

Uso Eficiente de Fertilizantes en Pasturas



Serie técnica
Boletín técnico no.98

Uso Eficiente de Fertilizantes en Pasturas



Danilo Pezo, PhD
Francisco J. García, MSc.
Consultores, Grupo Ganadería y Manejo del
Medio Ambiente, CATIE, Turrialba, Costa Rica

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)
Turrialba, Costa Rica, 2018

Este manual ha sido posible gracias al apoyo del pueblo de los Estados Unidos de América a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). Los puntos de vista/opiniones de este documento son responsabilidad de los autores contratados por el CATIE. Sin embargo, no reflejan necesariamente el punto de vista de esta institución, ni de USAID o el Gobierno de los Estados Unidos.

© Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), 2018

ISBN 978-9977-57-57-696-1

631.8

P521 Pezo, Danilo A.

Uso eficiente de fertilizantes en pasturas / Danilo A. Pezo y Francisco J. García. – 1ª ed. – Turrialba, C.R : CATIE, 2018.

56 p. : il. – (Serie técnica. Boletín técnico / CATIE ; no.98)

ISBN 978-9977-57-57-696-1

1.! Pastizales – Fertilizantes – Costa Rica 2. Fertilizantes – Mejora de pastizales – Costa Rica I. Orozco Vílchez, Lorena, ed. II. CATIE III. Título IV. Serie.

Créditos

Edición: Lorena Orozco

Diseño: Rocío Jiménez Salas

Revisores:

Francisco Arguedas – Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en
Tecnología Agropecuaria de Costa Rica

Cristóbal Villanueva – Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

Fotografías:

Danilo Pezo, Jorge Cruz, Andrés Vega, Francisco García Cruz, Julio Alegre y Cristóbal Villanueva

Contenido

Prefacio	5
1. Introducción	7
2. Necesidades de nutrientes en las pasturas	8
3. Fuentes fertilizantes	17
4. El uso de fertilizantes	20
5. El encalado	31
6. Fijación y transferencia de nitrógeno en asociaciones gramíneas/leguminosas	38
7. El reciclaje de nutrientes en sistemas de pastoreo: Una guía para definir las necesidades de fertilización	40
8. Eficiencia del uso del fertilizante	43
9. El caso de la fertilización de precisión	49
10. Consideraciones finales	51
11. Referencias	52
12. Anexos	54



Prefacio

En Costa Rica la actividad ganadera genera una serie de beneficios socioeconómicos para el país; según Acosta y Valdez (2012) la actividad aporta alrededor del 10% del PIB nacional. Además, contribuye con más de 200,000 empleos directos e indirectos a lo largo de la cadena de producción. Sin embargo, este sector es el responsable del 28,6% de las emisiones totales del país, cuyas principales fuentes son el metano entérico (62%) y el óxido nitroso (36%) (Chacón et ál. 2014).

El Ministerio de Agricultura y Ganadería, el Ministerio de Ambiente y Energía y socios estratégicos han establecido la Estrategia Nacional para la Ganadería Baja en Carbono vinculada con la política de Costa Rica Carbono Neutral 2021. La cual contempla un plan de acción para responder a las metas del sector ganadero a nivel productivo, socioeconómico y ambiental; asimismo, a los compromisos asumidos por el país en las convenciones internacionales de cambio climático (UNCCC), biodiversidad (CB), degradación de tierras (UNCCD) y a los objetivos de desarrollo sostenible. El país ha definido el NAMA¹ Ganadería como el mecanismo para la implementación del plan de acción de la Estrategia para la Ganadería Baja en Carbono.

Con base al avance mostrado por el país, la cooperación internacional ha mostrado interés en tomar al país como laboratorio para seguir consolidando la estrategia país en el desarrollo de una ganadería competitiva y con bajas emisiones y su posterior escalamiento en países con condiciones agroecológicas similares, principalmente aquellos de la región centroamericana y el Caribe. En ese sentido, la Agencia Internacional de Desarrollo de los Estados Unidos (siglas en Ingles USAID) por medio del departamento de Agricultura (USDA) aprobaron los fondos para el Proyecto Ganadería con bajas en emisiones en Costa Rica. Esto se logró bajo el programa EC LEADS² que ya había implementado la fase I en el periodo 2012-2015, en el cual se generó información sobre metodologías, métricas y recopilación de medidas para el desarrollo del sector ganadero de leche con bajas emisiones.

¹ Acciones de Mitigación Nacionalmente Apropriadas.

² Estrategia de Mejoramiento de Capacidades para el Desarrollo con Bajas Emisiones

El Proyecto Ganadería con bajas en emisiones en Costa Rica (EC LEDS II), tuvo como propósito capitalizar los logros de la primera fase del programa EC-LEDS y apoyar los esfuerzos costarricenses para la promoción de políticas de desarrollo sobre la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector ganadero. Los objetivos de esta segunda fase fueron: fortalecer el sistema de gobernanza para favorecer la implementación de las acciones del NAMA; mejorar la capacidad de las instituciones nacionales para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero del sector ganadero, de acuerdo con las políticas nacionales y obligaciones internacionales; fomentar y facilitar la inversión e implementación de acciones para el desarrollo de un sector ganadero eficiente (extensión y mecanismo financiero).

Como parte del tercer objetivo, fue contemplada la preparación de materiales de extensión para técnicos del sector público y privado como herramientas de apoyo en el proceso de capacitación y asistencia técnica para el desarrollo de una ganadería competitiva con bajas emisiones que fortalezca los medios de vida y la seguridad alimentaria de las familias involucradas a lo largo de la cadena de producción. Además, que contribuya con productos y servicios de alta calidad para los consumidores de los mercados nacionales e internacionales.

En el marco del proyecto fue elaborada una serie de manuales para técnicos en los temas siguientes:

- Potencial de los sistemas silvopastoriles en la mitigación al cambio climático y en la generación de múltiples beneficios en fincas ganaderas de Costa Rica.
- Los pastos mejorados: su rol, usos y contribuciones a los sistemas ganaderos frente al cambio climático.
- Establecimiento y manejo de sistemas intensivos de pastoreo racional.
- Uso eficiente de fertilizantes en pasturas
- Tecnologías relevantes para la gestión integral del estiércol en fincas ganaderas de Costa Rica.



Muhammad Ibrahim, PhD
Director General

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza



1. Introducción

La fertilización de las pasturas se considera una estrategia necesaria en la intensificación sostenible de los sistemas de producción animal por sus efectos en el incremento de la producción de biomasa forrajera en corto tiempo (Bernal 1984), y en el mantenimiento de la fertilidad del suelo en el mediano y largo plazo. La aplicación de esta práctica requiere de inversión, lo que va a tener un impacto sobre los costos de producción; sin embargo, si el programa de fertilización se basa en el máximo aprovechamiento de la fertilidad natural del suelo, en el conocimiento de las necesidades de los cultivos forrajeros y de los fertilizantes y en el manejo inteligente del reciclaje de nutrientes, el productor podrá lograr el aumento en la productividad de la finca, a un menor costo por unidad de producto animal y sin afectar negativamente el ambiente.

La fertilización de las pasturas suele ser una herramienta eficaz para mantener el suelo en un nivel de producción óptimo, reponiendo los nutrientes extraídos a través de los productos animales; sin embargo, para el buen uso de los fertilizantes y que los nutrientes aplicados a través de ellos sean absorbidos debidamente por la planta, debe haber un nivel adecuado de humedad en el suelo y se deben utilizar niveles de fertilización acordes con las demandas y la capacidad de absorción de las plantas.

En el presente manual se discuten los criterios a considerar para hacer un uso eficiente de los fertilizantes, partiendo del diagnóstico del potencial natural del suelo y sus limitantes, del conocimiento de las demandas de nutrientes que tienen los pastos como cultivos, del rol de los animales domésticos y la microfauna y flora del suelo en el retorno y descomposición de los nutrientes, así como de los factores ambientales y de manejo que inciden en la eficiencia de uso de los fertilizantes, de manera que todo esto contribuya a una producción animal económicamente eficiente, competitiva y sostenible, basada en el uso racional de los recursos de la finca.



2. Necesidades de nutrientes en las pasturas

La producción en cualquier sistema agrícola, como puede ser la producción animal basada en el uso de los forrajes, se centra en tres factores: i. Suelo, ii. Planta, y iii. Clima. La clave está en cómo se hace un manejo integral y racional de estos componentes en la toma de decisiones respecto a diferentes intervenciones, una de las cuales puede ser la fertilización de las pasturas.

En el caso del suelo, se deben definir qué áreas de la finca son aptas para la producción de forrajes, sean estos de uso directo bajo pastoreo o para la producción de pastos de corte, y cuáles áreas deberían excluirse del uso agrícola o ganadero considerando su topografía, condiciones de suelo, accesibilidad, etc. En aquellas áreas consideradas aptas para la producción, deben definirse las necesidades de enmiendas -si fuera el caso- y de fertilizantes para alcanzar los niveles de productividad que se consideren adecuados bajo la circunstancias en que se trabaja. En cuanto al cultivo, el productor ganadero debe decidir qué especies o variedades se adaptan a las condiciones edáficas y de clima prevalentes en su finca, pues se tiene información sobre la adaptación de muchas de las especies forrajeras a altas concentraciones de acidez y saturación de aluminio (Al) en el suelo, a la deficiencia de nutrientes como el fósforo y a la toxicidad de otros elementos como el manganeso (Mn). Con respecto al clima, el productor debe tomar en cuenta las variaciones a lo largo del año de las variables atmosféricas (precipitación, temperatura, humedad, velocidad del viento, brillo solar, evapotranspiración, etc.) y con base en esto, planificar el programa de fertilización y cualquier otra intervención que contribuya a aprovechar al máximo los efectos benéficos y a disminuir sus efectos potencialmente detrimentales.

En el caso de la fertilización, es importante considerar las características climáticas, pues afectan el crecimiento de las pasturas y la eficiencia de utilización del fertilizante. Así, en los períodos secos, cuando se presenta un déficit de humedad, el fertilizante inorgánico no se solubiliza completamente y más bien, pueden ocurrir pérdidas importantes de los fertilizantes nitrogenados por volatilización. También, bajo esas condiciones, no ocurre una mineralización apropiada de la materia orgánica, pues los microorganismos responsables del proceso requieren de humedad adecuada en el suelo. Por otro lado, hay que considerar cómo esas mismas características climáticas favorecen el rebrote de los pastos, pues esto influye en la demanda por nutrientes. Así, en los meses con mayor temperatura y buena disponibilidad de humedad, el crecimiento del pasto es más acelerado, por lo que las plantas van a requerir en ese período de una mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo. En cambio, en lugares de mayor altitud la temperatura

ambiente es más baja y como resultado de ello se presentará una menor tasa de crecimiento del forraje, por lo que bajo esas condiciones la demanda de nutrientes será menor. También, en el caso de especies sensibles al fotoperiodo, las cuales pasan de la fase vegetativa a la reproductiva como respuesta a cambios en el largo del día, la tasa de crecimiento se ve fuertemente afectada porque la planta florece y produce semillas y, por ende, se reduce la demanda de nutrientes. Queda claro entonces que hay que tomar en cuenta todos estos factores para lograr una buena eficiencia en el uso del fertilizante.

2.1 Nutrientes requeridos

Según Bertsch (1998), un nutriente es esencial para la planta cuando cumple las tres condiciones siguientes:

- Su ausencia reduce drásticamente el crecimiento en la planta
- Su ausencia produce síntomas visibles de deficiencia
- Esos síntomas son superados solamente cuando se suministra el nutriente que es deficitario

Los nutrientes requeridos para el correcto desarrollo y crecimiento de las pasturas provendrán de aquellos que las plantas puedan obtener directamente del suelo -sean estos derivados del material madre o del reciclaje a través de excretas o material senescente-, más los que se aporten a través de la fertilización.

Es conocido que en la mayor parte de los suelos tropicales el nitrógeno (N), el potasio (K) y el fósforo (P) son los nutrientes con mayor demanda por las pasturas y, obviamente, esta demanda es mayor a medida que se incrementa la intensificación del sistema. De estos, el N es el que presenta las mayores deficiencias, excepto en suelos de áreas nuevas recientemente “desmontadas” (Sánchez 1976), o luego de haber sido manejados en “barbecho mejorado” con la inclusión de leguminosas como abonos verdes. Además, en términos cuantitativos, el N regularmente se presentará como deficitario, no sólo porque las demandas de este nutriente son mayores, sino porque además se suelen presentar pérdidas por volatilización y lixiviación en el proceso de mineralización y transferencia a la planta. La necesidad de nitrógeno es mucho mayor cuando se trabaja con pastos de alto rendimiento como las guineas (*Panicum maximum*) Mombasa o Tanzania y el pasto elefante o gigante (*Pennisetum purpureum*), y que además con frecuencia se manejan en sistemas de corte y acarreo (Salas Camacho 2017).

El nitrógeno es importante para el crecimiento de las plantas, porque:

- Participa en la síntesis de la clorofila, por lo que su presencia permite acentuar el color verde del follaje. La clorofila es un elemento esencial en el proceso de fotosíntesis, de ahí la importancia del nitrógeno en la producción de biomasa.
- Es un componente básico de los denominados compuestos nitrogenados, como son las proteínas, vitaminas y enzimas.
- Acelera la división celular, lo cual permite la formación de nuevos tejidos de la biomasa aérea y radicular.
- Mejora la concentración proteica en los tejidos.
- Favorece la resistencia a plagas y enfermedades.

Por las razones descritas anteriormente, la fertilización con nitrógeno es vital en los sistemas productivos, ya que la falta de este elemento tendrá efectos visibles en el cultivo como es la merma en el crecimiento, la presencia de amarillamiento en las hojas y una baja concentración proteica en los tejidos verdes, lo cual tendrá repercusiones directas sobre la producción de leche y carne del ganado.

El fósforo (P) se considera el segundo nutriente más demandado debido a la frecuencia con que se detectan bajas concentraciones en las plantas (<5 ppm, con Bray II). Si bien muchos suelos tropicales presentan niveles de fósforo total que varían entre 200 y 3300 ppm, una alta proporción de este fósforo se encuentra en formas orgánicas o como fosfatos de hierro (Fe) y Al de baja solubilidad, no aprovechables por la planta. En el 82% de los suelos tropicales se han encontrado deficiencias de P. En el caso de los órdenes oxisoles y ultisoles que cubren el 56% del área total en América Tropical, el 96% de las muestras analizadas han mostrado niveles deficitarios de P (Ayarza 1991), Cabe anotar que este tipo de suelos son particularmente frecuentes en la Región Brunca de Costa Rica.

Una de las razones principales de la deficiencia de este nutriente en los oxisoles y ultisoles, que comúnmente se conocen como suelos “rojos”, son sus altos valores de acidez, fuerte lixiviación de bases y una limitada mineralización de la materia orgánica; por lo que cuando se trabaja con especies forrajeras no adaptadas a niveles altos de saturación de Al, en primer lugar se hace necesario neutralizar la acidez mediante el encalado y posteriormente realizar una aplicación abundante de P, con la finalidad de saturar la capacidad fijadora de este nutriente en el suelo.

El P participa en todos los procesos metabólicos que involucran energía en forma de ATP¹ en la planta, como son la fotosíntesis, glicólisis, respiración y la síntesis de ácidos grasos y proteína, entre otros (Bertsch 1998). Pero además de esto, su presencia permite:

- Fomentar y acelerar el desarrollo del sistema radicular.
- Incrementar el número de rebrotes luego de la defoliación.
- Servir como catalizador en los procesos de formación de semillas.
- Incrementar el tenor de carbohidratos, aceites, grasas y proteínas contenidos por las plantas.
- Incrementar la resistencia a las enfermedades.
- Facilitar la fijación simbiótica del N en el caso de las leguminosas.

Por otro lado, el potasio (K), actúa como un catión intercambiable de reacción positiva, participa en muchos procesos metabólicos como son la absorción de nutrientes, respiración y evapotranspiración. También se le reconoce un papel activo en la regulación osmótica e hídrica de la planta, además de servir como catalizador de las enzimas responsables de la síntesis proteica y en el metabolismo de los carbohidratos (Bertsch 1998). En términos generales, el K en la planta contribuye a:

- Regular la apertura de estomas y, por ende, juega un rol en la regulación hídrica y osmótica.
- Activar enzimas involucradas en la fotosíntesis y en el metabolismo de las proteínas y carbohidratos.
- Incrementar la eficacia en la elaboración y movilización de azúcares y almidones.
- Reducir los efectos ocasionados por las sequías y heladas.
- Aumentar la resistencia a plagas y enfermedades.
- Participar en la fijación atmosférica del nitrógeno.

¹ Trifosfato de adenosina

Además de los macroelementos (N, P y K), las plantas presentan requerimientos específicos de los llamados micro-nutrientes como son el calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), boro (B), cobre (Cu), molibdeno (Mo), cloro (Cl) y zinc (Zn). Muchos de estos micro-nutrientes tienen su origen en la descomposición y mineralización de la materia orgánica presente en el suelo, pero en muchos casos estos no son suficientes, y se pueden presentar deficiencias de algunos de ellos, por lo que se debe considerar su aplicación a través de la fertilización.

En el caso de los suelos jóvenes, que disponen de altas cantidades de materia orgánica, los micronutrientes -en especial el hierro y el manganeso- no suelen presentar deficiencia; pero en pasturas viejas, la lixiviación puede provocar que se pierda parte de los micronutrientes liberados por la descomposición de la materia orgánica. En adición a lo anterior, muchos de los suelos en Costa Rica muestran deficiencia de boro y zinc, por lo que resulta conveniente incluir esos elementos y otros microelementos en el plan de fertilización. Con frecuencia estos son aplicados en forma de quelatos a través de fertilizantes foliares.

2.2 Diagnóstico de deficiencia y toxicidad

El diagnóstico de deficiencias o toxicidades de nutrientes en el suelo se realiza mediante un análisis del suelo, acompañado del registro de algunos síntomas de deficiencia o toxicidad que se puedan observar en las plantas presentes en el sitio de muestreo. El análisis del suelo permite determinar el contenido de nutrientes y su disponibilidad en el suelo, adicionalmente, en éste se pueden determinar otras características químicas del suelo como son el pH, la acidez intercambiable, la presencia de diferentes formas de nitrógeno, etc., así como atributos físicos y biológicos que son relevantes para el manejo de los suelos y para la fertilización de aquellas áreas donde se encuentran las pasturas (Cuadro 1).

Algunos de los atributos del suelo que frecuentemente se solicita analizar cuando se llevan muestras al laboratorio -sin que ello signifique que no se puedan hacer otros análisis con base en las recomendaciones del técnico asesor- son:

- La reacción del suelo (ácido, básico o neutro), dada por el potencial de hidrógeno (pH).
- Concentración de aluminio intercambiable (particularmente importante en suelos ácidos).
- La saturación de la acidez (%).
- El nivel de fertilidad del suelo expresada por el contenido de macro- (N, P, K) y micronutrientes (Mn, Zn, Cu, Fe, B, Mo, Cl) y de aquellos nutrientes considerados intermedios (Ca, Mg, S).
- El contenido de materia orgánica (%).
- La saturación de bases intercambiables.

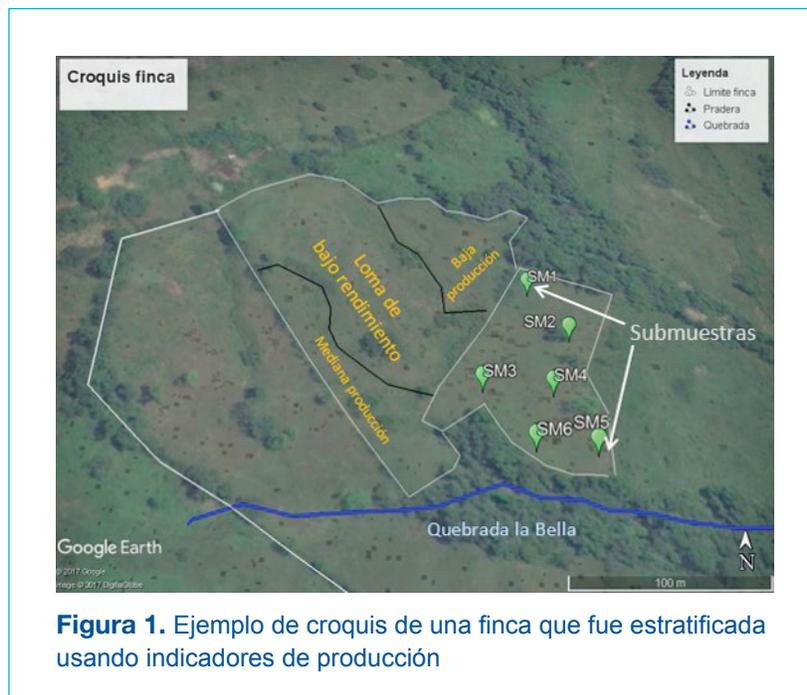
2.2.1 Recomendaciones generales para el muestreo del suelo

La muestra de suelos que se lleve al laboratorio debe ser representativa del área donde se va a sembrar o se encuentra la pastura; por ello, se recomienda primero estratificar la finca o el área de potreros utilizando los criterios siguientes: pedregosidad, pendiente, zonas inundables, etc. De igual forma se deberán determinar las zonas que se reconocen como de alta y baja producción, tal como el ejemplo que se muestra la Figura 1 donde se estratifica el terreno usando el criterio de la productividad. Para ello se recomienda preparar un croquis o mapa de la finca, el cual se elabora en conjunto con el propietario o quien maneja la finca.

Cuadro 1. Atributos que se pueden analizar para la caracterización de los suelos

Físicos	Químicos	Biológicos
Textura	Disponibilidad de nutrientes	Materia orgánica
Estructura	Capacidad de intercambio catiónico	Biomasa microbiana
Profundidad	pH, acidez intercambiable, saturación de aluminio	Carbono orgánico
Capacidad de retención de agua	Relación de bases intercambiables	Cobertura de la vegetación
Drenaje interno	Nitrógeno total, nítrico y amoniacal	Presencia de lombrices y otra fauna del suelo
Compactación	Contenido de sales	Nemátodos

Fuente: Salas Camacho (2017)



Para mejorar la precisión del diagnóstico del suelo, se recomienda realizar un recorrido en zig-zag en el área bajo observación y de ser posible, geo-referenciar la ubicación de las submuestras usando un GPS². En cada uno de esos puntos, se obtendrá una muestra de suelo a una profundidad de 0 - 20 cm, que es en donde generalmente se concentran la mayor proporción del sistema radicular de las pasturas. Al laboratorio se debe enviar una muestra compuesta, la cual se logra mezclando cuidadosamente las submuestras obtenidas de los diferentes puntos de muestreo, buscando homogeneidad en el tamaño y color del suelo, lo cual se logra mediante la pulverización de los terrones más grandes. La muestra resultante no debe ser mayor a 500 g, y se debe rotular debidamente con el nombre de la finca, sitio geográfico y la fecha en la que la muestra fue colectada.

2.2.2 Análisis químico del suelo.

El análisis químico de muestras de suelo es uno de los métodos que permite determinar con precisión la fertilidad, por lo menos al momento en que se efectúa el muestreo. En Costa Rica existen varias instituciones que poseen laboratorios donde se efectúan los análisis de suelos (p.e., Ministerio de Agricultura y Ganadería, Universidad de Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza), los cuales cuentan con procedimientos estandarizados para la extracción y determinación de los nutrientes contenidos en el suelo. Pero hay también empresas privadas que ofrecen ese servicio tanto a asociados como a particulares, entre las que se conocen están p.e. LAMBDA, CORBANA, BANDECO, entre otros. Para ilustrar el formato de presentación de los resultados de un análisis químico del suelo, en el Anexo 1 se presenta un ejemplo de un análisis realizado en el Laboratorio de Análisis de Suelo, Tejido Vegetal y Aguas del CATIE.

La frecuencia con la que se deben efectuar los análisis del suelo estará definida por el uso que se le vaya a dar a los resultados obtenidos. En todo caso es recomendable hacerlo cuando se van a establecer nuevas pasturas o cuando se detecten problemas en las pasturas manejadas bajo pastoreo o corte; como puede ser la presencia de síntomas de deficiencia en el follaje, o cuando se sospecha que la baja productividad de la pastura está asociada a la deficiencia de nutrientes.

Muchos de los datos resultantes del análisis químico del suelo pueden no ser entendidos por los productores e incluso por varios profesionales en agronomía, ya que las unidades utilizadas no son de uso común. Por ejemplo, valores del pH digamos de 5,5 ó 6,3, pueden dar una indicación general que se trata de suelos con algún grado de acidez. Pero lo importante es analizar el impacto que ese pH puede tener en el aprovechamiento de los nutrientes por diferentes especies de pastos, y si es necesaria o no la aplicación de enmiendas (como el carbonato de calcio) para neutralizar la acidez.

2.2.3 Diagnóstico visual de deficiencias de nutrientes

Tal como se mencionó anteriormente, el análisis químico del suelo por lo regular debe ir acompañado de un diagnóstico visual del estado de las pasturas en el que se presta atención a la tonalidad del follaje del pasto, así como al nivel de desarrollo de la pastura. No obstante, al realizar esa apreciación visual es importante recordar que el estado nutricional de la pastura puede ser el resultado de varias causas posibles. Por ejemplo, el amarillamiento puede ser consecuencia de una deficiencia de nitrógeno en el suelo, del encharcamiento o excesos de humedad que interfieren con la síntesis de clorofila (por falta de oxígeno en el suelo), o del ataque de alguna plaga, como puede ser el salivazo o “baba de culebra” producido por las larvas de *Aeneolamia* spp., y otras especies de insectos chupadores que afectan a

² Sistema de Geo-posicionamiento Global

varias especies de gramíneas susceptibles, como puede ser el caso de muchas accesiones de *Brachiaria* spp., o el pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*). No obstante, para lograr un mejor diagnóstico de si existe o no una deficiencia nutricional y cuál es el nutriente deficitario o en exceso, el evaluador deberá contar con experiencia previa de los diferentes estadios del desarrollo de la pastura en evaluación, y auxiliarse con la clave dicotómica que se usa para el diagnóstico visual de deficiencias nutricionales que se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Clave dicotómica para el diagnóstico visual de las deficiencias nutricionales en plantas

Código	Descripción	Ir al código	Elemento deficiente
1.-	Los tejidos jóvenes son afectados primero (elemento no móvil)	2	
1.-	Los tejidos maduros son afectados primero (elemento móvil)	7	
2.-	Muerte ascendente en zonas de crecimiento activo	3	
2.-	No se presenta muerte descendente	4	
3.-	Deformación, necrosis y caída de hojas		B
3.-	Hojas cloróticas, acoloradas, arrugadas y necróticas		Ca
4.-	Clorosis generalizada en las hojas	5	
4.-	Ausencia de clorosis en las hojas, presencia de marchitez		Cu
5.-	Necrosis en las hojas, apariencia moteada		Mn
5.-	No hay necrosis	6	
6.-	Nervaduras cloróticas, hojas casi blancas		S
6.-	Nervaduras no cloróticas, hojas blancas excepto en las venas		Fe
7.-	Toda la planta es afectada, achaparramiento	8	
7.-	Efectos localizados: clorosis, necrosis, moteado	9	
8.-	Las hojas inferiores muestran clorosis, plantas marchitas		N
8.-	Planta verde oscura o púrpura, marchitez tardía		P
9.-	Hojas veteadas, clorosis intervenal		Mg
9.-	Clorosis marginal o general	10	
10.-	Necrosis marginal en las hojas		K
10.-	Moteado necrótico sobre toda la hoja		Zn

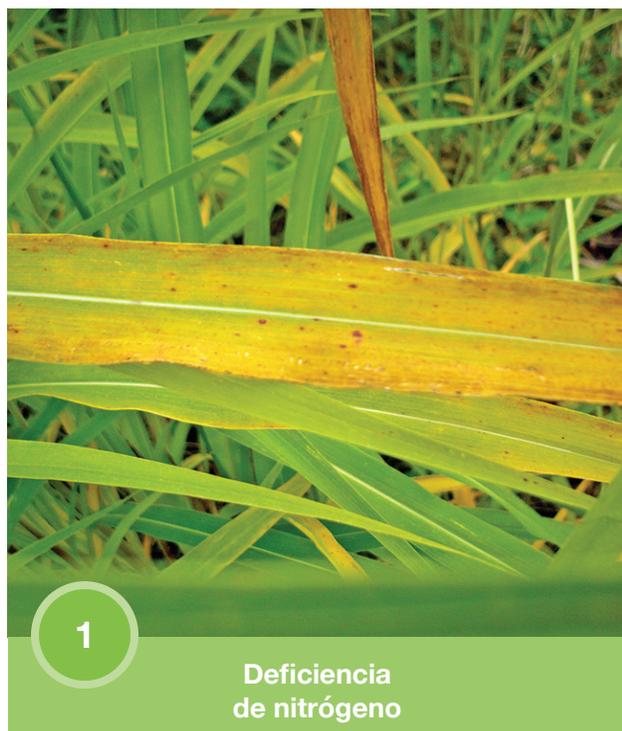
Fuente: Ting (1982), citado por Bertsch (1998)

En todos los casos, el mejor indicador de una deficiencia potencial o real es el análisis foliar (de tejidos), que se realiza utilizando técnicas específicas tanto para la toma de las muestras, como para el análisis de laboratorio. Pero para reforzar el análisis visual y descartar si se trata de deficiencias o toxicidades asociadas a la ausencia o exceso de nutrientes la pastura suele presentar uno o muchos de los siguientes síntomas:

- El síntoma tiene una distribución generalizada, es decir que se manifiestan en muchos sectores y no sólo en regiones específicas.
- El síntoma afecta en forma ascendente o descendente, lo cual dependerá de la movilidad del elemento (cuando el elemento no es móvil, los tejidos jóvenes se ven afectados primeramente -síntoma ascendente-), tal como se muestra en el Cuadro 2.
- La sintomatología presenta simetría, y en el caso de las pasturas los síntomas se presentarán en brotes contiguos o en el mismo par de hojas.

En el caso de los macronutrientes, se desconoce si la aplicación por encima de los valores requeridos por la pastura llegarán a causar daños; pero en el caso de los micronutrientes, la mayoría de los casos de toxicidad están asociados al exceso en su aplicación; por lo que el técnico deberá ser muy cuidadoso en el plan de fertilización ya que la falta de un diagnóstico oportuno tendrá repercusiones directas en la productividad y en la economía de la finca, porque la pastura no logrará el desarrollo necesario para sostener la producción animal en el largo plazo.

A continuación se presentan algunas fotografías que muestran síntomas de deficiencia en nitrógeno (foto 1), fósforo (foto 2), potasio (foto 3), calcio (foto 4) y zinc (foto 5):





3

Deficiencia de potasio



4

Deficiencia de calcio



5

Deficiencia de zinc



3. Fuentes fertilizantes

Las fuentes de fertilización se pueden clasificar como: a) sintéticas o inorgánicas, cuando contienen algún derivado sintético el cual es portador -en forma concentrada y soluble- de elementos nutritivos necesarios para el desarrollo de la planta (Bertsch 1998); y b) orgánicas, cuando son capaces de proveer nutrientes inorgánicos a la planta luego de que los residuos de origen animal o vegetal se mineralizan por acción de organismos presentes en el suelo. Entre las fuentes inorgánicas se tienen los siguientes: urea, sulfatos, cloruros y nitratos; en cambio entre los orgánicos se pueden mencionar los abonos verdes, compostajes, residuos de cosecha, excretas animales y purines.

En cuanto al origen de los fertilizantes, se presenta una gran diversidad de formulaciones químicas que permiten suplir los elementos deficientes en el suelo, cuya aplicación guardará relación con las necesidades del cultivo antes, durante y después de la cosecha. Entre las fuentes inorgánicas hay fertilizantes que aportan un solo nutrimento; se les denomina simples o individuales; mientras existen otros que aportan dos o más nutrimentos a los cuales se les denominan fórmula completa. Dentro de estas últimas se distinguen las mezclas físicas y las formulaciones químicas. En el Cuadro 3 se muestran las principales formulaciones y el contenido porcentual para cada uno de los nutrientes.

En el caso específico de las combinaciones químicas, éstas garantizan que cada una de las partes del fertilizante contiene las concentraciones indicadas en las etiquetas, porque en el proceso de preparación de la mezcla los componentes se solubilizan y solidifican, para finalmente convertirlos en gránulos de un tamaño manejable. En cambio, la mezcla física requiere procesos más sencillos para su preparación a nivel industrial, por lo tanto, los precios en el mercado tienden a ser más accesibles. Para su preparación se toman volúmenes establecidos de cada uno de los nutrientes, se mezclan en proporciones determinadas, por lo que la mezcla final será hasta cierto punto heterogénea, y como consecuencia de ello, no siempre se logrará que las proporciones de nutrientes descritas en los empaques lleguen a todos los puntos en el campo.

Por su parte, los fertilizantes o abonos orgánicos tienen una composición muy variable dependiente de las especies vegetales y animales utilizadas en su preparación, así como por el manejo que se les da a los abonos verdes, los residuos de cosecha y las excretas animales utilizadas. Además, porque se presentan pérdidas de nutrientes en procesos tales como el compostaje, o en la colecta, almacenamiento y distribución de los abonos orgánicos. Por ello, cualquier valor que se encuentre en tablas disponibles en la literatura sólo será indicativo; por lo que es mejor contar con análisis de laboratorio de los nutrientes contenidos en los abonos orgánicos a ser usados, si es que se quiere establecer una dosis de aplicación.

Cuadro 3. Composición porcentual (%) de los principales fertilizantes químicos.

Fertilizante		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	Ca	S	Otros
Nitrogenados								
1	Clanamida de calcio	21				38,5		
2	Cloruro de amonio	28						
3	Nitrato de amonio	33,5						
4	Nitrato de amonio calcáreo	20,5			7,3	7,3		
5	Nitrosulfato de amonio	26					15	
6	Nitrato de calcio	15				19,4		
7	Nitrato de sodio	16						26 (Na)
8	Sulfato de amonio	21					23,7	
9	Urea	46						
10	Urea - azufre	40					10	
Fosforados								
11	Superfosfato sencillo		20			20	12	
12	Superfosfato triple		46			13		
13	Roca fosfórica		33			33		
Potásicos								
14	Cloruro de potasio			60				47 (Cl)
15	Sulfato de potasio			50			17	
16	Sulfato de potasio y magnesio			22	18		22	

Fuente: Sáenz (1975) citado por Berstch (1998)

Cuando se decide sobre la selección del fertilizante a utilizar, debe recordarse que puede haber relaciones de sinergismo y antagonismo entre nutrientes (Cuadro 4). Se entiende por sinergismo, aquel proceso por el cual la presencia de un nutriente favorece la asimilación de otro; mientras que antagonismo es cuando la presencia de un nutriente disminuye la asimilación de otro, o que al mezclarlos se forman compuestos insolubles, los cuales no pueden ser absorbidos por la planta.

Cuadro 4. Casos de sinergismo y antagonismo entre nutrientes requeridos por las plantas

Nutrientes involucrados	Relaciones entre nutrientes
Sinergismo	
Nitrógeno – azufre	A mayor cantidad de azufre existente en el suelo, mayor asimilación del nitrógeno.
Nitrógeno – fósforo	A mayor cantidad de fósforo existente en el suelo, mayor asimilación del nitrógeno.
Magnesio – nitrógeno	El magnesio y el nitrógeno forman la clorofila, por lo que la deficiencia de uno de los nutrientes conlleva la deficiencia del otro.
Antagonismo	
Fósforo – calcio	Al mezclarse ambos nutrientes forman compuestos insolubles que la planta no puede asimilar o se neutralizan entre ambos.
Potasio – magnesio	Cuando hay exceso de potasio, menor es la cantidad de magnesio absorbida.
Calcio – boro	El calcio siempre debe estar en mayor cantidad que el boro (idealmente en una relación 10:1), para neutralizarlo. El boro en exceso es tóxico.
Calcio – sodio	El sodio es tóxico en los suelos, por lo que debe haber más calcio para neutralizarlo.



La sostenibilidad de las pasturas requiere un buen plan de fertilización para compensar las salidas de nutrimentos.



4. El uso de fertilizantes

4.1 Oportunidad y frecuencia de aplicación

El momento de aplicación de los fertilizantes tendrá un efecto significativo sobre la respuesta en rendimiento de las pasturas; ya que cuando la aplicación se realiza oportunamente, el efecto sobre la producción será mayor porque se reducen las pérdidas de nutrientes, aumenta la eficiencia del uso de estos y se previenen posibles daños al medio ambiente. En cambio, si la aplicación se efectúa en el momento equivocado, ello va a resultar en pérdida de nutrimentos, desperdicio de fertilizantes e incluso en daños al cultivo. Ahora bien, los mecanismos por los cuales ocurren pérdidas de nutrientes dependerán de las propiedades de los nutrientes y sus reacciones con el entorno.

El momento óptimo para la aplicación de fertilizantes está determinado por el patrón de absorción de nutrimentos por el cultivo. De hecho, cada nutriente muestra un patrón de uso individual para el mismo cultivo. Por ejemplo, los picos de absorción de N y P tienden a ser similares; pero el de K es un poco más tardío.

En adición a lo anterior, el tipo de suelo es determinante para definir el momento y la frecuencia de aplicación de fertilizantes. Dos propiedades del suelo que influyen sobre esta decisión son la capacidad de intercambio catiónico (CIC), y la textura del suelo. Así, suelos con alta CIC requerirán menor frecuencia de aplicación de fertilizantes, por lo que se podrán usar mayores dosis de fertilizante en cada aplicación; en cambio, en suelos con baja CIC es necesario el fraccionamiento en múltiples aplicaciones para así evitar la pérdida de nutrientes. Por su parte, la textura del suelo que guarda relación con la CIC; por ejemplo, los suelos arcillosos tienen mayor CIC que los suelos arenosos.

Por ello cuando se trabaja con pasturas bajo irrigación, la frecuencia de riego suele ser mayor en los suelos arenosos, lo cual causa una mayor lixiviación de nutrientes si se compara con suelos francos o arcillosos sin irrigar. Por lo tanto, en los suelos de textura arenosa manejados bajo riego, es necesario fraccionar más la aplicación de fertilizantes. Algo similar puede ocurrir en sistemas de secano (sin riego), donde la lluvia caída va a seguir un patrón similar a lo estipulado para el riego, lo cual obviamente dependerá de la cantidad e intensidad de las lluvias, pero el punto máximo se presentará cuando el suelo está saturado.

La movilidad de los nutrientes es también un criterio a tomar en cuenta cuando se decide la frecuencia de aplicación. El nitrógeno requiere un manejo cuidadoso debido a que es un nutriente muy susceptible de perderse a través de la volatilización, lixiviación, desnitrificación, erosión y escorrentía; si la aplicación es incorrecta, la pérdida de nutriente puede representar fácilmente un 50 - 60% de la cantidad aplicada. Y como cabe esperar, los valores mayores de lixiviación se presentarán con mayor frecuencia en suelos arenosos que en los de textura fina.

Por lo señalado anteriormente, se debe tener cuidado en la decisión de cuándo aplicar el N, para que haya un uso eficiente del mismo. En pasturas recién sembradas debe esperarse a que haya un buen desarrollo de raíces, pues si la aplicación se hace muy temprano, una parte importante del nitrógeno se perderá antes que el cultivo lo absorba. En cambio, en pasturas ya establecidas, es importante fraccionar las aplicaciones de nitrógeno después de cada ciclo de pastoreo, unos pocos días después de la salida de los animales del potrero, para evitar que su disponibilidad en un momento dado supere la capacidad de absorción de la planta, y, por ende, se presenten fuertes pérdidas por lixiviación y volatilización. Para reducir pérdidas por volatilización, se recomienda realizar la fertilización temprano por la mañana o en horas de la tarde, cuando la temperatura es más fresca. También las aplicaciones deben hacerse sólo cuando se tenga certeza que hay buena disponibilidad de humedad en el suelo, lo cual permitirá que el fertilizante se solubilice para que la planta absorba el N aplicado. Debe evitarse aplicaciones en días con demasiada lluvia para prevenir el lavado de los fertilizantes aplicados.

Otro aspecto a considerar es el tipo de fuente. En el caso del nitrógeno, las fuentes se clasifican en cuatro grupos: a) los *fertilizantes nítricos* (nitrato de calcio y nitrato de potasio), que son altamente solubles en agua, lo cual propicia que sean rápidamente absorbidos por las plantas pero también corren el riesgo de perderse por lixiviación; b) los *fertilizantes amoniacales* (sulfato de amonio, fosfato mono-amónico, fosfato di-amónico y fosfato de amonio con sulfato), cuya acción en el suelo es más duradera comparada con los fertilizantes nítricos pues necesita condiciones adecuadas de humedad, temperaturas altas, oxígeno y microorganismos para metabolizarse a nitratos; c) los *fertilizantes nítrico-amoniacales* (nitrato de amonio, nitrato de amonio calcáreo -conocido como CALNITRO-, nitrosulfato de amonio), en los cuales la parte nítrica es absorbida rápidamente por la planta, mientras que la parte amoniacal puede permanecer durante más tiempo en el suelo, lo que puede contribuir a una mayor eficiencia en la absorción por la planta; d) las *amidas* (urea y cianamida de calcio) que presentan una acción mucho más lenta que las anteriores ya que al entrar en contacto con el agua y en presencia de la ureasa, se produce una reacción química convirtiendo las amidas en amonio, el cual posteriormente mediante la nitrificación se transforma en nitratos. Sin embargo, si no se presentan las condiciones favorables los productos finales de la reacción serán el CO₂ y amoníaco; este último es susceptible a volatilizarse, y por lo tanto, no será aprovechado por las plantas.

El potasio que tiene un nivel de movilidad muy alto, hasta cierto punto equivalente al del nitrógeno, por lo que es preferible fraccionarlo en pequeñas dosis, con la finalidad de prevenir las pérdidas, en especial por lixiviación; más aún cuando se trabaja en suelos arenosos y con baja CIC. Como regla general, los suelos donde se cultivan pastos en Costa Rica reportan niveles adecuados de K, por lo que no es necesario aplicarlo siempre, a no ser que se tengan sistemas intensivos de producción de forrajes de corte, manejados con dosis altas de fertilización nitrogenada, pues en esos casos los niveles de extracción suelen ser bastante altos (Gutiérrez, 1996).

Por otro lado, las raíces de las leguminosas tienden a ser menos eficientes en la extracción de potasio que las de gramíneas, por lo que si se cultivan leguminosas y el suelo presenta un tenor bajo de potasio es mejor añadirlo como fertilizante. Sin embargo, hay que recordar que cualquiera fuere el caso de las forrajeras fertilizadas con potasio, los pastos hacen un “consumo de lujo”-cuando se hacen aplicaciones que superan los requerimientos de las plantas, absorbiendo el potasio en cantidades mayores a las requeridas, lo depositan en sus tejidos y lo mantienen como una reserva, por lo que es mejor aplicarlo en forma fraccionada.

El fósforo presenta un movimiento muy lento por lo que las raíces sólo pueden absorber aquel que está disponible en su entorno o radio muy cercano. En condiciones naturales este nutriente se encuentra en el suelo bajo formas orgánicas que son de liberación difícil o en formas inorgánicas de baja solubilidad, de manera que si bien el nivel total en el suelo puede ser alto (de 200 a 3300 ppm), el nivel disponible para las plantas puede ser tan bajo como <5 ppm con Bray II (Ayarza 1991).

En el caso de la mayoría de los fertilizantes fosfóricos (P) -quizás con excepción de la roca fosfórica-, el P se encuentra en forma soluble y disponible, lo cual puede ser “un arma de doble filo” para el caso de suelos ácidos donde se presentan condiciones idóneas para que ocurra el proceso de «fijación», pues el fósforo aplicado rápidamente se puede hacer no disponible para las plantas y como resultado de ello se da la formación de fosfatos de hierro y aluminio, los cuales no pueden ser absorbidos por las plantas. El mismo problema de la no disponibilidad de fósforo ocurre cuando se fija a los coloides del suelo o cuando se liga al calcio en suelos calcáreos, formando un compuesto insoluble (fosfato di-cálcico), que no puede ser aprovechado por las plantas.

Por otro lado, cuando se aplican fertilizantes fosfóricos con frecuencia éstos permanecen en la capa superior del suelo, por lo que si se presentan lluvias fuertes pueden ocurrir pérdidas de fósforo por escorrentía superficial y erosión del suelo. Por ello es importante tener cuidado de no aplicar dosis altas de este nutriente justo antes de una lluvia fuerte o de un riego pesado, para prevenir pérdidas del fósforo presente en el fertilizante aplicado. Si se requiere utilizar una dosis alta y sólo se dispone de fuentes altamente solubles como el superfosfato simple o el triple superfosfato, se debe considerar usar la aplicación fraccionada.

En el caso de los micronutrientes es aconsejable realizar la aplicación de fertilizantes una o dos veces al año. Hay casos especiales a tomar en cuenta; por ejemplo, el molibdeno es importante para la fijación simbiótica de nitrógeno pues este micronutriente es requerido para que se produzca una nodulación efectiva. Tampoco debe olvidarse que la disponibilidad de varios de estos elementos menores puede estar afectada por las reacciones de acidez o alcalinidad en el suelo, por lo que en algunos casos puede ser mejor considerar aplicaciones foliares en ciertos momentos de la fase de crecimiento del pasto.

4.2 Dosis

En la fertilización de las pasturas es común el uso de urea o de la fórmula Triple Quince (15-15-15), debido a su fácil accesibilidad en el mercado; pero en la mayoría de las veces estos se utilizan sin conocer los niveles críticos de la pastura, ni las cantidades de nutrimentos disponibles en el suelo. Por ello, en el Cuadro 5 se muestran algunos datos de absorción de macro- y micronutrientes esenciales en

tres diferentes especies de pasto. Esta información debe tomarse sólo como indicación de la capacidad relativa de las tres especies para absorber dichos nutrientes, pues los valores absolutos variarán en función de otros factores que inciden en la capacidad de crecimiento de los pastos.

Para la gran mayoría de cultivos agrícolas existen tablas con dosis calibradas de los nutrientes, las cuales se han elaborado tomando como base los niveles críticos necesarios para su desarrollo. Esa información es difícil de encontrar para pastos, sobre todo porque en su manejo se aprovecha la fertilidad natural del suelo y se favorece el reciclaje de los nutrientes aportados por la deposición de las excretas del ganado.

Cuadro 5. Absorción de nutrientes (kg/ha/ciclo) de los pastos toledo (*Brachiaria brizantha*), estrella (*Cynodon nlemfuensis*) y kikuyo (*Pennisetum clandestinum*)

Forraje	Absorción (kg/ha)					
	N	P	Ca	Mg	K	S
Toledo (<i>Brachiaria brizantha</i>)	97	12	22	21	163	8
Estrella (<i>Cynodon nlemfuensis</i>)	54	9	8	5	86	9
Kikuyo (<i>Pennisetum clandestinum</i>)	253	45	52	40	400	34

Fuente: Salas Camacho (2017)

Para definir las dosis de fertilización se necesita conocer los nutrimentos requeridos por los pastos; a los cuales se les debe restar la cantidad disponible en el suelo y luego la diferencia se divide por un factor que representa la eficiencia de uso del fertilizante aplicado a la pastura, la cual es función del nivel de fertilización usado, la CIC y la textura, entre otros factores. La fórmula usada para esa estimación es la siguiente:

$$Dosis = \frac{\text{Requerimientos de la planta} - \text{Disponibilidad en el suelo}}{\% \text{ de eficiencia de uso del fertilizante} * 0,01}$$

Generalmente los resultados del análisis del suelo suelen estar expresados en términos de mg/L o cmol(+)/L y para convertirlos a kg/ha del elemento (forma de mayor uso en el campo para el cálculo de fertilizantes), se utilizan los factores de conversión que se muestran en el Cuadro 6.

En el Ejemplo 1 se muestran la estimación de la cantidad de nutrientes a ser aplicados en una pastura considerando los resultados obtenidos en el análisis de suelo y en la cantidad de forraje que se espera producir. Esta forma de cálculo puede aplicarse fácilmente para el caso de la producción de forraje en sistemas de corte y acarreo, o para la producción de heno o ensilaje; pero definitivamente se va a sobreestimar los requerimientos de fertilizantes cuando las pasturas están siendo manejadas bajo pastoreo, donde hay retorno de nutrientes a través de la excreción de orina y heces.

Cuadro 6. Factores para la conversión de mg/L y cmol(+)/L a kg/ha en el caso de los principales nutrientes del análisis químico de suelos

	P (mg/L)	K (cmol(+)/L)	Ca (cmol(+)/L)	Mg (cmol(+)/L)	S (cmol(+)/L)
Factor de conversión	2	780	400	240	2

EJEMPLO 1: Determinación de la dosis de fertilizante

Para determinar la cantidad de nutrientes requeridos en un programa de fertilización, a partir de los resultados del análisis químico del suelo, se deben transformar las cantidades expresadas en mg/L o cmol(+)/L para convertirlas a kg/ha. Para esto se utilizarán los datos del análisis del suelo que se presenta en el cuadro siguiente y los factores de transformación mostrados en el Cuadro 6.

Paso 1. Expresar el aporte de los nutrientes del suelo en kg/ha

Para este ejemplo se utilizará la muestra 2 (M2) del suelo, seleccionando los nutrientes P, K, Ca y Mg

No. Reporte: NR17-024

No.	Identificación	Ca	Mg	K	P	Cu	Zn	Mn	Fe
Lab.		cmol(+)/l	cmol(+)/l	cmol(+)/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
LS17- 213	M1	0,35	0,09	0,10	4,4	11,0	1,2	115	67
LS17- 214	M2	3,14	0,31	0,15	3,3	7,8	0,9	17	260

Los resultados anteriores corresponden al laboratorio que realizó el análisis.

Nutriente	Cantidad * factor	kg/ha
Ca	3,14 (400)	1256,0
Mg	0,31 (240)	74,4,
K	0,15 (780)	117,0
P	3,3 (2)	6,6

Paso 2. Determinar la cantidad que debe aportarse al sistema

Con base en la información disponible en la literatura se encontró que para obtener un rendimiento de 13 TM/ha son necesarios 200 kg de N, 30 kg de P, 200 kg de K, 50 de Ca, 50 de Mg y 20 de S (Malavolta, citado por Berstch 1998).

Nutriente	Cantidad disponible (kg/ha)	Cantidad necesaria (kg/ha)	Balance
Ca	1256,0	50	+1206,0
Mg	74,4	50	+24,4
K	117,0	200	-83,0
P	6,6	30	-23,4
N	0	200	-200

Una vez efectuado el balance de nutrimentos, se determinó que el Ca y Mg estaban en exceso, por lo que no es necesario aplicarlos; en cambio, deberán aplicarse 200, 23,4 y 83 kg/ha/corte de N, P y K respectivamente, para lograr suplir las necesidades de la pastura.

Otra manera de estimar las necesidades de nutrimentos en las pasturas es tomando como base los nutrimentos extraídos por los productos animales que salen del sistema, en el Cuadro 7 se presentan los contenidos porcentuales de los principales nutrimentos en tres productos de la ganadería; con base en esos datos, se pueden estimar las necesidades de nutrimentos para reponer los nutrimentos extraídos.

Cuadro 7. Contenido de minerales (%) en los animales y sus productos

Elemento	Ternero	Novillo	Leche
Nitrógeno	2,6	2,4	0,61
Fósforo	0,67	0,68	0,10
Potasio	0,17	0,15	0,12
Azufre	0,15	0,15	0,04
Calcio	0,12	1,3	0,11
Magnesio	0,15	0,03	0,001

Fuente: Pearson e Ison (1997)

EJEMPLO 2. Estimación de las necesidades de fertilización en pasturas usando la composición de productos exportados

En una finca de doble propósito se tienen 17 hectáreas de *Brachiaria ruziziensis*, las cuales son pastoreadas por 22 vacas y 14 terneros. Las vacas producen en promedio 5,4 kg de leche vendible/día. Durante el año se venden 10 terneros con un peso promedio de 160 kg, además de 3 vacas de desecho con un peso promedio de 420 kg.

La fertilización está orientada a mantener la productividad del sistema, por lo tanto, se busca reponer la extracción de nutrimentos con énfasis en el nitrógeno y fósforo. Para tal propósito se pretende hacer una aplicación de la fórmula completa 10-30-10 al inicio de lluvias y el nitrógeno restante se va a fraccionar en seis aplicaciones iguales de nitrato de amonio (33,5% N).

1. Estimación de la extracción de nutrimentos

Para estimar la cantidad de nutrimentos extraídos en el sistema de pastoreo se requiere la siguiente información:

- Tipo de sistema
- Carga animal
- Producción por animal
- Concentración de nutrimentos en el/los productos(s) vendido(s)

1.1 Extracción de nitrógeno en las 17 ha

1.1.1 Por leche producida

$5,4 \text{ kg/vaca/día} * 22 \text{ vacas} * 365 \text{ días} = 43.362 \text{ kg de leche/año}$
 $(43.362 \text{ kg} * 0,61)/100 = 264,51 \text{ kg N/año}$

1.1.2 Por venta de terneros

$10 \text{ terneros/año} * 160 \text{ kg} = 1600 \text{ kg/año}$
 $(1600 \text{ kg} * 2,6)/100 = 41,60 \text{ kg N/año}$

1.1.3 Por venta de vacas de desecho

$3 \text{ vacas/año} * 420 \text{ kg} = 1260 \text{ kg/año}$
 $(1260 * 2,4)/100 = 30,24 \text{ kg N/año}$

1.1.4 Extracción total de nitrógeno

$264,51 + 41,60 + 30,24 = 336,35 \text{ kg N/año en las 17 hectáreas}$

1.1.5 Extracción de nitrógeno por hectárea

$336,35 / 17 = 19,79 \text{ kg N/ha/año}$

1.2 Extracción de fósforo (P_2O_5) en las 17 hectáreas**1.2.1 Por leche producida**

$5,4 \text{ kg/vaca/día} * 22 \text{ vacas} * 365 \text{ días} = 43.362 \text{ kg de leche/año}$

$(43.362 \text{ kg} * 0,10) / 100 = 43,36 \text{ kg P/año}$

$43,36 * 2,25^1 = 97,56 \text{ kg } P_2O_5/\text{año}$

$11 \text{ Kg P} = 2,25 \text{ kg } P_2O_5$

1.2.2 Por venta de terneros

$10 \text{ terneros/año} * 160 \text{ kg} = 1600 \text{ kg/año}$

$(1600 \text{ kg} * 0,67 * 2,25) / 100 = 24,12 \text{ kg } P_2O_5/\text{año}$

1.2.3 Por venta de vacas de desecho

$3 \text{ vacas/año} * 420 \text{ kg} = 1260 \text{ kg/año}$ $(1260 * 0,68 * 2,25) / 100 = 19,28 \text{ kg } P_2O_5/\text{año}$

1.2.4 Extracción total de P_2O_5 en las 17 hectáreas

$97,56 + 24,12 + 19,28 = 140,96 \text{ kg de } P_2O_5/\text{año}$

1.2.5 Extracción en una hectárea:

$140,96 / 17 = 7,42 \text{ kg } P_2O_5 \text{ ha/año}$

2. Estimación de las dosis de nutrimentos a ser aplicadas

Para estimar la cantidad de nutrimentos a aplicar por medio de los fertilizantes se requiere la siguiente información:

- Nivel de extracción
- Eficiencia del uso de los fertilizantes (debe considerarse la eficiencia de uso del fertilizante) para compensar las posibles ineficiencias en el aprovechamiento de los nutrimentos aplicados del fertilizante

2.1 Nitrógeno

Nivel de extracción: $19,79 \text{ kg N/ha/año}$

Eficiencia de uso: 40%

Dosis: $19,79 / 0,40 = 49,48 \text{ kg de N/ha/año}$

2.2 Fósforo P_2O_5

Nivel de extracción: $7,42 \text{ } P_2O_5/\text{ha/año}$

Eficiencia de uso: 60%

Dosis: $7,42 / 0,60 = 12,37 \text{ kg de } P_2O_5/\text{ha/año}$

3. Estimación de las cantidades de fertilizantes a aplicar

Para estimar la cantidad de fertilizantes a aplicar se requiere la siguiente información:

- Dosis de nutrimento
- Fuente fertilizante y contenido del nutrimento
- Forma de aplicación

3.1 Dosis requerida

49,48 kg N y 12,37 kg de P_2O_5 por hectárea por año

3.2 Estimación de la cantidad de fertilizante fórmula completa (10-30-10)

Nota: Todo el fósforo es aportado por el fertilizante fórmula completa de manera que la estimación de la cantidad a aplicar de la fórmula se realiza con base en la dosis total requerida. Debe estimarse además cuánto se aporta de nitrógeno y potasio para descontarlo de lo que se requiere aplicar de esos nutrimentos con los otros fertilizantes.

3.2.1 Cantidad de fertilizante fórmula completa:

Si 100 kg de fertilizante	aportan 30 kg de P_2O_5
X kg -----	aportan 12,37 kg

$$X = (12,37 * 100) / 30 = 41,23 \text{ kg de fertilizante 10-30-10}$$

3.2.2 Aporte de nitrógeno en la fórmula completa

$$(41,23 * 10) / 100 = 4,12 \text{ kg de N/ha}$$

3.3 Estimación de la cantidad de nitrato de amonio (33,5 %N) requerido**3.3.1 Cantidad de nitrógeno a aplicar vía nitrato de amonio**

$$49,48 - 4,12 = 45,36 \text{ kg de N/ha/año}$$

3.3.2 Cantidad de nitrato de amonio necesaria

Si 100 kg de nitrato de amonio	aportan 33,5 kg de N
X -----	aportarán 45,36

$$X = (45,36 * 100) / 33,5 = 135,40 \text{ kg de nitrato de amonio/ha/año}$$

3.3.3 Cantidad de nitrato de amonio a distribuir en cada aplicación (considerando 6 aplicaciones al año)

$$135,40 / 6 = 22,6 \text{ kg de nitrato de amonio/ha/aplicación}$$

4.3 Método de aplicación

La forma de aplicación de los fertilizantes debe buscar reducir al máximo las pérdidas de los nutrientes, o dicho en otras palabras, conseguir la máxima eficiencia en el uso del fertilizante. Esto tiene implicaciones importantes sobre el ambiente, pues de esa manera se reducen las pérdidas por volatilización que en el caso de varias fuentes nitrogenadas contribuirían a la emisión de óxido nitroso, así como a la contaminación de las fuentes de agua en el caso de prácticamente todos los fertilizantes, los cuales se lavan en procesos de erosión o se lixivian. Este tipo de problemas es mayor cuando todo el fertilizante requerido se aplica de una sola vez, es decir no se fracciona.

Las formas de aplicación de los fertilizantes suelen ser:

- Directamente al suelo (fertilizantes granulados)
- Diluido con el agua de riego (fertirrigación)
- Aplicado al follaje (fertilizantes foliares)

En nuestro medio la forma más común de aplicación directamente al suelo es la denominada “al voleo”, en la cual la aplicación se hace a toda la pastura (“no es localizada”). Cuando las pasturas están sembradas en hileras y se puede aplicar el fertilizante a un lado de las hileras de plantas se produce la denominada fertilización “en banda”, o el fertilizante se puede aplicar alrededor de cada planta (fertilización “por posición”). Esta última es frecuente en plantas que crecen en macollas. En todos estos casos se aplica el fertilizante en la superficie del suelo; por lo tanto su aprovechamiento dependerá de la presencia de humedad en el mismo. En la aplicación “en banda” o “por posición” se espera que haya una mayor eficiencia en el uso del fertilizante aplicado que cuando se efectúa la fertilización al voleo, porque la primera favorece un mayor crecimiento de raíces en la banda (compensación morfológica), además de que aumenta la capacidad de absorción por unidad de área o superficie de raíz (compensación fisiológica).

Otra posibilidad es que el fertilizante sea incorporado en el suelo mediante el paso de una rastra o arado luego de su aplicación. Esta práctica es más factible en el establecimiento de pasturas nuevas; y su uso es más frecuente cuando se utilizan abonos verdes o excretas secas de animales, y no tanto en el caso de fertilizantes inorgánicos.

La fertirrigación es el sistema en el cual el fertilizante se distribuye disuelto en agua y mediante un sistema de riego. Este se usa más en pastos de corte con altos rendimientos y en fincas que tienen acceso al riego; a pesar de que este sistema requiere mayor inversión inicial, posibilita el mantener un buen crecimiento del pasto y una gran disponibilidad de forraje durante todo el año. Entre las ventajas que se le atribuyen a este sistema se mencionan las siguientes: i) Bajo costo de aplicación por menor necesidad de mano de obra; ii) Mayor flexibilidad en el momento de la aplicación, así como en las dosis a aplicar; iii) Se puede hacer una distribución más uniforme del fertilizante; y iv) Se puede lograr una mayor eficiencia en el uso del fertilizante aplicado. Lo más común es el uso de aspersores o cañones, así como los sistemas de riego por goteo, pues en el riego por gravedad (por inundación-surcos), se suelen presentar problemas de uniformidad en la distribución y muchas pérdidas de fertilizante cuando el riego no es bien regulado.

El sistema de riego por goteo es de baja presión y alta frecuencia de irrigación (4 mm/h); no hay duda de que tiene potencial porque se hace un uso más eficiente del agua y de los nutrientes, pero su uso está más limitado a las siembras en hilera y con forrajeras de alto potencial de producción de biomasa,

que son aquellas usadas mayormente bajo corte. Además, existe el inconveniente potencial de que se presenten problemas por obturación de los goteros por presencia de algas, microbios, arcillas, sustancias orgánicas y sales, esto último es particularmente frecuente cuando se usan aguas duras.

Algunas consideraciones respecto a los fertilizantes usados en fertirrigación son: i) Deben ser solubles en agua y no tener impurezas o recubrimientos; ii) No deben reaccionar con el agua de riego; y iii). No deben obturar ni corroer el sistema de riego. Los fertilizantes más usados en sistemas de fertirrigación son los nitratos de potasio y de amonio, la urea, el cloruro de potasio, los quelatos y las sales solubles de micronutrientes.

En cuanto a la fertilización foliar, ésta tiene mayor probabilidad de ser usada para: i) Corregir rápidamente deficiencias de nutrientes; ii) Solventar la excesiva “fijación” de nutrientes por parte del suelo cuando se puede presentar; y iii) Ayudar a mejorar la absorción de nutrientes por parte de las raíces del cultivo (p.e., por baja temperatura, daños físicos, etc.) En el caso de la fertilización nitrogenada, la urea es la opción preferida, pero es necesario que la solución no tenga una concentración mayor al 2% para prevenir daños por quema del follaje. Además, la urea utilizada para aplicación foliar deberá estar libre de contaminantes como el biureto, cianato y/o cianamida. No se recomienda realizar las aplicaciones foliares de urea cuando se presente una alta radiación solar.

En el caso de la aplicación de micronutrientes, debe recordarse que el calcio, magnesio, zinc, cobre, manganeso, y hierro no se traslocan efectivamente por el floema, por lo que su aplicación como quelatos mejora su absorción y traslocación; sin embargo, esto no aplica al boro porque no es capaz de formar quelatos. Otra práctica que ayuda en el aprovechamiento de los fertilizantes foliares es el uso de surfactantes para reducir la tensión superficial, humectar la hoja y facilitar la absorción a través de las estomas.



La aplicación localizada de fertilizantes ayudará en su uso eficiente para optimizar la producción de biomasa y reducir problemas ambientales.



5. El encalado

La aplicación de cal para contrarrestar la acidez y disminuir la saturación de Al en los suelos ha sido por muchos años una práctica común en los sistemas de altos insumos, inclusive en algunos sistemas de producción intensiva a base de forrajes; sin embargo, en las últimas décadas ha habido un cambio respecto a la necesidad de esta práctica en sistemas de pasturas, buscando más bien germoplasma forrajero tolerante a la alta acidez y a niveles altos de saturación de Al. Esto ha traído consigo que en el caso de la producción de forrajes se piense ahora más en la cal como fuente de Ca y no como enmienda; con ese enfoque los niveles de cal dolomítica a ser aplicados pasan de varias toneladas a apenas unos 500 kg/ha (Rao *et al.* 1995).

La gran mayoría de los suelos del trópico presentan una reacción ácida (pH <5,5), y muchos de los forrajes tropicales son tolerantes a rangos de pH entre 5 y 6 (Bernal 1984); pero por debajo de estos valores los suelos empiezan a presentar grados crecientes de toxicidad de nutrimentos tales como el Al, Fe y Mn, que pueden afectar el buen desarrollo de las pasturas menos tolerantes a la acidez. Esto es particularmente cierto para especies no tolerantes a la acidez, porque en suelos ácidos (pH <5,5), disminuye la disponibilidad de ciertos nutrimentos y se incrementan la solubilidad de otros (Figura 2). Los niveles altos de Al, Fe y Mn suelen afectar el crecimiento de las pasturas; además, bajo esas condiciones se presenta una baja disponibilidad de P, que es esencial para el desarrollo del sistema radicular y el crecimiento de las plantas.

La acidez de los suelos suele ser un problema que enfrentan muchos productores en las regiones tropicales; en el caso particular de Costa Rica, esta situación se ejemplifica en la Figura 3, donde se muestra la distribución de la acidez expresada en términos del pH y acidez intercambiable. En el caso (a) se puede notar que en un 50% de los cantones predominan suelos con un pH <5,5; en cambio el problema de altos niveles de acidez intercambiable (caso b), sólo se presenta en un 36% de los cantones. Aunque en términos generales la Figura 3 muestra la distribución en Costa Rica de los factores asociados a la acidez del suelo, se debe tener en cuenta que se presenta mucha variabilidad a nivel de unidades más pequeñas como lo son las fincas o los potreros; por lo tanto, se deberían seguir las recomendaciones para obtener las muestras de suelo y así tener una mejor apreciación de las condiciones a nivel de las fincas o potreros donde se va a trabajar.

Bertsch (1998) menciona que, en términos generales y prácticos, los indicadores de la acidez en el suelo son:

- pH < 5,5
- Acidez o Al intercambiable > 0,5 cmol(+)/L
- Suma de bases < 5 cmol(+)/L
- 10% < saturación acidez < 60%

En plantas sensibles a la acidez, el encalado es la práctica común que permite contrarrestar los efectos negativos de los elementos tóxicos presentes en el suelo sobre las plantas, como resultado de los múltiples efectos de dicha práctica, entre los que destacan:

- Eleva el pH del suelo (neutralización del pH)
 - Disminuye la saturación del ion hidrógeno H+
 - Permite el crecimiento de rizobios en el sistema radicular para posibilitar la fijación del nitrógeno atmosférico

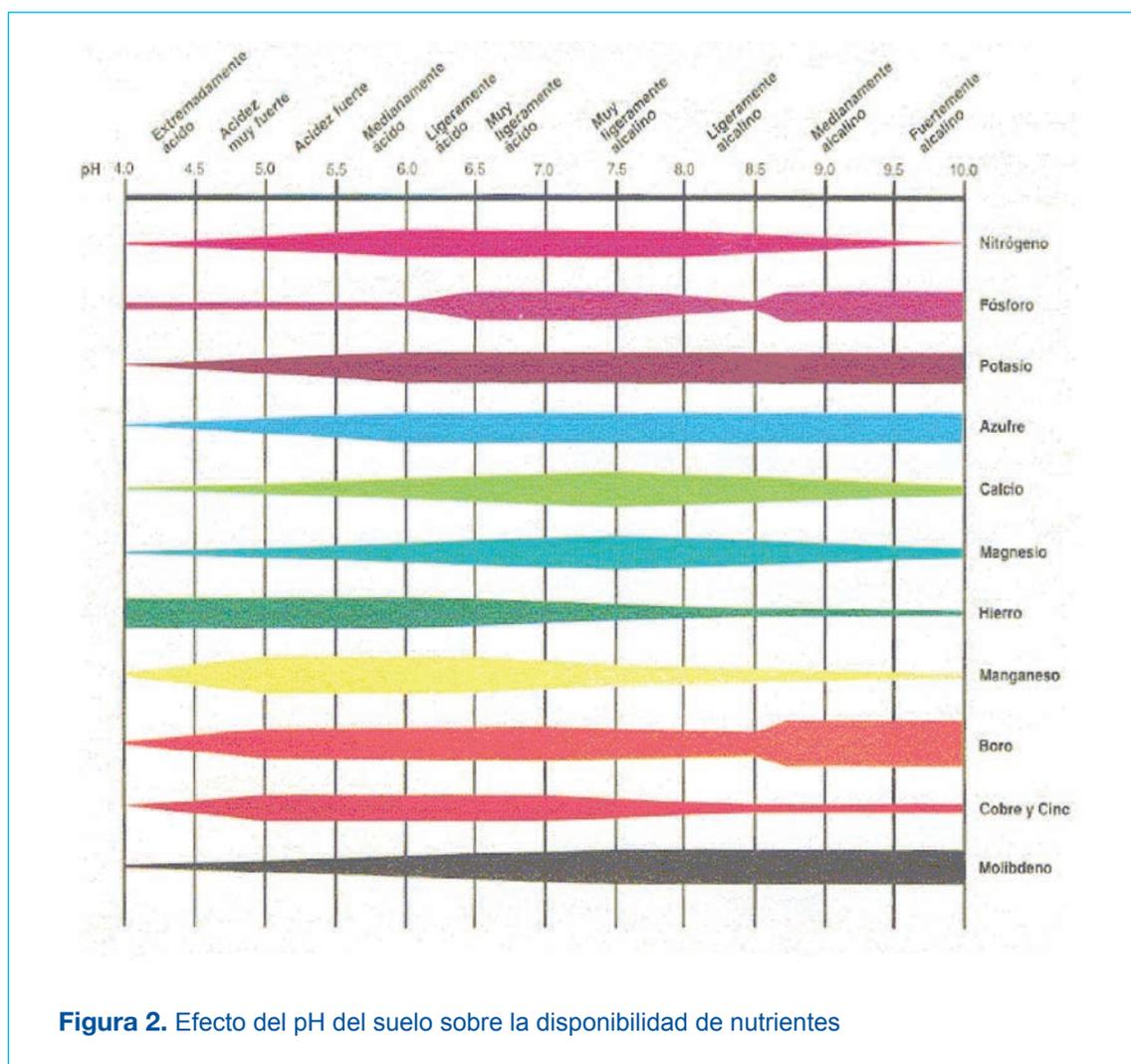
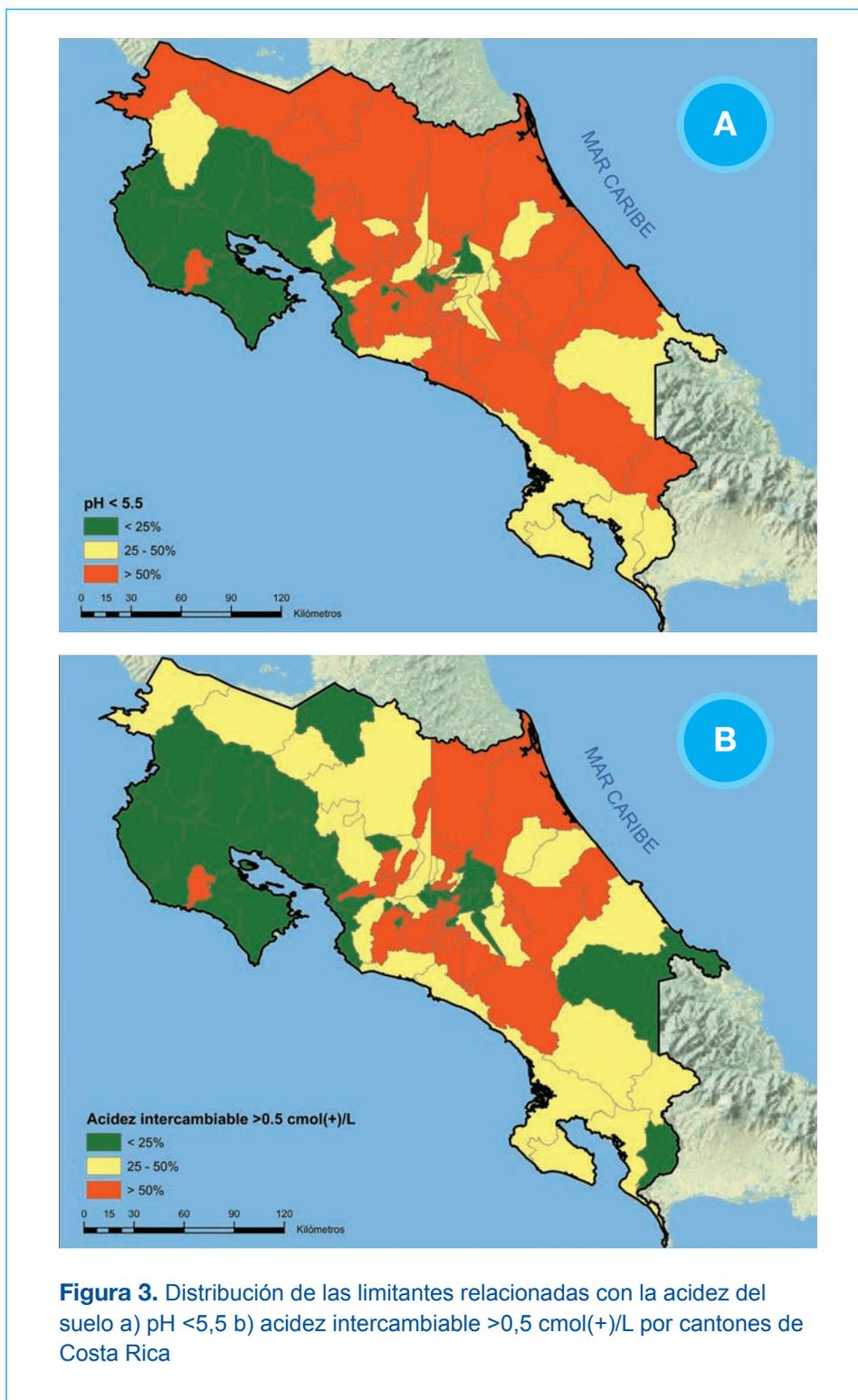


Figura 2. Efecto del pH del suelo sobre la disponibilidad de nutrientes



- Favorece el aporte de nutrientes contenidos en la cal, como son el calcio y magnesio
- Disminuye la solubilidad de elementos considerados tóxicos para las plantas, como son el aluminio, manganeso y hierro
- Incrementa la solubilidad del potasio
- Acelera la nitrificación
- Mejora la absorción de amonio (NH_4^+)
- Incrementa la disponibilidad de fósforo en el sistema

Adicionalmente, en el corto plazo, el realizar un encalado favorece la estructura y la capacidad de infiltración del suelo, facilitando el acceso a algunos nutrientes necesarios para el desarrollo de las pasturas. Pero, cuando se aplica en exceso, el encalado puede actuar como un agente cementante que puede llegar a taponear los poros del suelo, reduciendo así la actividad microbiana y afectando los procesos de respiración de las raíces. En el largo plazo, el uso racional de la cal permite incrementar la mineralización de la materia orgánica; de allí la conveniencia de promover los sistemas silvopastoriles pues los árboles pueden aportar hojarasca, mantienen la humedad y regular la temperatura del suelo, evitando la pérdida de los nutrientes y favoreciendo la absorción y movilización de los nutrientes hacia las partes productivas de la planta.

Cuando se implementa el plan de fertilización, se debe tener el cuidado de separar la aplicación de enmiendas y las fuentes fertilizantes en por lo menos un mes, ya que la aplicación conjunta puede causar que los nutrientes presentes en el fertilizante se precipiten (se insolubilizan), y la fuente de calcio (CaCO_3 , cal dolomítica, etc.), no reduzca la acidez; ni aumenta la concentración de calcio o magnesio en el suelo, tal como lo haría si se aplicara sola. Por ello, si se decide aplicar cal como enmienda, es recomendable que esta se haga con antelación a la siembra de pastos, y si es posible, efectuar la aplicación al final de la época lluviosa o en un momento de baja precipitación, con el fin de evitar la pérdida excesiva de la cal por escorrentía.

Berstch (1998) menciona que cuando se detecta un problema de acidez en el suelo, se debe realizar en primer lugar un encalado que aporte calcio al suelo, y posteriormente se puede aplicar fertilizantes orgánicos que coadyuven a reducir la concentración de aluminio en el suelo y que además aumente el contenido de materia orgánica.

Adicionalmente a estas acciones correctivas, entre las pasturas de uso común existen muchos cultivares que muestran adaptación a los suelos ácidos y a concentraciones altas de aluminio y manganeso como los que se muestran en el Cuadro 8. Aunque de entrada se sabe que la mayoría de las leguminosas presentan una resistencia mayor a suelos ácidos.

La cantidad de cal a aplicar al suelo (kg/ha), se puede determinar usando como base los valores obtenidos en el análisis del suelo. En el Ejemplo 2 se muestra cómo se pueden hacer esas estimaciones. Aunque en el mercado se pueden encontrar varias fuentes de calcio, el carbonato de calcio (CaCO_3) sigue siendo la fuente de uso más difundido y la más económica. Su aplicación se realiza principalmente al voleo, tratando de lograr uniformidad en su distribución sobre el suelo.

Cuadro 8. Tolerancia a la saturación de la acidez (AI) en tres niveles (baja (0-40%), media (40-70%) y alta (70-100%)) de forrajeras tropicales

Forraje	Tolerancia a AI (saturación de acidez, %)		
	Baja (0-40)	Mediana (40-70)	Alta (70-100)
Braquiarias (<i>Brachiaria</i> spp.)			+
Pasto brunca (<i>Brachiaria dictyoneura</i>)		+	
Gamba (<i>Andropogon</i> sp.)			+
Guinea Mombasa (<i>Panicum maximum</i>)	+	+	
Elefante (<i>Pennisetum purpureum</i>)		+	
Pasto bermuda (<i>Cynodon dactylon</i>)		+	
Maní forrajero (<i>Arachis pinto</i>)		+	
Leucaena (<i>Leucaena</i> spp.)		+	
Trébol (<i>Trifolium</i> spp.)	+		

Fuente: Bertsch, 1995; Rao *et al.*, 1995



Aplicación al voleo en pasturas de piso.

EJEMPLO 2: Cálculo del encalado en pasturas

Para determinar la cantidad de cal a aplicar, primero se deben identificar en el análisis del suelo los tres indicadores principales: a) el pH < 5,5; b) acidez intercambiable (> 0,5 cmol (+) /L); y c) la saturación de la acidez (10 < SA% <60). Tomaremos de ejemplo el resultado del análisis químico de la muestra 1 (M1) del Cuadro 7.

Paso 1: Identificación de los 3 indicadores de acidez

IR17-024				
Identificación	Prof.	pH	Acidez	Ca
	cm	H ₂ O	-----cmol(+)	
M 1	0-20	5.3	7.26	0.35
M 2	0-20	5.2	1.15	3.14

anteriores corresponden a las muestras ingresadas

pH	Acidez	Ca
H ₂ O	-----cmol(+)/l-	
5.3	7.26	0.35
5.2	1.15	3.14

% Saturación acidez	
(Acidez Extraíble X 100)/(Ca+Mg+K+Acidez) 100	
	83.54

pH	5,2
Acidez	7,26
% SA	83,54

Paso 2: Interpretar la acidez

Los datos indican que el AI se encuentra soluble en el suelo y que el sistema está saturado en un 83,54% por acidez asociada a este elemento.

Paso 3: Cálculo de la enmienda

Los cultivos presentan diferentes reacciones a la saturación de aluminio y su comportamiento dependerá de su adaptación a estos suelos. Sin embargo, en este caso consideraremos que se quiere establecer una pastura de braquiaria la cual presenta una alta tolerancia a la saturación de acidez (70%); por lo tanto, para calcular la enmienda con carbonato de calcio utilizamos la fórmula:

$$tCaCO_3 = \frac{2 (\% S Al existente - \% S Al deseable) * CICE}{100}$$

Saturación de Al existente = 83,54 %

Saturación de Al deseable = 70% (Rao *et al.* 1993)

CICE = 8,69 cmol+/L

En consecuencia, por sustitución tendremos

$$tCaCO_3 = \frac{2(83,54 - 70) * 8,69}{100}$$

$$tCaCO_3 = \frac{2(13,54) * 8,69}{100}$$

$$tCaCO_3 = \frac{27,08 * 8,69}{100}$$

$$tCaCO_3 = \frac{235,33}{100}$$

$$tCaCO_3 = 2,35 \quad CaCO_3 \approx 2,5 \text{ ton/ha}$$



6. Fijación y transferencia de nitrógeno en asociaciones gramíneas/leguminosas

El nitrógeno atmosférico constituye un factor importante dentro de la dinámica de este elemento en el suelo ya que puede hacer una contribución importante a través de la fijación simbiótica que se puede presentar cuando las leguminosas están presentes. Bajo condiciones naturales, el proceso de mineralización de la materia orgánica es muy lento y se ve afectado por factores tales como el pH, la temperatura, aireación, humedad, adición de materiales orgánicos, relación C/N, presencia de taninos, arcillas e inclusive el manejo; pero cuando se tienen asociaciones de gramíneas con leguminosas, la mineralización se ve favorecida por el aporte de nitrógeno que realizan las leguminosas, e idealmente se logra que haya una liberación de este elemento más compatible con el ritmo de absorción de las especies acompañantes.

La concentración de nitrógeno en el suelo suele variar, dependiendo de la composición botánica de la pastura; la disponibilidad de este nutriente se incrementa cuando se presentan leguminosas en la pradera debido justamente a la capacidad que tienen muchas de fijarlo por la simbiosis con rizobios que infectan sus raíces y que mediante la descomposición de la materia orgánica que depositan, se logra incorporar nitrógeno y otros elementos minerales en el suelo.

La fijación biológica de nitrógeno consiste en la asimilación de la forma elemental de este elemento por formas vivientes del suelo, lo cual conlleva a incrementar la fracción presente en el suelo. Esta acción se logra por dos clases de microorganismos: a) los que realizan la fijación por sí mismos, y b) los que necesitan formar una simbiosis con las plantas para realizarla (Bertsch 1998).

La fijación simbiótica del nitrógeno se lleva a cabo principalmente por las bacterias del género *Rhizobium* contenidas en las raíces de muchas leguminosas. Sin embargo, hay también evidencia científica de fijación simbiótica en ciertas gramíneas forrajeras tropicales como *Paspalum notatum* y ciertas variedades de *Digitaria decumbens* (pasto pangola), por su asociación con otros microorganismos del suelo, en especial del género *Azotobacter*, *Klebsiella* y *Rhodospirillum*.

Existe cierta especificidad en cuanto a los rizobios que infectan las leguminosas de clima frío (p.e. *Rhizobium trifolii* en los tréboles, *R. meliloti* en alfalfa); en cambio los *Bradyrhizobium* que infectan la mayoría de leguminosas tropicales tienen menor especificidad, por lo que puede ocurrir infección sin necesidad de inoculación, pero con esto no se niega que en muchos casos se puede lograr mayor fijación

de nitrógeno cuando se inoculan las semillas de leguminosas tropicales con cepas seleccionadas. Hay que recordar que en los trópicos de América Latina hay una gran diversidad de leguminosas nativas a las que acompañan muchos rizobios nativos.

Es fácil reconocer si las leguminosas presentes en las pasturas están fijando nitrógeno; basta con coleccionar con cuidado plantas de leguminosas y retirarlas del suelo para observar los nódulos -formaciones engrosadas y pegadas a las raíces-. Cuando estos se cortan por la mitad con una cuchilla filosa se puede observar el color en la parte interna de los mismos; una coloración rosada es indicativa de que los nódulos están activos en la fijación; en cambio una coloración blanquecina o amarillenta indica que los nódulos no están fijando nitrógeno. La presencia de nódulos no activos puede ser el resultado de la infección con cepas que no son activas en la fijación, o que las condiciones del suelo no favorecen su actividad. Por eso, al aplicar nitrógeno en pasturas asociadas con leguminosas, no solo se favorece el desarrollo de las gramíneas en perjuicio de las leguminosas por competencia, sino que además no se promueve la actividad fijadora en los nódulos de esas leguminosas, porque los nitratos liberados luego de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados inhiben la síntesis y actividad de la enzima nitrogenasa, la cual es responsable de la fijación del N del aire.

Hay muchos factores que pueden afectar la fijación de nitrógeno en las pasturas, además de las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados; entre ellos se pueden citar:

- La especie de leguminosa presente y su contribución porcentual en la asociación.
- El estadio fenológico de las leguminosas: hay mayor fijación cuando las plantas se encuentran en estado vegetativo.
- El manejo de la defoliación: cuando las leguminosas son defoliadas -ya sea en el pastoreo o corte- hay muerte de raíces y con ellas se van muchos nódulos, por lo que deben formarse nuevos que sean capaces de fijar nitrógeno.
- La temperatura ambiente: las leguminosas tropicales encuentran el óptimo de temperatura entre 27-29°C, por lo que las temperaturas fuera de ese rango afectan el crecimiento y la capacidad de síntesis de nitrógeno por los nódulos.
- Atributos del suelo tales como la acidez, saturación de aluminio y salinidad afectan negativamente el crecimiento de muchas especies de leguminosas no adaptadas, y por ende su capacidad fijadora de nitrógeno.
- La humedad en el suelo: los excesos y déficit de humedad afectan el proceso fotosintético, y por lo tanto, la provisión de productos de la fotosíntesis a las raíces; además, el exceso de humedad en el suelo hace que el agua ocupe el espacio aéreo, lo cual causa que no se fije el nitrógeno en los nódulos de la raíz por falta de oxígeno en el medio.
- La nutrición mineral de la planta que afecta su crecimiento, pero además los rizobios tienen requerimientos específicos de fósforo, molibdeno, calcio y cobalto.
- El ataque de plagas y enfermedades que afectan el crecimiento y la sobrevivencia de las plantas afectan los sistemas radiculares y el desarrollo de los nódulos.

Hay varios mecanismos por los cuales se transfiere el nitrógeno fijado por las leguminosas hacia las gramíneas acompañantes:

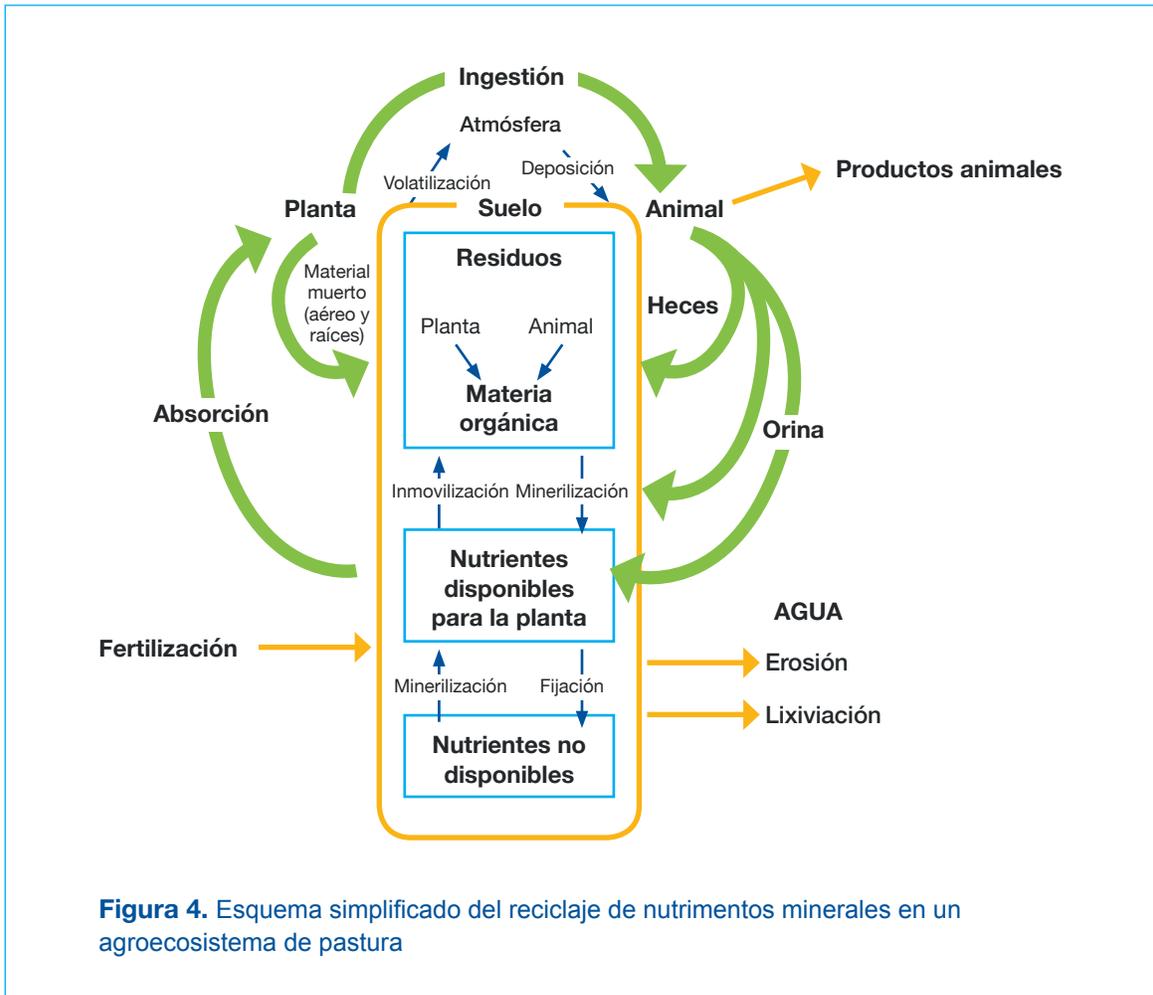
- Descomposición de raíces senescentes y de nódulos desprendidos
- Mineralización de biomasa aérea de leguminosas
- Transferencia a través de las excretas (heces y orina) de animales que consumen las leguminosas
- Excreción de exudados de las raíces (es mínima a nivel de campo)



7. El reciclaje de nutrientes en sistemas de pastoreo: Una guía para definir las necesidades de fertilización

En los sistemas de pasturas manejadas bajo pastoreo ocurre el retorno de los nutrimentos al suelo por medio de las excretas (heces y orina), que son depositadas por los animales. Este es el mecanismo más importante de restitución de los nutrimentos ingeridos; sin embargo, también se presenta a través de la degradación de los residuos vegetales no consumidos por los animales, generalmente hojas y tallos maduros que pasan a formar el denominado “material senescente”, así como las raíces que mueren luego de una defoliación (Figura 4). Lo que sucede es que una porción pequeña de los residuos de las plantas y de las heces pasan directamente a la fracción soluble del suelo; lo mismo sucede con la orina, cuyos nutrimentos están en formas inorgánicas, y por ende llegan a la fracción soluble del suelo. En cambio, la mayor proporción de los residuos de plantas y de las heces pasan a formar parte del “pool de materia orgánica”, el cual necesita ser procesado por la microfauna y microflora del suelo antes de llegar a la fracción soluble del suelo, que es de donde las plantas absorben los nutrimentos en sus formas inorgánicas. Aquí conviene anotar que el uso de algunos productos como las ivermectinas (utilizadas para el control de parásitos), afectan la microfauna y microflora del suelo responsable de la mineralización de materia orgánica (Madsen *et al.* 1990); por lo que hay que ser muy cuidadosos en su uso.

Ahora bien, hay que considerar que no todos los nutrimentos que se reciclan en los sistemas de pastoreo son utilizados por las plantas. Hay diversas pérdidas, como las del nitrógeno contenido en la orina, que se pierden por efecto de la volatilización del amoníaco, las pérdidas de nutrientes altamente solubles en agua por procesos de lixiviación y pérdidas de nutrientes contenidos en las heces por efecto de la erosión (producto particularmente de las lluvias intensas y en áreas de pendiente pronunciada); asimismo, especialmente con la lluvia o en ausencia de vientos, se presenta una cierta deposición de nutrientes presentes en la atmósfera (Figura 4).



Se estima que el 75% del nitrógeno, 80% del fósforo y el 85% del potasio ingerido por los animales a través del pasto, retorna al suelo en las heces y la orina (Spain y Salinas 1984). No es despreciable la cantidad total de nutrientes que se pueden reciclar en los sistemas de pastoreo; por el contrario, son bastante importantes y su magnitud va a depender de factores tales como:

- Tipo de pastura
- Tipo de animales manejados bajo pastoreo
- Nivel de consumo y digestibilidad del pasto ingerido
- Carga animal a la que está sometida la pastura
- Método de pastoreo
- Tipo y nivel de suplementación
- Aplicación de fertilizantes

Sólo a manera de ejemplo, Haynes y Williams (1993) estimaron que en pasturas de gramíneas fertilizadas con 400 kg de nitrógeno/ha, manejadas con ganado de carne y bajo una carga animal de 2,5 UA/ha, el retorno de nitrógeno por la orina fue de 295-323 kg ha/año y a través de las heces de 69-76 kg ha/año. Sin embargo, los mismos autores citan que apenas un 20-23% del nitrógeno depositado por la orina se logra convertir en nitratos (NO_3), que es la forma de nitrógeno más asimilable por las plantas. La deposición de excretas en las áreas bajo pastoreo es aleatoria y llega a cubrir sólo una pequeña porción del área de pasturas (Cuadro 9); pero en las manchas de orina cae una cantidad excesiva de nitrógeno que no puede ser totalmente absorbida por las plantas.

Otro aspecto importante a considerar es cuál es la vía más importante de deposición de los nutrientes contenidos en las excretas, pues esto afecta la disponibilidad potencial de los nutrimentos. Para el nitrógeno, potasio y boro, la orina es la principal vía de excreción; en cambio para el fósforo, calcio, magnesio, hierro, manganeso, zinc y cobre, son las heces las que tienen mayor concentración de esos nutrimentos, mientras que en el caso del azufre, el 55% de su volumen llega al suelo a través de las heces y el 45% restante a través de la orina (Spain y Salinas 1984).

Un último aspecto que considerar es cómo podría mejorarse la eficiencia del reciclaje de nutrimentos en sistemas de pastoreo. Algunos criterios importantes a tomar en cuenta son:

- El pastoreo con cargas altas mejora la distribución de las heces y la orina; y el pisoteo resultante acelera el proceso de descomposición de la materia orgánica
- Los sistemas de pastoreo rotacional favorecen una distribución más uniforme de las excretas animales
- El sobrepastoreo favorece la erosión y las pérdidas gaseosas de nutrientes volátiles como el nitrógeno
- Si se tienen comederos y bebederos en los potreros, deben cambiarse de lugar con alguna frecuencia para lograr una mayor área de deposición de excretas
- Se debe maximizar el tiempo de permanencia de los animales en el potrero

Cuadro 9. Área de las pasturas afectadas por la deposición de excretas de ovinos y bovinos en sistemas de pasturas de zonas templadas¹

Parámetro	Ovinos		Bovinos	
	Heces	Orina	Heces	Orina
Área de deposición (m ²)	0,02	0,03 - 0,05	0,05	0,2 - 0,5
Frecuencia diaria	20-25	20	10-15	10
Área cubierta por año (%)	15	25	5	11

¹ Carga animal: 2 UA/ha

Fuente: Haynes y Williams (1993)



8. Eficiencia del uso del fertilizante

La eficiencia del uso de fertilizantes, expresada como la cantidad de los nutrimentos recuperados en el forraje producido, tiene relevancia no sólo desde el punto de vista económico (puesto que el uso excesivo de fertilizantes tiene implicaciones importantes en los costos de producción), sino también por su impacto en la emisión de gases de efecto invernadero (cuando la disponibilidad del óxido nitroso supera la capacidad de absorción de las plantas, éste se emite hacia la atmósfera), y en el paso de nutrimentos no absorbidos por las plantas hacia fuentes de agua (como puede ser el caso del nitrógeno, fósforo, etc.). De hecho, estos últimos son contaminantes importantes en muchos casos resultado de la actividad ganadera (Steinfeld *et al.* 2006), como producto del uso excesivo de fertilizantes o de suplementos.

Todos los suelos no muestran la misma respuesta a la fertilización porque hay diferencias entre ellos en cuanto al potencial de disponibilidad de los nutrientes aplicados; tal es el caso del P que suele ser uno de los nutrientes con mayor retención en los suelos. En el Cuadro 10 se muestra la eficiencia de absorción de nutrimentos para algunos tipos de suelo, la cual está en función de la disponibilidad de los nutrientes para las plantas y es afectada por condiciones del suelo tales como porosidad, textura, estructura, tipo de material parental, cantidad de materia orgánica, densidad aparente, etc.

8.1 ¿Cómo estimarla?

En general, la eficiencia de aprovechamiento de los fertilizantes dependerá en gran medida de las condiciones edáficas en que se desarrolla la pastura, pero también de la forma como se aplican los fertilizantes. A nivel de laboratorio se puede evaluar la eficiencia del uso de fertilizantes mediante análisis químicos y por las llamadas curvas de retención. Sin embargo, en la práctica la mejor expresión es el denominado producto marginal, es decir, la cantidad de forraje que se obtiene por unidad de fertilizante adicional que se aplica.

En la Figura 5 se presentan los resultados de producción de materia seca del pasto ratana bajo diferentes niveles de aplicación de nitrógeno, obtenidos por Villarreal *et al.* (2010), en la zona de San Carlos, Costa Rica. Se observa que los rendimientos son decrecientes, es decir que la respuesta a la aplicación de fertilizantes tiende a declinar a medida que se incrementa el nivel de aplicación (Cuadro 11).

Cuadro 10. Eficiencia en la absorción (%) de los principales nutrimentos en suelos vertisoles, andisoles (de origen volcánico) y suelos rojos (ultisoles y alfisoles)

	Vertisoles	Andisoles	Ultisoles-alfisoles
Nitrógeno	- Alta volatilización si se usan fuentes amoniacales - Hay desnitrificación si se siembra en suelo inundado y se usan nitratos	- Se presenta lixiviación con nitratos - Puede presentarse desnitrificación localizada	- Alta lixiviación de nitratos - Puede presentarse volatilización de amonio
	(50-65% de eficiencia)	(55-65% de eficiencia)	(50-55% de eficiencia)
Fósforo	45-50% de eficiencia	30-35% de eficiencia	35-40% de eficiencia
Potasio	Alta fijación según el tipo de arcilla	Evidencia de lixiviación	Alta lixiviación
	(60-65% de eficiencia)	(70-80% de eficiencia)	(60-70% de eficiencia)

Fuente: Bertsch (1998)

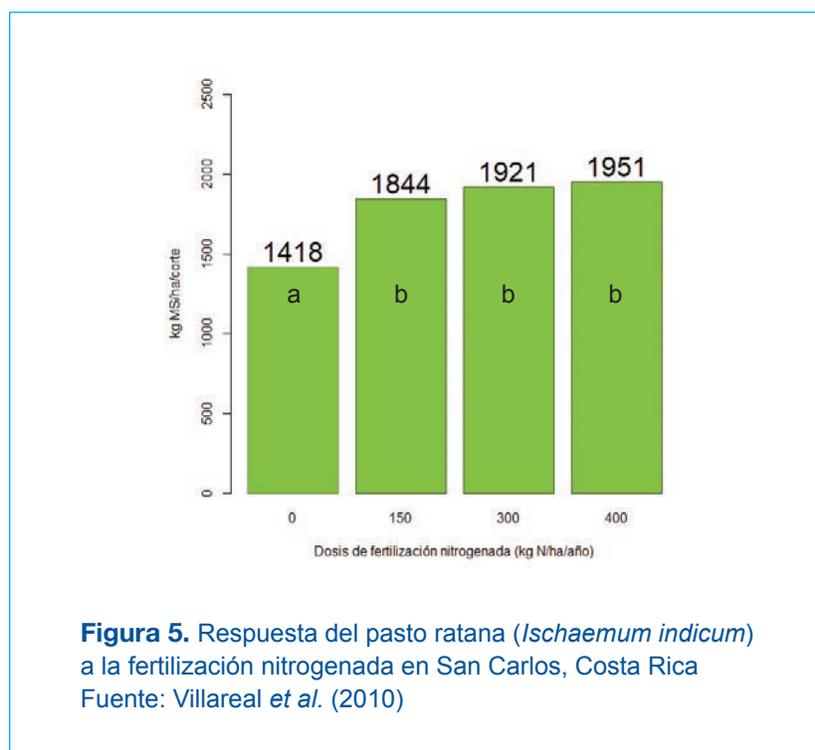
Cuadro 11. Eficiencia de la utilización del nitrógeno (kg de MS/kg N aplicado) por el pasto ratana (*Ischaemum indicum*) en la zona de San Carlos, Costa Rica

Nivel de N fertilizante (kg/ha/año)	Kg MS/kg N
150	24,7 a
300	14,8 b
450	10,7 b

Fuente: Villareal *et al.* (2010)

En términos generales, si se quiere estimar la eficiencia del uso del nutrimento se debe hacer una estimación del aumento en la producción de biomasa forrajera (como materia seca), resultante de la aplicación de un nivel dado de fertilizante, comparado con la misma pastura sin fertilizar (testigo); pero como la eficiencia se refiere a la recuperación del nutrimento aplicado, entonces se necesita estimar el contenido de ese nutriente en el forraje cosechado de las parcelas tratadas con fertilizante y en el testigo.

Eficiencia (%) = $[(\text{kg MS en parcela fertilizada} \times (\% \text{ nutriente en el forraje}/100)) - (\text{kg MS en parcela testigo} \times (\% \text{ nutriente en el forraje}/100))] / (\text{kg nutriente en fertilizante aplicado})$



8.2 ¿Qué factores afectan la eficiencia?

Es claro que en los pastos, al igual que en cualquier otro cultivo, la eficiencia obtenida como respuesta a la fertilización tiende a disminuir conforme aumenta el nivel de fertilizante aplicado; pero también es importante recordar que el incremento en la cantidad de forraje o producto animal por kilogramo de fertilizante aplicado va a estar en función de:

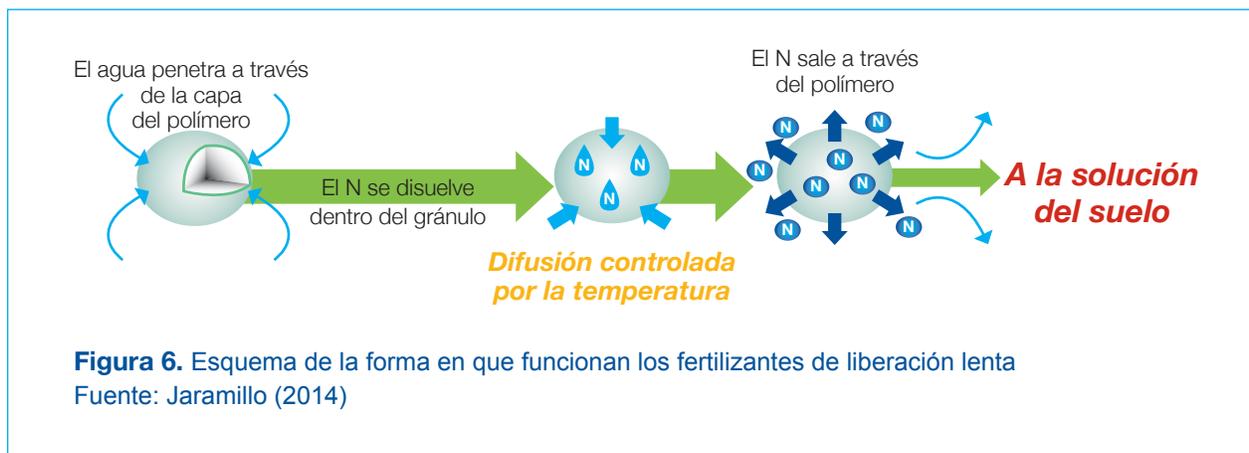
- **El tipo de pasto.** Pastos con mayor potencial de producción como el gigante o las guineas, muestran una mayor respuesta por kilo de fertilizante aplicado que el pasto ratana o el natural.
- **La época del año.** Se necesita humedad en el suelo para que el fertilizante sea aprovechado, pero además la respuesta será mayor en aquellos meses en que se presentan las mejores condiciones de temperatura, humedad y luminosidad que favorezcan la actividad fotosintética de los pastos.
- **El tipo de fertilizante.** Hay fertilizantes que liberan con mayor lentitud los nutrientes, lo cual puede impactar en la reducción de las pérdidas de nutrientes.
- **Dosificación.** El fraccionamiento de las aplicaciones previene que se pierda mucho fertilizante cuando la cantidad de nutrientes disponibles supera la capacidad de las plantas para absorber los nutrientes disponibles en la solución del suelo.
- **Características químicas y mineralógicas del suelo.** Un ejemplo es el tipo de arcilla predominante en el suelo; por ejemplo, los suelos vertisoles (que son muy oscuros y arcillosos y que suelen inundarse durante una parte del año), poseen arcillas con características expandibles (agrietamiento-contracción) y como consecuencia de eso, muchos de los minerales disueltos pasan a capas internas del suelo, llegando a ubicarse hasta a un metro de profundidad. Esto puede incidir en la eficiencia del uso del fertilizante, si es que las plantas no tienen raíces tan profundas.

8.3 Fuentes de liberación lenta para aumentar la eficiencia

El uso desmedido de los nutrientes aplicados como fertilizantes suele tener repercusiones en el ambiente ya que la porción no utilizada por los cultivos regularmente tiene como destino final las fuentes de agua contiguas a las pasturas, causando daño en el agua y a la vegetación circundante (Shaviv 2001). De hecho, los mayores problemas ambientales debido al mal uso de los fertilizantes se encuentran asociados al nitrógeno y fósforo. Cualquiera sea el método de fertilización de las pasturas (la aplicación de amonio o urea y/o el reciclaje natural de los nutrimentos), siempre se presentarán pérdidas por efecto de la volatilización; es más, una gran porción del amonio se llega a convertir en las formas oxidadas del nitrógeno (óxido nitroso y óxido nítrico), las que contribuyen directa o indirectamente a incrementar la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. No debe olvidarse que el óxido nitroso es más poderoso que el metano y el dióxido de carbono en cuanto a su contribución al cambio climático y que puede permanecer en la atmósfera por más de 100 años.

Los fertilizantes de liberación controlada o lenta contienen el nutriente (normalmente nitrógeno), en una forma que –después de la aplicación– demora significativamente más tiempo en estar disponible para la absorción por la planta, en comparación con los fertilizantes de uso común. Este efecto se logra ya sea cubriendo el fertilizante normal (a base de N o N-P-K), con azufre o con un polímero semipermeable (FAO 2002), el cual se asocia con los compuestos del fertilizante. El primer grupo está formado por los productos de la condensación de urea y los aldehídos de urea, entre los que se destacan la urea formaldehído, la di-urea iso-butilideno y la di-urea crotonilideno. El segundo grupo está conformado por la urea que tiene un recubrimiento o se presenta encapsulada, como es el caso de la urea cubierta de azufre o recubierta con polímeros (Chien *et al.* 2009).

Debido a que la liberación del nitrógeno contenido en fertilizantes de liberación controlada o lenta generalmente depende también de la temperatura y de la humedad del suelo, este nutriente se hará disponible cuando se presenten las condiciones adecuadas para el crecimiento de la planta. El mecanismo de operación se ilustra en la Figura 6.



Las principales ventajas de los fertilizantes de liberación lenta son el ahorro en la mano de obra (en lugar de repartir el fertilizante en varias aplicaciones, se necesita sólo una para el período completo de crecimiento), la reducción de los riesgos de toxicidad (aún con altas tasas de aplicación), y el ahorro en la cantidad de fertilizante aplicado dado que se logra una mayor eficiencia en el uso del nitrógeno y, de esa manera, se puede reducir su aplicación de un 15 a 20%, sin afectar el rendimiento.

Aunque estos beneficios han sido probados principalmente en el cultivo de arroz, una desventaja de los fertilizantes de liberación lenta para la agricultura es el costo por unidad de nutriente, el cual es considerablemente más elevado que el de un fertilizante común. De allí que los fertilizantes de liberación controlada y de respuesta lenta son usados casi exclusivamente en cultivos de elevado valor, tales como las hortalizas y los ornamentales; por lo que en el caso de las pasturas es necesario investigar sobre la relación económica de su aplicación y los ingresos generados por los incrementos en la producción. Además, hay preocupación de algunos investigadores (Shaviv 2001) sobre el potencial de contaminación ambiental que algunas de las fuentes inorgánicas utilizan en su preparación.

8.4 La inhibición biológica de la nitrificación

La nitrificación es un proceso microbiano que forma parte del ciclo del nitrógeno en el suelo y determina la forma en la que el nutriente se presenta en el sistema y, en consecuencia, la forma en que será absorbido por las plantas. Durante la nitrificación, el amoníaco (NH_4^+)-que es una forma inmóvil y muy poco aprovechable por las plantas- se convierte en nitrato (NO_3^-), que es fácilmente asimilable por las plantas. Sin embargo, el nitrato formado es muy susceptible de perderse ya sea por lixiviación o desnitrificación, antes de ser absorbido a través de las raíces (Subbarao *et al.* 2007). Esto va a tener implicaciones directas sobre la fijación del nitrógeno en la planta y su ausencia resultará en un incremento en los costos en fertilización.

La gran mayoría de las leguminosas, incluyendo el maní forrajero (*Arachis pinto*), muestran inhibición biológica a la nitrificación; este fenómeno también ha sido reportado en algunas gramíneas como la *Brachiaria humidicola* y *B. brizantha* (Subbarao *et al.* 2007). Esta es un área sobre la cual se encuentran trabajando investigadores del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), quienes evalúan diversas especies de gramíneas tropicales; y se esperan mayores avances en los próximos años.

8.5 Inhibidores de la nitrificación y de la hidrólisis de la urea

A principios de la década de los 70 se probaron varios compuestos capaces de retardar o inhibir la oxidación del amonio (NH_4^+), para producir nitrógeno nítrico (NO_3^-), y, de esa manera, prevenir la presencia de este compuesto en cantidades tales que superaran la capacidad de absorción de las plantas. Lo anterior no solo tiene implicaciones sobre la eficiencia del uso de los fertilizantes nitrogenados, sino que además puede contribuir a reducir las emisiones de este gas que tiene un efecto invernadero muy superior al metano. Se conocen al menos tres compuestos comerciales capaces de reducir la nitrificación: la nitrapirina, la diciandiamida y el 3,4-dimetilpirazol fosfato (Chien *et al.* 2009). También se ha utilizado el carburo de calcio con un recubrimiento de cera, el cual libera acetileno cuando entra en contacto con el agua; este es un inhibidor muy potente de la nitrificación. Hay muchos estudios sobre el uso de estos

agentes en cultivos tales como el trigo, algodón y arroz inundado y de secano; pero no se dispone de información concreta para el caso de las pasturas, pero no hay razón importante para pensar que no pueda trabajar de una manera similar.

Por otro lado, hay compuestos capaces de inhibir la acción de la ureasa, enzima que actúa sobre la urea para la liberación del nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+); el cual luego se transforma en NH_3 . Como este es un compuesto volátil, se puede perder fácilmente antes de ser usado por las plantas, y por ende, se reduce marcadamente la eficiencia del uso de la urea fertilizante (Jaramillo 2014). Hay una diversidad de compuestos y elementos minerales con capacidad de inhibir la actividad de la ureasa; entre ellos, el compuesto más usado recientemente es el N-(n-butil) triamida tiofosfórica (NBTPT), el cual no ha trabajado muy bien en el cultivo de arroz inundado; sin embargo, datos en Brasil muestran su efectividad en el caso de pasturas, reduciendo hasta seis veces la volatilización del NH_3 , lo cual tendría un efecto muy significativo en la utilización de la urea. Este efecto fue incluso mucho más marcado bajo condiciones de alta humedad y no trabajó eficazmente en ausencia de esta (Chien *et al.* 2009).



Los purines constituyen una estrategia en la fertilización de pasturas y se reducen las exportaciones de nutrientes del sistema.



9. El caso de la fertilización de precisión

El desarrollo de la autonomía de las máquinas, aunada a la gran cantidad de investigación desarrollada en suelos, cultivos y fertilizantes, han permitido disminuir los costos de producción y han favorecido el desarrollo del concepto de la agricultura de precisión, la cual puede describirse como “el conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola” (Chartuni *et al.* 2007).

La agricultura de precisión se basa en la identificación e interpretación de la variabilidad espacial en el campo a través de sensores remotos. Esta comprende el uso de tecnologías de última generación como son los drones, los cuales se combinan con el uso de sistemas GPS, sensores, imágenes satelitales y aéreas; los datos registrados en campo son procesados mediante los sistemas de información geográfica (SIG).

Aunado a lo anterior, el uso de software libre y la posibilidad de usar vehículos no tripulados manejados mediante un control remoto y que además resultan mucho más económicos que un sobrevuelo con una nave tripulada, es posible realizar el mapeo de la variabilidad a gran escala, logrando observar variaciones de hasta 0,6 m de resolución. Además, el uso de las bandas radiométricas que permiten evaluar aspectos como el estrés hídrico, presencia de plagas, áreas de suelo desnudo sin cobertura de pastos, áreas de concentración de ciertos minerales, limitantes productivas presentes en las fincas como las piedras, pendientes, anegamiento y hasta el movimiento del ganado, se están convirtiendo en herramientas que cada vez van a tener mayor aplicación en la ganadería.

Pero, para comprender y aplicar esta agricultura es necesario definir los siguientes conceptos básicos:

- **Variabilidad espacial:** expresa las diferencias de producción en un mismo campo, en una misma campaña de una misma cosecha.
- **Variabilidad temporal:** formula los cambios de producción en un mismo campo, en distintas campañas de la misma cosecha.

Chartuni *et al.* (2007) indica que la aplicación del concepto de agricultura de precisión es posible gracias a la aplicación de cinco tecnologías:

1. Sistema de posicionamiento global (GPS)
2. Sistemas de información geográfica (SIG)
3. Percepción remota (imágenes, fotos, etc.)
4. Tecnologías de dosis variables (sensores, controladores, etc.)
5. Análisis de datos geo-referenciados (geoestadística, análisis de conglomerados (“cluster”), análisis multi-temporal, análisis multifactorial, etc.)

Aunque muchos de los esfuerzos sobre fertilización de precisión han estado dirigidos hacia la producción de granos como el maíz, soya y algodón, esta tecnología está tomando protagonismo por su aplicación en otras actividades productivas como la producción de forrajes para el ganado, especialmente por las ventajas comparativas que presenta en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero comparado con la ganadería tradicional.

En cuanto a la técnica de la fertilización de precisión, es posible evaluar temporalmente el efecto de las enmiendas, el fertirriego y la respuesta inmediata de los fertilizantes sobre la pastura, con el fin de tomar decisiones inmediatas que permitan incrementar la producción mediante un control oportuno de las fugas y pérdidas de nutrientes que se suelen presentar en los sistemas de producción.

En resumen, la adopción de la agricultura de precisión representa un potencial para la racionalización del sistema productivo moderno ya que permite:

- Optimizar la cantidad de agroquímicos fertilizantes o correctivos aplicados en los suelos.
- Establecer la magnitud de la correlación de la variabilidad espacial y/o temporal entre los factores asociados al suelo y al desarrollo de los cultivos.
- Determinar la disponibilidad de nutrientes, materia orgánica, acidez, disponibilidad de agua, textura, distribución de enfermedades, plagas, malezas, entre otros.
- Reducir los costos de producción y la contaminación ambiental.
- Mejorar la calidad de las cosechas.



10. Consideraciones finales

La fertilización de pasturas forma parte de las estrategias de intensificación de los sistemas de producción ganadera; sin embargo, hay que ser cautos en la aplicación de esta práctica para no afectar la sostenibilidad de dichos sistemas, no sólo por su impacto en los costos de producción y eventualmente en la competitividad de la actividad, sino porque además el uso excesivo y no planificado de los fertilizantes puede ejercer impactos negativos directos e indirectos sobre el ambiente. Directos, porque cuando se usan niveles superiores a la capacidad de absorción de las plantas habrá mayores emisiones de óxido nitroso a la atmósfera y/o contaminación de las fuentes de agua con residuos derivados de la solubilización de los fertilizantes aplicados; indirectos, por las emisiones asociadas con la producción, transporte y distribución de los fertilizantes. Por ello es importante conocer la disponibilidad de nutrientes en los suelos donde se producen las pasturas, los requerimientos de los pastos, la extracción de nutrientes en el forraje -en sistemas de corte y acarreo- o en los productos animales -en sistemas de pastoreo-, y qué prácticas favorecen la reducción de la demanda de nutrimentos aplicados vía fertilización, así como el incremento en la eficiencia de uso de los fertilizantes utilizados en las pasturas.

En cuanto a la reducción de la demanda de nutrimentos aplicados vía fertilización, se propone el uso de especies o variedades adaptadas a suelos ácidos cuando éste es el factor limitante, así como de aquellas con menor demanda interna y externa de ciertos nutrientes (en especial el fósforo); la incorporación de leguminosas con buena capacidad para la fijación de nitrógeno atmosférico y de su transferencia a las gramíneas acompañantes; promover el mejor uso de los mecanismos de reciclaje de nutrimentos vía excretas animales e incluir -cuando sea posible- la rotación de pastos con cultivos, de manera que los primeros hagan un uso adecuado del efecto residual de los fertilizante aplicados en los cultivos en rotación.

En cuanto a la mejora en la eficiencia del uso de los fertilizantes, se propone considerar las dosis, frecuencias, momentos y métodos de aplicación que permitan un mejor uso de los nutrientes, el uso de fuentes de liberación lenta y de compuestos que inhiban la nitrificación en el suelo, cuando su costo lo permita; así como el uso de especies que poseen mecanismos para inhibir naturalmente las pérdidas de nitrógeno por nitrificación. Estas áreas, así como el uso de técnicas de fertilización de precisión son las que se verán más desarrolladas en los próximos años.



11. Referencias

- Ayarza, MA. 1991. Efecto de las propiedades químicas de los suelos ácidos en el establecimiento de las especies forrajeras. *In* Lascano, CE; Spain, JM (eds.). Memoria. Establecimiento y Renovación de Pasturas: Conceptos, Experiencias y Enfoque de Investigación (1988, Veracruz, México). CIAT, Cali, Colombia. pp. 161-185. (Publicación CIAT no. 168).
- Bernal, EJ. 1984. Manual pastos y forrajes para Colombia. 4ta ed. Medellín, Colombia, Federación Antioqueña de Ganaderos. 273 p.
- Bertsch, F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 157 p.
- Chartuni, E; Carvalho, FdAd; Marcal, D; Ruz, E. 2007. Agricultura de precisión: nuevas herramientas para mejorar la gestión tecnológica en la empresa agropecuaria. *Revista Palmas* 28(4):29-34.
- Chien, SH; Prochnow, LI; Cantarella, H. 2009. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy* 102:267-322.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2002. Los fertilizantes y su uso. Roma, Italia. 83 p.
- Gutiérrez, MA. 1996. Pastos y forrajes en Guatemala: su manejo y utilización, base de la producción animal. Guatemala, Universidad de San Carlos. 318 p.
- Haynes, R; Williams, P. 1993. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Advances in Agronomy* 49:119-199.
- Jaramillo VR. 2014. Perspectivas en el uso eficiente de fertilizantes: Nuevas tecnologías y retos en el futuro de una agricultura sostenible. Georgia, United States of America, International Plant Nutrition Institute. 81 p.
- Madsen, M; Overgaard-Nielsen, P; Holter, O.C; Pedersen, J; Brochner Jespersen, KM; Vagn Jensen, PN; Gronvold, J. 1990. Treating cattle with ivermectin: Effects on the fauna and decomposition of dung pats. *Journal of Applied Ecology* 27:1-15.
- Rao, IM; Borrero, V; Ayarza, MA.; García, R. 1995. Adaptation of tropical forage species to acid soils: the influence of varying phosphorus supply and soil type on plant growth. *In* Date, RA; Grundon, NJ; Rayment, GE; Probert, ME (eds.). *Plant Soil Interactions at Low pH: Principles and Management*. (Proceedings) Proceedings of the Third International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH (1993, Queensland, Australia). Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic. p. 235-241.
- Salas Camacho, R. 2017. Manejo de suelos y enmiendas como base para la producción eficiente de forrajes. (Presentación con diapositivas). *In* Congreso Nacional Lechero (XXII, 2016). San José, Costa Rica. Consultado 21 Jul 2017. Disponible en <http://proleche.com/recursos/documentos/congreso2016/Charla6.pdf>.
- Sánchez, PA. 1976. Properties and management of soils in the tropics. New York, United States of America, Wiley. 618 p.
- Shaviv, A. 2001. Advances in controlled-release fertilizers. *Advances in Agronomy* 71:1-49.

- Spain, JM; Salinas, JG. 1984. El reciclaje de nutrimentos en pastos tropicales. Cali, Colombia, CIAT. 58 p. (Trabajo presentado en el "Simposio de reciclagem de nutrientes e agricultura de baixos insumos nos trópicos", en la XVI Reunião Brasileira de Fertilidade do solo. 22-27 Julio 1984. CEPLAC. Itabuna, Brasil).
- Steinfeld, H; Gerber, P; Wassenaar, T; Castel, V; Rosales, M; Haan, C. de. 2006. Livestock Long Shadow: Environmental Issues and Options. The Livestock and Environment Development Initiative (LEAD). Rome. Italy, FAO. 392 p.
- Subbarao, G; Rondon, M; Ito, O; Ishikawa, T; Rao, IM; Nakahara, K; Lascano, C; Berry, W. 2007. Biological nitrification inhibition (BNI)—is it a widespread phenomenon? *Plant and Soil* 294(1-2):5-18.
- Villarreal, M; Ducca, E; Alfaro, O; Villalobos, E; Rodríguez, C. 2010. Respuesta del pasto ratana (*Ischaemum indicum*) a la fertilización nitrogenada. Trabajo final de graduación. Alajuela, Costa Rica, ITCR. 73 p.



12. Anexos

Anexo 1. Resultados de laboratorio del análisis del suelo



LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, TEJIDO VEGETAL Y AGUAS.
TEL: (506) 25582377. FAX 25582060. Http://www.catie.ac.cr

Nombre del Cliente:
Nombre Agricultor:
Dirección de la Finca:
Tipo de muestra: Suelo.
Fecha Ingreso: 27/02/2017.
Fecha Análisis: 13/03/2017.
Fecha de Reporte: 14/03/2017.
Método Análisis: Extracción en Olsen Modificado pH 8.5, para determinación de Cu, Zn, Mn, Fe, K y P.
Extracción en Cloruro de Potasio 1N para determinación de Ca, Mg y Acidez Intercambiable.
pH en agua.

No. Reporte: NR17-024

No.	Identificación	Prof.	pH	Acidez	Ca	Mg	K	P	Cu	Zn	Mn	Fe	% Saturación acidez	C.I.C.E. (cmol+/l)	
Lab.		cm	H ₂ O	—cmol(+)/l—				mg/l	—mg/l—				(Acidez Extraíble X 100)/(Ca+Mg+K+Acidez)	(Ca + Mg + K + acidez extraíble)	
LS17-	213	M 1	0-20	5.3	7.26	0.35	0.98	0.10	4.4	11.0	1.2	115	67	83.54	8.69
LS17-	214	M 2	0-20	5.2	1.15	3.14	0.31	0.15	3.3	7.8	0.9	17	260	24.21	4.75

Los resultados anteriores corresponden a las muestras ingresadas al laboratorio por el cliente.

Anexo 2. Abreviaturas de los elementos químicos (nutrientes) y su símbolo citados en el documento

Aluminio: Al	Magnesio: Mg
Azufre: S	Manganeso: Mn
Boro: B	Molibdeno: Mo
Calcio: Ca	Nitrógeno: N
Cobalto: Co	Potasio: K
Fósforo: P	Sodio: Na
Hierro: Fe	Zinc: Zn

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) es un centro regional dedicado a la investigación y la enseñanza de posgrado en agricultura, manejo, conservación y uso sostenible de los recursos naturales. Sus miembros son Belice, Bolivia, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Venezuela y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).



ISBN: 978-9977-57-696-1

