMA SEGÚN CULTIVOS (BORG Y GRIMES, 1986)

Cultivo	Zona de ramificación densa	Profundidad extrema
Alfalfa (1º año)	50	180 – 240
Alfalfa (7º año)	90	300–600
Algodón	70	150–300
Avena	50	120 – 160
Caña de azúcar	60	200–600
Centeno	50	150 – 225
Girasol	30	150–300
Lino	40	100–150
Maíz	70	150 – 300
Melilotus	45	150–240
Soja	40	150–250
Sorgo	65	150–300
Trigo	30	150–300
Vicia	40	150–190

Estado de conservación del suelo

El muestreo debe realizarse en el horizonte perturbado por las labores (Ap) o, en el caso de siembra directa diferenciar los primeros 10 cm, donde la acumulación orgánica es mayor, de la zona donde la compactación puede ser limitante: usualmente entre los 15 y 40 cm; hay que definirlo con observaciones en el terreno.

Es indispensable, para poder comparar, tomar una muestra a la misma profundidad en un terreno sin remoción de más de 30 años de antigüedad, natural o bajo alambrado antiguo seleccionado por profesionales idóneos.

Momento y frecuencia de la toma de muestras

El momento del año en el que debe realizarse el muestreo y frecuencia con la que debe repetirse depende del objetivo perseguido y la variación interanual de las propiedades que se quieran determinar.

La época del año depende de la dinámica del cultivo, por ejemplo, en pasturas conviene realizar el muestreo luego del corte o máximo pastoreo,

en cultivos antes de la siembra o bien durante los primeros estadios del cultivo si el objetivo es una aplicación postergada.

Cuando el objetivo es la caracterización de la fertilidad química del lote se realiza un mes antes del cultivo a implantar. Por razones prácticas (esfuerzo para introducir el calador) es necesario que haya humedad —baja resistencia a la penetración—. Si se efectúa siempre en la misma época del año podrán compararse los resultados entre años.

La frecuencia de análisis depende fundamentalmente de la variabilidad interanual de la propiedad edáfica que se quiera medir. Aquellos parámetros más variables deben analizarse anualmente, por ejemplo, el contenido de nitratos o sulfatos. En cambio, los parámetros más estables como el contenido de Materia Orgánica o elementos poco móviles pueden analizarse cada ciclo de rotación (entre 4 y 7 años). En el Cuadro 4.5 se listan algunas propiedades edáficas, su momento y frecuencia de análisis requeridos.

CUADRO 4.5. FRECUENCIA Y MOMENTO DE MEDICIÓN DE ALGUNAS PROPIEDADES EDÁFICAS. (1) EN BARBECHO DESPUÉS DE CADA CICLO DE ROTACIÓN, (2) ANUALMENTE EN PRESIEMBRA. (PILATTI Y ORELLANA, 2007)

Determinación	Frecuencia y Época de Medición
Densidad (g cm ⁻³)	(1)
Capacidad de campo (g %)	(1)
Macroporosidad (cm ³ cm ⁻³)	(1)
Agua útil (% o cm)	(2)
Carbono Orgánico (g %)	(1)
Nitrógeno total (g %)	(1)
Nitrógeno activo (g Mg ⁻¹)	(2)
cic (cmolc kg ⁻¹)	(1)
Cationes intercambiables (cmolc kg ⁻¹)	(1)
pH (rel. 1:2,5)	(1)
cées (dS m ⁻¹)	(1)
N-Nitratos (g Mg ⁻¹)	(2)
P extraíble (g Mg ⁻¹)	(2) cada 3-4 años
S disponible (g Mg ⁻¹)	(2)
Intervalo hídrico óptimo	(1)
Infiltración del sello (mm h ⁻¹)	(1)
Estabilidad de agregados (%)	(1)

Esquemas de muestreo

Todo esquema de muestreo debe ser diseñado para cumplir el objetivo final por el cual se realizarán los análisis de suelos, por lo tanto, existen varias alternativas para realizar la toma de muestras variando su grado de intensidad, rigor estadístico y sesgo. A continuación, se describen algunos diseños de muestreo más utilizados.

a) Muestreo selectivo

El objetivo de este tipo de muestreo suele ser evaluar las propiedades del suelo en varios lugares donde se cree que existe algún tipo de problema, por ejemplo: bajos rendimientos, contaminación de suelo, drenaje pobre, etc. Los sitios donde se tomarán las muestras son elegidos con probabilidades diferentes, aunque desconocidas ya que la selección está basada en el criterio del muestreador y/o la evidencia visual de cambios en las propiedades del suelo (diferencias de color, humedad, vigor de la vegetación, salinidad). Se recurre a este tipo de muestreo cuando existe poco interés en el rigor estadístico dado que el número de muestras generalmente es pequeño y el procedimiento de selección de sitios a muestrear está sujeto al sesgo del observador.

b) Muestreo Aleatorio Simple

La elección de los sitios de muestreo se realiza de manera aleatoria, asignándole la misma probabilidad de elección a todos los puntos del lote independientemente del sitio que haya sido elegido anteriormente. Para ello se emplean tablas o generadores de números aleatorios para establecer las coordenadas o distancias entre los puntos.

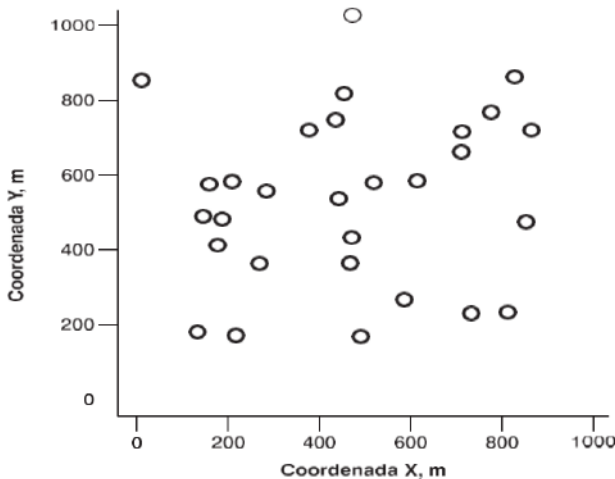


FIGURA 4.8. EJEMPLO DE ESQUEMA DE MUESTREO ALEATORIO. LAS COORDENADAS DE LOS SITIOS DE MUESTREO (O) SE OBTUVIERON A PARTIR DE UN GENERADOR DE NÚMEROS ALEATORIOS

Si bien este método es estadísticamente riguroso y evita el sesgo en la elección de los puntos de muestreo, generalmente es poco práctico y el resultado es un muestreo con apariencia agrupada dejando grandes áreas del lote sin muestrear con el consecuente grado de incertidumbre en aquellos sectores (Figura 4.8).

Por otro lado, el supuesto de independencia entre los sitios de muestreo no permite aplicarlo en variables que presentan dependencia espacial. Para estos casos, la selección de los sitios de muestreo debe realizarse teniendo en cuenta la distancia mínima entre puntos de muestreo para obtener así muestras independientes representativas.

c) Muestreo estratificado

Es una extensión del muestreo aleatorio simple que permite aumentar la precisión sin incrementar sustancialmente los costos. El área se divide en regiones o estratos según alguna característica que presuponga reducción de la heterogeneidad o error de muestreo, por ejemplo: distintas posiciones en el relieve (loma, media loma, bajo), tipos de suelos, potencial de rendimiento, etc. (Figura 4.9). Este esquema de muestreo puede ser utilizado en Agricultura de Precisión para el manejo diferenciado por ambientes o zonas de manejo. El número de zonas a delimitar dependerá de la heterogeneidad del lote, siendo aconsejable que las zonas no sean menores al 20 % del área total.

Una vez delimitadas las zonas de muestreo, se procede a realizar un muestreo aleatorio dentro de cada una, empleando la metodología del muestreo aleatorio simple, las muestras obtenidas de cada zona se reúnen en una muestra compuesta y se remite al laboratorio una muestra por zona.

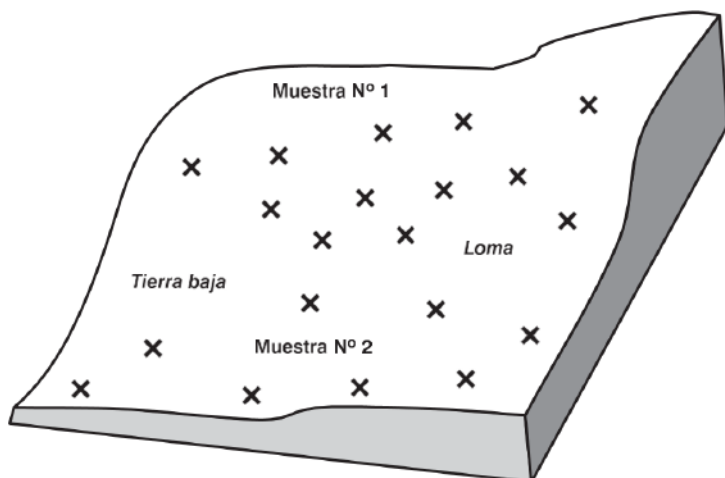


FIGURA 4.9. EJEMPLO DE LA ESTRATIFICACIÓN DEL MUESTREO DE ACUERDO A LA POSICIÓN DEL RELIEVE

d) Muestreo sistemático

Es un sistema de muestreo muy usado para evitar la distribución agrupada del muestreo aleatorio y tener mayor grado de certeza cubriendo la mayor parte del lote. Este tipo de muestreo brinda la mayor cantidad de información, pero su costo elevado lo restringe a casos especiales donde se requiere una mayor caracterización de la variabilidad del lote para la aplicación de tratamiento al suelo diferenciales como, ej., dosis de abonos; es usual en el contexto de Agricultura de Precisión.²

El terreno se divide en una grilla con celdas geoméricamente regulares, generalmente con forma de cuadrado, rectángulo o triángulo. Las muestras se toman en el centro de cada celda asumiendo que dicho valor es representativo de área delimitada por la celda, o bien, pueden tomarse en las intersecciones de la grilla en cuyo caso el valor de la celda es el promedio de los valores ubicados en sus límites. Cada muestra que va al laboratorio a su vez se compone de 4 a 8 submuestras tomadas en un radio de 5 m en torno al sitio de muestreo.

La elección del tipo de celda y el tamaño introduce algún tipo de sesgo. Por otro lado, los puntos se encuentran alineados y pueden coincidir con algún tipo de variación sistemática producida por prácticas de manejo (ej. bandas de fertilización, surcos, etc). Esto último puede evitarse empleando una disposición desalineada de los puntos dentro las celdas.

El principal dilema de este procedimiento es que de él depende el semi-variograma para determinar el espaciamiento de la grilla, el cual es a su vez desconocido para la situación a estudiar. Para paliar este problema puede recurrirse a información zonal del intervalo de dependencia espacial de las variables para determinar el tamaño de las grillas o bien realizar un estudio exploratorio con una o más transectas y determinar el intervalo para el sitio de estudio.

En todos los casos deben descartarse aquellos sitios donde se manifieste influencia de arboledas perimetrales, depósitos de alimentos (silos, comederos), influencia de aguadas, o microrelieves (Pilatti y Orellana, 1994).

Instrumental

Las propiedades químicas de suelo se determinan a partir de muestras desmenuzadas, donde no interesa conservar la estructura del suelo, en cambio, la mayoría de las propiedades físicas del suelo requieren la obtención de muestras inalteradas que conserven la estructuración presente en el campo.

Un instrumento de muestreo requiere dos condiciones importantes: (a) que tome una capa uniforme desde la superficie hasta la profundidad determinada, y (b) que se pueda obtener el mismo volumen de suelo en cada

² Sin embargo, el alto costo de este sistema de muestreo ha motivado al desarrollo de alternativas menos costosas que permita obtener la misma información.

extracción. El empleo de la pala no asegura que cada punto muestreado contribuya con igual volumen de tierra a la composición total, por lo tanto debe reservarse solo a casos especiales como la extracción de muestras para estabilidad de agregados. Para los otros casos existen dispositivos diseñados para cumplir con las condiciones antes mencionadas.

Muestras desmenuzadas

Existen diversos diseños de caladores de suelos para muestras desmenuzadas los cuales sirven para distintos tipos de suelos (suelos rocosos, etc) o tipos de muestreo (superficial o profundo). A continuación, se describen los más comunes:

Sondas y barrenos

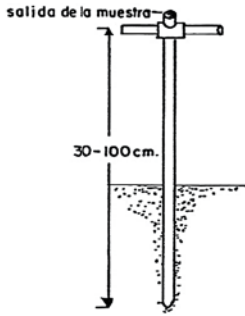
Consiste de un tubo de metal de longitud variable según diseño, con una abertura longitudinal en los primeros 15 o 30 cm (Figura 4.10b) o sin ella y con un orificio en el extremo superior del tubo (Figura 4.10a). En la boca presenta un ensanchamiento exterior, el cual evita el rozamiento del resto de la sonda con las paredes de la perforación, lo que disminuye el esfuerzo para introducirlo, y una abertura ligeramente inferior al diámetro del resto del tubo para permitir el desplazamiento fácil del cilindro de tierra y su posterior extracción. La abertura longitudinal permite extraer el material con los dedos o, si se adhiere al metal, con ayuda de un destornillador, cortaplumas, cuchillo o adminículo diseñado para tal fin. Este tubo se continúa en un vástago de uno o varios tramos que finaliza en un mango en forma de «T» sobre el cual se realiza la presión descendente.

La ventaja principal de este calador es la posibilidad de ser usado para tomar muestras a diferentes profundidades. Algunos diseños presentan aforos o marcas lo que permite controlar fácilmente la profundidad a la que se introduce el calador. Si el calador no cuenta con estas marcas es conviene practicar una o pegar una tela adhesiva en las sondas, señalando la línea hasta la cual debe introducirse en el terreno para unificar la profundidad de muestreo. Este aparato debe clavarse siempre con presión vertical, sin girar, ya que la zona debilitada por la muesca puede torcerse.

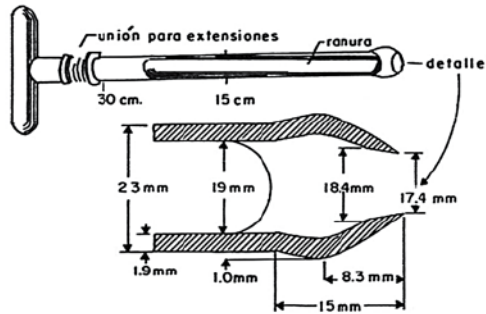
Cuando los suelos son muy sueltos o secos la operación se ve dificultada y pueden producirse pérdidas de material al retirar la sonda. Esto se evita humedeciendo (con agua destilada o de lluvia) previamente los puntos a sondear, compactándolo o ambas cosas, o bien utilizando el muestreador tipo barreno (Figura 4.10d).

Suele ocurrir que la tierra dentro de la sonda se compacte de tal modo que la profundidad medida en la sonda no se corresponda con la que se mide en el terreno. Obviamente la medición correcta es la que se practica en la perforación que ha quedado en el suelo; para efectuarla se utiliza un metro como el usado en carpintería.

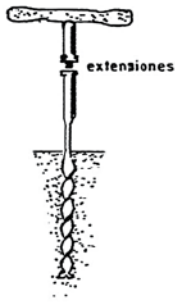
(A) Sonda de Tubo



(B) Sonda de Tubo Ranurado



(C) Taladro



(D) Barrenos

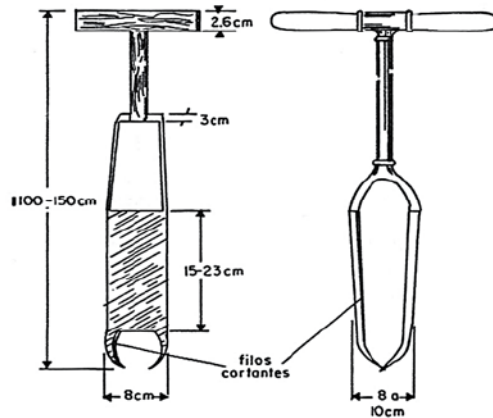


FIGURA 4.10. DISEÑOS DE INSTRUMENTOS PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE SUELO DESMENUZADAS: (A) SONDA DE TUBO, (B) SONDA CON TUBO RANURADO, (C) TALADRO (SUELOS DUROS), Y (D) BARRENOS PARA SUELOS CON ROCOSIDAD

Sonda cónica con depósito

En la Figura 4.11 se observan los detalles de este tipo de muestreador. Es muy utilizado para la toma de muestras para análisis químico del horizonte superficial. Consta de un caño ligeramente cónico lo que facilita la introducción en la tierra friable que se continúa con un depósito donde se van acumulando las muestras a medida que se van obteniendo. En suelos compactos el diseño puede dificultar la inserción del instrumento, mientras que en suelos sueltos presenta las mismas dificultades que la sonda de tubo.

El balde sirve de tope para uniformar la introducción, ventaja que se constituye en una limitación si se desea cambiar de profundidad de la toma de muestras o fraccionar cada extracción en dos o más partes. El traslado debe hacerse con cuidado para evitar que la tierra caiga del aparato, cuyo peso va en aumento durante la operación.

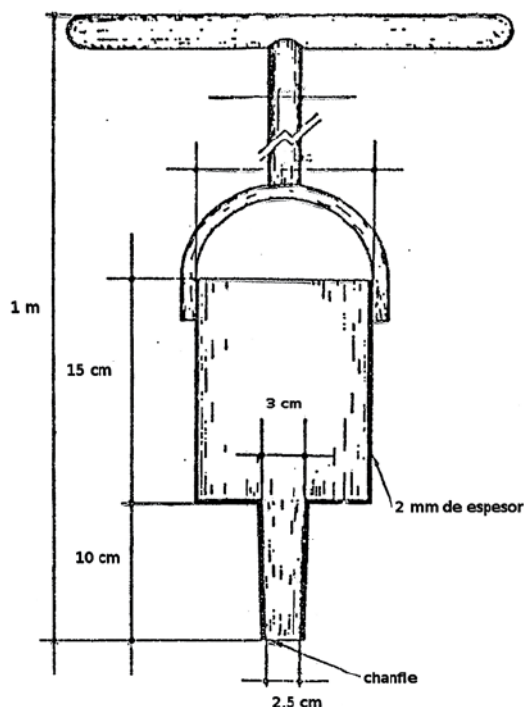


FIGURA 4.11. DISEÑO ESQUEMÁTICO DE UN MUESTREADOR TIPO SONDA CÓNICA CON BALDE

Muestras no desmenuzadas: cilindros

Las muestras no desmenuzadas, para la determinación de propiedades físicas, se obtienen utilizando cilindros metálicos, especialmente diseñados, de volumen conocido según objetivo del muestreo. Por lo general los cilindros son provistos por el laboratorio y que, debido a la complejidad del proceso, es aconsejable que lo efectúe personal idóneo.

Procedimiento

En cada sitio se alisa (sin comprimir) la superficie y se introduce el cilindro, evitando que haya desplazamientos laterales (Si ocurre deberá desecharse la muestra y reiniciar la extracción en un sitio vecino). Para introducir el cilindro se utiliza una maza o martillo grande, intercalando una madera de 3-5 cm de espesor, deteniendo de inmediato los golpes cuando el cilindro se

halla colmado de tierra: de continuar el contenido se comprimirá, falseando la información que se espera obtener. Puede utilizarse un dispositivo especial (Camisa) que contiene al cilindro y recibe los golpes, según se observa en la Figura 4.12b. Presenta las siguientes ventajas: (I) elimina la necesidad de disponer del anillo superior del cilindro (Figura 4.12a), ya que al extraer la muestra se lo saca cuidadosamente y se corta con un cuchillo la parte superior de la muestra que pudo haberse comprimido levemente; (II) evita el peligro de comprimir la muestra con los golpes y, por lo tanto, repetir extracciones mal realizadas por este motivo.

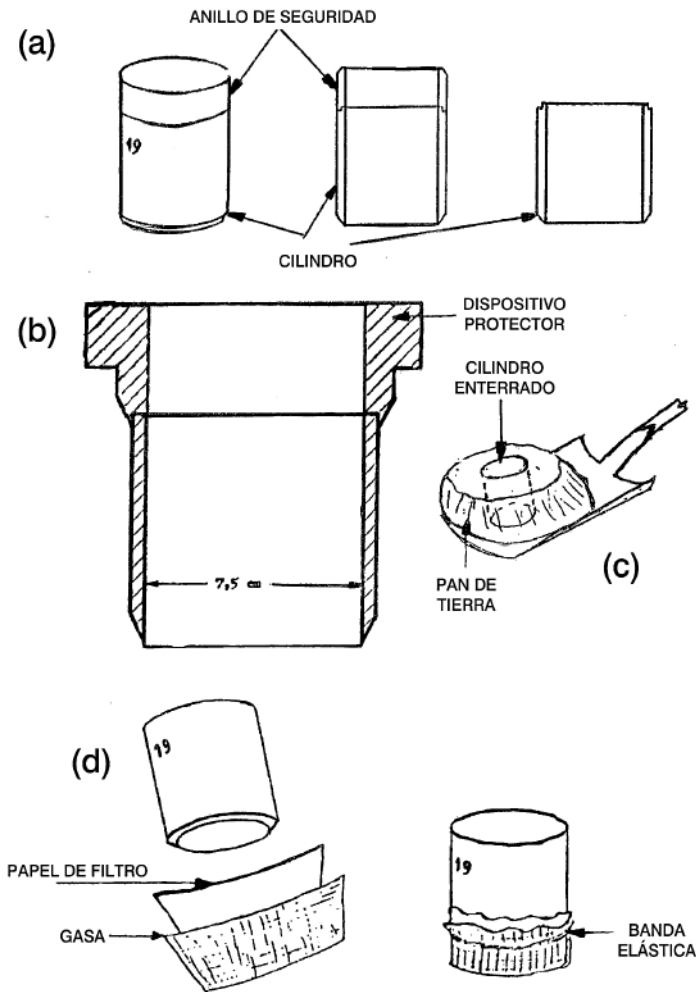


FIGURA 4.12. (A) DETALLE DE LOS CILINDROS UTILIZADOS PARA LA OBTENCIÓN DE MUESTRAS INALTERADAS. (B) DISPOSITIVO PROTECTOR PARA EVITAR COMPACTACIÓN POR GOLPES AL INTRODUCIR EL CILINDRO EN EL SUELO. (C) EXTRACCIÓN DEL CILINDRO MEDIANTE EL USO DE PALA. (D) ENRASADO Y ACONDICIONAMIENTO DE LA MUESTRA PARA TRANSPORTAR AL LABORATORIO. (TOMADO DE: ORELLANA; 1988)

Una vez efectuada la operación de introducir el cilindro, este se extrae utilizando una pala de puntar, tomando una importante fracción de tierra circundante para no dañar el cilindro y evitar pérdidas de la muestra (Figura 4.12c).

Puede utilizarse un dispositivo especial para golpear como el que se observa en la Figura 4.13 en reemplazo del martillo y la madera. Presenta ventajas: (i) elimina la necesidad de disponer del anillo superior del cilindro, ya que al extraer la muestra se lo saca cuidadosamente y se corta con un cuchillo la parte superior de la muestra que pudo haberse comprimido levemente; (ii) evita el peligro de comprimir la muestra con los golpes y, por lo tanto, repetir extracciones mal realizadas por este motivo.

Este instrumento extractor permite incorporar la camisa y cilindro en el suelo por efecto de una pesa que se desplaza por un vástago, el cual también permite sacar, directamente, camisa con cilindro conteniendo la muestra de tierra. Se separa el cilindro de la camisa manualmente y luego se enrasa. (Figura 4.13).



FIGURA 4.13. EQUIPO PARA EXTRAER MUESTRAS NO DESMENUZADAS DENTRO DE CILINDROS. SE APRECIA LA VARA CON PESA PARA GOLPEAR E INSERTAR EN EL SUELO LA CAMISA CON FILO QUE CONTIENE Y PROTEGE EL CILINDRO DONDE SE ALOJA EL SUELO SIN MODIFICAR SU ESTRUCTURA

Identificación de muestras no desmenuzadas y desmenuzadas

La experiencia indica que nunca está demás el énfasis que se ponga en esta etapa para que se tomen todos los recaudos, cuando se toman muestras a distintas profundidades y en distintos lotes. Las bolsas, en los cuales se colectan las muestras en el terreno y los envases definitivos, que se envían al laboratorio puede ser la misma bolsa), deberán estar claramente rotulados, indicando el lote al cual pertenecen y su profundidad, pudiendo agregarse algún tipo de indicación como el manejo implementado. En la Figura 4.14 se muestra un ejemplo de rotulación para los recipientes (cajas, bolsas, frascos o cilindros) en los que se enviarán las muestras de suelo. Además, en hoja aparte se indica qué cultivo se implantará, expectativa de rendimiento; cultivo

antecesor, rendimiento y si se aplicó fertilizantes y/o enmiendas. Las determinaciones que se solicitan pueden ir en el rótulo o también en hoja aparte.

Muestra Nº	Campo/Establecimiento		Fecha de muestreo
Lote	Sector	Superficie	Profundidad
Determinaciones solicitadas			

FIGURA 4.14. EJEMPLO DE TARIJETA O RÓTULO DE IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Acondicionamiento y envío al laboratorio de muestras desmenuzadas

Una vez terminado el muestreo, el material obtenido en cada bolsa debe acondicionarse e identificarse previamente a su envío al laboratorio.

Acondicionamiento

I. Desmenuzamiento

El material de las submuestras debe reunirse y desmenuzarse en trozos no mayores a 1–2 cm, mezclándolos bien y eliminando el material orgánico grosero (trozos de raíces, rastrojo, etc.).

II. Secado

Si las muestras no son remitidas inmediatamente al laboratorio, es necesario detener todo tipo de actividad biológica para evitar la sobreestimación de la dotación de algunos nutrientes. Aquí caben dos caminos posibles: El uno, poner en la heladera (2º a 4º C) las muestras —análisis Nitratos— y mantener la cadena de frío hasta su ingreso al laboratorio. El otro, incluye al resto de analitos debiendo extender el material sobre una superficie limpia e impermeable, dejando secar al aire y a la sombra por 2 a 4 días según textura y época del año. Esta operación se obvia si en las siguientes 4 a 6 horas al muestreo ingresan al laboratorio.

III. Reducción o cuarteo (a campo o laboratorio)

Dado que generalmente se obtiene un volumen de muestra mayor al que se debe enviar al laboratorio, se recomienda, una vez secado el material, reducirlo hasta llegar al peso requerido (generalmente 1 kg) siguiendo el procedimiento de la Figura 4.15: consiste en colocar el material desmenuzado y seco sobre una lona o plástico y mezclar tirando de las esquinas opuestas, alternando las diagonales. Luego dividir en 4 partes, de las cuales se guarda 1, volver a mezclar y repetir el cuarteo hasta llegar al tamaño final requerido. Embolsar o poner en frasco e identificar.

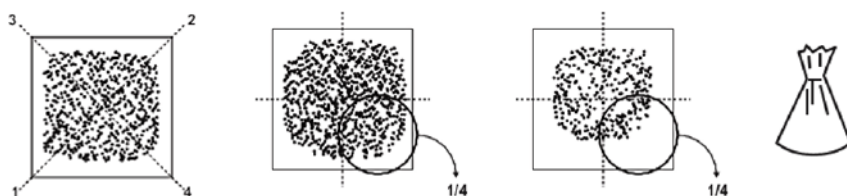


FIGURA 4.15. ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO DE REDUCCIÓN DE MUESTRAS POR CUARTEO. (TOMADO DE: BOLSA CEREALES ROSARIO; 2015)

Caso especial: nitratos

Si se necesita medir el contenido de Nitratos ($N-NO_3$), una vez extraída la muestra y acondicionada debe enviarse inmediatamente al laboratorio. Es indispensable que esta determinación se efectúe antes de transcurrido las 48 horas. Cuando la temperatura ambiente supera los 20 °C es necesario asegurar la refrigeración de la muestra desde el momento posterior al desmenuzamiento hasta la recepción en el laboratorio. Para ello suelen utilizarse conservadoras con hielo seco, o bien con hielo común adecuadamente resguardado para evitar el humedecimiento de la muestra y borrado de etiquetas. Es conveniente rotular con lápiz —el grafito es hidrófobo.

Acondicionamiento de muestras no desmenuzadas

Cuidadosamente se toma el pan de tierra que rodea al cilindro y con un cuchillo filoso, de hoja delgada y ancha, se la desprende liberándolo; en el caso de usar el muestreador integral se separa el cilindro de la camisa manualmente y en ambos casos se enrasan sus extremos opuestos, cuidando que todo el volumen del cilindro esté perfectamente lleno. En caso de perderse parte del contenido quedará inutilizada la muestra y será necesario repetir la extracción.

Una vez enrasado se coloca en su extremo inferior (extremo con el filo del cilindro o si proviene de una camisa, el que auspició de mayor profundidad en el estrato muestreado) un papel de filtro de 10 x 10 cm y sobre él una gasa de 11 x 11 cm o directamente una tela voile de 11 x 11 cm sin papel y luego con la ayuda de una banda elástica se sostiene adheridas al cilindro (ver Figura 4.12d). A continuación se deposita en un recipiente rígido para transportarlos, evitando los golpes, presiones y secado. Cada cilindro lleva impreso un número que se utilizará para identificar la muestra.

Caso de estudio: ejemplo de una toma de muestras

Se requiere saber el estado de fertilidad química de los lotes del siguiente establecimiento hipotético (Figura 4.16). Cada lote (I a VI) no supera las 30 ha.

Procedimiento

Con la ayuda de un croquis del campo a muestrear, elaborado a partir de información obtenida in situ y/o con ayuda de tecnología informática p.ej.: «google earth», mapas cartográficos y de suelos, detallando las partes que conforman cada lote (por topografía: loma, media loma y bajo; aguadas; áreas de suministro de alimentos y nocheros; etc.) se procede a dividir los lotes individualmente y descartar aquellas áreas no representativas (zonas rayadas de la Figura 4.15) De esta manera abordamos las situaciones de cada lote y seguimos adelante según corresponda:

En el lote I, la fertilización del cultivo anterior se realizó con 2 dosis de fertilizantes aplicadas en dos sectores bien definidos, por lo tanto se deberán tomar 2 muestras compuestas separadas ((1) y (2)).

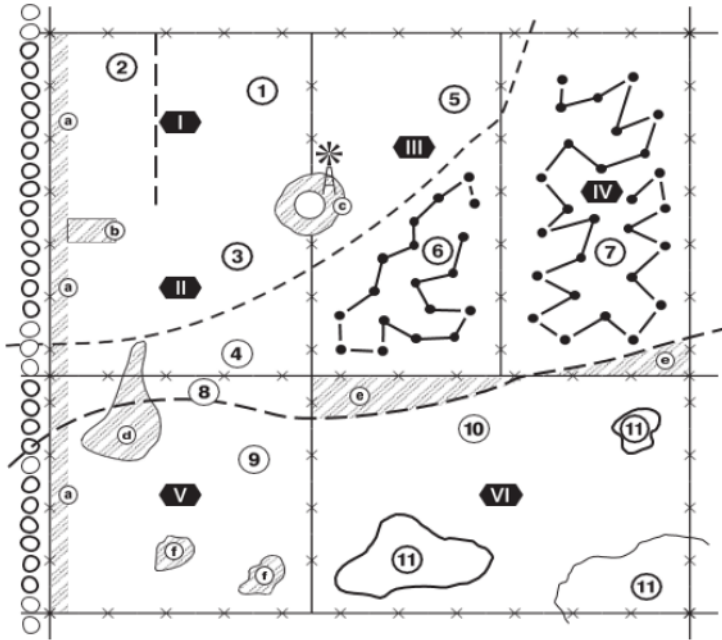
En los lotes II, III y V se toman 2 muestras por lote ((3), (4), (5), (6), (8), (9)) en función de la posición en el relieve (loma y media loma), descartando la influencia del silo, arboledas, áreas erosionadas, aguadas y microrelieves.

En cambio, en el lote IV, la proporción de loma y bajo no son representativas, por lo tanto deben descartarse (e) y solo tomar una muestra compuesta (7). Finalmente, en el lote VI se toman 2 muestras compuestas ((10), (11)) correspondientes a la situación que domina el lote (muestra (10)) y a los «manchones» de suelo ya que superan el 20 % de la superficie del lote (muestra (11)).

En todos los casos, como se indica en las muestras (6) y (7), el terreno se debe recorrer en forma de zig-zag tomando las submuestras al azar —para constituir la muestra compuesta— pero respetando una distancia mínima entre ellas de 30 metros (40 pasos) y la profundidad prevista para los análisis requeridos, cuidando no mezclar horizontes.

Luego de obtenidas las muestras, deben ser identificadas y acondicionadas. Cada muestra, separadamente, es mezclada y desmenuzada hasta obtener agregados (terrones) de 1–2 cm. Se dejan secar y se procede a la reducción para lograr muestras de 1 kg.

Cada muestra se rotula indicando la fecha de muestreo, establecimiento, lote y sector, profundidad, número de muestra, fertilización recibida y las determinaciones que se desean realizar. Finalmente se envían al laboratorio.



REFERENCIAS

—x—x—	Límite de los potreros (alambrados)	(a)	Influencia de la arboleda perimetral
●—●—●	Recorrida y Puntos de Muestreo	(b)	Parva o Silo
(1) (11)	Número de Muestras compuestas	(c)	Influencia de la aguada
////	Áreas No Muestreadas	(d)	Área erosionada y de acumulación de material no representativa
I ... VI	Número de Lote	(e)	Superficie no representativa del lote (< 20% del total)
		(f)	Microrrelieves (lagunas)

FIGURA 4.16. CROQUIS DE UN CAMPO HIPOTÉTICO DONDE SE TOMARÁN LAS MUESTRAS

Resumen sobre obtención de muestras compuestas de suelos desmenuzadas (análisis químico)

Para que la muestra sea representativa y se minimicen los errores se debe:

1. **División del lote:** Se tomará una muestra por cada lote, como mínimo, siempre que la superficie en cuestión sea homogénea y no muy extensa (no superior a 30–50 ha).

Un lote es homogéneo cuando no presenta alguno de los siguientes rasgos:

- Diferencias topográficas o de relieve (lomas, pendientes, bajos).
- Manchones de distinta coloración (presencia de sales en superficie, etc.).
- Áreas con microrrelieves naturales, como tacurúes y micro depresiones.
- Superficies del lote con distinto antecedente cultural. Esto abarca zonas (bandas) fertilizadas con distintas dosis, diferentes labranzas o cultivo antecesor, etc.
- Diferencias en la vegetación natural o en el crecimiento de algún cultivo puede indicar áreas no homogéneas, no detectables de otro modo.
- Si se dispone de Cartas de Suelos: ubicar el lote y observar si hay unidades cartográficas de suelos dentro de él que tengan un IP (Índice de Productividad) que difieran en más de 20 puntos. Si esto ocurre, muestrear los sectores por separado si cada uno supera el 20 % de la superficie del lote; si no muestrear solo el sector que contiene el que predomina. Se recuerda que el IP es una clasificación de la aptitud de los suelos que varía en una escala de 0 a 100.

Cuando un lote no sea homogéneo se tomará una muestra compuesta por cada tipo de irregularidad observada, siempre que abarque más del 20 % de la superficie.

Si es homogéneo pero su extensión supere las 30–40 has. se recomienda dividirlo en fracciones no mayores que dicha superficie.

2. **Modo de recorrer el terreno:** Recorrer el terreno correspondiente a cada sector homogéneo marchando en zig-zag y deteniéndose para efectuar extracciones en cada vértice del recorrido. Entre cada punto de muestreo debe haber una distancia mínima de 30 metros (entre 40 y 50 pasos). Evitar los sitios obviamente aberrantes, por ejemplo, con restos orgánicos no representativos: excrementos animales o acumulaciones de restos vegetales; sedimentos anormales, hormigueos; pequeñas manchas salinas o erosionadas; huellas de animales o maquinarias; proximidades de dormideros de animales; aguadas; árboles y en general cabeceras.
3. **Profundidad de muestreo:** Tomar las muestras con calador siempre a la misma profundidad. Por lo general se recomienda muestrear todo el espesor que está por encima del estrato más arcilloso; frecuentemente entre 20 y 40 cm. Si en es espesor hay más de un horizonte, muestrear por separado.
4. **Número de extracciones:** Se realizarán 30 extracciones (submuestras) depositándolas todas en la misma bolsa. Así se tendrá poco más de 1kg de muestra en total (aproximadamente).
5. **Instrumentos usados para la extracción de muestras:** Debe descartarse la pala como instrumento para efectuar la operación, reemplazándola

por sondas o caladores. Con ellas cada punto sondeado contribuye con igual volumen de tierra a la composición total, lo que difícilmente se logre con una pala. Además, cada cilindro provisto por estos aparatos aporta tramos de idéntico espesor para todos los puntos de la profundidad sondeada. De este modo se obtendrán muestras compuestas representativas de cada sector.

Las sondas más usadas se mostraron anteriormente. La segunda de ellas se caracteriza por presentar una abertura longitudinal que permite extraer el material con los dedos o, si se adhiere al metal, con ayuda de un destornillador, cortaplumas, cuchillo o adminículo diseñado para tal fin. De este modo se transfiere a un recipiente (bolsa plástica, balde, etc.) en la cual se reúne con la tierra procedente de los distintos sondeos.

Este calador o sonda tiene la ventaja de poder ser usado para tomar muestras a diferentes profundidades, por lo cual cuando —como en el caso que nos ocupa— el trabajo debe hacerse a espesores constantes, conviene practicar una marca o pegar una tela adhesiva en las sondas, señalando la línea hasta la cual debe introducirse en el terreno. Este aparato debe clavarse siempre con presión vertical, sin girar, ya que la zona debilitada por la muesca puede torcerse. Otra ventaja de este instrumento radica en que la boca presenta un ensanchamiento exterior, el cual evita el rozamiento del resto de la sonda con las paredes de la perforación —disminuyendo el esfuerzo necesario para introducirlo— y una abertura ligeramente inferior al diámetro del resto del tubo, lo cual permite el desplazamiento fácil del cilindro de tierra y su posterior extracción.

6. **Acondicionamiento de la muestra:** Una vez terminado el recorrido, las bolsas contendrán —según el estado hídrico del terreno— entre 1 a 2 kg de tierra. El contenido de cada una de estas bolsas debe fraccionarse a mano en trozos pequeños no mayores de 1 a 2 cm de longitud. Este material —envasado en bolsas plásticas— constituirá la muestra definitiva para enviar al laboratorio. Si se desea determinar nitratos debe dársele un trato especial, como se indicó anteriormente.
7. **Secado:** Las muestras se dejan secar al aire y a la sombra, extendiéndolas sobre una superficie limpia e impermeable, durante 3 a 7 días. La operación de secado puede obviarse si se envían las muestras inmediatamente al laboratorio, es decir, en un lapso que no supere a los dos días.
8. **Individualización de las muestras:** La experiencia indica que nunca es suficiente el énfasis que se ponga en esta etapa para que se tomen todos los recaudos, especialmente cuando se toman muestras a distintas profundidades y en distintos lotes.

Las bolsas en las cuales se colectan las muestras en el terreno y los envases definitivos que se envían al laboratorio (puede ser la misma bolsa) deberán estar claramente rotulados, indicando el lote al cual pertenecen y su profundidad.

9. **Casos especiales.** Nitratos: Una vez extraída y acondicionada la muestra debe enviarse inmediatamente al laboratorio. Es indispensable que esta determinación se efectúe antes de transcurrido las 48 horas del momento en que se toma la muestra. Cuando la temperatura ambiente supera los 20 grados Celsius es necesario asegurar la refrigeración de la muestra desde el momento posterior al desmenuzamiento hasta la recepción en el laboratorio. Para ello suelen utilizarse conservadoras con hielo seco, o bien con hielo común adecuadamente resguardado para evitar el humedecimiento de la muestra y borrado de etiquetas.

Muestras no desmenuzadas: densidad del suelo

Aquí también se respetan las pautas establecidas en el caso general para la división del lote, recorrido y humedad del suelo en el momento de tomar las muestras, pero esto se hará en cilindros metálicos especialmente diseñados, como se mostró anteriormente, de volumen conocido. Por lo general, los cilindros son provistos por el laboratorio y, debido a la complejidad y cuidado que es necesario poner para realizar el muestreo, es aconsejable que lo efectúe personal experimentado.

El número de estaciones de muestreo no debe ser inferior a 10 a 15 obteniéndose —en cada una— tres cilindros de cada profundidad. En cada sitio se alisa (sin comprimir) la superficie y se introduce el cilindro, evitando que ocurran movimientos laterales (en caso de ocurrir se desecha la muestra y se inicia la extracción nuevamente en un sitio vecino). Para introducir el cilindro se utiliza una maza o martillo grande, intercalando una madera de 3–5 cm de espesor, deteniendo de inmediato los golpes cuando el cilindro se halla colmado de tierra: de continuar golpeando se comprimiría el contenido, falseando la información que se espera obtener.

Una vez efectuada la operación de introducir el cilindro, este se extrae utilizando una pala de puntear, tomando una importante fracción de tierra circundante para no dañar el cilindro y evitar pérdidas de la muestra. Luego, cuidadosamente, se toma el pan de tierra contenido en el cilindro y con un cuchillo filoso, de hoja delgada y ancha, se desprende la tierra en torno al cilindro y se enrasan las superficies expuestas, cuidando que todo el volumen del molde esté perfectamente lleno. En caso de perderse parte del contenido queda inutilizada la muestra y es necesario repetir la extracción.

Una vez enrasada se pone en su parte inferior (donde se halla el filo del cilindro) un papel de filtro de 10 x 10 cm y sobre él una gasa de 11 x 11 cm aprisionándola con una banda elástica.

Luego se deposita en un cajón para transportarla, evitando los golpes, presiones y secado.

Cada cilindro lleva impreso un número que se utilizará para identificar la muestra.

Cuestionario para guiar el estudio

¿Cuáles son las principales fuentes de variabilidad de los análisis químicos de un suelo?

¿Sobre cuál puede actuar? ¿Cómo?

¿Qué relación existe entre la extensión que alcanzan las raíces de las plantas y la toma de muestras compuestas de suelo?

¿Cuáles son los requisitos para que una muestra de suelo compuesta sea válida y representativa?

¿Cuántas muestras individuales de suelo deben componerse para reducir la variabilidad de la muestra compuesta?

¿Cuáles son los principales instrumentos que se utilizan para la toma de muestras desmenuzadas y no desmenuzadas?

¿Con qué criterios se puede dividir el terreno para reducir la variabilidad al momento de tomar la muestra de suelo?

¿Por qué es importante el acondicionamiento e identificación de las muestras?

¿Con que fin es conveniente secar o congelar las muestras si no se enviarán de inmediato al laboratorio?

¿Cuáles son los sitios que nunca deben ser incluidos en un muestreo para caracterizar el nivel de fertilidad de un lote?

¿Qué relación existe entre la variabilidad de una propiedad edáfica y número de muestras que deben tomarse para caracterizar su valor medio con un determinado margen de error?

Pasos para tomar una muestra compuesta representativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALESSO, C.A. Y PILATTI, M.A. (2008). Variabilidad espacial de la densidad del suelo, fósforo extractable y potasio intercambiable. Actas XXI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, San Luis, Argentina. 6 pp.
- ALVAREZ, R., H. STEINBACH, B. BAUSCHEN, J. ENJALBERT (2008). ¿Cuántas submuestras de suelo hay que tomar para caracterizar la fertilidad de un lote en la pampa ondulada? *Informaciones Agronómicas*, 37:17–19.
- BORG H. Y D.W. GRIMES (1986). Depth development of roots with time: An empirical description. *Transactions of the ASAE*, 29 (1): 194–197.
- CLINE, M.G., 1994. PRINCIPLES OF SOIL SAMPLING. *SOIL SCI.*, 58:275–288.
- CONTI, M. (2005). Toma de muestra de suelo. En: Marbán, L. y Ratto, S. (Eds.). *Tecnologías en análisis de suelos*, 1ª Edición, Asoc. Argentina de la Ciencia del Suelo. pp 55–63.
- JACKSON, M.L. (1960). Análisis químico de suelos. Barcelona: Omega, 662 pp.
- MULLA D.J. Y A.B. MCBRATNEY (2000). Soil spatial variability (pp. 321–352). En: Sumner, M.E. (Ed.). *Handbook of soil science*. CRC Press, Boca Raton.
- ORELLANA J.A. DE (1987). *Heterogeneidad edáfica y precisión del análisis de suelos*. Comunic. FAVE, C-001-AD-001, 8 pp.
- PETERSEN, R.G. Y L.D. CALVIN (1986). Sampling. En: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part 1, 2ª Edición. *Agronomy* 9, (1): 33–51.
- PILATTI M.A. Y ORELLANA J.A. DE (1987). *Instrucciones para tomar muestras de suelos*. Comunic. FAVE, C-002-AD-002, 10 pp.
- PILATTI, M.A. Y GRENÓN, D.A. (1995). *La profundidad enraizable de los suelos. Su estimación a partir de información edáfica*. Comunic. FAVE C-003; AD-003, 29 pp.
- PILATTI, M.A. Y ORELLANA, J.A. DE (1994). *Instrucciones para tomar muestras de suelos*. 2ª Edición, Comunic. FAVE, C-002-AD-002, 11 pp.
- ROBERTS, T.L. Y J.L. HENRY (1999). El muestreo de suelos: los beneficios de un buen trabajo. *Informaciones Agronómicas*, 42:4–13.
- TRANGMAR, B.B., YOST, R.S. Y UEHARA, G. (1985). Application of geostatistics to spatial Studies of soil properties. *Advances in Agronomy* 38: 45–94.
- WILDING, L.P. (1985). Spatial variability: Its documentation, accomodation and implications to soil surveys, p. 166–189. En: Nielsen, D.R. and Bouma, J. (Eds.). *Soil Spatial Variability*. Proc. Workshop, SSS and SSSA, Las Vegas, 30 Nov.–1 Dec. 1984, Wageningen, Netherlands.

PARTE 2. **DATOS DEL PERFIL EDÁFICO: CONTROL DE SU COHERENCIA**

MIGUEL PILATTI, OSVALDO FELLI Y GABRIEL QUAINO

Los Ingenieros Agrónomos se encuentran habitualmente con información de suelos proveniente de diferentes fuentes. Es necesario que antes de usarla para diagnosticar o clasificar un suelo, realizar un análisis crítico puesto que puede contener errores dando origen a conclusiones falsas y malas interpretaciones.

Los errores no siempre provienen de la toma de muestras o del análisis, sino — simplemente— por errores de tipeo.

El objetivo de esta aplicación es ejercitar al alumno en el análisis crítico de la información edafológica. Para la evaluación de la calidad de los datos contenidos en una planilla se deberán examinar los siguientes aspectos:

1. Secuencia de horizontes y granulometría
2. Relación Carbono/Nitrógeno
3. Salinidad
4. Capacidad de intercambio catiónico
5. Reacción del suelo
6. Estructura

En caso de encontrar incoherencias en los datos proceda así:

1. Enumere el dato que considere erróneo
2. Explique por qué considera que hay una anomalía.
3. Verifique si los datos contenidos en cada columna son característicos del horizonte que describen.
4. Si los datos de una columna no corresponden con el horizonte en cuestión el horizonte deberá ser renombrado.

En el Apéndice se ofrecen planillas con datos de perfiles para ejercitación

4.1. SECUENCIA DE HORIZONTES Y GRANULOMETRÍA

Debe tener en cuenta que:

- a) Si el perfil con el que se trabaja no está descrito con la nomenclatura actual, se debe traducir a ella. (Cuadro 4.6)
- b) La secuencia de horizontes sea lógica.

- c) La sumatoria de arena, limo y arcilla de cada horizonte debe dar 100 %
- d) Los contenidos de arcilla y arena del horizonte A son parecidos a los del C.
- e) El horizonte E es el horizonte que posee menos arcilla y más arena por ser un horizonte eluvial.
- f) Los horizontes BA o Bt (iluviales) son los que contienen los mayores porcentajes de arcillas del perfil y por consiguiente.

CUADRO 4.6. NOMENCLATURA ANTERIOR Y EN VIGENCIA DE LOS HORIZONTES EDÁFICOS

	Anterior ↓	↓ Actual	
ELUVIALES	O1	Oi	Sin degradar. Orgánicos.
	O2	Oe	Biodegradado. No se inundan
		Oa	Orgánico. Frecuentemente inundado
	A1	A	Horizonte Mineral (Mo < 20-30 %). No arado o laboreado
	Ap	Ap	Idem arado o laboreado
	A2	E	Horizonte de máxima eluviación
Transicionales graduales	A3	AB	Más parecido al A
	AB	AB	Más parecido a ninguno
	B1	BA	Más parecido al B
Mezclas de transición		A/B B/A	
ILUVIALES	B2	B	Se agrega t, h o s según se trate de arcilla, humus o sesquióxidos iluviales. Ej.: Bt, Bh, Bs Posteriormente se los subdivide agregando números arábigos: Ej.: Bt1, Bt2, Bt3
Transicionales entre B y C	B3	BC	
Si no hay B, entre A y C	A3	AC	
Material de origen no consolidado	C	C	Material de origen poco modificado
Material de origen consolidado o roca consolidada	R	R	

Las capas sedimentarias se denominan 1, 2, 3, 4, etc. Antes: I, II, III, IV, etc.

Uso de los subíndices: Antes, A11, A12, A13. Ahora, A1, A2, A3.

Antes, B21t, B22t. Ahora, Bt1, Bt2.

Ejercicio 1: Analice los siguientes datos e identifique incoherencias:

Horizonte	A1	B2t	A2	C1
Arcilla %	20	25	40	20
Limo %	73	65	42	77
Arena %	7	10	18	3
co3Ca	0	0	3	2

4.2. RELACIÓN CARBONO / NITRÓGENO

La relación carbono: nitrógeno decrece con el aumento de la profundidad. Los valores más comunes de la relación carbono nitrógeno para suelos de la Región son:

Horizonte	Relación C/N
A1	10 - 12
A2	10 - 9,5
E	8
BA	8 - 8,5
B	7 - 8
BC	6
C	4 - 5

Ejercicio 2: Compruebe si la relación C/N es coherente. ¿Cuál puede ser erróneo?

Horizonte	A	E	Bt	C
C g/100g	2,20	1,60	1,00	0,80
N g/100g	0,22	0,20	0,125	0,11

4.3. SALINIDAD

Al observar los datos de una planilla puede suceder que para cada horizonte se detecte o no la presencia de sales. Para detectar si el horizonte es salino se tienen en cuenta tres parámetros:

1. Conductividad eléctrica: si es mayor a 4 dS/m indica que el suelo es salino
2. Resistencia de la pasta de saturación: si es menor a 1000 ohms indica presencia de sales

Si se cuenta con el análisis de la salinidad discriminada (valoración de cationes y aniones solubles expresada en mmolc/L) debe cumplirse que sus sumatorias sean iguales. Estas sumatorias permiten definir si la cees hallada es correcta ya que se relacionan del siguiente modo:

$$CE \times 10 = \Sigma \text{ aniones } \text{ ó } \text{ cationes mmol}_c/\text{L}$$

Estas relaciones pueden no cumplirse cuando el suelo tiene yeso (es común hallarlo cuando el Ca^{++} soluble es mayor a 12 mmolc/L) lo cual se comprueba agregando acetona al extracto de saturación; si la mezcla se enturbia se ratifica su presencia.

En la mayoría de los casos —en que la freática no está cerca de la superficie— los horizontes superficiales no son salinos, donde más hay sales es en los horizontes B (zonas de migraciones descendentes). Inversamente, cuando está cerca de la superficie el horizonte superficial es el que más sales tiene, ya que asciende por capilaridad junto con el agua y luego ésta se evapora dejando las sales en la superficie.

Ejercicio 3. Composición del extracto de saturación del suelo: corroborar coherencia con la conductividad eléctrica

Horizonte	A	E	Bt	C
Resistencia (ohms)	2000	6000	400	800
cees (dS/m)	0,1	0,6	0,4	8
Cl^- mmolc/L	0,1	2,8	25,0	38
so_4^{4-} mmolc/L	0,6	3,0	12,0	30,0
co_3^{3-} mmolc/L	0,2	0,1	2,0	6,0
co_3H^- mmolc/L	0,1	0,1	1,0	6,0
Ca^{++} mmolc/L	0,1	0,5	6,8	60,0
Mg^{++} mmolc/L	0,2	1,0	5,0	18,9
Na^+ mmolc/L	0,6	4,4	28,0	1,0
K^+ mmolc/L	0,1	0,1	0,2	0,1

4.4. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

Comparar Tsuma y Tanalítico: admitir una diferencia de hasta 15 %.

Atención: el Tteórico se calcula solo cuando hay grandes discrepancias entre el Tanalítico o CIC (Capacidad de Intercambio Cationico) y el Tsuma.

Tteórico: resulta de calcular la CIC en base a la cantidad de arcilla y carbono presente en cada horizonte.

Se asume para los suelos de la región pampeana que la CIC de la arcilla es de 40 cmol_c/kg.

Aporte a la CIC debido a la arcilla para el horizonte A en el Ejercicio 4 es:

$$40 \text{ cmolc/kg} = 40 \text{ cmolc}/1000\text{g} = 0,04 \text{ cmolc/g}$$

Como la cantidad de arcilla del horizonte es 20 % ó 200g/kg, la CIC debido al aporte de cargas de las arcillas será 8 cmol_c/kg.

Aporte a la CIC debido al C, es función del pH y se calcula así:

$$\text{CIC cmol}_c / \text{kg C} = -672 + (151 \times \text{pH}) \dots \text{ para pH entre 5 y 9}$$

El C (carbono orgánico) del horizonte A aportará:

$$\begin{aligned} \text{CIC cmol}_c / \text{kg C} &= -672 + (151 \times 6,2) = 264,2 \text{ cmol}_c / \text{kg} \\ 264,2 \text{ cmol}_c / \text{kg} &= 264,2 \text{ cmol}_c / 1000\text{g} = 0,2642 \text{ cmol}_c / \text{g} \end{aligned}$$

Al haber 2,2 g de carbono por 100g o 22g/kg en el horizonte el aporte es de:

$$22 \times 0,2642 = 5,8 \text{ cmol}_c / \text{kg}$$

Para nuestro ejemplo, el Tteórico, es 8 + 5,8 = 13,8 cmol_c/ kg; la suma del aporte de la arcilla y el C.

→ Tsuma: es la sumatoria de Ca⁺⁺; Mg⁺⁺; Na⁺, K⁺ y H⁺; en nuestro caso es igual a 13,1 cmolc/kg.

→Tanalítico: es un resultado analítico que se realiza para corroborar los datos anteriores y que en nuestro caso es 14,2 cmol_c/ kg.

Como la diferencia entre ambos es menor al ± 15 % se los considera correcto:

$$(13,1 - 14,2) / 14,2 \times 100 = -7,7 \%$$

La CIC total es, entonces, el valor de Tsuma. En base a ello se calcula el porcentaje de Na intercambiable y el de protones de intercambio.

Ejercicio 4

Horizonte	A1	A2	Bt	C
Ca ⁺⁺ cmolc/kg	5,0	3,5	15	0,8
Mg ⁺⁺ cmolc/kg	1,0	1,0	3,2	1,5
Na ⁺ cmolc/kg	1,0	0,5	4,0	0,4
K ⁺ cmolc/kg	1,1	0,5	1,0	1,4
H ⁺ cmolc/kg	5,0	6,0	0	0
Tanalítico cmolc/kg	14,2	15,5	19,8	10,5
pH Agua 1:2,5	6,2	5,7	7,8	8,4
pH Cl K	5,7	5,1	7,5	8,3
Arcilla (%)	20	15	40	20
C (%)	2,2	1,6	0,6	0,5

cic arcilla: 40 cmolc/kg

4.5. REACCIÓN DEL SUELO

Se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos para saber si el horizonte es alcalino, neutro o ácido:

1. Sumatoria de CO_3^{2-} y CO_3H^- solubles: si supera los 10 mmolc/L indica pH básico, de lo contrario el pH es ácido.
2. Porcentaje de Na intercambiable: si hay más del 15 % de Na intercambiable el pH suele ser alcalino por estar acompañado por el anión CO_3H^- .
3. Porcentaje de H⁺ de intercambio: mayor al 10 % de H⁺ de intercambio el pH es *ácido*. Además,
 - pH en H₂O y Cl K: La diferencia entre pH en H₂O y pH en Cl K por lo general no es mayor a 1,5. El pH en Cl K siempre es menor o igual que el pH en H₂O. Ambos indican acidez o basicidad si son menores o mayores a 7 respectivamente
 - Presencia de CO_3Ca : cuando está presente en el horizonte analizado el pH es mayor o igual a 8,3. En el horizonte A no es común que haya CO_3Ca ya que al haber una alta tensión de CO_2 el calcio migra como bicarbonato. Por otra parte, el horizonte E no contiene CO_3Ca ni sales solubles o bien están en cantidades despreciables.

Utilizar nuevamente el Ejercicio 4.

4.6. ESTRUCTURA

Finalmente se analiza si las estructuras se corresponden con los datos de granulometría y con el nombre que se dio al horizonte atendiendo a:

Horizonte	Estructura	Arcilla (%)
A	migajosa, granular, masiva, laminar, grano suelto (arena), se desechan prismas y bloques	Menos de 25
E AB BA	masiva bloque angulares y subangulares	30 a 40 25 a 35
B	prismas, columnas, bloques angulares y subangulares	Más de 35
BC C	bloques, prismas, difícilmente columnas masiva	Más de 35 Variable

Ejemplo 1

Horizonte	A	E	Bt	C
Arcilla %	20	25 [1]	40	20
Limo %	73	65	42	77
Arena %	7	10	18	3
co3Ca	0	0	1	5

[1] Se considera erróneo el dato de arcilla en el horizonte E porque debe ser menor que el horizonte A. Por esa razón se lo puede cambiar por 15 y se agrega o extrae del limo la diferencia, no de la arena.

Ejemplo 2

Horizonte	A	E	Bt	C
C g/100g	2,20	1,60	1,00	0,80
N g/100g	0,22	0,20	0,125	0,11 [2]

[2] Si observamos el ejemplo, la relación C/N (7,2) del horizonte C es muy alta en relación a los valores presentados como más comunes.

Ejemplo 3

Horizonte	A	E	Bt	C
Rel. 1:4 g %	0,20 [3]	1,30	0,20	0,05
Resistencia (ohms)	2000	6000	400	800
cEes (dS/m)	0,1	0,6	0,4	8
Cl ⁻ mmolc/L	0,1	2,8	25,0	38
so4 ²⁻ mmolc/L	0,6	3,0	12,0	30,0
co3 ²⁻ mmolc/L	0,2	0,1	2,0	6,0

continúa en página siguiente

Horizonte	A	E	Bt	C
co ₃ H ⁻ mmolc/L	0,1	0,1	1,0	6,0
Ca ⁺⁺ mmolc/L	0,1	0,5	6,8	60,0
Mg ⁺⁺ mmolc/L	0,2	1,0	5,0	18,9
Na ⁺ mmolc/L	0,6	4,4	28,0	1,0
K ⁺ mmolc/L	0,1	0,1	0,2	0,1

[3] Si se analiza el horizonte A el contenido de sales indica que es salino porque su concentración es mayor a 0,2 g %. Los datos de Resistencia y cEEs contrastan con el dato anterior. Al haber dos ítems que indican que el horizonte no es salino, se puede detectar un error en el dato de la Rel. 1:4. Para los horizontes restantes se procede de la misma manera.

Ejemplo 4

Horizonte [4]	A1 [5]	A2	B2t	C
Ca ⁺⁺ cmolc/kg	5,0	3,5	15	0,7 [8]
Mg ⁺⁺ cmolc/kg	1,0	1,0	3,2	1,5
Na ⁺ cmolc/kg	1,0	0,5	4,0 [7]	0,4
K ⁺ cmolc/kg	1,1	0,5	1,0	1,4
H ⁺ cmolc/kg	5,0	6,0	0	0
Tanalítico cmolc/kg	14,2	15,5 [6]	19,8	10,5
pH agua 1:2,5	6,2	5,7	7,8	8,4
pH Cl K	5,7	5,1	7,5	8,3
Arcilla (%)	20	15	40	20
C (%)	2,2	1,6	0,6	0,5

[4] Controlar secuencia de Horizontes y nomenclatura.

[5] Teniendo en cuenta que Tteórico, Tsuma y Tanalítico son equivalentes no se detecta error en el primer horizonte.

[6] En el horizonte E, el Tanalítico es muy elevado, posiblemente, error de análisis.

[7] En el horizonte Bt, el Tsuma es muy elevado, posiblemente, error de tipeo en el valor de Na (0,4). [8] En el horizonte C, el Tsuma es muy bajo, posiblemente, error de tipeo en el valor de Ca (7,0).

Además, posible error en el dato de Na intercambiable: debería ser más alto para estar acorde a los siguientes parámetros:

- Sumatoria de co₃ y co₃H⁻ solubles: es mayor a 10 indicando reacción básica: ver ítem 5 (Ejemplo 3).
- Porcentaje de Na intercambiable: es menor al 15 % indicando que no es alcalino.
- Porcentaje de H⁺ de intercambio: hay menos del 10 % indicando pH básico: ver ítem 5 (Ej. 3).
- pH en H₂O y CLK: La diferencia entre pH en agua y pH en cloruro de potasio es menor a 1,5.
- Presencia de co₃Ca (Ejemplo 1).

Apéndice: Planilla analítica de suelos #1 para analizar la coherencia de sus datos

Horizonte	A11	A12	A2	B21t	C
Arcilla %	20	19	15	40	20
Limo %	75	74	75	45	75
Arena %	5	7	10	15	5
co3Ca %	0	3	0	3	4
C g/100g	2,00	1,80	1,00	1,10	0,80
N g/100g	0,20	0,18	0,125	0,155	0,02

SALINIDAD

Resistencia (ohms)	150	1500	2000	400	100
cEes (dS/m)	0,05	0,10	0,50	4,00	1,00
Cl ⁻ mmolc/L	0,05	0,10	0,05	18	20
so4 ⁻ mmolc/L	0,30	0,60	0,30	10	60
co3 ⁻ mmolc/L	0,10	0,20	0,10	6	10
co3H ⁻ mmolc/L	0,05	0,10	0,05	6	10
Ca ⁺⁺ mmolc/L	0,05	0,10	0,05	5	20
Mg ⁺⁺ mmolc/L	0,10	0,20	0,10	15	30
Na ⁺ mmolc/L	0,30	0,60	0,30	15	40
K ⁺ mmolc/L	0,05	0,10	0,05	5	10

INTERCAMBIO

Ca ⁺⁺ cmolc/kg	5,0	4,5	3,5	8,5	4,0
Mg ⁺⁺ cmolc/kg	1,0	1,5	1,2	2,5	1,0
Na ⁺ cmolc/kg	0,1	1,0	1,5	10,5	4,0
K ⁺ cmolc/kg	1,9	1,5	1,0	2,0	1,0
H ⁺ cmolc/kg	10,0	4,0	2,0	0	0
Tanalítico	19,0	12,0	10,0	23,5	11,0
pH H2O (1:2,5)	8,0	6,0	6,5	9,7	6,0
pH Cl K	5,0	5,9	6,0	6,5	9,0
Estructura	Laminar	Masiva	Prismas	Granular	Prismas

cic arcilla: 45 cmolc/kg

Apéndice: Planilla analítica de suelos #2 para analizar la coherencia de sus datos

Horizonte	E	A1	Bt	C
Arcilla %	20	25	40	35
Limo %	76	74	52	61
Arena %	4	1	8	4
co3Ca %	0	2	3	6
C g/100g	2,20	2,00	1,00	0,80
N g/100g	0,22	0,21	0,125	0,11
SALINIDAD				
Resistencia (ohms)	2000	600	400	800
cEes (dS/m)	0,1	0,60	0,40	8
Cl ⁻ mmolc/L	0,10	28,0	25,0	38,0
so4 ⁻ mmolc/L	0,60	30	12	40
co3 ⁻ mmolc/L	0,20	1,0	2,0	1,0
co3H ⁻ mmolc/L	0,1	1,0	1,0	1,0
Ca ⁺⁺ mmolc/L	0,1	4,9	6,8	60
Mg ⁺⁺ mmolc/L	0,2	10,0	5,0	18,9
Na ⁺ mmolc/L	0,60	45	28,0	1,0
K ⁺ mmolc/L	0,1	0,1	0,2	0,1
INTERCAMBIO				
Ca ⁺⁺ cmolc/kg	4,0	11,0	15,0	13,8
Mg ⁺⁺ cmolc/kg	1,0	2,0	2,6	3,4
Na ⁺ cmolc/kg	1,0	9,5	5,8	3,0
K ⁺ cmolc/kg	1,1	0,5	1,0	1,4
H ⁺ cmolc/kg	5,0	0	0	0
Tanalítico	14,5	23,0	24,0	19,5
pH H2O (1:2,5)	9,0	9,0	9,5	8,3
pH Cl K	4,5	8,5	9,0	8,0
Estructura	Laminar	Prismas	Granular	Prismas

cic arcilla: 50 cmolc/kg

Apéndice: Planilla analítica de suelos #3 para analizar la coherencia de sus datos

Horizonte	A1	E	B	C
Arcilla %	20	25	45	35
Limo %	70	69	52	61
Arena %	10	6	3	4
co3Ca %	0	0	0	3
C g/100g	2,20	2,00	1,00	0,08
N g/100g	0,22	0,21	0,125	0,11
SALINIDAD				
Resistencia (ohms)	100	6000	4000	8000
cEes (dS/m)	0,1	6	4	8
Cl ⁻ mmolc/L	0,10	28,0	15,0	38,0
so4 ⁻ mmolc/L	0,60	30	10,0	40
co3 ⁻ mmolc/L	0,20	1,0	10,0	1,0
co3H ⁻ mmolc/L	0,1	1,0	5,0	1,0
Ca ⁺⁺ mmolc/L	0,1	4,9	6,8	50
Mg ⁺⁺ mmolc/L	0,2	10,0	5,0	18,9
Na ⁺ mmolc/L	0,60	45	28,0	1,0
K ⁺ mmolc/L	0,1	0,1	0,2	0,1
INTERCAMBIO				
Ca ⁺⁺ cmolc/kg	5,5	10,0	16,0	12,0
Mg ⁺⁺ cmolc/kg	1,1	2,0	3,2	2,5
Na ⁺ cmolc/kg	1,0	1,5	6,8	0,1
K ⁺ cmolc/kg	1,1	0,5	1,0	0,6
H ⁺ cmolc/kg	4,0	0	0	0
Tanalítico	12,6	15,2	27,0	16,0
pH H2O (1:2,5)	9,0	9,0	9,5	8,3
pH Cl K	4,5	5,0	9,0	7,9
Estructura	0,200	0,150	0,010	0,300
Ca ⁺⁺ cmolc/kg	Granular	Bloques	Prismas	Prismas

cic arcilla: 50 cmolc/kg

Apéndice: Planilla analítica de suelos #4 para analizar la coherencia de sus datos

Horizonte	A1	A2	E	C	Bt
Arcilla %	20	19	15	40	20
Limo %	75	74	75	45	60
Arena %	5	7	10	15	20
co3Ca %	0	0	2	3	4
C g/100g	2,00	1,80	1,00	1,10	0,70
N g/100g	0,20	0,18	0,125	0,155	0,02
SALINIDAD					
Resistencia (ohms)	1500	50	2000	200	100
cEes (dS/m)	0,10	0,20	0,05	4,00	1,00
Cl ⁻ mmolc/L	0,10	0,20	0,05	18	20
so4 ⁻ mmolc/L	0,60	1,20	0,30	10	60
co3 ⁻ mmolc/L	0,20	0,40	0,10	6	10
co3H ⁻ mmolc/L	0,10	0,20	0,05	6	10
Ca ⁺⁺ mmolc/L	0,10	0,20	0,05	5	20
Mg ⁺⁺ mmolc/L	0,20	0,40	0,10	15	30
Na ⁺ mmolc/L	0,60	1,20	0,30	15	40
K ⁺ mmolc/L	0,10	0,20	0,05	5	10
INTERCAMBIO					
Ca ⁺⁺ cmolc/kg	4,5	5,5	4,5	7,5	5,0
Mg ⁺⁺ cmolc/kg	1,0	1,5	1,2	1,5	1,0
Na ⁺ cmolc/kg	1,0	1,0	1,5	9,5	4,0
K ⁺ cmolc/kg	1,0	1,5	1,0	2,0	1,0
H ⁺ cmolc/kg	5,0	3,0	2,0	0	0
Tanalítico	12,3	12,8	10,1	20,5	11,2
pH H2O (1:2,5)	7,5	6,0	6,5	6,7	6,8
pH Cl K	4,5	6,1	6,0	6,5	6,7
Estructura	200	150	10	300	400
Ca ⁺⁺ cmolc/kg	Migajosa	Masiva	Masiva	Granular	Prismas

c/c arcilla: 45 cmolc/kg

Apéndice: Planilla analítica de suelos #5 para analizar la coherencia de sus datos

Horizonte	A	BA	E	B	C
Arcilla %	20	19	15	46	20
Limo %	75	75	82	50	75
Arena %	5	6	3	4	15
co3Ca %	0	0	3	3	2
C g/100g	1,20	1,10	0,80	1,00	0,90
N g/100g	0,12	0,11	0,10	0,06	0,04
SALINIDAD					
Resistencia (ohms)	150	50	2000	1500	100
cEes (dS/m)	0,10	0,20	0,05	5,00	1,00
Cl ⁻ mmolc/L	0,10	0,20	0,05	18	20
so4 ⁻ mmolc/L	0,60	1,20	0,30	20	64
co3 ⁻ mmolc/L	0,20	0,40	0,10	6	8
co3H ⁻ mmolc/L	0,10	0,20	0,05	6	8
Ca ⁺⁺ mmolc/L	0,10	0,20	0,05	5	20
Mg ⁺⁺ mmolc/L	0,20	0,40	0,10	15	30
Na ⁺ mmolc/L	0,60	1,20	0,30	15	40
K ⁺ mmolc/L	0,10	0,20	0,05	15	10
INTERCAMBIO					
Ca ⁺⁺ cmolc/kg	5,0	7,0	3,0	7,5	3,0
Mg ⁺⁺ cmolc/kg	1,0	1,2	0,6	1,5	2,0
Na ⁺ cmolc/kg	1,0	1,0	0,5	8,5	4,5
K ⁺ cmolc/kg	3,0	1,3	0,5	5,0	2,0
H ⁺ cmolc/kg	5,0	1,5	3,0	0	0
Tanalítico	27,0	26,0	8,0	16	12,5
pH H2O (1:2,5)	5,5	8,6	5,3	6,4	6,5
pH Cl K	7,0	6,0	4,9	6,0	6,1
Estructura	Migajosa	Granular	Masiva	Prismas	Masiva

c/c arcilla: 45 cmolc/kg

PARTE 3. ESTIMACIÓN DE DATOS EDAFOLÓGICOS

MIGUEL PILATTI, OSVALDO FELLI, SILVIA IMHOFF,
CRISTIAN ZORZÓN Y PABLO GIBERTO

El agrónomo utiliza datos de suelos con distintos fines, como ser:

- Reconocer un suelo.
- Evaluar su capacidad de uso o su aptitud productiva
- Detectar factores que limitan la producción de los cultivos.
- Conocer el grado de deterioro o recuperación de propiedades críticas.
- Diseñar obras de riego, drenaje o sistematización para el control de la erosión.
- Determinar el momento oportuno de laboreo.
- Especificar dosis de abonado o enmienda.

El Cuadro 4.7 reúne los datos edafológicos agrónomicamente más usados: No es frecuente que el ingeniero cuente con todos ellos ya sea porque los necesita a la brevedad, el costo es muy elevado, no existe en su zona el equipamiento necesario para su medición o los recursos humanos capacitados para ello.

Cuando no es posible MEDIR para obtener un dato, puede estimarse a partir de otros datos que sí están disponibles o con apreciaciones directas en el campo. De esto trata esta Aplicación Edafológica para agrónomos: ¿cómo estimar datos cuando no podemos medirlos? Para ellos se utilizan funciones de edafotransferencia. Una función de edafotransferencia (FET) es una relación matemática entre dos o más parámetros del suelo que presentan un nivel de confianza estadística razonablemente alto (Nachtergaele, 2002). El término fue introducido por Bouma (1989) quien comentó: «el desafío de la ciencia del suelo es transformar datos que tenemos (levantamiento de suelos) en información que necesitamos», ej., funciones predictivas de ciertas propiedades del suelo obtenidas a partir de otras ya existentes o poco costosas y fáciles de medir.

Las FET son útiles en investigación básica porque ayudan a comprender y cuantificar la relación que existe entre diferentes propiedades del suelo y en el ámbito ingenieril donde hidrólogos, agrónomos y meteorólogos las utilizan para estimar parámetros de transporte de agua, en estimaciones de rendimiento de cultivos, en la programación de prácticas de manejo etc. Pachepsky *et al.* (1999) cita que las FET se utilizan tanto a escala local como regional vinculadas a sistemas de información geográfica y modelos de simulación del crecimiento de los cultivos.

Las funciones de edafotransferencia más comunes son aquellas que estiman la curva de retención hídrica (Vereecken *et al.*, 1989) y la conductividad hidráulica (Jabro, 1992; Vereecken *et al.*, 1990; Tietje y Hennings, 1996) el intervalo hídrico óptimo (da Silva y Kay, 1997; Silva *et al.*, 1997; Kay *et al.*, 1997) entre otras.

Pero debe quedar claro que siempre es mejor un dato bien medido, representativo, que uno estimado por cualquier método.

Suelo: ubicación

CUADRO 4.7: LISTA DE DATOS EDAFOLÓGICOS PARA USO AGRONÓMICO. (EN NEGRILLA LOS QUE PUEDEN ESTIMARSE O CALCULARSE A PARTIR DE OTROS)

Horizonte					
Límite inferior (cm)					
Densidad del suelo (g/cm³)					
Densidad de partícula (g/cm³)					
Porosidad total (cm³/cm³)					
Capacidad de campo (cm ³ /cm ³)					
Macroporosidad (cm³/cm³)					
Marchitez permanente (cm ³ /cm ³)					
Contenido hídrico inicial (cm ³ /cm ³)					
Agua útil max (cm)					
Agua fácilmente utilizable max (cm)					
Carbono orgánico total (g/kg)					
Nitrógeno total (g/kg)					
N activo o particulado* (g/Mg)					
Arcilla (%)					
Limo (2 a 50 µm) (%)					
Arenas (%)					
Textura					
Moteados					
Nódulos Fe, Mn					
Estructura					
Consistencia					
Barnices					
Raíces					
Roca, Cement, Napa					

Continúa en página siguiente

N-Nitratos (g/Mg)					
P extraíble (g/Mg)					
S de so ₄ (g/Mg)					
Ca intercambiable (cmolc/kg)					
Mg intercambiable (cmolc/kg)					
Na intercambiable (cmolc/kg)					
K intercambiable (cmolc/kg)					
H intercambiable (cmolc/kg)					
c _{ic} (cmolc/kg)					
Saturación de bases (%)					
PSI (%)					
pH (rel. 1:2,5)					
cEes (dS/m)					
α curva retención hídrica					
β curva retención hídrica					
a resistencia mecánica					
b resistencia mecánica					
c resistencia mecánica					
Conductividad hidráulica (cm/h)					
Curva «número» II, CN del USDA			Estabilidad agregados al agua %		
Profundidad enraizable (cm)			Profundidad enraizamiento (cm)		

(*) Alternativamente usar carbono orgánico particulado, uno u otro.

Ecuación de curva de retención hídrica $\theta = \theta_s / (1 + \alpha \psi^\beta)$ y Resistencia mecánica $RP = a \theta^b D_s^c$

θ y θ_s : contenidos hídricos volumétricos en un momento dado y a saturación. ψ : potencial hídrico mátrico. D_s , densidad del suelo. RP resistencia a la penetración medido con penetrómetro. α , β , a , b , c , parámetros ajuste de ecuaciones.

A continuación, se presentan los procedimientos que pueden utilizarse para estimar:

1. Granulometría.
2. Densidad de partículas.
3. Densidad del suelo.
4. Porosidad total.
5. Macroporosidad y espacio aéreo
6. Contenido hídrico:
 - Saturación
 - Punto de marchitez permanente

- Capacidad de campo
 - Límite plástico inferior y Límite de contracción
7. Curva de retención hídrica.
 8. Agua útil para los cultivos
 - Agua útil actual
 - Agua útil máxima
 9. Conductividad hidráulica a saturación.
 10. Precipitación efectiva o lámina infiltrada.
 11. Resistencia mecánica según el contenido hídrico y densidad del suelo.
 12. Nitrógeno activo o potencialmente mineralizable.

4.1. GRANULOMETRÍA

Puede estimarse el porcentaje de arcilla, limo y arena conociendo la textura, o sea a partir de una apreciación táctil. Para evaluar la textura consultar el Trabajo Práctico correspondiente. También puede hacerse lo contrario: estimar la clase textural a partir de la granulometría usando la Figura 4.16

4.2. DENSIDAD DE PARTÍCULAS

La densidad de partículas (δ_p), a diferencia de la densidad del suelo, no tiene en cuenta el volumen ocupado por los poros, sino solo el correspondiente a las partículas sólidas: minerales y materia orgánica. Ésta suele tener una densidad próxima a $1,08 \text{ g/cm}^3$ (δ_o), siendo muy inferior a la densidad media de los minerales que componen la fase sólida que es aproximadamente $2,66 \text{ g/cm}^3$ (δ_i). Un horizonte dado contiene una mezcla de minerales y materia orgánica en distintas proporciones, por eso su δ_p variará. Para calcularla utilice la siguiente ecuación.

$$\delta_p = \frac{100}{\frac{100}{\delta_i} + MOx \frac{\delta_i - \delta_o}{\delta_i x \delta_o}}$$

Donde:

δ_p es densidad de partículas en g/cm^3 ,

mo es % de Materia orgánica;

δ_o es la densidad de la fracción orgánica ($1,08 \text{ g/cm}^3$) y

δ_i es la densidad de los minerales ($2,66 \text{ g/cm}^3$)

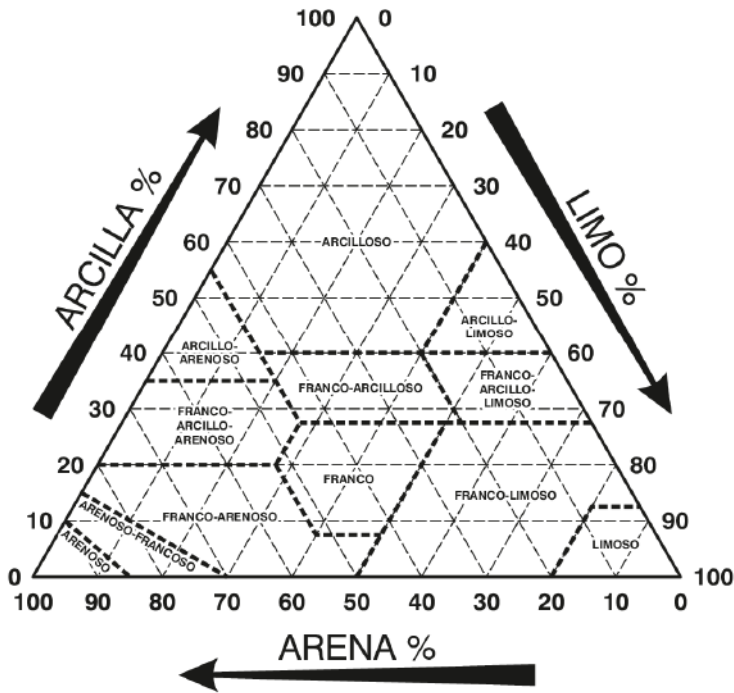


FIGURA 4.16. TRIÁNGULO TEXTURAL ÚTIL PARA ESTABLECER LAS CLASES TEXTURALES A PARTIR DE LA GRANULOMETRÍA O VICEVERSA

4.3. DENSIDAD DEL SUELO

La densidad del suelo (δ_s) puede estimarse a partir de la granulometría utilizando la Figura 4.17, esta densidad corresponde a materiales naturalmente asentados y puede adoptarse como valor medio; se denomina densidad normal (δ_{sn}).

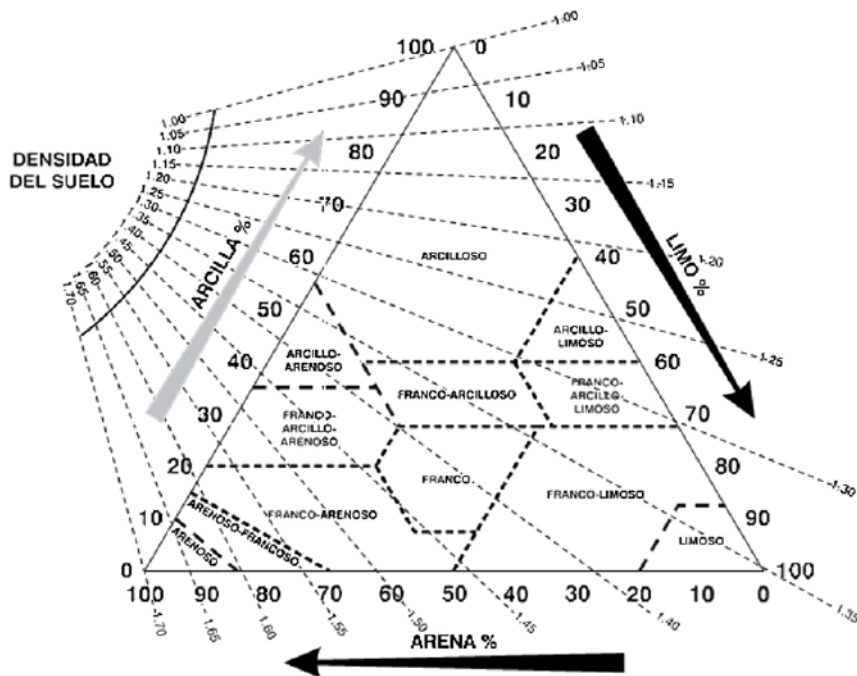


FIGURA 4.17. ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DEL SUELO UTILIZANDO GRANULOMETRÍA O TEXTURA

Sin embargo, horizontes superficiales con elevado tenor orgánico o mullidos por labranza tienen densidades menores. En éste caso utilizar la densidad obtenida a partir de la Figura 4.17 multiplicándola por 0,9.

En la realidad los estratos pueden estar un poco más mullidos o bien más compactos, según lo que observa en el perfil de suelo seleccione lo siguiente:

mullido: $\delta_{sm} = \delta_{sn} \times 0,9$

horizonte natural sin compactar en superficie: δ_{sn}

– Si tienen menos de 45% de arcilla

algo compacto: $\delta_{sac} = \delta_{sn} \times 1,05$

compacto: $\delta_{sc} = \delta_{sn} \times 1,1$

– Si tienen igual o más de 45% de arcilla

algo compacto: $\delta_{sac} = \delta_{sn} \times 1,1$

compacto: $\delta_{sc} = \delta_{sn} \times 1,15$

Donde:

δ_{sm} , δ_{sn} , δ_{sac} , δ_{sc} y δ_{sn} son las densidades (g/cm^3) mullida, natural, algo compacto y compacta; respectivamente.

Ejemplo. Estimar la densidad para un horizonte superficial con las siguientes características

Datos: arcilla 20% y arena 5%

Del triángulo textural se obtiene: $\delta_{sn} = 1,35 \text{ g/cm}^3$

$\delta_{sac} = 1,35 \times 1,05 = 1,42 \text{ g/cm}^3$

$\delta_{sc} = 1,35 \times 1,1 = 1,49 \text{ g/cm}^3$

$\delta_{sm} = 1,35 \times 0,9 = 1,22 \text{ g/cm}^3$

Esto se interpreta así: ese horizonte puede tener densidades que oscilan entre 1,22 y 1,49 g/cm^3 ; un valor normal es de 1,35 g/cm^3 .

Si no dispone del dato medido de densidad, según el grado de mullimiento o compactación que observa al describir el horizonte asigne un valor más próximo al menor o al mayor.

4.4. POROSIDAD TOTAL

La porosidad total (cm^3/cm^3) se calcula a partir de la densidad del suelo (δ_s) y la densidad de partícula (δ_p), estimadas anteriormente.

$$PT = (1 - \delta_s / \delta_p)$$

4.5. MACROPOROSIDAD Y ESPACIO AÉREO

La macroporosidad, M_a , se calcula restando a la porosidad total el volumen de agua retenida a tensión mayor de 10 kPa³, $\theta_{10\text{kPa}}$:

$$M_a = PT - \theta_{10\text{kPa}} \text{ (cm}^3/\text{cm}^3\text{)}$$

En cambio, el espacio con aire, E_a , se conoce restando a la PT el volumen de agua (θ) que tiene el suelo a un contenido hídrico cualquiera; puede coincidir con la M_a o no:

$$E_a = PT - \theta \text{ (cm}^3/\text{cm}^3\text{)}$$

3 No hay un acuerdo generalizado acerca de la tensión a utilizar: algunos autores usan 5kPa otros 6 kPa; aquí se utilizará 10 kPa (equivale a 100 cm de columna de agua). Los diámetros de poros equivalentes son 60, 50 y 30 μm .

4.6. CONTENIDOS HÍDRICOS

Saturación

El contenido hídrico a saturación, θ_s , se supone igual a la porosidad total del suelo (ver ítem 4). Si se comparan datos medidos de saturación con los estimados como aquí se indica se constata que no son iguales, sino que la saturación es entre 3 y 10 % inferior a la PT. Ello se debe a que existen poros lacunares o en forma de bolsas cerradas donde el agua no ingresa y por ello la porosidad total es mayor que el contenido hídrico a saturación. Para una mejor estimación de θ_s se recomienda multiplicar el resultado de aquella fórmula por 0,9.

$$\theta_s = 0,9 \times PT \text{ (cm}^3/\text{ cm}^3\text{)}$$

Nótese que no es lo mismo saturar una muestra por ascenso capilar, donde prácticamente todo el aire se expulsa y –por lo tanto– θ_s y PT son prácticamente iguales; que lo que ocurre después de una copiosa lluvia donde el agua ingresa por arriba evitando que parte del aire salga del suelo: ésta es la condición frecuente en el campo, aquí θ_s suele ser menor que PT.

Punto de marchitez permanente

El contenido hídrico a marchitez permanente (w_{pmp} , g/g) puede obtenerse a partir del % de arcilla usando la siguiente ecuación (también de la Figura 4.20 o Cuadro 4.8):

$$w_{pmp} = \frac{0,22}{1 + [10,68 \times \exp(-0,0814 \times A)]}$$

Donde

A, es el porcentaje de arcilla. w_{pmp} , es el contenido hídrico a marchitez permanente en g/g.

CUADRO 4.8. RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE ARCILLA Y EL PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE (G/100G)

Arcilla %	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
PMP %	2,9	3,4	3,8	4,4	4,0	5,6	6,3	7,1	7,9	8,8	9,6	10,5	11,4

Arcilla %	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
PMP %	12,3	13,2	14,0	14,8	15,6	16,3	17,0	17,6	18,1	18,6

Las mediciones, a partir de la cual se obtuvo la Figura 4.18 y se ajustó la ecuación anterior, se efectuaron utilizando el método biológico para determinar marchitez permanente, no el agua retenida a 1,5 MPa en laboratorio.

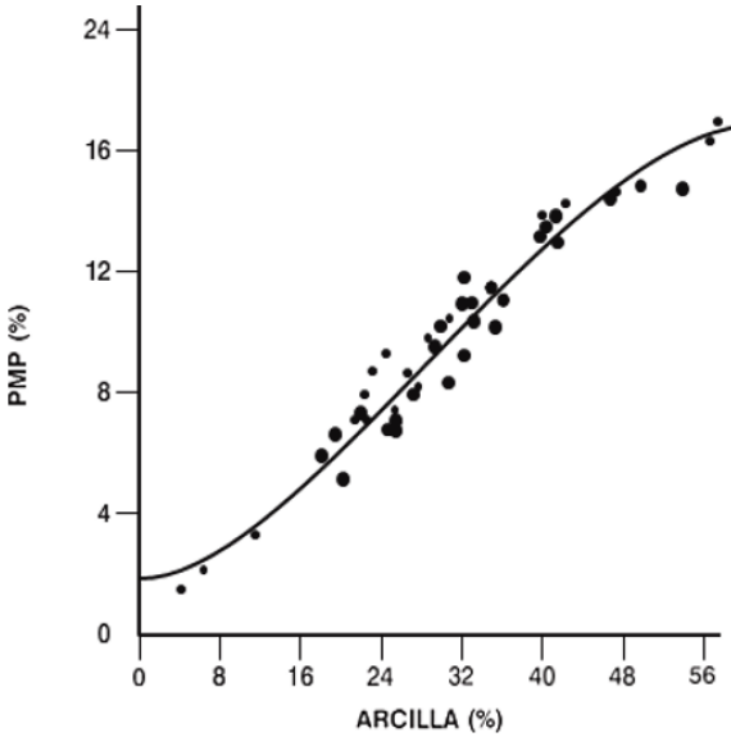


FIGURA 4.18. RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE ARCILLA Y MARCHITEZ PERMANENTE DETERMINADO POR EL MÉTODO BIOLÓGICO.

Capacidad de campo

Tradicionalmente la tensión hídrica correspondiente a capacidad de campo para texturas arenosas es de 10 kPa; francas es de 33 kPa y para arcillosas es de 60 kPa (ó 0,1 – 0,33 y 0,6 bares o 100; 330 y 600 cm respectivamente). En la actualidad la mayoría está adoptando el primer valor.

El contenido hídrico volumétrico a capacidad de campo, θ_{cc} (retenida a 33 kPa), puede estimarse utilizando Figura 4.19, a partir de la granulometría.

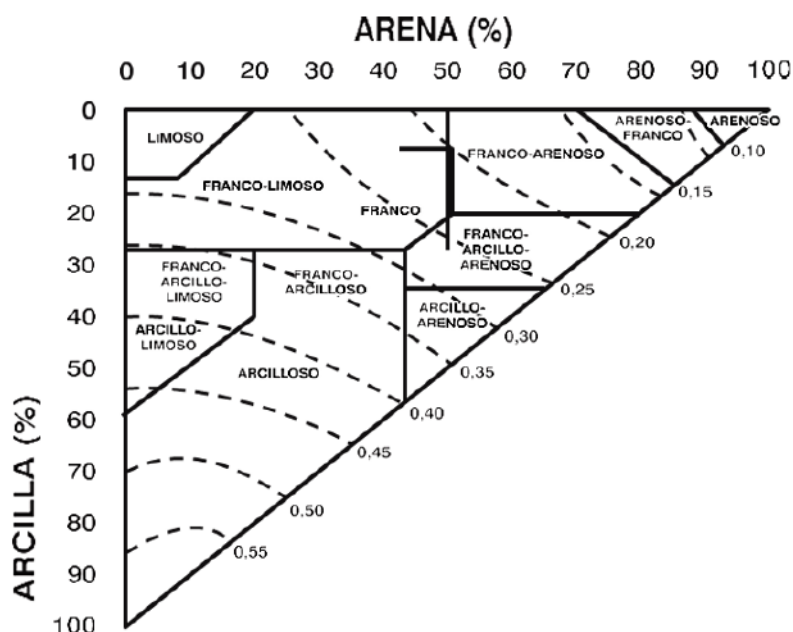


FIGURA 4.19. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO A CAPACIDAD DE CAMPO (CM³/CM³) (RAWLS Y BRAKENSIEK, 1983)

Límite plástico inferior y límite de contracción

Además de lo anteriores hay dos contenidos hídricos que interesan especialmente: los límites (a) plástico inferior (w_{Lpi}) y (b) de contracción (w_{ct})

El límite plástico inferior es el contenido hídrico a partir del cual el suelo deja de ser plástico, ya no puede ser amasado, deformado; comienza a quebrarse. Interesa, entre otros usos, porque allí el suelo ofrece la mínima resistencia mecánica a la labranza: es el punto óptimo de laboreo; si está más húmedo se amasa destruyendo la estructura; si está mucho más seco se requiere mucha más energía y se genera polvo y terrones —que luego es necesario achicarlos con otra labor—: por lo tanto, también se destruye la estructura.

Se puede estimar a partir del contenido de arcilla así:

$$W_{Lpi} = 15,5 + 16,4 \times \frac{A}{100 - A}$$

Donde:

w_{LPI} es el contenido hídrico gravimétrico del límite plástico inferior (g/100g) y «A» es el porcentaje de arcilla.

El límite de contracción es el contenido hídrico en el que los suelos expansivos dejan de cambiar su volumen si se secan más. Si se seca un suelo inicialmente saturado la densidad comienza a aumentar, aparecen grietas, hasta que llegan al «límite de contracción» donde la densidad es máxima, también las grietas; pero a partir de él no cambian más.

Para estimarlo puede utilizarse:

$$w_{ct} = 0,65 \times w_{LPI}$$

Donde:

w_{ct} y w_{LPI} son el contenido hídrico gravimétrico del límite de contracción y plástico inferior (g/100g)

4.7. CURVA DE RETENCIÓN HÍDRICA

La relación existente entre el contenido hídrico y el potencial mátrico con que el agua es retenida en el suelo se puede estimar conociendo el contenido de arcilla (%) y de materia orgánica (%). Para suelos Hapludoles y Molisoles de la provincia de Santa Fe se desarrolló una función de edafotransferencia (Imhoff *et al.* 2016).

Para los suelos en general se puede estimar a partir de la capacidad de campo y punto de marchitez permanente utilizando la ecuación de Norero (1980, ver capítulo Disponibilidad de agua para los cultivos):

$$\theta = \frac{\theta_s}{1 + \alpha |\psi_m|^\beta}$$

Donde:

ψ_m , es el potencial mátrico del suelo;

θ_s, θ son los contenidos hídricos volumétricos a saturación y retenido al potencial mátrico ψ_m , se pueden estimar los parámetros α y β conociendo los valores de contenido hídrico en capacidad de campo y punto de marchitez permanente. Para ello se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\beta = \frac{\ln \left[\frac{(\theta_s / \theta_{CC}) - 1}{(\theta_s / \theta_{PMP}) - 1} \right]}{\ln \left(|\psi_{CC}| / |\psi_{PMP}| \right)} \quad \alpha = \frac{(\theta_s / \theta_{CC}) - 1}{(|\psi_{CC}|)^\beta}$$

Donde:

θ_{cc} , es el potencial mátrico en capacidad de campo, que corresponde a 100, 330 o 600 cm o hPa según el suelo sea de textura arenosa, franca o arcillosa, respectivamente y θ_{pmp} el potencial mátrico en punto de marchitez permanente, que es 15.000 cm. ATENCIÓN: la unidad de potencial mátrico que utilice para estimar alfa y beta debe ser la misma que luego use en la curva de retención hídrica. Además, si capacidad de campo le da mayor o igual que saturación, haga saturación igual a capacidad de campo más 0,01.

4.8. AGUA ÚTIL PARA LOS CULTIVOS

Disponibilidad máxima de agua útil

Es posible estimar cuánta agua útil como máximo (capacidad de campo – marchitez permanente) puede almacenar un estrato a partir de su textura (Figura 4.20). Se expresa como la lámina de agua útil máxima (cm) por cada centímetro de estrato. Así 0,2 cm/cm significa que un estrato de 10 cm de espesor puede contener 20 mm a agua útil como máximo.

Disponibilidad actual de agua útil

La clase textural y la apariencia que presenta un horizonte en el terreno, es útil para estimar la proporción de agua utilizable que queda para el cultivo, esto es muy valioso para realizar el seguimiento del balance hídrico de un suelo cultivado, usando el Cuadro 4.8.

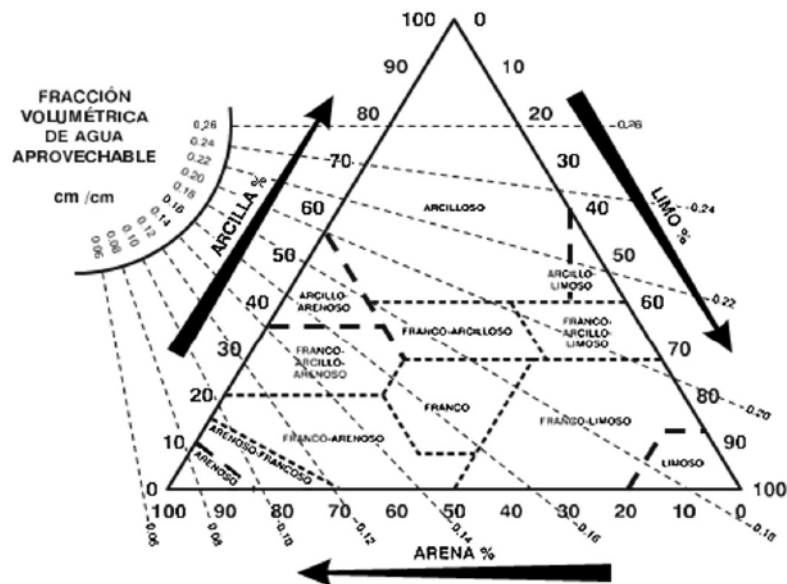


FIGURA 4.20. LÁMINA DE AGUA ÚTIL SEGÚN LA TEXTURA DEL SUELO

CUADRO 4.8. GUÍA PARA ESTIMAR LA PROPORCIÓN DE AGUA ÚTIL REMANENTE EN EL SUELO

Porcentaje de Agua disponible remanente	Texturas Arenosas (gruesas)	Texturas Francas (medias)	Texturas Arcillosas (finas)
0 %	Seco, suelto; fluye entre los dedos.	Pulvulento o costras que se pulverizan con facilidad.	Duro, denso, con grietas; frecuentemente con terrones en superficie.
Menos del 50 %	Parece seco, no se amasa ni forma bolas al comprimir.	Se desmenuza pero se mantiene compacto con la presión, permite un leve amasado.	Algo plástico, moldeable, se deja amasar, forma bola con la presión.
50 % a 75 %	No puede amasarse ni formar bola al comprimir o se desintegra al dejar de hacer presión.	Forma bola, es muy amasable; fácilmente se alisa; muestra algo de adherencia al presionarse fuerte entre los dedos.	Plástico; forma bola y cordones al amasar entre pulgar e índice y brota entre los dedos al apretar.
75 % a 100 %	Se cohesionan muy poco; forma bola de muy poca consistencia; logra ser amasado débilmente. Nunca queda liso. Tono oscurecido.	Plástico; se deja moldear con facilidad y se siente untuoso. Tono oscuro.	Muy untuoso; se moldea con gran facilidad. Brota agua fácilmente entre los dedos; parece aceitoso al tacto. Tono oscuro.
100 %	No salen gotas de agua en la superficie de la bola pero sí queda en la mano el contorno húmedo de la bola.		

4.9. PRECIPITACIÓN EFECTIVA O AGUA INFILTRADA

Se presentan dos procedimientos para estimar cuánta agua, de lluvia o riego, ingresa al suelo; ambos se basan en la curva número (CN del USDA): El primero es una simplificación del siguiente, que solo requiere la intensidad de precipitación y textura del horizonte superficial. El segundo es detallado, útil para diseño de proyectos.

En función de textura e intensidad de precipitación

La fracción de agua que infiltra en una precipitación dada puede estimarse utilizando el Cuadro 4.10, a partir de la intensidad de la precipitación y de las características texturales de los suelos.

Seleccione la CN según los siguientes criterios (Cuadro 4.9):

CUADRO 4.9. CRITERIOS PARA SELECCIONAR LA «CURVA NÚMERO» QUE PERMITE ESTIMAR LA INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO.

Curva Número (CN)	Criterios para seleccionarla
65	Textura arenosa, profundos, permeables, cubiertos por cultivos densos: pastizales y praderas.
75	Texturas livianas (francas), permeables, con diversos cultivos agrícolas y condiciones estructurales en superficie satisfactorias,
85	Texturas francas, algo compacto o texturas moderadamente pesadas con cultivos generales.
95	Texturas arcillosas, densos, o suelos de poco espesor sobre estratos impermeables.

CUADRO 4.10. PROPORCIÓN DEL AGUA QUE INFILTRA (TANTO POR UNO) SEGÚN INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN Y CURVA NÚMERO (CN)

Precipitación mm	CN 60	CN 65	CN 70	CN 75	CN 80	CN 85	CN 90	CN 95
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,98	0,90	0,74
15	1,00	0,99	0,97	0,97	0,93	0,91	0,80	0,61
20	0,98	0,97	0,94	0,93	0,88	0,85	0,72	0,51
25	0,97	0,94	0,91	0,89	0,83	0,79	0,65	0,44
30	0,95	0,92	0,88	0,85	0,79	0,73	0,59	0,39
35	0,93	0,89	0,85	0,82	0,75	0,69	0,54	0,35
40	0,91	0,87	0,82	0,79	0,71	0,65	0,50	0,31
45	0,89	0,84	0,79	0,76	0,68	0,61	0,46	0,29
50	0,87	0,82	0,77	0,73	0,64	0,57	0,43	0,26
55	0,85	0,80	0,74	0,70	0,62	0,54	0,41	0,24
60	0,83	0,78	0,72	0,68	0,59	0,52	0,38	0,23
65	0,81	0,76	0,70	0,65	0,57	0,49	0,36	0,21
70	0,79	0,74	0,68	0,63	0,54	0,47	0,34	0,20
75	0,78	0,72	0,66	0,61	0,52	0,45	0,33	0,19
80	0,76	0,71	0,64	0,59	0,51	0,43	0,31	0,18
85	0,75	0,69	0,63	0,57	0,49	0,41	0,30	0,17
90	0,73	0,67	0,61	0,56	0,47	0,40	0,28	0,16
95	0,72	0,66	0,59	0,54	0,46	0,38	0,27	0,15
100	0,70	0,64	0,58	0,52	0,44	0,37	0,26	0,14

Método de la «curva número»

La cantidad de agua que infiltra después de una lluvia puede estimarse utilizando el método de la Curva Número el cual calcula el escurrimiento total a partir de datos de precipitación y características del terreno y del cultivo; por diferencia se halla la infiltración.

Primer paso

Clasifique hidrológicamente al suelo según su potencial de escurrimiento, según los siguientes criterios:

- A. *Bajo potencial de escorrentía.* Alta tasa de infiltración aún cuando están húmedos. Arenoso con mucha grava, profundo y bien a excesivamente drenado.
- B. *Moderadamente bajo potencial de escorrentía.* Tasas de infiltración moderadas cuando húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente drenados a bien drenados, texturas medias; incluyendo moderadamente finas a moderadamente gruesas.
- C. *Moderadamente alto potencial de escorrentía.* Infiltración lenta cuando húmedos. Con estrato que dificulta el flujo de agua o de textura fina. Incluye estratos con sodio y/o freática no muy profundas. Esos suelos son pobremente drenados a moderadamente bien drenados con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50 – 100cm): fragipán, hardpan, roca dura no fisurada.
- D. *Alto potencial de escorrentía.* Infiltración muy lenta cuando húmedos. Consiste de suelos arcillosos expansible; suelos con nivel freático permanente cerca de la superficie; suelos «claypan» o estrato arcilloso superficial; suelos poco profundos sobre material casi impermeable.

Segundo paso

Seleccione el valor correspondiente a la Curva Numero II (CNII) del Cuadro 4.11 para ello necesita la siguiente información:

- a) Qué cultivo hay, interesa cómo cubre el suelo según el tipo de siembra.
- b) Qué modalidad de siembra: surcos rectos en curva a nivel y/o terrazas.
- c) Cuánto es la cobertura vegetal.
- d) Por último, con la clasificación del suelo obtenida en el Paso 1, obtiene la CNII.

Tercer paso

Corrección por pendiente

El valor hallado en el segundo paso corresponde a pendientes del 5 %, para pendientes distintas corregir usando la siguiente ecuación:

$$CN_{IIp} = \frac{1}{3} \times (CNIII - CNII) \times [1 - 2 \times \exp(-13,86 \times p)] + CNII$$

Donde:

CN_{pp} : valor de la curva CNII ajustado por pendiente.

CNIII : el valor de la curva número para la condición humedad III (Cuadro 4.13)

p: pendiente media de la cuenca (en tanto por uno)

A partir de la CNII puede obtenerse los valores de la CNIII y CNI usando el Cuadro 4.12 o las ecuaciones siguientes.

Los datos de curva número fueron tabulados para las siguientes condiciones:

CNI: horizonte superficial seco, lluvias < a 33 mm últimos cinco días

CNII: horizonte superficial húmedo, lluvias 34 a 53 mm últimos cinco días

CNIII: horizonte superficial mojado, lluvias > 54 mm últimos cinco días

CUADRO 4.11. CURVAS DE ESCURRIMIENTO (CNII) PARA DIVERSOS COMPLEJOS SUELO-COBERTURA PARA CONDICIÓN DE HUMEDAD II. (SR: SURCO RECTO; CUN: CURVA A NIVEL; T: TERRAZA)

Tipo de cultivo	Manejo	% cobertura	Clase hidrológica del suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	SR	< 50	77	86	91	94
Cultivos en surcos (grano grueso)	SR	< 50	72	81	88	91
	SR	> 75	67	78	85	89
	CuN	< 50	70	79	84	88
	CuN	> 75	65	75	82	86
	CuN y T	< 50	66	74	80	82
	CuN y T	> 75	62	71	78	81
Siembras al voleo o chorrillo	SR	< 50	65	76	84	88
	SR	> 75	63	75	83	87
(grano fino)	CuN	< 50	63	74	82	85
	CuN	> 75	61	73	81	84
	CuN y T	< 50	61	72	79	82
	CuN y T	> 75	59	70	78	81
Leguminosas	SR	< 50	66	77	85	89
	SR	> 75	58	72	81	85
	CuN	< 50	64	75	83	85
	CuN	> 75	55	69	78	83
	CuN y T	< 50	63	73	80	83
	CuN y T	> 75	51	67	76	80
Pasturas densas		< 50	68	79	86	89
		50 a 75	49	69	79	84
		> 75	39	61	74	80

continúa en página siguiente

Tipo de cultivo	Manejo	% cobertura	Clase hidrológica del suelo			
			A	B	C	D
	CuN	< 50	47	67	81	88
	CuN	50 a 75	25	59	75	83
	CuN	> 75	6	35	70	79
Pastizal natural		> 75	30	58	71	78
		< 50	45	66	77	83
Bosque		50 a 75	36	60	73	79
		> 75	25	55	70	77

CUADRO 4.12. NÚMERO DE CURVA II Y III A PARTIR DE CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE I (CNI)

CNII	CNI	CNIII	CNII	CNI	CNIII
100	100	100	50	31	70
95	87	98	45	26	65
90	78	96	40	22	60
85	70	94	35	18	55
80	63	91	30	15	50
75	57	88	25	12	43
70	51	85	20	9	37
65	45	82	15	6	30
60	40	78	10	4	22
55	35	74	5	2	13

$$CNI = CNII - \frac{20 \times (100 - CNII)}{(100 - CNII + X)}$$

$$X = \exp[2,533 - 0,0636 \times (100 - CNII)]$$

$$CNIII = CNII \times \exp[0,00673 \times (100 - CNII)]$$

Atención: Para estimar aproximadamente la infiltración, con la *cn* corregida por pendiente, vaya al Cuadro 4.11 para calcular cuánta agua infiltra y con esto termina.

Cuarto paso

Corrección por contenido hídrico horizonte superficial

Si necesita corregir la *cn* para un contenido hídrico específico del horizonte superficial (θ) use las ecuaciones que se presentan a continuación. Las dos

primeras reconocen si ese contenido hídrico está por encima (θ_{+cc}) o debajo de capacidad de campo (θ_{-cc}); luego la CN se calcula según ese estado de humedad.

$$\theta_{+cc} = \frac{(\theta - \theta_{cc})}{(\theta_s - \theta_{cc})}$$

$$\theta_{-cc} = \frac{(\theta - \theta_{pmp})}{(\theta_{cc} - \theta_{pmp})}$$

Donde:

Los contenidos hídrico volumétricos $\theta_s, \theta_{+cc}, \theta_{cc}, \theta_{-cc}, \theta_{pmp}, \theta$; corresponden a saturación; entre saturación y capacidad de campo, capacidad de acmpo, por debajo de él; marchitez permanente y un contenido hídrico cualquiera: el que se está estudiando; respectivamente.

a) Si θ es igual o mayor que capacidad de campo:

$$CN = CNII + (CNIII - CNII) \times \theta_{+cc}$$

a) Si θ es menor que capacidad de campo:

$$CN = CNI + (CNII - CNI) \times \theta_{-cc}$$

Atención: las CNI, II y III que se utilizan en este paso ya han sido corregidas por pendiente.

Quinto paso

Por fin para estimar cuánta agua infiltra (INF) de una precipitación (PPTA, en mm) se utiliza la ecuación:

$$INF = PPTA - \frac{(PPTA - XIA)^2}{(PPTA - XIA + S)}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

XIA = 0,075 x S si CN menor de 70

XIA = 0,1 x S si CN entre 71 y 80

XIA = 0,15 x S si CN entre 81 y 90

XIA = 0,2 x S si CN mayor que 90

Donde:

INF, es la lámina que infiltra en mm;

PPTA, es la precipitación en mm;

XIA, es un factor de corrección expresado en mm;
S, infiltración potencial para la condición de humedad del suelo que corres-
ponda (cm).

cn, Curva Número para la condición de humedad del suelo que se desea
evaluar.

4.10. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA A SATURACIÓN (Ks)

La conductividad hidráulica saturada (cm/h) puede estimarse usando el Cuadro 4.13 a partir de la textura y del grado de densificación o reducción de la porosidad total (cm³/cm³).

CUADRO 4.13. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA A SATURACIÓN (Ks) CARACTERÍSTICA DE LAS PRINCIPALES CLASES TEXTURALES Y SEGÚN EL GRADO DE DENSIFICACIÓN (REDUCCIÓN DE LA POROSIDAD TOTAL)

CLASE TEXTURAL	Porosidad total (cm ³ /cm ³)	Ks media (cm/h)	Ks max (cm/h)	Ks mín (cm/h)
ARCILLOSO	0,48	0,2	0,7	0,1
	0,40	0,2	0,6	0,03
ARCILLO – LIMOSO	0,53	0,2	0,8	0,05
ARCILLO – ARENOSO	0,39	0,1	0,3	0,03
FRANCO – ARCILLOSO	0,48	0,4	1,3	0,2
	0,40	0,1	0,4	0,02
FRANCO – ARCILLO – LIMOSO	0,50	0,5	1,4	0,2
	0,43	0,4	1,0	0,2
FRANCO – ARCILLO – ARENOSO	0,44	0,8	5,1	0,2
	0,37	0,3	1,1	0,1
FRANCO	0,47	0,6	2,8	0,3
	0,39	0,4	1,7	0,2
FRANCO – LIMOSO	0,49	1,4	3,7	0,8
	0,39	0,3	1,0	0,1
FRANCO – ARENOSO FINO	0,45	2,2	3,6	1,0
	0,36	0,8	1,7	0,3
FRANCO – ARENOSO	0,47	5,6	13,0	3,1
	0,37	1,3	3,1	0,5
ARENOSO FINO FRANCO	0,46	6,2	12,2	3,6
	0,37	1,3	11,6	0,7
ARENOSO FRANCO	0,45	12,3	19,6	8,4
	0,37	4,1	7,8	3,1
ARENOSO FINO	0,49	14,1	26,6	11,8
	0,39	10	22,0	6,8
ARENOSO	0,44	18,2	26,7	9,7
	0,39	9,1	21,9	6,4

4.11. RESISTENCIA MECÁNICA

La resistencia mecánica que ofrece el suelo a la penetración de un vástago metálico (penetrómetro) varía con el contenido hídrico edáfico y también de otras propiedades, como el contenido de arcilla y la densidad. Puede estimarse cuánta resistencia ofrece un horizonte dado según cambia su humedad, con la siguiente ecuación:

$$RP = a \times \theta^{-b} \times Ds^c$$

Donde:

RP es la resistencia del suelo a la penetración (MPa),

θ es el contenido volumétrico de agua (cm^3/cm^3),

Ds es la densidad del suelo (g cm^{-3}) y

a, b, c son parámetros de la ecuación. Atención "b" es negativo ingresarlo con ese signo.

Los parámetros pueden estimarse a partir del contenido de arcilla (A en %) y materia orgánica (%). Estos fueron ajustados para Molisoles y Hapludoles de la provincia de Santa Fe por Imhoff *et al.* (2016).

$$a = \exp[-4,9 - 0,017 \times (A) + 0,423 \times (MO)]$$

$$b = -1,725 - 0,05 \times (A)$$

$$c = 5,60$$

4.12. NITRÓGENO ACTIVO O POTENCIALMENTE MINERALIZABLE

El nitrógeno orgánico de los suelos se encuentra en tres fracciones: nitrógeno de los Rastrojos (fracción más gruesa, mayor a 2 mm), Nitrógeno Activo (Nac) y Nitrógeno Pasivo (Np). Pero, en la determinación de laboratorio se descartan los rastrojos evaluándose lo que se denomina N total (Nt) que incluye al N inorgánico usualmente bajo la forma de nitratos y amonio.

El Nac está constituido por compuestos orgánicos lábiles con tasas de mineralización de 0,14/semana (Tiempo de Reciclado TR de 7 semanas) y por orgánicos estabilizados con tasas de 0,0038/semana (TR= 5,5 años).

El Np o húmico, constituido por formas orgánicas transformadas muy complejas, difícilmente atacable por los microorganismos del suelo, posee una tasa de mineralización muy baja, la que oscila entre 0,0067/año (TR=150 años) y 0,0003/año (TR= 3300 años).

Por lo tanto es el Nac el que realiza el mayor aporte de Nitrógeno para los cultivos y sobre el que se efectúan las recomendaciones de necesidad de abono.

Como generalmente solo se cuenta con el dato de Nt, a continuación se indica cómo estimarlo a partir de él teniendo en cuenta la Fracción potencialmente mineralizable.

$$Nac = Nt \times Fmin$$

Nac se obtiene multiplicando el nitrógeno total por la fracción mineralizable según el manejo predominante en los últimos 10 años:

Fmin es solo para la profundidad enraizable, usualmente, el horizonte superficial; horizontes profundos considerar 0,01

CUADRO 4.14. FRACCIÓN MINERALIZABLE (FMIN) DEL NITRÓGENO TOTAL SEGÚN LAS PRÁCTICAS DE MANEJO DEL SUELO PREDOMINANTE

Historia de uso del suelo	FMIN	Aclaración
Predominante agotador	0,07 a 0,12	Cultivos extractivos sin barbechos ni fertilizaciones (o muy bajas y esporádicamente), con bajo/medios rendimientos de cosecha.
Moderadamente agotador	0,12 a 0,17	Cultivos extractivos: Áreas de cultivos de maíz, girasol, trigo, algodón, etc. con algunos barbechos y dosis de fertilización nitrogenada, inferior a 100 kg urea/ha/año.
Prácticas conservacionistas	0,17 a 0,22	Suelos en los que se realizan rotaciones, barbechos y fertilizaciones en dosis superiores a los 100 kgurea/ha/año. Típicamente cultivos de maíz o trigo regularmente fertilizados y/o intercalados con cultivos anuales de leguminosas o pasturas plurianuales. El mayor valor se aplica para suelo sin cultivar («vírgenes»)
Prácticas incrementadoras	0,27	Cultivados con aplicación de altas dosis de fertilizantes y estiércol y en rotación con pasturas de leguminosas. Muy raro.

Atención: Para suelos con régimen ácuico o vérticos debe restarse 0,03 al Fmin del Cuadro. 4.14 También si el suelo es imperfectamente drenado o peor.

A partir de datos recientes: Los más frecuentes varían entre 0,07 y 0,12; lotes buenos entre 0,15 y 0,17. En lotes vírgenes o bajos alambrados 0,2 o poco más.

EJERCICIOS

- **Ejercicio 1:** Suponga que el análisis textural indica que el horizonte estudiado es franco limoso con tendencia a franco limo arcilloso; utilice el triángulo textural (Figura 4.16) para estimar cuál puede ser el porcentaje de arcilla, arena y limo.
- **Ejercicio 2:** (a) ¿Cuánto será la densidad de un horizonte que contiene 50 % de arcilla y 30 % de arena? (b) En el terreno se describió un perfil que presentaba a los 30 cm de profundidad un horizonte franco arenoso muy compacto ¿Qué densidad tendrá? (c) Un Ap con 70 % de limo y 10 % de arena ha sido arado y posteriormente se le pasó un rolo ¿cuánto habrá sido su densidad antes y después de la labor?
- **Ejercicio 3:** ¿Qué diferencia de porosidad total tendrán los estratos del ejercicio 2 (b) y 2 (c) si el primero contiene 1 % de materia orgánica y el segundo 5 % ?
- **Ejercicio 4:** ¿Quién tendrá mayor contenido hídrico a saturación un estrato arcilloso (60 % arcilla y 30 % de limo) o uno arenoso (70 % arena y 10 % de arcilla)? ¿Por qué? ¿Qué valor tiene cada uno?
- **Ejercicio 5:** Un perfil de suelo presenta 2 horizontes contrastantes: un E y un Bt. El primero es franco limoso casi limoso y el segundo es arcilloso. Cuánto será, estimativamente, el agua útil para los cultivos de uno y otro. Expresar el resultado en lámina asumiendo un espesor para ambos de 10 cm.
- **Ejercicio 6:** ¿Cuáles son los parámetros de la curva de retención hídrica y de la curva de resistencia mecánica de los 2 horizontes del ejercicio 5, conociendo que el E tiene 1,5 % de materia orgánica y el Bt 0,3?
- **Ejercicio 7:** Para los mismos horizontes del ejercicio 5 ¿cuánto es la macroporosidad de cada uno? Recuerde que los poros con agua retenida a más de 0,006 MPa son microporos.
- **Ejercicio 8:** Se tiene dos lotes aledaños con suelos distintos, el horizonte superficial del lote 1 tiene 40 % de arena y 15 % de arcilla; el lote 2 tiene 5 % y 45 % respectivamente. En ambos llueven 100 mm ¿Qué lámina de agua infiltra en uno y otro?
- **Ejercicio 9:** ¿Quién tendrá más nitrógeno activo (Nac) (es decir, el que se va a mineralizar transformándose en nitratos disponible para los cultivos) un suelo «Z» con antecedentes de más de 20 años de agricultura continua sin adición de fertilizantes que tiene 30 cm de profundidad enraizable, 1,33 g/cm³ de densidad y 0,12 % de nitrógeno total. O un suelo «X» ganadero agrícola con 20 cm; 1,40 g/cm³ y 0,09 % respectivamente.

Expresar el resultado en kg/ha, recordando que para obtener kg/ha de Nac hay que efectuar la siguiente operación: Nac (ppm) x densidad del suelo x espesor (cm) x 0,1

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOUMA, J. (1989). Use soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci.* 9: 177–213.
- IMHOFF, S., PIRES DA SILVA, A., GIBERTO, P.J., TORMENA, C.A., PILATTI, M.A., LIBARDI, P.L. (2016). Physical Quality Indicators and Mechanical Behavior of Agricultural Soils of Argentina. *PLOS ONE* 11(4): e0153827.oi: 10.1371/journal.pone.0153827. Editor: P.C. Abhilash, Banaras Hindu University, India.
- JABRO, J.D. (1992). Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density. *Transactions of the ASAE*. 35(2): 557–560.
- KAY, B.D., DA SILVA, A.P. Y BALDOCK, J.A. (1997). Sensivity of soil structure to changes in organic carbon content: Prediction using pedotransfer functions. *Canadian Journal of Soil Science*. 77: 655– 667.
- NACHTERGAELE, F.O. (2002). From the soil map of the world to the digital global soils and terrain database: 1960–2002. Sumner, M.E. (Ed.) *Handbook of Soil Science*. CRC press: Boca Raton, Section H, 5–39.
- ORELLANA, J.A. DE, PILATTI, M.A Y GREÑÓN, D.A. (1997). Soil quality: an approach to the physical state assessment. *J. of Sustainable Agriculture* 9 (2–3): 91–108.
- PACHEPSKY, YA.A. Y RAWLS, W.J. (1999). Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Science Society of America Journal*. 63: 1748–1757.
- PILATTI, M.A. (1988). Parámetros hídricos de suelos santafesinos: estimación de curvas de retención hídrica. *FAVE* 4 (1,2): 102–111.
- PILATTI, M.A. (1989). Estimación del punto de marchitez permanente en Molisoles santafesinos. *Ciencia del Suelo* 7 (1–2): 103–106.
- RAWLS, W.J. Y BRAKENSIEK, D.L. (1983). A procedure to predict green and ampt infiltration parameters. *Advances in infiltration*:102–112.
- SILVA, A.P. Y KAY, B.D. (1997). Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61 (3): 887–883.
- SILVA, A.P., KAY, B.D. Y PERFECT, E. (1997). Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil and Tillage Research*. 44: 81–93.
- TIETJE, O. Y V. HENNINGS (1996). Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo– transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma*. 69: 71–84.
- VEREECKEN, H., MAES, J. FEYEN, J. (1990). Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Science*. 149 (1): 1–12.
- VEREECKEN, H., MAES, J., FEYEN, J. Y DARIUS, P. (1989). Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Science*. 148 (6): 389–402.

PARTE 4. CALIDAD ENRAIZABLE DEL SUELO

MIGUEL PILATTI Y DANIEL GRENÓN

INTERÉS

La aptitud de los suelos, para proveer agua y nutrimentos para los cultivos, queda determinada básicamente por dos características: la calidad de cada centímetro de espesor edáfico y el espesor total de suelo disponible para ser explorado por las raíces.

En un perfil de suelo pueden reconocerse cuatro zonas de interés agronómico:

- 1) Una superficial, de gran actividad biofísica y química, de pocos centímetros de espesor.
Aquí ocurre la germinación y emergencia de las plántulas, es prontamente ocupado por las raíces. El contenido orgánico es máximo. Esta zona es frecuentemente modificada por labores superficiales y algunos autores la denominaron «el perfil cultural».
- 2) Otra de mayor espesor denominada profundidad enraizable, en ella las raíces no encuentran limitaciones para ocupar el suelo: obtienen la mayor parte del agua y prácticamente todos los nutrimentos que dependen de la materia orgánica: nitrógeno y azufre, también fósforo.
- 3) La tercera zona es la profundidad de enraizamiento, hasta allí hay actividad radical, aunque —en ciertos horizontes— las raíces pudieron tener inconvenientes para profundizar y proliferar. Los cultivos anuales suelen extraer agua hasta esa profundidad.
- 4) Por debajo se encuentra una zona con escasa o nula actividad de raíces. Agronómicamente puede interesar estudiarla para evaluar si es posible aumentar la profundidad de enraizamiento.

Para conocer cuánta agua y minerales se absorben desde el suelo debe conocerse cuánto es el espesor explorado por las raíces y cuál es su actividad en cada estrato durante todo el ciclo del cultivo. Para ello es necesario: «Determinar la profundidad de enraizamiento y estimar, para cada estrato edáfico, su aptitud para contener raíces activas durante el ciclo del cultivo», este es el objetivo principal de este trabajo.

La aptitud del suelo para contener raíces depende, en parte, de características permanentes propias del suelo y, además, de otras condiciones que resultan de la interacción entre el suelo, el edafoclima y el cultivo.

El espesor del suelo disponible para las raíces comprende a todos los estratos edáficos consecutivos con características favorables al desarrollo radical, que no tienen entre si ningún otro estrato que le plantee a las raíces un obstáculo insalvable permanente.

No es común encontrar métodos que permitan estimar la aptitud de cada estrato edáfico para contener raíces. En cambio, sí se dispone de información básica que podría usarse para estimar la profundidad del suelo más ocupada por el sistema radical. Por lo general esa información se reduce a la registrada con fines cartográficos, es decir, descripción morfológica del perfil y datos de laboratorio que posibilitan la ubicación taxonómica del suelo estudiado. En este trabajo se presentan criterios y un procedimiento para estimar la profundidad enraizable y de enraizamiento a partir solo de datos edafológicos.

4.1. PROCEDIMIENTO: NORMAS BÁSICAS Y CÁLCULOS

El procedimiento consiste en asignar índices a ciertas propiedades o características morfológicas, físicas y químicas del suelo que afectan a la exploración radical. Con esos índices se evalúa la importancia relativa de las condiciones edáficas como variables influyentes en la proliferación de las raíces.

Las raíces pueden verse afectadas negativamente por cuatro tipos de factores que limitan las condiciones de: Aireación, Mecánicas, Químicas y Barreras. En el suelo cada uno de estos factores es puesto en evidencia por rasgos que señalan su presencia y dan idea de la magnitud de su influencia (Cuadro 4.16).

CUADRO 4.16. ATRIBUTOS EDÁFICOS RELACIONADOS CON ASPECTOS LIMITANTES A LA EXPLORACIÓN RADICAL

Factor	Atributo Edáfico
Aireación Fa	Macroporosidad Concreciones ferromangánicas Moteados
Mecánico o Estructural Fe	Estructura Consistencia Película de arcilla (barnices) Expansibilidad Densidad Sodicidad
Químico Fq	Acidez / Alcalinidad Salinidad Elementos tóxicos
Barrera (obstrucción) Fk	Roca consolidada Cementaciones edafogenéticas Nivel freático permanente

Los cuatro factores tienen connotaciones fisiológicas, cada uno de los cuales, por separado, puede producir impedimentos o inhibición en las raíces. Así:

- El factor por aireación, F_a , se basa en la proporción de macroporos, e indicios de niveles freáticos fluctuantes, o de anegamientos temporarios, tales como la presencia de moteados o concreciones.
- El factor mecánico, F_e , relacionado con los impedimentos mecánicos a la exploración y proliferación radical, se asocia con las condiciones estructurales y su estabilidad. A éste fin se determina previamente un índice de expansibilidad del horizonte basado en la cantidad y tipo de coloides, y la densidad crítica del suelo.
- El factor químico, F_q , involucra solo propiedades con efecto general adverso al crecimiento y actividad de raíces, como lo son los efectos tóxicos provocados por el aluminio asimilable, y los osmóticos generados por la presencia de sales solubles en el suelo. No se emplean características químicas relacionadas con el desarrollo radical, como la fertilidad.
- El factor por obstrucción o inhibición total, F_k , se asocia a la roca consolidada, horizontes cementados y nivel freático permanente.

Los datos requeridos para estimar la profundidad enraizable constan en el Cuadro 4.17.

CUADRO 4.17. INFORMACIÓN NECESARIA PARA ESTIMAR LA PROFUNDIDAD ENRAIZABLE

Descripción	Símbolo	Unidad
1. Descripción morfológica detallada del perfil	Ver cuadro 4.18	Ver cuadro 4.18
2. De cada horizonte		
2.1. Densidad del suelo	Ds	g cm ⁻³
2.2. Densidad de las partículas	Dp	g cm ⁻³
2.3. Contenido hídrico a capacidad de campo	Wcc	g / 100g
2.4. Carbono orgánico	% C	%
2.5. Nitrógeno total	N	%
2.6. Arcilla	% A	%
2.7. Capacidad de intercambio de cationes	cic	cmol kg ⁻¹
2.8. Sodio intercambiable	Na	cmol kg ⁻¹
2.9. pH en agua (1:2,5)	pH	—
2.10. Porcentaje de saturación de bases	PSB	%
2.11. Aluminio de intercambio o extraíble	Al	ppm
2.12. Conductividad eléctrica del extracto de saturación	CEes	dS m ⁻¹

En el Cuadro 4.18 se le asigna un índice a cada característica del horizonte, un bajo valor indica poco o ningún impedimento y a medida que incrementa también lo hace el grado de restricción. Así a las rocas consolidadas o cementos edafogenéticos, K, que ofrecen una evidente obstrucción o impedimento total al desarrollo radical se les asigna el índice más alto, es decir, 5. Aquí no se consideran términos medios, porque su efecto es plantear una barrera impenetrable para las raíces o causar una inhibición prácticamente total a la actividad radical, caso del nivel freático estático o permanente.

En el caso de otras propiedades del suelo, su relación con el desarrollo y actividad radical es más ambigua que las consideradas precedentemente. Además, y refiriéndose en particular a la descripción morfológica, la información contiene una dosis considerable de subjetividad. Por eso se asocian varias propiedades indicadoras de cierta influencia general fisiológica y se establece con ellas un factor que expresa ese efecto integral sobre el aparato radical, al menos en términos relativos.

CUADRO 4.18. GRADO DE RESTRICCIÓN A LA PROLIFERACIÓN DE RAÍCES (ÍNDICE) ASIGNADO A DIFERENTES PROPIEDADES EDÁFICAS

Símbolo	Propiedad	Valor o Categoría	Índice
K	Roca Consolidada, Cementaciones, Napa Freática Permanente	a) Cualquiera presente	5
		b) Todas ausentes	1
M	Moteados	a) Ninguno, pocos, no se informa (< 2 %)	1
		b) Comunes, frecuentes, regulares	2
		c) Abundantes, muchos (> 20 %)	3
U	Nódulos o Concreciones Ferromangánicas	a) Ninguno, pocos, no se informa	1
		b) Comunes, frecuentes	2
		c) Abundantes, muchos	3
E	Estructura	a) Masiva, laminar, gruesa, columnar, prismática	3
		b) Blocosa muy gruesa, laminar fina o moderada	2
		c) Otras	1
D	Densidad	a) Mayor que densidad crítica (dcrit)	3
		b) Entre (0,97 x dcrit) y dcrit	2
		c) Menor de (0,97 x dcrit)	1

continúa en página siguiente

Símbolo	Propiedad	Valor o Categoría	Índice
S	Consistencia	a) Plástica, firme, y dura (o más)	3
		b) Plástica y firme (o más) Plástica y dura (o más) Firme y dura (o más)	2
		c) Otras	1
I	Películas de Arcilla (barnices)	a) Pocas, no se informan	1
		b) Comunes, frecuentes	2
		c) Muchas, abundantes (o más)	3
O	Sodicidad	a) $PSI \geq PSICrit \times 1,3$	3
		b) $PSI > PSICrit$	2
		c) $PSI \leq PSICrit$	1
L	Conductividad Eléctrica Extracto de Saturación	a) $> 8 \text{ dS / m}$	3
		b) $4 - 8 \text{ dS / m}$	2
		c) $< 4 \text{ dS / m}$	1
P	Macroporosidad	a) $> 0,15$	1
		b) $0,05 - 0,15$	2
		c) $< 0,05$	3
X	Expansibilidad	a) < 2	1
		b) $2 - 6,7$	2
		c) $> 6,7$	3
Q	Acidez	a) $pH < 4,5$ y $PSB < 60 \%$ y $Al > 1 \text{ cmol kg}^{-1}$	3
		b) Dos características de las especificadas en a)	2
		c) Otras	1
	Alcalinidad o Sodicidad	a) $pH \geq 9$ ó $PSI \geq 40 \%$	3
		b) $pH > 7,8$ y < 9 ó PSI de 20 a 40 %	2
		c) $pH \leq 7,8$ y $PSI \leq 20 \%$	1
R	Raíces	a) Nada, muy pocas, no se informa	1
		b) Pocas	2
		c) Comunes, frecuentes, regulares	3
		d) Abundantes, muchas	4
		e) Muy abundantes	5

continúa en página siguiente

Símbolo	Propiedad	Valor o Categoría	Índice
G	Carbono Orgánico	a) < 0,15 %	1
		b) 0,15 – 0,44 %	2
		c) 0,45 – 0,90 %	3
		d) 0,91 – 1,30 %	4
		e) >1,30 %	5
N	Nitrógeno Total	a) < 0,013 %	1
		b) 0,014 – 0,036 %	2
		c) 0,037 – 0,074 %	3
		d) 0,075 – 0,110 %	4
		e) > 0,110 %	5

El valor que se asigna a cada factor, exceptuando el Barrera por los motivos citados, es igual a la media geométrica de los índices de las propiedades que lo determinan. De este modo la magnitud del promedio aumenta a medida que los índices edáficos adversos son mayores, más claros y consistentes. En el Cuadro 4.19 se presentan las ecuaciones para el cómputo de los factores aludidos.

La influencia conjunta de los factores edáficos se sintetiza en un factor edáfico global, FEG, que presenta, a modo de un efecto multiplicativo, la influencia de las propiedades del suelo.

Tanto el factor aireación como el mecánico dependen del contenido hídrico edáfico para expresar su influencia negativa. Pero mientras el primero se relaciona con excesos de agua, el otro se manifiesta en condiciones de deficiencias hídricas. En ciclos de cultivo predominantemente húmedos será el factor de aireación el que restrinja a las raíces y no el mecánico ya que en esas condiciones, las resistencias mecánicas a la penetración radical son bajas. Lo inverso ocurre en una temporada seca, en ella no habrá dificultades de oxigenación para las raíces, pero sí es posible que haya elevadas resistencias mecánicas.

Para moderar o equilibrar el juicio, emitido a partir de los factores edáficos ya mencionados, acerca de la aptitud para el enraizamiento que muestra un estrato, se compara el FEG con un quinto factor, denominado, factor biótico, Fb.

Las raíces son, en definitiva, la expresión más directa de los atributos enraizables del suelo. Además su continua y persistente acumulación a través del tiempo deja sus huellas en los diversos estratos del perfil, bajo las formas de carbono y nitrógeno orgánicos. Salvo circunstancias edafogenéticas conducentes a importante traslocación, el reparto relativo de carbono y nitrógeno orgánico en el perfil puede considerarse como una síntesis histórica de la distribución radical. El factor biológico, es el promedio geométrico de los indicios presentes (raíces) y pasados (carbono y nitrógeno) asociados al crecimiento de raíces en el suelo.

CUADRO 4.19. ECUACIONES UTILIZADAS EN LA ESTIMACIÓN DE LA PROFUNDIDAD ENRAIZABLE (VER SIGNIFICADO DE LOS SÍMBOLOS EN EL CUADRO 4.17)

Determinación	Ecuación Ds/Dp
Macroporosidad	$M_a = \left[1 - \frac{D_s}{\rho_p} \right] - \left[\frac{W_{cc}}{100} \times \rho_s \right]$ 0 $M_a = P_t - \theta_{cc}$
Factor de Expansibilidad	$E_x = \frac{0,1 \times \%A \times \left(\frac{CIC - 4 \times \%C}{\%A} \right)^{0,42}}{\%C}$
Densidad Crítica	$d_{crit} = 1,52 - 0,006 \times \%A$
Porcentaje de Sodio intercambiable (psi)	$PSI = Na_{int} / CIC \times 100$
Porcentaje de Sodio intercambiable crítico	$PSI_{crit} = 10,7 \times CEES - 2,1$
Factor por Obstrucción o inhibición total	$F_k = K$
Factor Químico	$F_q = \sqrt[2]{Q \times L}$
Factor por Aireación	$F_a = \sqrt[3]{P \times M \times U}$
Factor Estructural	$F_e = \sqrt[6]{E \times S \times I \times X \times D \times O}$
Factor Edáfico Global	$FEG = F_k \times F_q \times F_a \times F_e$
Factor Biótico	$F_b = \sqrt[2]{G \times R}$ <p style="text-align: center;">ó</p> $F_b = \sqrt[3]{G \times R \times N}$
Diagnóstico	$DIAG = \frac{FEG}{F_b}$

Límites críticos

a) *Profundidad enraizable*

Si no existen indicios desfavorables en ninguno de los cuatro factores edáficos, su valor será igual a 1 (uno) y así también lo será el FEG. En este caso, aunque no haya manifestación actual de raíces, el estrato se considera apropiado para la ocupación radical y se diagnostica como *favorable* o de gran calidad para contener raíces. En cambio, si hay indicios desfavorables, se compara el valor del FEG, que tendrá un valor mayor que 1, con el Fb. La comparación se establece como un cociente, de tal modo que el diagnóstico se basa en el contraste de los indicios desfavorables y favorables al enraizamiento. Esto significa que, si existen abundantes indicios adversos, lo que se corresponde con un alto valor del FEG, se requieren claras manifestaciones de buen enraizamiento para rechazar la presunción de que tal horizonte no es favorable a la ocupación radical. Por el contrario, si las manifestaciones de buen enraizamiento son pobres, lo que se denota a través de un bajo valor biótico, bastan comparativamente menos indicios de propiedades adversas, es decir un bajo valor de FEG, para dictaminar que tal estrato es desfavorable. El cociente entre el FEG y el Fb proporcionan así un índice de diagnóstico.

El índice de diagnóstico aumenta en proporción a la acumulación de indicios desfavorables y disminuye con el aumento de las evidencias de mayor enraizamiento efectivo.

Por necesidad diagnóstica debe establecerse un límite crítico entre estratos desfavorables y favorables a la expansión y actividad radical. Un índice edáfico igual a 3 expresa una clara situación adversa en cualquiera de las propiedades del suelo consideradas, de manera que si estas situaciones se acumulan dando un FEG igual a 3, hay marcados indicios de que existen circunstancias desventajosas en el estrato. Tendría que haber claras muestras de enraizamiento, por ejemplo, un Fb igual a 4, para rechazar la impresión desfavorable. La proporción $\frac{3}{4}$, es decir 0,75, se considera por eso como límite de aceptación, y de aquí la adopción de un índice de diagnóstico mayor o igual a 0,8 para rechazar el horizonte como apto para las raíces. En el caso de rocas, cementaciones edafogenéticas o nivel freático permanente, la asignación de un índice igual a 5 automáticamente excluye al horizonte de la exploración de las raíces.

Así, la *profundidad de suelo más utilizable por el cultivo o profundidad enraizable* se define como el espesor desde el cual los cultivos anuales estrictamente aerobios extraen mayoritariamente el agua y minerales para su desarrollo y crecimiento. Comprende todos los estratos diagnosticados como favorables, acumulativamente desde la superficie, hasta el primer estrato definido como desfavorable, o de lo contrario es la profundidad del perfil completo si es que ningún estrato es adverso al desarrollo de las raíces.

b) Profundidad enraizamiento

Es la profundidad hasta donde la actividad radical de cultivos anuales puede llegar, si bien con algunos posibles impedimentos. Se determina considerando a todos los horizontes que tengan un *factor biótico (Fb) mayor o igual a 1,75*.

4.2. UTILIDAD

Los datos obtenidos son útiles tanto para la actividad profesional: diagnóstico edáfico, como para el entrenamiento de estudiantes en Edafología y Manejo de suelos. En cualquier caso, resulta conveniente seguir una serie de pautas para cada uno de los horizontes en estudio:

- a) Si cualquier horizonte ha sido definido como desfavorable, determinar la causa: alto valor del FEG o muy bajo valor de Fb.
- b) Especificar el orden jerárquico de limitaciones de los distintos factores edáficos.
- c) Describir las causas limitantes para cada uno de los factores edáficos, determinando si su origen es genético o si se debe a inadecuados manejos culturales; por ejemplo, estructura masiva o piso de arado y sus efectos sobre las raíces.
- d) Proponer posibles alternativas de manejo tendientes a eliminar o reducir la causa limitante descrita.

En resumen, el procedimiento presentado es útil para responder a:

¿Cuáles son los horizontes de mayor calidad para las raíces? (Ordenar de mejor a peor)

¿Cuánto es el espesor enraizable? ¿Qué horizontes comprende?

Ídem de enraizamiento.

¿Qué horizontes tienen limitaciones dentro de la profundidad de enraizamiento?

¿Qué limitaciones son las más frecuentes y las más graves?

¿Qué limitaciones hay debajo de la profundidad de enraizamiento?

¿Cuánto es la capacidad de almacenamiento de agua útil?

¿Cuánto nitrógeno potencialmente mineralizable hay en la profundidad enraizable?

¿Hasta qué profundidad y con qué distribución vertical tomaría muestras de suelo para:

- Determinar el estado de fertilidad química para un cultivo determinado.
- Evaluar la evolución de la capacidad productiva: monitoreo.
- Conocer la disponibilidad de agua en un momento dado.
- Evaluar el efecto de alguna práctica agrícola o labranza.
- ¿Cada cuánto lo haría?

PARTE 5. **DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA LOS CULTIVOS**

PABLO GIBERTO Y MIGUEL PILATTI

El siguiente material de estudio tiene como objetivo brindar métodos de cálculo para determinar la disponibilidad de agua para los cultivos. En la primera parte se aportan conceptos básicos que sirven para cuantificar el agua en el suelo y en la segunda, dos procedimientos para determinar la disponibilidad hídrica para los cultivos. Las metodologías para la determinación experimental de los diferentes parámetros no son detalladas en profundidad, para los interesados se recomiendan los libros editados por Klute (1986) y Smith y Mullins (1991). También son recomendados los libros de Libardi (2005) que posee una profunda descripción matemática de la dinámica del agua en el suelo, y el de Brady y Weil (1999) para aspectos generales de edafología.

4.1. CURVA DE RETENCIÓN HÍDRICA

El decrecimiento de potencial mátrico está asociado a una disminución del contenido de agua en el suelo, el gráfico del potencial matricial (ψ_m) en función del contenido hídrico (θ), es comúnmente denominado curva de retención hídrica, curva característica de humedad o simplemente curva de retención (Childs, 1940).

La curva de retención hídrica es propia de cada suelo y condición de manejo, permite estimar ψ_m conociendo θ o viceversa y ayuda a caracterizarlo ya que propiedades físicas tales como resistencias mecánicas, compresibilidad, plasticidad y conductividad hidráulica cambian marcadamente con los cambios humedad del suelo. Además permite: (1) conocer la capacidad del suelo de retener agua; (2) estimar cantidad de agua disponible para las plantas en un momento determinado; (3) en suelos no expansivos conocer la curva de distribución del tamaño de los poros y (4) estimar de conductividad hidráulica de los suelos utilizando modelos matemáticos.

Obtención de la curva de retención hídrica

La curva de retención hídrica puede obtenerse en el laboratorio o a campo. En el primer caso se recolectan muestras que luego son saturadas en agua.

Posteriormente las muestras se colocan en mesas de succión o embudos de placa porosa (bajas tensiones) o en cámaras de presión de Richards (altas tensiones) para determinar el contenido de humedad con cada uno de los sucesivos valores de potencial mátrico aplicado. Se obtienen así, valores de θ en función de y_m que permiten posteriormente ajustar la curva característica.

Los métodos de campo requieren la medida en paralelo del potencial mátrico utilizando un tensiómetro y del contenido de agua en la profundidad establecida utilizando un método indirecto, por ejemplo gravimétrico. Los métodos de campo tienen la ventaja de poderse medir simultáneamente varias profundidades en condiciones que incluyen «overburden», fenómenos de expansión contracción, y los efectos de la calidad del agua en el lugar de medición. Las desventajas incluyen, a) se determina solamente una pequeña parte de la curva de retención (entre 0 y 8 m de tensión) por ser limitante el instrumental y b) que las condiciones experimentales no son controladas como en el laboratorio.

Interpretación de las curvas de retención hídricas

Recordando la ecuación de la capilaridad⁴ podemos prever que partiendo de una muestra saturada, con la aplicación de tensiones crecientes se produce el vaciado de poros progresivamente menores hasta que en tensiones muy altas solamente poros muy pequeños consiguen retener agua. Dado que a cada tensión corresponde el vaciado de poros de un cierto diámetro, puede atribuirse un intervalo de poros a cada incremento de tensión y por consiguiente del agua extraída. La pendiente de la curva representa, la curva de distribución del tamaño de poros, a mayor pendiente, mayor es el volumen de poros correspondientes a la tensión necesaria para vaciarlos. En rigor esto es aplicable solamente a suelos con estructura rígida.

La forma típica de la curva característica es una S invertida (Figura 4.21). Puede observarse que al comienzo, no ocurre flujo de agua de los poros más grandes hasta que la tensión llega a un determinado valor crítico llamado *potencial hídrico de entrada de aire* (ψ_e), en inglés «*air entry value*». Su valor es bien definido en suelos de textura arenosa y más difícil de distinguir en suelos de textura fina.

4 Ecuación de Kelvin: $h = \frac{2 \times S \times \cos \alpha}{r \times g}$; donde S es tensión superficial; r: radio del capilar;

g: aceleración de la gravedad y α : ángulo de contacto entre el líquido y la pared del capilar.

En el otro extremo de la curva, a muy altos valores de tensión (τ), cuando $d\theta/d\psi_m \rightarrow 0$, el valor de θ es llamado contenido hídrico residual «*residual soil water content*» (θ_r). Es necesario aclarar que cuando se usa el término tensión (τ) nos referimos al potencial mátrico en valor absoluto. Acorde a Gardner (1968) citado por Jury *et al.* (1991) el agua contenida a una tensión de 1.500 kPa (a menudo tomado como el límite inferior de humedad del suelo disponible para las plantas) está correlacionado con la superficie específica del suelo y podría representar aproximadamente 10 capas de moléculas de agua si fueran distribuidas uniformemente sobre la superficie de la partículas.

Entre los principales factores que influyen en la forma de la curva característica se encuentran la textura y la estructura (Figura 4.21). Como la cantidad de agua retenida a bajas tensiones (0–100 kPa) es fuertemente dependiente del efecto de la capilaridad, en suelos arenosos que contienen poros grandes la mayor cantidad de agua se libera a bajas tensiones (Reeve y Carter, 1991). En suelos arcillosos se liberan pequeñas cantidades de agua a bajas tensiones y se retiene gran proporción del agua a altas tensiones, donde las fuerzas de adsorción predominan sobre las capilares. Elevada cantidad de arcilla dan un contenido hídrico mayor a un potencial determinado siendo la distribución de poros más uniforme y en consecuencia, la pendiente de la curva es más gradual (Hillel, 2004).

La estructura del suelo afecta la forma de la curva característica particularmente en el intervalo de bajas tensiones (o elevado potencial mátrico) donde dominan las fuerzas capilares sobre las de adsorción (Hillel, 2004). El efecto de la compactación es disminuir la porosidad total y especialmente el tamaño de los poros interagregados, en consecuencia disminuye el contenido hídrico de saturación, y aumenta el volumen de poros de tamaño intermedio. Las curvas del suelo compactado y no compactado resultan similares a altas tensiones porque no se modifican los poros intraagregados.

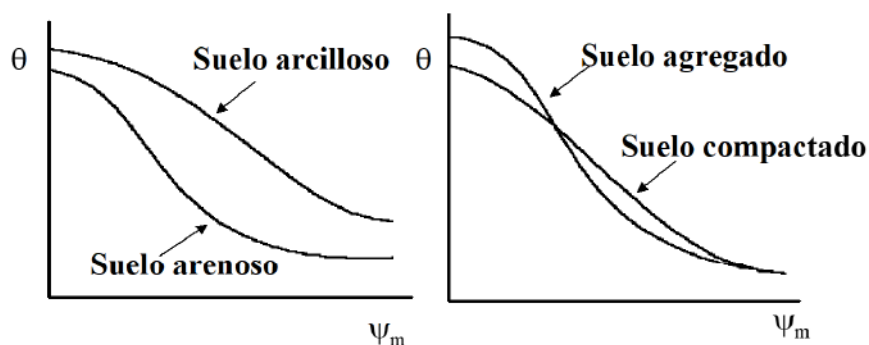


FIGURA 4.21. CURVAS DE RETENCIÓN HÍDRICA

También son importantes otros factores como la mineralogía de las arcillas, así, las arcillas del grupo de las esmectitas, con alta superficie específica, tienen una mayor fuerza de adsorción que las del grupo de las caolinitas. La materia orgánica incrementa la cantidad de agua retenida, especialmente a bajas tensiones, y en altas tensiones los suelos ricos en materia orgánica liberan el agua más rápidamente. La presencia de óxidos de hierro y carbonatos de calcio también afectan la liberación del agua, pero estos efectos son difíciles de separar del contenido de arcilla y de las buenas condiciones estructurales a las cuales a menudo están asociados (Reeve y Carter, 1991).

Ajuste de curvas de retención hídrica

En la resolución de problemas prácticos, es ventajoso tener una expresión analítica que permita estimar fácilmente θ en función de ψ_m . Para ello es necesario encontrar funciones que se ajusten de la mejor manera posible a la curva de retención de agua en el suelo. A continuación, son presentados algunos modelos matemáticos comúnmente utilizados.

Excepto para valores de θ cercanos a θ_s la curva de retención hídrica es semejante a la hipérbola:

$$|\psi_m| = a\theta^b$$

Donde:

a y b son constantes empíricas.

El valor de θ puede ser reemplazado por la saturación relativa $S_r = \theta/\theta_s$ (Gardner, 1970).

Brooks y Corey (1964) propusieron la ecuación:

$$S_e = \left(\frac{\psi_e}{\psi_m} \right)^\lambda$$

Donde el contenido efectivo de agua es $S_e = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$ y λ , un índice de distribución del tamaño de los poros característico de cada suelo con valores con valores aproximadamente entre 2 y 5. El valor de λ es más grande en suelos que tienen una distribución del tamaño de los poros uniforme y pequeño en suelos con un amplio intervalo de tamaño de poros.

El modelo de Campbell (1974) presenta que:

$$\psi_m = \psi_e \left(\frac{\theta_s}{\theta} \right)^b$$

Siendo ψ_m , el potencial mátrico del suelo; θ_s y θ_r , son los contenidos hídricos volumétricos a saturación y retenido al potencial dado; b representa el potencial hídrico de entrada de aire y c , una constante.

Las ecuaciones anteriores no ofrecen una descripción satisfactoria de la curva de retención en la región húmeda. Van Genuchten (1980) propuso una ecuación que tiene la ventaja de describir mejor la función $\psi_m = f(\theta)$ en bajas tensiones y combinado con el modelo de Mualem (1976) se puede predecir la conductividad hidráulica (K) en función de θ .

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha|\psi_m|)^n\right]^m}$$

Donde α , n y m son parámetros de ajuste y θ_s y θ_r son la humedad volumétrica a saturación y residual.

Por último, la ecuación propuesta por Norero (1980), también permite buenos ajustes requiriendo solo dos parámetros:

$$\theta = \frac{\theta_s}{1 + \alpha|\psi_m|^\beta}$$

Siendo ψ_m , el potencial mátrico del suelo; θ_s , θ son los contenidos hídricos volumétricos a saturación y retenido al potencial mátrico ψ_m , respectivamente, en cm^3/cm^3 y α , β son parámetros de ajuste de la curva.

Histéresis

La relación entre el potencial matricial y la humedad del suelo puede obtenerse de dos maneras diferentes, a) por secado, tomándose una muestra de suelo inicialmente saturada de agua y aplicando progresivamente tensiones mayores o, b) por mojado a partir de una muestra inicialmente seca al aire humedeciéndola gradualmente. El método da dos curvas de retención que generalmente son distintas debido al fenómeno denominado histéresis siendo la humedad del suelo θ en la condición de equilibrio a un dado potencial mayor en la curva de secamiento que en la de mojado (Figura 4.22). La histeresis es atribuida a la no uniformidad de poros en relación a fenómenos capilares, burbujas de aire que permanecen fijas dentro de los macroporos y fenómenos de contracción expansión durante procesos de secamiento y humedecimiento (Hillel, 2004).

La histéresis trae serios problemas en la descripción matemática de flujo de agua en el suelo. El problema es resuelto parcialmente utilizando la curva de mojado cuando se describen fenómenos por ejemplo infiltración y la curva de secamiento en fenómenos como la evaporación. La mayoría de las veces es preciso despreciar el fenómeno de histéresis (Reichardt y Timm, 2004).

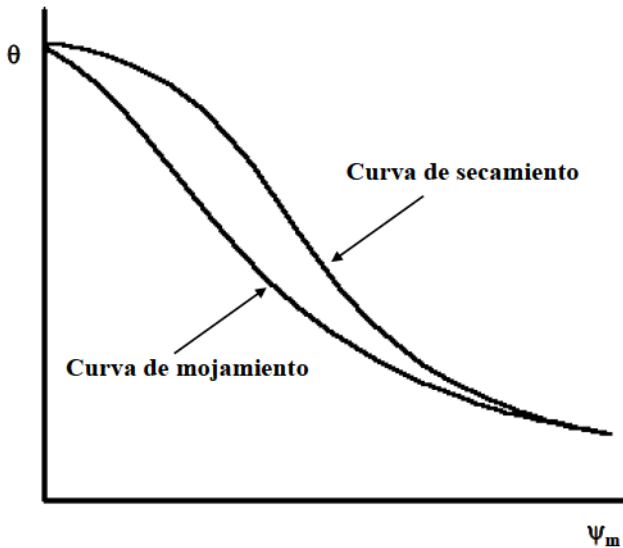


FIGURA 4.22. FENÓMENO DE HISTÉRESIS DEL AGUA EN EL SUELO

4.2. CONTENIDOS HÍDRICOS RELEVANTES

Contenido hídrico a saturación, θ_s

Cuando todos los poros están llenos con agua, se dice que el suelo está saturado y ese punto representa la máxima capacidad de retención de agua. El potencial mátrico es cero, muy cercano al del agua pura y el contenido volumétrico de agua es similar a la porosidad total del suelo (Brady y Weil, 1999).

Contenido hídrico en capacidad de campo, θ_{cc}

Después de producido el proceso de infiltración de agua en el suelo se produce su redistribución en el perfil y a medida que transcurre el tiempo la velocidad de las variaciones de contenido hídrico decrecen. Veihmeyer y Hendrickson (1949) definieron la capacidad de campo como «la cantidad de agua retenida por el suelo después de haber drenado su exceso, cuando la

velocidad del movimiento descendente prácticamente cesa, lo que normalmente ocurre dos o tres días después de una irrigación o lluvia en suelos permeables de textura y estructura uniformes».

Obviamente los criterios para tal determinación son subjetivos, dependiendo enormemente de la frecuencia y precisión con que se mide la humedad del suelo. El proceso de redistribución es continuo y no muestra interrupciones abruptas o niveles estáticos. Además, la velocidad de salida de agua de un estrato del perfil de suelo depende de su textura, conductividad hidráulica y estructura del perfil de suelo, pues la presencia de un estrato limitante al flujo en cualquier posición dentro del perfil retarda la salida de agua de todos los espesores superiores. Así, es claro que la capacidad de almacenamiento de agua no está solamente relacionada con el tiempo, sino también con la composición textural, la secuencia estratos con propiedades distintas, la humedad inicial etc.

Los suelos en los cuales el concepto más se adapta son los de textura gruesa, en los cuales la conductividad hidráulica decrece rápidamente con la disminución de la humedad del suelo y el flujo se torna muy pequeño en poco tiempo. En suelos de textura media y fina, el proceso de redistribución puede persistir de manera apreciable por varios días y hasta meses.

A pesar de todo, el concepto de capacidad de campo es considerado por muchos como un criterio práctico y útil para el límite superior de agua que un suelo puede retener. Así, por ejemplo, se calcula la cantidad de agua a ser aplicada por irrigación en base al déficit a capacidad de campo del espesor de suelo a ser regada. En estas condiciones, la capacidad de campo debe necesariamente ser determinada en el campo y el interesado debe ser consciente de sus limitaciones (Reichardt y Timm, 2004).

Contenido hídrico en el punto de marchitez permanente, θ_{pmp}

El punto de marchitez permanente, fue definido inicialmente por Hendrickson y Veihmeyer (1949) como «el contenido de humedad del suelo cuando las hojas de las plantas que crecían en él alcanzaron un estado de marchitez del que no se recuperaron al colocarlas en una atmósfera saturada sin adición de agua del suelo». Fue determinado usando como indicador una planta de girasol, aunque en la práctica se ha tomado como un valor medido directamente de la tensión matricial de 1 500 kPa (15 bares), aunque ese límite varía con el tipo de suelo, planta y condición meteorológica.

4.3. DISPONIBILIDAD DE AGUA PARA LOS CULTIVOS.

Procedimiento «estático»

Este procedimiento considera que la cantidad de agua retenida entre capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente es el agua útil para las plantas ($LAUT$). Se supone que el 50 % del agua útil es fácilmente utilizable ($LAFUT$) si la demanda evaporadora de la atmósfera es alta (verano) y 66 % si es baja.

Ecuaciones básicas:

$$LAUT = (\theta_c - \theta_{pmp}) \times E$$

$$LAFUT = LAUT \times 0,5 \text{ o } 0,66$$

Donde:

θ_c : contenido hídrico volumétrico a capacidad de campo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

θ_{pmp} : contenido hídrico volumétrico en el punto de marchitez permanente ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

E: es la profundidad de enraizamiento (cm).

$LAUT$, $LAFUT$: se expresa en cm si utilizamos las unidades anteriormente mencionadas.

A continuación, se explica paso a paso como calcular « $LAUT$ » y « $LAFUT$ » utilizando el procedimiento estático:

• *Primer paso:* Especifique la profundidad de enraizamiento, « E »

Puede calcularse utilizando tres vías alternativas, de la menos a la más precisa son:

1. Si solo tenemos el carbono orgánico, se considera la profundidad de enraizamiento aquella que tenga más de 0,5 % de C orgánico.
2. Seleccionar el espesor enraizable a partir de la textura predominante en el suelo y el cultivo de interés.
3. Utilizando la metodología propuesta en la Aplicación: «Calidad enraizable».

Atención: Los pasos que siguen a continuación deben efectuarse para cada uno de los estratos u horizontes involucrados en el espesor explorado por las raíces.

• *Segundo paso:* Especifique el contenido hídrico volumétrico en el punto de marchitez permanente, θ_{pmp}

Las alternativas que tiene para hacerlo son:

- Utilizar dato proveniente de laboratorio donde se obtuvo el contenido hídrico a 1.500 kPa en cámaras de presión de Richards.

- Estimar el contenido hídrico en el punto de marchitamiento permanente a partir de los datos de contenido de arcilla como se explicó en la Aplicación: «Estimación de datos faltantes».
- *Tercer paso:* Especifique el contenido hídrico volumétrico a capacidad de campo, θ_{cc}
Para determinarlo existen tres alternativas, ordenadas de más precisa a menos son:
1. Evaluar la capacidad de campo directamente en el campo.
 2. Determinar, en condiciones de laboratorio y sobre muestras no alteradas, el agua retenida a 0,1; 0,3 o 0,6 bares de tensión dependiendo de la textura del estrato en cuestión.
 3. Estimarlo a partir de la granulometría como se explica en la Aplicación: «Estimación de datos faltantes».

• *Cuarto paso:*

Calcule la lámina de agua útil total con la siguiente ecuación:

$$LAUT = (\theta_c - \theta_{PMP}) \times E$$

• *Quinto paso:*

Calcule la lámina de agua fácilmente utilizable total con la siguiente ecuación:

$$LAFUT = LAUT \times 0,5$$

• *Sexto paso:*

Obtenga la LAUT y LAFUT de toda la profundidad de enraizamiento sumando los valores parciales calculados para cada horizonte.

Procedimiento agroecológico

Este procedimiento fue propuesto por Norero (1980) y lo fundamentó de la siguiente manera.

En proyectos y en la práctica de riego se admite corrientemente que el agua disponible a los cultivos es aquella retenida entre los niveles energéticos correspondientes a la «capacidad de campo» y «punto de marchitez permanente». Sin embargo, no todos los autores concuerdan con esos límites, o con su definición precisa, ni mucho menos con el grado de utilización de esa agua entre esos valores de contenido hídrico. Así, algunos han comprobado experimentalmente que no existen diferencias en la utilización del agua en la gama de humedad llamada «disponible». Otros, por el contrario, han señalado un descenso progresivo en el uso del agua entre la capacidad de campo y punto de marchitamiento. También se han demostrado situaciones

intermedias. Ante esta situación y como solución práctica de compromiso, se suele adoptar, a los fines del riego, un valor igual al 50 % del total disponible en la zona de enraizamiento para designar un uso irrestricto del agua por los cultivos. En otros términos, esta sería la cantidad de agua que aseguraría al cultivo satisfacer plenamente la demanda potencial de evaporación impuesta por el clima.

En la actualidad tanto la experimentación como la teoría han logrado reconciliar los conceptos y observaciones conflictivas ya mencionadas, y han puesto en relieve el carácter dinámico de la extracción de agua del suelo por los cultivos, en claro contraste con la idea de una utilización estática basada solamente en la diferencia entre capacidad de campo y punto de marchitamiento. Ha quedado así demostrado que el suelo, el cultivo y la atmósfera forman un sistema inseparable y continuo para el transporte del agua en el ambiente natural, y que la transpiración depende de las interacciones que se establecen entre estos tres componentes del ecosistema. De aquí que para estimar las necesidades de agua de un cultivo y para tomar decisiones prácticas más eficaces respecto al riego, es conveniente comprender y evaluar cuantitativamente las interacciones entre esos tres tipos de factores agrofísicos.

Clasificación del agua disponible

La Figura 4.23 presenta la relación entre el potencial mátrico con que es retenida el agua en el suelo y la evapotranspiración relativa. Tiene una forma sigmoideal típica y representa gráficamente la siguiente fórmula, que describe cuantitativamente la «disponibilidad» del agua del suelo:

$$ET / ET_m = \left[1 + \left((S_p \times S_0)^{-0,5} \times |\Psi_m| \right)^{2,56 / \log(S_0 / S_p)} \right]^{-1}$$

Donde

ET es la evapotranspiración real del cultivo,

ET_m es la evapotranspiración máxima del cultivo,

S_p, es el potencial hídrico en el suelo a la que se inicia la reducción de evapotranspiración.

S_o, es el potencial hídrico en el suelo a la que se detiene prácticamente la evapotranspiración

Ψ_m, el potencial mátrico del suelo en valor absoluto

La Figura 4.23 se divide en tres partes:

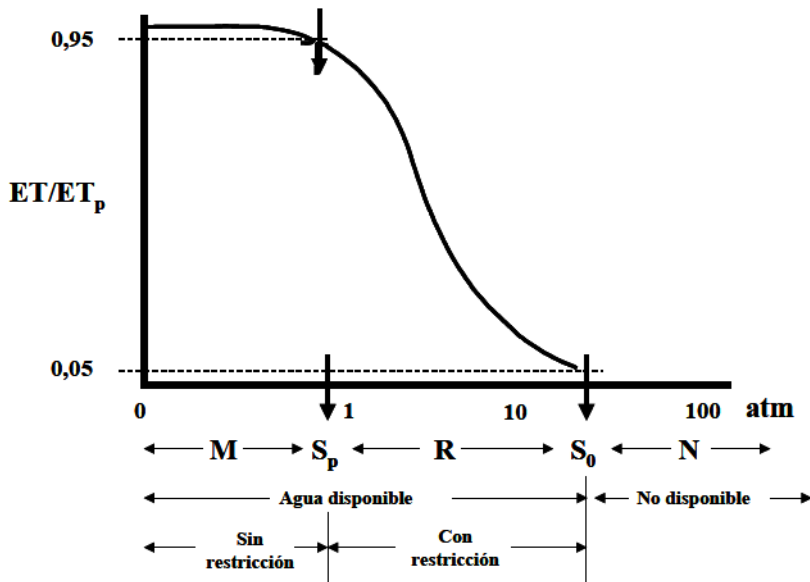


FIGURA 4.23. CLASIFICACIÓN DINÁMICA DEL AGUA DISPONIBLE EN EL SUELO

Se sugiere designar la primera zona indicada en la Figura 4.23 con la letra M, porque corresponde a una utilización máxima: el agua del suelo está disponible sin restricciones para satisfacer la demanda atmosférica. Se ha escogido la letra R para designar la segunda zona de la curva para indicar que aquí la utilización del agua es restringida, por factores del suelo y cultivo. La letra N es utilizada para indicar que el agua retenida en esa gama de valores de S no está disponible al cultivo. Entonces, el agua total disponible será aquella retenida en la zona de enraizamiento entre los niveles energéticos $S = 0$ y $S = S_0$, $(M + R)$. En la práctica, limitaciones en la oxigenación del suelo pueden también inhibir la utilización del agua en valores cercanos a $S = 0$ (cuando el potencial mátrico, S, es de 0 atm, el suelo está saturado). Si el drenaje del suelo es suficientemente rápido después de un riego o lluvia abundante, el valor superior de disponibilidad será el de capacidad de campo. Sin embargo, cabe advertir que este límite superior es consecuencia de las características hidrodinámicas del suelo y no el resultado de una vinculación directa entre energía de retención y utilización del agua por las plantas. Existen situaciones en las cuales la relación suelo-cultivo-clima exigen una demanda de agua que aún a capacidad de campo resulte imposible de satisfacer. La Figura 4.24 ilustra algunas situaciones típicas: en (a) se acusa la influencia del clima; en (b) la influencia del cultivo, y en (c), la del suelo. Además, la figura indica que no existe una relación directa o constante entre el contenido hídrico del suelo y el uso del agua por las plantas.

A continuación se explica paso a paso como calcular «LAUT» y «LAFUT» utilizando el procedimiento estático:

• *Primer paso:* Estime el potencial mátrico del suelo a la cual comienzan a cerrarse los estomas (se restringe la evapotranspiración), S_p . Utilice la siguiente ecuación, obteniendo el resultado por «tanteo» con una aproximación de $\pm 0,05$ bares.

$$S_p + \frac{0,95 \times G}{L \times E} \times ET_m \times S_p^n = S_h - 0,95 \times I \times ET_m$$

Donde:

S_p , es el potencial hídrico en el suelo a la que se inicia la reducción de evapotranspiración, en bares.

G , es un parámetro relacionado con la geometría del flujo del suelo hacia las raíces; suele adoptarse un valor de $4,21 \text{ cm}^3 \text{ día}^{-1}$.

L , es la densidad radical, en unidades de longitud por unidad de volumen de suelo (cm cm^{-3}). Varía entre $0,25$ hasta 25 cm cm^{-3} , siendo frecuentes valores entre $0,5$ y 5 cm cm^{-3} .

E , es el espesor enraizado o profundidad de enraizamiento, varía normalmente entre 30 y 180 cm . Debe estimarse según el procedimiento explicado anteriormente.

I , es un factor de la resistencia al flujo del agua a través de la planta, fluctúa entre $0,5$ y $1,1 \text{ bares día mm}^{-1}$. Suele adoptarse un valor de $1,05 \text{ bares día/mm}$.

S_h , es el potencial hídrico en las hojas a la que se inicia el cierre estomático, en bares. Fluctúa entre 3 y 20 bares, siendo frecuente el intervalo lo 8 a 12 bares.

ET_m , evapotranspiración máxima en mm día^{-1} .

n , es un coeficiente relacionado con la conductividad hidráulica del suelo. Puede adoptarse un valor $n = 1,5$ a 2 para texturas arcillosas; $n = 3$ para texturas francas y $n = 4$ para texturas arenosas.

• *Segundo paso:* Estime la potencial hídrico del agua en el suelo a la cual prácticamente cesa la evapotranspiración, S_0 (equivale a marchitez permanente). Utilice la siguiente ecuación, obteniendo el resultado por «tanteo» con una aproximación de $\pm 0,2$ bares.

$$S_0 + \frac{0,05 \times G}{L \times E} \times ET_m \times S_0^n = S_{iv}$$

Donde:

S_0 , es el potencial hídrico en el suelo a la que se detiene prácticamente la evapotranspiración, en bares.

S_{iv} , es el potencial osmótico de los tejidos vegetales. Su valor es de 200 bares para la mayoría de plantas cultivadas y de 1000 bares para especies semixerofíticas o moderadamente tolerantes a la salinidad.

• *Tercer paso:* Calcule el contenido hídrico al cual comienzan a cerrarse los estomas usando la curva de retención hídrica. En este caso usaremos la CRH de Norero (1980) presentada anteriormente. Para ello deberá utilizar como potencial mátrico el valor de S_p calculado y obtendrá el contenido hídrico volumétrico q_p .

$$\theta = \frac{\theta_s}{1 + \alpha |S_p|^\beta}$$

Si no posee los datos de la curva de retención puede estimarla calculando los parámetros α y β como se muestra en la aplicación «Estimación de datos faltantes».

• *Cuarto paso:* Calcule el contenido hídrico, θ_o , al cual cesa la evapotranspiración. De igual manera, deberá utilizar como potencial mátrico el valor de S_o calculado y obtendrá el contenido hídrico volumétrico θ_o .

$$\theta = \frac{\theta_s}{1 + \alpha |S_o|^\beta}$$

Se realizan aquí las mismas consideraciones que las realizadas en el paso anterior.

• *Quinto paso:* Calcule la lámina de agua útil total:

$$LAUT = (\theta_c - \theta_o) \times E$$

• *Sexto paso:* Calcule la lámina de agua fácilmente utilizable total:

$$LAUT = (\theta_c - \theta_p) \times E$$

Compare si el cociente LAFUT/LAUT es mayor menor o igual a 0,66 del procedimiento estático y compruebe que las principales diferencias entre este procedimiento y el estático son:

- El límite inferior de agua disponible para los cultivos no está siempre retenida a 15 bares de potencial, pudiendo ser mayor o menor según el tipo de cultivo, suelo y demanda atmosférica.
- El agua fácilmente utilizable no es el 66 % del agua útil sino que puede ser menor o mayor según la particular condición de cultivo/suelo/clima que se considere.

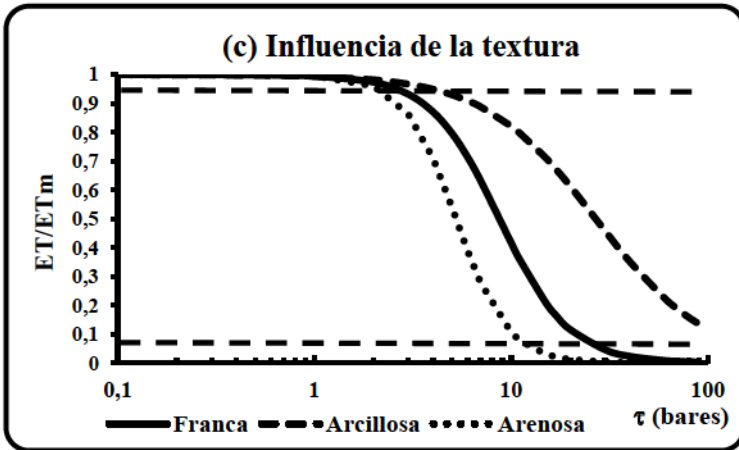
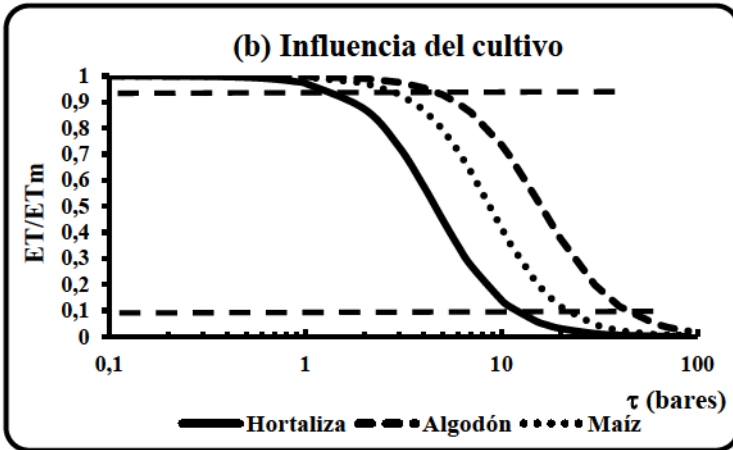
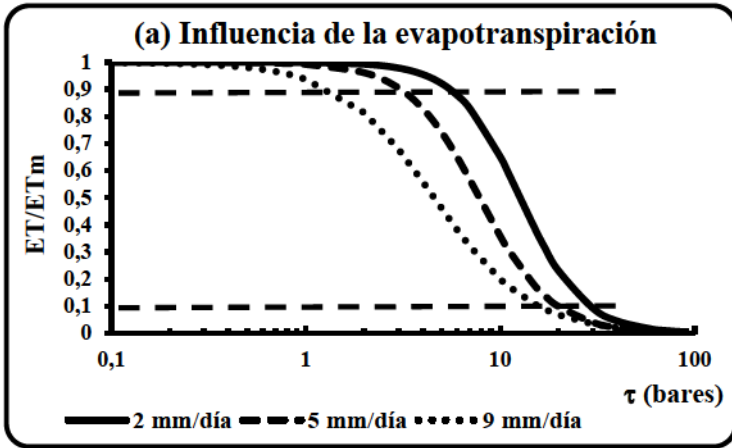


FIGURA 4.24. RELACIÓN ENTRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN RELATIVA ET/ET_m Y EL POTENCIAL MÁTRICO DEL SUELO. (A) INFLUENCIA DEL TIPO DEL CLIMA (SUELO Y CULTIVO CONSTANTE); (B), INFLUENCIA DEL CULTIVO (CLIMA Y SUELO CONSTANTES); (C), INFLUENCIA DEL SUELO (CLIMA Y CULTIVO CONSTANTES)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRADY, N. Y WEIL, R.R. (1999). *The nature and properties of soils*. New Jersey: Prentice Hall, 881pp.
- CAMPBELL, G.S. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, v:117, p.311–314.
- CHILDS, E.C. (1940). The use of soil moisture characteristics in soil studies. *Soil Science*, v.50, n.10, 239–252.
- BROOKS, R.H. Y COREY T. (1964). Hydraulic properties of porous media. *Hidrology papers*, n.3, 27 pp. Fort Collins: Colorado State University.
- HILLEL, D. (2004). *Introduction to environmental soil physics*. San Diego: Elsevier, 494 pp.
- JURY, W.; GARDNER, W.R. Y GARDNER, W.H. (1991). *Soil physics*. New York: John Wiley y Sons, 327 pp.
- KLUTE, A. (Ed.). (1986). *Methods of Soil Analysis, I. Physical and mineralogical methods*. Madison: American Society of Agronomy, 1188 pp.
- LIBARDI, P.L. (2005). *Dinâmica da água no solo*. São Paulo: EDUSP, 335 pp.
- NORERO, A. (1980). Concepto dinámico de «humedad disponible» y su estimación para fines técnicos. CIDIAT, Venezuela. 26 pp.
- REEVE, M.J. Y CARTER, A.D. (1991). Water release characteristic. In: K.A Smith; Mullins, C.E. (Ed). *Soil analysis: physical methods*. New York: Marcel Dekker. 111–153.
- REICHARDT, K. Y TIMM, L.C. (2004). Balanço hídrico. En *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri: Manole, 478 pp.
- SMITH, K.A. Y MULLINS, C.E. (1991). *Soil analysis: physical methods*. New York: Marcel Dekker. 619 pp.
- VAN GENUCHTEN, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.892–898.
- VEIHMEYER, V.J. Y HENDRICKSON, A.H. (1949). Methods of measuring field capacity and wilting percentage of soils. *Soil science*, v.68, 75–94.

5 Integración. Uso de modelo de simulación para el diagnóstico (FITOSIM)

MIGUEL PILATTI, DANIEL GRENÓN Y JORGE DE ORELLANA

INTRODUCCIÓN

Con los atributos hasta aquí propuestos y sus límites críticos solo puede emitirse un juicio agronómico cualitativo o semicuantitativo. Ante un caso dado, solo 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, solo 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 la mayoría de las 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 y Norero, 2001; Norero y Pilatti, 2002 y Pilatti *et al.*, 2011) y propuesto indicadores globales de capacidad productiva y degradación (Pilatti *et al.*, 2006).

Con el objeto de alcanzar sistemas de Agricultura Sostenible (As), numerosos autores (Hamblin, 1991, 1992; Lal, 1991, 1993; Parr *et al.*, 1992; Australian Agricultural Council, 1993; Acton y Gregorich, 1995) trataron de identificar indicadores de sostenibilidad, capaces de detectar si determinadas prácticas agrícolas favorecen la degradación edáfica o contribuyen a revertirla.

En la Argentina podemos citar a Orellana y Pilatti, 1993, 1994; Pilatti y Orellana, 1993; Cantú, 1996; Ligier, 1996; Salazar Lea Plaza, 1996; Puricelli y Krüger, 1996; Cursack *et al.*, 1997; Pilatti y Orellana, 2012.

Investigadores australianos y neozelandeses (Hamblin, 1992, Australian Agricultural Council, 1993) distinguen entre indicadores y atributos. Denominan indicador a. “un conjunto de atributos o mediciones que abarcan un aspecto particular de la agricultura, derivado de interacciones funcionales y metodologías específicas”; Ej.: Calidad edáfica, o del suelo (Soil Quality o SQ) y reservan el nombre de atributos para referirse a valores numéricos de parámetros individuales, (propiedades y componentes edáficos) cuya medición puede detectar procesos de degradación o recuperación del suelo. Este texto respetará tales denominaciones.

En la práctica, el control de la *sq* por la mayoría de los investigadores limita al monitoreo de cierto número de atributos edáficos, el cual depende de cada suelo y situación cultural. Por razones prácticas, el número de atributos que se controla es el menor posible: "Minimum data set" de Larson y Pierce (1991), aquí conjunto básico de atributos (CBA). Esto es insuficiente para cuantificar la *sq* y solo permite detectar niveles de degradación o de recuperación del suelo. No es preciso medir directamente todos los atributos monitoreados, pues algunos de ellos están vinculados entre sí y pueden inferirse unos de otros: se las denomina funciones de edafotransferencia (pedotransfer functions, Larson y Pierce 1991).

Tampoco basta la medición ocasional del CBA; se requiere conocer su dinámica. La periodicidad de control difiere según el atributo: algunos deben ser evaluados tras cada cosecha (Ej.: nutrientes disponibles); otros con menor frecuencia, según su dinámica, su vecindad de límites críticos (LC) y su influencia sobre la *sq* y los cultivos.

El mantenimiento y el incremento de la *sq*, desde el punto de vista agronómico, involucra al manejo conservacionista del suelo, y con ello al concepto de Agricultura Sostenible (AS). En este trabajo adoptaremos la definición de AS adoptada por el Congreso de los EE. UU. de Norte América (U.S. Congress, 1990) que la define como "...un sistema integrado de prácticas de producción vegetal y animal, de validez local, que debe permitir, en el largo plazo: satisfacer las necesidades humanas de alimentos y fibras / mantener la calidad ambiental y los recursos naturales básicos / hacer eficiente el uso de los recursos no renovables / utilizar y controlar los ciclos biológicos naturales / mejorar la viabilidad económica de la empresa agropecuaria / mejorar la calidad de vida de los productores y de la sociedad en su conjunto."

Algunos autores sintetizan el significado de AS en el eslogan "Producir conservando", o mejor: "Producir rentablemente, conservando los recursos naturales". Eso establece 2 objetivos básicos: a) mantener o mejorar la producción del agroecosistema y b) conservar el recurso edáfico. Sin embargo, aun cuando se disponga de un CBA idóneo y de todos sus valores, solo se tendrá información empírica de la dinámica aislada de algunas variables y, aunque ese método sirva para controlar la evolución de procesos de degradación edáfica, no proporciona información cuantitativa acerca de la productividad del suelo que requiere estimar respuestas de cultivos a un estado edáfico determinado, en un ambiente dado, considerando la totalidad de las interacciones suelo-clima-cultivo-tecnología aplicada.

Precisamente eso se puede lograr cuando los atributos estratégicamente elegidos, medidos o calculados, son insertados en "modelos de simulación del crecimiento y desarrollo de cultivos" (modelos de cultivos). Aquí proponemos usar tales herramientas para establecer índices globales e interactivos: globales porque incluyen a todas las variables edáficas y ambientales que inciden significativamente en el crecimiento de los cultivos, e interactivos

porque, cuando en el modelo se modifica alguna de esas variables, se reacomodan automáticamente todas las que tienen vinculación con ella. Además, los índices propuestos se expresan en la unidad de medida (proporción de rendimiento esperado de un cultivo) coincidiendo con el objetivo agrícola con que se evalúa el suelo, posibilitando extender sus valores a análisis económicos y financieros (tanto del suelo como de las prácticas de manejo y del producto probable de obtener).

En este capítulo se pretende:

- a) Elaborar índices globales de productividad de suelos y de degradación edáfica;
- b) Expresar cuantitativamente la Calidad edáfica (SQ) para suelos reales
- c) Discutir la utilidad de las expresiones propuestas.

5.1. MATERIALES Y MÉTODO

Concepto de Fitosfera (Norero, 1977). Denominamos Fitosfera al ecosistema específico de las plantas cultivadas. Abarca la parte inferior de la atmósfera que ocupa - o puede ocupar - el cultivo del caso, más el espesor superior del suelo hasta la profundidad en la cual han existido, existen o pueden desarrollarse raíces (fitoclima). Horizontalmente cubre la parte de agroecosistema ocupada por la población vegetal que interesa. Los límites superior e inferior varían según la etapa del cultivo. El fitoclima comprende al atmoclima, para la parte epigea, y al edafoclima, para la hipogea. Ambos espacios y las plantas reciben ingresos y egresos de materia (agua, CO_2 , O_2 , N_2 , nutrientes, plaguicidas, etc.) y energía (radiación, viento, calor sensible), los cuales se interrelacionan en diversos mecanismos y procesos (Pilatti y Norero, 1997).

Modelo de simulación del crecimiento de cultivos "FITOSIM": Debido a que satisface los requerimientos de ser un modelo teórico (basado en leyes generales del crecimiento y desarrollo de los cultivos) con capacidad de descripción, predicción y explicación, se utiliza el modelo FITOSIM (Pilatti, 1990; Pilatti *et al.*, 1993; Norero y Pilatti, 2002; Pilatti *et al.*, 2004; Pilatti *et al.*, 2011), cuyas principales características son (Cuadro 5.1):

- Dispone de una estructura matemática en el módulo de crecimiento y desarrollo del cultivo que le permite simular cualquier cultivo anual.
- Calcula el máximo crecimiento y producción que es posible esperar según cada particular interacción genotipo-ambiente meteorológico.
- Simula el crecimiento, exploración y actividad radical en suelos estratificados y con variadas limitaciones.

- Permite considerar el efecto de diversas alternativas de manejo vinculadas a las restricciones abióticas, especialmente agua (riego, drenaje) y nutrientes (fertilización).
- Es posible continuar su elaboración para incorporar la consideración de los efectos (separados y combinados) de malezas, plagas animales y enfermedades.

CUADRO 5.1. RESUMEN DE LOS FENÓMENOS MÁS IMPORTANTES SIMULADOS EN CADA SUBMODELO DE FITOSIM Y DE SUS PRINCIPALES RESULTADOS

Submodelo	Fenómenos simulados	Información resultante
Crecimiento y demanda de agua máximos	Distribución en altura (dentro del cultivo) de viento, tensión de vapor, radiación, temperatura y transpiración foliar, fotosíntesis, respiración foliar y de los otros órganos, fotorrespiración	Crecimiento máximo diario. Transpiración máxima diaria. Evaporación máxima diaria. Temperatura del cultivo. Temperatura superficial del suelo. Velocidad del viento en la superficie del suelo
Edad fisiológica y cambios fitométricos	Evolución de la edad fisiológica por efecto de la temperatura y duración de la noche. Reparto del crecimiento diario. Evolución del área foliar, ancho de hoja, altura del cultivo y albedo	Fecha de ocurrencia de estadios fenológicos. Biomasa acumulada en distintos órganos.
Crecimiento, exploración y actividad de absorción radical	Incremento de peso de raíces, elongación y ocupación de los estratos edáficos según: edad, resistencia mecánica, salinidad, deficiencia de oxígeno, temperatura, toxicidad o estratos esqueléticos. Absorción de agua y modificación de la capacidad absorbente según: categoría de raíz, edad, contacto raíz-agua, temperatura, salinidad.	Lámina de agua absorbida diariamente desde cada horizonte. Actividad absorbente relativa de las raíces a distintas profundidades
Balance hídrico	Infiltración, escurrimiento. Evaporación. Redistribución, percolación. Transpiración actual.	Contenido hídrico de cada horizonte. Láminas transpirada, evaporada, percolada y escurrida.
Modificación del crecimiento por deficiencia de agua	Apertura y cierre de estomas. Balance de energía en el cultivo: temperatura y transpiración foliar. Redistribución de biomasa. Expansión foliar. Modificación de resistencias bioquímicas.	Crecimiento diario controlado por la deficiencia de agua. Temperaturas del cultivo y del suelo con deficiencia de agua.
Balance de N Disponibilidad de P y K	Mineralización del N orgánico y de fertilizantes amoniacales. Fijación simbiótica. Demanda de N por los cultivos. Absorción de N desde cada horizonte. Lixiviación N. Requerimiento y oferta de P y K. Reducción del crecimiento diario por deficiencia de N, P y K.	N disponible y absorbido cada día. Crecimiento diario afectado por deficiencia de N, P o K.

Datos de suelo

El componente suelo es ingresado al modelo de simulación mediante los datos almacenados en el archivo específico, en el cual cada una de las situaciones a evaluar se caracteriza a través de los valores diferenciados de las siguientes variables (Cuadro 5.2):

CUADRO 5.2. ARCHIVO SUELO: VARIABLES INCLUIDAS Y AGRUPAMIENTO EN FUNCIÓN DE LOS ASPECTOS EN QUE INTERVIENEN

Símbolo	Descripción de la variable	Unidad	Gral.	Agua	Raíces	Nutr.	Manejo
NH	Cantidad de estratos en que se divide el perfil		xxx				
PROFHO	Profundidad del límite inferior de cada estrato	cm	xxx				
DSUE	Densidad de cada estrato	g cm ⁻³	xxx				
XLAT	Latitud a la que se encuentra el lote	grado	xxx				
CNI	Curva número I, usada p/ estimar escurrimiento			xxx			xxx
PE , B0	Parámetros curva de retención hídrica			xxx			
AGUA	Volumen inicial de agua contenida de c/estrato	cm ⁻³ cm ⁻³		xxx			xxx
KS	Conductividad hidráulica en saturación	cm/día		xxx			
AGUAX	Factor del estado hídrico óptimo permanente			xxx			xxx
MODESC	Factor reductor del tenor de agua que escurre			xxx			xxx
RIEGO	Factor que indica aplicación de riego óptimo			xxx			xxx
RASTR	Cantidad de rastrojo en superficie a la siembra	kg m ⁻²		xxx			xxx
CRES RMAX	Parámetros relación contenido hídrico : resistencia mecánica				xxx		
CAL	Contenido de calcio intercambiable	cmolc kg ⁻¹			xxx		
CE	Conductividad eléctrica del extracto de saturación	dS m ⁻¹			xxx		
PH	Reacción (pH) de cada estrato				xxx	xxx	
C	Carbono orgánico en cada estrato	g%				xxx	
NT	Nitrógeno orgánico total	g%				xxx	

Continúa en página siguiente

Símbolo	Descripción de la variable	Unidad	Gral.	Agua	Raíces	Nutr.	Manejo
FMIN	Factor de mineralización de la materia orgánica					XXX	
NO3	Contenido de nitrógeno como nitratos	g kg ⁻¹				XXX	
NFIJ	Cantidad de nitrógeno fijado por simbiosis	kg ha ⁻¹				XXX	XXX
PSUELO	Contenido de fósforo extraíble	g kg ⁻¹				XXX	
KSUELO	Contenido de potasio intercambiable	g kg ⁻¹				XXX	
N3P, N3K	Parám. relac. produc. relativa: disponib. de P y K					XXX	
NUTRX	Factor que indica condición óptima de nutrimentos					XXX	XXX
FERN	Cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado	kg,ha ⁻¹				XXX	XXX
TIPON	Tipo de fertilizante nitrogenado aplicado						XXX
EFIN	Eficiencia de utilización del fertilizante nitrogenado						XXX
EDADN	Días desde la siembra a la fertilización nitrogenada	día					XXX
FERP	Cantidad de fertilizante fosforado aplicado	kg ha ⁻¹				XXX	XXX
EFIP	Eficiencia de utilización del fertilizante fosforado						XXX
EDADP	Días desde la siembra a la fertilización fosforada	día					XXX
FERK	Cantidad de fertilizante potásico aplicado	kg ha ⁻¹				XXX	XXX
EFIK	Eficiencia de utilización del fertilizante potásico						XXX

Los suelos empleados en el trabajo son (INTA, 1989):

Tipo de suelo	Serie	Clase	Aptitud de uso	IP
Argiudol típico	Escuela Granja	IIeW	Agrícola-Ganadera	66
Argiudol ácuico	Recreo	IIIW	Agrícola-Ganadera	52
Natralbol típico	Cululú	IVWS	Ganadera-Agrícola	20

Cada uno de los suelos se evaluó en su condición natural (datos obtenidos de situaciones sin antecedentes agrícolas, “bajo alambrado”) y en condiciones con más de 20 años de uso agrícola y pecuario, supuestamente degradado -al menos parcialmente.

Datos del cultivo

El cultivo se modeliza a través de los datos fitométricos. Estos datos se dividen en cuatro categorías: fenométricos, auxométricos, morfométricos y fisiométricos (Ghiberto *et al.*, 1994). La fenometría es la descripción cuantitativa del inicio y fin (aparición y desaparición) de las fases fenológicas del cultivo. La auxometría es la cuantificación del cambio de biomasa de una planta individualmente y de cada uno de sus órganos (o del cultivo en total). La morfometría es la cuantificación de la forma y estructura de cada órgano de la planta y su evolución en el espacio y durante la ontogenia. Por último, la fisiometría es la cuantificación de los distintos parámetros que describen el funcionamiento interno del vegetal y su relación con el ambiente.

Los datos de los cultivos empleados en las simulaciones corresponden a un maíz ciclo largo sembrado el 15 de octubre y a un trigo sembrado el 1º de agosto.

Datos meteorológicos

Para la ejecución del modelo FITOSIM se requieren, para cada día simulado, los siguientes datos meteorológicos: radiación global ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{día}^{-1}$), temperaturas máxima y mínima (Celsius), humedades relativas máxima y mínima (%), precipitación pluvial (cm) y velocidades promedio del viento diurna y nocturna (m.seg^{-1}).

Los datos meteorológicos empleados corresponden a una serie de 50 años de datos diarios generados sintéticamente a partir de registros históricos de la estación agrometeorológica de la EEA Rafaela del INTA (Giorgis *et al.*, 1986)

5.2. MÉTODO

Se propone la utilización de métodos de simulación para determinar el potencial de producción y degradación de las tierras y la utilización de dos índices (Orellana *et al.*, 2004):

- IPP (Índice de producción potencial¹): Compara la producción potencial de un determinado cultivo con respecto a la que se obtendría en el suelo estudiado en su condición natural (“virgen”); es decir: no ha sido modificado

1 En el trabajo original, en su versión en inglés, se denominaba Propotín. En castellano se prefiere IPP dado que los profesionales del agro están acostumbrados al uso del IP para referirse a la aptitud productiva de los suelos.

por la labranza ni pastoreo. El cálculo de la producción potencial supone un genotipo y su productividad está determinada por las condiciones meteorológicas: niveles de radiación, temperatura y fotoperíodo; suponiendo que no hay limitaciones por agua. En cambio, cuando se calcula la producción de ese mismo cultivo en un suelo virgen, se incorporan todas las limitaciones edáficas que tiene el suelo en cuestión y la provisión de agua pluvial. Matemáticamente es la relación entre la productividad del suelo natural (PP nat) y la productividad potencial del cultivo evaluado (PP potencial):

$$IPP = (PP \text{ nat}) / (PP \text{ potencial}) \times 100$$

- IDE (Índice de degradación edáfica²): Expresa el porcentaje de degradación en la que se encuentra un suelo. Para ello compara la producción del suelo que se está estudiando, con la producción del mismo suelo en su estado natural (virgen). Matemáticamente es la disminución porcentual de la productividad del suelo considerando como están sus propiedades actualmente con respecto al mismo suelo en su estado natural:

$$IDE = 100 \times (PP \text{ nat} - PP \text{ act}) / (PP \text{ nat})$$

5.3. RESULTADOS

Se presentan los resúmenes de las simulaciones realizadas con el modelo Fitosim para los suelos y cultivos considerados, y los índices calculados:

Cultivo: Trigo (01/08)							
Indicador	Produc. potencial (qq/ha)	Escuela Granja		Recreo		Cululú	
		Natural	Laboreado	Natural	Laboreado	Natural	Laboreado
Mínimo	40,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cuartil 1	56,4	10,3	5,6	8,8	6,2	7,0	5,6
Mediana	67,1	15,6	8,1	14,5	9,7	9,4	7,3
Cuartil 3	75,1	20,7	11,5	24,7	14,9	12,4	9,8
Máximo	110,8	44,3	16,1	44,1	31,2	18,9	14,6
Promed	67,3	16,3	8,4	17,2	10,9	9,7	7,6
Desvío	16,1	9,0	4,0	10,6	6,8	4,2	3,3
IPP %		24		26		14	
IDE %			48		37		22

2 *Degradín* en su versión en inglés.

Cultivo: Maíz (15/10)							
Indicador	Produc. potencial (qq/ha)	Escuela Granja		Recreo		Cululú	
		Natural	Laboreado	Natural	Laboreado	Natural	Laboreado
Mínimo	127,0	64,9	34,2	44,4	31,2	30,6	21,8
Cuartil 1	149,2	81,0	40,6	53,6	35,1	40,7	28,6
Mediana	159,8	88,9	44,4	55,8	37,0	44,1	30,8
Cuartil 3	169,2	96,1	48,9	57,4	38,2	48,3	34,4
Máximo	189,4	113,2	57,7	61,7	41,2	59,3	40,7
Promed	160,0	89,3	45,1	55,1	36,6	44,7	31,4
Desvío	13,6	10,7	5,8	3,6	2,2	6,9	4,5
IPP %		56		34		28	
IDE %			50		34		30

5.4. DISCUSIÓN

Comparando los índices aquí propuestos, con la definición de indicadores preconizada por australianos y neozelandeses se observa una gran coincidencia, puesto que ambos constituyen un conjunto de atributos o mediciones que abarcan un aspecto particular de la agricultura, derivado de interacciones funcionales y metodologías específicas". Es decir que se dispone de verdaderos indicadores. De otro modo, los índices aquí propuestos permiten calcular indicadores como los definidos por Hamblin (1992) y el Australian Agricultural Council (1993).

Los índices propuestos superan a los tradicionales, basados solo en la evaluación de algunos atributos, porque:

- Reflejan la acción conjunta de todos los factores involucrados y de sus interacciones (y no solo de algunos de ellos, aislados) representando la complejidad inherente al proceso productivo y cuantificando la influencia del componente suelo.
- Al estar expresados como magnitudes concretas, asociadas al interés agronómico del uso del suelo (producción / rendimiento de cultivos) pueden traducirse en valores monetarios. Lo antedicho es especialmente destacable porque -modificando virtualmente atributos edáficos y recogiendo los efectos de esas modificaciones sobre la producción vegetal- es posible evaluar económicamente la degradación física del suelo y la incidencia, sobre ella, de cada atributo modificado.
- Ensayos virtuales como los mencionados permiten diagnosticar sobre factores limitantes de la producción vegetal y pronosticar acerca de la posible rentabilidad emergente de la modificación de propiedades o componentes defectuosos.

- La posibilidad de que el usuario defina el cultivo que empleará como objeto de las simulaciones habilita la obtención de un índice ajustado a objetivos productivos específicos. Así se puede observar que, en el caso del trigo, el suelo Recreo supera levemente al Escuela Granja (en el promedio y a partir del Cuartil 3), mientras que para maíz, la situación se invierte.
- Esto último pone de manifiesto la complejidad del proceso productivo y el valor que adquiere la metodología propuesta para poner en evidencia las interacciones entre los componentes de la fitosfera y, además, de cuantificar la probabilidad del riesgo productivo involucrado en las tomas de decisiones tecnológicas

Además, disponer de modelos propios permite acceder a sus módulos, modificar coeficientes e introducir nuevas variables; esto amplía las posibilidades del uso didáctico de los modelos (Norero y Pilatti, 2002).

Es necesario poder medir, calcular o estimar cada variable edáfica del modelo. Esto permite expresar en cifras de rendimiento los efectos que produce la modificación de cada variable y detectar la necesidad de modificarla. Los “ensayos de sensibilidad” jerarquizan los efectos de esas variables y evalúan la importancia de su inclusión -o no- como variables críticas.

Por otra parte, el uso de modelos acorta el tiempo de investigación, permitiendo conocer mediante cálculos virtuales lo que pasaría realmente tras algunos años de cultivo en condiciones conocidas posibilitando evaluar la sustentabilidad de la tecnología propuesta y sus consecuencias ambientales y económicas.

Cabe destacar que algunos autores no hallaron correlaciones positivas entre el tradicional *IP* y cultivos de trigo (Gvozdenovich *et al.*, 2010); otros sí para el cultivo de soja (Pilatti *et al.*, 1993)

Conclusión

El fin específico asignado al suelo en nuestro caso es el de la producción vegetal, que es un proceso dinámico y complejo. La herramienta que se emplee para evaluar una tierra en función de este fin específico, necesariamente deberá contemplar tales características del proceso productivo: *complejidad* que deriva en un comportamiento “caótico” [respuestas no lineales ante modificaciones aún mínimas en el sistema] y *dinámica* [alta dependencia de las condiciones iniciales del sistema: ante iguales estímulos, sistemas levemente diferentes pueden evolucionar de manera muy disímil].

Cuando la evaluación se reduce al uso de indicadores simples, restringidos a alguno de los componentes, se elimina la influencia de la compleja dinámica productiva sobre dicho índice. Pero cuando se emplean métodos basados en

modelos de simulación que incorporan esa dinámica y complejidad, se pierde el poder de síntesis y la facilidad de uso que poseen los índices simples.

Una posición intermedia es generar índices a partir de simulaciones dinámicas que representen lo más acertadamente posible al proceso productivo pero que, simultáneamente, faciliten la interpretación y aplicación tanto para el diagnóstico como para la prognosis y el diseño de alternativas de manejo. En tal caso, el índice elegido deberá: a) incorporar una cuantificación de la variabilidad y del riesgo derivados de la dinámica del sistema considerado, y b) posibilitar el empleo de diversas formas de evaluarlos según las características e intereses del usuario.

Desde el punto de vista económico, la consideración del suelo dentro de la estructura de la empresa no es representativa de la totalidad de las funciones que cumple: se lo considera solo como capital fundiario y no como factor de producción. El suelo como factor de producción sufre agotamiento, degradación y erosión bajo manejos inadecuados o puede recuperar potencialidad si es conducido con tecnología adecuada. La evaluación económica de la tierra deberá incorporar también este valor diferenciado, derivado del manejo del suelo, con el objetivo de posibilitar la cuantificación de la magnitud del cambio inducido en función de la estrategia tecnológica aplicada.

Esta última exigencia es importante porque si los procesos degradantes no se detectan a tiempo, superados ciertos niveles críticos es muy difícil retrotraerlos a valores aceptables (dinamismo, resiliencia). Así, manejos expoliantes para el suelo, que generan altos ingresos económicos en el corto plazo, se volverían inaceptables si se los evaluara incorporando también sus consecuencias en el mediano o largo plazo. Alternativamente, manejos que consideren la sustentabilidad del suelo - e impliquen altas erogaciones en el corto plazo - serían mejor evaluados si se pudiera cuantificar sus beneficios a largo plazo. Lo anterior no es contemplado con las herramientas de análisis económico tradicionales: para ellas el suelo no sufre cambio en su valor ante manejos degradantes o conservadores (no existe una "amortización" del recurso), solo se consideran los gastos directos y su resultado sobre la actividad en ejecución (márgenes brutos) y tampoco se cuantifican costos ocultos (agotamiento, acidificación, salinización, erosión, etc.) derivados de la aplicación de tecnología "más barata" pero degradante para el recurso productivo.

Un índice como el IDE posibilitaría incorporar al análisis económico (a través de la proporción de rendimiento diferencial) estos costos y beneficios no considerados en el actual cálculo de resultados económicos de la empresa agropecuaria. El valor de la tierra se podría considerar conformado por su valor inmobiliario, por las mejoras y por su capacidad productiva (IPP, IDE). Las alternativas tecnológicas aplicadas en su manejo modificarían esta última porción de su valor y podrían proyectarse sus impactos sobre los rendimientos y costos futuros (labores, insumos), posibilitando así la cuantificación del "valor agregado" de los manejos sustentables y los "costos ocultos" de los degradantes.

5.5. USO COMPLEMENTARIO DEL DIAGNÓSTICO EDAFOLÓGICO Y FITOSIM

Introducción

La cuenca hidrográfica de los Bajos Submeridionales (BS) se ubican al norte de la provincia de Santa Fe, pero los BS como Unidad Fisiográfica según Gollán y Lachaga (1939) o como “Región Natural” según INTA-MAG (1981) se extienden hasta más al sur cubriendo un área de 2,6 millones de hectáreas (aproximadamente) de los 13 millones del territorio provincial.

Los suelos predominantes en el 46% de la superficie son Natracualfes; seguidos por 23% de complejos indiferenciados y lagunas; 21 % de Natracuales y Natralboles; con solo 10% de suelos con mayor aptitud: Hapludoles, Argiustoles y Argiudoles (elaboración propia a partir mapa de suelos 1:500.000 INTA-MAG 1981 y 1983)

Por esto, se destaca la importancia para esa Región el hecho de tener un mayor conocimiento de la capacidad y limitaciones para producir de los Natracualfes. Ya se sabe, aún desde antes de que exista cartografía de suelos 1:500.000, que las limitaciones más importantes son los excesos hídricos, la salinidad y sodicidad (Cerana, 1960), confirmado posteriormente con la información del Mapa de Suelos de Santa Fe (INTA-MAG, 1983).

Según los procedimientos tradicionales de evaluación de tierras tienen una Capacidad de uso 6 ws (Giorgi *et al.*, 2010a); se basa en la Clasificación usada a nivel internacional (Klingebiel y Montgomery, 1961) con adaptaciones y mejoras para Santa Fe. Tiene un índice de aptitud productiva entre 4 y 22; este índice fue adaptado para Santa Fe (Giorgi *et al.*, 2010 b) basado en el Índice de Productividad (IP) de Sobral y Nakama (1988).

Se han desarrollado otras metodologías para el diagnóstico y evaluación de la capacidad productiva de las tierras que proporcionan información más completa y detallada que los métodos tradicionales (Pilatti 1990; Pilatti y Norero 2002; Pilatti y Orellana, 2016). Estas completan y amplían las evaluaciones tradicionales permitiendo una apreciación más detallada de las limitaciones por un lado y por otro generar valoraciones del recurso edáfico expresadas en términos de reducción del rendimiento e incremento del riesgo. Se basan en la conceptualización de un modelo ecofisiológico del crecimiento y producción de los cultivos anuales que presta especial atención a la influencia del suelo. Basado en estos métodos, el objetivo del trabajo es:

1. Determinar las limitaciones para producir que presenta el suelo dominante en los Bajos Submeridionales (Natracualf) y cuál es su orden de importancia.
2. Establecer las diferencias con uno de los mejores suelos del centro-norte de Santa Fe (Argiudol).
3. Cuantificar cuánto se limita el rendimiento girasol y cuánto es el riesgo para producir ese cultivo en cada uno de los suelos estudiados.

Un objetivo complementario de este trabajo es informar acerca de cuál el conjunto de datos necesarios para realizar el diagnóstico edafológico, cómo obtenerlos y destacar que son los mismos datos que usa Fitosim, siendo así ambas metodologías complementarias.

5.5.1. Materiales y métodos

Se determinaron las limitaciones y el riesgo productivo para producir girasol Dekalb Ac885 (uno de los 3 cultivos anuales más sembrados en los Bs) en los siguientes casos 1) Natracualf típico serie Monigote virgen o prístino (NtV); 2) Natracualf típico serie Monigote con más de 10 años de remoción (NtL); 3) Argiudol típico serie Esperanza virgen o prístino (AtV); 4) Argiudol típico serie Esperanza con más de 40 años de labranzas (AtL). Se determinaron las propiedades físicas y químicas del horizonte superficial: 14 cm en el Natracualf típico y 27 cm en el Argiudol. El resto de datos del perfil se obtuvieron de la Cartas de Suelos (INTA, 1991) o fueron estimados con funciones de edafotransferencia según lo indican Pilatti y Orellana (2016); Imhoff *et al.* (2016) (Cuadro 5.3.).

Para el análisis se utilizó el método del “diagnóstico edafológico” y un “modelo de simulación de cultivos anuales” como se detalla a continuación.

Diagnóstico edafológico

En este método Orellana y Pilatti (1999), Pilatti y Orellana (2000, 2003 y 2012) propusieron el concepto de “suelo ideal” para los cultivos (S_I) siendo aquel cuyas propiedades no limitan su crecimiento y producción. En este estudio se pretende lograr 25 qq/ha de girasol; por lo tanto todos los atributos edáficos deben presentar un nivel suficiente para permitir esa producción. Para diagnosticar se compararon los niveles que tendría el S_I con los que tiene el suelo en su condición natural (NtV y AtV) y se consideró que cuanto más se aleje de las condiciones del S_I mayor sería el grado de limitación. Los indicadores requeridos para reconocer si hay limitaciones fueron: toxicidad, aireación, captación y/o capacidad de almacenamiento de agua fácilmente utilizable, macronutrientes, fijación biológica de N e impedimentos mecánicos. En este procedimiento se utiliza la técnica del “semáforo” usando el color verde cuando el atributo evaluado es similar al del S_I, amarillo cuando hay leves diferencias, anaranjado y rojo para limitaciones en grado creciente. Los datos requeridos y la forma de obtenerlos se presentan en los Cuadros 5.4.a y b.

CUADRO 5.3. DATOS DEL SUELO NECESARIOS PARA REALIZAR UN DIAGNÓSTICO EDA-FOLÓGICO Y ORIGEN DE LA INFORMACIÓN

Determinación	Origen de los datos
Límite inferior (cm)	Carta de Suelos
Densidad del suelo (g/cm ³)	Medido en horizonte superficial, el resto estimado
Dens. partículas (g/cm ³)	Estimado
Capacidad de campo (cm ³ /cm ³)	Medido en horizonte superficial, el resto estimado
Punto marchitez permanente (cm ³ /cm ³)	Medido en horizonte superficial, el resto estimado
Pendiente del terreno (%)	Plancheta IGN ¹ o medición con nivel óptico
Carbono Orgánico Total (g%)	Medido en horizonte superficial, el resto estimado
Nitrógeno total (g%)	Medido en horizonte superficial, el resto estimado
Nitrógeno activo o particulado (g/Mg)	Medido en horizonte superficial, el resto estimado
Arcilla, limo y arena (%)	Carta de Suelos
c _{1c} (cmol _c /kg)	Medido en horizonte superficial, el resto estimado
Cationes intercambio (cmol/kg)	Medido en horizonte superficial, el resto estimado
Conductividad eléctrica extracto de satur. (dS/m)	Medido en horizonte superficial, el resto Carta de Suelos
pH (rel. 1:2,5)	Medido en horizonte superficial, el resto estimado
Moteados	Carta de Suelos
Nódulos Fe Mn	Carta de Suelos
Estructura	Carta de Suelos
Consistencia	Carta de Suelos
Barnices	Carta de Suelos
Raíces	Carta de Suelos
Roca, Cementaciones, freática	Carta de Suelos
N-Nitratos (g/Mg)	Medido en horizonte superficial
P extraíble (g/Mg)	Medido en horizonte superficial
S-so ₄ (g/Mg)	Medido en horizonte superficial
Retención hídrica f (contenido hídrico)	Medido en horizonte superficial, el resto estimado
Resistencia mecánica f (contenido hídrico)	Medido en horizonte superficial, el resto estimado
Conductiv. hidráulica saturada (cm/h)	Medido en superficie
Curva "número" II, CN del USDA	Deducido según Pilatti y Orellana (2016)
Descripción del paisaje	Carta de Suelos

Modelo de simulación de cultivos

Se utilizó el modelo de simulación de crecimiento de cultivos *Fitosim* (Pilatti 1986, Pilatti 1990; Pilatti *et al.* 1993; Norero y Pilatti 2002; Pilatti *et al.*, 2011). Éste dispone de un módulo de crecimiento y desarrollo del cultivo que le permite simular cultivos anuales a paso diario; calcula el máximo crecimiento y producción que es posible esperar según cada particular interacción genotipo-ambiente meteorológico (producción potencial); simula el crecimiento, exploración y actividad radical en suelos estratificados y con variadas limitaciones, permitiendo considerar el efecto de diversas alternativas de manejo vinculadas a las restricciones abióticas, especialmente agua (riego, drenaje) y nutrimentos (abonos). Previo a correr una simulación se definen las condiciones iniciales del suelo, como por ejemplo disponibilidad de agua a la siembra, fertilización en siembra (aplicación de nitrógeno o fósforo), etc.; esto permite suprimir, o incorporar, factores determinantes y enfocar el interés durante la simulación en algún aspecto del sistema en particular. A su vez, el modelo supone que se tiene un control total sobre malezas, plagas y enfermedades durante el ciclo del cultivo.

Los datos que se ingresaron al modelo para realizar las simulaciones son:

- a) Datos meteorológicos: se utilizaron los correspondientes a la Estación Experimental Agropecuaria de INTA en Reconquista (29°15'28.89"S y 59°44'32.65"O), en el lapso 1980-2014 lo cual permite una combinación amplia de escenarios posibles para las zonas de interés. Se consideró como fecha de siembra para las simulaciones el 1 de agosto. La información meteorológica utilizada fue: radiación global, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa máxima y mínima, precipitación y velocidades promedio del viento diurna y nocturna.
- b) Datos fitométricos: los datos fenométricos, auxométricos, morfométricos y fisiométricos (Pilatti *et al.*, 1999) empleados en las simulaciones corresponden a un determinado genotipo de girasol obtenido de la bibliografía general del cultivo y de Sartor (2013).
- c) Datos edáficos: se utilizan datos de las determinaciones edáficas obtenidas a campo a través de calicatas, toma de muestras y análisis de suelos y/o mediciones directas a campo: En el Cuadro 5.4.a y b se detallan las evaluaciones realizadas. Si bien la fecha de siembra es el 1/8, el modelo asume que el horizonte superficial está seco, el resto del perfil con 60% de agua útil, por lo tanto para sembrar se espera hasta que llueva y el potencial hídrico en superficie sea inferior a 0,2 mpa.

Con la información que se incorporó al modelo se realizaron simulaciones de producción del girasol correspondientes a los 34 años de la serie de datos meteorológicos. Se obtuvo la producción potencial (supone un genotipo y que su productividad está determinada por los niveles de radiación, temperatura y fotoperiodo) y la producción real de cada año para cada suelo en su

condición natural y cultivado. Con esa información se calcularon los índices de producción potencial (IPP) que compara la producción potencial con respecto al que se obtendría en el suelo en su condición natural (“virgen”) y el índice de degradación edáfica (IDE) que expresa el porcentaje de degradación en que se encuentra un suelo. Pueden obtenerse valores entre 0 y 100.

CUADRO 5.4.a. DETERMINACIONES QUÍMICAS REALIZADAS EN ARGUJOL TÍPICO ESPERANZA Y NATRACUALF TÍPICO MONIGOTES PARA REALIZAR DIAGNÓSTICO EDAFOLÓGICO Y UTILIZAR EN MODELO DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS

Medida	Símbolo	Relación con suelo ideal	Método	Referencia
Materia orgánica total	MO	Nutrientes Actividad biológica Agregación	Combustión húmeda Walkley-Black (Factor recuperación 0,77) (MO= C x 1,724)	SAMLA (2004), Jackson (1982)
Nitrógeno total	Nt	Nutrientes	Kjeldahl	SAMLA (2004)
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	Nutrientes Fijación simbiótica	Turbidimetría	SAMLA (2004)
Fósforo extraíble	P	Nutrientes Fijación simbiótica	Bray y Kurtz Nº 1	SAMLA (2004),
Capacidad de intercambio catiónico	CIC	Nutrientes Toxicidad	Extracción con acetato de amonio y posterior determinación del amonio mediante destilación	SAMLA (2004)
Calcio y Magnesio intercambiable	Ca ²⁺ y Mg ²⁺	Nutrientes Fijación simbiótica	Complexometría	SAMLA (2004)
Sodio y Potasio intercambiable	Na ⁺ y K ⁺	Toxicidad y Nutrimiento	Fotometría de llama	SAMLA (2004)
Conductividad eléctrica extracto de saturación	CEES	Toxicidad Fijación simbiótica	Conductimetría	SAMLA (2004)
Reacción del suelo	pH	Toxicidad Fijación simbiótica	Potenciometría (pH en H ₂ O rel. 1:2.5)	SAMLA (2004)

$$IPP = \frac{\text{Producción del suelo natural}}{\text{Producción potencial}} \times 100$$

$$IDE = \frac{\text{Producción suelo natural} - \text{Producción suelo laboreado}}{\text{Producción suelo natural}} \times 100$$

Para estimar el riesgo productivo de obtener un rendimiento de girasol igual o inferior a 7 y 10 qq/ha, para el peor y mejor suelo, se utilizó la distribución de frecuencias relativas acumuladas como estimación de probabilidad de ocurrencia de rendimientos menores a dicho umbral (Pilatti *et al.*, 2011). Se consideraron esas productividades porque son el rendimiento de indiferencia sobre campo alquilado y sin aplicar fertilizantes para girasol en esa región.

CUADRO 5.4.b. DETERMINACIONES FÍSICAS REALIZADAS EN ARGUJOL TÍPICO ESPERANZA Y NATRACUALF TÍPICO MONIGOTES PARA REALIZAR DIAGNÓSTICO EDAFOLÓGICO Y UTILIZAR EN MODELO DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS

Medida	Símbolos	Relación con suelo ideal	Método	Referencia
Densidad del suelo	ds	Varios	Cilindro	Blake, Hartge 1986
Densidad de las partículas	dp	Varios	Por cálculo en f(mo)	Pilatti <i>et al.</i> (2006)
Curva de retención hídrica	CRH	Almacenamiento y disponibilidad de agua	Mesa de tensión y cámaras de presión de Richards	Klute (1986)
Curva de resistencia mecánica	CRM	Impedimento Mecánico Fijación simbiótica	Penetrometría	Silva <i>et al.</i> (1994)
Contenido de agua del suelo saturado	θ_s	Varios	Por cálculo : $\theta_s = 1 - (Ds/Dp)$	Pilatti <i>et al.</i> (2012)
Contenido de agua a partir de la cual la aireación limita	θ_a	Aireación Fijación simbiótica	Por cálculo: $\theta_a = \theta_s - 0,15$	Pilatti <i>et al.</i> (2012)
Contenido de agua fácilmente disponible	θ_{fu}	Disponibilidad de agua	Por cálculo de curva de retención hídrica (Retenida a -0,17 MPA)	Pilatti <i>et al.</i> (2012)
Contenido de agua resistencia mecánica limitante	θ_{rp}	Impedimento mecánico	Por cálculo: $RP = a \theta^{-b} d^c$ Valor crítico según textura: 3,7 MPA	Pilatti <i>et al.</i> (2012)
Conductividad Hidráulica	K	Infiltración	Tensioinfiltrometría	Ankeny <i>et al.</i> (1991)

5.5.2. Resultados

Diagnóstico edafológico de la capacidad productiva de dos suelos contrastantes

En el Cuadro 5.5. se presentan los resultados para el NtV.

Se aclara que en el Cuadro 5.5. se jerarquizan las limitantes desde las que están más arriba hacia abajo, así primero se presenta la toxicidad: si ella está presente es inútil que haya en cantidad suficiente agua o nutrimentos. Después está la posibilidad de muerte por anaerobiosis; luego la disponibilidad de agua, nutrientes y así sucesivamente.

Al mirar ese cuadro pronto se ve y destacan las múltiples y variadas limitaciones que presenta ese suelo para producir 25 qq/ha de girasol.

CUADRO 5.5. ANÁLISIS AGRONÓMICO DE LOS DATOS DEL NATRACUALF TÍPICO SERIE MONIGOTE NO LABOREADO PARA REALIZAR UN DIAGNÓSTICO EDAFOLÓGICO DE LA CAPACIDAD PARA PRODUCIR 25 QQ/HA DE GIRASOL

Requisitos Suelo Ideal	Atributo	Nivel de referencia (Suelo Ideal)	Datos del Suelo estudiado	¿Limita?
Tóxicos	Sales, humatos	No más del 20%	20 a 40%	Ambar
	Manchón, faltan plantas	Pocos o ninguno	Muchos	Rojo
	PSI	20 - 40	PSI: 20,4	Verde
	Mn, Al	Al: pH>5 y Mn: pH>5,5	pH: 7,3	Verde
	Sales	Pr > 90%	Pr: 64,5	Ambar
Aireación	Drenaje	Moderadamente bien drenado o más	Pobremente drenado o peor	Rojo
	Freática	> 150 cm	50 a 150 cm	Ambar
	Factor de aireación	Fa < 1,5	Fa: 1,6	Ambar
Agua	Infiltración	40 a 60 mm/h	17,1 mm/h	Ambar
	L.A.F.U.	> 125 mm	141 mm	Verde
Nutrimentos	Pobre crecimiento y color	Pocos o ninguno	Muchos	Rojo
	Nitrógeno	163 kg N/ha	% Rto 82 kgN/ha	Rojo
	Azufre	28 kg S/ha	% Rto 56 16 kgS/ha	Ambar
	Fósforo	19 kg P/ha	% Rto 51 6 kgP/ha	Ambar
	Potasio	176 kg K/ha	% Rto 100 203 kgK/ha	Verde
	Calcio	> 65 % CIC	Ca: 55%	Rojo
	Magnesio	> 15 % CIC	Mg: 10%	Ambar

continúa en página siguiente

Requisitos Suelo Ideal	Atributo	Nivel de referencia (Suelo Ideal)	Datos del Suelo estudiado	¿Limita?
Impedimentos mecánicos	Huellas, pisoteo	No más del 20%	No más del 20%	
	Costra	No se presenta	Por sectores y/o incipiente	
	ic (Plántula)	ic < 0,2	ic: 1,1	
	Factor estructural	Fe < 1,5	Fe: 1,5	
Indicadores indirecto de nutrientes y antagonismo	pH	6 a 7,5	pH: 7,3	
	M.O.	> 3 %	M.O.: 4,5	
	Ca/Mg	4 – 7,5/1	Ca/Mg: 5,4	
	Ca/K	15 – 38/1	Ca/K: 8,7	
	K/Mg	< 1,3/1	K/Mg: 0,6	

PSI: porcentaje de sodio intercambiable; L.A.F.U.: Lámina de agua fácilmente utilizable; Pr: es Productividad relativa (porcentual), indica cuánto produciría por efecto de las sales respecto del máximo, sin efecto de sales; ic: Índice de encostramiento; M.O.: Contenido de materia orgánica.

CUADRO 5.6. ANÁLISIS AGRONÓMICO DE LOS DATOS DEL ARGUJOL TÍPICO ESPERANZA NO LABOREADO PARA REALIZAR UN DIAGNÓSTICO EDAFOLÓGICO DE LA CAPACIDAD PARA PRODUCIR 25 QQ/HA DE GIRASOL

Requisitos Suelo Ideal	Atributo	Nivel de referencia (Suelo Ideal)	Datos del Suelo estudiado	¿Limita?
Tóxicos	Sales, humatos	No más del 20%	No más del 20%	
	Manchón, faltan plantas	Pocos o ninguno	Pocos o ninguno	
	PSI	20 – 40 %	3,9 %	
	Mn, Al	Al: pH>5 y Mn: pH>5,5	6,0	
	Sales	Pr > 90%	100	
Aireación	Drenaje	Moderadamente bien drenado o más	Moderadamente bien drenado o más	
	Freática	> 150 cm	> 150 cm	
	Factor de aireación	Fa < 1,5	1,3	
Agua	Infiltración	40 a 60 mm/h	28 mm/h	
	L.A.F.U.	> 125 mm	147 mm	

continúa en página siguiente

Requisitos Suelo Ideal	Atributo	Nivel de referencia (Suelo Ideal)	Datos del Suelo estudiado	¿Limita?
Nutrimentos	Pobre crecimiento y color	Pocos o ninguno	Pocos o ninguno	
	Nitrógeno	163 kg N/ha	214	
	Azufre	28 kg S/ha	46	
	Fósforo	19 kg P/ha	45	
	Potasio	176 kg K/ha	682	
	Calcio	> 65 % CIC	59%	
	Magnesio	> 15 % CIC	11 %	
Impedimentos mecánicos	Huellas, pisoteo	No más del 20%	No más del 20%	
	Costra	No se presenta	No	
	IC (Plántula)	IC < 0,2	1,1	
	Factor estructural	Fe < 1,5	1,2	
Indicadores indirecto de nutrientes y antagonismo	pH	6 a 7,5	6,1	
	Mat. Org.	> 3 %	3,1	
	Ca/Mg	4 – 7,5/1	6,3	
	Ca/K	15 – 38/1	6,1	
	K/Mg	< 1,3/1	1,1	

PSI: porcentaje de sodio intercambiable; L.A.F.U.: Lámina de agua fácilmente utilizable; Pr: es Productividad relativa (porcentual), indica cuánto produciría por efecto de las sales respecto del máximo, sin efecto de sales; IC: Índice de encostramiento; M.O.: Contenido de materia orgánica.

Como era de esperar la toxicidad (en este caso por sales) y anaerobiosis están en primer lugar. El NtV analizado no tiene ni fase salina ni alcalina; si fueran esos casos las limitaciones por salinidad serían aún mayores y la toxicidad por Na se expresaría; cosa que en el caso estudiado no es limitante.

Luego limitan los nutrimentos, especialmente N y también Ca (Rojos y naranjas).

En un tercer nivel aparecen limitaciones para captar agua (infiltración), otros nutrimentos; costras y resistencias mecánicas (factor estructural). Por fin, muy secundariamente, se presenta un probable antagonismo entre Ca y K, donde la abundancia de este puede restringir la absorción del otro.

Muy distinto es lo que ocurre en el AtV (Cuadro 5.6.) donde prácticamente todos los atributos permitirían alcanzar el rendimiento deseado. El contraste entre ambos suelos se corresponde con lo que se constata empíricamente.

Nótese que lo valioso es que se han identificado cuáles son las limitaciones y se las ha jerarquizado según el grado de restricción que imponen: esta información es vital para definir el tratamiento o plan de manejo edafotécnico a aplicar.

Modelo de simulación de cultivos: FITOSIM

Al comparar ambos suelos con Fitosim se encuentra lo siguiente (Cuadro 5.7.).

La producción potencial del ambiente meteorológico para el genotipo de girasol utilizado supera los 43 qq/ha. El AtV en su condición natural aprovecha de ese potencial el 62% (IPP= 62; lo que equivaldría al conocido y genérico IP) pero el NtV, dado sus múltiples limitaciones solo es capaz de producir el 17 % del potencial (Figura 5.1.)

Cuando se utilizan los datos de ambos suelos labreados se aprecia la disminución de los rendimientos medios (Cuadro 5.7.) con respecto a la condición prístina o natural. Con ese contraste es posible calcular el índice de degradación Edáfica (IDE) que en el mejor suelo es del 55%; es decir el Argiudol con el uso de la tierra que ha tenido durante muchos años ha perdido más de la mitad de su capacidad productiva. En cambio, el Natracualf solo ha declinado por el uso un 14 %. Obviamente los mejores suelos son los que también tienen mayores posibilidades de deterioro: que aparezcan más limitaciones o se profundicen las existentes originalmente. En cambio, los suelos que naturalmente ya tienen grandes limitaciones (solo producen poco más de 7 qq/ha) no es mucho más lo que pueden empeorar, siempre desde la óptica productiva.

CUADRO 5.7. RESUMEN DE LAS PRINCIPALES ESTADÍSTICAS DE SIMULAR LA PRODUCCIÓN DE GIRASOL EN EL NORTE DE SANTA FE PARA ESTIMAR EL RENDIMIENTO POTENCIAL Y EL QUE SE OBTENDRÍA EN EL MEJOR SUELO (ARGIUDOL) Y EN EL MÁS REPRESENTATIVO DE LOS BAJOS SUBMERIDIONALES (NATRACUALF). TAMBIÉN SE EVALÚA PARA CADA SUELO EL ÍNDICE DE PRODUCCIÓN POTENCIAL (IPP); EL ÍNDICE DE DEGRADACIÓN EDÁFICA (IDE, COMPARANDO “NATURAL” VS. LABOREADO) Y EL RIESGO DE PRODUCCIÓN

Cultivo Girasol		Condiciones meteorológicas		1980 a 2014, Reconquista (Santa Fe)	
Indicador	Producción potencial (qq/ha)	Argiudol típico Esperanza		Natracualf típico Monigote	
		Natural	Laboreado	Natural	Laboreado
Mínimo	32,4	5,6	3,6	2,3	3,0
Máximo	53,1	42,0	24,1	24,3	19,0
Mediana	42,8	30,7	12,6	4,8	4,9
Promedio	43,3	26,7	12,0	7,4	6,4
Desvío	4,6	12,0	5,7	6,1	4,3
IPP		62 %		17 %	
IDE			55		14
Riesgo		14 %	36 %	74 %	78 %

Riesgo se asume que el rendimiento de indiferencia sobre campo alquilado y sin aplicación de fertilizantes es de 10 qq/ha y 7 qq/ha para el mejor y peor suelo. Se usó el modelo de simulación de cultivos: Fitosim

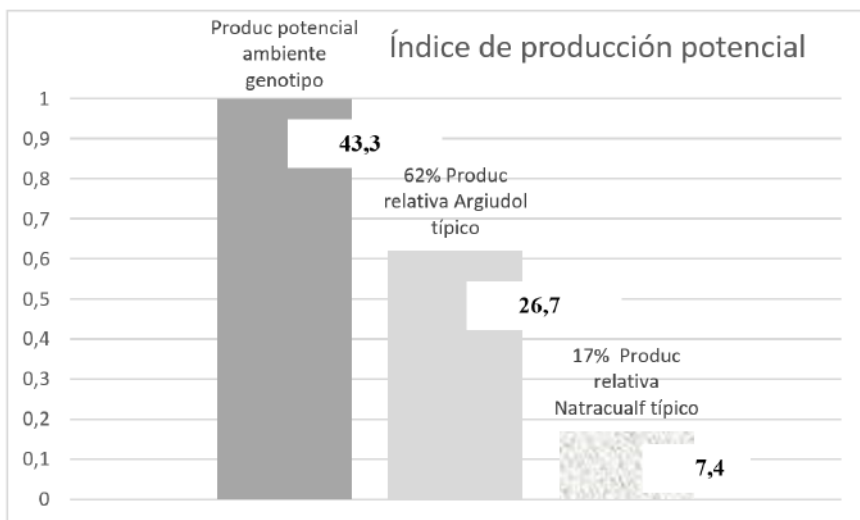
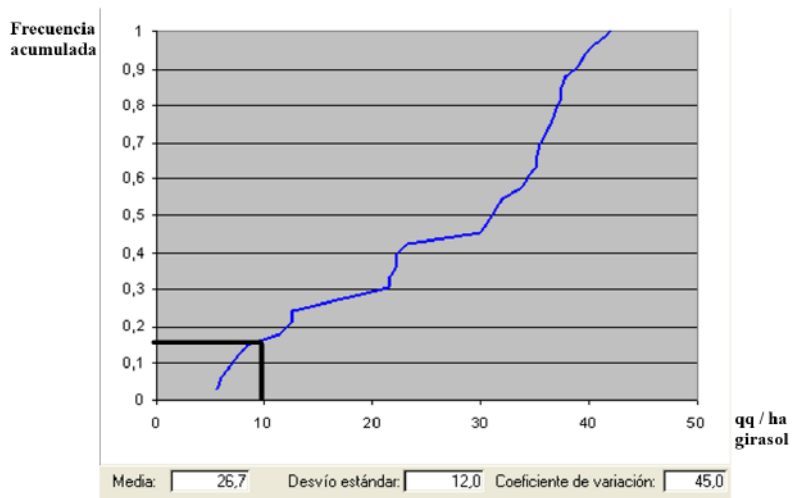
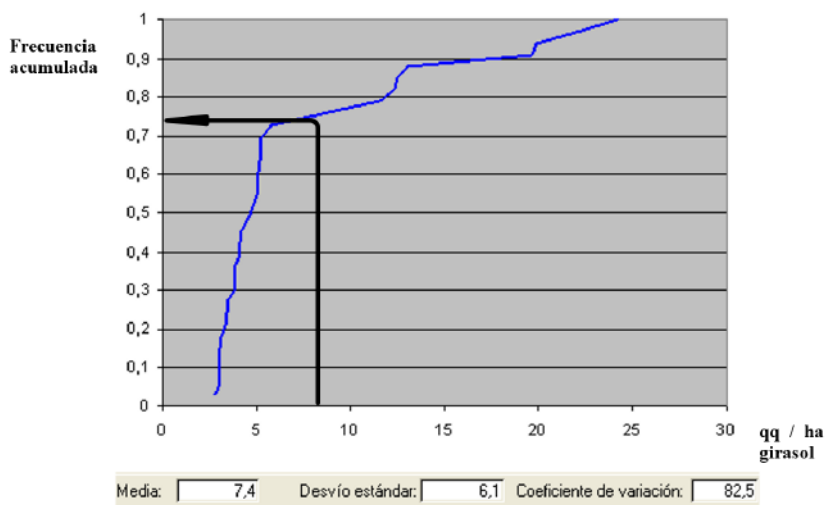


FIGURA 5.1. RENDIMIENTO POTENCIAL DEL GIRASOL PARA EL NORTE DE SANTA FE (OBTENIDO USANDO MODELO DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS; FITOSIM PARA EL LAPSO 1980-2014) Y PRODUCCIÓN MEDIA ESTIMADA PARA EL MEJOR SUELO DEL CENTRO NORTE SANTAFESINO (ARGIUDOL TÍPICO) Y EL MÁS REPRESENTATIVO DE LOS BAJOS SUBMERIDIONALES (NATRACUALF TÍPICO)



A-



B-

FIGURA 5.2. RIESGO DE PRODUCCIÓN O DE NO LOGRAR EL RENDIMIENTO DE INDIFERENCIA PARA UN CULTIVO DE GIRASOL EN EL NORTE DE SANTA FE SOBRE UN ARGUJOL TÍPICO ESPERANZA (A-) Y NATRACUALF TÍPICO MONIGOTE (B-) AMBOS EN SU CONDICIÓN NATURAL. LA FLECHA INDICA QUE EL RENDIMIENTO DE INDIFERENCIA SOBRE CAMPO ALQUILADO Y SIN APLICAR FERTILIZANTES ES DE 7 Y 10 QQ/HA PARA EL PEOR Y MEJOR SUELO

Conclusiones

Las limitaciones que tiene para producir el Natracualf típico, en orden de importancia son: toxicidad (en este caso por sales) y anaerobiosis están en primer lugar. Luego limitan los nutrimentos N y Ca. También tiene limitaciones para captar agua (infiltración) y deficiencias de otros nutrimentos; además de costras y resistencias mecánicas.

Son notorias y múltiples las diferencias con un Argiudol típico: pueden distinguirse claramente no solo por la experiencia práctica sino por los procedimientos aquí utilizados.

La capacidad potencial de producción del genotipo/ambiente es elevada, equivale a 43,3 qq girasol/ha; sin embargo, el Natracualf solo es capaz de producir 7,4 qq girasol/ha con un riesgo de producción que asciende al 74 %.

NATRACUALF TÍPICO MONIGOTES

HORIZONTE	E	Bt1	Bt2	BC	C
Límite inferior (cm)	13	43	79	105	195
Arcilla (%)	27	45	45	42	29
Limo (2 a 50µm)	70	53	53	56	62
Arenas (%)	3	2	2	2	9
Densidad de partícula (g/cm ³)	2,49	2,62	2,63	2,65	2,66
Densidad del suelo (g/cm ³)	1,36	1,30	1,30	1,29	1,33
Capacidad de campo (cm ³ /cm ³)	0,340	0,470	0,540	0,480	0,420
Macroporosidad (cm ³ /cm ³)	0,116	0,033	-0,034	0,034	0,077
Marchitez permanente (cm ³ /cm ³)	0,130	0,230	0,230	0,210	0,150
Carbono Orgánico Total (g%)	2,62	0,62	0,38	0,20	0,06
Nitrógeno total (g%)	0,18	0,055	0,044	0,035	0,02
Factor de min. de N	0,12	0,07	0,01	0,01	0,01
N activo o particulado (g%)	0,0216	0,0039	0,0004	0,0004	0,0002
N-Nitratos (g/Mg)	7	7	7		
P extraíble (g/Mg)	14	14	14		
S de so4 (g/Mg)	10	10	10		
Ca intercambiable (cmolc/kg)	11,3	14,9	16,8	16,2	10,9
Mg intercambiable (cmolc/kg)	2,1	3	2,8	1,3	4,1
Na intercambiable (cmolc/kg)	4,2	6,2	6,2	8,6	8,3
K intercambiable (cmolc/kg)	1,3	1,7	2,1	2,4	2,3
c1c (cmolc/kg)	20,6	25,8	27,9	28,5	25,6
Saturación de bases (%)	92	100	100	100	100

Continúa en página siguiente

HORIZONTE	E	Bt1	Bt2	BC	C
pH (rel. 1:2,5)	7,3	8,4	8,5	8,9	8,8
α curva retención hídrica	0,0154	0,00028	0,00018	0,00068	0,00555
β curva retención hídrica	0,529	0,961	0,929	0,797	0,631
a resistencia mecánica	0,0318	0,0054	0,0046	0,0042	0,0048
b resistencia mecánica	-3,075	-3,975	-3,975	-3,825	-3,175
c resistencia mecánica	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
Conductividad hidráulica (cm/h)	0,44	0,18	0,18	0,18	0,37
Conductividad eléctrica (dS/m)	6	3,9	4,7	3,9	1,3

ARGIUDOL TÍPICO ESPERANZA, NO LABOREADO ("VIRGEN")

HORIZONTE	A	AB	Bt1	Bt2	Bt3	BC	C
Límite inferior (cm)	27	40	68	97	130	165	225
Arcilla (%)	28,7	32,9	59,4	54,4	47	42,3	29,1
Limo (2 a 50 μ m)	66,6	63,2	38,6	43,2	49,6	54	66,2
Arenas (%)	4,7	3,9	2	2,4	3,4	3,7	4,7
Densidad de partícula (g/cm ³)	2,52	2,59	2,63	2,65	2,65	2,65	2,66
Densidad del suelo (g/cm ³)	1,21	1,32	1,32	1,29	1,32	1,34	1,35
Capacidad de campo (cm ³ /cm ³)	0,397	0,393	0,422	0,401	0,392	0,374	0,336
Macroporosidad (cm ³ /cm ³)	0,124	0,099	0,075	0,111	0,107	0,121	0,154
Marchitez permanente (cm ³ /cm ³)	0,131	0,167	0,268	0,252	0,236	0,220	0,149
Saturación (cm ³ /cm ³)	0,468	0,443	0,447	0,461	0,450	0,445	0,441
Carbono Orgánico Total (g%)	2,15	1,00	0,48	0,20	0,22	0,11	0,04
Nitrógeno total (g%)	0,185	0,082	0,085	0,048	0,04	0,03	0,03
N activo o particulado (g%)	0,0278	0,0066					
N-Nitratos (g/Mg)	15	15					
P extraíble (g/Mg)	47	25					
S de so ₄ (g/Mg)	13	10					
Ca intercambiable (cmolc/kg)	10,5	10	9,1	8,4	7,1	6,9	8

Continúa en página siguiente

HORIZONTE	A	AB	Bt1	Bt2	Bt3	BC	C
Mg intercambiable (cmolc/kg)	1,8	1,4	4,4	4,6	5	4,2	4
Na intercambiable (cmolc/kg)	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
K intercambiable (cmolc/kg)	1,5	2,4	3,9	3,7	3,6	3,6	3,2
cic (cmolc/kg)	17	14,9	19,4	18,5	16,8	16,5	17,1
pH (rel. 1:2,5)	6,1	6	6,4	6,5	6,3	6,6	7
α curva retención hídrica	0,5355	0,5201	0,5106	0,4913	0,4917	0,4765	0,4531
β curva retención hídrica	-0,1304	-0,1214	-0,0824	-0,0882	-0,0979	-0,1048	-0,1295
a resistencia mecánica	0,0219	0,0088	0,0038	0,0034	0,0039	0,0039	0,0047
b resistencia mecánica	-3,16	-3,37	-4,695	-4,445	-4,075	-3,84	-3,18
c resistencia mecánica	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
Conductividad eléctrica (dS/m)	0,18	0,21	0,54	0,51	0,4	0,38	0,67
Ks (mm/h)	28						

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACTON, D.F. & L.I. GREGORICH (Eds.) (1995). *The health of our soils*. Toward Sustainable Agriculture in Canada. Centre for Land and Biological Resources Research. Research Branch. Agriculture and Agri – Food, Canada. Publication 1906/E.
- AUSTRALIAN AGRICULTURAL COUNCIL. STANDING COMMITTEE ON AGRICULTURE AND RESOURCE MANAGEMENT (1993). *Sustainable Agriculture: Tracking the Indicators for Australia and New Zealand*. SCARM Report 51. 62 pp.
- CANTÚ, M.P. (1996). Usos y aplicaciones de los mapas de suelos en la cartografía ambiental. En Moscatelli et al. (1996). Op.cit.:11-24.
- CERANA, L.A. (1960). Suelos de la fracción norte de los bajos submeridionales de la provincia de Santa Fe. *IDIA* 1:180-183.
- FAO (1995). Planning for sustainable use of land resources: towards a new approach, W.G. Sombroek and D. Sims. *Land and Water Bulletin* 2, Rome.
- GIORGI, R., TOSOLINI, R., SAPINO V., LEÓN., C. (2010a). Agrupamiento por aptitud agropecuaria de las tierras de la Provincia de Santa Fe (GAT) - I. Conceptos del sistema y II. Procedimientos operativos para la clasificación de las unidades cartográficas en clases y subclases de aptitud agropecuaria. <http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/suelos/GAT.htm>
- GIORGI, R., TOSOLINI, R., SAPINO V., LEÓN., C. (2010b). *Índices de aptitud agropecuaria de las tierras de la Provincia de Santa Fe*. <http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/>
- GVOZDENOVICH, J.; BARBAGELATA P.; TASI H; PAPANOTTI O. (2010). Validación del índice de productividad específico para trigo como predictor del rendimiento. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata (Argentina).
- 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 p.
- IMHOFF, S., PIRES DA SILVA, A., GIBERTO, P.J., TORMENA, C.A., PILATTI, M.A., LIBARDI, P.L. (2016). Physical Quality Indicators and Mechanical Behavior of Agricultural Soils of Argentina. *PLoS ONE* 11(4): e0153827.oi: 10.1371/journal.pone.0153827. PC. Abhilash, Banaras Hindu University, India.
- INTA (1989). Carta de suelos de la República Argentina, Esc. 1:50.000. Hoja Esperanza-Pilar.
- INTA (1991). Carta de Suelos de la República Argentina Hojas 3160-26 y 25-Esperanza Pilar. 135 pp.
- KLINGEBIEL A. Y P.H. MONTGOMERY (1961). *Land Capability Classification, Agriculture Handbook No. 210*. Washington, DC: Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture.
- LAL, R. (1991). Soil Structure and Sustainability. *J. Sustainable Agriculture* 1 (4):67-91.
- LARSON, W.E. & F.J. PIERCE (1991). Conservation and enhancement of soil quality. In J. Dumanski, E. Pusparajah, M.Latham & R. Myers (eds.) *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World*. Publ. International Board for Soil Research and Management, Bangkok, Thailand. Vol. 2:175-204.

- LIGIER, H.D. (1996). Mapas de suelos, información de base para evaluar aptitud de tierras para cultivos alternativos en el área subtropical argentina. En Moscatelli et al. Op. Cit. :25-38.
- MOSCATELLI, G., PANIGATTI, J.L. Y DI GIACOMO, R.M. (Eds.) (1996). *Suelos: Utilización de la Cartografía para el uso Sustentable de las Tierras*. INTA, Programa Nac. de Suelos. Subprograma Reconocimiento de Suelos. 117 p.
- NORERO, A.L. Y M.A. PILATTI (2002). *Enfoque de sistemas y modelos agronómicos: necesidad y método*. Universidad nacional del Litoral. 161pp. ISBN 987-508-203-12 (Cátedra: Ciencias Agrarias).
- NORERO, A. (1977). La fitosfera: el ambiente físico de las plantas cultivadas. *Ciencia e Investigación Agraria* 4(4):263-272.
- ORELLANA J.A. DE, PILATTI, M.A., GRENÓN, D. A. (1997). Soil Quality: an approach to the physical state assessment. *J. Alternative Agriculture* 9(2-3):91-108.
- ORELLANA J.A. DE Y PILATTI, M.A. (1997). Indicadores edáficos en Agricultura Sostenible. I) Selección de variables relevantes. 13 pp. XVI Congreso Arg. de la C. del Suelo, Carlos Paz, mayo de 1998.
- ORELLANA J.A. DE, PILATTI, M.A. Y GRENÓN, D. (2004). Propotín y Degradín: Índices globales de productividad y degradación de suelos. Propuesta de un nuevo método e indicadores. XIX Congreso Argentino de la Ciencia el Suelo (Paraná, Entre Ríos).
- ORELLANA, J.A. DE Y PILATTI, M.A. (1993). Posibles indicadores edáficos de sostenibilidad. I: la estabilidad de agregados. Actas XIV Cong. Arg. de la Ciencia del Suelo:19-20. Mendoza.
- ORELLANA, J.A. DE Y PILATTI, M.A. (1994). La estabilidad de agregados como indicador edáfico de estabilidad. *Ciencia del Suelo* 12 (2):75-80.
- ORELLANA, J.A. DE Y PILATTI, M.A. (1999). The Ideal Soil: I) An Edaphic Paradigm for Sustainable Agriculture. *J. of Sustainable Agriculture* 15 (1): 47- 59.
- ORELLANA, J.A. DE; PILATTI, M.A. Y GRENÓN, D. (2004). Propotín y Degradín: Índices globales de productividad y degradación de suelos. Propuesta de un nuevo método e indicadores. XIX Congreso Argentino de la Ciencia el Suelo (Paraná, Entre Ríos). Actas de Resúmenes. 391 pp. Trab. en CD adjunto 10 pp.
- PARR, J.F., PAPENDICK, R.I., HORNICK, S.B., MEYER, R.E. (1992). Soil Quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Amer. J. Alternative Agriculture* 7(1-2):5-11.
- PILATTI, M.A. Y J. A DE ORELLANA (2012). Suelos ideales para agricultura sostenible. *Revista FAVE sección Ciencias Agrarias*, Vol.11 N°1- 65-87.
- PILATTI, M.A., NORERO, A.L. Y GRENÓN, D.A. (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.A. Y A.L. NORERO (2004). *Simulación de cultivos anuales. Formulaciones básicas del desenvolvimiento normal*. Universidad Nacional del Litoral, 148pp. ISBN 987-508-256-2 (Cátedra: Ciencias Agrarias).
- PILATTI, M.A., GRENÓN, D., DE ORELLANA, J.A. Y 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.A.; ORELLANA DE J.A.; PRIANO, L.J.J.; FELLI, O.M Y D.A. GRENÓN (1988). Incidencia de manejos tradicionales y conservacionista sobre propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo de un Argiudol en el sur de Santa Fe. *Ciencia del Suelo* 6 (1): 19-29.
- PILATTI, M.A. Y 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.A. Y J.A. DE ORELLANA (1997). Indicadores edáficos en Agricultura Sostenible. II: Idoneidad de variables edáficas para evaluar sostenibilidad en agroecosistemas. Actas XVI Congr. Argentino de la Ciencia del Suelo. Carlos Paz, mayo de 1998.
- PILATTI, M.A. Y 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. (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.A. (1989). Estimación del punto de marchitez permanente en Molisoles de Santa Fe. *Ciencia del Suelo* 7 (1-2):103-106.
- PILATTI, M.A, GRENÓN, D.A., DE ORELLANA, J.A. Y 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.A., PRIANO, L.J. Y J.A. DE ORELLANA (1987). Modificaciones producidas en el suelo por plantas forrajeras. *C. del Suelo* 5(2): 150-157.
- PILATTI, M.A, ORELLANA, J.A. DE Y FELLI, O.M. (2003). The Ideal soil: III Fitness of Edaphic Variables to Achieve Sustenance in Agroecosystems. *J. of Sustainable Agriculture* 22 (2): 109-132.
- PILATTI, M.A. Y J.A. DE ORELLANA (1994). *Instrucciones para tomar muestras de suelos*. 2ª. Ed., corregida y ampliada. Comunic. FAVE, C-002-AD-002, 10pp.
- PILATTI, M.A. Y A.L. NORERO (2002). *Simulación de cultivos anuales. Formulaciones básicas del desenvolvimiento normal*. Universidad Nacional del Litoral, 131pp.
- PILATTI, M.A. Y D.A. GRENÓN (1995). Utilidad de los modelos de simulación para evaluar el impacto de propiedades físicas del suelo sobre la producción de los cultivos. Actas Reunión Nac.Física de Suelos, Paraná 13 pp.
- PILATTI, M.A. Y J.A. ORELLANA DE (2000). The Ideal Soil: I) An Edaphic Paradigm for Sustainable Agriculture. *J. of Sustainable Agriculture* 15 (1): 47 a 59.
- PILATTI, M.A. (1986). Análisis agrofísico de la relación entre la dinámica hídrica en la fitósfera y el desarrollo y producción de los cultivos. Tesis para optar al Grado de Magister Scientiae en Riego y Drenaje de Tierras Agrícolas. CIDIAT, Universidad de los Andes. Venezuela. 209 pp y Anexos.
- PILATTI, M.A.; VEGETTI, A. Y P. GHIBERTO (1999). Fitometría. *Revista FAVE*, 13 (1): 23 a 37.
- PILATTI, M.A.; ORELLANA DE, J.A. Y O. FELLI (2003). The Ideal Soil: III) Fitness of Edaphic Variables to Achieve Sustenance in Agroecosystems. *J. of Sustainable Agriculture* 22 (2): 109 - 132.

- PURICELLI, C.A. Y H.R. KRUGER** (1996). Utilización de la información edáfica disponible para el sudoeste bonaerense en la Agricultura Sustentable. En Moscatelli *et al.*, Op. cit. :101 - 114.
- SALAZAR LEA PLAZA, J.C.** (1996). Aplicación de la cartografía y bases de datos de suelos en el diagnóstico de la degradación del ambiente. En Moscatelli *et al.*, Op. Cit.:56-64.
- SARTOR, S.** (2013). Girasol en el noreste santafesino: seguimiento de cultivos y uso de modelo de simulación para la asistencia técnica. Práctica profesional (Trabajo final de graduación) FCA-UNL. 92 pp.
- SOBRAL, R. Y NAKAMA, V.** (1988). Índices de productividad (IP). Método paramétrico para la evaluación de tierras. XII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Corrientes.
- US CONGRESS** (1990). Food, Agriculture, Conservation and Trade Act of 1990: 3705-3706. Public Law 101-624. U.S. Government Printing Office. Washington DC.

Sobre las autoras y los autores



CARLOS AGUSTÍN ALESSO. Ingeniero Agrónomo (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral). Dr. en Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Córdoba). Profesor Adjunto de Estadística (FCA, UNL). Investigador Asistente (CONICET). Participa activamente en la enseñanza de métodos estadísticos aplicados a problemas agronómicos en cursos de grado y posgrado. Conduce investigaciones sobre diseño de experimentos y métodos de análisis de datos obtenidos con tecnologías de agricultura de precisión. Presentó trabajos en congresos y escribió artículos en revistas científicas sobre temas relacionados con suelos y cultivos. Colabora activamente en proyectos de investigación dando soporte sobre metodología estadística.



JORGE ALBERTO DE ORELLANA. *Études Supérieures Agronomiques* (Paris, 1960). Fundador y Profesor Titular de Edafología (FAVE, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral). Jurado de concursos docentes y de tesis de grado y de posgrado. Investigador del CONICET. Director de Proyectos de Investigación y Desarrollo (UNL, CONICET). Miembro del Proyecto Internacional ALFA-GEASUD. Autor y coautor de indicadores de productividad y degradación de suelos. Integró el CD directivo de la FCA y presidió comisiones de especialidades. Fue presidente del Comité de Física de Suelos (Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo). Profesor Honorario de la UNL. Participó en numerosos congresos como Presidente de Comisión, relator y exponiendo trabajos. Publicó un centenar de artículos en revistas científicas argentinas y extranjeras.



OSVALDO MARIO FELLI DI ANGELO. Ingeniero Agrónomo. Cursos Completos Maestría Docencia Universitaria. Investigador nivel IV. Integrante de la Comisión Seguimiento Plan Curricular (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral). Profesor adjunto Edafología. Especialidad temática en física y química, degradación y biología de suelo. Integrante en el diseño y ejecución de nodos de integración agronómica. Especialización y perfeccionamiento en temática docente y pedagógica. Perfeccionamiento en educación a distancia (E-learnig); operador de cursos en plataformas de formación. Operador-tutor de Suelos en la Tecnicatura de Administración de Empresas Agropecuarias (UNL). Presentó trabajos en congresos y en revistas especializadas

sobre fertilidad, degradación y biología de suelos de la provincia de Santa Fe. Integrante del equipo de diagnóstico y resolución de problemas agronómicos a través del enfoque de sistemas. Integrante del seguimiento y evaluación del uso de enmiendas orgánicas mitigadoras de la degradación de suelos.



PABLO JAVIER GHIBERTO. Ingeniero Agrónomo (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral). MSc. en Agronomía. Dr. en Ciencias, área Suelos y Nutrición de Plantas (ESALQ/USP). Profesor Adjunto de Edafología (FCA, UNL). Investigador del Instituto Ciencias Agropecuaria del Litoral (UNL/CONICET). Tiene experticia en Ciencia del Suelo con énfasis en física y fisicoquímica de suelos, agua en el suelo, movimiento de agua y solutos, balance hídrico de cultivos, uso de isótopos como marcadores en experimentos agrícolas, calidad de suelos y uso de purines en agricultura. Responsable de los Laboratorios de Química y de Física de suelos (FCA, UNL). Revisor de periódicos científicos en el ámbito nacional e internacional. Director de tesis de maestría y doctorado. Consejero Directivo (FCA, UNL). Director y evaluador de programas y proyectos, presentó numerosos trabajos en congresos, publicó artículos científicos y capítulos de libros.



DANIEL GRENÓN. Ingeniero Agrónomo (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral). Diploma en Computación y Sistemas de Información (Oxford), especializado en Agromática. Profesor Asociado, Cátedra de Agromática. Investigación y desarrollo de modelos de simulación y sistemas de información agropecuarios. Simulación del crecimiento y desarrollo de cultivos, de sistemas de producción animal y de sistemas de información gerencial. Evaluación de alternativas tecnológicas y económicas e integración de criterios productivos, ecológicos (conservación de suelos, sustentabilidad de agroecosistemas, impacto ambiental de plaguicidas) y económicos en sistemas de información y de soporte de decisiones. Autor de libros y artículos científicos.



SILVIA IMHOFF. Ingeniera Agrónoma. Ms. Sc. Ph.D. Profesora Asociada de Diagnóstico y Tecnología de Tierras (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral). Profesora en cursos de posgrado y jurado de concursos docentes, de tesis de grado y de posgrado en diversas universidades del país. Evaluadora de proyectos de investigación nacionales e internacionales, de investigadores, de carreras de grado y posgrado y de revistas. Investigador Categoría I, Investigador Independiente del CONICET. Director del ICiAgro Litoral. Miembro de Junta de Evaluación

de CONICET. Director de Proyectos de Investigación y Desarrollo Nacionales (UNL, CONICET, MINCYT, ASACTEI) e Internacionales (Convenios Brasil-Argentina). Autora de numerosos artículos en revistas internacionales y nacionales, de capítulos de libros, trabajos en comunicación pública de la ciencia y de extensión rural. Participó en numerosos Congresos, como Presidente de Comisión, disertante y exponiendo trabajos.



MARÍA CELESTE MIRETTI. Ingeniera Agrónoma y Doctora en Ciencias Biológicas (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral). Ayudante de la Cátedra de Edafología (FCA, UNL). Jefe de Trabajos Prácticos. Ha publicado trabajos en congresos, artículos científicos.



MIGUEL ÁNGEL PILATTI MERGEN. Ingeniero Agrónomo. MSc. en Desarrollo Integral de Tierras y Aguas. Exprofesor titular de Edafología. Investigador nivel I en el ámbito nacional. Participó activamente en numerosas reformas curriculares, Planes de Mejoramiento y Objetivos para la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional del Litoral. Cocreador de los Nodos de Integración agronómica. Evaluador de la CONEAU en el ámbito nacional y en el Mercosur. Director y evaluador de programas y proyectos, presentó trabajos en congresos. Autor de *Hacia una Clínica de Suelos*; *Enfoque de sistemas* en el ámbito agropecuario; *Modelos de simulación de cultivos* con énfasis en lo que ocurre en el suelo y raíces; *Riego y drenaje*; *Degradación de tierras*, principalmente física. Desarrolló modelo de simulación de cultivos a escala diaria: Fitosim, con énfasis en lo que ocurre en el suelo. Ordenación territorial: desde hace 25 años realiza estudios interdisciplinarios en el centro y norte de Santa Fe (Argentina).



GABRIEL MARIO QUAINO. Ingeniero Agrónomo, Especialista en Ingeniería de la Tasación y Valoración (Universidad Politécnica de Valencia). Coordinador Agronómico Zonal Región Centro (provincias de Santa Fe y Córdoba), Banco de la Nación Argentina. Docente en el posgrado de tasaciones (Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional de Buenos Aires). Dictado de curso de Tasaciones Rurales al plantel de tasadores del Banco Ciudad (Buenos Aires). Profesor Auxiliar de la Cátedra de Edafología (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral). Colaboración en proyectos de Investigación. Uso de Sistemas de Información Geográfica en Evaluación y Ordenamiento de Tierras.



CRISTIAN ABEL ZORZÓN. Ingeniero Agrónomo (Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral). Capacitación complementaria en Producción y Gestión de la Información geográfica-gvsig i, Infraestructura de datos Espaciales de Santa Fe (IDESF), Ecofisiología del Cultivo de Algodón (UNNE). Antecedentes en Agromática y Edafología. Asesor privado de empresas agrícolas. Asistencia técnica a grupos de productores de algodón en la Asociación para la Promoción de la Producción Algodonera (APPA).

Este libro no es un texto clásico de Edafología ni pretende serlo. Es un «puente» entre la Edafología y el Manejo de Suelos. Sintetiza 55 años de indagaciones en la cátedra de Edafología, de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNL, que se inspiró en las necesidades de agrónomos y estudiosos en suelos.

Define los objetivos de la enseñanza de suelos en Agronomía: directrices que guían todo el desarrollo temático poniendo énfasis en el uso múltiple de ese valioso recurso natural. Detalla los pasos del método ingenieril para identificar y resolver problemas. Usando el enfoque sistémico, elabora un modelo edafológico a partir del cual se deducen cuáles son las condiciones que requiere un suelo ideal para los cultivos. Finalmente, expone cómo realizar un diagnóstico edafológico tanto desde la óptica analítica como de su integración usando modelo de simulación de generación propia.

No hay nada más difícil de intentar, más peligroso de conducir, o más incierto en su éxito, que tomar el liderazgo en la introducción de un nuevo orden de cosas. Porque el innovador tiene por enemigos a todos aquellos que lo han hecho bien bajo las viejas condiciones y solamente indiferentes defensores en aquellos que podrían hacerlo bien bajo las nuevas condiciones. (Niccolo Machiavello, El Príncipe)