



Curso de capacitación para operadores y futuros operadores del Sistema de Incentivos para la Sustentabilidad Agroambiental (SIRSD-S) de la Región de Los Ríos

Editoras: Constanza Sepúlveda, Marta Alfaro

Instituto de Desarrollo Agropecuario – Instituto de Investigaciones Agropecuarias

BOLETÍN INIA / Nº 361



ISSN 0717 - 4829



INDAP
Ministerio de
Agricultura

Gobierno de Chile

Director Responsable:

Alfredo Torres B., Ing. Agrónomo, M. Sc.
Director Regional (i) INIA Remehue

Editoras:

Constanza Sepúlveda T., Ing. Agrónomo, INIA Remehue
Marta Alfaro V., M. Ing. Agrónomo, Ph.D, INIA Remehue

Comité Editor:

Germán Holmberg F., Ing. Agrónomo, Mg, Encargado UVTT, INIA Remehue
Pedro Barrera S. Ing. Agrónomo, Profesional Departamento Fomento, INDAP Los Ríos
Elisa Barria L., Periodista, INIA Remehue

Autores:

Marta Alfaro V.
Ing. Agrónomo, Ph.D / INIA Remehue

Jorge Riquelme S.
Ing. Agrónomo, Dr. / INIA Raihuén

Luis Ramírez P.
Ing. Ejecución en Agronomía / INIA Remehue

Cristian Moscoso J.
Ing. Agrónomo, M. Sc. / INIA Remehue

Ricardo Campillo R.
Ing. Agrónomo, M. Sc.

Alfredo Torres B.
Ing. Agrónomo, M. Sc. / INIA Remehue

Angélica Sadzawka R.
Químico Farmacéutico

Cecilia Céspedes L.
Ing. Agrónomo, M. Sc. / INIA Quilamapu

Juan Hirzel C. /
Ing. Agrónomo, M. Sc., Dr., INIA Quilamapu

Josué Martínez-Lagos
Ing. Ambiental, Dr., M.Sc. / INIA Remehue

Jaime Mejías B.
Ing. Agrónomo, Ph. D / INIA Carillanca

Camila Muñoz M.
Médico Veterinario, Ph. D / INIA Remehue

Jorge Carrasco J.
Ing. Agrónomo, Dr. / INIA Rayentué

Boletín INIA N° 361

ISSN 0717 - 4829

Este boletín fue editado por el Centro Regional de Investigación INIA Remehue, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, como parte del proyecto Programa de capacitación, extensión y transferencia para el desarrollo de rubros y sus sistemas productivos, mediante la adecuada utilización del sistema de incentivos SIRSD-S en la AFC de la Región de Los Ríos. Financiado por el Instituto de Desarrollo Agropecuario, INDAP Los Ríos. Permitido su reproducción total o parcial citando la fuente y autores.

Cita bibliográfica correcta: Sepúlveda, C., Alfaro, M. 2018. Curso de Capacitación para Operadores y Futuros Operadores del Programa de Incentivos para la Sustentabilidad Agroambiental (SIRSD-S) de la Región de Los Ríos. Financiado por el Instituto de Desarrollo Agropecuario, INDAP Los Ríos. Osorno, Chile. Instituto de Investigación Agropecuaria. Boletín N° 361, 110 pp.

Diseño, Diagramación e Impresión

Comercial SERVIGRAF

Cantidad de Ejemplares: 300
Osorno, Chile 2018

Advertencia: INIA y los autores no se responsabilizan por los resultados que se obtengan del uso o aplicación de productos químicos genéricos o comerciales mencionados en esta publicación.

© 2018, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA, Centro Regional de Investigaciones Remehue



Curso de capacitación para operadores y futuros operadores del Sistema de Incentivos para la Sustentabilidad Agroambiental (SIRSD-S) de la Región de Los Ríos

Editoras:

Constanza Sepúlveda T.

Ing. Agrónomo,
INIA Remehue

Marta Alfaro V.

Ing. Agrónomo, Ph.D.
INIA Remehue

Boletín INIA / N° 361

INIA, Osorno 2018

ISSN 0717 - 4829



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 1	13
ANÁLISIS DE SUELO: MUESTREO, INTERPRETACIÓN Y RECOMENDACIÓN	
1.1. Introducción	13
1.2. Toma de muestra de suelo	13
1.2.1. Equipo de muestreo	13
1.2.2. Toma de la muestra	14
1.2.3. Profundidad de muestreo	15
1.2.4. Época de muestreo	15
1.2.5. Manejo de la muestra	15
1.3. Interpretación de resultados de análisis de suelo	17
1.4. Fertilización balanceada	18
1.5. Indicadores de acidez de suelo	19
Bibliografía	20
CAPÍTULO 2	21
ENCALADO DE LOS SUELOS. CARACTERIZACIÓN Y MANEJO DE ENMIENDAS CALCÁREAS	
2.1. Introducción	21
2.2. Reacciones del encalado en el suelo	22
2.3. Clasificación y características de las cales agrícolas	24
2.3.1. Óxido de calcio (CaO)	25
2.3.2. Hidróxido de calcio (Ca (OH) ₂)	25
2.3.3. Carbonatos o Cales Agrícolas	25
2.3.3.1 Carbonato de calcio	25
2.3.3.2 Carbonato doble de calcio y de magnesio	25
2.4. Selección del material encalante	26
2.4.1. Grado de finura	26
2.4.2. Valor de neutralización	28
2.4.3. Contenido de otros elementos	30
2.4.4. Costos de producción, distribución y aplicación	30
2.5. ¿Cómo aplicar el encalado?	31
2.6. Determinación de los requerimientos de encalado	34

2.7. ¿Qué dosis de cal usar?	37
2.8. Consideraciones en el encalado	40
2.8.1. Beneficios del encalado	40
2.8.2. Respuestas erráticas del encalado	40
2.8.3. Peligros del sobre encalado	41
Bibliografía	41

CAPÍTULO 3 44

FÓSFORO EN SUELOS DE USO AGRÍCOLA: FERTILIZACION Y CONSIDERACIONES AMBIENTALES

3.1. Introducción	44
3.2. Fertilización fosfatada en recuperación de suelos de uso agrícola	44
3.3. Impacto ambiental de la actividad agropecuaria y el uso de fertilizantes	50
3.3.1. Contaminación de cursos de agua producto de la actividad agropecuaria	51
3.3.2. Pérdidas de fósforo	52
3.3.3. Mecanismos de transporte de fósforo desde el suelo hasta cuerpos de agua	52
3.3.4. Indicadores de riesgo ambiental asociados al fósforo	53
Bibliografía	55

CAPÍTULO 4 57

PREPARACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS, Y SU EFECTO SOBRE LOS PARÁMETROS FÍSICOS DEL MISMO

4.1. Introducción	57
4.2. La labranza y su efecto en las propiedades físicas del suelo	58
4.2.1. La compactación de los suelos originada por la labranza	58
4.2.2. Importancia del contenido de humedad del suelo en la labranza	59
4.3 Labranza y equipos de aradura que invierten el perfil del suelo	60
4.3.1. Arado de vertedera	60
4.3.2. El arado de discos	62
4.4. Araduras que no alteran el perfil del suelo. Aradura vertical	64
4.4.1. El arado cincel	64

4.4.2. Arado subsolador o “escarificador” de suelo.....	65
Bibliografía	67

CAPÍTULO 5 69

PRADERAS Y CULTIVOS SUPLEMENTARIOS

5.1. Introducción	69
5.2. Establecimiento y regeneración de praderas	69
5.3. Cultivos suplementarios	72
5.3.1. Pradera suplementaria de invierno (ballica-avena)	73
5.4. No recomendable	76
Bibliografía	76

CAPÍTULO 6 77

SOSTENIBILIDAD DE LOS SUELOS Y LA IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA

6.1. Introducción	77
6.2. Suelo	78
6.2.1. Fertilidad del suelo	82
6.2.2. Manejo sostenible del suelo	83
Bibliografía	84

CAPÍTULO 7 85

EL CAMBIO CLIMÁTICO, SUS POTENCIALES EFECTOS EN LA AGRICULTURA Y SU MITIGACIÓN

7.1. Introducción	85
7.2. Potenciales impactos en la agricultura	86
7.3. Mitigación de la emisión de óxido nitroso (N ₂ O) desde suelos destinados a la actividad agropecuaria	89
7.4. Mitigación de la emisión de metano (CH ₄) de Rumiantes	92
7.4.1 Método para medir las emisiones de metano	94
Bibliografía	95

ANEXO 1. Elaboración y utilización de compost	98
ANEXO 2. Elaboración y utilización de lombricompost	102
ANEXO 3. Elaboración y utilización de bokashi	106

INTRODUCCIÓN

Como parte del trabajo con equipos técnicos y funcionarios INDAP del *“Programa de Capacitación, Extensión y Transferencia para el desarrollo de rubros y sus sistemas productivos, mediante la adecuada utilización del Sistema de Incentivos SIRSD-S en la AFC de la Región de Los Ríos”*, se realizó un curso de perfeccionamiento para Operadores y futuros Operadores del Sistema de Incentivos para la Sustentabilidad Agroambiental de los Suelos Agropecuarios (SIRSD-S), programa que tiene como finalidad recuperar los suelos agropecuarios degradados y/o mantener suelos agropecuarios ya recuperados de la Agricultura Familiar Campesina, aplicando prácticas que eviten que los suelos regresen nuevamente por debajo de los niveles mínimos técnicos ya alcanzados con anterioridad.

Habiendo transcurrido ya varios años que no se realizaba un curso de actualización de contenidos del Programa SIRSD-S en la Región de Los Ríos, era de importancia para los Operadores acreditados y quienes quieran acreditarse por primera vez, disponer de nuevos conocimientos y herramientas para así realizar de mejor manera las labores de apoyo (Planes de Manejo y Seguimiento) a los agricultores de la Agricultura Familiar Campesina que éstos atienden.

El curso se ejecutó de forma modular en dos versiones una para operadores SIRSD-S y otra para futuros operadores, esto con la finalidad de diferenciar la entrega de contenidos y profundidad de los mismos durante el curso. Los diferentes temas fueron abordados por especialistas del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), en ocho módulos teóricos y prácticos, para aquellos temas que requerían de ello. Se abordaron temáticas relacionadas directamente al Sistema de Incentivos SIRSD-S y otras de importancia para el trabajo con agricultores. Los temas tratados fueron:

- Importancia de la determinación de fertilidad en los suelos, muestreos y análisis químicos.
- Interpretación de los resultados. Recomendación de dosis de fertilización.
- Conceptos de fertilidad fosfatada. Dosis de corrección y mantención.
- Conceptos de enmiendas calcáreas. Dosis de corrección y mantención.
- Física de suelo y manejos conservacionistas.
- Establecimiento y regeneración de praderas y cultivos suplementarios.

- Efectos del cambio climático en los parámetros del suelo.
- Conceptos de agricultura orgánica.
- Normativa SIRSD-S.

Los temas mencionados fueron incorporados en los capítulos de este boletín para que sirva de material de ayuda para Operadores y Futuros operadores del Programa de Incentivos SIRSD-S y para Extensionistas en general.

CAPÍTULO 1

ANÁLISIS DE SUELO: MUESTREO, INTERPRETACIÓN Y RECOMENDACIÓN

Marta Alfaro V.

Ing. Agrónomo, Ph.D

INIA Remehue

Luis Ramírez P.

Ing. Ejecución en Agronomía

INIA Remehue

1.1. Introducción

La fertilización de praderas y cultivos es una tecnología fundamental para el éxito productivo de agricultores y ganaderos, siendo además uno de los principales costos de producción a nivel primario. Por lo mismo, la decisión de cuánto y con qué fertilizar una pradera o cultivo debe ser lo más informada posible.

Por ello, la correcta toma de la muestra de suelo es vital para la planificación de la fertilización. Para una guía práctica detallada sobre cómo tomar una muestra de suelo se puede consultar el video elaborado por INIA Remehue disponible en YouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=YRJEzjxoxPw>).

1.2. Toma de muestra de suelo

1.2.1. Equipo de muestreo

El equipo básico de muestreo de suelo incluye un balde limpio, bolsas plásticas, barreno de tubo, barreno de fertilidad o pala (jardinera, recta) (Figura 1.1a). Para la selección de las herramientas que se utilizarán debe considerarse la textura del suelo, ya que algunas de las herramientas señaladas no pueden ser empleadas, por ejemplo en suelos muy arenosos o muy arcillosos. Para texturas medias es más aconsejable el uso del barreno de fertilidad, pudiendo ser reemplazado por el barreno de tubo (Foto 1.1). La pala jardinera tiene un amplio rango de texturas en las cuales puede ser utilizada, pero tiene el inconveniente de hacer más lento el muestreo al realizar una excavación para cada submuestra.

1.2.2. Toma de la muestra

Una muestra representativa es aquella que mejor refleja las condiciones de fertilidad de un área específica. Para que exista representatividad, la muestra de suelo debe ser compuesta de varias submuestras de igual tamaño. El número de submuestras por muestra está dado por la variabilidad que presenta el nutriente más móvil dentro de los que se desea analizar. Estudios realizados en la Región de Los Lagos, señalan que dicha variabilidad se compensa con 20 a 25 submuestras por unidad de muestreo. Los suelos se pueden diferenciar por su color, textura, profundidad, topografía y otros factores. Si todos estos factores fueren homogéneos, pero existe una parte del área que ha sido fertilizada, ésta última debe ser muestreada por separado.

La unidad de muestreo debe tener una superficie menor a 20 ha, dependiendo de las características de homogeneidad presentes. En los suelos de la Región de Los Lagos y Los Ríos, que presentan una marcada variabilidad espacial, topográfica y de fisiografía, pudiera reducirse el tamaño de la unidad de muestreo a no más de 10 ha para asegurar una adecuada representatividad.

Una vez establecida la unidad de muestreo, se procede a recolectar las

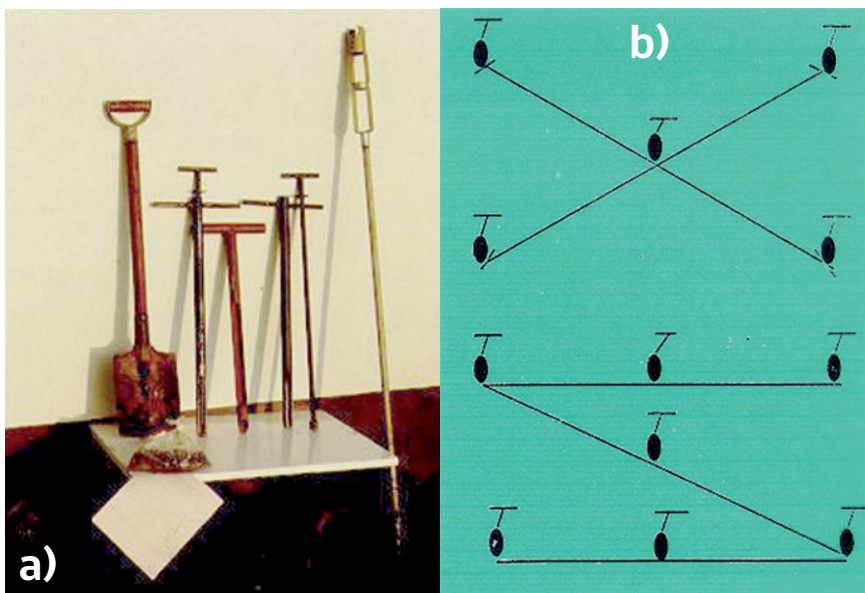


Figura 1.1 a) Ejemplos de herramientas que pueden emplearse para la toma de muestra de suelo, b) diseño de zigzag o X a emplear para la colecta de una muestra de suelo representativa.

submuestras recorriendo la unidad establecida en zigzag o en cualquiera otra forma sistemática cada cierta distancia (Figura 1.1b). La profundidad de suelo a la que tomar la muestra de suelo es variable dependiendo del objetivo del análisis, pero es relevante que se mantenga constante a través de muestreos sucesivos.

En los potreros existen sectores que no deben ser incluidos en el muestreo. Se debe tener especial cuidado de no muestrear cerca de acequias, drenes o sectores inundados, cerca de la entrada de potreros o de construcciones, sectores en los que se han acumulado residuos vegetales, tales como silos, parvas, etc., sectores con fecas o en manchas de orina. También es recomendable distanciarse unos 10 metros de cercos vivos, árboles u otras barreras.

1.2.3. Profundidad de muestreo

Las muestras de suelo deben colectarse de la profundidad en que se concentra la mayor proporción y actividad de raíces de la pradera o el cultivo. En el marco del presente programa, la profundidad estándar de muestreo es de 0-20 cm de profundidad.

1.2.4. Época de muestreo

En general, las muestras de suelo pueden ser colectadas en cualquier época del año. Sin embargo, por razones prácticas es recomendable tomar las muestras 1 ó 2 meses antes de la siembra de cultivos anuales y al menos 1 mes antes de la fertilización de otoño o primavera en praderas.

1.2.5. Manejo de la muestra

Una vez mezclada y homogeneizada, la muestra de suelo debe ser envasada en una bolsa de polietileno nueva (0,3 a 0,5 kg), con el objeto de evitar su contaminación. Cualquier elemento extraño a la muestra de tierra puede inducir a errores en el análisis químico, con la consecuente falla en su interpretación. Cada muestra debe ser perfectamente identificada, en términos de su procedencia, fecha de colecta, profundidad a la cual fue colectada y potrero. En la figura 1.2 se observa un formulario tipo del Laboratorio de Suelo de INIA para ingresar muestras para SIRSD-S

IDENTIFICACION DEL OPERADOR									
NOMBRE _____								☐ INDAP	
MUESTRA TOMADA POR _____								☐ SAG	
IDENTIFICACION DEL AGRICULTOR									
NOMBRE O RAZON SOCIAL _____						RUT _____			
DIRECCION _____									
COMUNA _____				*GRUPO SAT _____					
FONO _____				*ORGANIZACIÓN _____					
FAX _____				*AREA INDAP _____					
* Solo llenar para agricultores usuarios INDAP									
IDENTIFICACION DE LA MUESTRA									
PREDIO _____				LOCALIDAD _____		Fecha Muestreo _____			
N° DE ROL _____				COMUNA _____		Fecha Recepción _____			
N° Laboratorio	Potrero	Muestreo		Uso Actual	Proximo Cultivo	Suelo (Según Cód **)			Coord. U.T.M
		Prof. cm.	Sup. Ha.			Tipo	Top.	Prof.	
ANALISIS REQUERIDOS					CODIGOS **				
☐ BASE REC. SUELOS pH (Agua), P, Na, K, Ca, Mg, Al, Suma de Bases, CICE y Sat. Al ☐ INDIVIDUALES					☐ COMPLETO REC. SUELOS ANALISIS BASE + M.O y S. 1 : Tronco 1 : Plano 1 : Profundidad 2 : Ropo Arcilloso 2 : Loma Suave 2 : Entre 60 y 100 cm. 3 : Transición 3 : Loma Fuerte 3 : Más de 100 cm. 4 : Noñi 5 : Terraza o Vega				
OBSERVACIONES _____									

Figura 1.2. Formulario de antecedentes Análisis de Suelo. Laboratorio INIA.

La muestra envasada y claramente identificada debe ser remitida con prontitud al Laboratorio para ser estabilizada y procesada. La muestra debe mantenerse en condiciones lo más frescas posible, sin congelar, hasta su ingreso al laboratorio. Es aconsejable tener un cooler para su conservación hasta el envío al laboratorio. En su defecto, puede refrigerarse en la sección de vegetales de un refrigerador tradicional, hasta su envío.



Foto 1.1 Toma de muestra de suelo en praderas a) uso de barreno, b) colecta de la submuestra para obtención de la muestra final de suelo.

1.3. Interpretación de resultados de análisis de suelo

La correcta interpretación de un análisis de suelo es clave para definir la dosis de fertilizante a aplicar a una pradera o cultivo, dado que permite establecer un rango de disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de las plantas (Cuadro 1.1).

El análisis de suelo representa la fertilidad química del suelo y no da cuenta de los aspectos de fertilidad física (densidad y textura, entre otros). La calidad de los resultados de un informe de análisis de suelo está directamente relacionado con la representatividad y manipulación de la muestra de suelo enviada a análisis. Asimismo, es siempre recomendable usar laboratorios de suelos que cuenten con certificación y, en el caso particular del programa estén debidamente acreditados en el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).

Cuadro 1.1. Rangos de disponibilidad de nutrientes en suelos (0–20 cm).

Parámetro	Método de análisis	Disponibilidad de nutrientes		
		Inadecuado	Medio	Adecuado
pH	Agua (1:2,5)	<5	5,1–6,0	>6,0
Fósforo (mg kg ⁻¹)	Bicarbonato de sodio 1 M (Olsen)	<10	10–20	>20
Potasio (cmol+ kg ⁻¹)	Acetato de amonio 1 M	<0,25	0,26–0,51	>0,52
Calcio (cmol+ kg ⁻¹)		<5,0	5,01–9,00	>9,00
Magnesio (cmol+ kg ⁻¹)		<0,5	0,51–1,00	>1,0
Sodio (cmol+ kg ⁻¹)		<0,2	0,21–0,30	>0,3
Aluminio de intercambio (cmol+ kg ⁻¹)	Cloruro de Potasio 1 M	>0,51	0,50–0,26	<0,25
Suma de Bases (cmol+ kg ⁻¹)	Cálculo matemático	<6	6–11	>11
Saturación de aluminio (%)	Cálculo matemático	>6	3–6	<3
Azufre (mg kg ⁻¹)	Dihidrógeno fosfato de Calcio 0,01 M	<10	10–20	>20
Cobre (mg kg ⁻¹)	DPTA a pH 7	<0,3	0,3–0,5	>0,5
Cinc (mg kg ⁻¹)		<0,5	0,5–1,0	>1,0
Boro (mg kg ⁻¹)	Cloruro de Calcio	<1	1–3	3–5
Molibdeno (mg kg ⁻¹)	DPTA a pH 7	<0,1	0,11–0,20	>0,20
Hierro (mg kg ⁻¹)		<2,5	2,5–4,5	>4,5

Fuente: adaptado de Bernier (1999)

Un resultado analítico puede tener distintas interpretaciones agronómicas, dependiendo del cultivo o del tipo de suelo, dado que diferentes plantas (cultivos, praderas) poseen distintos requerimientos nutricionales, y que las características químicas de un suelo afectan la disponibilidad de nutrientes del mismo, conocida como capacidad de suministro del suelo.

Adicionalmente, los rangos considerados adecuados desde un punto de vista agronómico deben ser evaluados considerando limitaciones y riesgos ambientales.

1.4. Fertilización balanceada

De acuerdo a la Ley de Liebig (Figura 1.3), la productividad de una pradera o cultivo está limitada por aquél nutriente que se encuentre en menor cantidad en el suelo. De allí la relevancia de tener siempre presente la generación de una recomendación de fertilización balanceada.

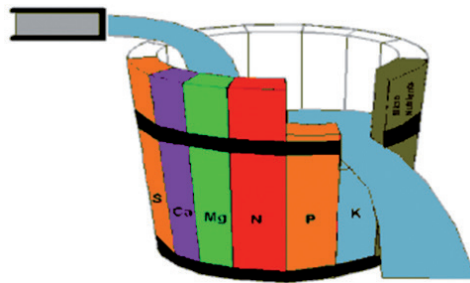


Figura 1.3. Ley de Liebig (Ley del mínimo) en análisis de suelos (José Marcano)

Esto es especialmente relevante al evaluar la concentración de bases de intercambio en la solución del suelo. Así, debe tenerse presente que el calcio debe ocupar entre el 60–80% del total de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo, el magnesio entre el 10–20%, el potasio entre 2 y 6% y el sodio desde 0 y hasta el 3% de la CIC.

Adicionalmente, excesos de calcio y/o magnesio (ej. por aplicación de enmiendas), o potasio (ej. aplicaciones reiteradas de purines) pueden causar desbalances nutricionales para las plantas o los animales en pastoreo. Por tanto, se recomienda mantener una relación Ca/Mg de 6:1, K/Mg de 0,3:1 y Na/Mg de 0,1:1.

1.5. Indicadores de acidez de suelo

La disponibilidad de nutrientes de un suelo está condicionada por su nivel de acidez, debido al impacto que este parámetro tiene sobre las propiedades químicas del suelo y sobre los organismos (bacterias y hongos) responsables de sus transformaciones. Un suelo más ácido tiene mayor disponibilidad de nutrientes como aluminio y manganeso, mientras que un suelo alcalino tiene mayor disponibilidad de fósforo, potasio y azufre (Figura 1.4). La mayor disponibilidad de nutrientes para la actividad biológica del suelo y el crecimiento de las plantas se encuentra entre pH 6 y 7.

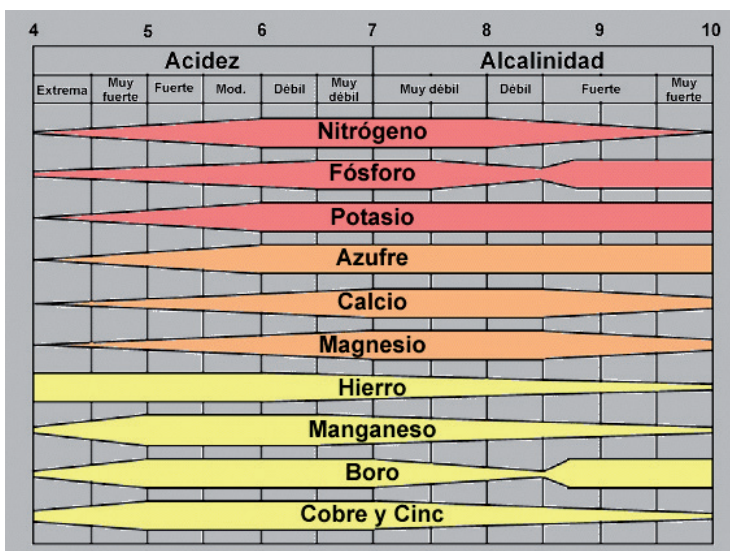


Figura 1.4. Disponibilidad de nutrientes según el pH (Agua) del suelo, indicada como grosor de la barra del respectivo color (ResearchGate, 2017).

El principal parámetro del análisis de suelo que permiten establecer el nivel de acidez de un suelo es el pH, mientras que la saturación de aluminio refleja de mejor manera el potencial riesgo de toxicidad de aluminio para las plantas, producto del nivel de acidez del suelo. Es por ello, que este último parámetro debe usarse siempre como guía para la aplicación de enmiendas calcáreas en suelos del sur de Chile.

- pH: Este parámetro corresponde al inverso matemático del logaritmo de la concentración de hidrógeno en el suelo y refleja el poder de acidez del mismo, en una escala de 1 (muy ácido) a 14 (muy básico).

- Saturación de aluminio: se calcula determinando la proporción de aluminio de intercambio que se encuentra en la suma de cationes de intercambio (Suma de bases) más el aluminio intercambiable (CICE), y multiplicando ese valor por 100.

Estos aspectos son claves por lograr la mayor efectividad productiva de la inversión económica realizada en fertilización, al mismo tiempo que disminuir los riesgos de contaminación ambiental.

Bibliografía

Bernier, R. 1999. Curso de Capacitación para operadores del Programa de Recuperación de Suelos Degradados, Décima Región. Osorno. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Serie Actas N°2.

CAPÍTULO 2

ENCALADO DE LOS SUELOS. CARACTERIZACIÓN Y MANEJO DE ENMIENDAS CALCÁREAS^(*)

Ricardo Campillo R.
Ing. Agrónomo, M. Sc.

Angélica Sadzawka R.
Químico Farmacéutico

2.1. Introducción

En el transcurso de la presente década se ha constatado una disminución de la productividad de cultivos y tipos de praderas desarrollados en ciertas áreas agroecológicas ocupadas por suelos derivados de cenizas volcánicas de la zona sur del país (regiones de La Araucanía a Aysén), en donde se practica una agricultura de tipo intensivo. Ello podría ser consecuencia de un proceso de acidificación de estos suelos, con la aparición de toxicidad para las plantas por la liberación de hidrógeno y principalmente aluminio, y la consecuente disminución en la disponibilidad de otros nutrientes, junto con un efecto depresivo en la actividad microbiológica del suelo.

Si bien los suelos de La Araucanía no muestran la magnitud del problema de la región de Los Lagos y Los Ríos, durante los últimos años la acidificación de ciertas áreas se ha ido constituyendo en una de las principales limitaciones nutricionales de los suelos agrícolas.

En la actualidad el Ministerio de Agricultura tiene como misión transformar a nuestro país en una Potencia Agroalimentaria, mediante el fortalecimiento de los procesos productivos y colocando especial énfasis en la incorporación de estándares de calidad y el respecto por el medio ambiente. Chile ha experimentado durante los últimos años un crecimiento económico creciente y liderado por el proceso exportador. Sin embargo, este crecimiento se ha cimentado en la extracción permanente de los recursos naturales renovables. Las evidencias de una degradación sostenida del recurso suelo se observan en gran parte de los ecosistemas del país y de nuestra región.

La existencia en nuestro país de una economía de mercado abierta ha propiciado el desarrollo de una agricultura cada día más intensiva y competitiva, que

(*) Extracto de Campillo (2006). Manejo de los recursos naturales en el sistema de incentivos para la recuperación de suelos degradados de la Araucanía. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Carillanca. Serie Actas N°38.

generalmente privilegia el criterio económico por sobre el criterio técnico para la elección de los insumos fertilizantes, incentivando así gran extracción de nutrientes e inadecuada reposición de bases.

Existen diversas alternativas de manejo de suelos para corregir los problemas de acidificación como ser la aplicación de enmiendas calcáreas, uso de fosfato en grandes cantidades y la adición de humus. En este artículo se abordará específicamente la aplicación de enmiendas calcáreas.

2.2. Reacciones del encalado en el suelo

El encalado consiste en agregar al suelo cualquier compuesto de calcio o de calcio y magnesio que sea capaz de reducir la acidez e incrementar el pH. Estrictamente, la cal es el óxido de calcio; sin embargo, el término cal también se aplica a otros materiales encalantes como hidróxidos, carbonatos y silicatos de calcio, o de calcio y magnesio.

El objetivo central de las enmiendas calcáreas es desplazar el aluminio (o manganeso) intercambiable en la fase sólida del suelo y neutralizar el ion Al^{3+} libre en la solución del suelo (Figura 2.1).

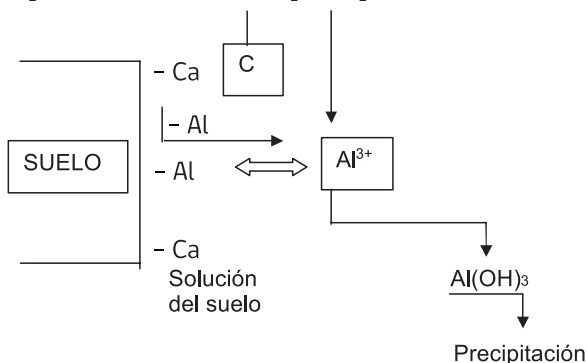
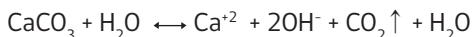
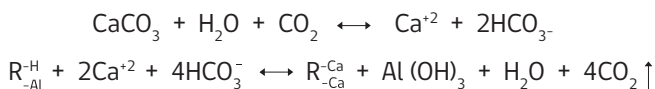


Figura 2.1. Esquema de la reacción de desplazamiento y neutralización del aluminio de intercambio por efecto del encalado.
Fuente: Campillo (2006).

Las reacciones básicas de la enmienda en el suelo, representadas por el caso del carbonato de calcio (calcita), son las siguientes (Brady y Weil, 2002):



Donde R representa una porción de un coloide orgánico o inorgánico.

Los mecanismos de la reacción de los materiales encalantes permiten la neutralización de la acidez en la solución del suelo al ponerse en contacto la cal con el agua del suelo. Es por esta razón que la cal es efectiva solamente cuando existe humedad en el suelo. Adicionalmente, el efecto correctivo de la cal se limitará al volumen de suelo donde fue aplicada.

Es interesante observar que el calcio proveniente de la disolución de la cal no interviene en las reacciones de incremento del pH. Este nutriente pasa simplemente a ocupar sitios en la superficie de las partículas del suelo y servirá como nutriente de las plantas.

Los iones hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{+3}) liberados a la solución de suelo por el intercambio con Ca, reaccionan con los iones bicarbonato (HCO_3^-) provenientes de la hidrólisis de la cal, formando agua y precipitando el aluminio, con liberación de anhídrido carbónico (CO_2) que se disipa como gas. De esta manera, el aluminio tóxico de la solución de suelo queda neutralizado y químicamente inerte. En el caso de utilizarse una cal dolomítica (carbonato doble de calcio y magnesio), la hidrólisis del material sigue la misma secuencia anterior, a la vez que se produce un incremento en el contenido de magnesio del suelo en función de la concentración que presente la cal dolomítica.

En el ámbito agrícola se señala erróneamente a varios productos fertilizantes como correctores de la acidez del suelo por presentar contenidos importantes de calcio. El yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) no es un producto alcalinizante como a veces se indica, sino de reacción neutra. Se tiende a confundir como efecto alcalinizante el hecho de aportar calcio, pero esto no le permite neutralizar los iones hidrógeno (H^+) y aluminio (Al^{+3}) de la solución de suelo (Suarez, 1994). Este efecto del yeso se puede apreciar en un experimento de establecimiento de praderas mixtas (Cuadro 2.1). Luego de un año de su incorporación, la aplicación de altas dosis de yeso incrementó el calcio de intercambio como era de esperar, pero, tanto el pH como el aluminio de intercambio permanecieron sin variación. Es decir, los niveles de acidez inicial del suelo no fueron neutralizados por el yeso. Sin embargo, el yeso puede ser más efectivo en reducir el aluminio intercambiable en el subsuelo que el carbonato de calcio porque, al ser más soluble, desciende más rápidamente en el perfil, luego los iones Ca^{+2} reemplazan a los iones Al^{+3} del complejo de intercambio, los cuales reaccionan con los iones SO_4^{-2} formando iones AlSO_4^+ que no son fitotóxicos (Tanaka *et al.*, 1987).

Cuadro 2.1. Efecto del yeso sobre las características químicas del Andisol Osorno (0–20 cm) luego de un año del establecimiento de la pradera. Remehue, marzo 1996.

Yeso t ha ⁻¹	Ca intercambiable cmol+ kg ⁻¹	pH-H ₂ O	pH-CaCl ₂	Al intercambiable cmol+ kg ⁻¹
0	3,71	5,5	4,8	0,34
1,7	4,21	5,5	4,8	0,24
3,4	4,72	5,4	4,8	0,33
6,8	5,43	5,4	4,8	0,30

Fuente: Campillo, (1994).

Una creencia similar ocurre con la utilización de rocas fosfóricas como fertilizante fosforado para los cultivos debido a su aporte adicional de calcio (Cuadro 2.2). Al igual que el yeso, estos productos liberan lentamente el calcio como nutriente pero no son capaces de neutralizar la acidez puesto que no producen iones OH⁻ y no son enmiendas calcáreas. Las rocas fosfóricas si pueden ser una alternativa interesante de fertilización fosforada en suelos derivados de cenizas volcánicas, bajo ciertos requisitos de pH y niveles de calcio.

Cuadro 2.2. Composición química de tres rocas fosfóricas comerciales.

Compuesto químico %	Bifox roca chilena	Sechura roca peruana	Carolina del Norte roca estadounidense
P ₂ O ₅	18,5	30,5	30,5
CaO	33,6	48,4	48,2
MgO	1,2	0,4	0,5
K ₂ O	0,8	0,09	0,1
Na ₂ O	2,0	0,47	1,2
S	0,75	0,93	1,0
Cl	0,22	0,07	1,0
Fe ₂ O ₃	2,2	1,3	0,6
Al ₂ O ₃	6,50	1,1	0,4
SiO ₂	20,0	5,3	s/i
F	1,6	3,7	s/i

Fuente: Campillo (2006).

2.3. Clasificación y características de las cales agrícolas

Existen varios productos capaces de reaccionar en el suelo y elevar el pH. Entre los más importantes están el óxido de calcio, hidróxido de calcio, calcita y dolomita (Espinoza, 1995).

2.3.1. Óxido de calcio (CaO)

También conocido como cal viva, es un polvo blanco, caústico, muy difícil y desagradable de manejar. Se obtiene calcinando piedra caliza (900 °C) y la pureza dependerá del material de origen. Cuando se aplica al suelo reacciona de inmediato por lo cual es útil cuando se requieren resultados rápidos. Debido a sus características y como una forma de evitar daños, este material debe ser aplicado con cierta antelación y mezclado inmediatamente con el suelo puesto que se endurece rápidamente haciéndose inefectivo.

2.3.2. Hidróxido de calcio (Ca (OH)₂)

Se conoce también como cal apagada o cal hidratada. Es una sustancia blanca, polvorienta y difícil de manejar. Se prepara hidratando la cal viva. Este material reacciona también rápidamente en el suelo.

Cabe señalar que la cal viva y la cal apagada son productos que normalmente no se utilizan debido a su alto costo y a los riesgos que implica su manipulación en las actividades productivas.

2.3.3. Carbonatos o Cales Agrícolas

Los productos más utilizados por su economía son los carbonatos. Se caracterizan por su baja solubilidad lo que determina efectos en el suelo relativamente lentos (uno a varios meses), dependiendo de la finura del material. Existen dos categorías generales de enmiendas calcáreas (Suárez, 1994):

2.3.3.1 Carbonato de calcio

Normalmente conocido como cal calcítica y cuya fórmula es CaCO_3 .

2.3.3.2 Carbonato doble de calcio y de magnesio

Generalmente conocido como cal dolomítica y su fórmula es $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$.

Las cales calcíticas, dependiendo de su origen, pueden ser clasificadas como:

- De origen minero. Estas cales presentan bajos contenidos de humedad pero con porcentajes de CaCO_3 levemente inferiores a las de conchas marinas, porque poseen mayor contenido de inertes.
- Residuo o subproducto industrial (azúcar). Las cales derivadas de la industria del azúcar poseen altos contenidos de humedad y menores porcentajes de CaCO_3 .

- Moliendas de conchas marinas. Las cales de conchas marinas poseen los mayores contenidos de CaCO_3 junto con contenidos muy bajos de humedad.
- Minero industrial. Calcitas con contenidos de óxido de calcio libre o hidróxido de calcio libre. Ambos productos son de alta solubilidad en agua y reaccionan inmediatamente en el suelo.

Las cales dolomíticas a su vez se pueden diferenciar por su contenido de magnesio en:

- Cal magnesiánica, con un contenido de 5,1 a 12% de MgO .
- Cal dolomítica, con un contenido superior al 12% de MgO .

La calidad de estos materiales depende del contenido de impurezas, como por ejemplo arcillas.

Cuando se evalúa la efectividad agronómica de las cales calcíticas respecto de las dolomíticas, es importante recordar que las calcíticas son el doble más solubles (50 mg/L) que las dolomíticas (25 mg/L), por lo cual su efecto corrector es más rápido.

A su vez, las cales dolomíticas presentan altos contenidos de magnesio (hasta 21% de MgO), el cual también debe ser valorado. En suelos con claras deficiencias de magnesio, las cales dolomíticas presentan ventajas comparativas puesto que la aplicación de magnesio resultará en incrementos de rendimiento.

2.4. Selección del material encalante

La calidad de los materiales encalantes depende principalmente de los siguientes factores (Rodríguez, 1993):

1. Grado de finura
2. Valor de neutralización
3. Contenido de otros nutrientes
4. Costos de producción, transporte y distribución.

2.4.1. Grado de finura

Un factor de gran importancia en el encalado de los suelos es el grado de finura o tamaño de las partículas de la cal a usar. La finura del material representa una medida de la velocidad de reacción de la cal agrícola (Beegle y Lingenfelter, 1996).

Esto se debe a que la velocidad de la reacción de la cal en el suelo depende de la superficie del producto en contacto con el suelo. Como el material calcáreo afecta un pequeño volumen de suelo alrededor de cada partícula de cal, mientras más fino es el material, tiene más superficie de contacto con el suelo para neutralizarlo y, por lo tanto, reacciona más rápido.

Cuando se utiliza calcita o dolomita es necesario asegurarse que el material sea molido a un tamaño de partícula adecuado. Las partículas gruesas de cal reaccionan más lentamente mientras que las partículas finas lo hacen más rápidamente y en forma completa. El costo de la cal aumenta con el grado de fineza de la molienda. Lo ideal es utilizar un material que requiera un mínimo de molienda y que a la vez tenga una cantidad suficiente de material fino que permita un cambio rápido de pH.

El grado de finura es el factor más importante en la elección de un encalante. Las partículas mayores de 2 mm se consideran totalmente inefectivas, entre 0,25 y 2 mm se clasifican como 50 % efectivas y las menores de 0,25 mm como 100 % efectivas. Estos rangos de efectividad pueden no representar la solubilidad real del material, pero permiten una evaluación práctica de los diferentes materiales. De acuerdo a estos antecedentes, se puede calcular la eficiencia relativa (ER) del grado de finura de un material encalante. Por ejemplo, un material con 80% de partículas con un tamaño menor de 0,25 mm; un 15% entre 0,25 y 2 mm y un 5% sobre 2 mm tendría la siguiente eficiencia relativa (ER):

$$ER = (80\% \times 1,0) + (15\% \times 0,5) + (5\% \times 0,0) = 87,5\%$$

En general, la granulometría de las enmiendas calcáreas más finas tiende a mejorar la eficiencia inicial, pero también encarece los costos del producto y dificulta su aplicación en terreno.

La finura determina la rapidez de la acción encalante. Así, la velocidad del efecto varía notablemente en función del tamaño de las partículas. Al mismo nivel de finura, las calcitas exhiben mayor efecto que las dolomitas producto de su mayor velocidad de solubilización en agua (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Eficiencia relativa de calcitas y dolomitas según el grado de finura.

Finura (mallaje ASTM)*	Eficiencia relativa %	
	Calcitas	Dolomitas
20 - 60	19	11
60 - 100	50	25
100 - 200	85	39
>200	100	60

* ASTM: American Society for Testing Materials Fuente: Suárez (1994).

Cuando el encalado se ha transformado en una práctica periódica (luego del encalado inicial) dentro del sistema productivo, la velocidad del efecto pierde relevancia en la medida que se aplique el encalado antes de alcanzar una situación crítica de los parámetros de la acidez.

Se ha establecido que las cales con finura mayor a 100 mallas son de alta eficiencia agronómica, mientras que las partículas retenidas por malla 10 no tienen valor como enmienda (sin efectividad agronómica). Las partículas retenidas por malla 60 ya presentan limitaciones; en cambio, las partículas que pasan por malla 60 y superiores son de adecuada eficiencia.

La humedad del material encalante le resta efectividad al producto por varias razones. Tiende a diluir el porcentaje real de los componentes químicos presentes en el producto comercial, que corrigen la acidez del suelo. También elevan los costos de transporte y aplicación del producto y finalmente dificultan notoriamente su aplicación en terreno.

2.4.2. Valor de neutralización

El valor de neutralización (VN) es la capacidad para neutralizar ácidos que tiene un producto encalante agrícola, el cual dependerá de su composición química y grado de pureza. Al valor de neutralización del carbonato de calcio puro se le ha asignado el valor 100% y sirve como punto de referencia para calificar el valor de neutralización de los materiales encalantes. Por ello, el VN se expresa como contenido de carbonato de calcio equivalente (CCE), en porcentaje. El CCE representa la cantidad equivalente de CaCO_3 puro presente en el material encalante (Halvin, *et al.*, 1999).

El valor de neutralización (VN) de algunos compuestos se presenta en el Cuadro 2.4. Se observa que mientras la cal calcítica tiene un VN de 100 % (equivalente a 100 kg de CaCO_3), la cal viva tiene un valor de 179 %, que es equivalente a 56 kg de producto cal viva. Esto significa que, por ejemplo, se requiere aplicar al suelo una cantidad mayor de cal calcítica que de cal viva para generar una corrección similar de pH.

Es importante recordar que la eficiencia de un material correctivo es consecuencia de dos características: su reactividad y su efecto residual. El valor de neutralización debe considerar ambas condiciones. Por ejemplo, el hidróxido de calcio o el óxido de calcio tienen un mayor valor neutralizante y una gran eficiencia inicial, que se traduce en una mayor velocidad de corrección que las cales tradicionales. Sin embargo, su efecto residual o período de duración de la

Cuadro 2.4 Valor de neutralización (VN) de diferentes productos químicos puros, constituyentes de materiales encalantes.

Producto	Fórmula	VN (%)	Kg de producto equivalente*
Carbonato de calcio	CaCO_3	100	100
Carbonato de calcio y magnesio	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	109	92
Hidróxido de calcio	Ca(OH)_2	135	74
Oxido de calcio	CaO	179	56
Oxido de magnesio	MgO	250	40

*Cantidad (kg) de producto que produce un efecto similar a 100 kg de CaCO_3 puro.

Fuente: Adaptado de Tisdale, *et al.* (1985).

corrección de la acidez es menor. Ambas características del material encalante son antagónicas: a mayor reactividad menor es el efecto residual y viceversa (Rodríguez, 1993).

Para hacer una adecuada comparación de productos comerciales encalantes es preciso conocer el contenido de humedad (%), el contenido y tipos de carbonatos, óxidos e hidróxidos y el tamaño o finura de las partículas del material.

La expresión del contenido de agentes alcalinizantes de un material encalante se obtiene mediante el cálculo de su valor de neutralización (VN). Para ello, se obtiene el producto entre la fracción de cada componente de este material por su correspondiente VN (%) (Cuadro 2.5). El valor resultante constituye el contenido de CaCO_3 equivalente (CCE) del material encalante.

Cuadro 2.5 Cálculo del contenido de carbonato de calcio equivalente (CCE) de un material encalante.

Componentes	Contenido %	Valor fraccional	VN %	CCE %
CaCO_3	75	0,75	100	75,0
$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$	4	0,04	109	4,4
Ca(OH)_2	6	0,06	135	8,1
CaO	5	0,05	179	9,0
Agua	10	0,10	0	0,0
Inertes	5	0,05	0	0,0
Total	100	1,0		91,5

Fuente: Campillo (2006).

La proporción del tamaño de partículas de un material encalante es de gran importancia para establecer la eficiencia de su valor de neutralización. Por ello, la distribución del tamaño de partículas que presente un material corrector al pasar por diferentes mallas, afectará la cantidad de enmienda a aplicar al suelo para obtener un efecto neutralizante determinado. De acuerdo a la granulometría del material encalante, se ha definido el Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT).

Este PRNT será función del valor de neutralización (VN) y de la eficiencia relativa (ER) o grado de finura del material correctivo:

$$\text{PRNT} = (\text{VN} \times \text{ER})/100$$

Esto significa que una enmienda con un valor de neutralización (VN) de 95% y una eficiencia relativa (ER) de 88% tiene un poder relativo de neutralización total (PRNT) de 84%. Cuando se realizan los cálculos de necesidades de un determinado material encalante se asume que dicho material posee un PRNT de 100%. De acuerdo a esto, la recomendación de la dosis de cualquier material encalante debe corregirse en función del valor de PRNT calculado:

$$\text{Dosis enmienda} = (\text{Dosis recomendada} \times 100)/\text{PRNT}$$

2.4.3. Contenido de otros elementos

El contenido de magnesio debería ser considerado en la selección de un material encalante, especialmente si será aplicado en suelos claramente deficientes en magnesio. La dolomita es la fuente más barata para corregir una deficiencia de magnesio. Es importante considerar que en suelos con bajos contenidos de bases la aplicación de grandes cantidades de enmiendas calcáreas puede provocar un desequilibrio entre el calcio y el magnesio, induciendo así una deficiencia de magnesio. Además, una alta concentración de calcio y magnesio puede inducir una deficiencia de potasio cuando sus valores en el suelo son bajos.

Otros nutrientes que deben ser considerados en la enmienda calcárea es el fósforo que aporta el fango de cal, junto a otros nutrientes en menores cantidades. Dicho porcentaje fluctúa entre 0,6% y 1,2%, lo cual puede ser bastante significativo en aplicaciones de varias toneladas de enmienda.

2.4.4. Costos de producción, distribución y aplicación

El costo de producción está ligado al grado de elaboración industrial de la enmienda. El carbonato de calcio es la enmienda calcárea más barata porque requiere solamente una molienda. El óxido de calcio es más caro ya que debe sufrir un proceso de calcinado.

El fango de cal tiene un precio relativamente bajo, pero presenta un alto grado de humedad, lo que baja, su valor de neutralización y encarece el transporte y su aplicación.

El hecho que los centros productores de cal se encuentren mayoritariamente en la zona centro norte, con excepción de la cal de conchas marinas y la cal lansa, determina que los costos de transporte suban significativamente los precios de la enmienda.

Una adecuada comparación de enmiendas calcáreas requiere considerar el contenido de humedad, el contenido y tipos de carbonatos, óxidos e hidróxidos, y la finura del material. El contenido de agentes alcalinizantes se obtiene mediante el cálculo de su eficiencia relativa (base CaCO_3 igual a 100). Para ello se multiplica la fracción de cada componente por su valor alcalinizante (ver Cuadro 2.5). El valor resultante es el porcentaje de CaCO_3 equivalente: a mayor valor, mayor es la magnitud del efecto encalante (Suárez, 1994). Los porcentajes de CaCO_3 equivalentes y otras características de interés de las principales cales agrícolas existentes en el mercado se presentan en el Cuadro 2.6.

Cuadro 2.6. Contenido de CaCO_3 , equivalente y otras características relevantes de algunas cales comerciales

Producto comercial	Contenido de CaCO_3 equivalente %	Características del material
Fango lansa	40	Alta humedad; producto difícil de aplicar con humedad original; heterogéneo; compactado.
Cal lansa	58	30% de humedad; terrones (por compactación); presenta nutrientes (N, P y otros) al igual que el fango.
Magnecal	98	Contiene Mg (hasta 15% de MgO); producto seco y de alta finura.
Soprocal	90	Presenta 0,6 a 1,2% de Ca(OH)_2 (rapidez). Contiene 0,6 a 1,2% de MgO . Seco y de alta finura.
Conchas Molidas	95	Finura similar a otros productos. Humedad baja a muy baja. Bajo contenido de inertes.

Fuente: Suárez (1994).

2.5. ¿Cómo aplicar el encalado?

Con la finalidad de corregir la acidez del suelo, se recomienda que el material calcáreo sea aplicado en su totalidad en una sola oportunidad. Sin embargo, debido a las limitaciones técnicas de los equipos de aplicación, y a los costos involucrados, en muchos casos no es posible aplicar la dosis recomendada en sólo una aplicación.

Las reacciones de neutralización de la cal exigen que el material se hidrolice previamente lo que determina que se deba aplicar la cal en un suelo húmedo

antes de la siembra. Si no existe humedad en el suelo las reacciones de neutralización no se producirán.

El efecto correctivo de las cales calcíticas y dolomíticas requiere de algún tiempo (uno a varios meses) para manifestarse en forma significativa (tiempo de incubación), debido que son materiales poco solubles y no reaccionan de inmediato en el suelo. Por ello, estos materiales deben ser incorporados en la capa arable (15 a 20 cm de profundidad), donde se concentra la mayor proporción de las raíces de los cultivos. La incorporación de la enmienda con la aradura permitirá distribuir el material uniformemente y a la mayor profundidad posible puesto que el calcio es adsorbido por la fase sólida del suelo y es muy poco móvil. Debe recordarse que este efecto benéfico se circunscribe sólo a la zona de aplicación.

El período de incubación de estos materiales encalantes es variable y dependerá de la solubilidad del material, temperatura y humedad existente en el suelo. De esta manera, es posible extender su efecto en la capa arable del suelo (20 cm de profundidad). En el caso de usar cal calcítica se debe aplicar ojalá un par de meses antes de la siembra. Respecto de la cal dolomítica, como es de menor solubilidad que la cal anterior, debe ser aplicada tres a cuatro meses previo a la siembra del cultivo.

Cuando se trate del establecimiento de praderas de cualquier tipo necesariamente debe efectuarse el encalado correctivo previo a la siembra, puesto que en los años posteriores sólo podrá aplicarse en cobertera con lo cual se reduce drásticamente la eficiencia de la corrección de la acidez del suelo en profundidad.

En el caso de praderas mixtas con trébol blanco y ballica perenne, que poseen un sistema radicular superficial, es posible considerar también la aplicación de enmiendas en cobertera, siempre que la acidificación del suelo no comprometa más allá de los primeros 10 cm de profundidad. La aplicación en cobertera de cal logra neutralizar la acidez principalmente en los primeros centímetros del suelo, por la escasa movilidad de la cal. Su efecto real se observa luego del primer año. Sin embargo, este efecto puede ser más rápido si la acidez del suelo es más intensa.

En el Cuadro 2.7 se presenta el efecto corrector de la aplicación de 4 t/ha de la enmienda cal Soprocal sobre una pradera permanente de Chiloé. Al cabo de tres años desde su aplicación, los parámetros de acidez de los primeros 7,5 cm presentan incrementos importantes de los pH y niveles de calcio de intercambio, mientras que la saturación de aluminio ha disminuido considerablemente. Sin

embargo, este efecto correctivo de la cal en cobertera no se ha extendido en profundidad (7,5 - 15 cm), en donde la acidificación sigue siendo un factor limitante.

En siembras con cero labranza ocurre un efecto similar a la aplicación del encalado en cobertera sobre la pradera permanente. Se ha establecido que el efecto correctivo provocado por este manejo de la enmienda se concentra en los primeros 5 cm del suelo. Es evidente que esta corrección tan superficial es claramente insuficiente como para eliminar las limitaciones provocadas por la acidificación del suelo para el crecimiento normal de las raíces de los cultivos anuales que se producen en nuestra región.

Cuando se quiere establecer una pradera permanente o iniciar un sistema de cero labranza o siembra directa, es fundamental realizar previamente un análisis nutricional completo del suelo para definir las dosis correctivas de enmienda que se deben aplicar al suelo para eliminar completamente cualquier limitación por acidez. Posteriormente, sólo se deberá complementar este manejo con un encalado de mantención en cobertera, con dosis bajas cada dos a tres años, sobre la pradera o sobre la rotación de cultivos.

Cuadro 2.7 Efecto residual del encalado en cobertera (4 t/ha) sobre una pradera naturalizada. Huillínco, Ancud, 1995-1998.

Parámetro químico	Profundidad cm	Septiembre 1995	Agosto 1998	
		Testigo	Testigo	Encalado
pH-H ₂ O	0 - 7,5	5,4	5,4	5,9
	7,5 - 15	5,4	5,5	5,6
pH-CaCl ₂	0 - 7,5	4,6	4,7	5,2
	7,5 - 15	4,5	4,6	4,9
Ca intercambiable (cmol+.kg ⁻¹)	0 - 7,5	3,82	3,27	11,78
	7,5 - 15	0,56	0,90	0,43
Saturación de Al (%)	0 - 7,5	8,4	14,8	0,6
	7,5 - 15	14,4	23,9	8,2

Fuente: Campillo *et al.* (1997).

Una vez que el pH de un suelo se ha incrementado por la aplicación de encalado y los problemas de acidez de suelo han sido corregidos, el suelo volverá otra vez a acidificarse si es sometido a las mismas condiciones de manejo inicial. La tasa de acidificación será lenta pero similar a aquella previamente experimentada en el potrero.

La duración del encalado dependerá del tipo de suelo, precipitación durante el invierno, cantidad de enmienda aplicada y la tasa de acidificación producida en

ese suelo. En términos generales, luego de tres a cuatro años se pierde el 50% del efecto inicial del encalado.

2.6. Determinación de los requerimientos de encalado

El “requerimiento de encalado” se define como la cantidad de carbonato de calcio (CaCO_3) necesaria para subir a un valor deseado el $\text{pH-H}_2\text{O}$ de una hectárea de suelo.

La decisión de encalar dependerá de las características del suelo y de la especie o variedad de cultivo. En condiciones de gran acidez de suelo, se solubiliza una gran cantidad de aluminio activo (Al^{+3}), que puede alcanzar niveles tóxicos, dependiendo de la variedad y especie de planta y del tipo de suelo en que se desarrollen. La tolerancia de los cultivos a la concentración de Al^{+3} puede deberse a su capacidad para reducir su absorción o para disminuir su actividad luego de su absorción por las raíces. Cultivos como el centeno y las papas son cultivos tolerantes a la actividad del Al^{+3} , presentando productividades adecuadas bajo situaciones de concentraciones altas de Al^{+3} . En cambio, existen otros cultivos como la remolacha, la cebada y alfalfa que son muy sensibles a la concentración de Al^{+3} y cuya productividad se deprime marcadamente en suelos ácidos. El Al^{+3} de la solución del suelo provoca necrosis en las raíces, afectando su capacidad de absorción de nutrientes y agua, disminuyendo fuertemente el crecimiento y provocando la aparición de síntomas de deficiencias nutricionales.

La estrategia recomendada para abordar la limitación de acidez de los suelos es reducir el aluminio tóxico disponible para las plantas mediante el encalado. La cantidad de enmienda usada debe ser la suficiente para reducir el aluminio de la solución de suelo a niveles no tóxicos. Sin embargo, se debe tener presente también que la toxicidad del aluminio es relativa, dependiendo del grado de sensibilidad o tolerancia del cultivo. Por esta razón, no es posible definir un nivel crítico de aluminio en la solución de suelo a alcanzar con el encalado, que sea válido para todas las especies y variedades.

Por otra parte, se ha establecido que las especies tienen distintos requerimientos individuales de pH. Estos valores indican los pH en los cuales un cultivo en particular crece mejor. Sin embargo, ello no significa que un cultivo no pueda crecer fuera del rango indicado (Figura 2.2).

Se ha determinado que la medición del pH del suelo puede utilizarse como un indicador de la toxicidad por aluminio. Para ello, debe establecerse previamente la relación que existe entre ambas variables mediante la experimentación de

Cultivo	pH				
	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Ajo		←			→
Alfalfa				←	→
Arveja		←			→
Avena		←		→	
Ballicas		←			→
Cebada			←		→
Centeno	←		→		
Coliflor			←		→
Lechuga			←		→
Maíz ensilaje		←			→
Papa	←		→		
Raps		←		→	
Remolacha			←		→
Trébol blanco		←			→
Trébol rosado			←		→
Trigo		←			→

Figura 2.2. Rangos adecuados de pH en agua de suelos ácidos para diferentes cultivos
Fuente: Adaptado de Rodríguez (1993).

campo, evaluando así estos parámetros en condiciones reales para los diferentes tipos de suelos de la región.

Frente al encalado, los suelos presentan diferencias en su resistencia al cambio de pH y es lo que se denomina capacidad tampón de pH (CTpH), que se define como la cantidad de CaCO_3 necesaria para subir en 0,1 unidades el pH- H_2O de una hectárea de suelo. La CTpH se puede determinar en el laboratorio por incubación con una base (Sadzawka *et al.*, 2006).

El inverso de la CTpH es lo que conoce como poder tampón y se define como la variación de pH que experimenta un suelo al agregar 1 t/ha de carbonato de calcio.

Mediante ensayos de campo, se han establecido algunas categorías de poder tampón de suelos de las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos (Cuadro 2.8), basados en experimentos de respuesta al encalado con especies forrajeras (Campillo y Sadzawka, 1993).

Por ejemplo (Cuadro 2.8), un suelo trumao de la localidad de Vilcún sube su pH en 0,11 unidades por cada tonelada de carbonato de calcio como enmienda. En otras palabras, se requieren 940 kg de enmienda para que el pH se incremente en 0,1 unidades.

Se ha observado que la respuesta de los diferentes trumaos a la aplicación de enmiendas es bastante parecida, considerando 10 cm de profundidad. La capacidad tampón de pH (CTpH) que presentan los suelos estudiados es semejante, independientemente de su ubicación geográfica (Campillo, 1996).

Cuadro 2.8. Capacidad tampón de pH (CTpH) de algunas agrupaciones de suelos trumaos (0–10 cm), de las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.

Zona geográfica	Localidad	Poder tampón*	CTpH** kg ha ⁻¹
V. Central	Vilcún	0,11	940
Pre cordillera	Pucón	0,13	700
S. Costero	Hualpín	0,15	600
V. Central	Máfil	0,13	770
V. Central	Osorno	0,12	830
V. Central	Purranque	0,12	830

* Variación del pH en agua del suelo por ton ha⁻¹ de carbonato de calcio.

** Carbonato de calcio para elevar el pH en 0,1 unidades.

Fuente: Campillo (2006).

En el Cuadro 2.9 se presenta la capacidad tampón de pH para diferentes asociaciones de suelos de la IX Región considerando 20 cm de profundidad.

Cuadro 2.9. Poder tampón de pH de agrupaciones de suelos derivados de cenizas volcánicas de La Araucanía.

Agrupación de suelos	Poder tampón de pH (Δ pH (CaCO ₃ t ha ⁻¹) ⁻¹)	CPT (CaCO ₃ t ha ⁻¹) (0,1 pH) ⁻¹
Ñadis	0,10	1,00
Andisoles (trumaos)	0,12	0,83
Transicionales	0,13	0,77
Ultisoles (rojos arcillosos)	0,15	0,67

Fuente: Campillo (2006).

También se han determinado diferentes categorías de pH y la probabilidad de respuesta al encalado de las especies de cultivo en general (Cuadro 2.10).

Cuadro 2.10 Rangos de pH-H₂O, pH-CaCl₂ y respuesta al encalado de especies de cultivos.

pH-H ₂ O	pH-CaCl ₂	Categoría de pH	Respuesta al encalado
< 5,0	< 4,3	muy fuertemente ácido	alta a muy alta
5,1 - 5,5	4,4 - 4,8	fuertemente ácido	media a alta
5,6 - 6,0	4,9 - 5,3	moderadamente ácido	baja a media
> 6,0	> 5,3	ligeramente ácido	nula a muy baja

Fuente: Campillo (2006).

2.7. ¿Qué dosis de cal usar?

La definición de la dosis de encalado para corregir la acidez del suelo dependerá de los siguientes factores (Rodríguez, 1993):

- Tolerancia del cultivo a la acidez.
- Capacidad tampón de pH del suelo.
- Variación entre el pH inicial del suelo y el pH a alcanzar según el cultivo.
- Composición y características de la enmienda calcárea aplicada.
- Profundidad del encalado.

Resulta evidente la imposibilidad de generalizar dosis de encalado para todos los suelos dado los diferentes factores que la están condicionando. Es importante reiterar que así como no existe un pH óptimo para todos los cultivos, tampoco existe una misma capacidad tampón para todos los suelos. De esta manera, la dosis de encalado variará en función a la tolerancia de los cultivos y también de acuerdo a la capacidad tampón de pH los suelos.

La dosis de encalado para corregir la acidez y establecer un cultivo puede establecerse de acuerdo a dos parámetros de evaluación de la acidez del suelo: el pH y el contenido de saturación de aluminio.

Cuando se utiliza el criterio del pH para el cálculo de la dosis, debe conocerse el pH inicial del suelo (análisis de suelo) y el pH adecuado según sea el cultivo a establecer (Figura 2.2). Adicionalmente, es preciso conocer la capacidad tampón de pH del suelo (CTpH), la cual se puede determinar en el laboratorio o seleccionarla de la Cuadro 2.9. Con estos antecedentes, se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{Dosis de encalado (t ha}^{-1}\text{)} = (\text{pH adecuado} - \text{pH inicial}) / \text{CTpH}$$

Es importante recordar que la definición de dosis de aplicación de enmiendas en suelos de cultivos o praderas de nuestra región mediante la utilización del

parámetro de pH-H₂O no es el mejor criterio de corrección. Este método es útil solamente cuando no se cuenta con el respaldo de un análisis de suelo que incluya la CICE.

El método más certero para definir la dosis de enmienda a aplicar en un suelo con limitaciones por acidez se basa en el parámetro de saturación de aluminio (%). Este criterio es más robusto e integrador puesto que engloba la suma de bases, el aluminio de intercambio y la CICE del suelo:

$$\text{Saturación de Aluminio (\%)} = (\text{Al de intercambio/CICE}) \times 100$$

El Sistema de Incentivos para la Sustentabilidad Agroambiental de los Suelos Agropecuarios (SIRSD-S) permite optar a la bonificación de encalado cuando el pH-H₂O es inferior a 5,8 en los suelos de las regiones VIII al norte, o cuando la saturación de aluminio de la CICE es superior a 5% en los suelos de las regiones de La Araucanía, de Los Lagos y Los Ríos. Para los productores agrícolas de La Araucanía se han establecido tablas de recomendaciones generales de dosis de enmiendas para diferentes rangos de saturación de aluminio (Cuadro 2.11). Alfaro y Bernier (2006) señalan dosis de CaCO₃ necesaria para bajar la saturación de aluminio a 5% (Cuadro 2.12), aplicado en cobertera para tres grupos de suelos representativos de la Región de Los Lagos y Los Ríos (Trumaos, Rojos Arcillosos y Transición).

Cuadro 2.11 Recomendaciones de encalado (0 – 20 cm) para Andisoles (trumaos) y Ultisoles (rojo arcillosos) de La Araucanía.

Saturación de Al %	Andisoles o trumaos CaCO ₃ t ha ⁻¹	Ultisoles o rojo arcillosos CaCO ₃ t ha ⁻¹
< 5,0	0,0	0,0
5,1 – 7,5	0,5	0,4
7,6 – 10,0	1,0	0,8
10,1 – 12,5	1,4	1,2
12,6 – 15,0	1,8	1,5
15,1 – 17,5	2,2	1,8
17,6 – 20,0	2,5	2,1
20,1 – 22,5	2,8	2,4
22,6 – 25,0	3,2	2,7
25,1 – 27,5	3,5	3,0
27,6 – 30,0	3,8	3,2
> 30,1	4,0	3,5

Fuente: Sistema de Recomendaciones de INIA – Carillanca

Cuadro 2.12. Dosis de carbonato de calcio (kg de CaCO_3 ha^{-1}) para reducir la saturación de aluminio a 5% (0-10 cm de profundidad) en tres tipos de suelo, por aplicación en cobertera.

Sat Al (%) inic.	Dosis en kg ha^{-1} de CaCO_3		
	Trumao	Rojo Arcilloso	Transición
50	4319	2980	3311
49	4281	2954	3282
48	4242	2927	3252
47	4203	2900	3222
46	4162	2872	3191
45	4121	2843	3159
44	4079	2814	3127
43	4036	2785	3094
42	3992	2754	3060
41	3946	2723	3026
40	3900	2691	2990
39	3853	2658	2954
38	3804	2625	2916
37	3754	2590	2878
36	3702	2555	2839
35	3650	2518	2798
34	3595	2481	2756
33	3539	2442	2713
32	3482	2402	2669
31	3422	2361	2624
30	3361	2319	2576
29	3297	2275	2528
28	3231	2229	2477
27	3163	2182	2425
26	3092	2134	2371
25	3019	2083	2314
24	2942	2030	2256
23	2862	1975	2194
22	2779	1917	2130
21	2692	1857	2064
20	2600	1794	1993
19	2504	1728	1920
18	2402	1658	1842
17	2295	1584	1760
16	2182	1505	1673

15	2060	1422	1580
14	1931	1332	1480
13	1792	1237	1374
12	1642	1133	1259
11	1479	1020	1134
10	1300	897	997
9	1102	761	845
8	882	608	676
7	631	435	484
6	342	236	262

Fuente: Alfaro M. y Bernier R. (2008)

2.8. Consideraciones en el encalado

2.8.1. Beneficios del encalado

- Aumenta el pH del suelo.
- Aumenta el nivel de calcio de intercambio en el suelo.
- Reduce la concentración de aluminio en la solución de suelo.
- Reduce la concentración de manganeso y hierro en la solución del suelo.
- Aumenta la disponibilidad de molibdeno aunque no necesariamente lo suficiente para el crecimiento de las plantas (esto es variable según el tipo de suelo).
- Puede aumentar la utilización de fósforo por el sistema radical de las plantas.
- Favorece la nodulación de algunas leguminosas de zonas templadas cuando el pH del suelo es restrictivo para la fijación simbiótica de nitrógeno.
- Favorece la presencia de microorganismos deseables y el reciclaje del nitrógeno del suelo y otros nutrientes, mediante el incremento de la actividad biológica.
- Permite un mejoramiento de la cantidad de lombrices de tierra, las que requieren un nivel de calcio superior al que está naturalmente presente en muchos suelos.

2.8.2. Respuestas erráticas del encalado

Las razones más comunes de una respuesta errática al encalado se deben a:

- Diagnóstico incorrecto del problema.
- Aplicación de la cal sin la suficiente antelación a la siembra.

- Deficiencias de otros nutrientes esenciales para las plantas, como es el caso del fósforo.
- Tamaño de partículas del material encalante demasiado grueso.
- Luego de la aplicación del encalado en cobertera (caso de praderas establecidas), cualquier respuesta puede no ser medible antes de uno a dos años.

2.8.3. Peligros del sobre encalado

El sobre encalado del suelo puede provocar una serie de problemas como:

- Deficiencia de magnesio.
- Reducción en la absorción de fósforo.
- Deficiencia de los micronutrientes cinc y boro.
- Deterioro de la estructura física del suelo.
- Reducción en la infiltración del agua.

Finalmente, la aplicación de dosis excesivas de enmienda constituye una práctica peligrosa que puede ser nociva para la producción de los cultivos, además de encarecer innecesariamente los costos de producción del cultivo. No debe olvidarse que el objetivo básico del encalado es eliminar sólo aquella acidez tóxica provocada por el aluminio activo de la solución de suelo y no pretender neutralizar toda la acidez natural de los suelos derivados de cenizas volcánicas del sur de Chile.

Bibliografía

- Alfaro M., Bernier R. 2008. Enmiendas calcáreas y estimación de dosis de aplicación. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. Boletín N° 179, pp 50. <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR35147.pdf>
- Beegle, D. B., Lingenfelter, D. D. 1996. Soil acidity and lime. 284p. Agronomy Facts N° 3, College of Agricultural Sciences. Penn State University. University Park, P.A. USA.
- Brady, N.C. and R.R. Weil. 2002. The nature and properties of soils. 960 p 13th.ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.

- Campillo, R. 2006. Manejo de los recursos naturales en el sistema de incentivos para la recuperación de suelos degradados de la Araucanía. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA Carillanca. Serie Actas N°38, pp 165.
- Campillo, R. 1994. Diagnóstico de la fertilidad de los suelos de la Décima Región. 135 p. Serie Remehue, N°53. In R. Campillo y G. Bortolameolli (eds.). Corrección de la fertilidad y uso de enmiendas en praderas y cultivos forrajeros. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Remehue, Osorno, Chile.
- Campillo, R. 1996. Encalado de suelos ácidos para producción de alfalfa. Tierra Adentro N° 8: 41-44.
- Campillo, R. y A. Sadzawka. 1993. Manejo del encalado y sus implicancias. Investigación y Progreso Agropecuario Carillanca 12 (3): 8-12.
- Campillo R., R., H. Zuñiga B. y J. Quilaqueo R. 1997. Los suelos de Chiloé y sus limitaciones nutricionales. p.27-46. Serie Remehue 65 In R.Campillo y G. Bortolameolli (eds.). Seminario Diagnóstico nutricional de los suelos de la Isla de Chiloé. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Remehue, Osorno Chile.
- Espinoza, J. 1995. Acidez y encalado de los suelos. Instituto de la Potasa y el Fósforo. Quito-Ecuador. Informaciones Agronómicas N° 20: 6-14.
- Halvin, J. L., Beaton J.D., Tisdale S.L. and Nelson W.L. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. 497 p. 6th .ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- ODEPA, 2005. Estadísticas Agropecuarias. Cultivos anuales, frutales y hortalizas. s/p. Departamento de Información Agraria, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile.
- Rodríguez, J. 1993. Enmiendas calcáreas. p. 117-125 In J. Rodríguez, J. y J. Donoso (eds.). Manual de Fertilización. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Sadzawka R., Carrasco M.A., Grez R., Mora M., Flores H. y Neaman A. 2006. Métodos de análisis de suelos recomendados para los suelos de Chile. 164 p. Serie Actas INIA N° 34, Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.

- Suárez, D. 1994. Uso de cales y fertilizantes en praderas de la zona sur. p. 39–65 Serie B.-18, In L. Latrille, L. (ed.). Avances en Producción Animal. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Instituto de Producción Animal, Valdivia, Chile.
- Tanaka, A., Tadano T., Yamamoto K. and Kamamura N. 1987. Comparison of toxicity to plants among Al^{+3} , AlSO_4^+ , and Al-F complex ions. Soil Science and Plant Nutrition 33(1): 43–55.
- Tisdale S.L., Nelson W.L and Beaton J.D. 1985. Soil fertility and fertilizers. 4th. ed. Macmillan, New York, USA.

CAPÍTULO 3

FÓSFORO EN SUELOS DE USO AGRÍCOLA: FERTILIZACIÓN Y CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Juan Hirzel C.

Ing. Agrónomo, M. Sc., Dr.

INIA Quilamapu

Marta Alfaro V.

Ing. Agrónomo, Ph.D

INIA Remehue

Jaime Mejías B.

Ing. Agrónomo, Ph. D

INIA Carillanca

3.1. Introducción

Los suelos usados para agricultura presentan diferentes propiedades relacionadas con la mayor o menor capacidad de producción de diferentes especies de uso agrícola. Estas propiedades se clasifican en físicas, químicas y biológicas, en función de su rol dentro del suelo (estructurarlo, permitir su hidratación, su drenaje, retención y entrega de nutrientes, actividad de microorganismos, etc.). Dentro de las propiedades químicas se encuentra el Fósforo (P) disponible, cuyos métodos de determinación son variados, pero en Chile se utiliza el método Olsen (Bicarbonato de Sodio 0,5N a pH 8,5; Sadzawka *et al.*, 2006).

3.2. Fertilización fosfatada en recuperación de suelos de uso agrícola^(*)

Una vez determinado el valor de P disponible de diferentes suelos, se debe correlacionar la respuesta de cultivos indicadores frente a la aplicación de fósforo a través de un fertilizante de alta solubilidad durante el periodo que comprenda un ciclo de cultivo, como el superfosfato triple u otro. De esta forma se tendrán suelos con diferentes niveles de P, y en función de la respuesta del cultivo a la dosis de P aplicada (incremento de rendimiento respecto del tratamiento control que no recibió P) se determinarán los índices de disponibilidad de este nutriente (muy bajo, bajo, medio, adecuado, etc.), como ha sido señalado

^(*) Extracto de Carrasco, et al. 2012. Técnicas de conservación de suelos, agua, y vegetación. Serie Actas Nº 48. INIA Rayentué.

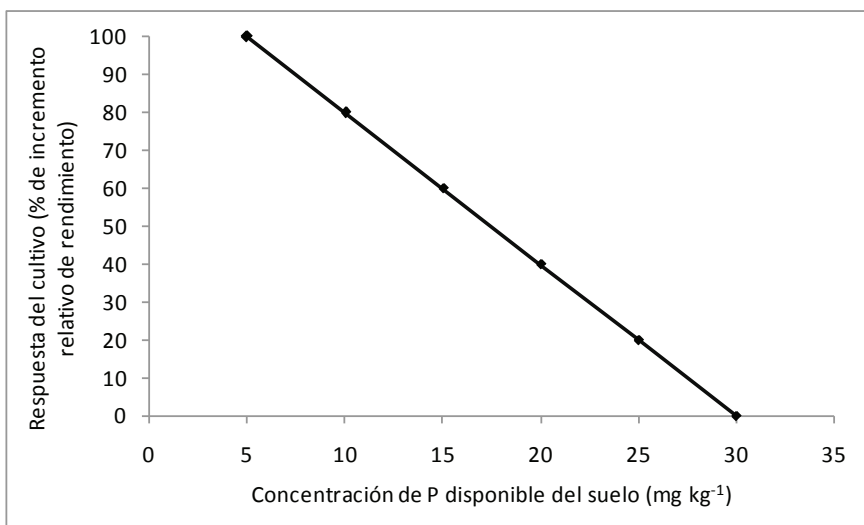


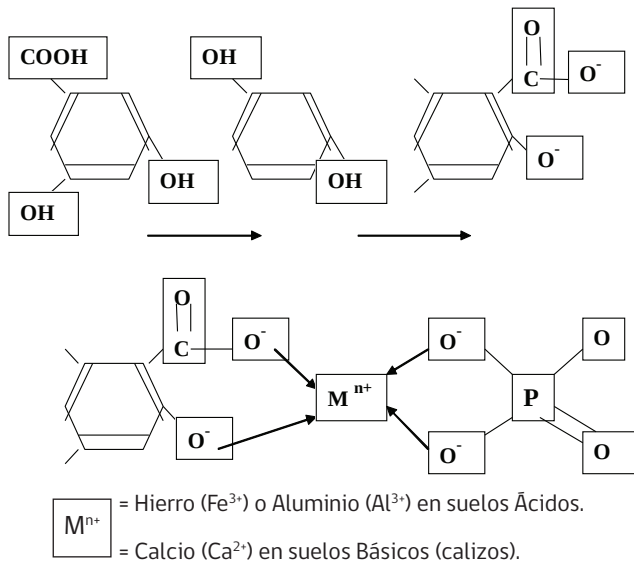
Figura 3.1. Respuesta de un cultivo indicador frente a la aplicación de Fósforo en un suelo con diferentes niveles de Fósforo disponible.
Fuente: Carrasco *et al.* (2012)

por algunos autores (Borges-Gómez *et al.*, 2008; Etchevers y Padilla, 2007; Glendinning, 2000). De manera metodológica, las dosis de P aplicadas al cultivo indicador superan las necesidades del cultivo, asegurando la reposición de sus necesidades para este nutriente. A modo de ejemplo, en la Figura 3.1 se presenta la respuesta teórica de un cultivo indicador frente a una misma dosis de P en un suelo con distintos niveles de P disponible.

Dado que el P es un elemento altamente fijado en el suelo a través de diferentes mecanismos que se explican a continuación (Havlin *et al.*, 1999; Navarro y Navarro, 2003), cuando el nivel de este nutriente es bajo, se deben utilizar dosis muy altas de este nutriente o dosis medias a altas durante varias temporadas consecutivas para alcanzar un nivel adecuado en el suelo (nivel en el cual la respuesta del cultivo es muy baja o nula, lo cual indica que este nutriente no constituye una limitación productiva al cultivo).

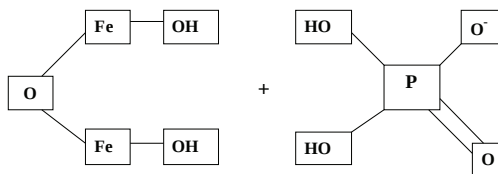
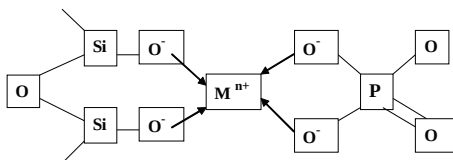
Los principales mecanismos de fijación de P en el suelo son los siguientes:

- En la materia orgánica del suelo.

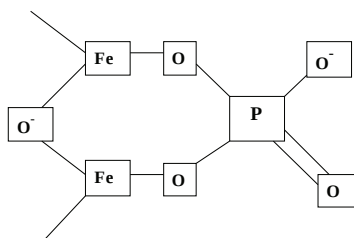


- En arcillas cristalinas y amorfas y en óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio.

En arcillas



En Óxidos e Hidróxidos de Hierro y Aluminio



- En suelos calizos.



CaHPO_4 FOSFATO MONOCÁLCICO (precipita)



$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ FOSFATO TRICALCICO (precipita fuertemente, poco soluble, se petrifica).

La dosis de P a emplear en un suelo para alcanzar un determinado valor de P disponible es función de características propias de cada suelo (principalmente propiedades físico-químicas) y de la diferencia de P a corregir (concentración de P a alcanzar menos concentración de P actual). Las características propias de cada suelo generan una resistencia al aumento en el P disponible producto de la aplicación de fertilizantes fosfatados, conocido como capacidad de fijación de P, como se puede observar en la Figura 3.2.

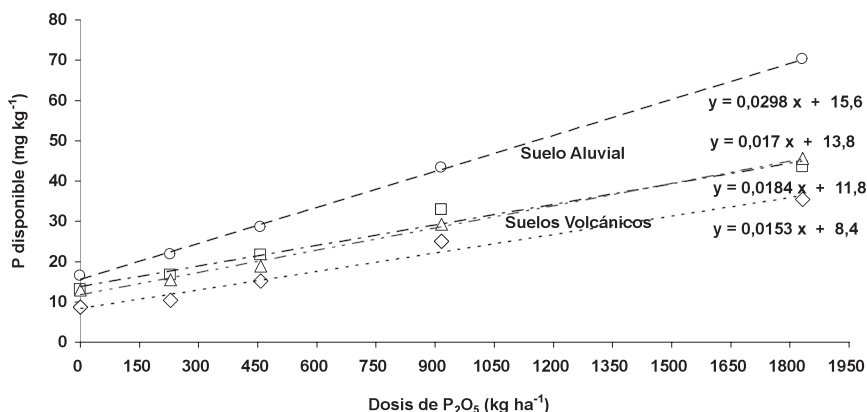


Figura 3.2. Efecto de dosis crecientes de Fósforo (P_2O_5) sobre el aumento de P disponible de cuatro suelos después de un período de 30 días de incubación en condiciones controladas de temperatura y humedad.
Fuente: Hirzel (2008).

Como se puede observar en la Figura 3.2, la pendiente de cada ecuación indica el aumento de P disponible de cada suelo que se genera con la aplicación del equivalente a 1 kg por ha de P_2O_5 . Para estos cuatro suelos el aumento de P disponible del suelo generado con la aplicación de P_2O_5 fluctuó aproximadamente entre 0,015 y 0,03 unidades por cada kg de P_2O_5 . No obstante, para otros suelos este valor puede ser mayor o menor a los presentados en la Figura 3.2. Al invertir los ejes de la Figura 3.2, se obtendría la dosis de P_2O_5 a aplicar para lograr

incrementos en el P disponible. De igual forma, al determinar la nueva ecuación de cada recta se obtendría su pendiente, la cual indicaría los kg de P_2O_5 a aplicar para lograr un incremento de 1 mg kg^{-1} (ppm) en el P disponible, también llamado "CP". Para los valores observados en la Figura 3.2, los CP obtenidos en estos cuatro suelos fluctúan entre 33 y 65, siendo mayor en los suelos volcánicos, dada su alta capacidad de fijación asociada a la presencia de arcillas amorfas (Alofán e Imogolita) con alta capacidad de intercambio aniónico y presencia de aluminio estructural (elemento muy reactivo con el fósforo) (Glendinning, 2000; Havlin *et al.*, 1999). La dosis de P a aplicar a la forma de P_2O_5 en un suelo se determina entonces con la siguiente ecuación:

Dosis de P_2O_5 ($kg\ ha^{-1}$) = (P a alcanzar- P disponible actual) (mg kg^{-1}) x CP x 2.29

Donde:

CP = kg de P_2O_5 a aplicar por ha para lograr el aumento en 1 mg kg^{-1} (ppm) de P disponible.

Por ejemplo, si se tiene un suelo granítico cuya concentración de P inicial es de 8 mg kg^{-1} (ppm) y se quiere alcanzar un valor de 15 mg kg^{-1} , considerando un CP de 20, la dosis de P a aplicar será de 140 kg/ha. Cabe destacar que también se puede expresar el CP en función de la dosis de P y luego transformar hacia dosis de P_2O_5

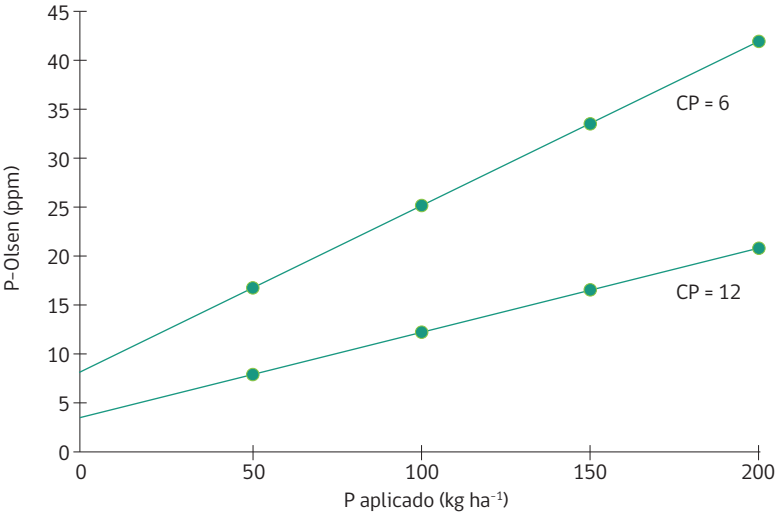


Figura 3.3. Valores de CP obtenidos en dos suelos de diferente origen.

Fuente: Carrasco *et al.* (2012)

multiplicando la dosis de P por 2,29 (valor que relaciona el peso molecular del P_2O_5 con el peso molecular del P_2 presente en esa molécula), como se observa en la Figura 3.3.

El valor de CP también se puede determinar en condiciones de campo, empleando un ciclo o varios ciclos de cultivos, en los cuales se determine la extracción total de P por el cultivo (planta entera) y las dosis de P aplicadas (normalmente mayores a las necesidades), generando un balance entre las entradas y salidas de P, que permitan determinar el incremento teórico de P disponible y luego relacionarlo con el incremento real de P disponible, para con ello determinar la eficiencia de incremento en el fósforo disponible, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\text{Eficiencia de incremento de P disponible (\%)} = \frac{\text{Incremento real de P disponible (mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Incremento teórico de P disponible (mg kg}^{-1}\text{)}} * 100$$

A su vez, con este valor de incremento se puede determinar la Fijación de P, que corresponde al valor porcentual restante para alcanzar el 100%, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\text{Fijación de P en el suelo (\%)} = 100\% - \text{eficiencia de incremento de P disponible (\%)}$$

A modo de ejemplo, en la Figura 3.4 se presenta la fijación de P obtenida en condiciones de campo en un experimento de largo plazo con diferentes rotaciones de cultivos, en la cual esta fijación se encontró entre un 90 a 98%, influenciada por el cultivo y el manejo integral de la fertilización (variaciones de pH, reacciones con los nutrientes aplicados, acidez fisiológica causada por el cultivo, entre otros).

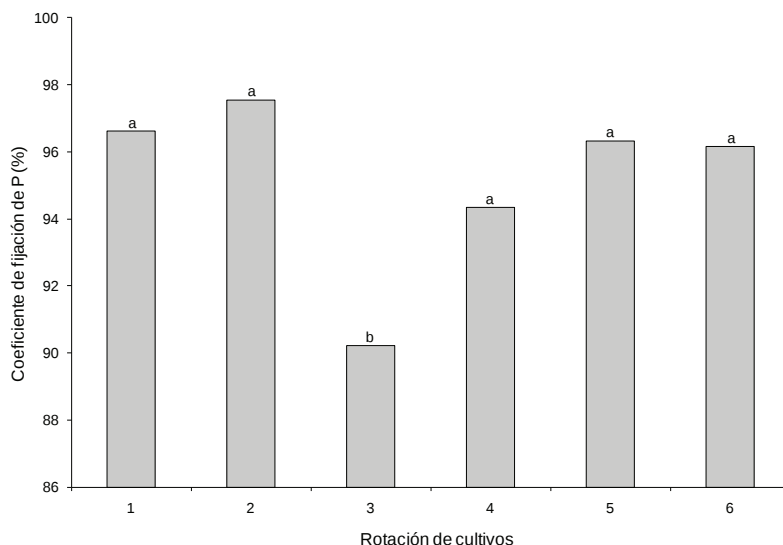


Figura 3.4 Coeficiente de fijación de Fósforo obtenido para los primeros siete años de cada rotación de cultivos en un suelo volcánico del centro sur de Chile. Letras distintas indican diferencia estadística entre tratamientos ($p < 0,05$). Las rotaciones son: (1) trébol rosado por 2 años, remolacha, trigo, trébol rosado, trébol rosado, remolacha; (2) poroto, cebada, remolacha, trigo, poroto, cebada, remolacha; (3) trébol rosado por 2 años, maíz de ensilaje, trigo, trébol rosado por 2 años, maíz de ensilaje; (4) poroto, cebada, maíz de grano, trigo, poroto, cebada, maíz de grano; (5) maíz de ensilaje, alfalfa por 5 años, remolacha; (6) maíz de ensilaje, trébol blanco - ballica por 5 años, remolacha.

Fuente: Hirzel *et al.* (2011).

3.3. Impacto ambiental de la actividad agropecuaria y el uso de fertilizantes

La demanda mundial de alimentos ha estado en una creciente expansión debido principalmente al incremento sostenido de la población. La tendencia actual indica que la demanda por alimentos aumentará en un 60% en el periodo 2006–2050. Casi la mitad de este aumento se atribuye al crecimiento de la población y el resto se asocia al incremento de los ingresos de los países en desarrollo, y a los cambios en el tipo de dieta (FAO, 2011). Para suplir la demanda proyectada de alimentos hacia el año 2050 se debe considerar que el recurso suelo, superficie arable y agua son cada día más limitantes. Esto, unido a las exigencias impuestas a los sistemas agropecuarios para que sean más inocuos, y de menor impacto hacia el ambiente, hace que este desafío sea una tarea aún más compleja.

Además, del aumento en el uso de insumos (fertilizantes, alimento para ganado y concentrados) en sistemas agropecuarios, la intensificación de la actividad incluye el uso de mayores cargas animales y de cultivares de alta producción con la finalidad de aumentar la producción por unidad de superficie. Cuando esta intensificación se realiza de manera inadecuada, puede acarrear potenciales impactos negativos sobre el medio ambiente (agua, suelo, aire). Entre los principales efectos ambientales asociados al desarrollo de la agricultura y ganadería a nivel mundial, se encuentran los generados por el manejo inadecuado de nutrientes, como fertilizantes y/o efluentes ganaderos, que pueden resultar en pérdidas de nitrógeno (N) y P hacia aguas superficiales y subterráneas, y en pérdidas de N en formas gaseosas que contribuyen a la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), además de la acumulación de metales pesados en los suelos y en la cadena de producción.

3.3.1. Contaminación de cursos de agua producto de la actividad agropecuaria

Hasta hace pocos años, el foco mundial de atención en relación a la contaminación de cursos de agua era la contaminación directa de éstos, sin embargo, en la actualidad existe una creciente preocupación por la contaminación difusa que proviene, principalmente, de predios agrícolas. La contaminación difusa puede ser definida como la introducción de impurezas a un curso de agua superficial o subterráneo, usualmente a través de vías indirectas y desde fuentes que son “difusas” en la naturaleza. La contaminación difusa puede ser continua o intermitente, siendo esta última más común debido a que está relacionada a actividades estacionales propias de la agricultura como la época de fertilización, o con fenómenos ocasionales tales como altas precipitaciones. Esto la hace difícil de controlar y regular.

Las principales vías de movimiento del agua relevantes para las pérdidas de N y P son el arrastre superficial y la lixiviación (Heathwaite *et al.*, 1996; Haygarth *et al.*, 1998). El arrastre superficial corresponde al agua que se mueve sobre la superficie del suelo a favor de la pendiente, mientras que la lixiviación corresponde al agua que se mueve en profundidad a lo largo del perfil del suelo una vez que ha ocurrido la infiltración. En suelos de drenaje libre, la lixiviación puede representar más del 70% del agua que se mueve en el suelo, pudiendo llegar hasta más de un 95% en suelos profundos y con buen drenaje como los suelos volcánicos encontrados en el sur de Chile (Alfaro *et al.*, 2009). En contraste, en suelos arcillosos, el arrastre superficial puede constituir una vía importante de transporte, en particular en períodos de saturación (Uusitalo *et al.*, 2001).

3.3.2. Pérdidas de fósforo

En general, los suelos son intrínsecamente deficientes en P por lo que la corrección en primera instancia y la mantención de este elemento son claves para la maximización de la producción. El rápido crecimiento e intensificación de los sistemas agropecuarios, ha resultado en una excesiva aplicación de P a través de fuentes minerales (fertilizantes) u orgánicas (efluentes ganaderos y biosólidos), generando una acumulación que supera la demanda agronómica (Correll, 1998). Los desbalances de P en sistemas agrícolas debido al uso inadecuado de fertilizantes y efluentes ganaderos, han causado un aumento de este nutriente en cursos de agua superficiales y subsuperficiales aledaños, provocando la aparición explosiva de algas tóxicas, la disminución de oxígeno disuelto y la muerte de organismos acuáticos. Así por ejemplo, concentraciones de P encontradas en arrastre superficial tan bajas como $0,01 \text{ mg P L}^{-1}$ pueden acelerar el crecimiento de algas en cursos de agua (Sharpley *et al.*, 1999).

3.3.3. Mecanismos de transporte de fósforo desde el suelo hasta cuerpos de agua

Aunque el P es considerado prácticamente inmóvil en el perfil del suelo, puede ser transportado desde el lugar de aplicación hacia cuerpos de agua, particularmente en aquellos suelos con concentraciones elevadas de P en relación a su capacidad de fijación.

El P es transportado por el agua ya sea como P disuelto o particulado, por lo que el conocimiento de la dinámica del movimiento del agua sobre y a través del suelo es fundamental para entender los procesos de transporte de P (Figura 3.5). En general, la mayoría del P es transportado principalmente vía arrastre superficial adsorbido a coloides orgánicos e inorgánicos. El otro mecanismo importante de pérdida de P se denomina pérdida incidental que se refiere a la coincidencia entre la aplicación de P con abonos orgánicos (güano, estiércol o efluente ganadero), o fertilizantes minerales y un evento de lluvia de intensidad alta, lo que resulta en escorrentía superficial. Este es un problema que se ha detectado en lugares donde se producen fuertes precipitaciones, en suelos arcillosos de baja infiltración, o en sectores con pendientes topográficas fuertes. Por ejemplo, en suelos volcánicos del sur de Chile con alta capacidad de fijación de P, se han encontrado pérdidas incidentales que varían entre 3 y 14 g P ha^{-1} (Alfaro y Salazar, 2007; Alfaro *et al.*, 2009).

En el perfil del suelo puede existir flujo preferencial a través de fisuras y microcanales, especialmente en suelos arcillosos. En suelos más livianos (arenosos), el

agua se mueve uniformemente en forma matricial favoreciendo las pérdidas de P vía lixiviación (Beauchemin *et al.*, 1998).

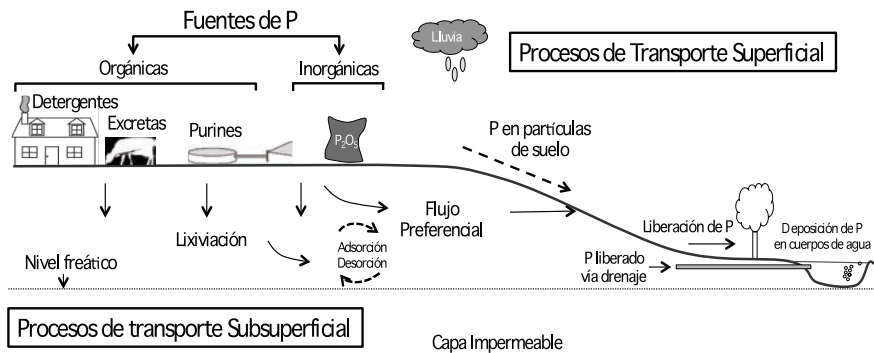


Figura 3.5. Principales mecanismos del movimiento del fósforo en sistemas agropecuarios intensivos.

Fuente: Adaptado de Sims y Kleinman (2005).

La erosión del suelo es un problema en suelos cultivados sin cobertura vegetativa o en praderas de baja calidad, donde el suelo está parcialmente cubierto. Además de corregir los riesgos de erosión, estas pérdidas incidentales se pueden evitar con fertilizaciones fosfatadas coherentes con el óptimo rendimiento de los cultivos.

Del total de P que es transferido desde el suelo a las aguas sólo una parte es soluble, y el inorgánico disuelto puede ser utilizado inmediatamente por los organismos acuáticos. Esta fracción que se denomina P biodisponible, es de menor magnitud y proviene generalmente de sistemas de drenaje artificial (Beauchemin *et al.*, 1998). Por lo tanto, se postula que la mayor parte del P que alcanza los cuerpos de agua no se encuentra biodisponible. Sin embargo, las formas de P tales como el P asociado a complejos orgánicos, son degradables y llegan a estar disponibles en el tiempo. Considerando que estas formas de P constituyen las pérdidas más comunes en sistemas agropecuarios intensivos, su impacto en el tiempo puede ser de gran magnitud en la eutrofización de las aguas.

3.3.4. Indicadores de riesgo ambiental asociados al fósforo

La preocupación ambiental que existe sobre el impacto que los sistemas agropecuarios tienen sobre la calidad de las aguas ha forzado a las agencias ambientales a considerar el desarrollo de recomendaciones de aplicación

de P y manejo de cuencas basado en el riesgo potencial de pérdida de P vía escurrimiento superficial y subterráneo proveniente de zonas agrícolas manejadas en forma intensiva. La mayor dificultad ha sido la definición de los niveles críticos de concentración de P en el suelo para ser utilizado como indicador del límite ambiental que recomiende detener la aplicación de P.

El riesgo ambiental de la pérdida de P ha sido estimado mediante el uso de distintos indicadores. Los métodos como el P Olsen (Sadzawka *et al.*, 2006). Sin embargo, el problema de estos indicadores ha sido la dificultad para discriminar si un tipo de suelo actúa como fuente de P o como acumulador de P. Es decir, dos suelos que tienen una concentración similar de P Olsen pueden presentar distintos riesgos potenciales para liberar P. Recientemente, un índice desarrollado y validado para formular recomendaciones agronómicas para la corrección de P en suelos deficitarios (BC_p), ha sido propuesto para definir los límites máximos de P en suelos volcánicos del sur de Chile donde existen pérdidas incidentales de P (Mejías *et al.*, 2013). El indicador BC_p es expresado como la cantidad de P que debe ser aplicada al suelo para subir en 1 ppm el P Olsen, considerando un volumen de 0,2 m de profundidad por una hectárea de suelo. Experimentos realizados en un suelo representativo del sur de Chile con aptitud agropecuaria indicaron que el riesgo potencial de pérdida de P aumenta significativamente cuando BC_p es inferior a 15 kg ha^{-1} . Este valor equivale a 53 mg kg^{-1} de P Olsen para este suelo, lo que está muy por sobre el óptimo agronómico para la mayoría de los cultivos de la zona. De este modo, el BC_p es sugerido como un indicador potencial para medir el riesgo de pérdida de P cuando se alcanza o excede la capacidad de adsorción de P del suelo por la adición de P en sistemas intensivos. La principal forma de reducir los riesgos ambientales por una sobre aplicación de P es implementar Buenas Prácticas Agrícolas o Ganaderas (BPA/BPG) para impedir un efecto negativo de la adición de P. Para ello se debe considerar definir e identificar áreas de riesgo potencial de acumulación (sectores sobre-fertilizados por ejemplo, sectores cercanos a cursos de agua o propensos a la lixiviación), ajustar la fertilización orgánica e inorgánica a las demandas del cultivo o la pradera, realizar un adecuado manejo de la rotación, evitar el uso de fertilizantes de origen desconocido, evitar el sobre pastoreo, y la aplicación de fertilizantes en periodos de alta precipitación, en particular en suelos con mayor pendiente topográfica.

Bibliografía

- Alfaro, M., y Salazar, F., 2007. Phosphorus losses in surface run-off from grazed permanent pastures on a volcanic soil from Chile. *Soil Use Manage* 23: 323-327.
- Alfaro, M., Salazar, F., Oenema, O., Iraira, S., Teuber, N., Villarroel, D. y Ramírez, L., 2009. Nutrients balances in beef cattle production systems and their implications for the environment. *J. Soil Sci. Plant Nutrition* 9: 40-54.
- Beauchemin, S., R. Simard y Cluis, D. 1998. Forms and concentrations of phosphorus in drainage water of twenty-seven tile drained soils, *J. Environ. Qual.*, 27: 721-728.
- Borgez-Gómez, L., M. Soria-Fregoso, V. Casanova-Villarreal, E. Villanueva-Cohuo, y Gaspar Pereyda-Pérez. 2008. Correlación y calibración del análisis de fósforo en suelos de Yucatán, México, para el cultivo de chile habanero. *Agrociencia* 42:21-27.
- Carrasco J., Jorge, Squella N., Fernando, Riquelme S., Jorge, Hirzel C., Juan., y Uribe C., Hamil., 2012. Técnicas de conservación de suelos, agua, y vegetación. pp. 210 . Serie Actas N° 48. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Rayentué, Rengo, Chile.
- Correl, D. 1998. The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review. *J. Env. Qual.* 27: 261-266.
- Etchevers, J., y J. Padilla. 2007. Diagnóstico de la fertilidad del suelo. En: Alcantar y Trejo-Téllez (Ed). *Nutrición de cultivos*. Ediciones Mundi-Prensa. México. 454 p.
- Food and Agriculture Organization, FAO. 2011. Current world fertilizer trends and outlook to 2015. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Glendinning, J.S. 2000. Australian Soil Fertility Manual. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia. 154 p.
- Havlin, J.L., J. D. Beaton, Tisdale, S., and W. L. Nelson. 1999. Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management. 6ª ed. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 499 p. North Carolina State. USA.
- Haygarth, P.M., Hepworth, L. y Jarvis, S.C. 1998. Forms of phosphorus transfer in hydrological pathways from soil under grazed grassland. *European J. Soil Sci.* 49: 65-72.
- Heathwaite, A.L., Johnes, P.J. y Peters, N.E. 1996. Trends in nutrients. *Hydrological Processes* 10: 263-293.

- Hirzel, J. 2008. El suelo como fuente nutricional. Pág. 49-83. In: Hirzel, J. 2008 (Ed). Diagnóstico Nutricional y Principios de Fertilización en Frutales y Vides. Colección Libros INIA-24. ISSN 0717-4713. 296 p.
- Hirzel, J. P.Undurraga, J. González. 2011. Chemical properties of volcanic soil as affected by seven years rotations. Aceptado en Chilean J. Agric. Res.
- Mejías, J.H., Alfaro y Harsh, J. 2013. Approaching environmental phosphorus limits on a volcanic soil of Southern Chile. *Geoderma* 207/208: 49-57.
- Navarro, S., y G. Navarro. 2003. Química Agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. España. 487 p.
- Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., Mora, M., Flores, H., y Neaman, A. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Serie actas INIA No. 34. 164p., Santiago, Chile.
- Sharpley, A.N., Daniel, T., Sims, T., Lemunyon, J., Stevens, R. y Parry, R., 1999. Agricultural Phosphorus and Eutrophication. USDA-ARS, USA.
- Sims, J. T. y Kleinman, P. 2005. Managing agricultural phosphorus for environmental protection. En: Sims, J.T.; Sharpley, A.N. (Ed.). Phosphorus; Agriculture and the environment. Madison: ASA. p.1021-1068.
- Uusitalo, R.; Turtola, E.; Kauppila, T. y Lilja, T. 2001. Particulate phosphorus and sediment in surface runoff and drainflow from clayey soils. *J. Environ. Qual.* 30:589-595.

CAPÍTULO 4

PREPARACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS, Y SU EFECTO SOBRE LOS PARÁMETROS FÍSICOS DEL MISMO

Jorge Carrasco J.
Ing. Agrónomo, Dr.
INIA Rayentué

Jorge Riquelme S.
Ing. Agrónomo, Dr.
INIA Raihuén

4.1. Introducción

La preparación de suelo o labranza, es un proceso clave al inicio de todo cultivo, particularmente para praderas, cereales, papas, maíz, y otros, por lo cual hay aspectos que se deben considerar para el desarrollo de los cultivos durante todo su ciclo, desde que germinan hasta su madurez. De ello dependerá el éxito del cultivo durante todo su ciclo, por lo cual una óptima preparación del terreno es la base para el establecimiento de una buena sementera y posterior crecimiento de ellos.

Para que se produzca una buena germinación y emergencia de los cultivos, se debe tener una temperatura adecuada (unos 10° C aproximadamente de temperatura media diaria del suelo), determinada humedad; una buena aireación, para que la semilla tenga oxígeno para germinar; un adecuado mullimiento o desmenuzamiento de la tierra, para que la semilla esté en contacto con ella; y una capa superficial de suelo suelto, para que la plántula tenga los menores obstáculos para emerger. Además de lo anterior, se debe disponer de un volumen suficiente de suelo para que las raíces de las plantas se desarrollen adecuadamente, lo que les permitirá absorber agua y nutrientes para su adecuado crecimiento.

Por otro lado, las labores de preparación de suelos deben ser las necesarias y contar con los equipos adecuados, porque un exceso de ellas, además de ser antieconómico, podría ser perjudicial para el suelo ya que corre el riesgo de mullirlo o desmenuzarlo en exceso, lo que puede originar problemas de erosión, e incluso “costras” superficiales que evitarán una buena germinación de la semilla. Además, un terreno preparado con implementos no adecuados, puede generar en el tiempo un riesgo de compactación de suelos.

El uso inadecuado de un equipo agrícola, puede causar daño al suelo y no conseguir condiciones favorables para el desarrollo del cultivo, por lo cual es necesario, entonces, conocer los problemas derivados de la preparación de suelos y los equipos involucrados, para hacer más eficiente las labores, sin afectar las propiedades del mismo.

La preparación de los suelos depende de una serie de factores, como son el tamaño de la semilla del cultivo a establecer, la maquinaria disponible, el tipo de suelo, la humedad del mismo, la presencia de rastrojos del cultivo anterior, tipo y cantidad de malezas presentes, condiciones climáticas, e incluso de la calidad y eficiencia del operador de la maquinaria.

Un productor agrícola no debe olvidar que un excesivo número de labores, producto de una mala programación de ellas, va afectar seriamente la estructura del suelo y sus propiedades físicas, principalmente por el “tránsito” del tractor y el implemento de labranza al momento de realizar la labor de aradura de inversión de suelo, si se trata de usar arados de disco o vertedera.

4.2. La labranza y su efecto en las propiedades físicas del suelo

En la preparación de suelos con arados y rastras, se producen cambios en las propiedades físicas del suelo, esto porque se modifican las condiciones del mismo en la profundidad de la labor. Si las labores se realizan con un grado de humedad excesiva de suelo y equipos inadecuados, los cambios pueden ser negativos para el suelo o para el cultivo. Esto significa que el agricultor debe elegir el método más apropiado para su situación particular, de acuerdo a la disponibilidad de maquinaria agrícola (arados y rastras), de acuerdo a condicionantes de suelo, como textura de suelo (porcentaje de arena, limo y arcilla), humedad, rastrojos, además de tipo de malezas presentes, entre otras.

4.2.1. La compactación de los suelos originada por la labranza

Existen dos tipos principales de compactación, una de origen morfológico, es decir producto de la formación de suelos, que resulta de una acción lenta y continua, en el tiempo, de los procesos de formación del mismo. El segundo tipo de compactación de suelos, tiene una causa diferente, donde en el suelo se origina un horizonte de impedimento físico, conocido como, “pie de arado”, que es consecuencia de tres fuerzas que actúan sobre el suelo: gravedad, humedad (lluvia o riego) y, especialmente por el tránsito de maquinaria y animales. Este

horizonte endurecido, alcanza su grado de compactación más alto, al nivel de la profundidad de trabajo de los arados y rastras, es decir si la profundidad de trabajo de un arado de vertedera o discos, por ejemplo, es de 25 cm, es a partir de esa profundidad donde se produce el mayor grado de compactación del suelo. En la labor de aradura con arados de disco o vertedera, para soportar las fuerzas laterales que ejerce cada uno de ellos, comúnmente se trabaja con una de las ruedas delanteras y una de las ruedas traseras del tractor, de un lado de este, ubicadas en el interior del último surco de inversión que va dejando la labor. Si la profundidad de la labor de aradura es de 25 cm, por ejemplo, las ruedas indicadas se desplazarán a esa profundidad en el último surco de aradura de la labor, por lo cual en esa profundidad se va generando un efecto de compactación por el tránsito de ellas, que se suma al efecto compactador del arado al cortar un prisma de suelo a esa profundidad, ya que con el corte origina una cierta presión hacia abajo, lo cual es compactación.

De acuerdo con lo señalado, es así como se origina el problema de pie de arado, primero por el efecto de corte del arado a la profundidad de la labor, y en forma posterior, y casi simultánea, por el tránsito de las ruedas de un lado del tractor en el interior del surco de aradura. El concepto anterior es muy importante, si consideramos que un agricultor que realiza labores de aradura con equipos tradicionales y propios, como lo son los arados de vertedera y discos, compactará año a año su suelo, si trabaja a la misma profundidad. De ahí la importancia de incorporar como una labor complementaria, cada 3 años, el uso de un arado escarificador subsolador (de 5 puntas), para romper posibles problemas de “pie de arado” que se pudiesen haber formado. Si el productor no dispone de los arados y arrienda el servicio de aradura, de acuerdo a lo señalado sobre la compactación que generan los arados de disco y vertedera, es recomendable contratar el servicio de aradura con arado cincel.

4.2.2. Importancia del contenido de humedad del suelo en la labranza

La humedad es uno de los factores más importantes en las labores de preparación de suelo, ya sea en su etapa inicial de aradura en la rotura del suelo, como en el afinamiento de la cama de siembra. La humedad, cuando es excesiva le confiere características de plasticidad al suelo, que lo hace adherirse a los implementos de labranza dificultando su acción, siendo más complicado esto en los suelos arcillosos. En suelos muy húmedos se afecta la tracción, al aumentar el patinaje, y con ello crecen los requerimientos de potencia. Un suelo seco o con un bajo contenido de humedad, es duro y cohesivo, debido al efecto de cementación de las partículas secas, lo que lo hace muy difícil de romper con arados y rastras, por lo cual se afecta la vida útil de estos equipos.

La consistencia “friable” representa la condición óptima de humedad para realizar labores de preparación de suelos. En la práctica, la condición friable se reconoce al tomar una muestra de suelo con la mano y conseguir que éste se disgregue fácilmente al ser presionado por los dedos, sin dejar restos adheridos en ellos. Un suelo muy húmedo se adhiere a la mano, incluso se puede moldear, en el caso opuesto se forman terrones que cuesta disgregarlos. Esto último, es más evidente en el caso de los suelos arcillosos.

El grado de mullimiento del suelo, está muy relacionado con su contenido de humedad y textura. Por lo tanto, es mucho más importante la oportunidad en que se realizan las labores, que el número de las mismas.

4.3 Labranza y equipos de aradura que invierten el perfil del suelo

4.3.1. Arado de vertedera

Es uno de los implementos agrícolas de mayor uso en el país. Se utiliza en las labores de preparación de suelo, para permitir un adecuado establecimiento de los cultivos, y además para incorporar al suelo desechos de cultivos, como los rastrojos.

En el caso de los cereales después de la cosecha de este cultivo, el uso del arado de vertedera permite incorporar los rastrojos que quedan después de la cosecha. Sin embargo, para que la labor del arado de vertedera sea eficiente, se hace necesario previamente que los rastrojos se piquen y trituren a un tamaño suficiente para facilitar su incorporación, lo cual se consigue con una rastra de discos. En la medida que los rastrojos queden picados lo más pequeño posible, por un lado, se facilitará la labor de incorporación, y por otro, será más rápido el proceso de descomposición de ellos en el suelo.

Como una forma de acelerar el proceso de descomposición de los rastrojos, es necesario además agregar una dosis de nitrógeno al suelo antes de la incorporación, para mejorar la relación carbono-nitrógeno, en dosis que van de 100 a 150 kg de urea por hectárea (45–70 kg N ha⁻¹).

Ventajas arado vertedera

Las ventajas más destacables de este arado, son las siguientes:

- Presenta una gran regularidad en la profundidad de trabajo y logra un buen control sobre la inversión del prisma del suelo, manteniendo con ello el micro

relieve del terreno.

- Consigue un perfecto mullimiento del suelo, lo que facilita el trabajo de los equipos como rastras de discos, que terminan el afinado de la cama de siembra de los cultivos.
- Realiza una buena inversión del suelo e incorporación de rastrojos, lo que permite una buena descomposición de los residuos vegetales. Después de picados los rastrojos sobre la superficie del terreno, puede llegar a incorporar el 90% de ellos al suelo.

Limitantes arado vertedera

- No trabaja bien si el suelo tiene una humedad por debajo o por sobre la del estado friable (definido anteriormente).

En la medida que la textura de un suelo se hace más arcillosa, es fundamental trabajar el suelo bajo el estado friable, porque a mayores contenidos de humedad, el suelo tiende a adherirse a la vertedera del arado y hace ineficiente la labor de inversión. Además, aumenta los riesgos de producir problemas de compactación



Foto 4.1. Arado de vertedera "listonado" o de rejilla. Adecuado su uso para suelos arcillosos o gredosos.

subsuperficial en el terreno (“pie de arado”). Cuando el suelo está muy seco, se producen terrones muy grandes, dada su elevada cohesión. También se dificulta notablemente la penetración del arado, aumentando con ello el desgaste del elemento de corte de la vertedera, la reja, por roce.

Sin embargo, existen diferentes diseños de vertedera que se pueden captar a distintas condiciones de trabajo y humedad de suelo. Existen algunas “listonadas” o de rejilla, que ofrecen una superficie de contacto con la banda de tierra muy reducida, lo que disminuye la fuerza de tracción requerida (Foto 4.1). Son aconsejables en tierras que se adhieren mucho a la vertedera, como los suelos arcillosos.

- Requiere suelos sin presencia de piedras, raíces de árboles, troncos o cualquier tipo de obstáculos, porque dañarían la vertedera, llegando en algunos casos a romperla.
- El suelo debe ser compacto para permitir un buen corte e inversión. Este arado no funciona bien en suelos arenosos, ya que la vertedera sólo se limita a desplazar el suelo sin invertirlo. Además se produce un excesivo desgaste del elemento de corte (reja de arado).
- La cubierta vegetal del terreno no debe ser enmarañada, para conseguir una buena incorporación. Es fundamental evitar rastrojos sueltos en la superficie, que no estén previamente picados, por una picadora desmenuzadora o rastra de disco, porque se producen problemas de “atollamiento” del arado.

4.3.2. El arado de discos

Los arados de discos (Foto 4.2) son implementos de labranza primaria utilizados para realizar la rotura inicial del suelo. Su trabajo es similar al de los arados de vertedera: cortan, invierten y mullen el terreno a profundidades superiores a 20 cm.

En Chile, fundamentalmente, se utiliza el arado de disco integral, acoplado por el enganche de tres puntos al tractor y sostenido por éste durante el transporte. El implemento corta el suelo y los rastrojos, invirtiéndolos y mezclándolos. El arado de disco, a diferencia del de vertedera penetra en el terreno por peso, por lo cual no existe succión alguna. Para conseguir la profundidad de suelo deseada, se requiere un ajuste del ángulo de “ataque” del disco y un abundante peso del armazón o estructura del arado (generalmente de 150 a 500 kg por disco).



Foto 4.2. Arado de discos, implemento de labranza primaria para la inversión de suelos.

Ventajas arado de disco

- A diferencia del arado de vertedera, en el terreno con presencia de obstáculos ocultos, como troncos o piedras, puede rodar sobre ellos sin sufrir daños o roturas que significan pérdidas de tiempo y dinero.
- En suelos arcillosos y húmedos, realiza una aceptable labor de aradura, de mejor calidad que los arados de vertedera, en la medida en que los discos se encuentran limpios y regulados.
- Efectúa un adecuado trabajo en superficies con exceso de cubierta vegetal, al picarla e incorporarla.

Limitantes arado de disco

- Su empleo por operadores de maquinaria inexpertos tiende a agravar la desnivelación del terreno, porque significaría además un mayor número de rastrajes para corregir la labor de aradura, por lo cual se verá más afectada la estructura del suelo.
- Desde el punto de vista de la inversión de rastrojos del cultivo anterior, el grado de inversión puede llegar a sólo un 60 por ciento. Su peso, que influye en la profundidad de aradura, al ser levantado a la posición de transporte por el tractor, reduce la estabilidad del mismo y daña su sistema hidráulico.
- Al cortar el suelo, favorece la propagación de malezas de reproducción

vegetativa, como chéptica (*Cynodon dactylon*), Maicillo (*Sorghum halepense*), y Zarzamora (*Rubus ulmifolius*).

- A diferencia del arado de vertedera, el arado de disco entra al suelo por peso, por lo cual lo compacta más.

4.4. Araduras que no alteran el perfil del suelo. Aradura vertical.

4.4.1. El arado cincel

El arado cincel (Foto 4.3) es un tipo de arado que opera a profundidades menores a los 30 a 35 cm, incrementando con ello la porosidad en el subsuelo, sus condiciones estructurales y la capacidad de retención de humedad. En la actividad agrícola cuando el suelo se compacta, a una profundidad sobre los 25 a 30 cm, debido al uso de arados de vertedera o discos, que generan pie de arado, conviene efectuar una labor de “estallamiento”, o sea romper, quebrar y abrir el suelo. En el caso del establecimiento de una pradera, es fundamental cincelar el terreno antes de iniciar su producción, con el objeto de prevenir futuros problemas originados por la existencia de una capa compactada presente en el suelo, por el uso continuo de arados de vertedera o discos, que impida una adecuada infiltración del agua, afectando el crecimiento normal de raíces de la especie a establecer.

Ventajas arado cincel

- Facilita la penetración del agua en el perfil de suelo y mejora considerablemente el drenaje del suelo.
- En la labor de aradura, por su forma de preparar el suelo, en forma vertical, va dejando rastros sobre la superficie del terreno, lo que crea una cobertura vegetal que reduce procesos erosivos.
- Rompe suelo compactado, mejorando la circulación de aire y CO₂ en el suelo. Tiene una mayor capacidad efectiva de trabajo que los arados de disco y vertedera, por su ancho de labor.
- Mejora las propiedades físicas, químicas, y biológicas de los suelos.
- No desnivela el terreno
- No requiere de operadores de maquinaria expertos.
- Permite la presencia de rastros sobre la superficie, por lo cual reduce



Foto 4.3. Arado cincel, equipo que rompe y suelta el suelo sin invertirlo ni mezclarlo.

procesos erosivos por impacto de las gotas de lluvia y escorrentía superficial del agua.

Limitantes arado cincel

- En suelos pedregosos, se puede llegar a dañar o romper los cinceles del arado
- En terrenos “enmarañados”, por excesos de rastrojos del cultivo anterior, no realizará una labor eficiente de aradura.
- En terrenos húmedos no opera en buenas condiciones, al no realizar una labor de estallamiento o resquebrajamiento del suelo.
- Requiere que el terreno se encuentre con un contenido de humedad bajo el estado friable, para que realice una buena labor de aradura.

4.4.2. Arado subsolador o “escarificador” de suelo.

Este tipo de arado, es una alternativa recomendable para romper el suelo realizando la labor a una profundidad que va entre los 35 y 40 cm, rompiendo capas endurecidas del mismo, facilitando la infiltración de las aguas lluvias. Con esta práctica se reducirá la escorrentía superficial del agua, que origina problemas de erosión sobre el terreno, acumulándose en el perfil del suelo y favoreciendo con ello el desarrollo de una pradera degradada.

La labor, debe ser realizada con un tractor con una potencia superior a 110 Hp y con un arado subsolador “escarificador” de 5 puntas, según capacidad de potencia del tractor, montadas en un chasis metálico y debiendo trabajar con el suelo lo más seco posible. Esta condición se consigue en otoño, antes de que se inicien las primeras lluvias. Si el terreno es arcilloso, al estar seco puede que esté muy endurecido para realizar la labor, lo que la hace ineficiente, por lo que es necesario esperar una primera lluvia importante, para que se humedezca parcialmente el suelo, y así hacer más fácil el trabajo de rompimiento.

El subsolado o “escarificado” de un terreno se puede realizar en fajas (Foto 4.4), técnica consistente en pasar sobre el suelo un equipo subsolador escarificador con 5 puntas y, trabajando a una profundidad de 35 a 40 cm, además de cubrir un ancho de 1,5 a 2,0 metro (ancho de trabajo del equipo). Esta debe ser realizada en forma perpendicular a la pendiente del terreno, y se debe realizar de tal modo que cada faja de la labor quede distanciada una de otra cada 10 a 15 metros.

Con la labor anterior, se consigue un menor costo de operación, si se compara con la rotura de suelos de toda la superficie del terreno, trabajo que tomaría de 2 a 3 horas.



Foto 4.4. Labor de subsolado o “escarificado” en fajas, con cinco puntas, para romper capa compactada de suelos y facilitar la infiltración de aguas lluvias en el mismo.

El principio de la labor de subsolado o “escarificado” en fajas, es recoger e infiltrar en la superficie intervenida, las aguas lluvias que caen y escurren desde el área no subsolada. El agua infiltra por conductividad hidráulica vertical en el suelo arado, y se mueve en forma sub-superficial hacia el área no subsolada

por conductividad hidráulica horizontal. De esta forma, se consigue humedecer el área de terreno ubicado entre pasadas de subsolador, favoreciendo así la germinación del banco de semillas o crecimiento de una pradera natural o sembrada.

En terrenos con pendiente o de lomaje, una forma eficiente de uso de arado subsolador de 5 puntas, es trabajar con él siguiendo curvas a nivel, en forma perpendicular a la dirección de la pendiente del terreno. Así se reducen riesgos de erosión, facilitando con ello la infiltración del agua en los sectores donde el subsolador escarificador realizó su labor.

Con la aradura o “escarificado” en fajas, para lograr el objetivo de facilitar la infiltración de las aguas lluvias, no es necesario romper la totalidad de la superficie de una hectárea de terreno, por lo que el tiempo de la labor se puede realizar entre 30 a 40 minutos.

El “escarificado” del terreno, permite la ruptura de la presencia de compactación de suelos, originada durante muchos años por el pisoteo animal, o debido a las labores de aradura convencional (pie de arado), facilitando así la infiltración de las aguas lluvias en el perfil de suelo.

El “escarificado” de suelos en fajas, es una técnica de aradura conservacionista incorporada en el programa SIRSD-S del Ministerio de Agricultura, para la recuperación de suelos degradados. Por lo cual se recomienda que los agricultores de áreas de secano, soliciten a los operadores del programa, que se les incorpore esta práctica en los planes de manejo presentados a INDAP o el SAG.

Bibliografía

- Carrasco, J., y García-Huidobro, J. 1998. Equipos de labranza. Los problemas de la labranza y los equipos. Tierra Adentro Nº 20. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Mayo-Junio, pp. 24-28.
- Carrasco, J., 1998. Equipos de labranza primaria. El arado de vertederas. Tierra Adentro Nº 21. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Julio-Agosto, pp. 44-47.
- Carrasco, J., 1998. Equipos de labranza primaria. El arado de discos. Tierra Adentro Nº 22. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Septiembre-Octubre, pp. 41- 44.

- Carrasco, J. 2003. El suelo y la erosión. En: Carrasco, J., y Riquelme, J.(eds). Métodos y prácticas de conservación de suelos y aguas. Boletín INIA N° 103. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional Rayentué. San Fernando, pp. 23-43.
- Carrasco, J. y otros. 2010. El suelo y su relación con el manejo. En Carrasco y Riquelme (eds.) Manejo de suelos para el establecimiento de huertos frutales. Boletín INIA N° 207. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Rayentué. Rengo, Chile. pp. 47-69
- Carrasco, J., (ed.), 2015. Técnicas de captación, acumulación, y aprovechamiento de aguas lluvias. Boletín INIA N° 321. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Rayentué. Rengo, Chile. pp. 128.
- Carrasco, J., y Blanco, C. 2017. Capítulo 1. Manejo de suelos para el cultivo de la Cebolla. En: Blanco, C., y Lagos, J. (Eds). Manual de producción de Cebolla. Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) e Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago, Chile. pp. 11-25.
- Ibañez, M. 1985. Curso internacional de mecanización agrícola para extensionistas. Preparación de suelos para la siembra. Universidad de Concepción. Depto. de Ingeniería Agrícola. Chillán. pp 89.
- Riquelme, J., y Carrasco, J., 1999. Arado Cíncel. Un implemento que protege el suelo de la erosión. Guía de operaciones. Tierra Adentro. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Julio-Agosto, pp. 46-50.
- Riquelme, J. y Carrasco, J., 2013. Capítulo 2. Laboreo Conservacionista de suelos: Arado Subsolador y Arado Cíncel para la preparación de suelos En: Carrasco, Riquelme, y Hirzel. Conservación de suelos. Técnicas de manejo para áreas de secano. Serie Actas INIA N° 48. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Rayentué. pp. 17-28.

CAPÍTULO 5

PRADERAS Y CULTIVOS SUPLEMENTARIOS

Cristian Moscoso J.

Ing. Agrónomo, M. Sc.

INIA Remehue

Alfredo Torres B.

Ing. Agrónomo, M. Sc.

INIA Remehue

5.1. Introducción

La Región de los Ríos basa la producción animal ya sea leche o carne en el uso de la pradera. Este es el recurso alimenticio más abundante, y puede dividirse principalmente en tres grupos: praderas naturalizadas, praderas mejoradas y praderas sembradas, representando cada una de ellas un 42%, 42% y 16% respectivamente. Dentro de éste último grupo, el 29,9% corresponde a cultivos forrajeros anuales, y el 70% a cultivos forrajeros perennes y de rotación mayor a un año (Moscoso and Urrutia, 2017).

A pesar de la alta inversión que se incurre en las labores de suelo y siembra de una pradera, no necesariamente ella presentará una mayor productividad en relación a una pradera naturalizada con un manejo adecuado (fertilización, encalado, cerco eléctrico). Recientemente Keim *et al.* (2014), al comparar diversas estrategias de mejoramiento de praderas, obtuvieron similares producciones en praderas naturalizadas bajo un régimen de fertilización versus praderas sembradas, mientras que otros estudios (Torres, 1999) indican las diferencias productivas que se pueden lograr al utilizar distintos tipos de regeneración.

Ante estos resultados, se abordarán algunos aspectos del establecimiento, y principalmente de regeneración de praderas, como también del uso de cultivos suplementarios que permitan maximizar la productividad forrajera, con la finalidad de obtener un menor costo por kilogramo de materia seca producida.

5.2. Establecimiento y regeneración de praderas

El establecimiento de praderas por medio de la regeneración es una labor que involucra tiempo y un costo monetario importante para el agricultor. En algunos casos se realiza debido a la baja productividad que presenta el potrero a intervenir, mientras que en otros, a la oportunidad que tiene el agricultor para

incorporar especies de mejor valor forrajero en potreros con buenos niveles de fertilidad.

En el primer caso, la baja productividad de la pradera puede deberse a diversos factores tales como, baja o nula fertilización del suelo, mal manejo del pastoreo, bajo o nulo control de plagas y alta presencia de malezas entre otros, mientras que en el segundo caso, la intención del agricultor de mejorar aún más sus praderas, que ya cuentan con un buen nivel de nutrientes en el suelo, y donde el agricultor desea aumentar, por medio de la siembra vía regeneración, la cantidad de especies forrajeras de mejor valor nutritivo y productivo. Teuber (1999) identifica, por medio de un esquema, dos vías para mejorar praderas, y que se detallan en la Figura 5.1, que junto con aumentar la productividad, mejoran el

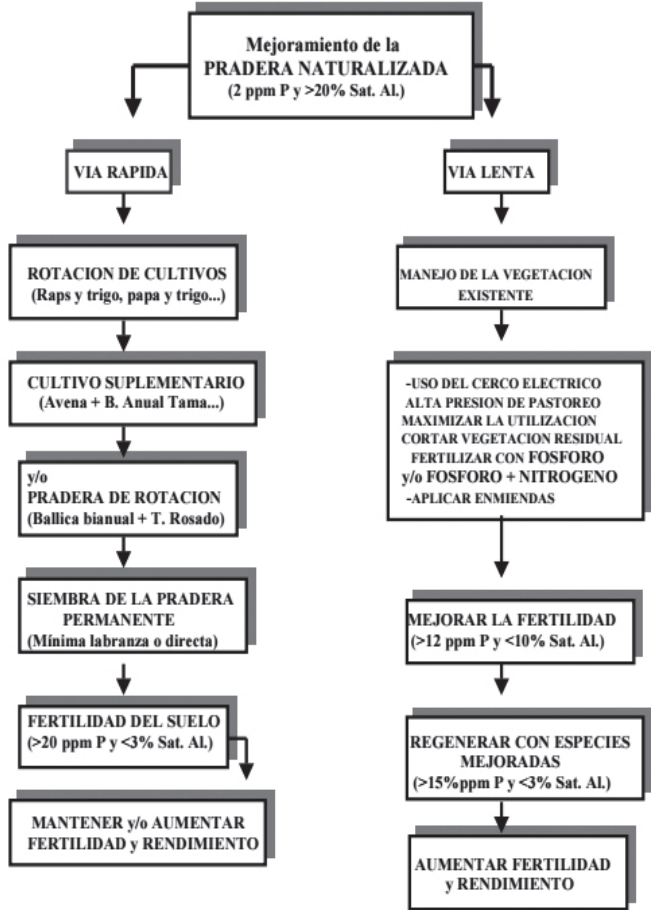


Figura 5.1. Estrategias de establecimiento de praderas permanentes.
Fuente: Teuber (1999).

nivel de nutrientes en el suelo. Ambos implican un desembolso económico para el agricultor, y la gran diferencia se encuentra en el lapso en que se logra cada una de ellas y en la concentración del uso del recurso monetario.

Antes de realizar este tipo de labores es necesario un muestreo de fertilidad de suelo, y de esa manera determinar que nutrientes, y en qué cantidad es necesario aplicar, debido a que praderas fertilizadas mejoran su producción, composición botánica y calidad nutritiva respecto a praderas no fertilizadas. En la Cuadro 1.1 del Capítulo 1, se presenta de forma práctica y rápida los niveles de cada nutriente según disponibilidad en el suelo (0-10 cm) desde “inadecuado, medio y adecuado” que sirve de guía para interpretar un análisis de suelo.

La regeneración, por sobre el establecimiento de praderas por medio de cultivo de suelo, tiene la ventaja de presentar un menor costo para el productor, menor probabilidad de descalce de plantas, menor erosión y pérdida de agua del suelo, mayor acumulación superficial de P, adaptándose bien a condiciones de suelo delgado, y presentando una producción más rápida y estable.

Es un proceso mediante el cual se persigue incorporar semillas de especies de alto valor forrajero y fertilizantes, en una pradera dominada por especies de bajo valor forrajero, con un mínimo de alteración de la vegetación residente (Torres, 1987).

A pesar de la existencia de diversos tipos de máquinas regeneradoras (cincel, zapata, disco, disco rotativo y disco triple entre otras), existen otros factores a considerar principalmente previo a la regeneración. Se debe realizar en suelos de adecuado drenaje y buena capacidad de retención de agua y de topografía plana. La época de regeneración debiera ser a fines de verano, después de las primeras lluvias, no recomendándose las siembras de primavera (regeneración de praderas perennes) debido a la mayor agresividad de las especies no sembradas, y a una profundidad adecuada (≤ 1 cm para especies de gramíneas forrajeras). En este último punto, la elección de la especie a utilizar debe considerar su rapidez de establecimiento, poder germinativo y de germinación. Por este motivo, dentro de las gramíneas son deseables las ballicas anuales o de rotación corta, y en cierta medida ballicas perennes, restringiéndose el uso de pasto ovillo, festuca y bromo, debido a su menor rapidez de germinación y menor capacidad de competencia con especies residentes.

Para aumentar el éxito de la regeneración debe incrementarse la dosis de siembra por hectárea, para compensar las pérdidas debido a las condiciones adversas que pudiera tener la semilla para germinar y emerger en función del éxito del tratamiento químico realizado anteriormente. Aun así, variados son los factores que incidirán en el éxito de una siembra, y muchos de ellos están encadenados.

El control de la vegetación residente, también es un factor de importancia para el éxito de una regeneración, reduciendo así la competencia por luz, agua y nutrientes. En un estudio realizado por Torres entre 1998 y 1999 (Figura 5.2) evaluando diversas metodologías de regeneración sobre una pradera degradada, concluyó que el testigo (sin fertilizar) presentó las menores producciones anuales, siendo la regeneración con barbecho químico la más productiva, incrementándose el porcentaje de ballicas en los tratamientos fertilizados y en los regenerados, destacando el tratamiento de regeneración + barbecho químico en los siguientes puntos: pastoreo más temprano, mayor producción de forraje invernal y mayor producción total (Torres, 2001). En la Figura 5.2 se presentan las tasas de crecimiento de la pradera y sus diferencias a través del año en los distintos tratamientos utilizados.

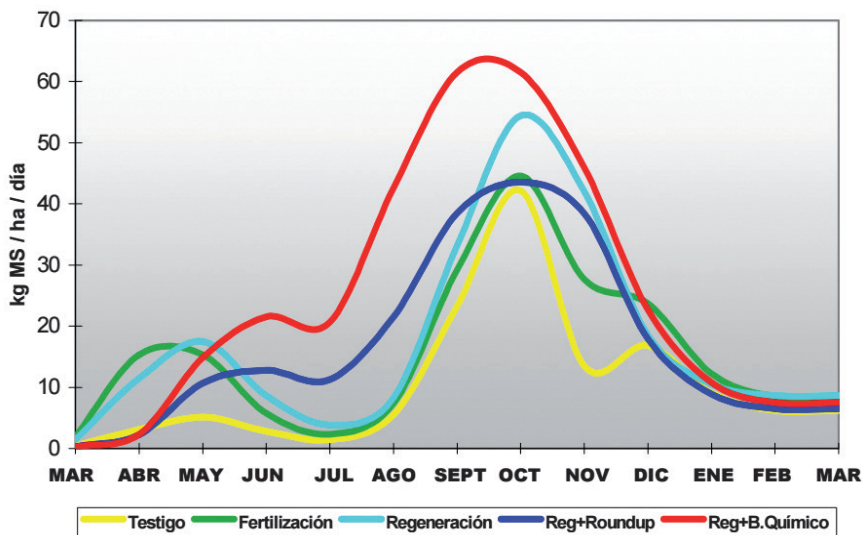


Figura 5.2. Tasa de crecimiento de diversos tratamientos de regeneración sobre una pradera degradada (Torres, 2001).

5.3. Cultivos suplementarios

Este tipo de cultivos, como se describió anteriormente, hasta el año 2007 representaban el 5% del total de forrajeras a nivel regional, y el 30% del total del forrajes cultivados en la Región de Los Ríos (Moscoso and Urrutia, 2017).

Su utilización se debe a la baja tasa de crecimiento, y productividad, de la pradera en ciertas épocas del año, especialmente en verano, otoño e invierno, siendo necesaria la utilización de cultivos específicos para abordar la falta de forraje. Del total de producción de la pradera a lo largo del año, Demanet *et al.* (2015) ha

estimado una distribución estacional de 28%, 18% y 5% de la producción total de MS del año en verano, otoño e invierno, respectivamente, en una pradera que presentaba 78% de ballica perenne y 3% de trébol blanco, durante un estudio comenzado en el 2002 al 2012, en la Región de Los Ríos.

El cultivo suplementario de avena y/o ballicas, se utiliza para abordar el déficit de forraje invernal, mientras que las brassicas forrajeras permiten un rango de utilización que abarca desde el verano al invierno dependiendo de la especie a utilizar, destacando los nabos, raps y coles.

5.3.1. Pradera suplementaria de invierno (ballica-avena)

La utilización de este tipo de forrajes suplementarios es principalmente en la época invernal, y deben sembrarse en el lapso de tiempo correspondiente al fin del verano y al inicio del otoño. Como regla general, a más tardía la siembra se obtendrá una menor producción acumulada a lo largo del año, y una mayor probabilidad de ocurrencia de heladas que puedan afectar las plántulas en crecimiento (descalce). Para ello es esencial una buena planificación predial, que también tome en cuenta la producción estimada de la pradera suplementaria y la cantidad de animales a suplementar. En las Fotos 5.1 y 5.2 se observan praderas suplementarias de invierno en campos distintos, que se sembraron con máquina regeneradora, aplicando previamente un barbecho químico.



Foto 5.1. Pradera suplementaria de invierno establecida con regeneradora, foto tomada el 24 de mayo



Foto 5.2. Pradera suplementaria de invierno establecida con regeneradora, foto tomada el 11 de noviembre.

La Foto 5.1 fue obtenida el 24 de mayo, mientras que la Foto 5.2, el 11 de noviembre. Ya que la finalidad de este tipo de siembras es la alimentación invernal, la siembra de la Foto 5.2 fue tardía, disminuyendo considerablemente la productividad de forraje anual de ese tipo de pradera, con la salvedad si el agricultor destinó esa siembra a producción de grano.

Las metodologías de siembra de ballica – avena suelen ser variadas dependiendo de la accesibilidad de los agricultores a la maquinaria, destacando el cultivo de suelo y posterior siembra y la siembra directa por medio del uso de una regeneradora.

El primero de ellos presenta la desventaja de involucrar un mayor costo para el agricultor, debido fundamentalmente a la mayor cantidad de laboreos del suelo necesarios para una correcta implantación de la pastura, mientras que la regeneración, a pesar de ser una labor que no involucra rotura de suelo, y con ello, un menor costo, puede presentar una mayor competencia en el caso de no realizarse un control químico eficiente de la vegetación residente, o un ataque de plagas (por ejemplo babosas).

La siembra directa por medio de regeneradora es una labor de menor costo, de mayor rapidez y que erosiona de menor manera el suelo, siendo la opción

ideal para la siembras de las praderas de ballica – avena que se utilizarán en el invierno, en especial si se desea realizar un pastoreo con una alta carga animal.

Cualquiera sea la opción elegida, uno de los primeros pasos, junto a la planificación, es la eliminación de la vegetación residente para así aumentar las probabilidades de éxito de la nueva siembra. Ante ello un sistema práctico puede involucrar las siguientes acciones en el caso de la utilización de una pradera degradada:

- Pastorear a piso, con una alta carga animal,
- Aplicación de un herbicida no selectivo sistémico, una a dos semanas posterior a la salida de los animales, dependiendo de la velocidad del rebrote de la pradera y de las condiciones climáticas,
- Aplicación de herbicida no selectivo de contacto una a dos semanas posterior al paso anterior (dependiendo de las condiciones climáticas), con la finalidad de atacar aquellas malezas que no fueron controladas por el herbicida sistémico.

Con estos pasos, previo a la regeneración, se puede lograr en un corto periodo de tiempo, un sustrato que disminuya la competencia para la nueva pastura por parte de las especies residentes, y de esta manera no incrementar el costo con la aplicación de otro tipo de herbicidas que controlen malezas de hoja ancha.

En cualquier tipo de labor que involucre la aplicación de agroquímicos, se deben tomar todas las medidas de protección necesarias para la protección del aplicador, como también respetar la correcta eliminación de envases utilizados (triple lavado, perforación del envase y disposición en un lugar establecido).

Existe un rango en la dosis de semilla a utilizar, que dependerá de la especie involucrada y tipo de siembra, pero a rasgos generales, debería de aumentar la dosis de semilla a medida que las condiciones de siembra son más adversas. En la Cuadro 5.1 se presentan el rango de dosis utilizadas para diversas especies junto a otras características.

Cuadro 5.1. Dosis de semilla comúnmente utilizadas en una siembra de ballica – avena

Especies (sola o en mezcla)	kg semilla/ha
Ballica (anual o bianual)	25-35
Avena strigosa	40-90
Avena sativa	80-120
Ballica – Avena strigosa	25-35/40-90
Ballica – Avena sativa	25-35/60-80

5.4. No recomendable

Realizar una siembra de gramíneas perennes en mezcla con Avena sativa o Avena strigosa. Motivo: 1) la mayor competencia ejercida por el cereal debido a su rápido crecimiento, sombreará a la especie perenne en sus primeros estadios dificultando su implantación, y 2) al año posterior a la siembra, los espacios vacíos dejados por la avena, pueden ser colonizados por malezas por especies no deseadas.

Utilizar rastra de clavos o de discos como exclusivo método de preparación de suelo, posterior siembra con trompo y rodón. Motivo: 1) por un lado el uso de rastras no implica la muerte del material vegetal, y 2) la siembra al voleo no va a asegurar un correcto contacto de la semilla con el suelo ya que parte de esas semillas caerán sobre los terrones con material vegetal y otras sobre suelo desnudo. La posterior utilización de rodón no podrá asegurar un completo contacto suelo semilla, ejerciéndose un estrés sobre ella, en el caso de aquellas que queden en contacto con el suelo, y una mayor competencia, en aquellas que se encuentren rodeadas de material vegetal que no logró disregar la rastra.

Bibliografía

- Demanet, R., M. L. Mora, M. Á. Herrera, H. Miranda, and J. M. Barea. 2015. Seasonal variation of the productivity and quality of permanent pastures in Andisols of temperate regions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 15:111-128.
- Keim, J. P., I. F. López, and O. A. Balocchi. 2014. Sward herbage accumulation and nutritive value as affected by pasture renovation strategy. *Grass and Forage Science*, pp. 13.
- Moscoso, C. J. and N. Urrutia. 2017. Overview of the forage land-use in southern Chile in a 30-year period. *Crop, Forage, & Turfgrass Management*, pp. 4.
- Teuber, N. 1999. Establecimiento y regeneración de praderas permanentes. Disponible en: <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR25018.pdf>
- Teuber, N. y R. Bernier. 2006. El semáforo del suelo, una guía para calificar el nivel de fertilidad. Disponible en: <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/informativos/NR34837.pdf>
- Torres, A. 2001. Últimos avances en regeneración de praderas. Disponible en: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR26893.pdf>
- Torres, A. 1987. Regeneración de praderas en la zona sur de Chile. I. Métodos, factores y costos. *Boletín técnico INIA* N° 144, Osorno.

CAPÍTULO 6

SOSTENIBILIDAD DE LOS SUELOS Y LA IMPORTANCIA DE LA MATERIA ORGÁNICA

Cecilia Céspedes L.
Ing. Agrónomo, M. Sc.
INIA Quilamapu

6.1. Introducción

Como resultado de las malas prácticas agrícolas, como son la excesiva labranza del suelo, el uso indiscriminado de productos químicos de síntesis (fertilizantes y pesticidas) y la quema de rastrojos, los suelos presentan una creciente degradación y contaminación, lo que ha reducido en forma continua su calidad y por ende los rendimientos de los cultivos que crecen sobre él.

La labranza del suelo destruye los agregados del suelo junto con dejar en contacto la materia orgánica del suelo (MOS) con los microorganismos que la mineralizan, así ellos se alimenten de la MOS dejando nutrientes disponibles para los cultivos y liberando gran parte del carbono, como CO_2 , en su respiración. Desgraciadamente la agricultura convencional no considera la necesidad de reponer el carbono liberado, en el suelo, como lo hace con los micro y macronutrientes, mediante el uso de los fertilizantes. Esta situación, que se repite año a año, provoca la degradación de los suelos, situación que es fácil observar en innumerables zonas de nuestro país, como es el caso de los suelos graníticos del secano interior de la zona centro sur, que han perdido su capacidad productiva debido al uso y abuso en la producción de cereales por largos años. La pérdida del carbono, no solo afecta la calidad del suelo reduciendo su capacidad de retención de agua, infiltración, densidad aparente, agregación y actividad biológica, sino que también tiene un efecto negativo a nivel global, al contribuir con la liberación del CO_2 a la atmósfera al efecto invernadero y cambio climático.

Por su parte, el uso indiscriminado de fertilizantes de origen químico sintético provoca cambios en el pH del suelo, particularmente las aplicaciones de fertilizantes amoniacales y aumenta el contenido de sales, incrementando la conductividad eléctrica. La aplicación de pesticidas, por tratarse de productos tóxicos, afectan la vida de los micro y macroorganismos del suelo, que, en su mayoría, cumplen importantes funciones en el agroecosistema, como descomponedores, fijadores de N, catalizadores de procesos en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes, participando como enemigos naturales de plagas y enfermedades, y un sin número de otros servicios ecológicos. Sumado a lo anterior, la quema de rastrojos de los cultivos agrícolas provoca

la volatilización del 80% del nitrógeno y azufre presente en los primeros centímetros del suelo; así como también la pérdida de otros nutrientes en las cenizas barridas por el viento, aumenta la erosión por causa de los suelos desnudos y contamina el aire con el humo generado en la quema.

Entender la importancia manejo del sostenible del suelo es una tarea urgente para recuperar su calidad y con ello su capacidad productiva.

6.2. Suelo

El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre en la que viven numerosos organismos y crece la vegetación, es el factor más importante en la producción agrícola y al mismo tiempo es el más influenciado por el manejo agronómico. El suelo es un sistema de tres fases: sólida, líquida y gaseosa, diferentes suelos presentan distintas proporciones de estos componentes, que dependen de las condiciones de su formación.

Los suelos son sistemas muy diversos y complejos, es el hábitat para plantas, animales, micro y macro organismos, todos interconectados entre sí. En la Figura 6.1 se pueden apreciar cómo, en términos generales, se distribuyen los componentes de un suelo. Los componentes sólidos se organizan en agregados determinando el espacio poroso destinado al aire y al agua. En un mismo suelo, la proporción de ambos elementos (aire y agua) sufre grandes fluctuaciones, dependiendo de las precipitaciones, riegos y movimiento del suelo. Dentro de los componentes sólidos, se encuentran la materia orgánica y las

Componentes del suelo y promedios normales

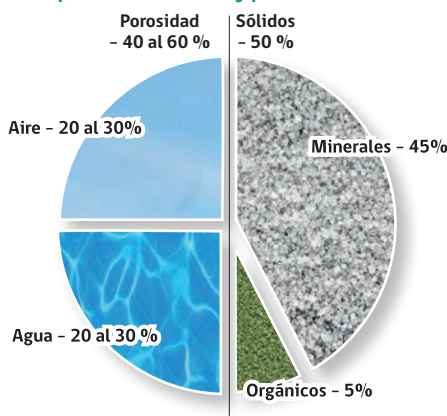


Figura 6.1. Componentes del suelo

partículas minerales, que se puede clasificar en grava y piedras (superior a 2 mm), arena (entre 0,05 a 2 mm), limo (entre 0,0002 a 0,05 mm) y arcilla (más pequeñas que 0,002 mm). Para determinar la textura del suelo en el campo es posible humedecer una muestra entre los dedos hasta obtener una pasta homogénea, la que se presiona entre dedo índice y pulgar formando una cinta. Si al tacto es áspero y abrasivo no tiene cohesión la muestra es arenosa. Si tiene tacto suave se forma una cinta escamosa sin pegajosidad ni plasticidad la muestra es limosa y si se forma una cinta brillante, plástica o pegajosa la muestra es arcillosa.

La materia orgánica del suelo (MOS) está formada por compuestos que provienen de restos de organismos, ya sea plantas y animales, y sus productos de desecho, su composición es de complejidad variable y se encuentra en distintos estados de transformación, desde los residuos de cultivos y animales recientemente incorporados, hasta la compleja estructura del humus alcanzada después de períodos muy extensos de transformación.

La incorporación de materia orgánica es de vital importancia para la fertilidad del

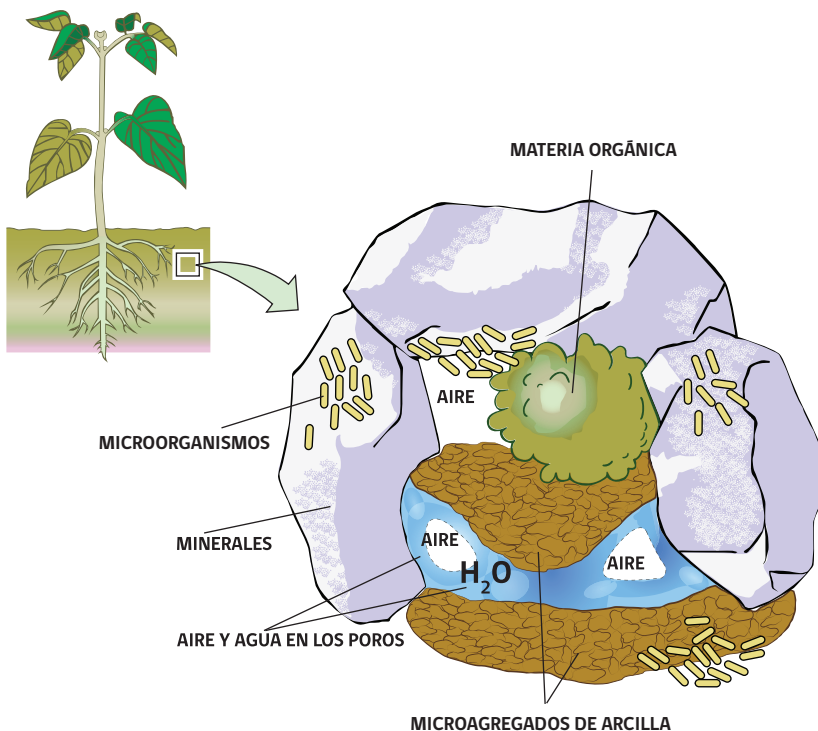


Figura 6.2. Organización de un agregado del suelo.

Fuente: Adaptado de Purves, *et al.* (2013)

suelo, aumenta el contenido total de nutrientes y la disponibilidad de ellos para los cultivos, tiene un efecto positivo en su estructura ya que permite mantener unidas las partículas primarias del suelo (arena, limo y arcilla), en conglomerados de mayor tamaño, que al unirse dejan espacio poroso entre ellos, mejorando la infiltración del agua, su retención, albergar microorganismos y favorecer el crecimiento de los cultivos sobre él (Figura 6.2). También incrementa la actividad de los organismos del suelo y estimula la competencia entre los organismos benéficos y los patógenos, lo que reduce la presencia de enfermedades y plagas.

Los microorganismos que se alimentan de la MOS corresponden a un grupo denominado descomponedores, que participan en la mineralización de compuestos orgánicos, dejando disponibles nutrientes para las plantas. Muchos de ellos participan en los ciclos de los nutrientes presentes en el suelo, por ello al aplicar materia orgánica se incrementa la biomasa microbiana del suelo. Además de estas funciones, existen aquellos que liberan promotores del crecimiento para las plantas, otros que suprimen los daños causados por plagas y enfermedades, éstos son antagonistas de enfermedades y plagas dañinos o los que liberan antibióticos, reduciendo los problemas sanitarios de los cultivos. Todas estas funciones están muy influenciadas por la presencia de MOS.

La presencia de MOS está asociada al incremento de la agregación estable al agua, a la menor erosión y escorrentía superficial, a la mejor infiltración, al movimiento, a la retención de agua, a la capacidad de intercambio catiónico, a la disponibilidad de nutrientes y por lo tanto al vigor de los cultivos.

Lo anterior es de gran relevancia, particularmente en el nuevo escenario de cambio climático, donde las precipitaciones se han concentrado en períodos más cortos causando temporadas más extensas sin precipitaciones. Como se mencionó anteriormente, niveles adecuados de MOS generan mayor cantidad de agregados y de mayor resistencia al efecto erosivo del agua, por lo tanto, esos suelos tienen mejor capacidad de retención de humedad, reduciendo el stress hídrico de los cultivos en períodos secos y logrando mayor resistencia a la erosión, en períodos lluviosos.

Estudios realizados por el Programa de Agroecología de INIA Quilamapu han demostrado que la aplicación periódica de materia orgánica al suelo, durante varios años permite reducir la densidad aparente, aumentar la agregación estable al agua, las poblaciones de lombrices y el contenido de materia orgánica del suelo. En la Figura 6.3 se pueden apreciar los resultados de un estudio observacional realizado en suelos graníticos de la región del Biobío, donde se estudiaron suelos que habían recibido al menos 10 t ha⁻¹ de materia orgánica cada año, sin importar si la enmienda era compost o guano maduro. Los suelos

colectados se agruparon de acuerdo a la cantidad de años en que se les había aplicado la enmienda (4: de 2 a 4 años, 10: de 5 a 10 años, 20: entre 16 y 20 años) y luego se compararon con dos situaciones sin aportes de materia orgánica (0: suelo descubierto sin aplicación de materia orgánica y P: suelo con pradera natural y sin aplicación de materia orgánica).

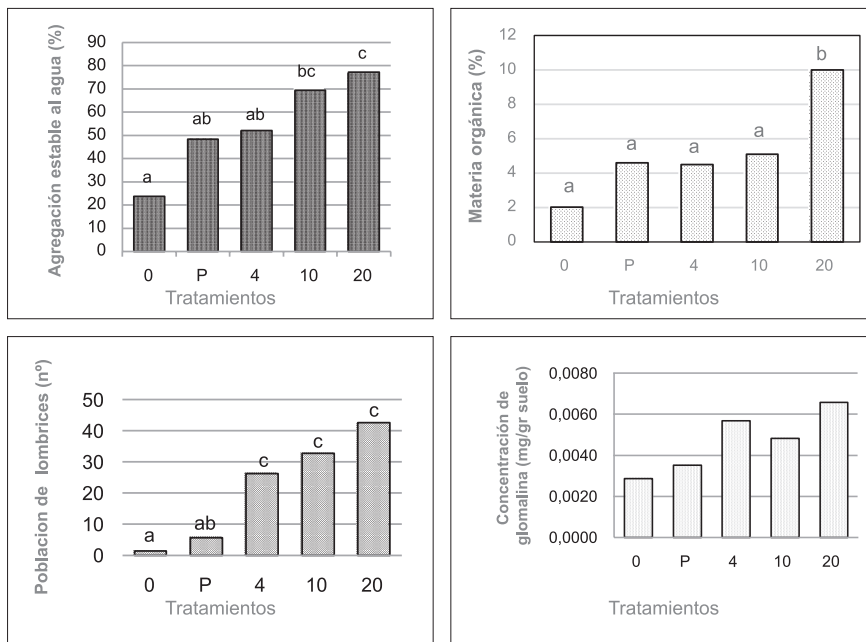


Figura 6.3. Indicadores de calidad de suelos con aplicaciones periódicas de materia orgánica.

Fuente: Elaboración propia.

Es posible observar como la estabilidad de los agregados del suelo aumenta a medida que hay mayor número de aplicaciones de la enmienda orgánica. En el caso de la materia orgánica no se detectan diferencias en los primeros años, probablemente debido a que las enmiendas aplicadas son rápidamente consumidas por los microorganismos presentes en el suelo, por lo que después de algunos meses el contenido de MOS vuelve a los mismos niveles, después de varios años de aportes de materia orgánica se observa una repuesta, elevando el nivel de este indicador, lo que se aprecia en el grupo con hasta 20 años de aplicaciones de enmiendas orgánicas, donde se puede observar un aumento considerable de este parámetro.

Las lombrices son organismos oportunistas, es decir llegan y permanecen en sectores donde existen condiciones adecuadas para su multiplicación y desarrollo, por ello se encuentran en suelos con suficiente humedad y

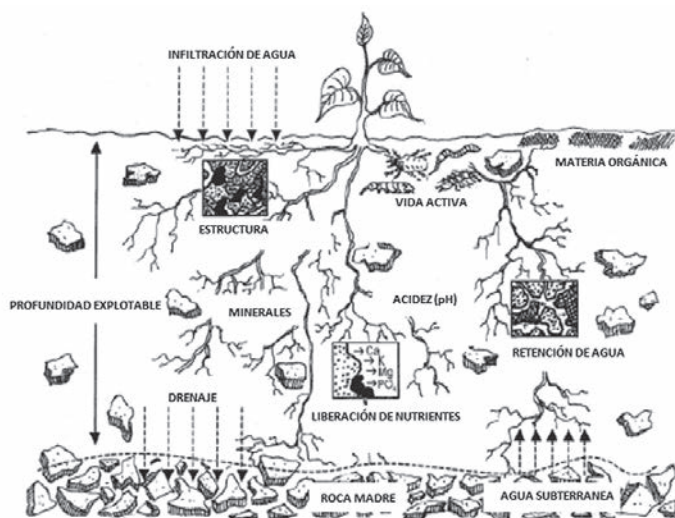
disponibilidad de materia orgánica para alimentarse, debido a lo anterior las lombrices son consideradas buenos indicadores de calidad de suelos. En la figura 16 es posible observar como las poblaciones de lombrices aumentan en la medida que la cantidad de años de aplicación de materia orgánica aumenta.

La glomalina es una proteína fúngica que se encuentra presente en el suelo, producida de manera muy abundante por los hongos micorrícicos-arbusculares (HMA). Las micorrizas son microorganismos del suelo, que forman con las raíces de la mayoría de las plantas relaciones simbióticas o mutualistas. Estos hongos producen la glomalina cuya función es constituir las paredes de sus hifas y esporas. De esta manera, cuando las células del hongo mueren y se descomponen lentamente en el suelo, la glomalina pasa a formar parte de él, pudiendo permanecer desde 6 hasta más de 40 años. La glomalina es una biomolécula de naturaleza glicoproteica, que confiere a los hongos propiedades hidrofóbicas que lo protegen de las pérdidas de agua y nutrientes; posee además, una fuerte capacidad adhesiva o cementante, lo que la vincula estrechamente con la estabilidad de los agregados del suelo, actuando como un amortiguador natural contra la erosión. Adicionalmente, la literatura sugiere que los HMA podrían estar cumpliendo una función clave de almacenamiento del carbono del suelo. A través de sus relaciones simbióticas, los HMA mejoran la capacidad de las plantas de absorber los nutrientes minerales desde el suelo y generan un efecto supresivo contra estrés generado por factores tanto bióticos (ataque de plagas) como abióticos (sequía). Por lo anterior, la determinación del nivel de glomalina constituye un buen indicador de la calidad de los suelos. En la Figura 6.3, se puede observar que la concentración de la glomalina no presentó diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo sigue una tendencia similar a la encontrada en la agregación estable al agua, donde los valores aumentan en la medida que lo hacen los años de aplicación de materia orgánica, a excepción de los suelos del tratamiento 10 que sufren una pequeña reducción de dicha concentración.

6.2.1. Fertilidad del suelo

Es la capacidad del suelo de sustentar la vida vegetal, que depende de la disponibilidad de nutrientes, de la capacidad de retención de agua, de la existencia de un espacio físico para el crecimiento de las raíces y movimiento de gases, de la presencia de microorganismos que actúen en los ciclos de los nutrientes y otros que controlen los problemas sanitarios; y de la ausencia de procesos de destrucción. Por ello, al decidir cuál será el manejo agronómico a realizar, es necesario considerar que sobre la fertilidad del suelo intervienen en forma interdependiente factores **químicos, físicos y biológicos** (Figura 6.4).

Figura 6.4. Factores que influyen sobre la fertilidad del suelo



Fuente: Eyhorn, *et al.* (2002).

6.2.2. Manejo sostenible del suelo

Para realizar un manejo sostenible del suelo es necesario incorporar las siguientes prácticas al manejo agronómico del predio:

- Incorporar materia orgánica estabilizada, de preferencia compostada, ya que en el proceso de compostaje mueren patógenos y semillas de malezas y se multiplican los microorganismos benéficos, que luego se aplican al suelo, además tiene un efecto de largo plazo sobre las características físicas, químicas y biológicas del suelo. La elaboración y usos de compost, bokashi y lombricompost se presentan en los anexos 1, 2 y 3.
- Sincronizar los cultivos en rotación, evitando dejar el suelo descubierto por períodos prolongados, evitando, así, la volatilización y/o lixiviación de nutrientes, sino por el contrario utilizándolos en el cultivo siguiente en la rotación.
- Reducir la labranza del suelo, para minimizar la mineralización de la materia orgánica y la destrucción de la agregación. En lo posible favorecer las prácticas de mínima labranza y labranza vertical que modifican menos las condiciones del suelo para la multiplicación de los microorganismos.
- Incorporar leguminosas en la rotación ya sea como cultivos asociados, rotaciones o cultivos intercalados, ya que aportan N, gracias a su asociación con las rizobacterias fijadoras de este nutriente.
- Utilizar cubiertas de suelo (vivas o muertas) entre las hileras de los cultivos

perennes, ya que evitan las pérdidas de nutrientes, la erosión, reducen fluctuaciones de temperatura y humedad, permiten reducir el crecimiento de las malezas y aportan nutrientes.

- Establecer e incorporar abonos verdes directamente al suelo, los que rápidamente son transformados por los microorganismos, aportando nutrientes a los cultivos. El abono verde proviene del establecimiento de cultivos, generalmente mezclas de gramíneas y leguminosas, que se cortan cuando alcanzan su máximo crecimiento, pero antes de que pierdan su turgencia, es decir, cuando alcanzan la floración. Las plantas cortadas son enterradas en el mismo lugar donde fueron sembradas, para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Al hacerlo, realizan un importante aporte de materia orgánica fresca, que rápidamente es transformada en nutrientes disponibles para las plantas y materia orgánica estable en el suelo.
- Realizar prácticas de conservación de suelos, como curvas a nivel o de escurrimiento y terrazas, mantener el suelo cubierto, sistemas silvopastoriles, especialmente en suelos con pendiente.
- Eliminar las quemas de rastrojos, por el contrario aprovechar todos los residuos orgánicos en la elaboración de enmiendas orgánicas y alimentación animal.
- Realizar diagnóstico nutricional oportuno tanto en cultivos anuales mediante análisis de suelos, como de cultivos perennes mediante análisis foliares y de suelos. Luego corregir deficiencias usando fertilizantes de baja solubilidad para evitar cambios de pH y aumento del contenido de sales, con el consecuente efecto negativo a los cultivos y reducción de las poblaciones de microorganismos del suelo.
- No usar compuestos tóxicos, fungicidas, pesticidas o herbicidas que contaminan el suelo y afectan la vida en él.

Bibliografía

- Vargas-Machuca, R. y Domínguez, J. 2011. Vermicompostaje. En: Compostaje. Moreno y Moral (eds.). Editores mundiprensa. Madrid, España. pp. 570.
- Eyhorn, F., Heeb, M., & Weidmann, G. 2002. IFOAM manual de capacitación en agricultura orgánica para los trópicos [recurso electrónico]: teoría, transparencias y enfoque didáctico.
- Infante, A. 2011. Manual de biopreparados para la Agricultura ecológica. Céspedes y Pino (ed.). Manual financiado con el proyecto PTO financiado por FIA. Chillán, Chile, Abril, 2011.

CAPÍTULO 7

EL CAMBIO CLIMÁTICO, SUS POTENCIALES EFECTOS EN LA AGRICULTURA Y SU MITIGACIÓN

Josué Martínez-Lagos

Ing. Ambiental, Dr., M.Sc.

INIA Remehue

Marta Alfaro V.

Ing. Agrónomo, Ph.D

INIA Remehue

Camila Muñoz M.

Médico Veterinario, Ph. D

INIA Remehue

7.1. Introducción

Se entiende el cambio climático como una modificación del clima con respecto al registro histórico climático global o regional en escalas de tiempo variable y comparable. Este cambio incluye variaciones en los principales parámetros meteorológicos como la lluvia, temperatura, presión atmosférica, nubosidad, viento y todos los demás elementos del sistema atmosférico. El término cambio climático usualmente suele emplearse para referirse al efecto producido por la acción del hombre (o sea por causas antropogénicas), sin embargo también se debe considerar la variabilidad natural del clima registrada durante los períodos de tiempo.

El cambio climático es evidente, observándose desde hace décadas cambios en los patrones climáticos con variaciones inusuales en la temperatura y en la cantidad y distribución de las lluvias. Gran parte de estos cambios pueden ser atribuible a las consecuencias del efecto invernadero y del calentamiento global. Existen evidencias que nos permiten determinar que verdaderamente existe este calentamiento global y que las actividades humanas son una de las causas más probables de su ocurrencia. Ejemplo de ello es que se estima que las tres últimas décadas han sido las más calurosas en comparación a cualquier otra década desde 1850, con un aumento de temperatura de 0,85 °C de 1880 al año 2012 (IPCC, 2013).

Para el futuro se prevé un aumento global de temperatura que bordea los 1,5

°C en comparación a la era preindustrial, sin embargo hay escenarios mucho más pesimistas que indican que podría registrarse un aumento de hasta 4,8°C (IPCC, 2013). Las actividades productivas del ser humano alteran la composición de la atmósfera, ya que emiten gases con efecto invernadero (GEI) como por ejemplo: vapor de agua, ozono, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y halocarbonos (compuestos gaseosos que contienen carbono además de alguno de los elementos como flúor, cloro o bromo) los cuales han aumentado sus concentraciones en la atmósfera.

El dióxido de carbono, por ejemplo, ha aumentado cerca del 40% en comparación a los niveles registrados en la era preindustrial. Además la destrucción de zonas boscosas, la degradación de suelos y el avance del desierto, junto con el uso de combustibles fósiles también son algunas de las principales fuentes antropogénicas de emisión. Si bien es cierto que parte de este dióxido de carbono emitido puede ser absorbido por los océanos, al combinarse químicamente con el agua puede provocar la acidificación de los mismos, lo que impacta las condiciones de la biota que habita en ellos y por consiguiente la productividad de las zonas de cultivo y de pesquerías artesanales que viven de esta importante actividad.

7.2. Potenciales impactos en la agricultura

El calentamiento global impacta significativamente a la agricultura debido a:

- los cambios en la temperatura;
- la disminución de la precipitación y variación en los patrones de distribución de la lluvia y nubosidad (por diferencia de temperatura entre el océano y la tierra);
- avance de las zonas áridas;
- deshielo de los casquetes de hielo (provocando la disminución de las reservas de agua dulce); mayor incidencia de plagas, insectos y enfermedades;
- ocurrencia de tormentas eléctricas y granizadas; y,
- alteración del ciclo habitual de ciertos cultivos.

Todos estos elementos interactúan para determinar las condiciones propias del territorio en que los seres vivos nos desarrollamos y realizamos nuestras actividades para satisfacer nuestras necesidades alimenticias y las de la sociedad en su conjunto.

Los efectos del cambio climático y la magnitud de los mismos en la agricultura son distintos en cada zona geográfica, ya que estos están más relacionados con variación local del clima en comparación con la alteración de los patrones globales. Es verdad que el cambio climático y el calentamiento global afectan a la agricultura, pero también es cierto que ésta última es una de las principales fuentes de emisión de gases con efecto invernadero a la atmósfera. Las actividades agrícolas provocan la emisión de dióxido de carbono, metano y óxido nítrico a la atmósfera, considerándose a la agricultura como la fuente principal de las emisiones de metano de origen animal. Lo anterior acentúa el efecto invernadero, ya que los gases atrapan el calor y lo reemiten en todas direcciones, causando el aumento de la temperatura de la superficie del planeta que no es capaz de reflejar toda esta energía en forma de calor y luz hacia el espacio.

Si bien es cierto que bajo un escenario de cambio climático una alteración permanente de las condiciones locales limita el potencial actual de producción de alimentos en ciertas zonas, habrá otras donde se propicien condiciones favorables para el desarrollo de nuevos tipos de cultivos. Al respecto se prevé el movimiento de grandes cantidades de alimento entre países o zonas exportadoras a las importadoras, con mayores ingresos y desarrollo para las zonas productoras. Con el fin de lograr la seguridad alimentaria de la población chilena queda de manifiesto la necesidad de considerar todos los posibles efectos del cambio climático en los territorios, por lo que debemos saber cómo anticiparnos y adaptarnos a una futura realidad con patrones del clima distintos y con variaciones para así potenciar la productividad agrícola bajo estas nuevas condiciones.

En términos muy generales, los modelos predictivos indican que en un futuro Chile será un país más cálido, con menos lluvias (pero con más días nublados) y más propenso a la ocurrencia de intensas tormentas. Todo esto provocará la modificación de los paisajes típicos del territorio ya que la base para la existencia de ellos es la disponibilidad permanente de agua, la cual se limitará debido a la menor cantidad de lluvia en ciertas zonas del país y al derretimiento de las reservas de agua que se encuentran en los glaciares. Lo anterior también influirá en la disminución de la masa boscosa nativa del territorio, con cambios en los ciclos de nutrientes. Además se espera un avance de las zonas áridas y del desierto en dirección a la zona central del país.

Concretamente podría esperarse una disminución en los rendimientos, calidad y diversidad de los cultivos en el norte y centro de Chile, los cuales podrían ser progresivamente trasladados hacia las zonas centro-sur y sur. Esta situación sería el resultado de cambios en el ciclo natural de los cultivos, con posibles cambios en la fecha de siembra o plantación; disminución en la germinación de

semillas; inadecuado desarrollo foliar; maduración precipitada del fruto; y baja resistencia al ataque de plagas, insectos y enfermedades. La predominancia de las condiciones secas requerirá importantes inversiones y cambios significativos en los sistemas de almacenamiento y uso del agua (mayor frecuencia de riego), además de medidas para el mejoramiento del drenaje del suelo.

Condiciones más secas del suelo también podrían provocar cambios en los procesos de degradación de la materia orgánica (y por ende en estructura del suelo) e intensificación de los procesos de erosión. Esto sería importante para el sur de Chile ya que buena parte de los suelos del llano central del territorio poseen un alto contenido de materia orgánica. En el sur de Chile la pérdida de superficie boscosa podría aumentar las áreas de cultivo, sin embargo por la aptitud de nuestros suelos esto podría significar la intensificación en el uso de fertilizantes químicos, con el riesgo de pérdidas de nutrientes al medio ambiente ya sea por arrastre, lixiviación y/o emisión gaseosa. Además la mayor vulnerabilidad a plagas, insectos y enfermedades también supone un aumento en el uso herbicidas, insecticidas y fungicidas con un posible deterioro de la biomasa microbiana del suelo.

No todos los cambios proyectados son negativos, por ejemplo el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) y la Universidad de Chile indican que teniendo en cuenta los rendimientos actuales de algunos cultivos como el trigo en escenarios futuros podría presentarse un aumento gradual en los mismos desde la precordillera del Biobío hacia el sur del país. Así mismo se proyecta un aumento productivo significativo en el cultivo de maíz en la zona sur y también de papas y porotos desde la Región de la Araucanía hacia la Región de Los Lagos. También el área para el cultivo de algunos frutales podría ampliarse hacia la zona sur del país, abarcando las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.

En cuanto al impacto en la producción animal se prevé un cambio en los patrones de precipitación en la zona sur con menor disponibilidad de lluvia en la época estival, esto impactará las praderas de las Regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos que son la base de la alimentación del ganado en estos territorios. Estas podrían sufrir disminuciones en su productividad principalmente por el estrés hídrico que suscitarían los veranos más secos. Al contrario para la Región de Aysén podría esperarse una mejora en la productividad de las praderas por el aumento de temperatura y la ininterrumpida disponibilidad de agua.

Dependiendo de las condiciones del suelo y la ocurrencia de heladas en la zona, en las áreas productivas donde se registre un aumento de la temperatura podría incentivarse el cultivo de ciertas especies y variedades adaptadas para este

tipo de condiciones, esperando además un aumento en los rendimientos de las que ya son habitualmente cultivadas en los territorios. Algunos ejemplos de los cultivos que podrían incentivarse son: pepino, espárrago, porotos, tomate, calabaza, zapallo y maíz dulce que requieren temperaturas $>17^{\circ}\text{C}$.

Si las variaciones en las condiciones ambientales atribuibles al cambio climático se suscitaran de manera gradual, muchas plantas y organismos vivos podrían adaptarse; sin embargo aquellos que no tengan la capacidad de hacerlo con rapidez y eficacia podrían verse superados por otros más competitivos que prevalecerán en los futuros agroecosistemas. Sin embargo, hay que considerar que la estimación de los efectos del cambio climático en las condiciones productivas futuras en Chile se basa en proyecciones, por lo tanto existe un grado de incertidumbre asociado a los modelos utilizados para la obtención de éstas. Dichos modelos toman en cuenta información específica generada a nivel local o regional, por lo tanto si ésta es limitada o inexistente es más difícil prever con certeza lo que ocurrirá en el futuro. Además la implementación de medidas de adaptación/mitigación en el presente pudiera tener beneficios que influirían en el futuro de los sistemas productivos locales.

La adaptación al probable y nuevo escenario determinado por el cambio climático incluye entre otras cosas: desarrollar e implementar medidas para la cosecha de agua; mejorar el almacenamiento y distribución del recurso (canaletas, reservorios y embalses); diseñar e implementar tecnologías para mejorar la eficiencia de uso en condiciones de riego; identificación y preparación ante la ocurrencia de eventos climáticos extremos; disminución del riesgo climático con sistemas de alerta y control integrado de plagas, insectos y enfermedades; identificación e implementación de medidas para detener y recuperar los suelos degradados; ejecución de programas de mejoramiento genético que generen futuras variedades que permitan disminuir el estrés hídrico y térmico; fomentar la conservación genética de actuales variedades con mejores características de desempeño productivo ante condiciones extremas como heladas, inundaciones, sequías o salinización excesiva del suelo; y la formación de la población civil y del capital técnico humano para ayudar a los productores a afrontar los desafíos del cambio climático a nivel local.

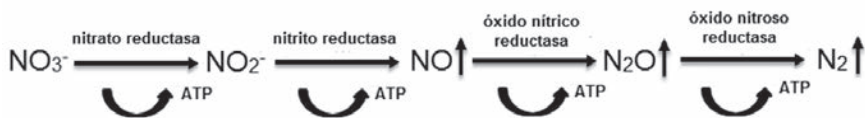
7.3. Mitigación de la emisión de óxido nitroso (N_2O) desde suelos destinados a la actividad agropecuaria

Las emisiones de N_2O contribuyen al calentamiento global y el agotamiento del ozono estratosférico, además de disminuir la eficiencia de uso de los fertilizantes

nitrogenados (orgánico y mineral). A nivel global, se estima que 1,8 mill de t N_2O -N año⁻¹ se generan en suelos bajo praderas, como resultado de los procesos de nitrificación y desnitrificación.

Sin embargo, la desnitrificación biológica es considerada la mayor fuente en la producción N_2O en los suelos bajo praderas templadas, que representa globalmente alrededor del 60% del total de las emisiones de N_2O a la atmósfera por parte de la agricultura.

La desnitrificación se produce en cuatro reacciones consecutivas catalizadas por cuatro enzimas reductasas diferentes. Estas enzimas son distribuidas en diferentes microorganismos como se muestra en la siguiente ecuación del proceso de desnitrificación completa llevada a cabo por las cuatro diferentes enzimas reductasa. (Adaptado de Zaman *et al.*, 2012:



Los requisitos generales para la desnitrificación biológica son:

- Presencia de bacterias, hongos, u otras eucariotas o arqueas desnitrificantes que poseen actividad metabólica.
- Presencia de donantes de electrones, como compuestos disponibles de carbono (C) orgánico.
- Condiciones anaeróbicas o suministro restringido de O_2
- Disponibilidad de óxidos de nitrógeno (N) como NO_3^- , NO_2^- , NO, N_2O , o receptores de electrones terminales.

Los principales factores ambientales que pueden afectar la desnitrificación han sido categorizados como reguladores proximales y distales. Los reguladores proximales son aquellos que afectan inmediatamente a las comunidades desnitrificantes que conducen a cambios instantáneos en las tasas de desnitrificación. Estos reguladores incluyen a la concentración de NO_3^- , C disponible, concentración de O_2 y temperatura. Mientras que los reguladores distales controlan la composición y diversidad de las comunidades desnitrificantes en escalas espaciales y temporales más amplias para un período más largo que los reguladores proximales. Estos reguladores incluyen factores como el crecimiento de las plantas, las prácticas de manejo (es decir, tipo cultivo

y pastoreo de animales), la textura y el pH del suelo y la disponibilidad de agua.

En praderas manejadas intensivamente la cantidad de N aportado vía fertilización y durante el pastoreo, en formas inorgánicas y orgánicas, favorece su acumulación en el sistema productivo, lo que puede resultar en pérdidas significativas de este nutriente por distintas vías, incluyendo la desnitrificación. Debido a ello, se han desarrollado prácticas de manejo y tecnologías para reducir las emisiones por esta vía que van desde el nivel predial, hasta una optimización de la cadena productiva en general.

Estas opciones incluyen:

- Optimizar la eficiencia del sistema productivo, incluyendo el aumento de productividad de praderas y cultivos, la optimización del pastoreo evitando la sobrecarga animal en periodos de invierno, el adecuado manejo del riego y el aumento de la eficiencia de uso del N aplicado como fertilizante,
- Optimización de la producción animal, incluyendo la combinación del manejo del rebaño y de la alimentación animal, de manera de reducir la excreción de N en orina y heces durante el pastoreo,
- Optimizar el manejo de los residuos orgánicos, incluyendo su colecta y acumulación, y su posterior uso como fertilizantes a nivel predial
- Optimizar la utilización de los alimentos producidos, se estima que globalmente entre un 20 y un 40% de los alimentos producidos son desperdiciados o perdidos. Reducir estas pérdidas podría disminuir proporcionalmente las necesidades de alimento en el mundo, y por tanto las emisiones de N_2O asociadas con su producción.

Los resultados locales obtenidos a la fecha indican que las emisiones directas de N_2O de suelos volcánicos bajo pradera (trumaos y rojo arcillosos) son bajas bajo condiciones naturales ($<0,4 \text{ kg N-N}_2\text{O ha}^{-1}$), siendo menor a las pérdidas basales estimadas vía lixiviación o volatilización para las mismas condiciones. Una vez que los suelos son sometidos a fertilización orgánica (uso de purines, o estiércol) o química (fertilizantes nitrogenados), este valor se incrementa alcanzando 4-6 veces los valores registrados bajo condiciones naturales, dependiendo del tipo y dosis de fertilizante aplicado. Por ejemplo, las emisiones de N_2O en potreros con aplicación de fertilizante nitrogenado (urea) en dosis de $200 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ pueden alcanzar a $1 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Cuadro 7.1).

Cuadro 7.1. Ejemplos de emisiones de N-N₂O en suelos destinados a la ganadería en el sur de Chile. Fuente: Adaptado de Alfaro *et al.* (2017) (±error estándar de la media).

Uso de suelo	Dosis de N (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Emisiones de N-N ₂ O (kg N-N ₂ O ha ⁻¹ año ⁻¹)
Pradera permanente	0	0,2 a 0,4
Pradera permanente, urea	41	0,6 ± 0,02
Pradera permanente, urea	124	0,9 ± 0,03
Pradera permanente, urea	200	1,0 ± 0,07
Pradera permanente, nitrato de amonio	200+inhibidores	0,7 ± 0,06
Pradera permanente, purín bovino	134	0,6 ± 0,07
Rotación maíz forrajero-avena forrajera, urea	300	0,9 ± 0,02

Los estudios realizados a la fecha en Chile permiten establecer reducciones de hasta un 30% en las emisiones de N₂O por el uso de fertilizantes nitrogenados que incorporan el uso de inhibidores de la nitrificación como DCD (Vistoso *et al.*, 2012; Alfaro *et al.*, 2014), sin que se haya determinado una reducción de la lixiviación de N, o aumentos de eficiencia en producción o calidad de forraje asociado al uso de estos productos. La adición de inhibidores de la ureasa no ha generado resultados concluyentes, mientras que el uso integrado de productos con ambos inhibidores logra reducciones de c. 39% en las emisiones de N₂O (Vistoso *et al.*, 2012). Esto plantea el desafío de comprender cuál es el rol que estos productos podrían cumplir en una estrategia nacional de reducción de GEI. Adicionalmente, resultados locales sugieren que los suelos volcánicos del sur de Chile podrían capturar C como CH₄, debido a la presencia de organismo metanotrofos en el suelo. Así, suelos que pasan de praderas a cultivos podrían capturar c. 7 kg C-CH₄ ha⁻¹ año⁻¹ (Hube *et al.*, 2017), mientras que suelos bajo pradera permanente pudieran capturar c. 1 kg C-CH₄ ha⁻¹ año⁻¹ (Alfaro *et al.*, 2016), debido al mayor contenido natural de C en suelos ganaderos. Esto pudiera contribuir al desarrollo de sistemas productivos de emisión de carbono reducida, aunque en predios lecheros basados en el pastoreo este potencial de captura sería menor.

7.4. Mitigación de la emisión de metano (CH₄) de Rumiantes

El CH₄ es un producto de la fermentación ruminal de los carbohidratos. Las emisiones de metano, además de contribuir al cambio climático, representan una pérdida de energía para el animal de entre el 2 y el 12% de la energía bruta ingerida. El CH₄ es producido en el rumen e intestino grueso de los animales por

organismos pertenecientes al dominio Archaea. Los metanógenos del rumen producen CH_4 preferentemente a partir de dihidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2). La formación de CH_4 tiene implicancias profundas para la fermentación ruminal, ya que mantiene baja la presión parcial de H_2 . Si el H_2 se acumula en el rumen, inhibe la re-oxidación del NADH, se acumulan productos atípicos reducidos de la fermentación tales como el lactato, etanol y formato, y se inhibe la digestión del forraje y el crecimiento microbiano (Wolin *et al.*, 1997).

La proporción de los ácidos grasos volátiles (AGV) acetato y propionato producido tiene una importante influencia sobre la producción de CH_4 , ya que determina la cantidad de H_2 disponible para la formación de CH_4 . La formación de acetato, y en menor medida la de butirato, resulta en la liberación de equivalentes reductores, en tanto el propionato es un depósito de electrones. Teóricamente, si la proporción de ácido acético a ácido propiónico fuera de 0,5, no habría sustrato energético perdido como CH_4 , mientras que si todos los carbohidratos de la dieta se utilizaron para producir ácido acético, la pérdida de energía en forma de metano sería del 33% (Johnson y Johnson *et al.* 1995).

Las emisiones de CH_4 entérico se ven afectadas por un número de factores, siendo los principales los nutricionales. La manipulación de la dieta puede alterar el tiempo de retención de los alimentos en el rumen y las tasas de fermentación, lo que a su vez puede afectar la proporción de propionato a acetato producido en el rumen y, en consecuencia la producción de CH_4 . La proporción de AGV producidos puede ser afectado por el consumo de alimento debido al incremento de la tasa de pasaje y disminución de la digestibilidad, y por el tipo de carbohidrato fermentado. Dietas con una alta proporción de concentrado en relación al forraje disminuyen la producción de CH_4 . Sin embargo, en sistemas pastoriles, donde el nivel de suplementación es bajo (usualmente <20%), la suplementación de vacas a pastoreo con concentrado no disminuyó las emisiones de CH_4 por unidad de producción de leche (intensidad de emisión; Muñoz *et al.*, 2015).

Las prácticas de manejo de pastoreo también puede afectar la cantidad y la calidad de los alimentos ingeridos, y por lo tanto la producción de CH_4 . En la medida en que las plantas maduran, la proporción de los componentes de la pared celular (i.e. carbohidratos estructurales) aumenta en relación al contenido celular (i.e. carbohidratos no estructurales; Beever *et al.*, 2000). El aumento en el contenido de carbohidratos estructurales favorece la producción de acetato en relación al propionato, resultando en mayor producción de CH_4 por unidad de materia orgánica digerida. La fermentación de carbohidratos solubles (no estructurales) resulta en mayor proporción de propionato y produce menos pérdidas energéticas como CH_4 (Johnson y Johnson, 1995). Por ejemplo, el pastoreo de praderas con alta calidad de forraje disminuye las emisiones de CH_4 .

comparado con el pastoreo de praderas de menor calidad por un inadecuado manejo de pastoreo (Muñoz *et al.*, 2016). La composición botánica también afecta la producción de CH_4 . Por ejemplo, la digestión de leguminosas en el rumen produce menos CH_4 en comparación con gramíneas (McAllister, *et al.*, 1996).

Algunas de las estrategias de mitigación de CH_4 reconocidas como exitosas incluyen la sustitución de forraje con concentrados, la adición de lípidos en la dieta y el uso de ionóforos, mientras que otras estrategias nutricionales que pueden disminuir el CH_4 entérico, pero que requieren investigación adicional son la alimentación de rumiantes con ensilajes de maíz y cereales en vez de ensilaje de pradera, prácticas mejoradas de manejo de pastoreo, inclusión de nuevas especies forrajeras y leguminosas forrajeras, compuestos secundarios de las plantas, y el uso de aditivos químicos y enzimáticos (Beauchemin *et al.*, 2008). Otras estrategias que requieren más investigación son la selección genética de animales con baja producción de CH_4 , el uso de bacteriófagos, bacteriocinas, inmunización y aditivos microbianos.

Una de las temáticas claves para el sector lácteo del sur del país es la sustentabilidad ambiental de sus productos. Hay una necesidad de aumentar la comprensión de los procesos y factores que intervienen en la determinación de las emisiones de CH_4 , la cuantificación de su producción y la evaluación de estrategias de mitigación que sean aplicables a las condiciones de producción local. Las opciones de mitigación de CH_4 más proclives a ser evaluadas, introducidas y aplicadas en Chile son aquellas tecnologías basadas en el manejo de la dieta de los rumiantes, en particular, estrategias en base al uso de praderas, aun cuando no se descartan otras estrategias en el largo plazo. Esto, debido al hecho de que la mayoría de los rebaños lecheros de esta parte del país se basan en el pastoreo como la principal fuente de energía alimentaria para la producción de leche.

7.4.1 Método para medir las emisiones de metano

La medición de las emisiones de CH_4 en rumiantes se ha hecho tradicionalmente con cámaras de respiración, las que son muy precisas y confiables. Sin embargo, estas cámaras tienen de un alto costo de inversión, y reducen el movimiento de los animales al estar confinados, por lo que es cuestionable la aplicabilidad de sus resultados a condiciones de pastoreo. Una técnica alternativa que hace uso de un gas inerte (hexafluoruro de azufre, SF_6) ha sido desarrollada para determinar las emisiones de metano de los rumiantes bajo condiciones productivas. La técnica de gas marcador SF_6 se basa en el uso de un bolo inserto en el rumen del animal



Foto 7.1. Vaca lechera a pastoreo usando un collar SF₆ para la medición de emisiones de metano.

Autor foto: Rodrigo Villalobos S.

que contiene gas SF₆, el que es liberado a una tasa constante predeterminada. Luego, una muestra representativa de aire proveniente de la respiración y el eructo es almacenada en un collar de PVC al vacío, diseñado para tal efecto (Foto 7.1). Las concentraciones de gas CH₄ y SF₆ dentro del collar son determinados en el laboratorio por cromatografía de gases y se utilizan para estimar las emisiones diarias de metano de cada vaca. Esta técnica fue implementación en INIA Remehue en el año 2011 para las mediciones de emisiones de metano en los trabajos de investigación que se lleven a cabo en esta área.

Bibliografía

Alfaro, M.A., Muñoz, C., Ungerfeld, E., Salazar, F., Hube, S. 2017. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en sistemas lecheros de Chile. En: Libro de Resúmenes 3ª Conferencia Gases de Efecto Invernadero en sistemas agropecuarios de Latinoamérica (GALA). INIA La Estanzuela, Colonia, Uruguay, 4-6 de Octubre. pp: 33-37.

- Alfaro, M., Inostroza, L., Hube, S., Ramírez, L., Salazar, F. 2016. Establecimiento de especies forrajeras, efecto sobre las emisiones de Gases de Efecto Invernadero y el balance de carbono. En: XLI Congreso Anual de la Sociedad Chilena de producción Animal (SOCHIPA AG); Allende, R., Toro, P. y Teixeira, D. (eds). Termas de Catillo, 11-13 de Octubre. pp: 219-220.
- Alfaro, M., Vistoso, E., Salazar, F., Hube, S., Ramírez, L., Rosas, A. 2014. Emisiones de óxido nitroso en una pradera permanente fertilizada con distintas fuentes de nitrógeno en un suelo volcánico del sur de Chile. En: Proceedings de la I Conferencia de Gases de Efecto Invernadero en Sistemas Agropecuarios de Latinoamérica (GALA) (Alfaro *et al.*, eds). Osorno 3 de Octubre del 2014. Serie actas INIA n°54 pp: 65-66.
- Anrique R, Latrille L, Balocchi O, Pinochet D, Moreira V, Smith R, Alomar D and Vargas G 2004. La producción de leche en Chile: caracterización técnica a nivel predial. In, pp. 59. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias, Valdivia.
- Beauchemin KA, Kreuzer M, O'Mara F and McAllister TA 2008. Nutritional management for enteric methane abatement: a review. Australian Journal of Experimental Agriculture 48, 21-27.
- Beever DE, Offer N and Gill M 2000. The feeding value of grass and grass products. In Grass: its production and utilisation (ed. A Hopkins), pp. 140-195, Blackwell Science, England.
- Hube, S., Alfaro, M.A., Scheer, C., Brunk, C., Ramírez, L., Rowlings, D., Grace, P. 2017. Effect of a nitrification and urease inhibitors on nitrous oxide and methane emissions from an oat crop in a volcanic ash soil. Agriculture Ecosystems and Environment, doi:10.1016/j.agee.2016.06.040
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Johnson KA and Johnson DE 1995. Methane emissions from cattle. Journal of Animal Science 73, 2483-2492.
- Lovett DK, Stack LJ, Lovell S, Callan J, Flynn B, Hawkins M and O'Mara FP 2005. Manipulating enteric methane emissions and animal performance of late-lactation dairy cows through concentrate supplementation at pasture. Journal of Dairy Science 88, 2836-2842.

- McAllister TA, Okine EK, Mathison GW and Cheng KJ 1996. Dietary, environmental and microbiological aspects of methane production in ruminants. *Canadian Journal of Animal Science* 76, 231 – 243.
- McCaughy WP, Wittenberg K and Corrigan D 1997. Methane production by steers on pasture. *Canadian Journal of Animal Science* 77, 519-524.
- Muñoz, C., S. Hube, J. M. Morales, T. Yan, and E. M. Ungerfeld. 2015. Effects of concentrate supplementation on enteric methane emissions and milk production of grazing dairy cows. *Livest. Sci.* 175:37-46.
- Muñoz, C., P. A. Letelier, E. M. Ungerfeld, J. M. Morales, S. Hube, and L. A. Pérez-Prieto. 2016. Effects of pregrazing herbage mass in late spring on enteric methane emissions, dry matter intake, and milk production of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 99:7945-7955.
- Vistoso, E., Alfaro, M, Saggar, S., Salazar, F. 2012. Effect of nitrogen Inhibitors on nitrous oxide emissions and pasture growth following an autumn application in a volcanic soil. *Chilean Journal of Agricultural Research* 72: 133-139.
- Wolin MJ, Miller TL and Stewart CS. 1997. Microbe-microbe interactions. In *The Rumen Microbial Ecosystem* (eds. PN Hobson and CS Stewart), pp. 467-491, Blackie Academic & Professional, New York, NY.
- Zaman M.; M.L. Nguyen; M. Simek; S. Nawaz, J.M. Khan; M.N. Babar and S. Zaman. 2012. Emissions of nitrous oxide (N₂O) and Di-nitrogen (N₂) from the agricultural landscapes, sources, sinks, and factors affecting N₂O and N₂ ratios [en línea]. In: Lui, G. (Ed.) *Greenhouse Gases - Emissions, Measurement and Management*. ISBN: 978-953-51-0323-3. Recuperado en: <<http://www.intechopen.com/books/greenhouse-gases-emission-measurement-and-management/emissions-of-nitrous-oxide-n2o-and-di-nitrogen-n2-from-agricultural-landscape-sources-sinks-and-fact>> consultado en: 30 enero del 2015.

ANEXO 1. Elaboración y utilización de compost

INTRODUCCIÓN

El compost o abono orgánico compuesto, es el producto que resulta de la descomposición aeróbica (en presencia de oxígeno) de una mezcla de materias primas orgánicas, tanto de animales como vegetales, bajo condiciones específicas de humedad y temperatura. Este material está constituido, principalmente, por materia orgánica estabilizada, siendo imposible el reconocimiento de su origen. El compost está libre de patógenos o enfermedades, y no contiene semillas de plantas (malezas) que mueren con las temperaturas que alcanza la oxidación. Puede ser aplicado directamente al suelo, mejorando sus características físicas, químicas y biológicas.

Es un producto que sirve para mejorar los suelos, ya que aporta nutrientes, promotores de crecimiento y microorganismos benéficos que, entre otras cosas reduce la incidencia de enfermedades y plagas que afectan a las plantas y mantiene una buena calidad del recurso suelo. El efecto del abono orgánico es progresivo y acumulativo, poco a poco va mejorando la calidad del suelo: estructura, retención de humedad, capacidad de explorar de las raíces, cantidad de nutrientes, lo que lleva a una mejor producción.

PREPARACIÓN

Antes de elaborar el compost, se debe ubicar en un sector alto, que no se inunde o con una leve pendiente para evitar encharcamientos, que tenga sol y sombra, cerca de una fuente de agua y de preferencia que no interfiera con las labores agrícolas.

Se marca un sector de terreno de 1,5 m x 1,5 m y se raspa y suelta un poco la parte superficial del suelo. La pila debe tener un ancho mínimo de 1,5 m y no más de 2 m, para facilitar el volteo. El largo puede ser mayor, depende de la cantidad de material disponible. En el centro se coloca una estaca de unos 2 m de largo, si la pila es larga, se coloca una estaca cada 2 o 3 metros. Se comienza la construcción de la pila alrededor de la estaca, colocando una capa de 30 centímetros de materia vegetal (rastros, hojas, malezas, restos de cocina, etc.) humedeciendo inmediatamente la capa. Es importante que los materiales utilizados queden ubicados en forma homogénea, para lograr que el proceso sea igual en toda la pila, es decir si se aplican restos secos, debe hacerse en toda la capa, luego otros restos vegetales de la misma forma, hasta lograr los primeros 30 cm de altura (figura 1).

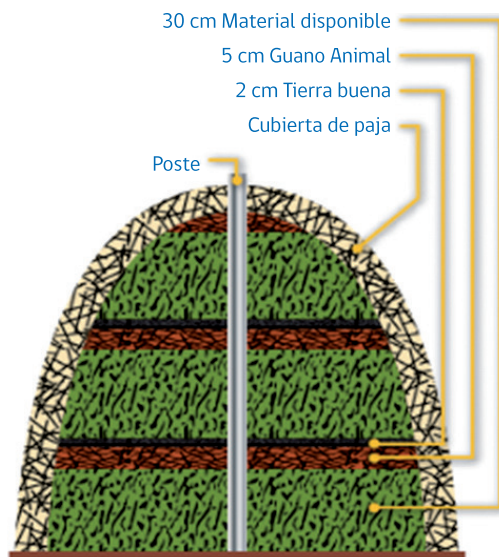


Figura 1. Elaboración de una abonera

Luego, se agrega una capa de 5 centímetros de guano, la que igualmente se le aplica agua. Si el guano está maduro o si es una mezcla con residuos orgánicos como el caso de una cama animal, la cantidad de guano se debe duplicar. Sobre estas dos capas se aplican 2 centímetros de tierra de buena calidad o, si hay disponible un compost terminado, con la finalidad de inocular microorganismos que se encargarán de iniciar el proceso de descomposición. La secuencia se repite hasta alcanzar una altura de al menos 1,5 metros mojando cada nueva capa. Es recomendable cubrir la pila con una capa de paja, sacos o malla rachel. Se debe sacar la estaca del centro para mejorar la ventilación, el espacio que deja la estaca sirve también para introducir la mano y evaluar el alza de la temperatura.

MATERIAS PRIMAS PARA SU ELABORACIÓN

Los materiales más comunes para utilizar son los rastrojos de cultivos, paja, aserrín, restos de poda, malezas, hojas y los de origen animal guano de diversos animales, orina y cama animal, pero se puede utilizar todos los residuos orgánicos, a excepción de:

- Materiales no degradables (plásticos, vidrios, etc.)
- Heces de perro, gato o humano, para evitar enfermedades
- Materiales de difícil descomposición

- Residuos tóxicos que no permiten el normal proceso de descomposición

MANEJO DURANTE EL PROCESO DE COMPOSTAJE

Como el proceso es aeróbico, no se debe compactar la pila para que circule el aire. Se debe mantener la humedad en forma permanente, por ello en verano es recomendable ubicar aspersores sobre la pila (figura 2). Por el contrario en períodos lluviosos se recomienda tapar la pila con plásticos o sacos, para evitar el exceso de humedad y lavado de nutrientes y microorganismos.



Figura 2. Riego en verano en una pila de compost

Para evaluar la humedad se puede tomar una porción de compost y apretarlo, no debe escurrir agua, si al abrir la mano mantiene la forma, el contenido de humedad es apropiado, si se disgrega, se debe mojar, como se observa en la foto 1.



Foto 1. Evaluación de la humedad del compost

La mezcla de materias primas orgánicas se calentará a partir del segundo día, lo que es un indicador que el proceso está funcionando, puede alcanzar temperaturas superiores a los 90°C, pero es conveniente mantenerla entre 60 y 75°C. Para disipar temperatura se puede revolver y mojar. Se recomienda al menos 55 °C por al menos 36 horas consecutivas para asegurar la muerte de patógenos y semillas de malezas.

Pasado algunos días, la pila comenzará a enfriarse, debido a la falta de oxígeno en su interior, por ello es necesario revolverla, para incorporar aire, habitualmente se aprovecha el volteo para mojarla.

Después de 3 a 4 meses el compost estará listo y se puede usar, esta situación se verifica cuando se cumplen tres condiciones: no es posible distinguir las materias primas, no aumenta la temperatura aunque se voltee y ha adquirido olor agradable a tierra de hojas. Una vez terminado se puede almacenar en sacos o guardar a granel protegiéndolo de la luz solar en un lugar fresco y seco, no debe resecarse, ideal mantenerlo con un 40% de humedad. 1 m³ de compost pesa entre 650 y 700 kg.

APLICACIÓN Y DOSIS

Se aplica en forma localizada en la línea de plantación al momento de realizar el establecimiento del cultivo o frutal. También se pueden realizar aplicaciones post-plantación colocando una capa alrededor de cada planta, siempre es conveniente incorporarlo para evitar la muerte de los microorganismos benéficos que contiene, por efecto de los rayos ultravioleta. La dosis recomendada es de 20 t ha⁻¹ en cultivos anuales, aplicando a todo el paño. Si las aplicaciones se realizan en la línea de plantación se puede reducir a 10 t ha⁻¹. La misma cantidad se utiliza en cultivos perennes aplicado bajo el lateral de riego.

ANEXO 2. Elaboración y utilización de lombricompost

INTRODUCCIÓN

El lombricompost o vermicompost es el producto final del proceso de biooxidación, degradación y estabilización de residuos orgánicos (vegetales y animales), por la acción combinada de la digestión de la lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) y microorganismos. Este producto está estabilizado, es homogéneo y de granulometría fina. Las lombrices, al alimentarse de los residuos orgánicos, inician su descomposición, dejándolos disponibles para la acción de los microorganismos y, de esta forma, estimulan la actividad microbiana. Al igual que el compost, este producto puede ser usado como un mejorador de las características físicas, químicas y biológicas del suelo.

CARACTERÍSTICAS DE LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA (*Eisenia foetida*)

La lombriz roja californiana es una de las especies de lombrices que se usan en lombricultura por su gran capacidad reproductiva. Pertenecen a la familia Lumbricidae y se agrupan en la categoría ecológica epigeas, que poseen una estrategia reproductiva rápida y prolífica, lo cual le permite altas tasas de consumo de residuos orgánicos y sucesivas generaciones. Se desarrolla bien en ambientes húmedos, sin luz directa, siendo los climas templados ideales para su reproducción. Esta especie puede duplicar su población en un mes con un manejo

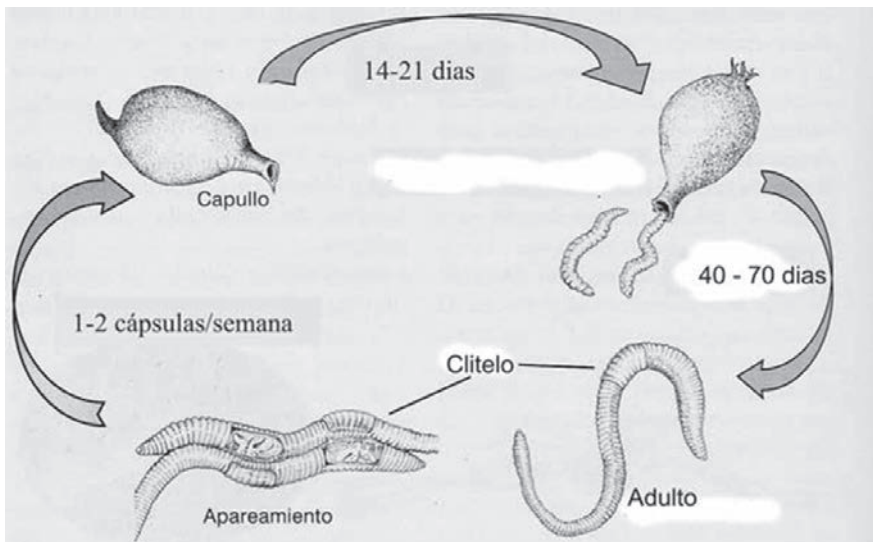


Figura 1. Ciclo biológico de *Eisenia foetida* .

Fuente: Vargas-Machuca y Domínguez (2011).

apropiado. Cada lombriz puede poner un cocón (figura 2), de donde nacen 1 a 5 lombrices en un período de 14 a 21 días, llegando a la su madurez sexual en tres meses aproximadamente. Se reproducen cada 7 días durante toda su vida que tiene una duración de más de un año. La lombriz roja californiana vive muchos años, se reproduce muchas veces en el año y es muy eficiente en transformar los residuos orgánicos en una excelente enmienda orgánica (figura 1).

SELECCIÓN DEL LUGAR

Se debe ubicar en un sector protegido, para que las lombrices no queden expuestas directamente al sol. Es aconsejable taparlas con una malla negra y bajo techo, para evitar exceso de humedad en períodos de precipitaciones, si no tienen techo tapar con plástico. Para comenzar la producción es necesario hacer una cuna de lombrices, la cual será la base para los posteriores lechos para producir humus.

ESTABLECIMIENTO DE LA CUNA DE LOMBRICES

Colocar compost de preferencia o una mezcla de estiércol y aserrín húmedo en el fondo del recipiente. Colocar varias lombrices y observar si se entierran fácilmente. Si se escapan o no se entierran y mueren, es porque no sirve ese sustrato o porque está muy seco. Si las lombrices entran al sustrato sin problema, se ponen todas las lombrices en la cuna tratando de no alterar el sustrato en el que vienen y se cubre con paja o malla. Se debe mantener siempre húmedo, mediante riegos frecuentes. Después de 3 meses, puede traspasar las lombrices de la cuna al lecho para producir humus.

INSTALACIÓN EN EL LECHO

Colocar en el fondo una capa de compost o estiércol maduro y mojar. Poner una o dos lombrices para ver su comportamiento, si penetran al sustrato sin problemas colocar sobre el sustrato todo el núcleo de lombrices y dejarlo tapado y protegido. Si las lombrices se retuercen sin penetrar en el sustrato, revisar que el sustrato esté bien húmedo. Idealmente se debe utilizar material del mismo lecho de donde provienen las lombrices

ALIMENTACIÓN DE LAS LOMBRICES

Se pueden alimentan con diversos tipos de residuos orgánicos, evitando aquellos que se calientan como guano o estiércol fresco, los que se deben dejar 2 a 3 días en descomposición antes de agregarlos al lecho para evitar el daño de las lombrices por el calor.

COSECHA DE VERMICOMPOST O LOMBRICOMPOST

En 3 a 4 meses ya se puede comenzar a cosechar el producto, dependiendo del manejo que se le ha dado. Para ello se separan las lombrices dejando alimento sólo en un extremo del lecho y humedeciendo solo ese sector durante 4 a 7 días. Las lombrices migrarán a ese lugar y el lombricompost quedará en condiciones para ser cosechado, con una baja carga de individuos. Otra forma de cosechar es colocando una malla raschell sobre el lecho de las lombrices, se agrega el alimento sobre ésta y después de 7 días se retira la malla con lombrices y el lombricompost queda disponible para ser utilizado. Para cosechar lombrices se utilizan trampas, colocando alimento dentro de bolsitas de malla, en el interior del lecho, en diferentes puntos, para que en ellas se agrupen las lombrices, al cabo de una semana se sacan las bolsas con gran cantidad de lombrices.

APLICACIÓN Y DOSIS

El vermicompost es un biofertilizante que se puede utilizar en todo tipo de cultivos y plantas. En la almaciguera mezclado con arena y tierra en partes iguales, en los camellones o camas altas, en los surcos de siembra, en maceteros y en la fuente de árboles frutales o bajo el riego por goteo. Se puede usar mezclado con otros abonos orgánicos, como compost y/o bokashi.



Figura 2. Lombriz y cócón, dentro del cual se encuentran los huevos de la lombriz.

ENVASADO Y ALMACENAJE

El lombricompost cosechado se deja secar al aire por unos días, puede almacenarse durante mucho tiempo en sacos, en un lugar fresco y seco, sin que sus propiedades se vean alteradas, pero es necesario mantenerlas bajo condiciones óptimas de humedad (40%).

Su aplicación, al igual que la del compost, mejora la fertilidad física, química y biológica, contribuyendo a recuperar suelos degradados y contaminados y elevando los rendimientos de cosecha de los cultivos. El conocimiento acerca de sus capacidades aún es limitado, pero se ha demostrado que permite reducir las poblaciones de hongos patógenos que causan enfermedades radiculares.

ANEXO 3. Elaboración y utilización de bokashi

(Fuente: Infante, 2011)

El Bokashi, es un abono orgánico de origen japonés, que se obtiene producto de la descomposición en presencia de aire de residuos vegetales y animales, donde se agregan algunas materias primas (yogurt, guano, levadura y tierra) que le permiten acelerar el proceso.

Cuando está terminado, el bokashi, aporta muchos nutrientes necesarios para estimular el crecimiento y desarrollo de los cultivos, como también microorganismos benéficos. Igual que el compost tiene un efecto progresivo y acumulativo, poco a poco va mejorando la fertilidad y la vida del suelo, otorga mayor retención de humedad y plantas más sanas con mayor producción.



Materias primas para la elaboración de bokashi

MATERIAS PRIMAS PARA LA ELABORACIÓN DE BOKASHI

Insumo	Cantidad
Guano maduro, seco, de preferencia harnereado	40 kg
Tierra de buena calidad harnereada	40 kg
Afrechillo o harinilla o afrecho.	20 kg
Yogurt, suero, leche, kéfir (1/4 litro)	1 litro
Levadura seca	20 g
Miel, melaza, azúcar, chancaca o mermelada	1 taza

PREPARACIÓN

Día 0	• Poner en el piso un plástico de unos 2,5 por 2, 5 m. • Sobre el plástico mezclar bien la tierra, el guano y el afrecho o harinilla o afrecho, simular a los volteos que se le da a una mezcla de cemento con arena. • Diluir en 20 litros de agua la miel, melaza, azúcar o mermelada, el yogurt, leche o kéfir y la levadura. • Con esta mezcla líquida, mojar la mezcla de materiales sólidos mientras se revuelve. • Agregar un poco más de agua, hasta que quede con humedad adecuada de tal forma que al apretar una porción de la mezcla no gotee, pero que al abrir la mano mantenga la forma. • Si la humedad no es suficiente, se debe seguir agregando agua como lluvia y revolver. Si por el contrario, la humedad es excesiva, se debe agregar más afrechillo, afrecho o harinilla. • Dejar el material en un montón y tapar con plásticos para evitar pérdida de humedad.
Día 1, 2 y 3	• Se debe revolver 3 veces al día (mañana, medio día y tarde), mantener la altura de unos 30 cm y tapar con plástico. • Al segundo día, el olor será similar a la levadura.
Día 4, 5 y 6	• Se debe revolver 2 veces al día (mañana y tarde) , mantener una altura a unos 30 cm.
Día 7	• Se debe extender el preparado, de manera que pierda algo de humedad y temperatura, a unos 10 cm de altura.
Día 8	• La temperatura debe estar baja y la mezcla ha tomado un color gris parejo. Es posible utilizar el producto terminado.

APORTE DE CADA MATERIA PRIMA

Materias primas	Aporte
Suelo	Constituye el cuerpo principal del preparado, que aporta microorganismos, por lo que debe ser de buena calidad, de preferencia de color oscuro.
Harinilla, afrecho o afrechillo	Principal materia orgánica, que aporta energía.
Estiércol	Residuo que aporta nutrientes rápidamente disponibles para los microorganismos, por lo tanto acelera el proceso de descomposición.
Miel, azúcar, mermelada, chancaca o melaza	Aporta energía de fácil utilización y acelera el proceso de descomposición.
Levadura	Es el microorganismo que inicia la fermentación.
Yogurt, suero, leche o kéfir	Contiene proteínas y es caldo de cultivo para microorganismos que aceleran el proceso. Pueden usarse de igual forma si están vencidos.

También se puede agregar pequeñas cantidades cáscaras de huevo molidas, carbón molido, cenizas y roca fosfórica.



Elaboración de bokashi

Caracterización de un bokashi terminado

Parámetro evaluado	Contenido
Materia Orgánica %	36,33
Carbono Orgánico %	20,20
N total %	1,33
N Amoniacal (N-NH ₄) mg kg ⁻¹	2.454,05
N Nítrico (N-NO ₃) mg kg ⁻¹	0,23
Relación C/N	15,25
Relación Amonio/Nitrato	10.669,78
Fósforo Soluble mg kg ⁻¹	67,50
Potasio Soluble mg kg ⁻¹	9.066,33
Calcio Soluble mg kg ⁻¹	179
pH	7,58
Conductividad eléctrica dS cm ⁻¹	4,85

ENVASADO Y ALMACENAJE

Al cabo de 8 días, cuando el bokashi está terminado, ya se ha enfriado y tiene un color ceniciento, si no se va a utilizar inmediatamente se recomienda almacenar en sacos, en un lugar fresco y seco, a la sombra. Es recomendable usar antes de 3 meses de finalizada su elaboración.

APLICACIÓN Y DOSIS

- Se recomienda aplicar en dosis de un kilo por metro cuadrado, no más que esa cantidad ya que puede tener niveles altos de conductividad eléctrica.
- Se puede aplicar directamente encima de los camellones, cama alta, surcos de siembra, maceteros y fuentes árboles frutales ya establecidos, siempre es recomendable incorporarlo.
- Aplicar 15 días antes de la siembra o trasplante, porque puede inhibir la germinación de algunas semillas por la presencia de sales.
- Se puede utilizar en mezcla con suelo, como sustrato al hacer almácigos.



Boletín INIA / N° 361
www.inia.cl

