

DIMENSIÓN AMBIENTAL



Guía para la Gestión de Suelos en Predios Lecheros Sustentables

ESTÁNDAR DE SUSTENTABILIDAD PARA PREDIOS LECHEROS

Se autoriza la reproducción parcial de la información aquí contenida, siempre y cuando se cite esta publicación como fuente.

Editores:

Natalie Jones, Consorcio Lechero

Fernando Barrera, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

Galit Rodríguez, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

María Paz Santibáñez, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

María Belén Sepúlveda, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

Julio 2022



Guía para la Gestión de Suelos en Predios Lecheros Sustentables

Susana Valle

Universidad Austral de Chile

Contenido

01. Glosario | pág. 5

02. Introducción | pág. 6

03. Principios y prácticas para el Manejo Sustentable del Suelo en Predios Lecheros | pág. 8

Gestión sustentable del suelo | pág. 9

Fertilidad de suelos: ¿Cómo gestionarla sustentablemente? | pág. 10

- Análisis de suelo | pág. 11
- Cálculo de enmienda | pág. 13
- Cálculo de dosis de fertilizante | pág. 14
 - Dosis de corrección momentánea de P (para la temporada) para cultivos | pág. 14
 - Dosis de fertilización para praderas | pág. 15
- Balance de nutrientes | pág. 17
- Acciones para avanzar en la gestión sustentable de la fertilidad de los suelos | pág. 18

Compactación de suelos: un problema a prevenir y mitigar | pág. 19

- ¿Cómo detectar la compactación del suelo? | pág. 19
- ¿Cómo evitar la compactación del suelo? | pág. 20

Contaminación del suelo: ¿Cómo evitarla? | pág. 23

Degradación del suelo: ¿Cómo prevenir y mitigar suelos degradados? | pág. 24

04. Bibliografía de referencia | pág. 25

05. Anexo | pág. 28

Anexo 1. ¿Cómo son los suelos de los predios lecheros del país? | pág. 29

- Suelos de la zona Central | pág. 31
- Suelos de la zona Centro-Sur | pág. 32
- Suelos de la zona Sur | pág. 33

Anexo 2. Valores de referencia para interpretar análisis de suelo | pág. 34

Anexo 3. Cálculo de enmienda | pág. 37

Anexo 4. Ejemplos de cálculo de dosis de fertilizante | pág. 39

A lo largo de esta guía encontrará diversos términos que se definen a continuación:

Material parental: todo aquel material mineral (proveniente de la descomposición de rocas) y/u orgánico que dan origen a los suelos.

Enmienda orgánica: material de origen animal o vegetal que puede ser adicionado al suelo para mejorar sus propiedades físicas, biológicas y/o químicas.

Tasa de mineralización: velocidad con que los microorganismos del suelo transforman residuos orgánicos (por ejemplo: enmiendas orgánicas) en formas inorgánicas que pueden quedar disponibles para las plantas.

Degradación del suelo: es la caída temporal o permanente de la capacidad productiva del suelo y/o del potencial ambiental que brinda servicios a la comunidad (servicios ecosistémicos). Según las propiedades del suelo afectadas, la degradación puede ser física, química y/o biológica.

Capacidad tampón de los suelos: es la resistencia que presenta el suelo ante una perturbación. Por ejemplo, la capacidad tampón de pH, se refiere a cuánto cambia el pH del suelo ante la aplicación de una enmienda ácida o básica (alcalina). De esta manera, un suelo con alta capacidad tampón requerirá la incorporación de una mayor cantidad de enmienda básica para aumentar el pH que un suelo con baja capacidad tampón. Se mide en la cantidad de material requerido para cambiar el pH en 1 unidad.

pH: es una medida de la acidez o alcalinidad en los suelos. El pH 7 es neutro, bajo 7 es ácido y sobre 7 es básico (alcalino). Según el pH del suelo será la disponibilidad de los nutrientes para las plantas. El pH óptimo depende del sistema productivo (especies).

Cero labranza: siembra directa al suelo, sin haberlo removido y manteniendo sobre él el rastrojo del cultivo anterior.

Labranza mínima: Mínimo movimiento de preparación de suelo, con uso de labranza vertical, con 1 o 2 pasadas de maquinaria en "tándem", es decir, dos implementos de labranza unidos uno detrás del otro.

Translocación: Movimiento de materia (iones, compuestos) dentro del suelo.

Agroecosistema: es un ecosistema modificado y gestionado por seres humanos con el objetivo de obtener alimentos, fibras u otros materiales de origen biótico (Gómez Sal, 2001).



Introducción

02.

Introducción

Esta guía técnica, vinculada al Estándar de Sustentabilidad para predios lecheros, se ha construido como un material de apoyo para productores de leche, sus equipos técnicos, asesores agrícolas y auditores para facilitar la incorporación de buenas prácticas y acciones que contribuyan al manejo sustentable del suelo para así mantener su productividad y/o sus servicios ecosistémicos a lo largo del tiempo.

Esto implica abordar los siguientes principios:

1. Prevenir y mitigar la compactación de suelos en predios lecheros
2. Mejorar la fertilidad de los suelos en predios lecheros
3. Evitar la contaminación de los suelos
4. Prevenir y mitigar los suelos degradados en predios lecheros
5. Gestionar sustentablemente los suelos en los predios lecheros

Para un manejo y gestión sustentable del suelo y sus propiedades, es fundamental considerar que **los suelos son sistemas extremadamente variables**. Sus propiedades varían a través de la superficie y la profundidad.

Esta gran variabilidad está dada por la formación de los suelos, donde 5 factores interactúan con procesos de adición, pérdida, translocación y transformación de materia (vegetación, agua, nutrientes, contaminantes, etc.) y energía dentro del sistema suelo:

- El tiempo transcurrido,
- El material parental o de origen,
- Los organismos presentes,
- El relieve y
- El clima.



En Chile, existe una enorme diversidad de materiales parentales, por ejemplo, rocas andesíticas-basálticas en la zona central del país, rocas metamórficas en la cordillera de la costa, y materiales volcánicos, en gran parte de la zona centro-sur al sur. En el Anexo 1 encontrará una descripción de los suelos presentes en los predios lecheros.

Entendiendo la variabilidad de los suelos y reconociendo que sus propiedades relevantes varían, el manejo sustentable de cada locación debe considerar las particularidades de cada sitio.

No se puede generalizar labores sin considerar las cualidades en cada caso.

Principios y prácticas para el Manejo Sustentable del Suelo en Predios Lecheros

03.

Principios y prácticas para el Manejo Sustentable del Suelo en Predios Lecheros

Gestión sustentable del suelo

La gestión sustentable del suelo es el principio rector, que considera la toma de decisiones integradas en uno o más de los principios de las siguientes secciones: prevenir y mitigar la compactación del suelo, mejorar su fertilidad, evitar su contaminación y prevenir y mitigar su degradación.

Para una gestión sustentable del suelo es necesario considerar la variabilidad intrínseca de los suelos, pero por sobre todo abordar el predio como un agroecosistema. De este modo, las decisiones de manejo del suelo considerarán un conjunto de elementos del agroecosistema lechero para así:

1. Definir áreas de manejo común.
2. Definir **estrategias de manejo** para cada área, acorde a sus características: rotación de cultivo, fertilización, manejo de pastoreo y carga animal, entre otros.

El predio lechero entonces podría verse como a continuación (Figura 1):



Figura 1.
Esquema de sectorización de unidades de suelos para diferentes manejos y definición de franja (verde) de protección de pendiente (S. Valle).

Fertilidad de suelos:

¿Cómo gestionarla sustentablemente?

Para lograr una gestión sustentable de la fertilidad de los suelos, se deben conocer algunas propiedades relevantes de condición y disponibilidad de nutrientes:

- Textura
- pH en H₂O (relación 1:2,5)
- Contenido de P disponible (P-Olsen)
- Bases de intercambio (Ca, Mg K y Na de intercambio)
- S disponible
- Materia orgánica
- Contenido de aluminio de intercambio (o saturación de Al)
- Micronutrientes
- Historial de manejo, considerando la incorporación de residuos (cantidad y tipo), que es importante para cuantificar el suministro de N desde el suelo.

Todo sistema productivo realiza extracción de nutrientes desde el suelo, que debiera ser **aportado o repuesto vía fertilizantes o abonos** (compost, abonos verdes, etc.). Si no hay reposición de lo extraído desde el suelo, habrá disminución de los nutrientes en el tiempo, lo que en casos extremos puede resultar en una *degradación química*.

Para determinar la dosis adecuada en términos económicos y ambientales de fertilizantes/abono es necesario hacer un **análisis de suelo** y conocer la **capacidad tampón de los suelos**, especialmente de pH y P.



→ Análisis de suelo

La mayor cantidad de errores en el uso de análisis de suelos ocurre en la toma de la muestra de suelo y no en el análisis y posterior interpretación de los resultados, aunque la correcta interpretación de los resultados es tan importante como la colecta de muestras. Los pasos a seguir se indican en la figura a continuación.

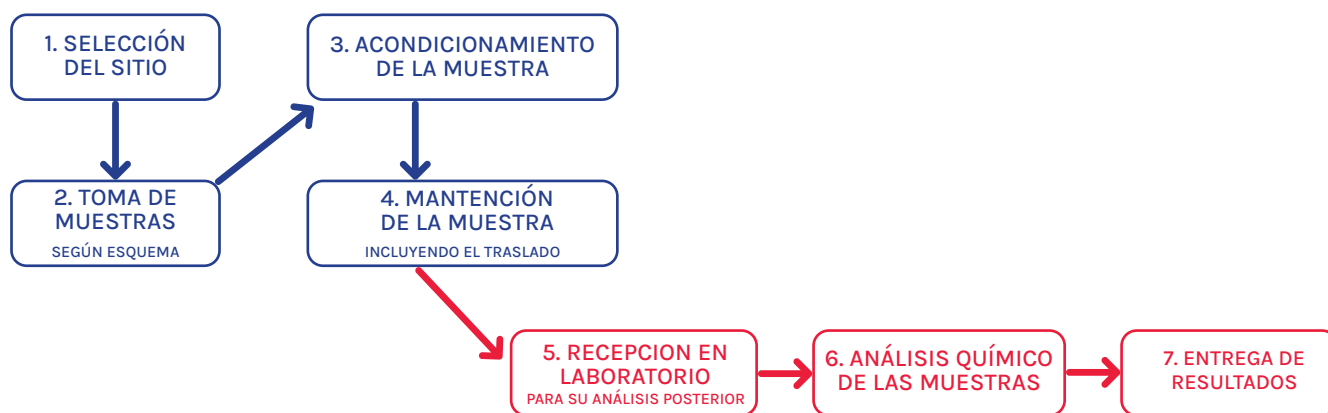


Figura 2. Etapas del proceso, desde la colecta (responsabilidad de quien lo ejecuta - cuadros azules) hasta la entrega de los análisis (responsabilidad del Laboratorio - cuadros rojos). Fuente: Elaboración propia.

Siga las siguientes recomendaciones para cada paso a seguir:

1. **Seleccione “áreas representativas” de suelo y manejo**, dentro de la variabilidad que exista en el predio y sus potreros. Se deben separar unidades de suelo según alguna característica que se repita o sea más frecuente y su manejo agronómico, de manera que la extracción de nutrientes sea similar en el área definida.
 - **Ejemplo:** una unidad de suelos de pendiente moderada con manejo de conservación y una unidad en zona baja y con pradera para pastoreo tienen un reciclaje de nutrientes muy diferente.
2. **Extraiga 10 a 15 submuestras de cada “área representativa”**, entre los 0-20 cm de profundidad (de 0-10 cm en praderas permanentes).
 - Las submuestras deben recolectarse con una buena distribución dentro del área. Por ejemplo, pueden ser tomadas recorriendo el área en zig-zag (Figura 3).
 - Las submuestras pueden ser colectadas con un barreno o una pala. Del suelo extraído seleccione un bloque interior (Figura 4), para no contaminar entre submuestras. Si se utiliza un barreno, este se debe limpiar después de extraer cada submuestra.
 - Acumule las submuestras en un balde o receptáculo limpio.

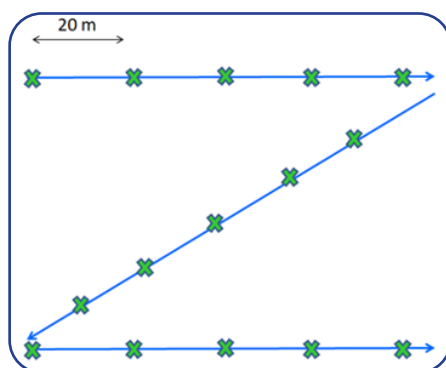


Figura 3. Recorrido zig-zag para colectar submuestras de un área representativa.



Figura 4. Volumen a considerar en la toma de muestra con pala (idealmente pala recta).

3. Obtenga una “muestra compuesta” de cada área representativa, al mezclar sus submuestras y seleccionar 1-2 kg de suelo húmedo.

- Guarde la muestra en una bolsa plástica, transparente y hermética, e identifíquela con lápiz permanente.
- Mantenga la muestra en un cooler o estructura similar, para evitar que se caliente ya que la temperatura altera de manera significativa la descomposición de la materia orgánica y, en consecuencia, el contenido de los nutrientes como N y S.

4. Entregue la(s) muestra(s) a un laboratorio de suelos acreditado por el SAG y solicite las propiedades a determinar, especificando la metodología.

- Idealmente, lleve la muestra compuesta al laboratorio el mismo día del muestreo; de lo contrario, manténgala refrigerada (4 °C).
- Por ejemplo, para determinar el contenido de enmienda - cal a aplicar para corregir la acidez del suelo, se debe solicitar **pH en H₂O, en relación 1:2,5** y la capacidad tampón de pH.

5. Interprete los resultados. La interpretación está directamente asociada al análisis solicitado y tiene relación con el tipo de suelo. Por ejemplo, si un suelo volcánico de la zona sur posee un contenido de materia orgánica de 12%, se puede decir que es un contenido “normal” para un suelo “trumao”, mientras que un contenido normal para un suelo aluvial de la zona central es 2%. Valores de referencia para interpretar los resultados se encuentran en el Anexo 2.

→ Cálculo de enmienda

Según los resultados del análisis de suelo, puede que sea necesario modificar el pH, lo cual se logra con una **enmienda**. Para el cálculo de enmienda, recuerde que la cantidad a adicionar de producto encalante será diferente en suelos con capacidad tampón de pH (CTpH) distinta, para lograr el mismo resultado de cambio de pH (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores de Capacidad tampón de pH para diferentes suelos de Chile (Luzio y Casanova 2020).

Región	Suelos	Capacidad tampón de pH CaCO ₃ (T ha ⁻¹)	Referencias
VI	Graníticos	0,10 - 0,55	Aldunate, 2000; Rodríguez et al., 2001.
	Terrazas Marinas	0,15 - 0,40	Aldunate, 2000.
X	Trumaos	0,71 - 1,50	Campillo, 1994; Campillo y Sadzawka, 1993; Dumont, 1994; Suárez, 1991.
	Rojos arcillosos	0,67 - 0,83	Suárez, 1991.
	Transicionales	0,83 - 1,00	Suárez, 1991.
	Ñadis	1,00 - 1,25	Suárez, 1991.

La CTpH de este cuadro muestra las toneladas de CaCO₃/ha a aplicar por cada 0.1 unidad de pH que se quiere subir.

La CTpH también puede ser estimada mediante una ecuación, según el contenido de materia orgánica, la densidad aparente del suelo y la profundidad (Anexo 3).

Entonces, para calcular el requerimiento de enmienda, siga los siguientes pasos:

1. Calcule la diferencia de pH entre el inicial y el que desea alcanzar.
2. Considere la capacidad tampón del suelo.
3. Estime el requerimiento de CaCO₃ para obtener el cambio de pH esperado.
4. Considere el Valor Neutralizante del producto encalante que se va a utilizar (medida de eficiencia de la cal), que se asocia a su pureza y tamaño de partícula (o “mesh”).

$$\frac{\text{Ton netas de CaCO}_3 \text{ equivalente/ha}}{\text{Eficiencia del producto (valor entre 0 - 1)}} = \text{ton de producto a aplicar / ha}$$

Un ejemplo práctico de este cálculo puede encontrar en el Anexo 3.

→ Cálculo de dosis de fertilizante

Para el cálculo general de dosis de fertilizantes, se debe considerar lo siguiente:

$$Dosis = \frac{(Demanda - Suministro)}{Eficiencia\ de\ fertilización}$$

Donde,

- Demanda es la cantidad mínima de un nutriente determinado, que requiere la especie, para alcanzar un rendimiento determinado.
- Suministro es la cantidad que aporta el sistema suelo (que es específico del suelo y del ingreso de residuos, para el caso del N).
- Eficiencia de fertilización depende de la tecnología de aplicación (y época para el N) y de la capacidad tampón del suelo para el caso del P, K y S.

Se debe considerar que los planes de fertilización pueden ser desarrollados a varios años (fertilizaciones de corrección, por ejemplo, para el P) o puede ser momentánea (para la temporada), en función del potencial de producción esperado para el caso del N, K y S, y según sea un cultivo o una pradera.

■ Dosis de corrección momentánea de P (para la temporada) para cultivos

$$Dosis\ P = \frac{(Suministro\ requerido - Suministro\ inicial)}{Eficiencia\ de\ fertilización\ de\ corrección} \times 2,3$$

Donde,

Suministro requerido – Suministro inicial = Contenido P-Olsen a alcanzar – Contenido P-Olsen inicial

→ Para estimar el contenido de P-Olsen a alcanzar:

Contenido P – Olsen a alcanzar = Demanda de P x Factor de Absorción de P

→ Para estimar la demanda de P:

$$Demanda\ P = Rendimiento\ esperado \times \left(\frac{1 - HC}{IC} \right) \times RIP$$

Donde,

HC = Humedad de cosecha (decimal)

IC = Índice de cosecha (IC) (decimal)

RIP = Requerimiento interno de P (RIP) (kg de nutriente / 100 kg de producto cosechado)

Factor de absorción de P (ppm Olsen / kg absorbido)¹

- Leguminosas forrajeras = 0,540
- Gramíneas forrajeras = 0,357
- Remolacha, brassicas = 0,80
- Cereales = 0,667

Finalmente, la eficiencia de fertilización depende de la capacidad tampón de P (CP) y de la eficiencia de la tecnología de aplicación. Valores de referencia se encuentran en el Anexo 4, junto a un ejemplo de cálculo de dosis de P par cultivos.

■ Dosis de fertilización para praderas

$$\text{Dosis fertilización P} = \text{Dosis de Corrección} + \text{Dosis de Mantención}$$

→ Para estimar la dosis de corrección en praderas:

$$\text{Dosis corrección P} = \frac{\Delta P - \text{Olsen} \times \text{FCO} \times 2,3}{0,4 \times t^{0,83}}$$

Donde,

ΔP -Olsen = P-Olsen a alcanzar – P-Olsen inicial

FCO = Factor de conversión a ppm P-Olsen = $\frac{\text{Da} \times \text{profundidad}}{\text{CP}}$

La profundidad se ingresa en dm (decímetro)

CP = capacidad de retención de P (ppm/ppm) = $1 - \left(\frac{0,942 \times \text{Al extractable}}{59,6 + \text{Al extractable}} \right)$

t = Tiempo a considerar en la corrección

Cabe indicar que la densidad aparente (Da, g/cm³) es un valor que debiera ser específico a cada suelo y manejo. La capacidad de retención de P (CP), por otra parte, es un parámetro que depende del tipo de suelo, por lo que se indica una estimación a través del valor del Al extractable (mg/kg) del suelo.

→ Para estimar la dosis de mantención en praderas:

$$\text{Dosis mantención de P} = (\text{Exportación de P en pastoreo (EPp)} + \text{Exportación de P en forraje conservado (EPc)}) \times 2,3$$

(kg P₂O₅/ha)

(kg P/ha)

(kg P/ha)

¹ (*) Valores referenciales (Pinochet 1996, 2007, 2011; Rodríguez et al. 2001). Los valores de Eficiencia de fertilización se determinan en función del tipo de suelo (contenido de Al extractable) y la tecnología de aplicación (Cuadro A4 en el Anexo 4). Fórmulas de cálculo publicadas por Pinochet 1996, 2007, 2011; Rodríguez et al. 2001.

En general, se considera que la exportación de P por pastoreo (EPp) 1kg P/ton MS de pradera y que la exportación por forraje conservado (EPc) es 3 kg P/ha para forraje de conservación. Pero una manera de estimar dichas exportaciones se indica a continuación.

→ **Exportación de P en pastoreo²:**

$$EPp \text{ (kg P/ha)} = CA \times PU \times AL \times (8,25 + 1,2 CA)$$

Donde,

CA = carga animal (unidades animal (UA)/ha/año)

PU = factor de utilización de la pradera

AL = factor de pérdida animal (kg P/US)

Los factores de pérdida animal considerados para las circunstancias más comunes se indican en el siguiente cuadro:

Animal	Topografía	AL (kg P/US)
Ovejas	Plano	0,7
	Lomaje	0,9
	Abrupto	1,1
Novillos	Plano	0,7
	Lomaje	0,9
	Abrupto	1,1
Vacas	Plano	0,9
	Lomaje	1,1

→ **Exportación de P por forraje conservado (EPc):**

$$EPc \text{ (kg P/ha)} = MS \times [1,8 (1 + 2e^{-0,21 MS})]$$

Donde,

MS = materia seca conservada en el rezago

Puede encontrar un ejemplo práctico en el Anexo 4.

² Fórmulas de cálculo publicadas por Pinochet 1996, 2007, 2011; Rodríguez et al. 2001.

→ Balance de nutrientes

El balance de nutrientes considera las entradas y salidas del sistema. Por lo que su cuantificación requiere información acotada de sus componentes, como muestra la Figura 5. Los balances pueden realizarse en diferentes escalas, por ejemplo, a nivel de suelo, considerando entre los procesos que influyen en las pérdidas la lixiviación, volatilización, extracción por las plantas, entre otros. O bien, a nivel de potrero, identificando todos los ingresos y egresos del sistema. En ambos casos, se requiere considerar este balance en un periodo específico de tiempo.

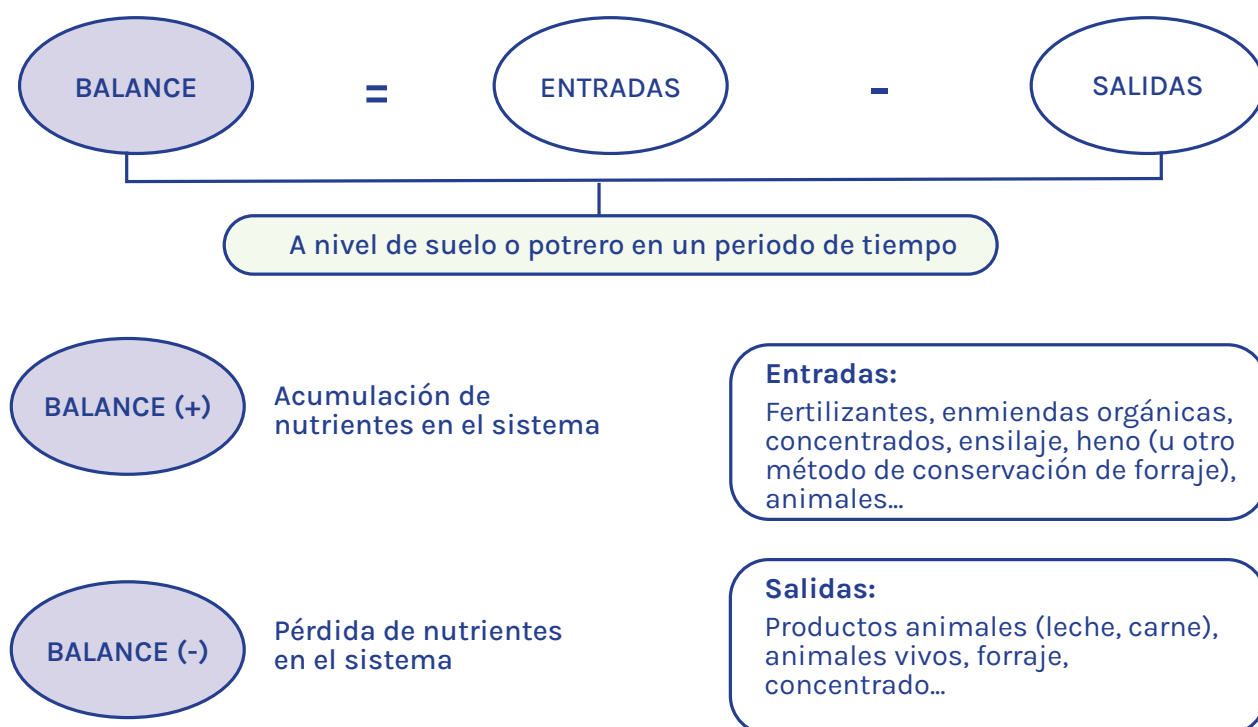


Figura 5. Esquema de cuantificación del balance de nutrientes en un agroecosistema.



→ Acciones para avanzar en la gestión sustentable de la fertilidad de los suelos

Considerando el contenido anterior, se sugieren las siguientes acciones para caminar hacia una gestión sustentable de la fertilidad de suelos.

Nivel de gestión	Acciones
Básico	Corrija pH y nivel de nutrientes limitantes para que sean adecuados al nivel productivo del agroecosistema. → Realice análisis de suelo e identifique nutrientes limitantes. → Use enmiendas alcalinizantes (cal) para neutralizar la acidificación de algunos fertilizantes (como los amoniacales).
Inicial	Realice un análisis a fines de la primera temporada de corrección, para asociar estos niveles y el rendimiento obtenidos. → Realice análisis de suelo periódicamente en cada “área representativa” de manejo. → Considere las propiedades más relevantes que le permitan hacer un balance. Es decir, que le permitan calcular una dosis racional y enfocada en la productividad a alcanzar y la extracción del sistema.
Avanzado	Determine un objetivo respecto a la fertilidad: si se desea incrementar (se desea alcanzar un nivel productivo mayor), mantener o bajar (posibilidad de contaminación). → Revise la disponibilidad de micronutrientes. → Haga un uso eficiente de nutrientes. Por ejemplo, aplique N de manera parcializada y acorde al crecimiento de los cultivos o praderas.
	Estime las pérdidas y reciclaje de los nutrientes (un balance de masa más detallado). → Fije estrategias de tipo comercial en la disponibilidad de nutrientes, por ejemplos en predios arrendados y/o frente a variaciones en el precio de los fertilizantes. → Mejorar los niveles de fertilidad con el uso periódico de abonos orgánicos o compost (con productos de composición y origen conocidos y registrados).
	Use fertilizantes con mayor tecnología, por ejemplo, ureas recubiertas, con inhibidores de nitrificación, con inhibidores de volatilización, de liberación controlada, roca fosfórica.

Compactación de suelos: un problema a prevenir y mitigar

La compactación es un proceso de densificación (aumento de la densidad aparente de los suelos), debido a la alteración de la estructura, pérdida de porosidad y permeabilidad, y constituye una manifestación de la *degradación física* de los suelos.

Las consecuencias de la compactación son:

- Disminución directa de la productividad
- Anegamiento, por disminución en la infiltración de agua al suelo
- Problemas asociados a la disponibilidad de nutrientes, por la falta de continuidad en los poros del suelo
- Problemas de aireación en las raíces
- Posibilidad de aumentar la erosión por escurrimiento del agua; e incluso
- Aumento de la emisión de algunos gases con efecto invernadero desde el suelo (Hillel et al., 2005).

→ ¿Cómo detectar la compactación del suelo?

La manifestación de la compactación es detectable mediante:

Observación directa del suelo, donde es posible ver estructura de tipo laminar en superficie (Figura 6), pérdida de porosidad, sellamiento superficial, “anegamiento superficial” o disminución de la infiltración del agua y rasgos de erosión laminar o de surcos en la superficie del suelo.

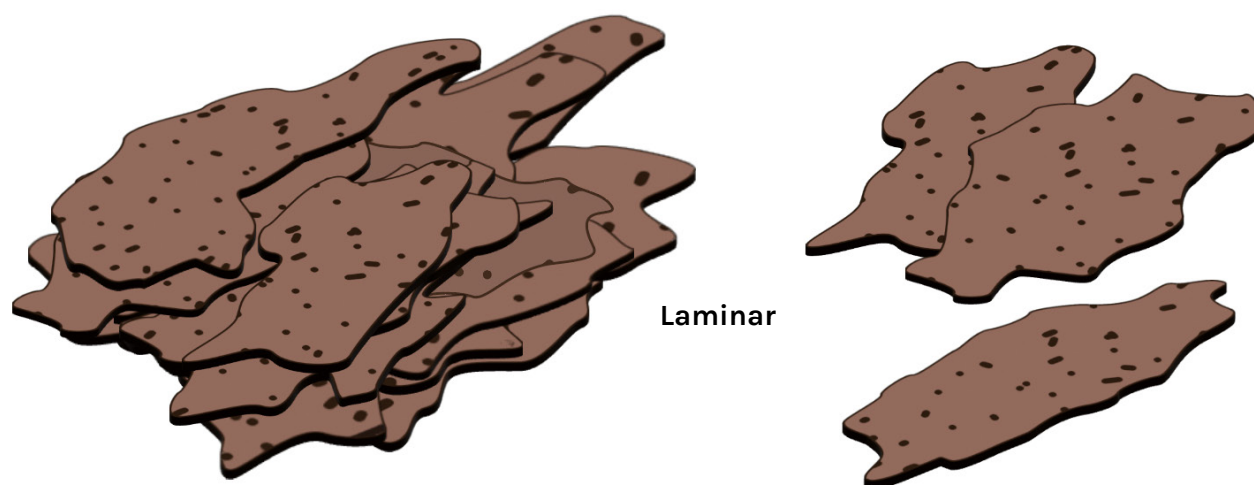


Figura 6. Estructura laminar (Fuente: Adaptado de Ficha técnica 162, INIA Kampenaike. 2021).

Metodologías objetivas

- Densidad aparente: medida del peso de una muestra suelo en relación a su volumen, en g/cm^3 . Esta se puede medir con cilindros metálicos que recolectan suelo no disturbado y se envían a laboratorio (Figura 7).
- Resistencia a la penetración (en paralelo a la del contenido de humedad), con un penetrómetro.
- Evaluación del sistema poroso con el método de colecta de suelo no disturbado con cilindros metálicos, entre otros.



Figura 7. Fotografías de colecta de suelo no disturbado con cilindros metálicos, para la evaluación de densidad aparente y distribución de poros (Fotografías S. Valle).

→ ¿Cómo evitar la compactación del suelo?

Se debe tener en cuenta que la porosidad total y la distribución y funcionalidad de los de poros del suelo, está dado por el tipo de suelo y su manejo. Según el tipo de suelo, se deben tener en cuenta las grandes diferencias de valores de densidad aparente (y, por ende, de porosidad total) que existe entre los suelos de las distintas zonas lecheras del país.

Ejemplo:

- Un suelo de la zona Centro, ubicado en posición de terraza, puede tener valores de densidad aparente de $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ (51% de porosidad total)³.
- Un trumao de la zona Sur puede tener valores de densidad aparente de $0,7 \text{ g cm}^{-3}$ (68% de porosidad total)⁴.

³ Considera una densidad de las partículas del suelo, o densidad real (D_r), de $2,65 \text{ g/cm}^3$

⁴ Considera una densidad de las partículas del suelo, o densidad real (D_r), de $2,20 \text{ g/cm}^3$

Es importante tener en cuenta que, aunque existan suelos con muy bajas densidades aparentes (como los volcánicos), y con muy alta porosidad total, ello no significa que no puedan degradarse por la compactación.

Dadas las consecuencias negativas asociadas a la compactación es relevante evitarla. Existen varias maneras de lograrlo, entre ellas:

1. **Mantener el suelo cubierto.** El suelo nunca debe estar descubierto, expuesto al impacto de la lluvia, viento y otras condiciones. El suelo desnudo es el comienzo de un espiral de situaciones negativas que conllevan a su máximo estado de degradación que es la erosión.
2. **Evitar las labores agrícolas (paso de maquinaria) cuando el suelo está en estado “plástico”,** es decir, cuando tiene una humedad que permite moldearlo con la mano. Idealmente las labores deben realizarse en suelo “friable”, es decir, cuando el suelo se desmenuza fácilmente bajo una presión ligera a moderada de los dedos.
3. **Utilizar en lo posible neumáticos que permitan aminorar la carga sobre el suelo,** es decir, neumáticos anchos, en que se equilibre la presión con el ancho del neumático.
4. **Minimizar las pasadas de maquinaria,** y utilizar algún parámetro para justificarlas (como densidad aparente del suelo o sellado superficial del mismo) que permita verificar si se cumplió el objetivo.
5. **Ajustar la carga animal** en función de la capacidad de soporte del suelo. Esto debe considerar la naturaleza del suelo y la condición hídrica del mismo (cantidad y distribución de la precipitación).
6. **Evitar la labranza de inversión,** ya sea parcial (arado de disco) o total (arado de vertedera), ya que ésta altera la estructura y continuidad del sistema poroso del suelo, lo que conlleva a la pérdida de porosidad en el tiempo. Si bien en el momento en que se realiza este tipo de labranza, se produce un efecto de “soltar el suelo”, en el largo plazo conlleva a la compactación superficial e incluso subsuperficial (“pie de arado”).
7. **Preferir el uso de labranza o rotura vertical del suelo** (cincel), en un estado de humedad que tienda a estar seco (no completamente), para generar grietas verticales, que favorecen la formación natural de estructura.

Tome en cuenta que la mayoría de los suelos de origen volcánico son naturalmente menos densos que otros tipos de suelos, por lo que, en muchos casos, no se justifica una labranza excesiva. Se debe evitar la “receta” de otros tipos de suelo, principalmente los de tipo no volcánico, cuyo comportamiento físico es totalmente diferente.

8. **Incorporar en la rotación cultivos con sistemas de raíces diferentes.** Por ejemplo, sistemas de raíces gruesas, o que profundicen y/o que exploren horizontalmente. Esto favorece la formación de poros de diferentes diámetros y a distintas profundidades, lo que permite “soltar” el suelo naturalmente.
9. **Utilizar prácticas de manejo que mejoren la estructura del suelo,** como la incorporación de materiales orgánicos, **o que mejoren su actividad biológica,** como la incorporación de rastrojos o mantenerlos en superficie, el uso de abonos verdes⁵ u otro.
10. **Utilizar manejos de conservación,** como cero o mínima labranza, con manejo de rastrojos. Esto en el tiempo, aumenta el contenido de materia orgánica y mejora la estructura del suelo (Figura 8).



Figura 8. Fotografía del suelo “Los Ulmos” con manejo de conservación, cero labranza y manejo de rastrojo, versus el mismo suelo manejado con labranza tradicional. La línea punteada amarilla muestra el horizonte enriquecido con materia orgánica y nutrientes generado en más de 20 años del manejo (Fotografías S. Valle).

⁵ Un abono verde es un cultivo que se establece proteger y recuperar el suelo, con su posterior incorporación.

Dado lo anterior, se recomienda lo siguiente:

Niveles de gestión	Acciones asociadas
Básico	Manejo del pastoreo con ajuste de la carga animal instantánea, que varía con la época del año y los niveles de pluviometría.
Intermedio	Implementación de una o más de las siguientes medidas: → Uso periódico de enmiendas orgánicas, particularmente en praderas permanentes (*) → Establecimiento de cultivos suplementarios de inicio de rotación, particularmente con sistemas radicales pivotantes y con amplio desarrollo en profundidad (por ejemplo: lupino, chicoria, raps).
Avanzado	Uso de métodos de cero o mínima labranza.

(*) Se debe tener en cuenta que las enmiendas orgánicas son muy heterogéneas en su composición, por lo que el correcto cálculo para determinar el aporte de estas enmiendas debe considerar la composición del nutriente en específico (por ejemplo, contenido total de N, N orgánico e inorgánico), el contenido de humedad de la enmienda y la tasa de mineralización de la misma (Hirzel y Salazar, 2016).

Contaminación del suelo: ¿Cómo evitarla?

La contaminación se produce por la entrada al suelo de distintos elementos contaminantes (orgánicos e inorgánicos). En el marco de los predios lecheros, las entradas riesgo de contaminación más comunes son:

- La aplicación de fertilizantes en dosis excesivas y/o con componentes que pueden causar contaminación (por ejemplo, cadmio en la formulación de fosfato monocálcico).
- La aplicación excesiva de purines.
- La eliminación en el suelo de residuos de la mantención de maquinaria (por ejemplo: aceite).
- La eliminación directa de agroquímicos al suelo ya sea por calibración, limpieza u otra acción con la maquinaria e implementos de aplicación de agroquímicos.

Se recomienda entonces, para un nivel de gestión intermedio:

Nivel	Acciones asociadas
Intermedio	Utilizar equipos de aplicación de agroquímicos limpios y calibrados.

Adicionalmente, se recomienda:

- **Conservar franjas con vegetación nativa entre potreros**, como por ejemplo arrayán y patagua, que actúan como amortiguadores frente a la descarga de contaminantes (Huertas et al., 2016) en suelos de origen volcánico.

Degradación del suelo: ¿Cómo prevenir y mitigar suelos degradados?

La degradación de los suelos considera un conjunto de procesos, acelerados por la acción del ser humano, que conducen a perder su funcionalidad ecosistémica. La degradación puede ser:

- **Física**, con procesos como la compactación, sellamiento, escurrimiento superficial, erosión, anegamiento.
- **Química**, con procesos como la salinización, alcalinización, acidificación, contaminación y toxicidad de elementos.
- **Biológica**, con procesos como la pérdida de materia orgánica y de biodiversidad.

En esta línea, se recomienda:

Nivel de gestión	Acciones asociadas
Intermedio	Se identifican áreas con suelos degradados presentes en el predio y se implementa una o más medidas para promover su recuperación. Por ejemplo: no se cultivan ni pastorean, se establece cobertura vegetal permanente, se incorporan rastrojos de cultivos anuales, se establecen cultivos que capturan nitratos en suelos con historial de fertilización intensa (como parte de la rotación, se puede citar mostaza blanca, rábano, cereal invernal, ballica italiana (Constantin et al., 2010)), entre otros.
Intermedio	En el predio se toman medidas para prevenir la erosión del suelo (por ejemplo: uso de cultivos de cobertura, establecimiento de barreras cortavientos con especies vegetales, plantación de árboles en zonas con pendiente, etc.) (Figura 9).

a) Uso de barrera de árboles cortavientos



b) Vegetación nativa en pendientes



Figura 9. Fotografías de: a) Uso de barrera de árboles cortavientos y b) Vegetación nativa en pendientes (Fotografías S. Valle).

Bibliografía de referencia

04.

Bibliografía de referencia

Bernier V., Rene (Ed.). 1999. Curso de Capacitación para Operadores del Programa de Recuperación de Suelos Degradados INDAP, X región [en línea]. Osorno: INIA. Serie Actas - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 2. Disponible.

Constantin J, Mary B, Laurent F, Aubrion G, Fontaine A, Kerveillant P, Beaudoin N. 2010. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 135: 268-278.

Estándar de Sustentabilidad para Predios Lecheros. Chile Origen Consciente. 63p.

Hillel D; Rosenzweig C; Powlson D, Scow K, Singer M y Sparks D (Editores). 2005. *ENCYCLOPEDIA OF SOILS IN THE ENVIRONMENT FOUR-VOLUME SET*. Alterra Wageningen UR, Wageningen, The Netherlands. Elsevier Ltd. All Rights Reserved. Edinburgh, UK.

Hirzel J, Salazar F. 2016. Guía de manejo y buenas prácticas de aplicación de enmiendas orgánicas en agricultura. Boletín INIA N°325.

Luzio W. 2010. Suelos de Chile. 360 p.

Luzio W, Casanova M. 2020. Avances en el Conocimiento de los Suelos de Chile (2006, Edición Digital 2020).

Pinochet D. 1996. Estrategias de Fertilización Fosforada en Praderas. En: UACH. Latrille L. (Ed.). *Producción animal*. 219 p.

Pinochet D. 2007. Suelo-Pradera. A. Fertilidad del suelo para la producción de Praderas. En: Hervé M. (Ed.). 2007. *Producción ovina: desde el suelo a la gestión*. Manuales FIA de Apoyo a la Formación de Recursos Humanos para la Innovación Agraria. ISBN No 978-956-7874-78-1.

Pinochet D. 2011. Guía para la fertilización de cultivos brásicas forrajeras. En: Hepp K., Christian (Ed.) 2011. *Cultivo y utilización de brassicas forrajeras en la Patagonia Húmeda (Aysén)* [en línea]. Coyhaique, Chile: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 228. Disponible

Rodríguez J, Pinochet D, Matus F. 2001. *Fertilización de los cultivos*. Editorial LOM. Santiago, Chile. 117p.

Sadzawka A, Carrasco MA, Grez R, Mora M, Flores H, Neaman A. 2006. *Métodos de análisis*

recomendados para suelos de Chile. Revisión 2006. Serie Actas INIA N°34. 150 p.

USDA-NRCS. 2014. Claves para la Taxonomía de Suelos. Soil Survey Staff. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS). Décima segunda Edición. 410 p.

Zúñiga F, Dec D, Valle S, Thiers O, Paulino L, Martínez O, Seguel O, Casanova M, Pino M, Horn R, Dörner J. 2019. The waterlogged volcanic ash soils of southern Chile. A review of the “Ñadi” soils. *Catena* 173, 99-113.



Anexo

05.

Anexo 1.

¿Cómo son los suelos de los predios lecheros del país?

Para comprender las características de los suelos de los predios lecheros, es necesario conocer cuáles son las características más relevantes y definitorias de la clasificación de los suelos: los órdenes (clasificación (USDA-NRCS, 2014):

Cuadro A1. Características más relevantes de los órdenes de suelos.

Orden	Características
Gelisol	Suelos con materiales géllicos o permafrost dentro de 1 m de profundidad (con rasgos de crioturación)
Histosol	Suelos con materiales fíbricos, hémicos o sápricos en > 40 cm superficiales
Spodosol (Espodosol)	Suelos con presencia de un horizonte espódico de más de 10 cm de espesor
Andisol	Suelos con propiedades ándicas en más del 60% de los 0.6 m superficiales (alta retención de P $\geq$ 85%, baja densidad aparente $\leq$ 0.9 g/cm ³ , alto contenido de C orgánico $\leq$ 25%, en materiales ándicos)
Oxisol	Suelos con un horizonte óxico dentro de los 1.5 m de la superficie ó con > 40% arcillas en los primeros 0.18 m y un horizonte kándico
Vertisol	Suelos que contienen > 30% arcillas en todos los horizontes y grietas activas (con presencia arcillas expandibles)
Aridisol	Suelos con algún horizonte diagnóstico subsuperficial y un régimen de humedad arídico (en zonas áridas frías o cálidas)
Ultisol	Suelos con presencia de un horizonte argílico o kándico (de acumulación de arcillas) y con una saturación de bases (a pH 8.2) < 35%
Mollisol	Suelos con un epipedón mólico y una saturación de bases (a pH 7.0) $\geq$ 50% en todo el perfil
Alfisol	Otros suelos con un horizonte argílico, kándico o nátrico
Inceptisol	Otros suelos con algo de desarrollo de horizontes (epipedón úmbrico, horizonte cámbico)
Entisol	Otros suelos con escaso desarrollo (que no cumple los criterios anteriores)

Cada uno de estos grupos poseen características comunes, pero difieren en algunas específicas y relevantes, que van a determinar los manejos a utilizar:

1. **Profundidad efectiva**, en que las raíces pueden explorar libremente
2. **Estructura**, que a su vez determina la cantidad y funcionalidad de los poros del suelo, extremadamente relevante para el almacenaje y conducción de agua y aire;
3. **Materia orgánica** (carbono orgánico)
4. **Textura**, que da cuenta de la cantidad de arena, limo y arcilla que posee un suelo (en términos porcentuales o relativos).

Otras propiedades como la acidez y disponibilidad de nutrientes van a estar determinados por la cantidad y tipo de coloides (arcillas y coloides orgánicos) (Figura A1).

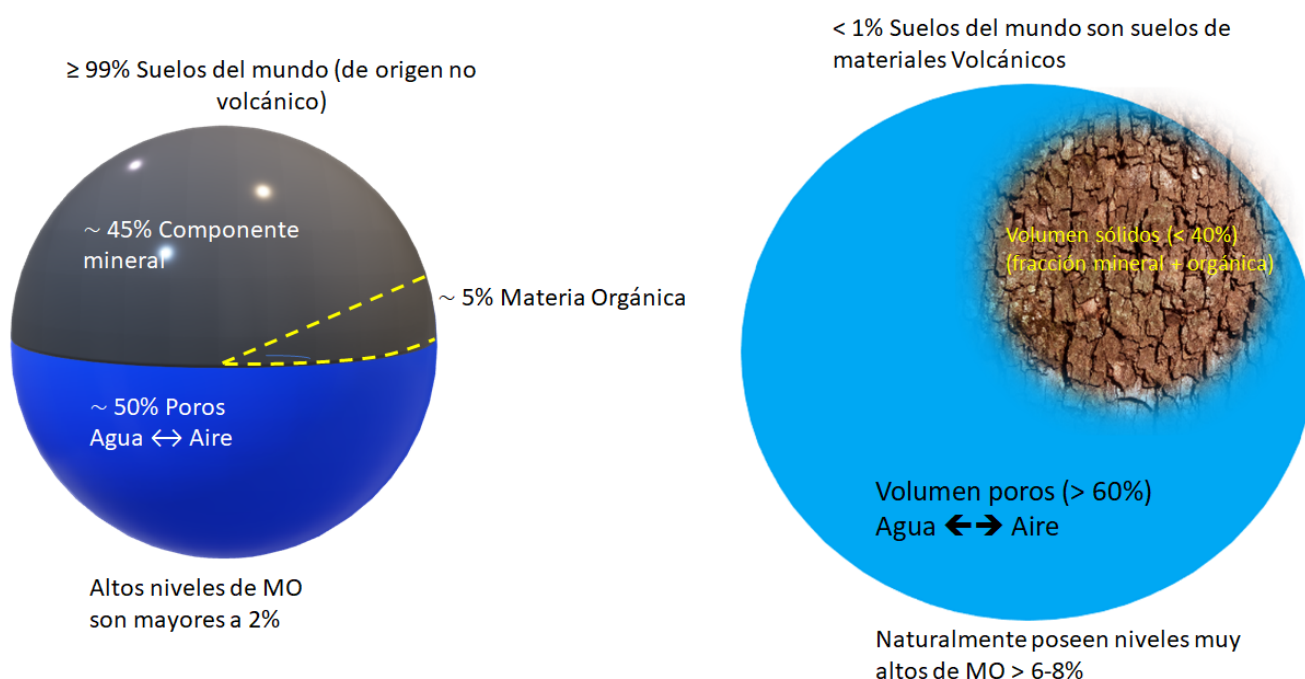


Figura A1. Distribución esquemática del volumen de los componentes del suelo, fase sólida, líquida y gaseosa, según el tipo de suelos (S. Valle).

Los predios lecheros se distribuyen en nuestro país en 3 grandes zonas:

- **Zona Central** (región metropolitana y VI región)
- **Zona Centro-sur** (VII, XVI y VIII región)
- **Zona Sur** (IX, X, XI región)

→ Suelos de la Zona Central

Los suelos de la Zona Centro y Centro Sur del país están muy influenciados por su ubicación dentro del paisaje, diferenciándose fuertemente entre aquellos que se sitúan cercanos a la Cordillera de los Andes, Depresión Intermedia o Cordillera de la Costa.

En general, los suelos descritos con un mayor nivel de detalle son los ubicados en la depresión intermedia. Estos suelos están definidos dentro de la zona climática mediterránea árida (Luzio 2010) (con bajas precipitaciones), por lo cual sus características responden a la evolución de sus propiedades bajo condiciones de escaso lavado o lixiviación natural y de intenso secado del perfil (Figura A2).

Los suelos del área precordillerana ocupan posiciones de cerros y sus pies o *piedmonts*, planos con suelo de origen asociado a cursos de agua (origen aluvial) y movimiento de material a lo largo de laderas (origen coluvial), y terrazas aluviales de ríos cordilleranos. Estos suelos son profundos a moderadamente profundos, en muchos casos con variado grado de desarrollo de horizontes superficiales mólicos (Mollisol) y en casos de menor desarrollo Inceptisol. Sus clases texturales son variadas, de francas a francas arcillosas, francas limosas o arenosas. Sus Clases de Capacidades de Uso (CCU) pueden estar entre I, II y III y en los casos de mayor pendiente VI.

En la Depresión Intermedia, los suelos se han desarrollado en terrazas aluviales, piedmont, cuencas lacustres, sobre toba volcánica y sedimentos fluvioglaciales, son extremadamente variables en clases texturales (arenosas a arcillosas), profundidad, CCU I a VI, drenaje y otras propiedades, lo anterior, por la accidentada topografía, cambios fuertes de posiciones geomorfológicas y variada composición del material parental. Entre los órdenes de suelo más comunes están los Alfisols, Mollisols, Inceptisols y Vertisols.

Los suelos de la Cordillera de la Costa se pueden asociar a posiciones de cerros y de terrazas costeras. Los suelos que se ubican en altas pendientes son los que han sufrido una gran intensidad de los procesos erosivos, en general son suelos de granulometría fina (Alfisols o comúnmente llamadas graníticos) a media (Inceptisols), con CCU que van de IV a VII según la pendiente. En posiciones de terrazas costeras, los suelos pueden presentar problemas de drenaje, con granulometrías más gruesas o mezclas con materiales más finos de diferentes orígenes, siendo los órdenes más comunes Inceptisol, Alfisol y Mollisol.

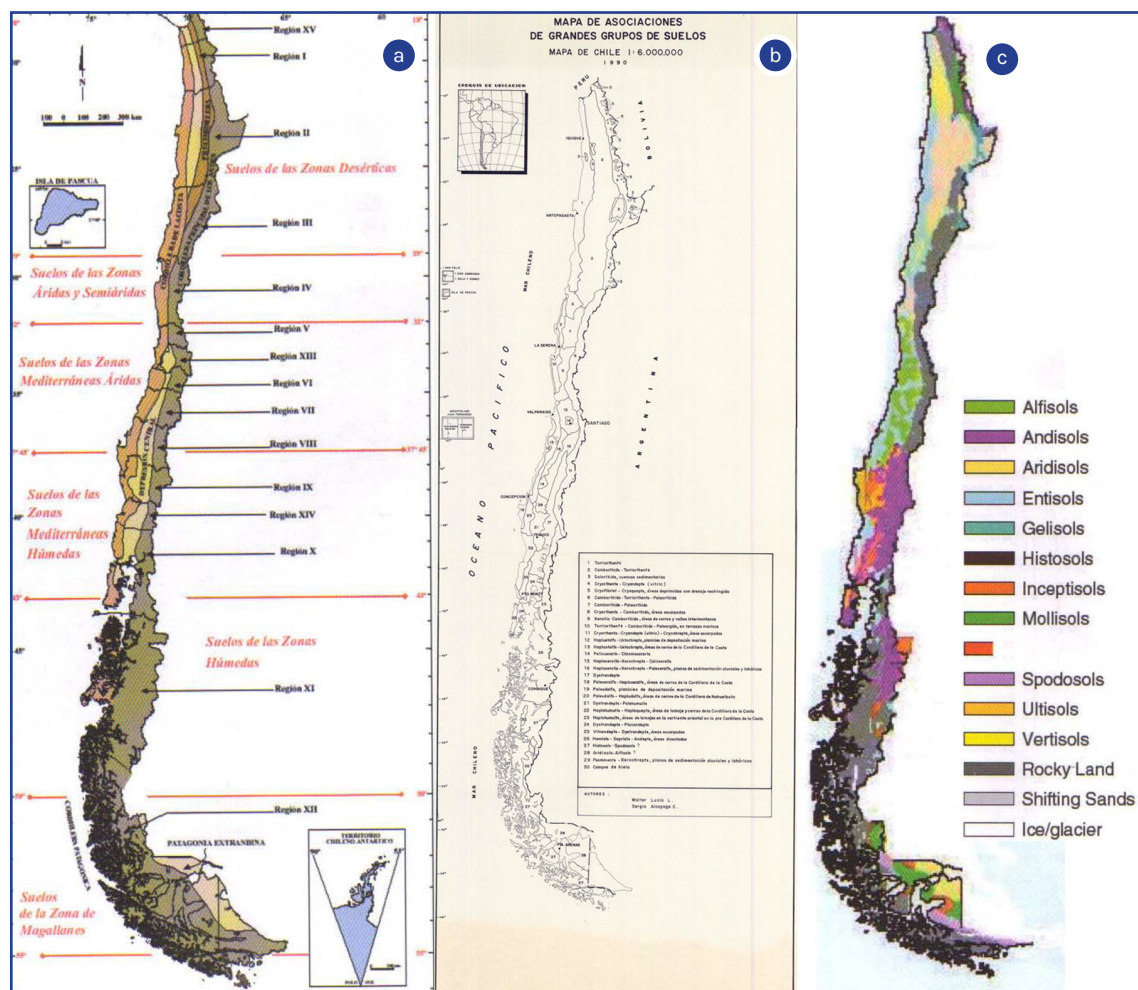


Figura A2. Mapas de Suelos de Chile, según: a) Zonas climáticas; b) Grupos de suelos; c) Órdenes de suelos (Luzio, 2010).

→ Suelos de la Zona Centro-Sur

Los suelos de la Precordillera andina ya están marcados por la presencia de materiales volcánicos, esta zona son suelos moderadamente profundos de texturas más bien gruesas (francas arenosas).

Los suelos de la depresión intermedia se han desarrollado en posiciones de terrazas aluviales (Mollisols e Inceptisols), sobre tobas volcánicas (Vertisols, Inceptisols, Alfisols y Mollisols), sedimentos fluvio-glaciales (Inceptisols y Alfisols) y a partir de materiales volcánicos (que en algunos casos llegan a ser Andisols, con altos valores de carbono orgánico-CO) (Luzio, 2010).

Como en la zona anterior, en los suelos de la Cordillera de la Costa se presentan diferencias entre aquellos que están en posiciones de mayor pendiente o Cerros (Alfisols, Inceptisols), de granulometrías de francas a finas, algunos de ellos con ciertas características ándicas, con CCU que varían entre IV a VII. Y, aquellos que se ubican en terrazas costeras, con granulometrías medias a gruesas. Según lo descrito

por Luzio (2010), no existen antecedentes suficientes para darles una sistematización en términos de clasificación de suelos, pero estarían dentro de los órdenes Inceptisol y Mollisol.

→ Suelos de la Zona Sur

La zona Sur de nuestro país está dominada por suelos derivados de **materiales volcánicos** que, considerando su ubicación, vegetación nativa inicial y clima local, han evolucionado en tipos de suelos muy diferentes.

Como muestra la Figura A3, los principales tipos de suelos derivados de materiales volcánicos en la zona Sur son:

- Inceptisoles
- Andisoles (“Trumaos y Ñadis”)
- Ultisoles (“Pardo o Rojo arcillosos”)

Otros suelos comunes en la zona, localizados hacia la Cordillera de la Costa, son los Arcillosos (Ultisoles) derivados de esquisto o roca metamórfica e Inceptisoles (jóvenes y que pueden ser delgados).

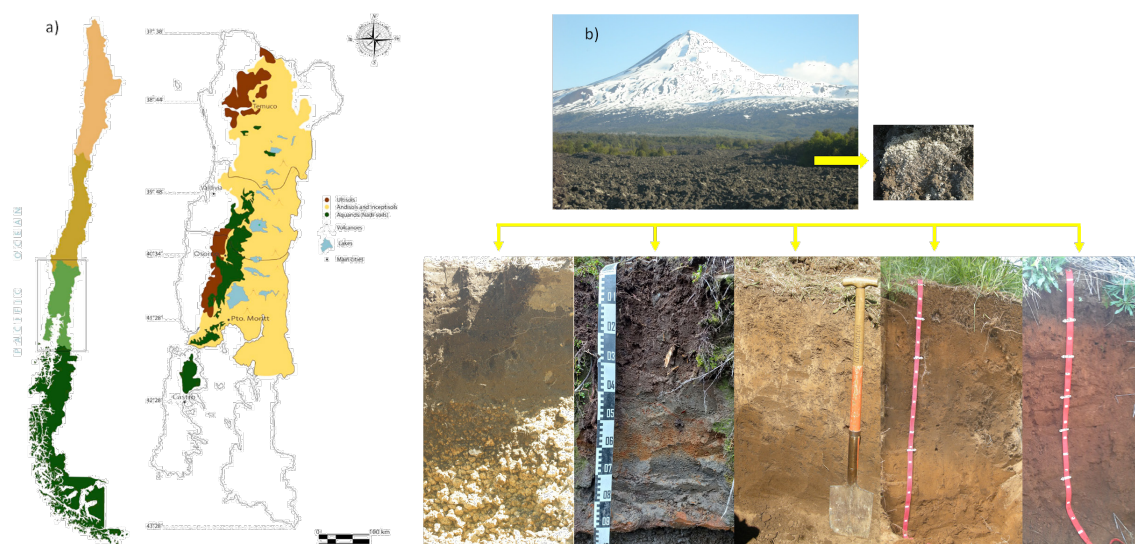


Figura A3. a) Distribución de suelos volcánicos del sur de Chile (Zuñiga et al., 2019). b) Fotografías de diferentes suelos volcánicos del Sur de Chile (Fotografías S. Valle).

Anexo 2.

Valores de referencia para interpretar análisis de suelo

A continuación, se presentan algunos valores de referencia de la literatura en Chile, para la interpretación de resultados de análisis de suelos (Bernier, 1999^a; Pinochet 2007^b):

Cuadro A2. Valores de referencia de indicadores químicos.

Indicador químico	Rango	Categoría	Metodología (Sadzawka et al., 2006)
pH H ₂ O ^a	≤ 4.5 4.6 - 5.0 5.1 - 5.5 5.6 - 6.0 6.1 - 6.5	Extremadamente ácido Muy fuertemente ácido Fuertemente ácido Moderadamente ácido Débilmente ácido	pH H ₂ O en relación suelo:solución 1:2.5
P-Olsen (mg/kg) ^a	≤ 5.0 5.1 - 10.0 10.1 - 20.0 20.1 - 30.0 ≥ 30.1	Muy Bajo Bajo Medio Adecuado Alto	Extracción con Bicarbonato de Sodio, 1M, pH 8.5 y determinación colorimétrica del azul de Molibdeno.
Ca intercambiable (cmol ₊ /kg) ^a	≤ 2.0 2.0 - 5.00 5.01 - 9.00 9.01 -15.00 ≥ 15.01	Muy Bajo Bajo Medio Adecuado Alto	Extracción con Acetato de Amonio, 1M, a pH 7.0. Determinación por Espectrofotometría de absorción y emisión atómica
Mg intercambiable (cmol ₊ /kg) ^a	≤ 0.25 0.26 - 0.50 0.51 - 1.00 1.00 -2.00 ≥ 2.01	Muy Bajo Bajo Medio Adecuado Alto	
K intercambiable (cmol ₊ /kg) ^a	≤ 0.12 0.13 - 0.25 0.26 - 0.51 0.52 - 0.64 ≥ 0.65	Muy Bajo Bajo Medio Adecuado Alto	
Na intercambiable (cmol ₊ /kg) ^a	≤ 0.15 0.16 - 0.20 0.21 - 0.30 0.31 - 0.40 0.41 - 0.51 ≥ 0.51	Muy Bajo Bajo Medio Adecuado Alto Muy alto	

Indicador químico	Rango	Categoría	Metodología (Sadzawka et al., 2006)
Suma de bases de intercambio (cmol ₊ /kg) ^a (Ca + Mg + K + Na)	≤ 3.00 3.01 – 6.00 6.01 – 11.00 11.01 – 15.00 ≥ 15.01	Muy Bajo Bajo Medio Adecuado Alto	Suma de los contenidos de Ca, Mg, K y Na intercambiables
Al intercambiable (cmol ₊ /kg) ^a	≤ 0.10 0.11 – 0.25 0.25 – 0.50 0.51 – 0.80 ≥ 0.81	Muy Bajo Bajo Medio Adecuado Alto	Extracción con Cloruro de Potasio, 1.0 M. Determinación por Espectrofotometría de absorción atómica
Saturación de Al (%) ^a	≤ 1.09 1.10 – 3.09 3.10 – 6.09 6.10 – 12.09 ≥ 12.10	Muy Bajo Bajo Medio Adecuado Alto	Sat.Al = $\left(\frac{\text{Al intercambiable}}{\text{CICE}}\right) * 100$ CICE = Capacidad de intercambio catiónica efectiva (Suma de Bases + Aluminio de intercambio)
Fe (mg/kg) ^b	< 2.5 2.5 – 4.5 > 4.5	Deficiente Marginal Suficiente	Extracción con DTPA, pH 7.3. Determinación por Espectrofotometría de absorción y emisión atómica.
Mn (mg/kg) ^b	< 0.7 0.7 – 1.0 > 1.0	Deficiente Marginal Suficiente	
Cu (mg/kg) ^b	< 0.5 0.5 – 0.8 > 0.8	Deficiente Marginal Suficiente	
Zn (mg/kg) ^b	< 0.5 0.5 – 1.0 > 1.0	Deficiente Marginal Suficiente	
B (mg/kg) ^b	< 0.5 0.5 – 1.0 > 1.0	Deficiente Marginal Suficiente	Extracción con Cloruro de Calcio, 0.01M. Determinación por colorimetría de Azometina- H

En el siguiente cuadro se muestran algunos niveles críticos de P-Olsen y K intercambiable, dentro de los primeros 20 cm de profundidad, para alcanzar diferentes niveles de productividad en praderas (Pinochet, 2007).

Cuadro A3. Valores críticos de P-Olsen y K intercambiable, para sistemas de praderas.

Productividad Pradera (kg MS/ha)	Niveles necesarios en el suelo (0-20 cm)			
	P-Olsen (mg/kg)	K intercambiable (mg/kg)	Mg intercambiable (cmol+/kg)	S disponible (mg/kg)
12000	12	120	0.25	8
10000	10	100	0.20	7
8000	8	80	0.15	6
6000	6	60	0.10	5

Anexo 3.

Cálculo de enmienda

Ecuación para estimar la CTpH de un suelo (Pinochet 2011):

$$CTpH = 8.4 * (1 - \exp^{(-0.09 * (MOS - 0.9))}) * Da * dm$$

Donde,

MOS= materia orgánica del suelo (%);

Da= densidad aparente (g/cm³);

dm= profundidad en dm (se consideran los primeros 20 cm, por lo que este valor es 2).

Ejemplo: El valor de pH del suelo es 5,4 (pH tomado en H₂O; 1:2,5) y se desea llegar a un nivel de pH de 5,9. ¿Cuántas toneladas de carbonato de calcio (cal, CaCO₃) se requieren incorporar en un suelo granítico de la VI región versus un suelo trumao de la X Región?

→ Información de entrada

- pH a alcanzar = 5,9
- pH inicial = 5,4
- Suelo granítico, VI región → CTpH = 0,3 ton de CaCO₃/ha/0,1 pH
- Suelo trumao, X región → CTpH = 1,0 ton CaCO₃/ha/0,1 pH

Entonces:

$$\Delta pH = 5,9 - 5,4 = 0,5 \text{ pH}$$

En suelo granítico:

$$0,3 \text{ ton de CaCO}_3/\text{ha} \rightarrow 0,1 \text{ pH}$$

$$X \text{ ton CaCO}_3/\text{ha} \rightarrow 0,5 \text{ pH}$$

$$X = (0,3 \times 0,5)/0,1 = 1,5 \text{ ton CaCO}_3/\text{ha}$$

En suelo trumao:

$$1 \text{ ton de CaCO}_3/\text{ha} \rightarrow 0,1 \text{ pH}$$

$$X \text{ ton CaCO}_3/\text{ha} \rightarrow 0,5 \text{ pH}$$

$$X = (1 \times 0,5)/0,1 = 5 \text{ ton CaCO}_3/\text{ha}$$

- El resultado anterior es el **valor neto** de kg (o ton) de CaCO_3 equivalente /ha necesarias para subir el pH.
- Para el cálculo final, se debe considerar el **Valor Neutralizante del producto encalante** que se utiliza (medida de eficiencia de la cal), que se asocia a su pureza y tamaño de partícula (o “mesh”).
- Por lo tanto, la cantidad total a aplicar dependerá de las características particulares del producto comercial. Independiente cuál sea este producto, el cálculo final es:

$$\text{ton de producto a aplicar /ha} = \frac{\text{ton netas de CaCO}_3 \text{ equivalente/ha}}{\text{Eficiencia del producto (valor entre 0 y 1)}}$$

Supongamos que utilizamos un producto encalante con un 90% de eficiencia (0,9), entonces el requerimiento final será:

Suelo granítico:

1,5 / 0,9 = 1,67 ton producto/ha

Suelo trumao:

5 / 0,9 = 5,56 ton producto/ha

Anexo 4.

Ejemplos de cálculo de dosis de fertilizante

Ejemplo de dosis de corrección momentánea de P (para la temporada) para cultivos

Por ejemplo, se quiere saber la dosis de corrección a aplicar para un maíz de ensilaje que alcanza 730 qqm/ha de materia verde (30% MS).

Datos:

- IC = 0,9; HC = 0,7; RIP=0,16 (expresado en kg nutriente por cada 100 kg de producto)
- Factor de absorción del cultivo = 0,667 (ppm Olsen/kg P absorbido)
- Nivel inicial del suelo (P-Olsen) = 9 mg/kg
- Eficiencia de fertilización = 0,085. Suelo volcánico (>1200 mg/kg de Al extractable), fertilización localizada

Entonces, considerando que:

$$Dosis P = \frac{(\text{Suministro requerido} - \text{Suministro inicial})}{\text{Eficiencia de fertilización de corrección}} \times 2,3$$

Donde,

Suministro requerido - Suministro inicial = Contenido P-Olsen a alcanzar - Contenido P-Olsen inicial

→ **Se debe estimar el contenido de P-Olsen a alcanzar, para lo cual se debe estimar la demanda de P:**

$$\text{Demanda P} = \text{Rendimiento esperado} \times \left(\frac{1 - HC}{IC} \right) \times RIP$$

$$\text{Demanda} = 730 \frac{(1 - 0,7)}{0,9} \times 0,16 = 38,9 \text{ kg P/ha}$$

→ **Luego, el contenido P-Olsen a alcanzar:**

Contenido P-Olsen a alcanzar = Demanda de P x Factor de Absorción de P

Contenido P-Olsen a alcanzar = 38,9 kg P/ha x 0,667 = 25,9 mg/kg

→ **Finalmente, es posible estimar la dosis de corrección:**

$$\text{Dosis} = \left(\frac{25,9 - 9}{0,085} \right) \times 2,3 = 457 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{ha}$$

2. Ejemplo cálculo de dosis de fertilización para praderas

a) Dosis de corrección a 4 años

→ **Información de entrada:**

- Productividad de MS a alcanzar = 12 ton MS/ha
- P-Olsen inicial = 6ppm
- Al extractable = 1250 ppm
- Da = 0,65 g/cm³
- Profundidad = 0-20 cm

→ **Considerando que:**

$$\text{Dosis corrección P} = \frac{\Delta P - \text{Olsen} \times FCO \times 2,3}{0,4 \times t^{0,83}}$$

→ **Se determina:**

- $\Delta P = 12 - 6 = 6 \text{ ppm}$
- $CP = 1 - \left(\frac{0,942 \times \text{Al extractable}}{59,6 + \text{Al extractable}} \right) = 1 - \left(\frac{0,941 \times 1250}{59,6 + 1250} \right) = 0,101 \text{ ppm/ppm}$
- $FCO = \frac{Da \times \text{profundidad}}{CP} = \frac{0,65 \times 2}{0,101} = 12,87 \text{ P/ppm P-Olsen}$

→ **Luego, la dosis de corrección:**

$$\text{Dosis corrección P} = \frac{6 \times 12,87 \times 2,3}{0,4 \times 4^{0,83}} = 141 \text{ (kg P}_2\text{O}_5)/\text{ha}$$

b) Dosis de mantención

→ Información de entrada:

- PU = Porcentaje de utilización de la pradera = 80% = 0,8
- Extracción para conservación = 2 ton/ha
- Extracción en pastoreo = 10 ton/ha
- Vacas lecheras, carga animal = 1,2 UA/ha
- Terreno plano, AL = 0,9

→ Considerando que:

$$\text{Dosis mantención de P} = (\text{Exportación de P en pastoreo (EPp)} + \text{Exportación de P en forraje conservado (EPc)}) \times 2,3$$

(kg P₂O₅/ha)
(kg P/ha)
(kg P/ha)

→ Entonces, se estima la exportación por pastoreo:

$$EPp \text{ (kg P/ha)} = CA \times PU \times AL \times (8,25 + 1,2 CA)$$

$$EPp = 1,2 \times 0,8 \times 0,9 \times (8,25 + 1,2 \times 1,2) = 8,37 \text{ kg P/ha}$$

→ Luego, la exportación en forraje conservado:

$$EPc \text{ (kg P/ha)} = MS \times [1,8 (1 + 2e^{-0,21 MS})]$$

$$EPc = 2 \times [1,8 (1 + 2e^{-0,21 \times 2})] = 8,33 \text{ kg P/ha}$$

→ Por lo tanto, la dosis de mantención es:

$$\text{Dosis mantención de P} = (8,37 + 8,33) \times 2,3 = 38,4 \text{ kg P}_{2}\text{O}_{5}/\text{ha}$$

c) Dosis de fertilización

$$\text{Dosis fertilización P} = \text{Dosis de Corrección} + \text{Dosis de Mantención}$$

$$\text{Dosis fertilización de P} = 141 + 38 = 179 \text{ kg P}_{2}\text{O}_{5}/\text{ha}$$

Cuadro A4. Factores de Eficiencia de fertilización de corrección momentánea de la disponibilidad de nutrientes (P, K y S) en distintos grupos de suelos chilenos (Pinochet 2011).

Grupos de Suelos	Factores de eficiencia de fertilización de corrección momentánea		
	P	K	S
	Incorporado - Localizado	Incorporado - Localizado	Incorporado - Localizado
	mg kg ⁻¹ / kg ha ⁻¹		
Suelos con < 150 mg kg ⁻¹ de Al extractable (Al _a)			
Arcillas 1:1 (caoliníticas), derivados de granito y metamórficos			
< 15% arcilla	0.250 - 0.275	0.335 - 0.375	0.400 -0.440
15 - 30% arcilla	0.225 - 0.250	0.285 - 0.315	0.333 - 0.365
> 30% arcilla	0.200 - 0.220	0.265 - 0.290	0.333 - 0.365
Suelos con < 150 mg kg ⁻¹ de Al extractable			
Arcillas 2:1 (esmectiras y micas), derivados de andesita, basalto y micaesquistos			
< 15% arcilla	0.250 - 0.275	0.250 - 0.275	0.400 - 0.440
15 - 30% arcilla	0.200 - 0.200	0.225 - 0.250	0.400 - 0.440
> 30% arcilla	0.165 - 0.180	0.200 - 0.220	0.400 - 0.440
Suelos con < 150 mg kg ⁻¹ de Al extractable			
Orgánicos			
> 20% materia orgánica	0.280 - 0.310	0.750 - 0.825	0.400 - 0.440
Suelos con >150 mg kg ⁻¹ de Al extractable			
Arcillas de corto rango ordenamiento (alofán, imogolita, haloistas), suelos derivados de materiales volcánicos			
150 - 400 mg kg ⁻¹ de Al _a	0.125 - 0.140	0.400 - 0.440	0.285 - 0.315
400 - 1200 mg kg ⁻¹ de Al _a	0.100 - 0.110	0.555 - 0.610	0.250 - 0.275
> 1200 mg kg ⁻¹ de Al _a	0.075 - 0.085	0.750 - 0.825	0.200 - 0.220

(Al_a) Aluminio extraído con Acetato de Amonio, pH 4.8, 1M

