

Innovación y tecnología para mejorar la sustentabilidad agrícola en el sector pecuario

Rodrigo Ortega Blu¹

¹Departamento de Ingeniería Comercial. Universidad Técnica Federico Santa María, Avenida Santa María 6400, Vitacura, Santiago.
E-mail: rodrigo.ortega@usm.cl

Introducción

El sector pecuario de América Latina ha crecido fuertemente durante los últimos años. Muchos países de la región se encuentran entre los primeros 20 productores mundiales de carne y sus tasas de crecimiento están entre las más elevadas del mundo, tal como ocurre en el caso de la producción de cerdos (Tabla 1). Este crecimiento ha generado un desarrollo de las cadenas productivas de la industria pecuaria, contribuyendo al empleo, en particular en aquellas explotaciones más intensivas y al desarrollo rural. Sin embargo, este explosivo desarrollo ha generado impactos ambientales importantes sobre los recursos naturales, suelo, agua y aire, existiendo la imperiosa necesidad de realizar manejos más sustentables, que aumenten la eficiencia productiva y minimicen los efectos negativos sobre el ambiente. Esto es más relevante aún bajo el contexto de cambio climático, caracterizado por un aumento de las temperaturas, déficit hídrico y lluvias más cortas e intensas, entre otros.

La innovación y la aplicación de tecnologías apropiadas son claves para enfrentar los desafíos productivos y ambientales de la agricultura moderna.

En el presente trabajo se presentarán algunas innovaciones y tecnologías relevantes para mejorar la sustentabilidad de los sistemas pecuarios.

Tabla 1. Posición a nivel mundial, producción total de carne de cerdo y tasa de crecimiento estimada para el año 2019 para países latinoamericanos seleccionados.

Producción			Tasa de crecimiento		
Lugar	País	(Ton x 1000)	Lugar	País	(%)
4	Brasil	3975	2	Argentina	8.06
9	México	1375	4	Colombia	7.05
14	Argentina	670	5	Brasil	5.63
15	Chile	555	6	México	4.09
17	Colombia	410	7	Chile	3.93

Fuente: USDA

El rol de la información

Contar con información detallada y oportuna es clave para la adecuada toma de decisiones para un manejo sustentable. Agricultura de Precisión puede definirse como “buena agronomía, con información de calidad”, es decir que los manejos agronómicos se realicen en base a información sitio-específica oportuna, alejándose de los manejos promedios, basados en una receta única. Dicha información se genera a partir de datos colectados con distintos instrumentos y sensores, procesados a través de algoritmos apropiados (Figura 1). Claramente, en el escenario descrito anteriormente se requiere de más y mejor información para producir de manera eficiente y sustentable.



REP	SEM	MATERIAL	PAQUETA	C/J	MS	P	E	S	CA	MS	C/J	MS	P	E	S	CA	MS	C/J	MS	P	E	S	CA
10000	10-01-76	1	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	2	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	3	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	4	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	5	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	6	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	7	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	8	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	9	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	10	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	11	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	12	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	13	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	14	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	15	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	16	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	17	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	18	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	19	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10000	10-01-76	20	100	0.00	1.00	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 \dots + \beta_kx_k + \epsilon$$

Cuartel	Rendimiento (kg/ha)
1	6000
2	7500
3	10500
4	12000

Figura 1. De datos a información. Las decisiones de manejo deben hacerse a través del análisis de datos apropiadamente colectados (Ortega y Orellana, 2018).

Manejo integrado del suelo y la nutrición

Para mejorar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas y pecuarios se debe considerar la calidad del suelo como la base de una producción eficiente y sustentable (Figura 2).

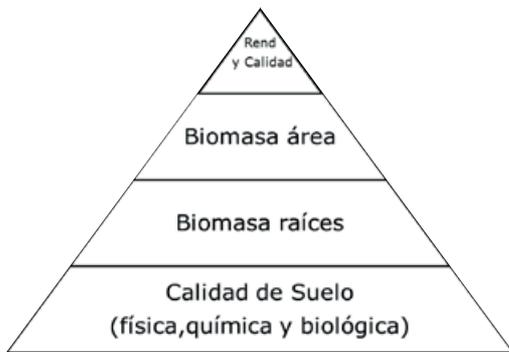


Figura 2. Calidad del suelo como base de una producción sostenible (Ortega, 2015).

Bajo este contexto se desarrolló el concepto de Manejo Integrado de la Nutrición (MIN), que involucra el uso de herramientas de diagnóstico y seguimiento (análisis de suelo, tejido, sensores, etc.), la adecuada estimación de las dosis de nutrientes, las aplicaciones de materia orgánica e inoculantes microbianos, el uso de inhibidores de nitrificación (IN) y el manejo sitio-específico (Figura 3). La aplicación de MIN

permite mejorar la calidad física, química y biológica del suelo, aumentar los rendimientos y calidad de fruta y disminuir la contaminación del agua y el suelo (Ortega, 2015). Las aplicaciones de nutrientes en dosis adecuadas y de materia orgánica pueden hacerse a través del uso de purines y biodigestatos.

- 1 • Uso de métodos de diagnóstico y seguimiento. Suelo, planta, agua, fertilizantes, bioproductos y materia orgánica
- 2 • Adecuada estimación de dosis
- 3 • Uso de inhibidores de nitrificación
- 4 • Aplicaciones de materia orgánica y microorganismos
- 5 • Manejo sitio-específico (AP)

Figura 3. Elementos del Manejo Integrado de la Nutrición (Ortega, 2015).

Uso de métodos de diagnóstico

La base de un manejo sustentable es un buen diagnóstico el que debe ser lo más detallado posible. El mapeo de los suelos es una herramienta fundamental para cumplir con este objetivo.

Según Ortega (2019), existen varias formas de mapear suelo:

Calicatas georreferenciadas

A través de un diseño sistemático de muestreo, se realizan un número apropiado de calicatas en el terreno (> 1 calicata/ha), sobre las cuales se estudian los factores limitantes del suelo (profundidad, textura, presencia de estratas compactadas, piedras, etc.) y se extraen muestras de suelo para la determinación de propiedades físicas y químicas del suelo. A partir de los datos recolectados se extraen estadísticas y se construyen mapas continuos que permiten delimitar zonas de manejo homogéneo, que tienen diferentes características físicas y químicas, las cuales podrían ser manejadas diferencialmente en términos de manejo de suelo (subsulado) o aplicación de fertilizantes o enmiendas.

Muestreo georreferenciado con barreno

Utilizando un diseño sistemático, con muestras espacialmente dependientes (normalmente 1 muestra/ha), se colectan muestras compuestas en cada punto de muestreo, utilizando un barreno de tubo. Las muestras son enviadas al laboratorio para la determinación de propiedades físicas, químicas y biológicas. A partir de estos datos se construyen mapas continuos de cada una de las propiedades del suelo y se delimitan áreas homogéneas. Estos mapas sirven para la aplicación variable de fertilizantes, enmiendas y materia orgánica. Si la intensidad de muestreo es apropiada y existe dependencia espacial, la calidad de los mapas es adecuada, sin embargo, el gran problema es el alto costo, considerando que como mínimo debe colectarse > 1 muestra de suelo/ha, cada una de las cuales se envía al laboratorio para su análisis separado. Además, se pierde algún nivel de detalle en la variación de las propiedades del suelo.

Mapeo de suelos a través de emisión de rayos gama

Todos los suelos naturalmente emiten radiación gama, derivada de sus isótopos más estables como potasio (40), cesio (137), torio (232) y uranio (238). Los sensores de rayos gama son capaces de medir estas señales, las cuales representan a la mineralogía del suelo y son estables temporalmente, no siendo afectadas por la humedad ni la cobertura vegetal del suelo (Figura 4). Normalmente, estos sensores se montan en un vehículo a una cierta distancia del suelo

y con la ayuda de un sistema de navegación global satelital (GNSS) colectan datos georreferenciados (Foto 1). A partir de estos datos, se construyen mapas de radiación gama del suelo y se colectan muestras en lugares estratégicos del área estudiada. Finalmente, a partir del mapa de radiación y los resultados analíticos de las muestras de calibración, utilizando algoritmos apropiados, se construyen mapas detallados de las propiedades del suelo. A la fecha, es posible derivar más de 20 propiedades del suelo, con un alto grado de detalle, con un promedio mayor a 700 puntos de medición/ha (Figuras 4 y 5).

Foto 1. Sensor de rayos gama SoilOptix (gentileza de SoilOptix, Canadá y Neoag Agricultura de Precisión).



A partir de las propiedades fisicoquímicas evaluadas, se construyen zonas de manejo homogéneo para el diseño del riego, la aplicación de enmiendas y la fertilización sitio-específica (Figura 6).

Junto al gran nivel de detalle de los mapas (>700 puntos/ha vs 1 punto/ha de las tecnologías tradicionales), una gran ventaja de la tecnología de rayos gama es la disminución de los costos de mapeo. El mapeo puede repetirse cada 3 años, por lo que el costo anual/ha es muy bajo, en relación con los grandes beneficios que presta tanto en lo productivo como ambiental.

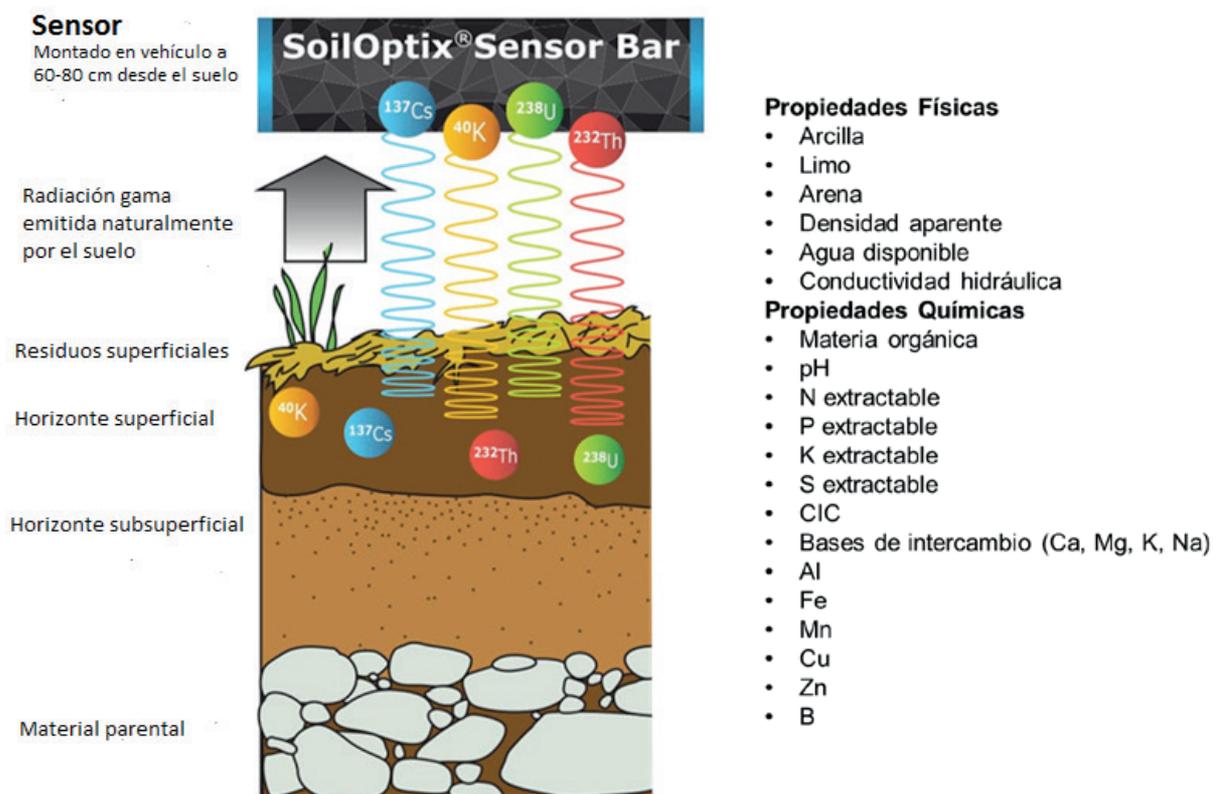


Figura 4. Funcionamiento de la tecnología de rayos gama y propiedades del suelo determinadas (fuente: SoilOptix).

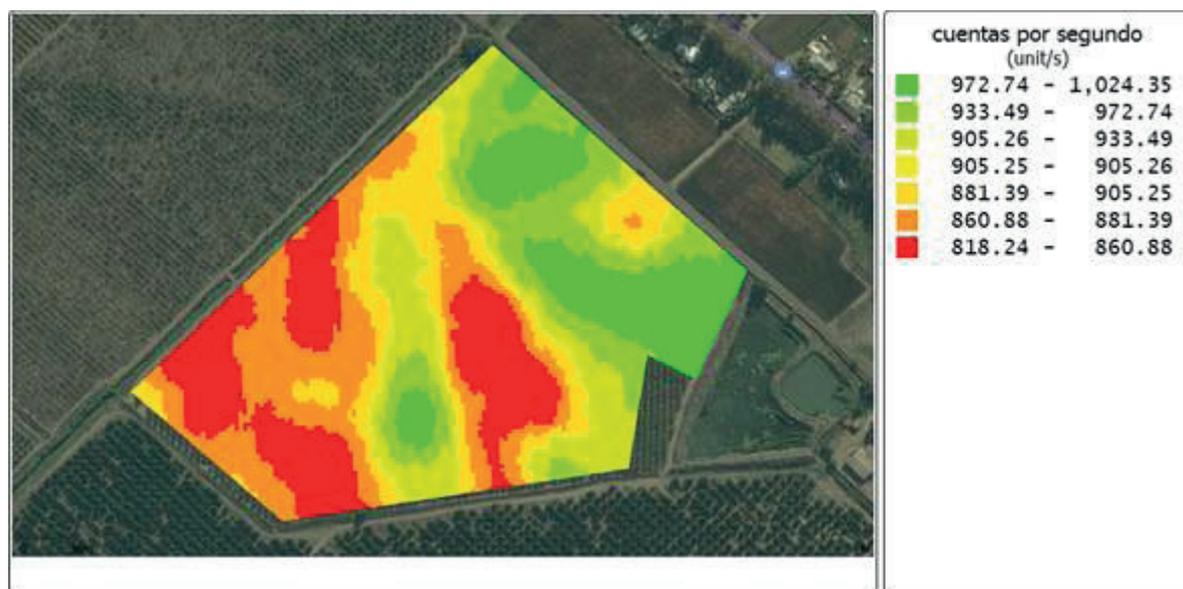


Figura 5. Mapa de radiación gama del suelo en un cuartel de la zona central de Chile obtenida con sensor SoilOptix (gentileza Neoag Agricultura de Precisión).

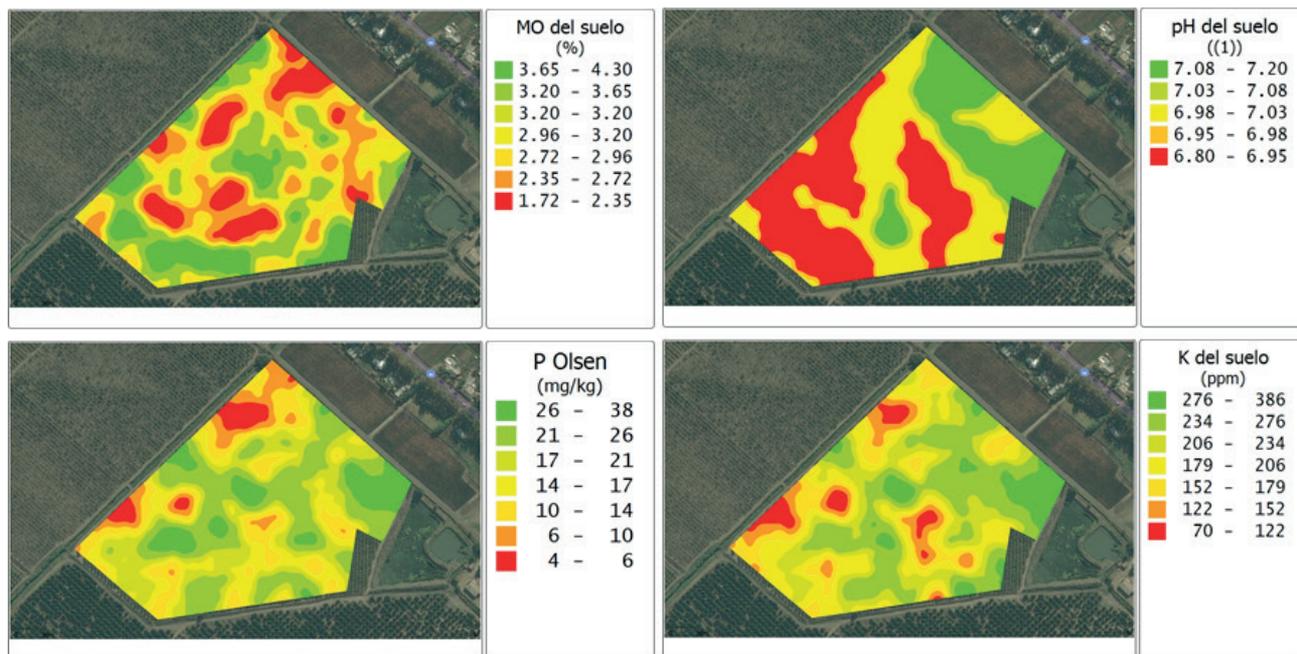


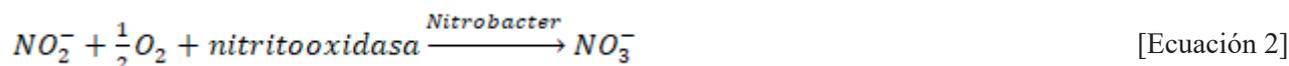
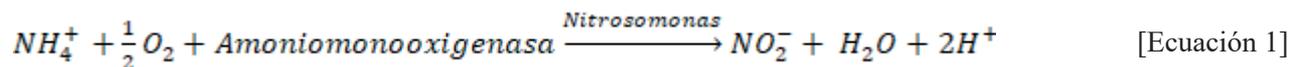
Figura 6. Mapas detallados de propiedades químicas del suelo determinadas con sensor de rayos gama SoilOptix (gentileza Neoag Agricultura de Precisión).

Inhibidores de nitrificación

El nitrógeno (N) es el nutriente más importante en la producción de cultivos y praderas; si bien es muy abundante a nivel atmosférico (78% de N en la atmósfera terrestre), es normalmente deficiente en el suelo, cuando se necesita sostener altos rendimientos. Dado su ciclo en el suelo, el nitrógeno es muy susceptible a pérdidas por volatilización, lixiviación y desnitrificación, las que deben ser minimizadas para aumentar su eficiencia de uso, la cual es, en general, baja y alcanza en promedio un 40% (Figura 7). Junto a las pérdidas derivadas del ciclo de N en el suelo, el mayor responsable de la baja eficiencia de recuperación del N aplicado, son las altas dosis de N utilizadas, que

muchas veces exceden los requerimientos reales de los cultivos, especialmente cuando se aplican purines. Es por ello que la integración de tecnologías es clave, pues ninguna de ellas *per se* permitirá alcanzar los objetivos productivos y ambientales trazados.

La mayoría de las transformaciones que ocurren con el N en el suelo son mediadas por microorganismos y sus sistemas enzimáticos. Los inhibidores de nitrificación (IN) funcionan a través de la inhibición de la actividad de la enzima amoniomonooxigenasa (AMO) responsable de transformar el amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-). El nitrito se transforma posteriormente en nitrato (NO_3^-) por acción de la enzima nitrito oxidasa (Ecuaciones 1 y 2).



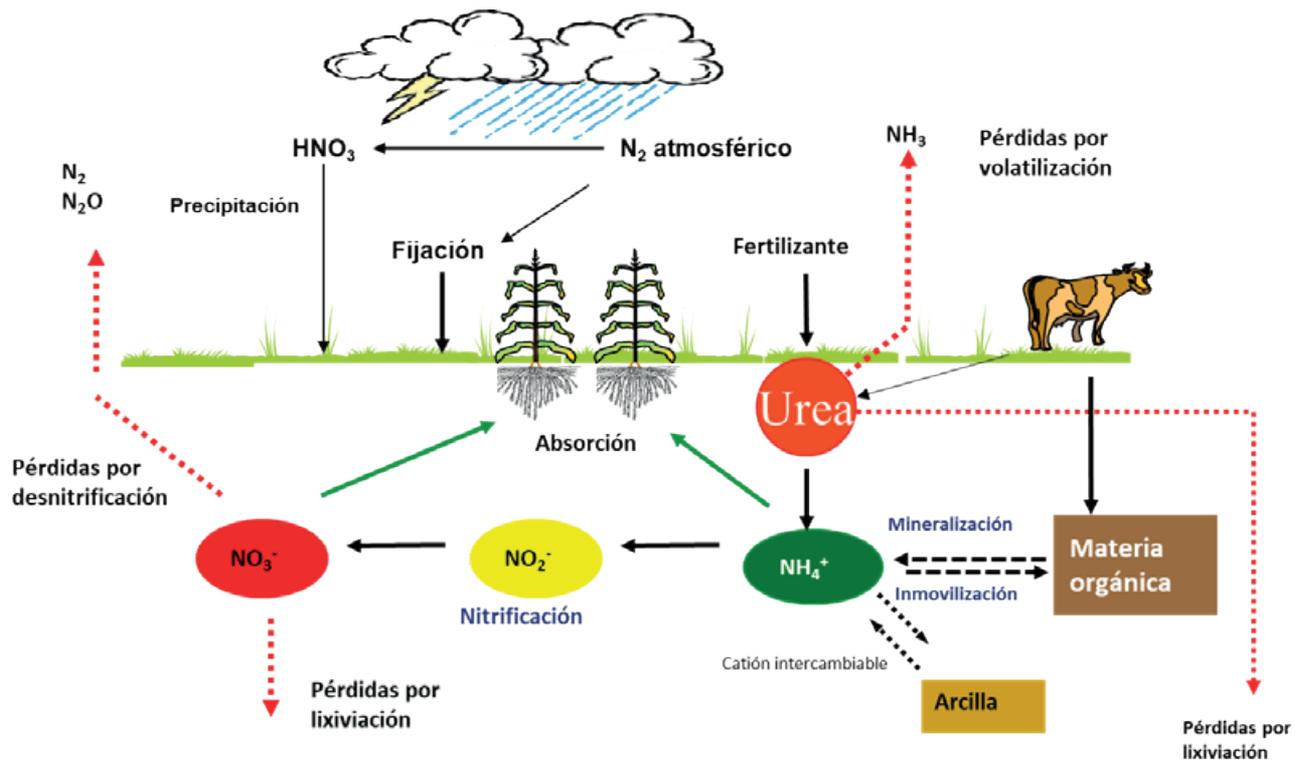


Figura 7. Ciclo del nitrógeno mostrando las entradas y salidas (pérdidas) del sistema (Ortega, 2019).

Los IN ralentizan la transformación de amonio a nitrito y de este a nitrato. Así, el NH_4^+ , que tiene carga positiva, permanece adsorbido en las cargas negativas del suelo, evitando la pérdida de N por lixiviación de NO_3^- . Por otra parte, el NH_4^+ es estable en condiciones de exceso de humedad, reduciéndose las pérdidas por desnitrificación (respiración del NO_3^-) (Figura 7). Esto significa mayor disponibilidad de N para la planta, lo que permite reducir la dosis de N para el cultivo, aumentar la eficiencia de utilización de N y reducir las pérdidas de N al medio ambiente.

La tecnología de los IN se desarrolló a partir de los años 70. Sin embargo, su mayor desarrollo y utilización de produjo a partir del año 2000. Existen numerosos compuestos que son capaces de inhibir la acción de la enzima AMO, siendo los más conocidos: nitrapirina, diaciandiamida (DCD), 3,4 dimetil pirazol fosfato (3,4 DMPP) y 3,5 dimetil pirazol fosfato (3,5 DMPP). Numerosas investigaciones han determinado que el compuesto más eficiente, que actúa además de manera específica sobre la enzima AMO, con un efecto bacteriostático sobre las *nitrosomonas* y sin efecto bactericida sobre las poblaciones de microorganismos benéficos del suelo es el 3,4 DMPP. Es por ello que es un compuesto particularmente apto para prácticas de

MIN donde además se incluye el uso de inoculantes microbianos.

Es importante señalar que el año 2013 en Nueva Zelanda, se encontraron trazas del IN diaciandiamida (DCD) en la leche, por lo que se suspendió su uso a nivel global, a pesar de que su presencia no revestiría riesgo para la salud humana. En el caso del 3,4 DMPP no se ha detectado su presencia en alimentos.

Los inhibidores de la nitrificación pueden ser utilizados en distintas formas:

1. En conjunto con los fertilizantes amoniacales (sulfato de amonio, fosfato mono- y di-amónico), que se transformarán en amonio (urea), o que contienen una fracción de su N en forma de amonio (nitrato de amonio, UAN).
2. Directamente al suelo para inhibir el nitrógeno (NH_4^+) que se mineraliza desde la materia orgánica.
3. En conjunto con purines, digestatos o estiércoles estabilizados que contienen una gran proporción de amonio en su composición y que se mineralizarán en el suelo produciendo más amonio.

4. En procesos de compostaje para mejorar la conversión de N mineral a N orgánico (nitrógeno de la biomasa microbiana).

Las dosis de aplicación de un IN normalmente varían entre 0,7 y 1,3 % del N-NH₄, es decir si se aplican 100 kg de N-NH₄/ha, deberían aplicarse entre 0,7 y 1,3 kg i.a/ha.

El primer efecto de la aplicación de IN es la reducción de las pérdidas de N disponible en el suelo. Así, con la aplicación de IN habrá más N disponible (N-NH₄ + N-NO₃) en el suelo, lo que permite reducir las dosis de N para el cultivo entre un 30 y un 50%, dependiendo del suelo y la especie. En la Figura 8 se muestran las distribuciones del N disponible en el suelo, para tres tratamientos: urea sola, urea + 3,4 DMPP y sulfato de amonio + 3,4 DMPP; puede observarse que, para cualquier percentil (% acumulado), los contenidos de N son mayores en los tratamientos con 3,4 DMPP, siendo el sulfato de amonio + 3,4 DMPP aquel que produce los mejores resultados en términos de N disponible.

Un segundo efecto es el aumento en la eficiencia de uso del N, la cual, como se dijo anteriormente, es inversamente proporcional a la dosis de N y una disminución de las pérdidas por lixiviación, lo que constituye un efecto ambiental muy positivo.

El aumento en la eficiencia de recuperación del fertilizante es cercano al 50%, lo que permite reducir proporcionalmente la dosis de N usada.

En muchos suelos, que mineralizan suficiente N para sostener buenos rendimientos de cultivos, el uso de IN solo permite asegurar que dicho N estará disponible para el cultivo. Se han obtenido excelentes resultados con esta práctica.

Aparte de los efectos en términos de aumento de eficiencia de uso del N y disminución de las pérdidas de N al ambiente, el uso de IN tiene otros efectos importantes.

1. Aumento de la absorción de P, producto de la mayor absorción de NH₄⁺ en la planta. Esto se traduce en más y mejores raíces y calidad de las cosechas.
2. Aumento del N metabolizado en los tejidos lo que se traduce en plantas más equilibradas y mejor calidad de las cosechas.
3. Menor gasto energético en la asimilación de N que finalmente puede traducirse en producción de materia seca.
4. Menores niveles de N-NO₃ en los tejidos, en particular en hortalizas de hoja, que significa

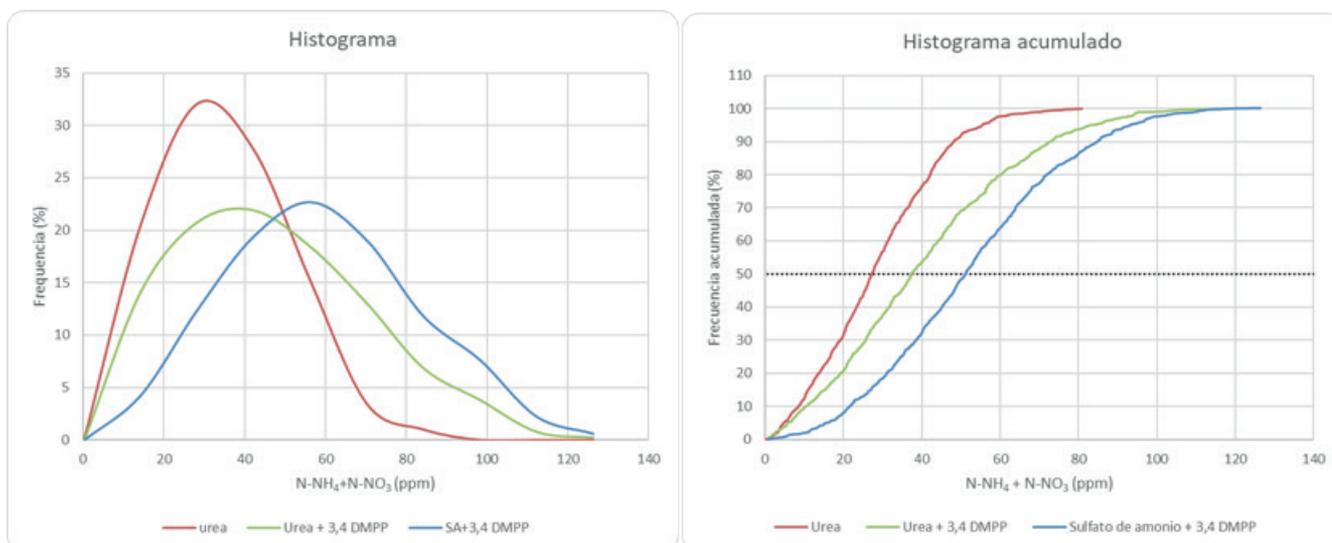


Figura 8. Histogramas e histogramas acumulados para N disponible para tres tratamientos (urea, urea + 3,4 DMPP y sulfato de amonio + 3,4 DMPP). Se puede observar que las distribuciones con 3,4 DMPP contienen más valores altos de N disponible (izquierda). Las distribuciones acumuladas a la derecha muestran más N disponible con 3,4 DMPP en todos los percentiles de la población. La línea punteada corresponde al percentil 50% (mediana).

alimentos más inocuos y seguros para el consumo humano. En el caso de las praderas, los excesos de $N-NO_3$ pueden afectar la salud del ganado provocando metahemoglobinemia. En la Tabla 2 se presentan los efectos del NO_3 sobre el ganado. Un estudio realizado en *ryegrass* demostró que el uso de un IN redujo significativamente los niveles de $N-NO_3$ en tejido, por lo cual el uso de IN, en particular cuando se aplican purines en altas dosis, es un seguro contra los efectos tóxicos del nitrato (Figura 9).

Tabla 2. Niveles de nitratos (NO_3) en tejidos de praderas y su efecto en la salud del ganado (adaptado de Oklahoma Cooperative Extension).

NO_3 (ppm)	$N-NO_3$ (ppm)	$N-NO_3$ (%)	Interpretación
0-3.000	0-680	0-0,68	Generalmente seguro para todo el ganado
3.000-5.000	680-1.136	0,68-1,14	Generalmente seguro para ganado de carne, excepto vacas preñadas. Bajo riesgo de reducir la fertilidad y de abortos tempranos. Ración total para ganado de leche debería ser menor a 2500 ppm NO_3 .
5.000-10.000	1.136-2.273	1,14-2,27	Algún riesgo para todo tipo de ganado. Puede provocar abortos a media gestación y a término, como también terneros débiles. Podría disminuir el crecimiento y la producción de leche.
> 10.000	> 2.273	> 2,27	Potencialmente tóxico para todo el ganado. Puede causar abortos, síntomas de toxicidad aguda, y la muerte.

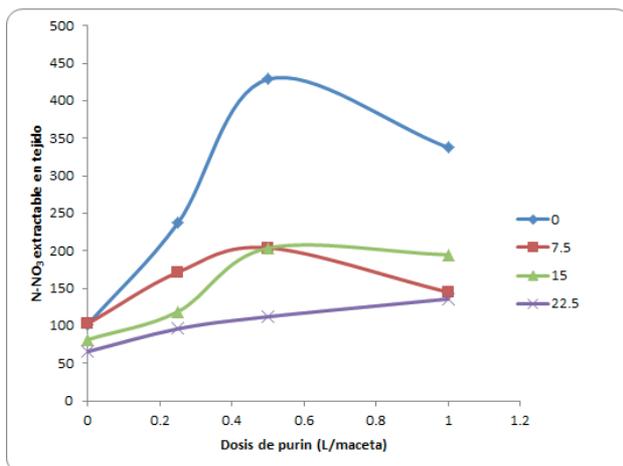


Figura 9. Efecto de la dosis de purín e inhibidor de nitrificación sobre el contenido de $N-NO_3$ en tejidos de *ryegrass*.

Uso sustentable de purines y biodigestatos

Los purines derivados de producción animal tienen un buen potencial agronómico para ser utilizados como fertilizante y/o mejorador de suelo. Los purines pueden aplicarse al suelo, ya sea frescos o tratados, luego de un tratamiento que puede ser completamente aeróbico, anaeróbico o aeróbico facultativo. Los purines más comúnmente usados provienen de lagunas aeróbicas facultativas o de plantas de producción de biogás. Cada tipo de purín tiene características únicas, que, además del proceso, dependen del tipo y edad del animal, la alimentación, la cantidad de agua usada en el lavado, además del método de lavado (uso de detergentes u otras sustancias limpiadoras). En el caso de los residuos de purines tratados en plantas de biogás, éstos se denominan digestatos o biodigestatos.

Por su alta carga de nutrientes, los purines pueden ser usados como fertilizantes de cultivos y praderas. Las ventajas que tiene el purín respecto a un fertilizante químico son su menor costo y los efectos positivos que causa en la calidad del suelo, dado sus aportes de materia orgánica. Sin embargo, al igual que los fertilizantes químicos convencionales, su aplicación debe ser muy cuidadosa, para maximizar los beneficios agronómicos y minimizar los impactos negativos que un mal uso pudiera causar en los cultivos, el suelo, el agua y el aire.

Los factores que deben considerarse para la correcta dosificación y aplicación de purines son (Ortega and Martínez, 2019):

1. La calidad del purín: Mientras más estable y controlado sea el proceso productivo y el tratamiento del purín, más estables serán sus propiedades fisicoquímicas.
2. Los requerimientos nutricionales del cultivo: Cada especie tiene requerimientos nutricionales específicos. Estos se expresan en kg de nutriente por tonelada de producto producido. Parte de estos requerimientos son aportados por el suelo y el resto debe suministrarse a través de fertilizantes, incluyendo los biodigestatos que deben ser considerados como tales. Por ejemplo, una tonelada de materia seca de *ryegrass* demanda 23 kg N, 7 kg de P_2O_5 y 15 kg de K_2O /ha.
3. Las propiedades del suelo: las propiedades físicas y químicas del suelo, en particular, la textura, pH,

conductividad eléctrica y la cantidad de nutrientes disponibles deben considerarse para dosificar adecuadamente los purines. La conductividad eléctrica del suelo idealmente debería ser < 2 dS/m, aunque existen marcadas diferencias en tolerancia a las sales entre las distintas especies. Por su parte el pH debería mantenerse sobre 5.8

- El clima: el clima controla la efectividad de las aplicaciones y afecta directamente las pérdidas de gases y nutrientes hacia el medio ambiente. Normalmente los biodigestatos deben ser aplicados en períodos sin precipitación y cuando el cultivo está en pleno crecimiento de manera que pueda aprovechar los nutrientes aplicados. Se deben evitar las aplicaciones superficiales, sin incorporación a través del cultivo del suelo o el riego, de manera de minimizar las pérdidas gaseosas de amoníaco.

Existen numerosas formas para estimar las dosis de nutrientes para un cultivo o pradera. Sin embargo, debería preferirse aquellas que producen dosis menores y que permiten alcanzar buenos rendimientos. Para nitrógeno (N), normalmente se utiliza un balance entre la demanda del cultivo y el suministro, incluyendo el N residual del suelo, el que aporta el agua de riego y el que se mineralizará durante la temporada.

En el caso de fósforo y potasio, el criterio de recomendación más sustentable se denomina construcción + mantención; en éste la idea es construir hasta los niveles críticos y luego mantenerlos reponiendo la extracción del cultivo. La extracción de nutrientes del cultivo es lo que sale del campo en el producto.

Una vez definidas las dosis de nutrientes, las dosis de purín a aplicar dependerán del criterio a utilizar:

- Satisfacer las necesidades de N del cultivo
- Satisfacer las necesidades de P del cultivo
- Satisfacer las necesidades de K del cultivo

La dosis a utilizar es aquella menor que satisfaga los requerimientos de uno de los nutrientes, en particular N o P. Los déficits de algún nutriente deben aportarse con fertilizantes convencionales dando origen al concepto de fertilización organomineral.

La Tabla 3 muestra un ejemplo de estimación de la dosis de purín para un rendimiento de maíz de 15 ton/ha, utilizando un digestato que contiene 1.1 kg de N, 0.25 Kg P_2O_5 y 0.6 K_2O / m^3 , respectivamente, y los criterios anteriores. Las dosis de digestato podrían variar entre 275 y 420 m^3 /ha/temporada, según el criterio utilizado (Tabla 4). Cuando se utiliza el criterio P, los requerimientos de N y K se superan en más del 50%; mientras que cuando se utilizan los criterios de N o K, hay un déficit de P de aproximadamente 34%. Según estos resultados, la dosis apropiada de digestato debería ser de 275 m^3 / ha / temporada, lo que satisfaría las necesidades de N y K, sin exceso. El déficit observado en el caso de P debe cubrirse con fuentes de fertilizantes convencionales (Tabla 4).

Tabla 3. Dosis de digestato (m^3 /ha) para maíz en función del criterio seleccionado.

Nutriente	Dosis (kg/ha)	Criterio		
		N	P	K
		----- m^3 /ha-----		
N	305	277		
P_2O_5	105		420	
K_2O	165			275

Tabla 4. Aportes de nutrientes suministrados por las dosis de digestatos según el criterio seleccionado.

Nutriente	Dosis (kg/ha)	Criterio		
		N	P	K
		-----kg/ha-----		
N	305	305	462	303
P_2O_5	105	69	105	69
K_2O	165	166	252	165

Los biodigestatos se aplican incorporados al suelo o bien diluidos a través del riego, ya sea este por aspersión, microaspersión o goteo. En este último caso, al igual que con los fertilizantes químicos convencionales, deben diluirse lo suficiente para no sobrepasar la conductividad eléctrica (CE) tolerada por el cultivo. Normalmente, para que el agua con purín no sobrepase los 2 dS/m, el purín debería ser diluido en agua 10 veces.

Los purines aplicados deben ser inocuos para la salud humana y deben cumplir con las normas establecidas. Por ejemplo, la Norma Chilena 3375 establece los siguientes valores para indicadores de contaminación biológica en biodigestatos: *E. coli* (<1000 NMP/g MS), *Salmonella sp.* (< 3 NMP/ 4 g MS), huevos de helminto (< 1/4 g MS). La misma norma establece los límites máximos de metales pesados: AS (55 mg/kg), Cd (15 mg/kg), Cu (667 mg/kg), Cr (167 mg/kg), Hg (3 mg/kg), Ni (133 mg/kg), Pb (367 mg/kg), Zn (1333 mg/kg). Recientemente entró en vigencia la Ley de Inocuidad Alimentaria FSMA (Food Safety Modernization Act) en Estados Unidos, que regula en mayor detalle el uso de fertilizantes e insumos agrícolas, la cual debe considerarse al momento de utilizar los purines.

Uso de fertilización organomineral

Tal como se comentó anteriormente, en la mayoría de los casos es necesario compensar los déficits de nutrientes producidos por la aplicación de purines o biodigestatos. La mezcla de purín y fuentes fertilizantes convencionales dan origen a los fertilizantes organominerales, que aportan nutrientes y materia orgánica al suelo, mejorando su calidad física, química y biológica, incrementando los rendimientos. Estos fertilizantes organominerales pueden incluir inhibidores de nitrificación para mejorar la eficiencia de uso del $N-NH_4$ derivado del purín o las fuentes de N convencionales.

En un estudio realizado por Ortega y colaboradores (2019) (no publicado), se demostró que a nivel de invernadero y campo, un fertilizante organomineral en base a purín, fosfato monoamónico, cloruro de potasio y el inhibidor de nitrificación 3,4 DMPP, presentó rendimientos mayores al purín solo y similares al del un tratamiento convencional, alcanzando mayor eficiencia y menores pérdidas de N por lixiviación (Figura 10).

Sensores de canopia

La teledetección o detección a distancia, es una técnica de obtención de datos acerca de un objeto o entidad, sin entrar en contacto físico con éste. El primer instrumento de teledetección fabricado por el hombre fue la cámara fotográfica, a partir de la cual se desarrolló la técnica de fotointerpretación, que hoy en día se realiza de manera digital. En los años 70 se desarrollaron los sensores remotos ópticos multiespectrales (scanner) que, montados en plataformas aéreas y satelitales, y más recientemente en drones, han permitido un gran desarrollo de los datos espaciales, en distintas industrias, incluida la agricultura. Estos sensores, normalmente pasivos, miden la reflectancia de las plantas y el suelo a la radiación electromagnética producida por el sol. Actualmente existen los denominados sensores hiperespectrales que, a diferencia de los multiespectrales, cuentan con un elevado número de bandas.

A diferencia de los sensores pasivos, los sensores activos emiten radiación electromagnética (en cierto rango de longitud de onda) y miden la reflectancia de

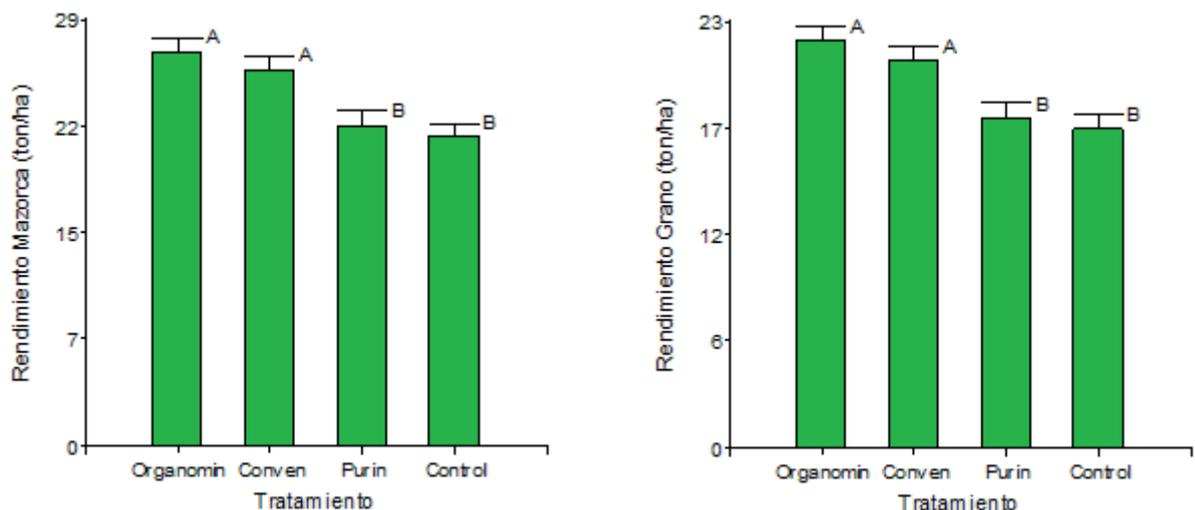


Figura 10. Efecto de los tratamientos sobre el rendimiento de mazorca y grano de maíz en condiciones de campo.

las plantas y el suelo en longitudes de onda específicas, normalmente, visible, límite rojo (red Edge) e infrarrojo cercano (NIR) (Figura 1).

Cada objeto tiene un firma espectral diferente, es decir la cantidad de luz reflejada (o absorbida) por éste varía con la longitud de onda. En el caso de las plantas, su curva espectral es muy característica y muestra, dentro del rango visible (400 a 700 nm), una baja reflectancia en el azul y rojo, y elevada en el verde, motivo por el cual las plantas se ven de dicho color; en el infrarrojo cercano (NIR), que normalmente va entre los 700 y 900 nm, que no es captado por el ojo humano, las plantas presentan una elevada reflectancia (Figura 2), la cual está directamente relacionada con su estructura (biomasa).

Así, a mayor reflectancia en el IR, mayor es la biomasa del cultivo. Este hecho ha permitido el desarrollo de los llamados índices de vegetación, que corresponden a combinaciones matemáticas de bandas espectrales, cuya función es realzar la vegetación, en función de la respuesta espectral de una superficie, y atenuar la de otros factores como suelo, iluminación, atmósfera, etc. En la actualidad existen numerosos índices, entre los que destacan el NDVI (Normalized

Difference Vegetation Index), NDRE (Normalized Difference Red Edge), GVI (Green Vegetation index) y PCD (Plant Cell Density). Los más conocidos y utilizados son el NDVI y el NDRE para la medición de vigor y biomasa, respectivamente. Sus fórmulas se definen a continuación:

$$NDVI = \frac{(NIR - Rojo)}{(NIR + Rojo)} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

$$NDRE = \frac{(NIR - \text{Límite Rojo})}{(NIR + \text{Límite Rojo})} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Dónde:

NIR: reflectancia en la banda infrarrojo cercano.

Rojo: reflectancia en la banda roja.

Límite rojo: reflectancia en la banda límite rojo

El uso de estos índices permite obtener información acerca del estado de la pradera, estimar su biomasa y las potenciales deficiencias de algunos nutrientes relacionados con los pigmentos fotosintéticos. El uso de

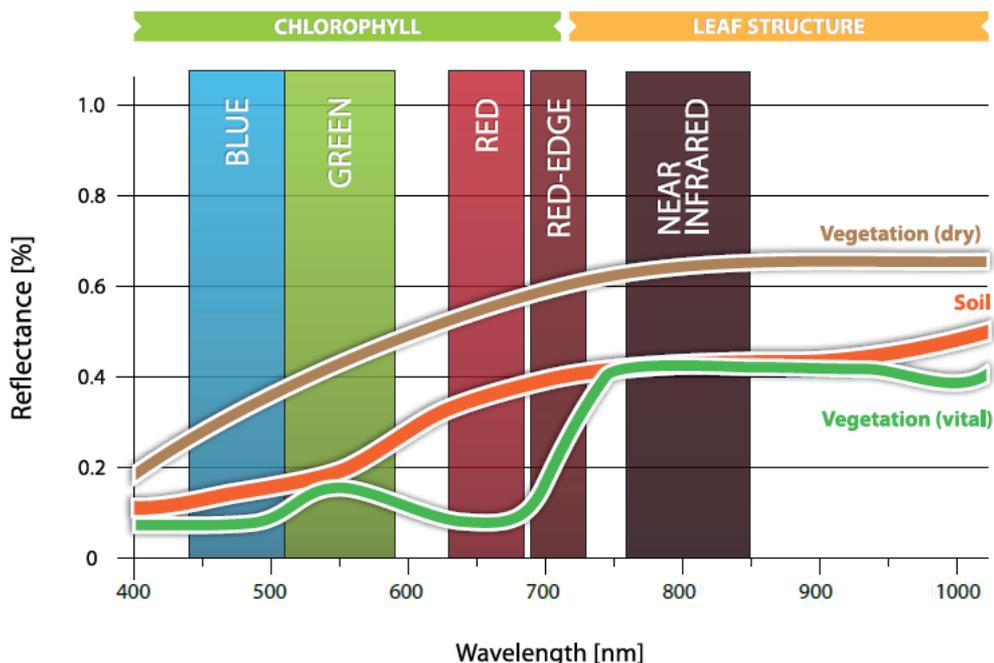
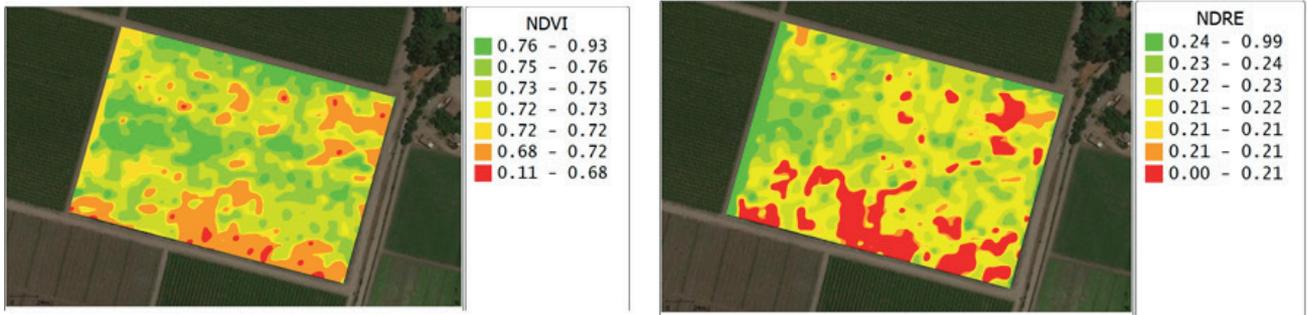


Figura 11. Respuesta espectral de la vegetación y el suelo.



mapas de índices de vegetación y biomasa, permiten realizar manejos variables de poda, fertilización, aplicación de agroquímicos y cualquier otro manejo que se pueda basar en el análisis de la vegetación (Figura 12).

Figura 12. Mapas de NDVI y NDRE obtenidos con sensor activo en plataforma terrestre.

Comentarios finales

Existen en el mercado numerosas tecnologías innovadoras, antiguas y nuevas, disponibles para ser aplicadas en producción pecuaria, de manera de mejorar su sustentabilidad económica y ambiental. El uso de dichas tecnologías debe ser integrado y a partir del suelo para mantener o mejorar su calidad de manera que preste sus funciones productivas y ambientales.

Referencias

Ortega Rodrigo, Martinez Maria. 2019. Sustainable Use of Animal Slurries in Chile. *Dairy and Vet Sci J.* 13(2): 555857. DOI: 10.19080/JDVS.2019.13.555857

Ortega, R. 2019. Los colores de la fertilidad. Nuevas herramientas para el mapeo detallado del suelo. *Revista Mundoagro* 115:50-53.

Ortega, R. 2019. Una barrera para las pérdidas. Inhibidores de nitrificación: una tecnología esencial para alcanzar alta productividad y calidad y cuidar el medio ambiente. *Revista MundoAgro* 113:48-52.

Ortega, R., Martínez M.M. y Orellana, C. 2018. Puro nutrientes. Pautas para la utilización de purines como fertilizantes y mejoradores de suelo. *Revista Mundoagro* 106:58-61

Ortega, R. y Orellana, C. 2018. Buena agronomía: ¿cómo contribuye la agricultura de precisión a producir de manera eficiente y sustentable y cumplir con los requerimientos de los mercados de exportación? *Revista MundoAgro* 98:56-59.

Ortega, R. 2015. Integrated nutrient management in conventional intensive horticulture production systems. *Acta Hort. (ISHS)* 1076:159-164.

Ortega, R., Orellana, C. y Ortega, A. 2018. Ojos para decidir. Tecnologías para el monitoreo de canopia. *Revista Mundoagro*:107: 42-47.