

PANORAMA DE MERCADO DE AGROMINERALES

Noviembre 2019



YESO AGRÍCOLA



Secretaría de Política Minera
Ministerio de Producción
Presidencia de la Nación

Dirección de Gestión de Servicios y
Prestaciones Complementarias de la
Minería.

Dirección Nacional de Cadena de Valor Minera
Subsecretaría de Desarrollo Minero

Autoridades

Ministro de Producción

Lic. Dante Sica

Secretaria de Política Minera

Ing. Carolina Sánchez

Director Nacional de Cadena de Valor Minera

Ing. José G. Gomez

Director de Gestión de Servicios y Prestaciones Complementarias de la Minería

Geol. Gabriel Del Mármol

Equipo de trabajo

Dr. Martin Torres Duggan

Ing. Mónica Malfitano

Martina Maceira (Edición gráfica)

ÍNDICE

METODOLOGÍA.....	4
CARACTERÍSTICAS DEL MERCADO ARGENTINO	5
PARTE I: EL PRODUCTO.....	9
DEFINICIÓN.....	9
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	10
CALIDAD DE USO AGRONÓMICO.....	10
USOS DEL YESO AGRÍCOLA EN EL ÁMBITO AGROPECUARIO	16
YESO AGRÍCOLA COMO FERTILIZANTE AZUFRADO	17
EFICIENCIA AGRONÓMICA RELATIVA DEL YESO CON OTROS FERTILIZANTES AZUFRADOS.....	18
DETERMINACIÓN DE LA DOSIS DE YESO AGRÍCOLA A APLICAR COMO FERTILIZANTE AZUFRADO	20
MOMENTOS Y FORMAS DE COLOCACIÓN DEL YESO AGRÍCOLA	23
YESO AGRÍCOLA COMO ENMIENDA PARA MEJORAR LA FERTILIDAD DE SUELOS SÓDICOS.....	24
LA PROBLEMÁTICA DE LA SALINIDAD Y SODICIDAD EDÁFICA Y SU IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS.	24
POTENCIAL DE USO DEL YESO AGRÍCOLA EN SUELOS SÓDICOS	30
ROL DEL YESO AGRÍCOLA COMO MEJORADOR DE SUELOS SÓDICOS DE LA REGIÓN PAMPEANA	34
YESO AGRÍCOLA PARA MEJORAR LA FERTILIDAD DE SUELOS SODIFICADOS POR EL RIEGO COMPLEMENTARIO.....	39
YESO AGRÍCOLA COMO ENMIENDA PARA MEJORAR SUELOS ÁCIDOS Y/O ACIDIFICADOS.....	41
POTENCIAL DE USO DEL YESO AGRÍCOLA EN SUELOS ACIDIFICADOS DE LA REGIÓN PAMPEANA.....	45
PARTE II: LA ACTIVIDAD MINERA EN LA ARGENTINA.....	47
CARACTERÍSTICAS DE LA OFERTA.....	47
YACIMIENTOS DE YESO	47
MINERÍA DE LAS CANTERAS DE YESO	51
PROCESAMIENTO DEL YESO AGRÍCOLA.....	53
PRODUCCIÓN NACIONAL	54
DATOS ESTADÍSTICOS DE ALGUNAS PROVINCIAS PRODUCTORAS DE YESO AGRÍCOLA.....	55
INFRAESTRUCTURA Y LOGÍSTICA	56
PANORAMA DEL SISTEMA LOGÍSTICO DE FERTILIZANTES EN ARGENTINA	56
LOGÍSTICA DE FERTILIZANTES DESDE EL DISTRIBUIDOR AL CAMPO	57
CARACTERÍSTICAS DE LA DEMANDA.....	59
ESTRUCTURA DE LA DEMANDA Y DE LA CADENA DE VALOR DEL YESO AGRÍCOLA.....	59
CADENA DE VALOR DE YESO AGRICOLA	60
EL PERFIL DEL PRODUCTOR AGROPECUARIO ARGENTINO	61
PARTE III: INTERCAMBIO COMERCIAL.....	63
CLASIFICACIÓN ARANCELARIA	63
ESTRUCTURA ARANCELARIA	63
EVOLUCIÓN DEL COMERCIO INTERNACIONAL.....	64
PARTE IV: PRECIOS	65
PRECIOS NACIONALES:	65
PRECIOS INTERNACIONALES	65
PARTE V: SITUACIÓN INTERNACIONAL	66
BIBLIOGRAFÍA	67

Metodología

La metodología empleada para elaborar el presente estudio consistió en la recolección y procesamiento de datos obtenido a través de consultas a fuentes primarias (e.g. consulta a referentes y expertos del mercado) como así también secundarias, principalmente información provista por organizaciones e instituciones oficiales nacionales relacionadas con la actividad minera (e.g. direcciones provinciales de minería, SEGEMAR, entre otras) como así también del ámbito agropecuario (e.g. INTA, Aapresid, Fertilizar Asociación Civil, entre otras). Para analizar el intercambio comercial se utilizó datos de exportaciones de yeso agrícola de Argentina a la región del Cono Sur (estadísticas de Aduana/AFIP), mientras que el contexto internacional de producción de yeso se tuvo en cuenta información publicada en fuentes especializadas.

Por otra parte, la estructura de la demanda de yeso agrícola se elaboró en base a estudios previos disponibles sobre el tema para el sector de fertilizantes, particularmente los llevados a cabo por CREA. Asimismo, sobre esta base se caracterizó la cadena de comercialización del yeso agrícola, haciendo énfasis en la descripción de las diferentes modalidades de integración vertical de las empresas proveedoras de yeso agrícola en la cadena de comercialización del mineral para abastecer la demanda del mismo como fertilizante y/o enmienda.

Características del Mercado Argentino

El yeso es la fase mineral del sulfato de calcio más abundante en la naturaleza, correspondiendo al sulfato de calcio bihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). El mineral de yeso puro contiene 18,6% de S y 23% de Ca. Tanto el yeso como la basanita (sulfato de calcio bihidratado; $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$) se los consideran aptos para su uso agropecuario como fertilizante y enmienda ya que la basanita se transforma en yeso rápidamente cuando reacciona en el suelo. Asimismo, de acuerdo con la Resolución 264/2011 del SENASA los yesos de uso agropecuario deben contener un mínimo del 85% en peso de sulfato de calcio como así también cumplir una serie de requisitos de calidad física y química.

Los principales usos del yeso en el ámbito agropecuario son como fertilizante azufrado y para mejorar la fertilidad de suelos sódicos (de aptitud forrajera) o bien de suelos agrícolas sodificados por el riego y/o derivado de fenómenos de anegamiento y/o inundaciones. Otro uso menos difundido del yeso agrícola es su aplicación combinada con calizas para mejorar su efectividad en suelos afectados por limitaciones de acidez edáfica en planteos en siembra directa.

La mayor parte de la información disponible sobre uso del yeso agrícola es sobre su aplicación como fertilizante azufrado en cultivos extensivos de la Región Pampeana, en donde se concentra el 80-85% del consumo aparente de fertilizantes del país. A pesar que este agromineral también se lo utiliza en cultivos intensivos (e.g. frutales, hortalizas, florales, forestales) en diversas regiones edafoclimáticas no se dispone de estadísticas y/o información publicada, y por ello no serán tratados en el presente estudio.

El yeso agrícola participa con el 34% del mercado de fertilizantes azufrados, siendo la principal fuente de azufre aplicada en forma sólida en la fertilización de cultivos de grano. En general el yeso agrícola se lo aplica antes, durante o luego de la siembra sin observarse diferencias en efectividad agronómica (respuesta en rendimiento) entre formas y momentos de colocación. Asimismo el yeso aporta S disponible para las plantas de un modo similar a los demás fuentes sulfatadas que se comercializan en el mercado. Los demás fertilizantes azufrados utilizados en el mercado argentino son sulfato de amonio (SA; 21%), el tiosulfato de amonio (TSA; 41%) y otros (4%). Sin embargo, estos guarismos no surgen de un relevamiento y/o censo de uso, sino que provienen de lo que reportan las empresas proveedoras de fertilizantes asociadas a CIAFA en cuanto a la venta de yeso agrícola.

Cabe destacarse que los principales productos sustitutos del yeso agrícola son el superfosfato simple (SFS), que si bien es usualmente clasificado como fertilizante fosfatado, aporta P y S, dos nutrientes deficientes en la mayor parte de los suelos de la Región Pampeana. En cuanto a las mezclas químicas NPS se trata de un segmento que viene creciendo a un ritmo muy considerable, y también compiten con el yeso agrícola.

En cuanto al uso del yeso agrícola como enmienda para mejorar la fertilidad de suelos sódicos, a pesar de existir una amplia distribución de suelos con estas características en zonas húmedas y sub-húmedas de la Región Chaco-Pampeana (~35 millones de ha), no se dispone de estadísticas oficiales sobre la utilización de yeso agrícola en este tipo de ambientes. Sin embargo, la evidencia empírica muestra que la adopción del yeso agrícola como tecnología para mejorar ambientes afectados por problemas de sodicidad no es una

práctica extendida, existiendo un potencial significativo de uso, tanto del yeso agrícola como del uso de éste como materia prima y/o co-productos para el desarrollo de fertilizantes, enmiendas y/o acondicionadores con valor agregado.

En este informe se presentan y analizan los factores claves que inciden en la posibilidad y viabilidad de aplicación de yeso agrícola en ambientes sódicos como así también en suelos sodificados por el riego complementario cuando se utilizan aguas de mala calidad (alto contenido de sodio). Algunos de los factores con mayor relevancia cuando se desea analizar la factibilidad de aplicación de yeso agrícola en suelos sódicos son: posición del suelo sódico en el paisaje; localización de la sodicidad en el perfil de suelo (superficial y/o superficial); dinámica hidrológica del sitio de producción; profundidad de la capa freática; riesgo de anegamiento; tipo de recurso forrajero, entre otros. Por otro lado, también 280 K ha con suelos regados en forma complementaria, principalmente en las provincias de Córdoba, Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos y en menor medida en el NOA, en donde el yeso agrícola, en conjunto con otras tecnologías.

El yeso agrícola también se lo puede utilizar para mejorar la efectividad y eficiencia de corrección de las calizas en suelos ácidos y/o acidificados en planteos de siembra directa. Si bien existen muy pocos estudios al respecto en el país, existen nichos de mercado en donde se podría posicionar el yeso agrícola para este uso, ya que en los últimos años se observa una aceleración de los procesos de acidificación de suelos en diferentes subregiones de la Región Pampeana. En algunas regiones como el sur de Santa Fe, norte, centro y oeste de Buenos Aires, centro y sur de Córdoba se han llevado a cabo trabajos experimentales que muestran la respuesta al uso de calizas y yeso agrícola en cultivos de grano y en forrajeras como alfalfa.

En cuanto a los yacimientos de yeso en la Argentina, con amplia distribución geográfica, los mismos responden principalmente a dos modelos de depósitos: evaporíticos marinos o evaporíticos lacustres. La pureza mineralógica de yeso, como así también la potencia de los depósitos es variable según la cuenca considerada, existiendo cuatro regiones principales: (1) Cuenca Neuquina (Mendoza, Neuquén, Río Negro); (2) Centro-oeste del país (Tucumán, Santiago del Estero, Catamarca, La Rioja, San Luis), (3) Región Buenos Aires-La pampa y (4) Suroeste de la región mesopotámica (Entre Ríos). Los métodos y tecnología de extracción del yeso agrícola son diferentes según la cuenca considerable. Así, en yacimientos ubicados en regiones como la 2, 3 o 4, es habitual la “Minería de Contorno” que consiste en la excavación tanto del estéril como del mineral en sentido transversal al afloramiento, dejando un talud de banco único y progresión longitudinal siguiendo el afloramiento. Por el contrario, en yacimientos de yeso localizados en la “Cuenca Neuquina”, por presentar una potencia mayor, se practica la perforación, carga, voladura y achique de bloques al pie de cantera para luego ser transportado a planta de molienda.

De acuerdo a datos provistos por el Centro de Información Minero Argentino (CIMA), la producción de yeso (como mineral industrial y para todo destino) en 2017 fue de 1.275.608 TM, con la siguiente distribución según provincia: Catamarca (166.932 TM); Chubut (1.477 TM); Entre Ríos (240.036 TM); La Rioja (7.800 TM); Mendoza (360.447 TM); Neuquén (23.171 TM); Río Negro (445.496 TM); Salta (4.750 TM); Santiago del Estero (26.660 TM); Tucumán (1905 TM).

En base a los datos de producción de yeso del 2017 (Censo Minero), y de la oferta de yeso agrícola reportada por las provincias de Neuquén, Santiago del Estero y Mendoza, que son las más significativas en términos del abastecimiento al mercado agropecuario, la participación del yeso agrícola en el total del yeso producido en el país se ubica en el 6% (~76536 TM), incluyendo al yeso agrícola utilizado tanto como fertilizante azufrado o bien como enmienda de suelo. La misma es relativamente baja considerando la experiencia internacional, existiendo un potencial de expansión del uso del yeso agrícola en el futuro.

La cadena de comercialización del yeso agrícola está integrada por diferentes actores (e.g. productor minero, distribuidor mayorista, distribución minorista, agricultores), como así también se observan distintos posicionamientos comerciales y niveles de integración vertical en las cadenas de valor. Así, algunas de las empresas proveedoras de yeso agrícola compran el mineral a productores mineros sin demasiada integración vertical, mientras otras tienen vínculos comerciales más o menos fijos con los proveedores mineros y/o disponen de yacimientos propios. También es habitual la figura del productor minero que, desentendido del negocio agropecuario, vende el yeso a distribuidores mayoristas y/o minoristas, sin estar formalmente integrado comercialmente con éstos últimos.

La demanda de yeso agrícola está representada por los propios agricultores, quienes en general compran el yeso agrícola a distribuidores minoristas, aunque, según la escala, en algunos casos también lo pueden hacer a oferentes mayoristas. Los rasgos principales del productor agropecuario argentino son su relativa juventud, particularmente en la actualidad se evidencia un notable recambio generacional. Asimismo, se destaca que entre el 50 y 70% de la producción de cultivos extensivos se realiza mediante contratos de arrendamientos de corto plazo (renovación anual).

Además del mercado interno, el yeso agrícola también se exporta principalmente a algunos países limítrofes, mientras que no se han registrado operaciones de importación en los últimos años. Los principales países que son destino de las exportaciones de yeso agrícola se destaca Chile (>88% del volumen) y en menor medida a Uruguay y Paraguay. En el período 2014 a 2018 el volumen de exportación pasó de 15.816 a 8.931 TM, mientras que el valor de exportación varió de 1.550 a 556 K USD FOB. Uno de los factores que explican la reducción en los niveles de exportación del yeso agrícola hacia países del Cono Sur, se relaciona con la pérdida del mercado de Paraguay, que recientemente comenzó a abastecerse desde Bolivia a precios más competitivos.

Los precios nacionales pagados por el productor agropecuario se ubican en rangos de 90 a 130 USD/TM más IVA, dependiendo de su calidad (pureza, granulometría, etc.). El costo del “flete largo” (del yacimiento a los centros de distribución minorista) gravitan considerablemente en el precio final pagado por el productor agropecuario. Asimismo, es muy frecuente que los proveedores de yeso agrícola consideren el precio de la unidad de S del SFS para definir la estrategia y nivel de precios del yeso agrícola. Como se mencionó antes, el SFS es el principal fertilizante sustituto y que compite en el proceso de posicionamiento y comercialización del yeso agrícola.

En cuanto a los precios internacionales, debido a que el mercado del yeso agrícola es muy pequeño en relación al mercado de la construcción, principal destino de este mineral, no se dispone de un mercado

internacional en donde cotice el yeso agrícola. Asimismo, cabe mencionarse que el yeso, debido a su bajo costo y amplia disponibilidad en una gran cantidad de países no suele ser transado internacionalmente de un modo muy significativo. Solo unos pocos países son importantes exportadores del mineral (e.g. Canadá, México, España y Tailandia) y solamente el 20% de la producción mundial de yeso del año 2016 participó del comercio internacional.

Parte I: El Producto

DEFINICIÓN

Desde el punto de vista mineralógico, el yeso es la fase mineral de sulfato de calcio más abundante en la naturaleza y corresponde al sulfato de calcio bihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Su mayor solubilidad y contenido de agua molecular, lo diferencian de la basanita y de la anhidrita.

Tabla I: Especies mineralógicas de sulfato de calcio y características de interés agronómico

Especies de sulfato de calcio	Formula química	Contenido de nutrientes	Características de interés agronómico
Yeso	$\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	S=18,6% Ca=23%	-Principal fertilizante azufrado sólido utilizado en la Argentina -Fuente de inmediata disponibilidad de sulfatos para las plantas -Pureza variable que determina diferentes contenidos de S (rango entre 15 a 18% de S) -Reacción neutra en el suelo -Se utiliza principalmente como corrector/mejorador en suelos sódicos y en mezclas con calizas y dolomías para mejorar la efectividad de éstas en sistemas en siembra directa
Basanita	$\text{Ca SO}_4 \cdot 0,5 \text{ H}_2\text{O}$	S=22% Ca=27%	-Rápidamente convertido a yeso cuando reacciona en el suelo (hidratación) -Presenta el mismo comportamiento agronómico que el yeso -En general, lo comercializan empresas que producen materiales para la construcción, partiendo de materias primas (yeso) de elevada pureza -Contiene más S y Ca que el yeso agrícola debido a su menor contenido molar de agua de hidratación
Anhidrita	CaSO_4	S=23,5 Ca=29,4%	-Presenta escaso valor como fertilizante azufrado y/o como corrector de suelos debido a su baja reactividad en el suelo asociado a su mayor dureza y menor solubilidad en agua

Fuente: Adaptado de Ponce y Torres Duggan (2005) y Torres Duggan y Rodríguez (2017).

Como se puede apreciar en la *Tabla I*, de los diferentes minerales de sulfato de calcio que se pueden encontrar en yacimientos, el yeso propiamente dicho y la basanita presentan aptitud agronómica como fertilizante o enmienda.

Desde la perspectiva química, el yeso es una sal sulfatada soluble en agua ($\sim 2,4 \text{ g L}^{-1}$ a 0°C), con bajo índice salino y reacción neutra en el suelo. Estos atributos, sumado a su amplia disponibilidad geográfica y su menor costo relativo a otro tipo de fertilizantes, facilitan su utilización en el ámbito agropecuario.

El yeso agrícola es el material portador de yeso que se comercializa en el ámbito agropecuario para aportar S a los cultivos o como mejorador de la condición de fertilidad del suelo.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

CALIDAD DE USO AGRONÓMICO

Las especificaciones técnicas del yeso agrícola para uso agronómico (i.e. como fertilizante azufrado y/o mejorador de la fertilidad de los suelos) se encuentran claramente definidas en la normativa actual (normas IRAM, SENASA).

Desde el punto de vista agronómico, la calidad del yeso agrícola se la define a partir de dos aspectos:

Calidad química

Calidad física

La calidad química del yeso agrícola surge de la composición química y mineralógica del mineral, ya que éstos determinan el contenido de nutrientes y por consiguiente determinan el valor fertilizante del producto. La calidad física del yeso agrícola se evalúa considerando diferentes atributos que permiten establecer la aptitud del mineral para su uso agropecuario. Las características más relevantes son: granulometría, contenido de polvo y humedad libre. Asimismo, en especial cuando se aplican dosis relativamente elevadas (corrección química), también resulta importante evaluar la concentración de Na y eventualmente de algunos elementos como Fe o Al. Estos elementos pueden formar parte de minerales acompañantes del yeso dentro de los yacimientos o depósitos.

En la Argentina, la normativa vigente exige un mínimo de 85% sulfato de calcio bihidratado en los productos comercializados como yeso de uso agropecuario (Tabla II). Las presentaciones físicas que se comercializan son:

- Granulado (sólido granulado)
- Granulado pelletizado (granulado propiamente dicho)
- Polvo

La forma física sólido granulada es la más utilizada y corresponde a los yesos que luego de extraídos de las canteras son triturados y tamizados a la granulometría objetivo. El yeso agrícola pelleteado o granulado se obtiene mediante el proceso de aglomeración a partir de fracciones de yeso fino o entrefino mediante el uso de equipos específicos como discos pelletizadores o tambores aglomeradores. Cabe aclarar que el procesamiento físico del yeso no modifica la solubilidad del material, y por consiguiente tampoco modifica la performance o eficiencia agronómica del producto. Así, tanto el yeso sólido granulado como el pelleteado presentan la similar capacidad de proveer Ca y S disponible para las plantas.

A diferencia del yeso sólido granulado, la calidad física del yeso pelleteado puede ser muy variable dependiendo del tipo de proceso utilizado y del sistema de pelletización implementado. Por ejemplo, la inadecuada regulación de la concentración de aglomerante y/o el proceso de secado del mineral pueden determinar que el yeso agrícola sea demasiado duro o blando. Un yeso demasiado duro puede reducir la reactividad del mineral en el suelo, mientras que un mineral demasiado blando aumenta significativamente la rotura de los gránulos y aumenta la generación de polvo (“finos”) durante el transporte, procesamiento y/o aplicación del producto a campo. Por estas razones, no es correcto el argumento utilizado habitualmente por empresas que venden yesos pelleteados acerca de la mayor solubilidad o mayor efectividad agronómica que los yesos no pelleteados. Como se dijo antes, el procesamiento físico del yeso agrícola, no modifica la solubilidad ni la forma química del S aportado que se encuentra como sulfato y por lo tanto es biodisponible.

El yeso agrícola en su presentación en polvo es la forma tradicional de uso para la corrección de suelos, particularmente cuando la enmienda se aplica y se mezcla con el suelo a través de una labranza. Sin embargo, el yeso granulado (o pelleteado) es una opción tecnológicamente válida para ser utilizada en sistemas de siembra directa, que representan entre el 80 y 90% del área sembrada con cultivos extensivo en la Región Pampeana de Argentina.

Tabla II: Requisitos químicos y físicos requeridos por el SENASA según la normativa vigente.

Propiedad	Referencia
Pureza (% de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	Mínimo 85% (p/p)
Cloruro de sodio	Máximo 0,5% (p/p)
Óxido de hierro	Máximo 1% (p/p)
Oxido de aluminio	Máximo 1,2% (p/p)
Agua libre	Máximo 1% (p/p)
Granulometría de yesos granulados (sólido granulado)	90% entre 1 y 4 mm Máximo de 10% menor a 1 mm
Granulado pelletizado	97% entre 1 y 4 mm Máximo de 3% menor a 1 mm

Fuente: Adaptado de la Resolución 264/2011 (Anexo 1) del SENASA correspondiente al reglamento para el "Registro de fertilizantes, enmiendas, sustratos, acondicionadores, protectores y materias primas en la República Argentina.

PRODUCTOS QUE COMPITEN EN SEGMENTOS SIMILARES DEL MERCADO

Dentro del segmento de fertilizantes azufrados, como se mencionó previamente, el yeso agrícola es el principal fertilizante sólido utilizado en la Argentina. Se lo aplica en los cultivos tanto en forma independiente o como ingrediente de mezclas físicas. En cambio, el sulfato de amonio (SA, 21% de N y 24% de S p/p) se lo utiliza principalmente para la formulación de algunas mezclas físicas. Asimismo, el tiosulfato de amonio (TSA, 12% de N y 26% de S p/p), fertilizante líquido que se produce en la Argentina, se lo aplica en su totalidad en mezclas con UAN (32% de N p/p).

Tabla III: Composición química y contenido de S de fertilizantes azufrados utilizados en la agricultura.

Fertilizante	Fórmula química	% de S	Forma de S
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	24	SO_4^{2-}
Tiosulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$	26	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$
Tiosulfato de potasio	$\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_3$	17	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$
Sal de Epsom	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	13	SO_4^{2-}
Yeso agrícola	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	12-18	SO_4^{2-}
Sulfato de magnesio hidratado	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	22	SO_4^{2-}
Sulfato de magnesio hidratado	MgSO_4	26	SO_4^{2-}
Sulfato de potasio y magnesio	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2 \text{MgSO}_4$	22	SO_4^{2-}

Sulfato de potasio	K_2SO_4	18	SO_4^{2-}
Azufre elemental	S^0	30-100	S^0
Superfosfato simple	$Ca(H_2PO_4)_2$ + $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	14	SO_4^{2-}
Superfosfato triple	$Ca(H_2PO_4)_2$ + $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$	<1	SO_4^{2-}

Fuente: adaptado de Fertilizer Manual (1998).

En la Tabla IV se compara las principales ventajas y desventajas de los fertilizantes azufrados sólidos utilizados en la fertilización de cultivos extensivos de la Región Pampeana.

Tabla IV: Principales ventajas y desventajas de fertilizantes sulfatados sólidos.

Tipo de fertilizante azufrado	Ventajas	Desventajas
Sulfato de amonio	- S inmediatamente disponible - Compatibilidad física y química para mezclas físicas - Aporta N y S en proporciones balanceadas	- Riesgo de lixiviación de sulfatos en condiciones predisponentes (e.g. precipitaciones intensas, suelos arenosos, etc.) - Compatibilidad limitada para mezclado físico con urea (tendencia al apelmazado)
Yeso agrícola	- S inmediatamente disponible. - Amplia disponibilidad en yacimientos locales. - Reacción neutra en el suelo. - Baja fitotoxicidad en contacto con semillas	- Contenido de S variable según pureza mineralógica - Variabilidad en propiedades físicas (e.g. granulometría, humedad libre) - Riesgo de lixiviación de sulfatos
SFS	- S inmediatamente disponible. - Aporta P y S, principales nutrientes deficientes en cultivos de fabáceas (leguminosas)	- Baja concentración de P - Relación P/S poco balanceada

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla V se muestra el consumo aparente de fertilizantes azufrados (yeso, SA, TSA y otros) en los últimos años. Estas estadísticas no incluyen el superfosfato simple de calcio (SFS) que se lo clasifica e incluye en las estadísticas de los fertilizantes fosfatados.

Tabla V: Consumo aparente de fertilizantes azufrados en la Argentina.

Año	Consumo aparente
2012	160,5
2013	177,3
2014	133,8
2015	94,9
2016	132,9
2017	157,8
2018	177,2

Fuente: CIAFA y Fertilizar Asociación Civil.

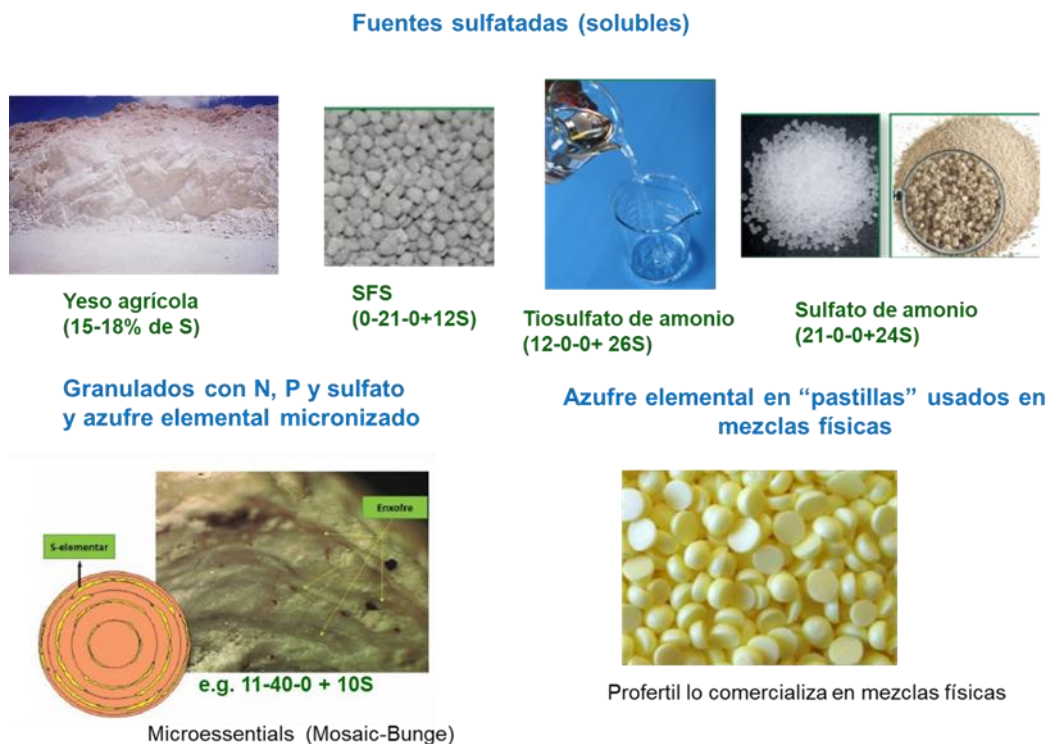
El consumo de fertilizantes azufrados representa el 4-5% del total de los fertilizantes utilizado en el ámbito agropecuario. Según CIAFA, dentro de este segmento, el consumo de yeso agrícola se ubica en el torno de las 40 o 50k TM. Sin embargo, cabe aclarar que este guarismo no surge de un relevamiento del uso según zona o cultivo, sino que corresponde al yeso agrícola comprado por estas empresas e informadas a CIAFA. Por lo tanto, estas estadísticas subestiman el yeso agrícola que se comercializa sin pasar por las empresas miembro de CIAFA, por ejemplo, todo el yeso agrícola comercializado en forma directa por las empresas mineras no se considera en las estadísticas de CIAFA, y lamentablemente tampoco han sido relevadas por organizaciones gubernamentales confiables, ni incluido en los censos mineros o agropecuarios.

De acuerdo con información de consultoría, existiría una capacidad instalada de 245k TM de yeso a nivel nacional. Este yeso se comercializaría tanto para ser utilizado como fertilizante o como enmienda principalmente en la Región Chaco-Pampeana.

Es importante resaltar que si bien el SFS (21% de P y 12% de S) no se lo incluye en las estadísticas de los fertilizantes azufrados (por ser clasificado y comercializado como un fertilizante fosfatado), el contenido y aporte de S de este fertilizante es muy considerado por los productores agropecuarios y también para el posicionamiento del producto por parte de las empresas que comercializan este producto en el país. Asimismo, este fertilizante representa el principal producto sustituto o competidor del yeso agrícola en el ámbito local. Así, la amplia oferta de comercialización del SFS representa la principal barrera de entrada al mercado de fertilizantes por parte de los empresarios mineros que comercializan o quieren comercializar yeso destinado al uso agropecuario y también una referencia para la determinación del precio de venta del

yeso agrícola. En el sitio web de CIAFA se pueden consultar estadísticas de consumo aparente de yeso agrícola y de SFS de los últimos años. <https://www.ciafa.org.ar/>

Gráfico 1: Tipos de fertilizantes azufrados utilizados en Argentina.



Además del SFS, considerado un commodity en los últimos años se observa una tendencia creciente a la adopción de mezclas químicas “NPS o NPSZn” que se caracterizan por presentar una combinación del S en forma de sulfatos y S elemental micronizado. Si bien el S elemental es insoluble en agua, el micronizado y su introducción en la matriz del gránulo aumenta exponencialmente su reactividad en el suelo. Así, si bien conceptualmente el S elemental se lo considera de liberación progresiva de sulfatos (ya que requiere oxidarse en el suelo), cuando se aplica en forma micronizado, debido a la rápida oxidación en el suelo, se considera que la mayor parte del S aportado se convierte a formas biodisponibles dentro del ciclo de los cultivos anuales. Esto no ocurre cuando se aplica S elemental con granulometrías gruesas, de lenta oxidación en el suelo.

La principal ventaja de la incorporación de S elemental en la granulación de fertilizantes fosfatados es la posibilidad de lograr una mayor concentración de S y una menor relación P/S en la formulación, que no es posible hacerlo mediante la mezcla de yeso u otros fertilizantes azufrados sulfatados con fertilizantes fosfatados tradicionales como MAP (11% de N, 52% de P₂O₅) o DAP (18% de N, 46% de P₂O₅). Así, las mezclas químicas contienen contenidos de P del orden del 40% y 10% de S, que aplicadas en dosis típicas de 100-150 kg/ha, permiten cubrir la demanda de P y S de la mayoría de los cultivos de grano. Estos productos se los consideran fertilizantes de eficiencia mejorada y se comercializan como especialidades

(speciality fertilizers) en mercado de nichos que son los que más vienen creciendo en el país. En el 2017, el consumo de mezclas químicas portadoras de N, P, S y micronutrientes fue de 256k Tns, de un total de mercado de especialidades de 330 k Tns (equivalentes a 260M de USD). Los demás productos del segmento “especialidades” corresponden a fertilizantes foliares, bioestimulantes, y aditivos para mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes, todos con gran valor agregado.

En cuanto a los fertilizantes azufrados líquidos, los mismos han mostrado un crecimiento muy notable en consumo en los últimos años, debido a sus ventajas agronómicas, logísticas y de aplicación. Los principales fertilizantes líquidos utilizados en la Argentina son soluciones nitro-azufradas formuladas en base a UAN (30-32% de N) y tiosulfato de amonio (TSA, 12% de N y 26% de S), que se mezclan en diferentes proporciones, determinando contenidos variables de N y S en el producto formulado. El TSA presenta la mayor concentración de S en solución dentro de los fertilizantes azufrados líquidos. Este fertilizante si bien reacciona generando en parte iguales sulfatos y AE, ésta última fracción se la considera de rápida disponibilidad en el suelo.

USOS DEL YESO AGRÍCOLA EN EL ÁMBITO AGROPECUARIO

Los principales usos del yeso agrícola en la Argentina son como fertilizante azufrado en cultivos extensivos y para mejorar la condición de fertilidad de suelos sódicos con aptitud forrajera. Asimismo, el yeso se lo utiliza para mejorar la condición física de suelos agrícolas sodificados y/o alcalinizados por el riego con aguas de mala calidad y/o por eventos de anegamiento e inundación con aguas bicarbonatadas sódicas. Otro uso menos conocido es la aplicación de yeso agrícola en combinación con calizas o dolomías para mejorar la solubilización y eficiencia de corrección de éstas en suelos ácidos y/o acidificados en sistemas manejados en siembra directa.

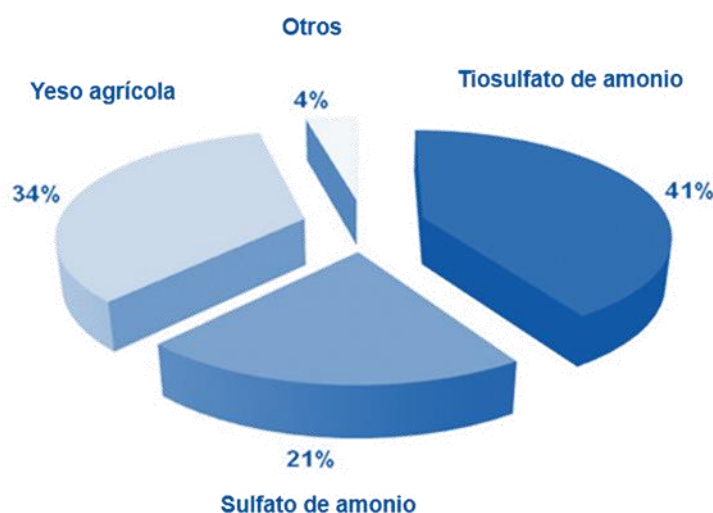
La mayor parte del uso del yeso agrícola como fertilizante azufrado se localiza en la Región Pampeana donde se concentra el 80-85% de la demanda global de fertilizantes del país. Asimismo, los cultivos extensivos de grano (trigo, cebada, maíz, sorgo, soja, girasol) demandan la mayor parte del yeso agrícola utilizado en la fertilización de estos cultivos.

En cultivos intensivos, el yeso agrícola se lo utiliza como enmienda en suelos bajo cubierta (invernáculo), por ejemplo, en la producción de tomate o pimiento. Este tipo de sistemas de producción si bien representan una proporción menor de la demanda global de yeso agrícola, representan nichos de mercado relevantes en las economías regionales. Estos sistemas se localizan en los denominados “cinturones frutihortícolas” de las principales ciudades dentro del ámbito de la Región Pampeana (e.g. Rosario, CABA, La Plata, Mar del Plata, etc.). Asimismo, en regiones como NEA, NOEA, Cuyo, y en los valles irrigados de la Patagonia o de la Cordillera de los Andes se cultivan especies frutales, forestales y/o hortícolas en donde el yeso agrícola ocupa un lugar tanto para la fertilización azufrada o cálcica, o bien como enmienda de suelo. Lamentablemente sobre este segmento de cultivos intensivos no se dispone de información publicada y por ello no serán tratados en el presente informe.

YESO AGRÍCOLA COMO FERTILIZANTE AZUFRADO

El yeso agrícola es el principal fertilizante azufrado sólido utilizado en la fertilización de cultivos extensivos en la Región Pampeana de Argentina (Gráfico 2).

Gráfico 2: Participación de mercado de los principales fertilizantes azufrados demandados en la Argentina en cultivos extensivos.



Fuente: adaptado de Pusetto (2012).

El S es un nutriente esencial en la nutrición vegetal. Los requerimientos de S de los cultivos son, en general, similares a los de P, aunque más bajos que los de N o K. El S participa en procesos bioquímicos y fisiológicos centrales como la síntesis de proteínas y lípidos, fotosíntesis, asimilación de N, fijación biológica de N, entre otras. El S también influye en la calidad de los productos cosechados, mejorando la calidad y contenido de proteína en los granos de diferentes cultivos.

Las raíces de las plantas superiores absorben S como sulfato que luego es reducido dentro de la planta, incorporándose a compuestos orgánicos. El principal reservorio de S del suelo se encuentra en la MO, de donde por mineralización, provee con S durante el ciclo del cultivo. El S presenta una movilidad intermedia dentro de las plantas en comparación con nutrientes móviles como el N, P, K o Mg o aquellos con baja movilidad como Fe, Ca o Mn. Por ello, en general, y dependiendo del genotipo, los síntomas de deficiencias se suelen presentar en las hojas más jóvenes, ubicadas en la parte superior del cultivo. Sin embargo, cuando las carencias de S son muy severas, la clorosis (amarillamiento) puede ser generalizada en toda la planta.

Históricamente, las principales deficiencias de nutrientes en la Región Pampeana correspondieron a N y P. A mediados de la década de los años 90 se comenzaron a reportarse algunos casos de respuestas a la

fertilización azufrada en algunos cultivos como colza. Posteriormente las respuestas se establecieron definitivamente en cultivos como soja y/o secuencias trigo/soja a partir de ensayos de campo conducidos por técnicos del INTA Casilda.

Actualmente las deficiencias de S son generalizadas en la Región Pampeana, en especial en la porción húmeda y subhúmeda. Como se observa en la Tabla VI, el área fertilizada con S en la Región Pampeana es de 40-50% en los cultivos de granos de mayor importancia en términos de área sembrada (trigo, maíz, soja). Asimismo, si bien el girasol es un cultivo que presenta una elevada superficie fertilizada con N y P, la fertilización azufrada no es habitual en este cultivo. Posiblemente esto se deba a los bajos niveles de productividad del cultivo en los ambientes de producción, que impedirían la manifestación de deficiencias de S, que podrían explorarse en cultivos de alta producción.

Tabla VI: Utilización estimada de nutrientes para los principales cultivos de granos de Argentina.

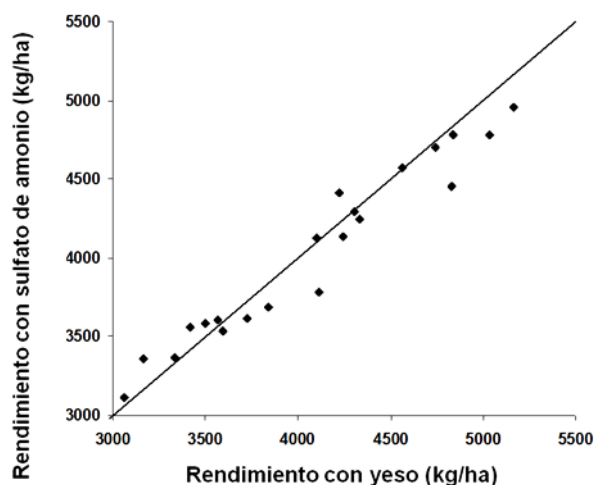
Cultivo	Dosis/ área fertilizada	N	P	S
Trigo	kg ha ⁻¹	46	16	10
	%	95	95	50
Maíz	kg ha ⁻¹	57	14	7
	%	90	90	40
Soja	kg ha ⁻¹	-	15	10
	%	-	50	50
Girasol	kg ha ⁻¹	15	9	5
	%	60	40	10

Fuente: adaptado de García y Salvagiotti (2009).

EFICIENCIA AGRONÓMICA RELATIVA DEL YESO CON OTROS FERTILIZANTES AZUFRADOS

De acuerdo con diversos trabajos científicos realizados a nivel internacional y nacional, se considera que el yeso agrícola, por presentar el S en forma de sulfatos, tiene similar capacidad para proveer S disponible para las plantas. Un ejemplo de estas investigaciones se muestra en el Gráfico3, en donde se comparó el rendimiento del trigo fertilizado con yeso o con sulfato de amonio en un conjunto de experimentos llevados a cabo en la Región Pampeana

Gráfico 3: Meta-análisis de la comparación del rendimiento de soja con aplicaciones de yeso y sulfato de amonio en la Región Pampeana. Los rendimientos obtenidos con yeso o sulfato de amonio no difieren significativamente ($p < 0,05$).



Fuente: Prystupa et al. (2012).

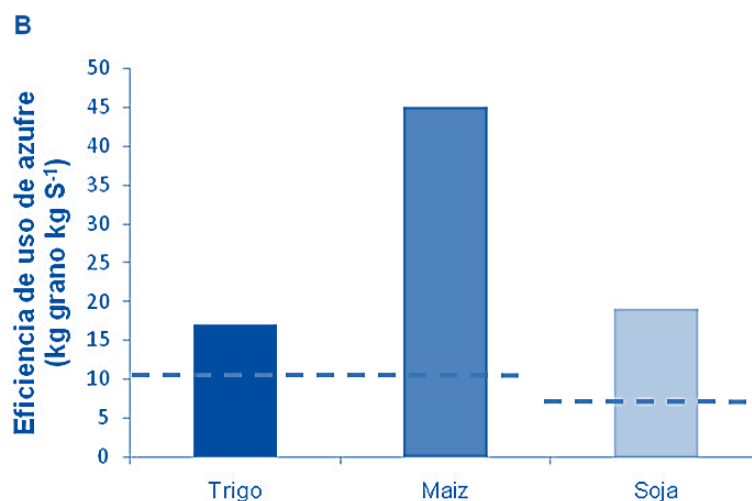
En términos simples, los resultados presentados, evidencian que el yeso agrícola, a pesar de su baja solubilidad en agua relativa a fertilizantes como el sulfato de amonio u otros, tienen la misma capacidad de aportar S biodisponible para los cultivos. Así, con las dosis de fertilización azufradas utilizadas habitualmente en la fertilización de cultivos en las condiciones de la Región Pampeana, se garantiza la disolución del mineral en el suelo, ya sea con la disponibilidad de agua en el suelo. Cabe destacar en este sentido, que una gran parte de los experimentos pioneros que se llevaron a cabo en esta ecoregión para evaluar la respuesta a la fertilización azufrada en cultivos de grano se utilizó yeso o basanita como fuentes de S. Por otro lado, el SFS, el otro fertilizante azufrado sólido utilizado en la Argentina contiene como forma química del S el sulfato de calcio hemi o bihidratado. De hecho, la literatura académica especializada en fertilizantes considera que el SFS presenta como compuestos químicos principales fosfato monocálcico y el yeso.

La decisión de compra de un determinado fertilizante azufrado se basa en una serie de consideraciones, cuya jerarquía varía según el perfil del comprador. Así, dentro de los factores que se suelen tener en cuenta se pueden mencionar el precio por tonelada o por unidad de S; disponibilidad del producto; financiamiento y servicios adicionales ofrecidos por el proveedor (e.g. muestreo de suelos, aplicación del producto; entre otros).

La relación de precios entre el grano y el fertilizante juega un rol importante ya incide directamente en la rentabilidad de la fertilización azufrada. Diferentes trabajos realizados en el país han demostrado que la fertilización azufrada genera respuestas económicas en una alta proporción de situaciones. De hecho, investigaciones recientes que analizaron la relación de precio del yeso y el trigo han demostrado que la respuesta a la fertilización azufrada fue rentable en 60% de los casos en donde se aplicaron dosis bajas de S (1-10 kg de S/ha) (Steinbach y Alvarez, 2017).

Trabajos previos realizados por los mismos autores incluyendo no solo trigo, sino también soja y maíz, observaron que la fertilización azufrada generó respuestas en rendimiento elevadas y rentables puesto que la magnitud de las respuestas (kg de grano/kg de S aplicado) fueron muy superiores a las relaciones de precios analizados.

Gráfico 4: Eficiencia agronómica de uso de azufre (EUS) en trigo, maíz y soja. Las líneas horizontales punteadas muestran la EUS en donde se iguala la relación de precios.



Fuente: Steinbach y Alvarez (2012).

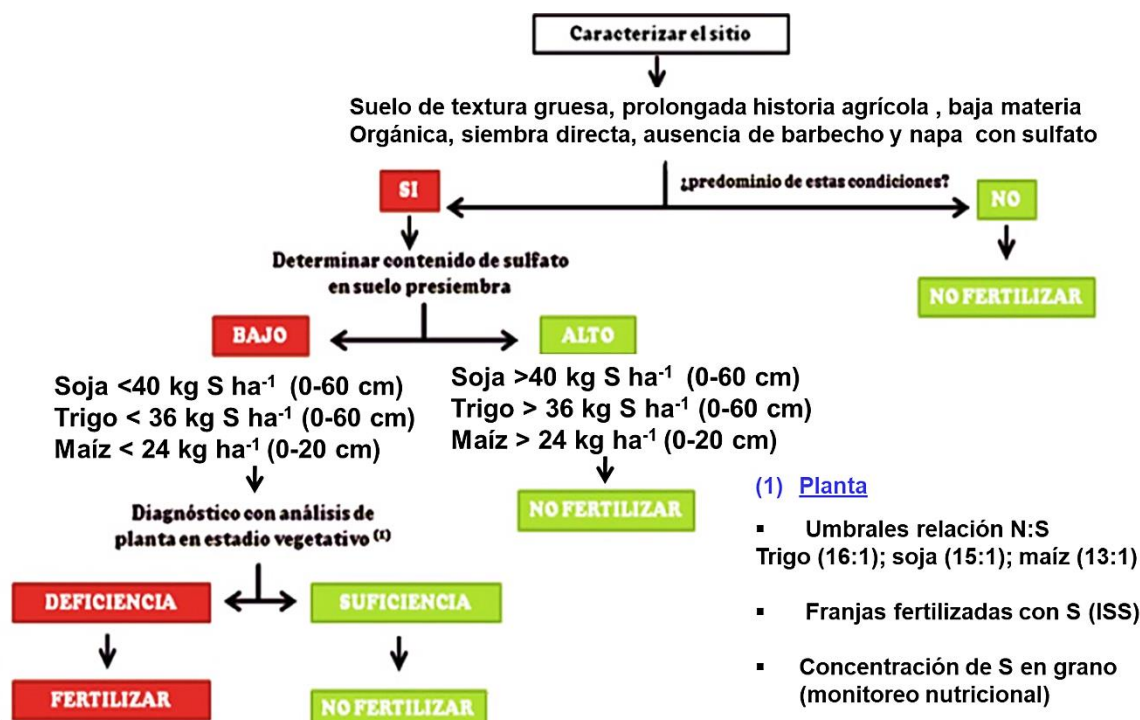
DETERMINACIÓN DE LA DOSIS DE YESO AGRÍCOLA A APLICAR COMO FERTILIZANTE AZUFRADO

Para determinar la dosis de S y consiguientemente calcular su equivalente en términos de yeso agrícola, se debe realizar un diagnóstico de las deficiencias de S en los diferentes lotes y/o ambientes. Para ello se disponen de las siguientes herramientas: (1) Análisis de suelos, (2) análisis de plantas, (3) evaluaciones sobre el cultivo y (4) evaluación integral del ambiente.

Los análisis de suelos son la principal herramienta para evaluar deficiencias de S y determinar la dosis de aplicación de S en cada unidad de manejo, ya sea un lote o ambientes diferenciados dentro de los lotes. Los análisis de suelos tienen como ventaja la posibilidad de detección temprana de las carencias, permitiendo planificar con tiempo las estrategias de fertilización.

Los análisis de planta, en general, se los utiliza para el monitoreo nutricional de los cultivos y eventualmente para realizar ajustes en futuros planes de fertilización. En Argentina los laboratorios utilizan diferentes extractantes para cuantificar la concentración de sulfatos. Los más utilizados son fosfato de calcio, acetato de amonio y fosfato de potasio. En los últimos años se han realizado calibraciones que permiten predecir la repuesta a la fertilización azufrada en base al análisis del contenido de sulfatos en el suelo en el momento de la siembra de los cultivos y también de la concentración de S en tejidos (Gráfico 5).

Gráfico 5: Modelo de decisión para definir la dosis la S en Cultivos de granos en Región Pampeana (2015).



Fuente: Adaptado de Carciocchi et al. (2015)

Las evaluaciones de las deficiencias de S mediante el uso de sensores remotos en estadios tempranos del ciclo de los cultivos, es decir sin extraer muestras de tejido foliar, es una herramienta interesante para monitorear el estatus nutricional de los cultivos. En algunos casos, también permiten evaluar la necesidad de re-fertilizaciones cuando se evidencien deficiencias que no han sido resueltas con el diagnóstico inicial (análisis de suelos) y la fertilización de base.

En zonas en donde no se hayan calibrado los análisis de suelos o en donde los mismos hayan presentado una baja o poco consistente asociación con las respuestas a la fertilización azufrada, se recomienda realizar una caracterización y evaluación integral de los ambientes, considerando no solo la disponibilidad de sulfatos en el suelo, sino también otras características del ambiente y del manejo agronómico:

- Características del suelo: contenido de MO del suelo, relación MO/arcilla, textura
- Historia agrícola: años de agricultura continua, nivel de degradación del suelo
- Antecedentes de respuesta a la fertilización azufrada en la zona o en propio establecimiento
- Evidencias de respuestas a otros nutrientes como N o P
- Nivel de productividad de los cultivos
- Aportes de S de la capa freática o del agua de riego.

En la Tabla VII se muestran dosis orientativas de aplicación de S en diferentes cultivos que constituyen una referencia cuando no se dispone de información local. Las mismas deben adaptarse a las condiciones del

propio sistema de producción, considerando las características edáficas, climáticas, genotipos utilizados (variedad o híbrido utilizado), rendimiento esperado y sistema de manejo (e.g. labranza tradicional, siembra directa, etc.)

Tabla VII: Dosis orientativas de S en donde se maximiza la respuesta a la fertilización azufrada en diferentes cultivos.

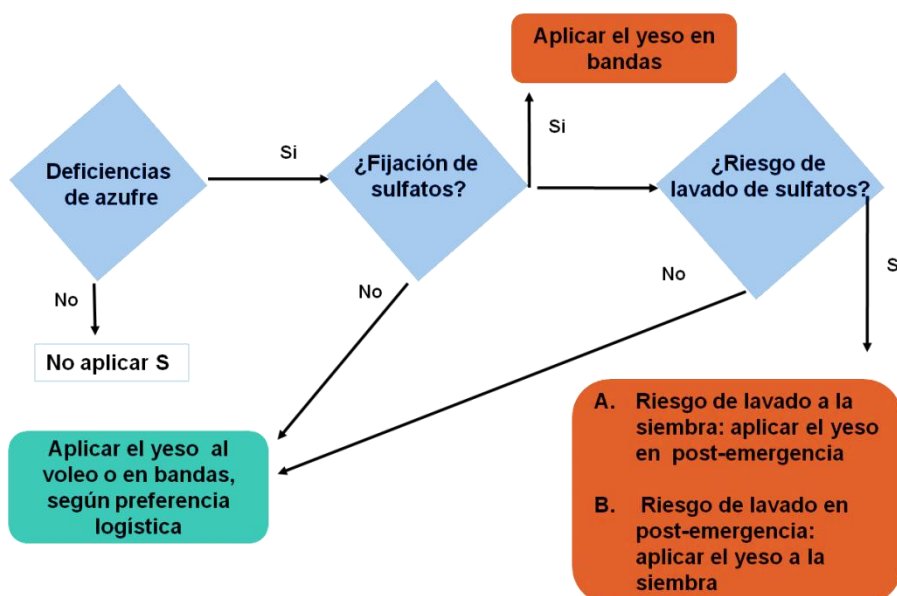
Cultivo	Dosis de S (kg/año)	Factores adicionales a considerar
Grupo I (alto requerimiento de S)		
Crucíferas	40-80	Especie y nivel de productividad
Alfalfa	30-70	Nivel de productividad y sistema de producción (pastoreo o corte mecánico)
Colza	20-60	Rendimiento y relación entre la disponibilidad de nitrógeno y azufre
Grupo II (moderado requerimiento de S)		
Cafeto	20-40	Productividad esperada
Caña de azúcar	20-40	Productividad
Tréboles y gramíneas forrajeras	10-40	Especie y productividad
Algodón	10-30	Productividad
Grupo 3 (bajo requerimiento de S)		
Remolacha azucarera	15-25	Productividad
Cereales forrajeros	10-20	Productividad
Cereales para grano	10-20	Especie y productividad
Maní	5-10	Productividad

Fuente: Adaptado de Darwich (1998).

MOMENTOS Y FORMAS DE COLOCACIÓN DEL YESO AGRÍCOLA

El propósito principal de la estrategia de fertilización azufrada debe ser lograr la mayor sincronía posible entre la demanda de S del cultivo y la oferta del nutriente, ya sea el proveniente del suelo o el derivado de la fertilización. Para definir el momento y forma de aplicación se deben tener en cuenta las características agroecológicas del sitio de producción, sobre todo las características del suelo (MO, textura) y el clima, en especial la magnitud y distribución de las precipitaciones durante la estación de crecimiento del cultivo. En suelos con baja capacidad de fijación de sulfatos y donde exista bajo riesgo de lixiviación de sulfatos, existe una amplia flexibilidad para decidir el momento y forma de aplicación de S. Así, en este tipo de condiciones, que son las predominantes en la Región Pampeana de Argentina, no son esperables diferencias en la respuesta a la fertilización azufrada entre los diferentes métodos de aplicación. Por ende, la preferencia logística y la maquinaria disponible en la zona representan las principales variables a considerar (Gráfico 6).

Gráfico 6: Modelo de decisión para determinar el momento y forma de aplicación de fertilizantes azufrados en cultivos de grano.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de Torres Duggan et al. (2012)

Por el contrario, en regiones en donde los suelos presenten mayor capacidad de retención y/o fijación de sulfatos, no son recomendables las aplicaciones en cobertura total (al voleo) ya que aumentan la superficie de contacto entre el S y el suelo, reduciendo la biodisponibilidad del nutriente. El mayor riesgo de fijación de sulfatos se presenta en suelos ubicados en zonas tropicales y/o subtropicales (Ultisoles/Oxisoles), como los que se pueden encontrar en algunas provincias argentinas como Corrientes y Misiones.

En cuanto al lavado de sulfatos, se considera que este mecanismo de pérdida es poco significativo en la mayor parte de los suelos de la Región Pampeana, aunque hay poca información al respecto. Sin embargo, debido a los fenómenos de cambio climático, se están observando con mayor frecuencia eventos de

precipitaciones de alta intensidad que pueden determinar el lavado de sulfatos cuando las lluvias ocurren luego de la fertilización azufrada, sobre todo en suelos con textura arenosa. La lixiviación de sulfatos es un fenómeno de difícil predicción y se encuentra regulado por diferentes factores. En términos generales se puede considerar que la pérdida de S por lixiviación aumenta en las siguientes condiciones: (1) suelos de textura arenosa, (2) disponibilidad de sulfatos (e.g. luego de la aplicación de yeso), (3) suelo húmedo y (3) lluvias o riego intenso luego de la fertilización.

En los suelos Molisoles de la Región Pampeana, caracterizados por su baja capacidad de fijación de sulfatos, se observan fenómenos de residualidad de la fertilización azufrada, que permite el manejo de ésta práctica a nivel de una secuencia de cultivos. Algunos ejemplos son los dobles cultivos como trigo/soja de 2°; cebada/soja 2°; trigo/maíz 2°, entre otras. Esto permite aplicar el Yeso durante el ciclo del primer cultivo (e.g. trigo, cebada, etc.) para cubrir la necesidad de S de los dos cultivos que integran la secuencia, obteniendo la misma EUS comparado con aplicaciones individuales efectuadas en cada cultivo. Esto permite al productor evitar el manipuleo de fertilizantes en el momento de siembra del segundo cultivo (cultivo de 2°), incrementando la eficiencia logística y tiempo disponible para dedicarse a la siembra del cultivo. Esto es muy relevante considerando que por cada día de demora en la fecha de siembra del segundo cultivo (típicamente soja o maíz), se reduce marcadamente el rendimiento potencial que se puede alcanzar con estos cultivos.

YESO AGRÍCOLA COMO ENMIENDA PARA MEJORAR LA FERTILIDAD DE SUELOS SÓDICOS

Aspectos generales

El yeso constituye el material tradicionalmente utilizado en la agricultura para mejorar la fertilidad de suelos sódicos, debido a la capacidad del yeso de aportar calcio disponible que permite ir sustituyendo progresivamente el sodio presente en el complejo de cambio. Sin embargo, la viabilidad para aplicar yeso agrícola en suelos genéticamente sódicos depende de diversos factores que deben ser considerados. Debido a la particular heterogeneidad de los suelos salinos y sódicos, es imprescindible realizar una exhaustiva evaluación de la capacidad productiva de estos ambientes.

En la actualidad no se dispone de estadísticas oficiales sobre consumo y/o utilización de yeso agrícola como enmienda para la corrección de suelos sódicos. Algunas estimaciones indican que, la demanda actual se ubicaría en 100-150 K t, sin embargo son datos no oficiales y que provienen de la opinión de expertos. A futuro, sería necesario que se incluya este tipo de información en los censos mineros y agropecuarios ya que hoy no se la tiene en cuenta y representa la base tanto para conocer tendencias y hábitos de uso, como así también para planificar y priorizar acciones de investigación y extensión.

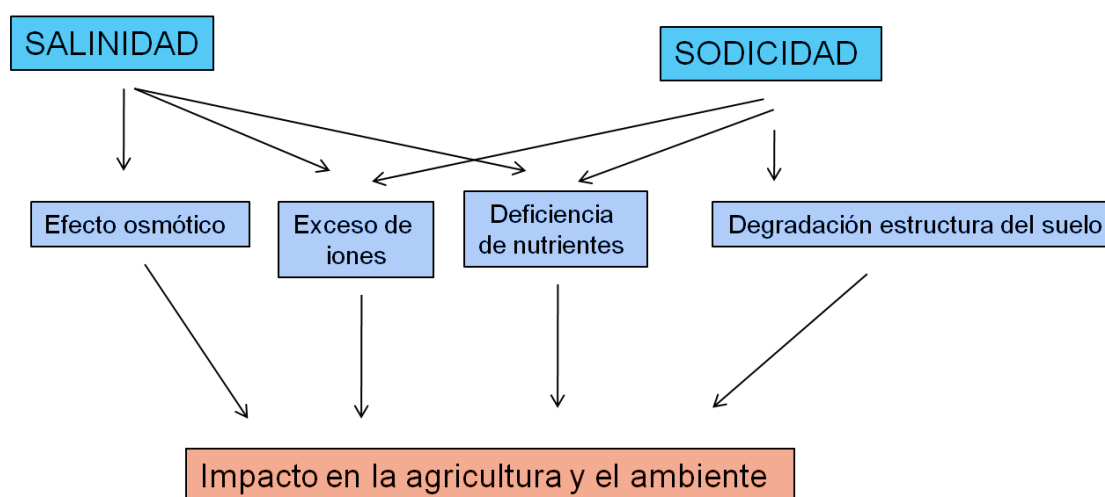
LA PROBLEMÁTICA DE LA SALINIDAD Y SODICIDAD EDÁFICA Y SU IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN DE CULTIVOS.

La salinidad edáfica es el aumento de la concentración de sales solubles en la zona de las raíces, por encima de valores que se consideran críticos para el adecuado crecimiento de cultivos sensibles. Esta acumulación

salina incrementa el potencial osmótico del suelo (generando un “efecto sequía”), pudiendo afectar la germinación y el crecimiento de las plántulas, como así también afectar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, es importante resaltar que existe diferente sensibilidad a la salinidad según la especie cultivada, inclusive hay forrajeras que pueden alcanzar productividades aceptables bajo una condición salina (e.g. raigrás, Lotus tenuis, festuca, entre otras) y por ello se las utilizan frecuentemente para mejorar la oferta forrajera en ambientes salinos o sódicos.

Los suelos salinos no presentan alteraciones en la condición física. La base de su manejo en áreas regadas consiste en la eliminación de las sales en exceso a través de la aplicación de láminas de lavado. En áreas de secano, la salinidad requiere de un manejo específico, en general de recuperación y manejo de la cobertura, implantando cultivos con capacidad de tolerancia a la salinidad o que puedan alcanzar rendimientos o una producción de forraje aceptable para la viabilidad de la empresa.

Gráfico 7: Efectos de la salinidad y sodicidad sobre los cultivos y el ambiente.



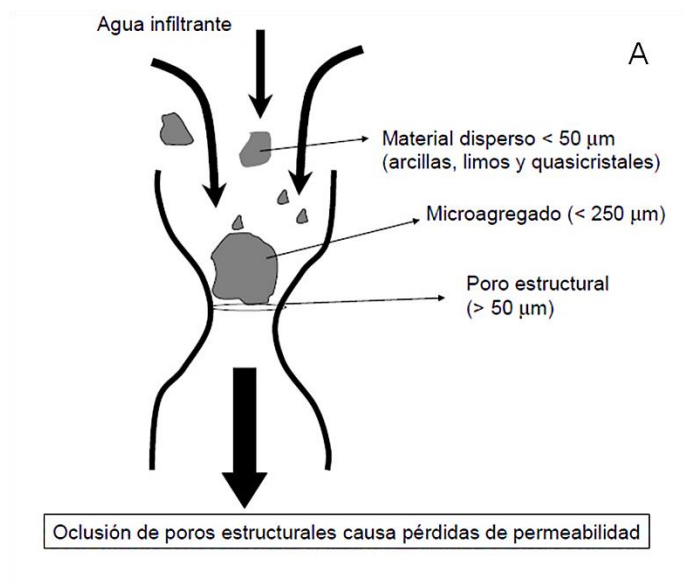
Fuente: Lavado y Taboada (2009).

Por otro lado, la sodicidad edáfica consiste en el incremento del contenido de sodio intercambiable por encima de valores en donde comienzan a evidenciarse alteraciones del funcionamiento estructural del suelo, derivada de la dispersión y migración de partículas de arcilla y microagregados, y el subsiguiente sellado de poros. El sellado de los poros reduce marcadamente el ingreso de agua al suelo (infiltración), como así también la permeabilidad (movimiento de agua en flujo saturado) del suelo. Asimismo, el sodio en altas concentraciones promueve la formación de costras superficiales, que en seco son muy duras y pueden provocar complicaciones para la normal emergencia de las plántulas, luego de ocurrida la germinación.

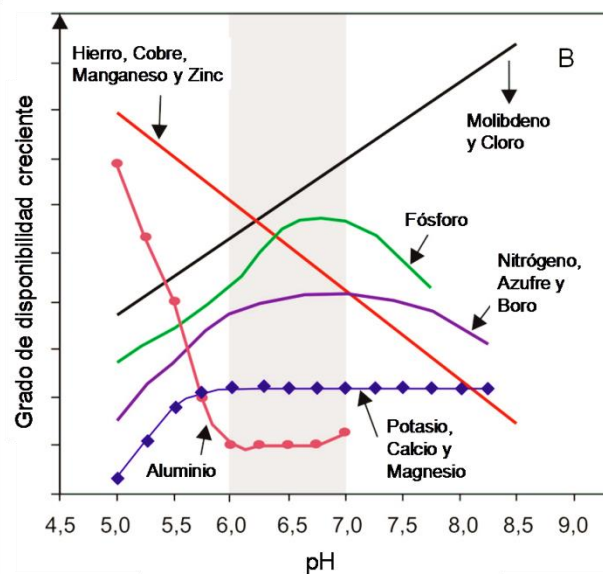
Por otro lado, la alcalinización del suelo (aumento del pH) se vincula con el exceso de sodio en el sistema, provocando la hidrólisis de las arcillas. Este proceso incrementa el pH a valores superiores a 8,2-8,3. Con estos niveles de pH se reduce marcadamente la biodisponibilidad de diferentes nutrientes, en especial de fósforo y micronutrientes metálicos (e.g. zinc, hierro, manganeso, entre otros).

Gráfico 8-A: *Dispersión y sellado de poros en suelos sódicos.*

Gráfico 8-b: *Disponibilidad de nutrientes según el pH del suelo.*



Fuente: Lavado y Taboada, 2009



Fuente: imagen gentileza IPNI Cono Sur.

El primer aspecto para establecer las posibilidades de uso del yeso agrícola en suelos halomórficos (ambientes salinos y/o sódicos) como así también en suelos agrícolas salinizados y/o sodificados por inundaciones y/o el riego, es el diagnóstico de la capacidad productiva de los suelos.

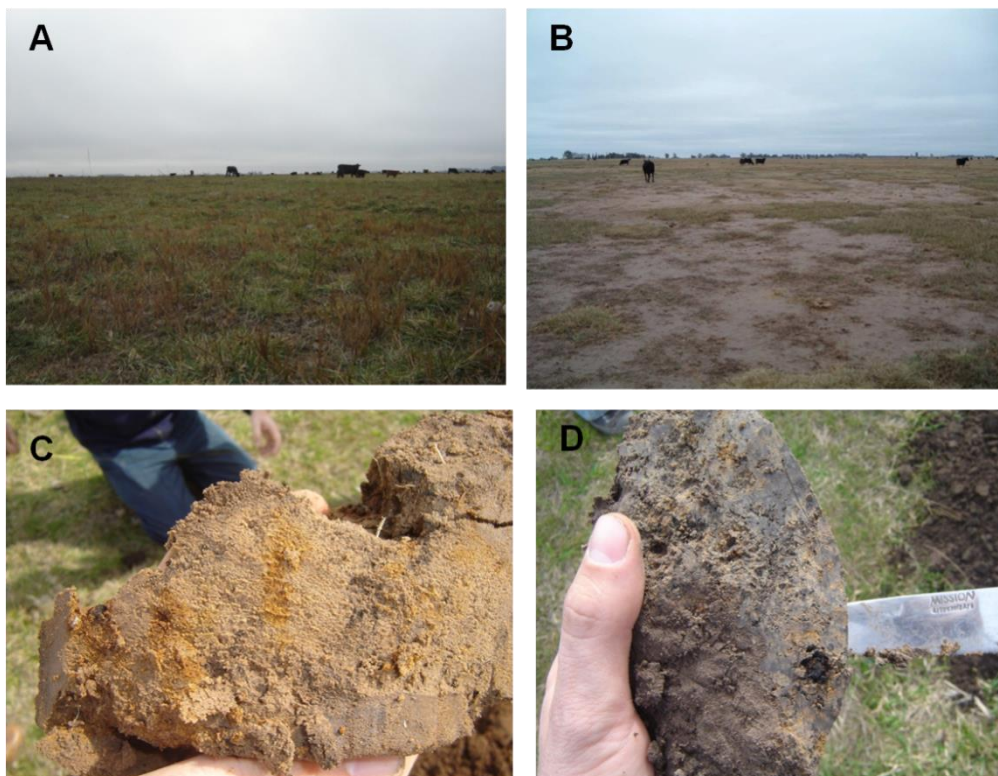
En cuanto a los suelos genéticamente sódicos, si bien la aptitud de uso de los mismos suele ser principalmente ganadera, existe todo un gradiente de posibilidades que tienen que ver con las características morfológicas del suelo (estructura, textura, distribución y espesor de horizontes), químicas (pH, CE, RAS), como así también del riesgo de anegamiento (rasgos de hidromorfismo).

Tabla VIII: Posición en el paisaje, y capacidad productiva de suelos bajos de la pampa deprimida y pampa arenosa.

Tipo de suelo	Ubicación en el paisaje	Capacidad de uso	Limitaciones	Usor ecomendado
Hapludolthaptonátrico	Planicies intermedias	Variable (III-VIs)	Alcalinidad subsuperficial	Marginalmente agrícola Típicamente ganadero
Natrudoles	Planicies bajas ("bajo dulce poco anegable")	Variable (IVs-VIs)	Alcalinidad subsuperficial	Marginalmente agrícola Típicamente ganadero
Natracuoles	Planicies tendidas ("bajodulce")	Variable (IV-VIws)	Alcalinidad subsuperficial Riesgo variable de inundación	Marginalmente agrícola Típicamente ganadero
Natracualfes, Natralboles	Planicies bajas alcalinas ("bajo alcalino")	VIIws	Salinidad-alcalinidad superficial y subsuperficial	Ganadero (pastizal natural y/o forrajeras adaptadas)

Fuente: elaboración propia.

Gráfico 9: Suelos de la Pampa Deprimida. A y B. Pastizal natural sobre un suelo Natracualf con diferente grado de cobertura. C y D. Moteados y concreciones ferro-manganesícos (rasgo de hidromorfismo) en suelos Natracuoles.



Fuente: archivo fotográfico tecnoagro.

La observación del perfil (morfología de suelos) es una labor central del trabajo de campo realizado durante la elaboración de mapas básicos de suelos, que requiere conocimiento y habilidad en reconocimiento de suelos, ya que se debe tener presente aspectos como la relación suelo/paisaje (propiedades externas), atributos morfológicos como el tipo y espesor de los diferentes horizontes; textura, estructura y consistencia del suelo, profundidad de las raíces, presencia de impedancias mecánicas, entre otras características.

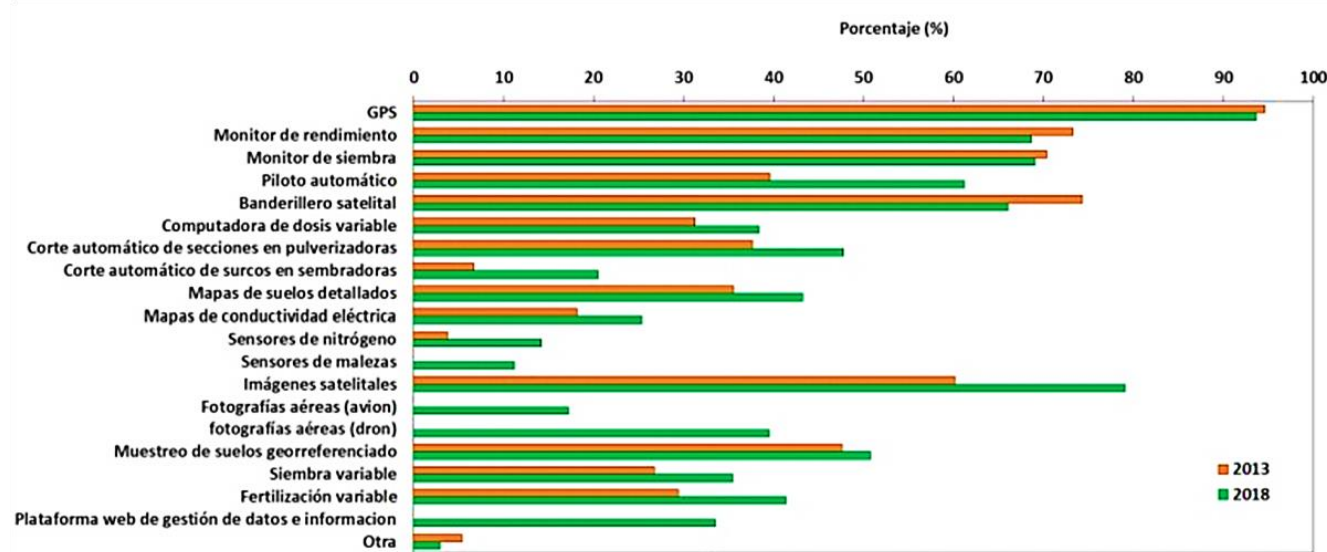
Tabla IX: Criterios para clasificar suelos halomórficos.

	CE dS m ⁻¹	PS %	pH	Estado de arcillas	Permeabilidad (k)	Infiltración
Normal	< 0,5	< 2	6-8,5	Floculada	Alta	Alta
Salino-sódico	> 4	< 15	>8,5	Floculada	Alta	Alta
Sódico-alcálico	< 4	> 15	>8,5	Hinchada	Baja	Baja
Salino-sódico	variable	> 15	Variable	Dispersa	muy baja	muy baja

Fuente: Elaborado en base a Cisneros et al. 2008.

En los últimos años tuvo lugar una marcada adopción de herramientas de agricultura de precisión en el ámbito de la Región Pampeana argentina, que complementan a las herramientas “tradicionales” utilizadas para el diagnóstico y rehabilitación de tierras afectadas sales. Así, de acuerdo a un relevamiento realizado por el INTA a través de encuestas electrónicas enviadas a asesores y en menor medida a productores agropecuarios en los años 2013 (488 casos) y 2018 (306 casos), aumentó marcadamente el uso de tecnologías que permiten caracterizar ambientes productivos como así también de herramientas para la aplicación variable de agro insumos como semillas, fertilizantes y/o fitosanitarios.

Gráfico 10: Utilización de herramientas de agricultura de precisión en la región pampeana de argentina



Fuente: Melchiori et al. 2018.

Otro de los hallazgos del relevamiento llevado a cabo por el INTA muestra que en el 2018 los asesores y productores agropecuarios reportaron una alta frecuencia de utilización de tecnologías que no se habían reportado (por no utilizarse) en el relevamiento realizado en el 2013. Dentro de estas tecnologías cabe destacarse el uso de fotografías aéreas a través de drones y aviones no tripulados, como así también la muy reciente adopción de plataformas web para la gestión de datos y sensoramiento de cultivos denominados “agro tecnologías de base digital” o AgTech’s (por su denominación en inglés).

La utilización de índices de vegetación obtenidos a través de drones y/o satélites son herramientas de gran valor y utilidad que permiten complementar y facilitar la caracterización y evaluación de suelos sódicos y/o alcalinizados por eventos de anegamiento y/o inundación. Particularmente el uso de drones, por poder funcionar aún con nubosidad, permite obtener y gestionar imágenes multiespectrales utilizadas para cuantificar con gran detalle y rapidez diferentes condiciones de la superficie de los suelos, por ejemplo presencia de afloramientos salinos, suelo anegado o saturado, vegetación activa o muerta, entre otros. A diferencia de la cartografía tradicional, que ofrece un inventario de las tierras según su aptitud de uso, la aplicación de herramientas de teledetección mediante fotografías aéreas obtenidas por drones y procesadas a una gran velocidad permite caracterizar y cuantificar áreas afectadas por problemas de halo e

hidromorfismo de un modo dinámico, lo que permite también establecer las técnicas de mejora y/o rehabilitación de tierra de un modo mucho más efectivo.

Debido a la rápida adopción de este tipo de herramientas en los sistemas de producción agropecuarios de la Región Pampeana, AAPRESID decidió crear un sitio web (www.agtech.org.ar) en donde los socios de esta organización evalúan las AgTech's y permiten ir dando una calificación que permite ir clasificando y puntuando cada una de ellas, aspecto que es de vital importancia para poder determinar la propuesta de valor de cada una de ellas para los productores agropecuarios.

POTENCIAL DE USO DEL YESO AGRÍCOLA EN SUELOS SÓDICOS

Un error de abordaje frecuente al dimensionar mercados y/o áreas con uso potencial de yeso agrícola como enmienda es considerar el área total de suelos salinos y/o sódicos como variable predictora de la demanda, ya que como se dijo previamente, estos ambientes son muy heterogéneos y presentan un muy diversa aptitud para ser tratados con este tipo de agrominerales, tema que se desarrollará en detalle en las próximas secciones. Así, aún en grandes regiones geomorfológicas como la Pampa Deprimida y/o los Bajos Submeridionales en donde hay millones de ha con suelos afectados por sales, debido a la coexistencia de suelos halomórficos (genéticamente afectados por sales) e hidromórficos (genéticamente afectados por los excesos hídricos), una fracción de dicha superficie termina siendo apta y viable para la aplicación de yeso agrícola.

Por ello, una recomendación práctica para dimensionar mercados potenciales de yeso agrícola es partir de una serie de interrogantes que permiten acotar y/o jerarquizar “zonas y/o mercados” con uso potencial de este tipo de agrominerales, a saber:

- *¿Cuál es la superficie con suelos sódicos en la región, subregión y/o predio?*
- *¿Qué proporción de los ambientes se encuentran afectados por eventos de anegamiento frecuentes?*
- *¿Qué proporción de los suelos sódicos no hidromórficos presentan sodicidad superficial?*
- *¿Qué proporción de los suelos sódicos no hidromórficos presentan sodicidad subsuperficial?*
- *¿Cuál es la dosis y forma de colocación recomendada en cada ambiente?*
- *¿Qué proporción de la superficie total apta para la aplicación del yeso agrícola podría ser efectivamente adoptada por los productores agropecuarios?*

Como se puede deducir de la secuencia de preguntas formuladas previamente, solo una fracción de las tierras afectadas por problemas de sodicidad es apta para la aplicación del yeso agrícola. Esta fracción de suelos aptos en general corresponde a ambientes sin anegamiento actual y/o con bajo riego de ocurrencias de eventos de anegamiento, como así también con capa freática por debajo de 1,2-1,3 m.

Por otro lado, el hecho que la mayor parte de los suelos sódicos se encuentren en producción ganadera sin uso de labranza (planteos de siembra directa) representa un factor a considerar para el dimensionamiento de mercados potenciales puesto que en este tipo de contextos no es habitual la aplicación de grandes volúmenes de yeso agrícola sobre la superficie, debido a la baja efectividad esperada de la práctica.

La información de la dosis o cantidad de yeso agrícola que se recomienda aplicar y el método de colocación del mismo debería provenir de información experimental regional llevada a cabo por organismos técnicos competentes como el INTA, Universidades, asociaciones de productores como CREA o AAPRESID, entre otros. Cabe destacarse en este sentido que, a diferencia de la abundante información experimental disponible en relación al uso del yeso agrícola como fertilizante azufrado, es muy limitada la literatura publicada sobre el funcionamiento de este agromineral como corrector y/o mejorador de ambientes sódicos y/o alcalinizados por el uso (e.g. riego). Esto resulta una gran falencia del sistema científico y tecnológico local. Posiblemente la misma se deba a que, debido a que el “enyesado” de suelos sódicos es una práctica conocida desde hace muchos años y por consiguiente no se la considera disruptiva y/o novedosa, se deja de invertir en recursos para generar modelos de recomendación calibrados a escala local y/o subregional, existiendo por lo tanto un vacío de conocimiento en esta materia.

También es relevante destacar que, cuando se analiza el potencial de uso del yeso agrícola como enmienda desde la perspectiva del desarrollo del mercado a escala regional y/o subregional, además de las características de los suelos y del paisaje, se debe tener en cuenta otros aspectos que inciden considerablemente en la adopción tecnológica, por ejemplo los aspectos sociológicos y psicológicos de los productores y cómo deciden adquirir o no una determinada tecnología; la infraestructura local de maquinaria agrícola para la aplicación del yeso agrícola; el precio del corrector; el financiamiento, entre otros. Este factor habitualmente se soslaya en las estimaciones de mercado de agrominerales y de yeso agrícola como enmienda en particular. En la actualidad si bien no se dispone de estadísticas que releven la adopción del yeso agrícola como corrector químico en ambientes afectados por sales, la evidencia empírica muestra que es muy escasa y por consiguiente hay mucho por hacer en términos de comunicación y extensión rurales.

Gráfico 11: Localización geográfica de suelos afectados por sales en la Argentina.



Fuente: Red Argentina de Salinidad (gentileza Dr. Miguel Taboada, INTA castelar).

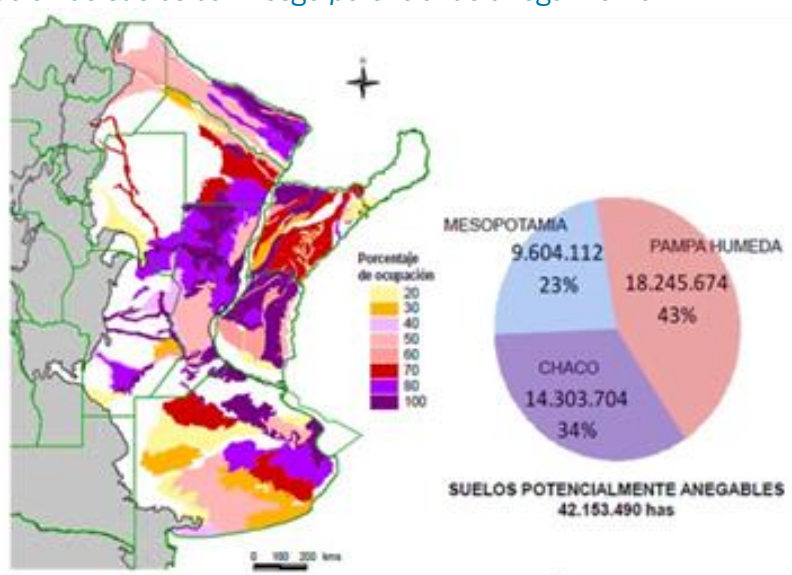
De las 35 millones de ha con suelos afectados por excesos de agua y sales en zonas húmedas y subhúmedas de la Región Pampeana, la mayor proporción corresponde a suelos genéticamente sódicos, que han evolucionado bajo el efecto más o menos permanente del agua freática, fuertemente salina y alcalina. Así, un rasgo particular de los ambientes salino sódicos de la Región Pampeana es la coexistencia de problemas de halomorfismo (exceso de sales) e hidromorfismo (excesos hídricos), aspecto importante a tener en cuenta cuando se analiza el potencial de uso de yeso agrícola en estos suelos.

En la provincia de Buenos Aires, el área con mayor prevalencia de suelos genéticamente sódicos se localiza en la Pampa Deprimida, que cubre un área mayor a 5.000.000 ha, que corresponde a una extensa llanura con muy bajo gradiente topográfico y muy escasa red de drenaje. Si bien el principal uso de la tierra es ganadero, la capacidad productiva de los suelos es muy variable y se encuentra estrechamente relacionada con la posición del suelo en el paisaje, ya que ésta condiciona las limitaciones por salinidad, alcalinidad y/o hidromorfismo.

Otra región emblemática de suelos genéticamente hidro-halomórficos es la de los “Bajos Submeridionales”, ubicados en Santa Fe y Chaco, considerados de gran importancia ecológica por la gran abundancia de humedales con gran biodiversidad.

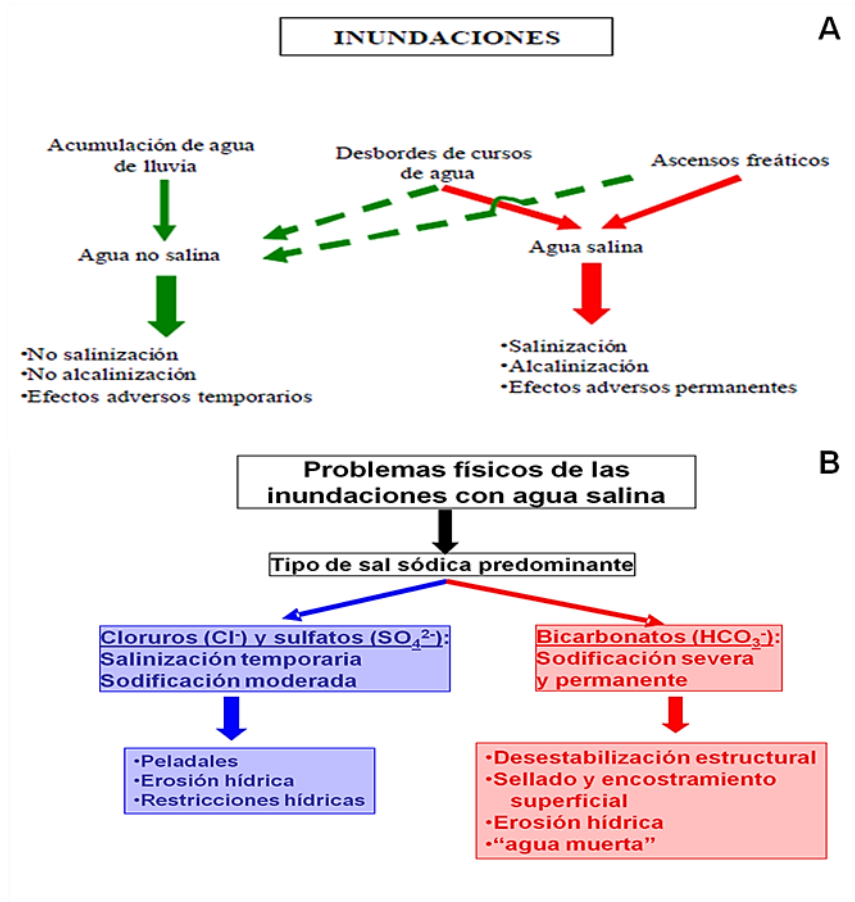
Por otro lado, también existen suelos que, sin haber evolucionado bajo condiciones hidro-halomórficas, han sufrido diferentes procesos de deterioro causado por los excesos de agua y sales asociados con ascensos de la capa freática, reduciendo su capacidad productiva. Estos suelos en su mayoría presentan aptitud agrícola y ocupan una superficie de entre 2 y 5 millones de ha. Se localizan principalmente en el sudeste de Córdoba, oeste y norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe.

Gráfico 12: Distribución de suelos con riesgo potencial de anegamiento



Fuente: Godagnone y de la fuente, inédito.

Gráfico 13: Efectos de las inundaciones sobre la salinización y/o alcalinización del suelo según el origen y calidad del agua inundante.



Fuente: Taboada et al. (2009)

Cuando el agua causante del anegamiento y/o la inundación proviene de la lluvia, como ocurre en la Pampa Deprimida, no se observan problemas de salinización y/o alcalinización superficial (Gráfico 13A). El problema principal es la falta de “piso” para poder circular y operar con maquinaria agrícola en los lotes y los efectos de la anaerobiosis (falta de oxígeno) sobre los cultivos y/o forrajeras establecidas en esa condición.

Por el contrario, cuando la fuente de agua de inundación es agua salina, ya sea por ascenso de la capa freática o proveniente del desborde de cursos de agua con esas características, se pueden presentar procesos de salinización y sodificación. Los efectos dependerán del tipo de sal sódica presente en el agua, que se puede analizar mediante un análisis químico de rutina (Gráfico 13 B). Así, si la sal sódica dominante presenta como acompañante cloruros y sulfatos, el principal efecto de la inundación es la salinización temporaria (que se suele revertir a medida que las lluvias van lavando las sales) y una sodificación moderada. Asimismo, cuando la sal sódica es del tipo carbonatada y/o bicarbonatada, frecuentemente ocurre sodificación severa, caracterizada por una alcalinización evidente y la subsecuente degradación del sistema estructural del suelo, como se describió previamente en la sección de suelos sódicos.

De acuerdo al contexto planteado, el rol del uso de los fertilizantes y enmiendas en general, y del yeso agrícola en particular, depende considerablemente del tipo de inundación y sobre todo del impacto observado. En áreas con suelos agrícolas, en donde el proceso de anegamiento y/o inundación deriva de ciclos climáticos húmedos y se asocian a ascensos transitorios de la capa freática, la aplicación de yeso agrícola puede ser una práctica coadyuvante de la recuperación natural del suelo, sobre todo en las situaciones en donde se haya verificado una alcalinización más o menos significativa. Esto se puede verificar mediante el análisis del pH y PSI (o RAS) del suelo. Asimismo, la aplicación de Y debe ir acompañada o enmarcada dentro de un plan integral de manejo y rehabilitación integral del suelo, que incluya la recuperación de la cobertura y la prevención de los ascensos freáticos.

ROL DEL YESO AGRÍCOLA COMO MEJORADOR DE SUELOS SÓDICOS DE LA REGIÓN PAMPEANA

Para definir la estrategia de mejora de suelos sódicos y/o de ambientes agrícolas que han sufrido procesos de sodificación por ascenso de capa freática es necesario llevar a cabo un diagnóstico integral de la condición de fertilidad edáfica. Así, el objetivo estratégico del manejo de ambientes salinos o salino-sódicos es mantener o recuperar la cobertura de vegetación, evitando que ocurra ascenso capilar de sales desde la capa freática. En la Tabla X se presentan las principales técnicas que se utilizan para mejorar ambientes salinos o sódicos, incluyendo el uso del yeso agrícola.

Tabla X: Técnicas de manejo de suelos salino-sódicos según diferentes propósitos.

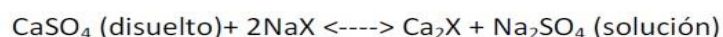
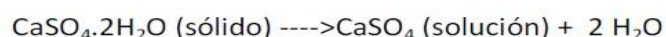
Técnica	Reducir ascenso capilar	Aumentar infiltración	Recuperar cobertura	Deprimir nivel freático	Aumentar producción
Pastoreo rotativo		X	X		X
Coberturas y mulches	X	X	X		X
Aflojamiento	X	X	X		
Intersiembra	X	X	X		X
Subsolado-drenes topo		X		X	
Revegetación de playas	X	X	X		X
Trasplantes de especies			X		X
Forestación	X		X	X	

Enyesado en bandas		X	X	X
Drenajes localizados	X		X	
Fertilización				X
Clausuras	X	X	X	X

Fuente: Cisneros et al. (2008).

Como se puede observar, el uso del yeso agrícola en ambientes afectados por procesos de sodificación juega un rol importante para la mejora de la infiltración de agua en el suelo y la recuperación de la cobertura de vegetación, aumentando la capacidad productiva del sitio de producción.

El primer efecto del agregado del yeso sobre el suelo es provocar la floculación del mismo, mejorando la condición física, en particular de la infiltración de agua. Posteriormente, a medida que el mineral entra en contacto con la fase sólida del suelo ocurre un fenómeno de intercambio iónico progresivo, según la siguiente reacción:



El calcio, además de mejorar la condición estructural del suelo, también reduce la actividad iónica del sodio en solución y su toxicidad específica.

A medida que el sodio adsorbido en el complejo de cambio del suelo se va desplazando progresivamente por acción del calcio, el sodio reacciona con el sulfato, formando sulfato de sodio en solución. Esta sal se debe eliminar del perfil para completar la corrección química del suelo. Para ello, el suelo debe presentar una adecuada permeabilidad y la capa freática se debe ubicar a una profundidad en donde no se evidencia ascenso capilar de sales. A medida que se va eliminando el sodio del sistema suelo-planta, se comienza a evidenciar la reducción de la alcalinidad mediante descensos del pH y en los valores del RAS.

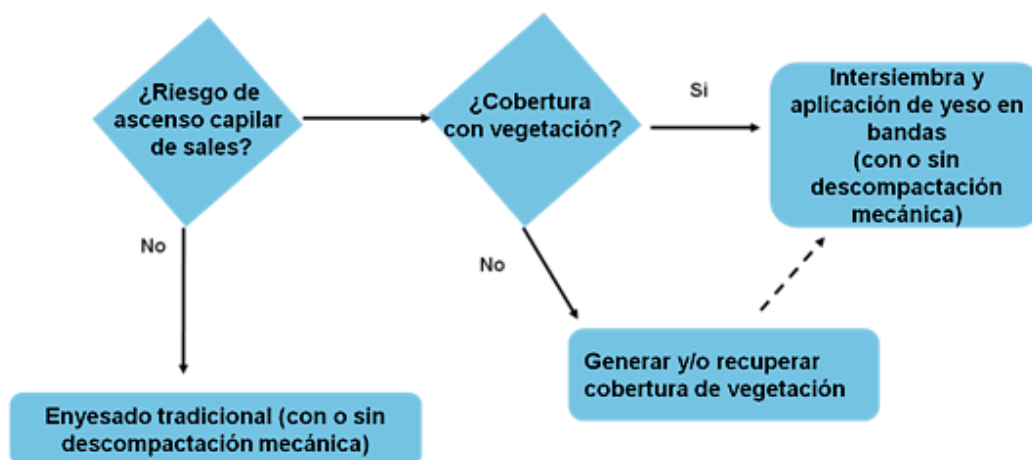
La evaluación de la dinámica de la capa freática, la cobertura o ausencia de cobertura de vegetación y la distribución de la alcalinidad en el perfil son variables decisoras centrales para establecer la tecnología de aplicación del yeso agrícola. La profundidad a la cual la capa freática provoca el ascenso capilar de sales hasta la superficie, causando problemas de salinización y/o sodificación se denomina “profundidad crítica” y depende principalmente de la estructura y textura del suelo. En el área central de la Región Pampeana, la profundidad crítica de la capa freática se ubica en el rango de 100-130 cm en suelos areno francos y francos, respectivamente, siendo un poco mayor en suelos arcillosos.

La dinámica teórica o idealizada del ascenso de la capa freática es algo diferente en suelos que presentan un horizonte impermeable arcillosos (B2t nátrico), rasgo dominante en la mayor parte de los suelos de la Pampa Deprimida. En esta zona, la capa arcillosa impermeable confina a la capa freática en su parte inferior o base, evitando que ésta alcance la superficie. La evidencia de este fenómeno es la formación de precipitados de carbonatos de calcio en la base del horizonte B2t nátrico, conocidos como “tosquillas”. Sin embargo, aún así puede ocurrir y ocurre en algunas situaciones ascenso capilar de sales desde el horizonte B2t nátrico hacia la superficie. Esto se debe a que hay capilares que comunican el horizonte A (horizonte superficial) y el B2t nátrico (horizonte sub-superficial). Este fenómeno ocurre sobre todo cuando hay escasa cobertura de vegetación viva o broza (material vegetal muerto en pie), característico de áreas sobre pastoreadas y/o degradadas.

Cuando hay ascenso capilar, ya sea porque la capa freática se ubica por encima de la profundidad crítica o bien ocurre ascenso capilar de sales desde capas arcillosas impermeables a nivel sub-superficial, la aplicación masiva de yeso agrícola es una práctica poco efectiva, debido a la ocurrencia de procesos de resodificación de la superficie del suelo. En estas condiciones se procura la instalación de forrajeras sobre el propio tapiz de vegetación (intersiembra) realizando aplicaciones del yeso agrícola en bandas en dosis bajas, localizadas en la línea de siembra. Esta tecnología de aplicación mejora la condición físico-química del sitio de germinación-emergencia de las plántulas y el establecimiento de los cultivos. En situaciones en donde no haya cobertura de vegetación debido a la severa salinización, se recomienda primer generar la cobertura mediante diferentes técnicas como la realización de clausuras al pastoreo, mulches, técnicas de revegetación, entre otras. Una vez logrado una adecuada cobertura de vegetación, se pueden utilizar las técnicas de aplicación localizada mencionada previamente.

Por otro lado cuando la freática se ubica por debajo de la profundidad crítica no ocurre ascenso capilar de sales hacia la superficie. Por ello, si el suelo presenta un adecuado drenaje interno, las posibilidades de aplicación de yeso agrícola son mayores. Asimismo, cuando se observa la presencia de costras duras en superficie, el yeso agrícola se lo puede combinar con técnicas de descompactación mecánica.

Gráfico 14: Modelo de decisión para definir la tecnología de aplicación de yeso en ambientes sódicos y/o sodificados.



Fuente: Elaboración propia en base a Cisneros et al. (2008) y Taboada y Lavado (2009).

El laboreo vertical aplicado durante la descompactación mecánica y la no remoción de la cobertura del suelo, son pre-requisitos básicos que se deben considerar en el manejo de ambientes sódicos.

Gráfico 15: Sembradoras para la intersembra de forrajeras con púas montadas para realizar descompactación (A y B) y equipo descompactador desarrollado por el INTA San Luis (C y D).



La determinación de la dosis de yeso agrícola a aplicar en cada lote o ambiente se debe basar en modelos disponibles a nivel local. En general, los modelos de diagnóstico de corrección de suelos con este tipo de minerales tienen en cuenta propiedades químicas como el RAS o PSI del suelo, textura, CIC, entre otras.

Cuando no se dispone de información experimental local se puede realizar el cálculo teórico de la “necesidad de yeso”. Para ello se calcula la cantidad de meq de sodio, es decir la masa equivalente de sodio que se requiere reemplazar del complejo de cambio del suelo mediante la aplicación de una masa equivalente del yeso necesaria para lograr esa meta. Sin embargo, este método se lo debe considerar como una referencia teórica preliminar. Las principales limitaciones de este método derivan en el supuesto que la reacción de intercambio es completa, y en realidad la misma presenta una muy amplia eficiencia de intercambio. Asimismo, en ambientes edáficos en donde se requiere desplazar una elevada cantidad de sodio intercambiable (e.g. suelos sódicos), las dosis recomendadas aplicando este cálculo suelen ser muy elevadas, frecuentemente inviables desde el punto de vista económico o logístico (posibilidades de aplicación con la maquinaria disponible).

Debido a la baja efectividad del “enyesado tradicional” (i.e. aplicación superficial de dosis elevadas de yeso agrícola), en los últimos tiempos organizaciones científicas y tecnológicas como el INTA promueven la difusión de prácticas como la aplicación localizada del yeso, principalmente en momentos como la

implantación de forrajeras en campos bajos. Esta técnica permite manejar dosis más bajas y lograr una mayor conveniencia económica.

El rol del asesor agronómico cumple es central en la evaluación y caracterización de los ambientes sódicos, y debería ser quien realice las recomendaciones en cuando a dosis y método de aplicación del Y en cada lote y/o ambiente.

En la el GRAFICO 16 se indican algunos de los factores que se deberían considerar y compatibilizar para establecer estrategias de aplicación de yeso agrícola en sistemas agropecuarios.

Gráfico 16: Información necesaria para establecer la dosis y método de aplicación en sistemas agropecuarios.



Fuente: Torres Duggan y Rodríguez (2017).

Como se mencionó antes, la eficiencia del enyesado tradicional suele ser muy baja en ambientes en donde existe ascenso capilar de sales hacia la superficie. Cuanto mejor es la condición de ingreso de agua (infiltración) al suelo y menor el efecto del ascenso capilar, mayor es la eficiencia y perdurabilidad de la corrección efectuada del enyesado. Los factores que intervienen en la efectividad lograda en un determinado sitio de aplicación son: dosis de yeso, PSI inicial del suelo; textura y MO (capacidad buffer); método de aplicación, pureza y granulometría del yeso. También las condiciones ambientales durante la aplicación y luego de la aplicación, sobre todo temperatura y humedad edáfica son factores a considerar. Cuanto mayor es el PSI inicial del suelo, a igualdad de los demás factores, mayor es la eficiencia teórica del intercambio del calcio por el sodio. Cuando el suelo presenta niveles de PSI relativamente bajos, el calcio aplicado con el yeso agrícola también desplaza a otros cationes intercambiables como el potasio o magnesio, reduciendo la “eficiencia teórica de conversión” del enyesado.

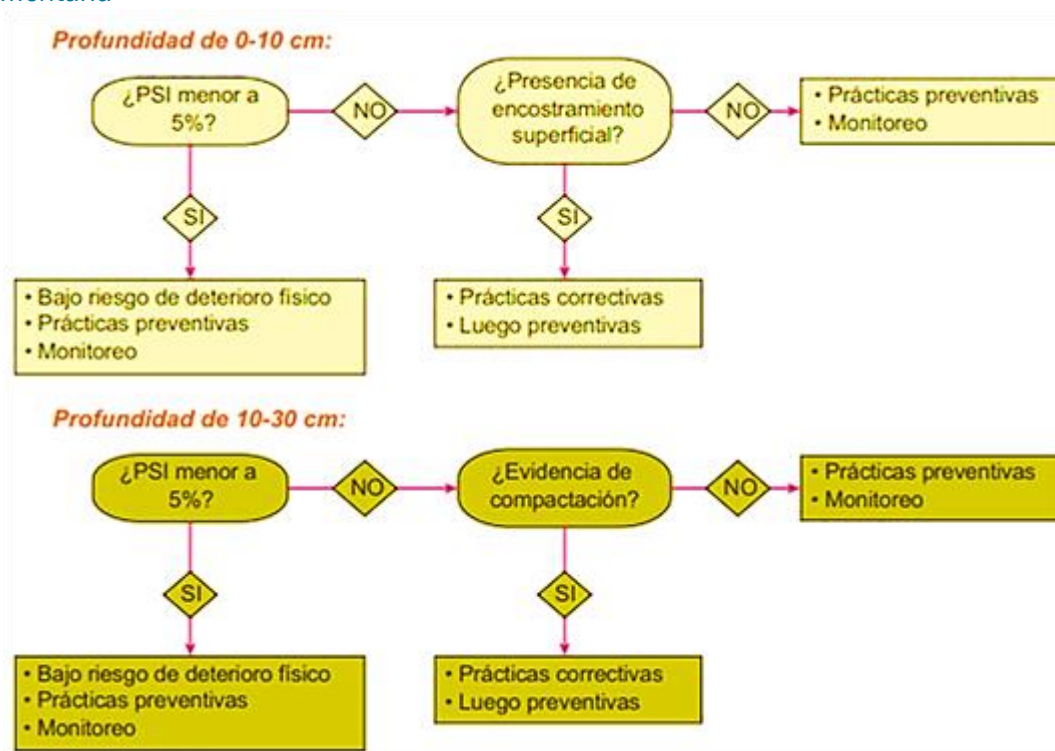
YESO AGRÍCOLA PARA MEJORAR LA FERTILIDAD DE SUELOS SODIFICADOS POR EL RIEGO COMPLEMENTARIO

El riego complementario es una práctica efectiva para incrementar y estabilizar el rendimiento de los cultivos, principalmente en contextos de variabilidad climática, permitiendo en definitiva reducir el riesgo productivo y económico de los sistemas de producción de granos. Actualmente se riegan alrededor de 280 K ha mediante riego complementario, principalmente en las provincias de Córdoba, Buenos Aires, Santa Fe y Entre Ríos y en menor medida en el NOA, existiendo un considerable potencial de expansión.

La principal problemática del manejo de suelos regados en forma complementaria radica en que la mayor parte de las aguas subterráneas disponibles en la porción húmeda de la Región Pampeana son del tipo bicarbonatadas sódicas. El manejo inadecuado del agua de riego puede conducir a procesos de degradación como sodificación, encostramiento superficial, entre los más frecuentes.

La evaluación de los ambientes regados en forma complementaria requiere de un abordaje integral basado en el análisis de diversos factores como las características de los suelos, la calidad y cantidad de agua de riego aplicada, el sistema de manejo de los cultivos, secuencias de cultivos, entre otros. En el Gráfico 17 se presenta un modelo conceptual para diagnosticar situaciones de sodicidad y compactación en ambientes regados con riego complementario, aplicable a zonas húmedas y subhúmedas de la Región Pampeana.

Gráfico 17: Modelo conceptual para el diagnóstico de la calidad de suelos regados en forma complementaria



Fuente: Torres Duggan et al., (2017).

La aplicación de yeso agrícola en ambientes alcalinizados por el riego complementario mejora la estructuración del suelo regado, favoreciendo la eliminación, aunque parcial, del sodio intercambiable. Actualmente no se dispone de información experimental regional y/o subregional en la Región Pampeana para establecer con precisión dosis de aplicación de yeso en suelos bajo riego complementario en siembra directa. Preliminarmente y a modo de hipótesis, la aplicación de dosis bajas de yeso permitiría la disolución del yeso en este tipo de sistemas de manejo, y facilitaría su incorporación progresiva a través del riego o de la lluvia. La información científica disponible sobre la influencia de la aplicación de correctores químicos de origen mineral en el ámbito de la Región Pampeana en suelos sodificados es muy escasa, y por consiguiente debería ser considerado un campo a explorar en futuras investigaciones para disponer de modelos conceptuales adaptados a las condiciones edafo-climáticas regionales y subregionales.

La combinación de prácticas de descompactación mecánica sin remoción de la cobertura de rastrojos y el agregado de yeso agrícola en dosis bajas factibles de distribuir con la maquinaria disponible podría ser una tecnología potencialmente útil para mejorar la condición física del suelo. Sin embargo, la aplicación de dosis bajas de yeso podría requerir de más de una aplicación, aumentando los costos logísticos. Por consiguiente, se debe evaluar para cada sistema de producción las ventajas y desventajas de cada tecnología de aplicación, considerando tanto los aspectos agronómicos aquí tratados como así también la viabilidad económica y logística. Cuando no se dispone de información local, preliminarmente, se pueden realizar cálculos teóricos de la “necesidad de yeso” para alcanzar determinados objetivos de sodicidad (e.g. 2 o 5% de PSI).

Tabla XI. Cálculo teórico de dosis de aplicación de yeso (Mg ha⁻¹) en suelos sodificados por el riego complementario para alcanzar PSI objetivo del 2%

<i>PSI inicial (%)</i>	<i>CIC (meq 100 g⁻¹)</i>				<i>Eficiencia (%)</i>
	10	15	20	25	
5	0,9	1,3	1,8	2,3	50%
8	1,8	2,7	3,7	4,6	50%
11	2,5	3,9	5,2	6,9	60%
14	3,5	5,2	6,9	9,2	60%

Nota: Profundidad=20 cm; Dap=1,2 g cm⁻³; pureza del yeso=100%; masa equivalente del yeso=86; capa freática por debajo de profundidad crítica.

Fuente: elaboración propia en base a Richards et al. (1973.)

Tabla XII. Cálculo teórico de dosis de aplicación de yeso (Mg ha^{-1}) en suelos sodificados por el riego complementario para alcanzar PSI objetivo del 5%.

<i>PSI inicial (%)</i>	<i>CIC ($\text{meq } 100 \text{ g}^{-1}$)</i>				<i>Eficiencia (%)</i>
	10	15	20	25	
8	0,9	1,3	1,8	2,3	50%
11	1,7	2,6	3,4	4,3	60%
14	2,6	3,9	5,2	6,5	60%

Nota: Profundidad=20 cm; $\text{Dap}=1,2 \text{ g cm}^{-3}$; pureza del yeso=100%; masa equivalente del yeso=86; capa freática por debajo de profundidad crítica.

Fuente: elaboración propia en base a Richards et al., (1973.)

Otro aspecto poco explorado en el ámbito local es la aplicación combinada de yeso con residuos orgánicos de origen animal, que permitiría una mejora en la condición física edáfica debido al efecto favorable del carbono orgánico aportado por el residuo pecuario, y del calcio soluble aportado por el yeso agrícola (i.e. mayor agregación e infiltración de agua). Asimismo, el yeso facilitaría la incorporación del abono orgánico, reduciendo las eventuales pérdidas de nitrógeno por volatilización de amonio. En la Argentina, la mayor parte de los efluentes y residuos orgánicos de origen animal no son reutilizados en los propios agro-ecosistemas o en el ámbito de influencia de los mismos para aportar nutrientes esenciales para las plantas o como mejoradores de suelos. Por el contrario, en general, son acumulados en lotes destinados *ad hoc* o bien vertidos sobre cursos de agua cercanos, contaminando el ambiente. Por ello es muy importante revalorizar estos materiales como recursos estratégicos a considerar en la fertilización de los cultivos, principalmente como fuentes de nitrógeno y fósforo, aprovechando residuos y efluentes disponibles a nivel local.

YESO AGRÍCOLA COMO ENMIENDA PARA MEJORAR SUELOS ÁCIDOS Y/O ACIDIFICADOS

Aspectos generales

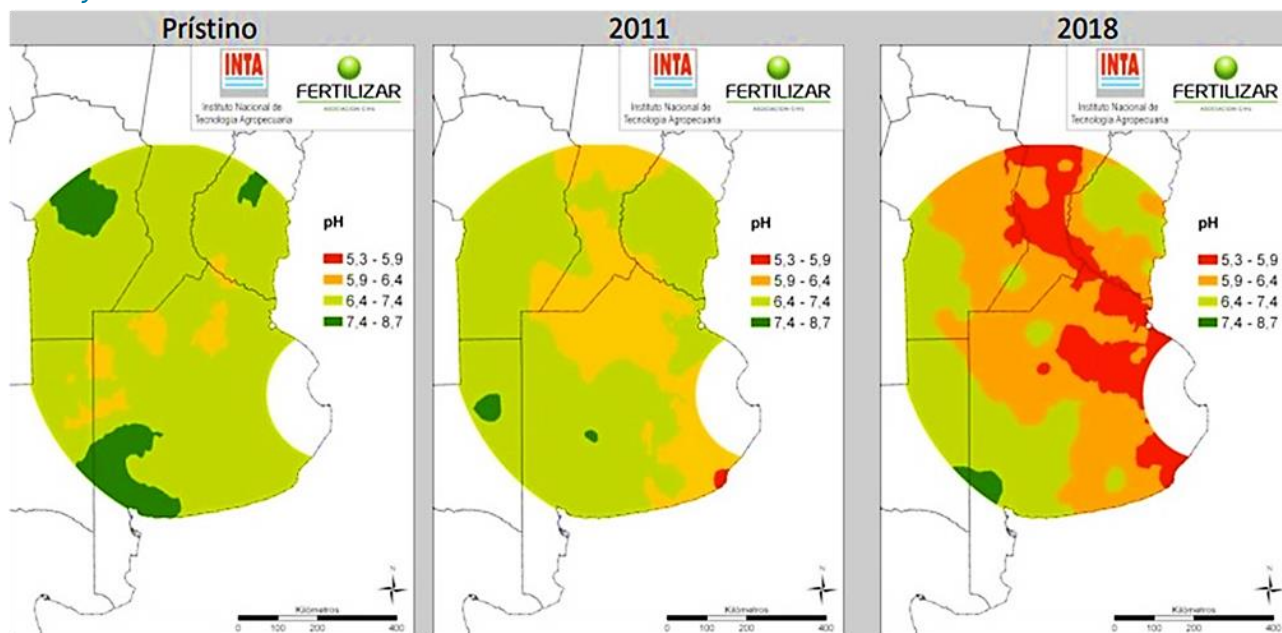
A diferencia de otros países de América del Sur como Brasil, Paraguay, Chile o Brasil, en donde una porción significativa de la producción extensiva de cultivos y pasturas se lleva a cabo sobre suelos genéticamente ácidos, en la Argentina la mayor parte de la agricultura extensiva se realiza en la Región Pampeana (que concentra alrededor del 80% de la demanda de fertilizantes) donde predominan suelos que no son genéticamente ácidos.

Sin embargo, en los últimos años diferentes investigaciones llevadas a cabo en el país comenzaron a reportar un fenómeno de acidificación de los suelos de la Región Pampeana argentina. Teniendo en cuenta que los suelos originarios en estos ambientes no son ácidos y que las dosis de nitrógeno aplicadas son de las

más bajas del mundo, el origen de la acidificación se atribuye fundamentalmente a la remoción de bases en los granos.

El Gráfico 18 muestra la evolución del pH superficial en suelos agrícolas de la Región Pampeana en relación al suelo prístino (suelo no cultivado) en dos años de muestreo (2011 y 2018), información obtenida en base a un relevamiento de suelos llevado a cabo por el INTA y Fertilizar Asociación Civil.

Gráfico 18: Niveles de pH en suelos prístinos y en muestreos realizados en suelos agrícolas en el año 2011 y 2018.



Fuente: Sainz Rozas (2019).

Como se puede observar, los suelos prístinos, que evolucionaron a partir del *Loess Pampeano* como material parental, no presentaban limitaciones de acidez debido a la riqueza en minerales primarios portadores de cationes básicos. Sin embargo, a medida que la agricultura se fue intensificando y consiguientemente la remoción de bases fue en aumento, los suelos fueron mostrando una progresiva acidificación. En los últimos años (período 2011-2018) la acidificación se aceleró debido posiblemente a la menor capacidad buffer de los suelos asociadas a la erosión y pérdida de MO en relación al suelo original. La acidificación no solo se evidenció en la reducción en los niveles de pH, sino también en la disminución de la concentración de bases en la capa superficial del suelo.

Gráfico 19: contenido de calcio intercambiable (0-20 cm)

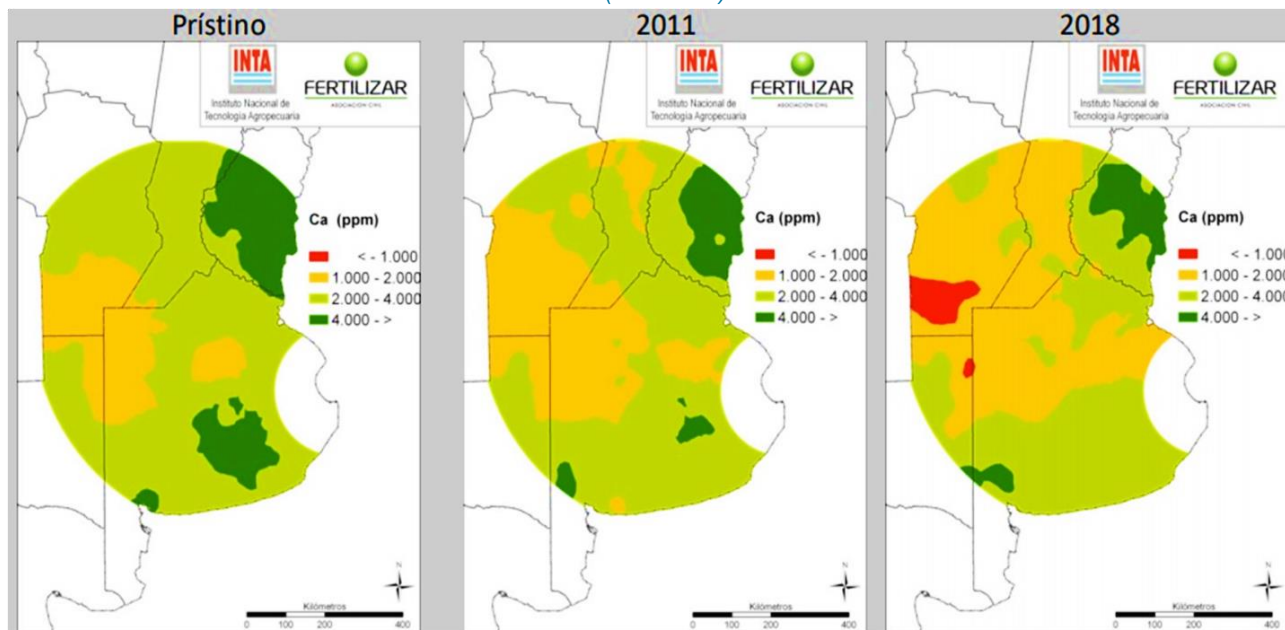


Gráfico 20: contenido de magnesio intercambiable (0-20 cm)

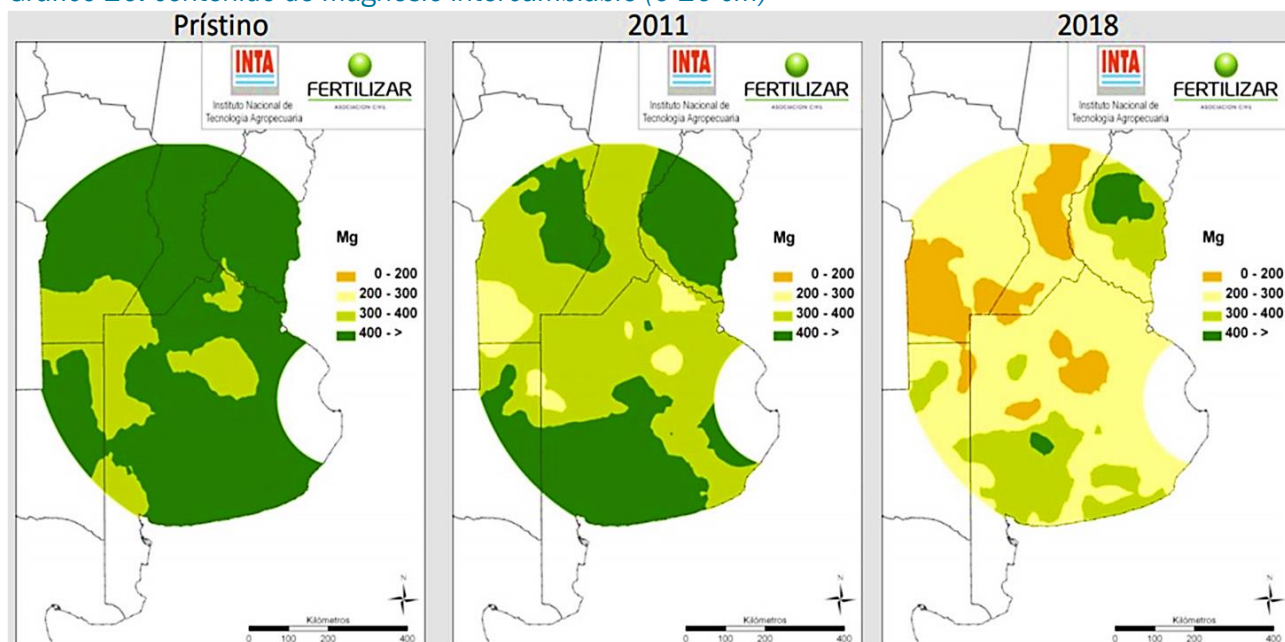
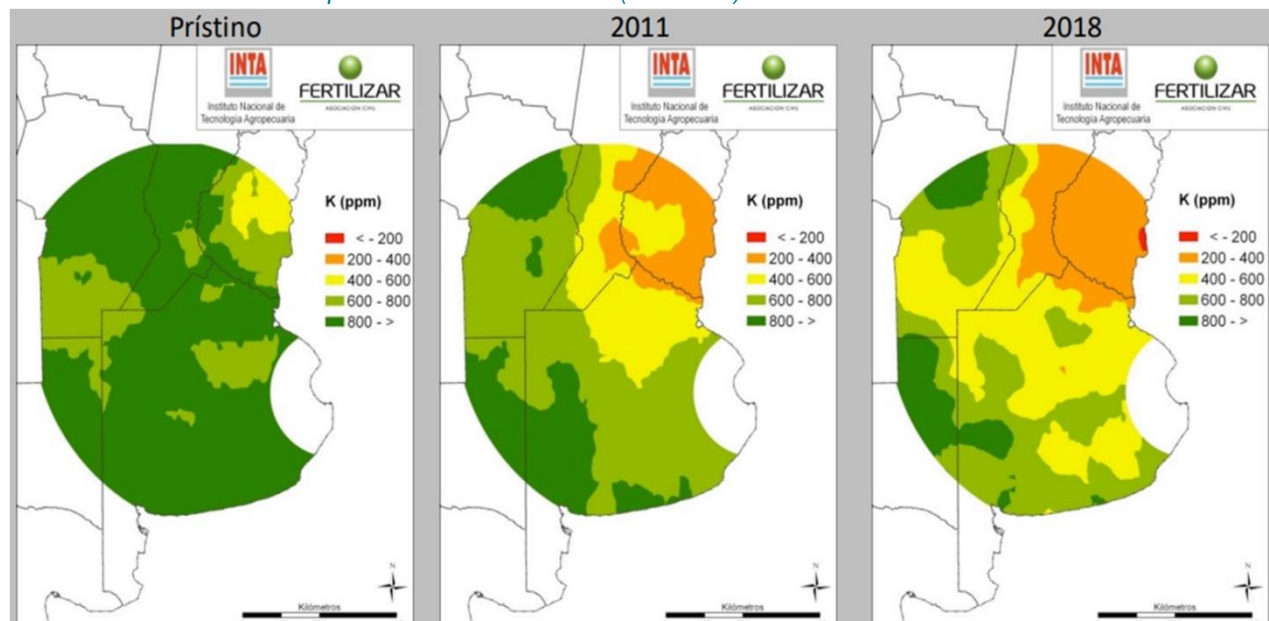


Grafico 21: Contenido de potasio intercambiable (0-20 cm).

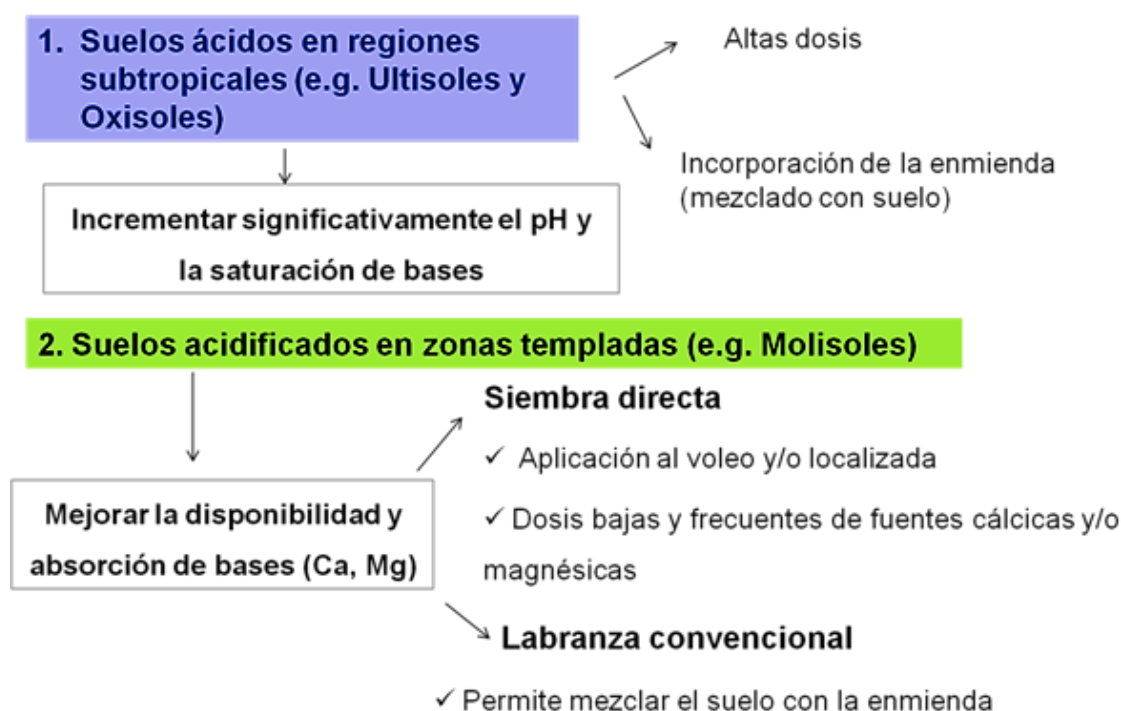


Fuente: Sainz Rozas (2019).

Cabe destacarse que los datos de pH y concentración de bases presentadas antes corresponden a la capa superficial del suelo (0-20 cm). En general por debajo de esta profundidad, los valores de pH como así también la saturación de bases tienden a aumentar y mejorar debido a la presencia de carbonatos en la masa del suelo.

Por otro lado, debido a que prácticamente la totalidad de la producción extensiva de cultivos de la Región Pampeana se hace mediante el sistema de siembra directa, el abordaje del manejo de correctores de acidez debe ser adecuado para este tipo de contextos. Así, el gran desafío del manejo de calizas y dolomías en planteos de siembra directa es lograr ser efectivos y eficientes en la aplicación de materiales insolubles en agua. La disolución de los carbonatos de calcio y/o calcio y magnesio cuando se aplican en cobertura total sin incorporación ocurre en los primeros centímetros del suelo (e.g. 0-5 cm), lo cual obliga a un esquema de aplicación de dosis más bajas y más frecuentes en el tiempo en comparación con el “encalado” tradicional.

Gráfico 22: Modelo conceptual de correctores de acidez según el tipo de suelo y sistema de manejo.

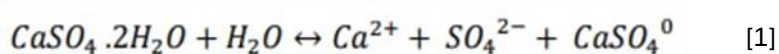


Fuente: elaboración propia.

POTENCIAL DE USO DEL YESO AGRÍCOLA EN SUELOS ACIDIFICADOS DE LA REGIÓN PAMPEANA

Si bien el yeso agrícola se lo utiliza tradicionalmente como fertilizante azufrado y como enmienda para mejorar la condición de fertilidad de suelos sódicos, también se lo puede utilizar para mejorar ambientes acidificados en siembra directa. Esto se debe a la capacidad que tiene el yeso de mejorar la performance de la corrección de las calizas en suelos ácidos y/o acidificados en sistemas en donde los correctores químicos se aplican sobre la superficie de los suelos sin incorporación mecánica. Debido a que los carbonatos no son solubles en agua, cuando se los aplica en superficie en cobertura total como ocurre en sistemas en siembra directa, debido a la ausencia de labranza, la efectividad y eficiencia de la corrección de la caliza es baja y se limita a los primeros centímetros.

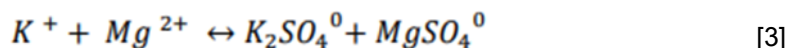
Cuando se aplica yeso agrícola en forma conjunta con el carbonato de calcio y/o de calcio y magnesio, se obtienen varios efectos favorables. Por un lado una parte del yeso agrícola que reacciona con el suelo queda como sulfato de calcio sin carga que se puede mover por el perfil y disociarse a calcio y sulfato en estratos subsuperficiales (reacción 1).



Por otro lado, el sulfato generado en la disolución del yeso genera pares iónicos con el aluminio (sulfato de aluminio), que se va eliminando a través del drenaje interno del suelo, mitigando el problema de la toxicidad del aluminio que afecta el crecimiento y expansión de las raíces (reacción 2)



Finalmente, el potasio o magnesio que eventualmente puede ser desplazado del complejo de cambio del suelo por el calcio del yeso también genera pares iónicos (sulfato de potasio y sulfato de magnesio) que se mueven en el perfil mejorando la saturación de bases en la zona de aprovechamiento radicular (ecuación 3)



Si bien se conocen estas reacciones, en la actualidad se están llevando a cabo iniciativas de investigación tendientes a evaluar en condiciones de campo qué dosis de carbonato y qué relación carbonato/yeso son las adecuadas para la corrección de la acidez y para la fertilización básica en suelos en siembra directa de la Región Pampeana.

Parte II: La actividad minera en la Argentina

CARACTERÍSTICAS DE LA OFERTA

YACIMIENTOS DE YESO

Argentina posee una amplia distribución de yacimientos yesíferos. Los mismos, se encuentran en formas variadas, desde el estado cristalino grueso hasta granular fino, como también desde la disposición en estratos hasta nódulos compactos sin diferenciación estructural.

Básicamente el origen de los yacimientos de yeso en Argentina responden a dos modelos de depósitos: los evaporíticos marinos y evaporíticos lacustres.

Los primeros se han formado en cuencas marinas marginales por precipitación de sales a partir del agua de mar. Se desarrollan en grandes zonas con importantes espesores, alcanzando una media de 90,7 % de sulfato de calcio.

Los depósitos de origen lacustre se encuentran más restringidos en su extensión alcanzando una ley de 85 % de yeso. Los depósitos de yeso en la Argentina se ubican en cuatro regiones principales:

- Cuenca neuquina (prov. de Mendoza, Neuquén, Río Negro)
- Centro-oeste del país (prov. de Tucumán, Santiago del Estero, Catamarca, La Rioja, San Luis)
- Región Buenos Aires - La Pampa
- Suroeste de la región mesopotámica (prov. de Entre Ríos).

Los señalados en primer término son los depósitos que presentan las mayores concentraciones correspondiendo a edad Jurásico-Cretácico, con las formaciones Auquilco, Huitrín, Allen y Roca extendiéndose desde el sur de la provincia de Mendoza a la provincia de Neuquén y el norte de Río Negro. El origen de este yeso se corresponde con las fajas litogenéticas de depósitos marinos y litorales. Están formados por masas de yeso y anhidrita con gran extensión y espesores que superan los 200m.

En Mendoza en los alrededores de Malargüe el yeso de tipo mantiforme forma un mineral blanco con interdigitaciones de anhidrita gris azulada constituyendo la Formación Auquilco.

Específicamente en la provincia de Neuquén forma la unidad denominada Yeso de Transición, presentándose como masas lenticulares con potencias que no superan las decenas de metros. Corresponden a depósitos de génesis evaporítica marina, razón por la que se encuentran asociados a sal de roca. Su disposición es estratificada con granulometría variable de gruesa a fina.

Los yacimientos que se encuentran en el valle del río Negro forman parte de la Formación Allen (Cretácico superior), presentándose como un horizonte subhorizontal. El mineral forma masas compactas o grandes bochas, con textura sacaroide (variedad alabastro).

Por su parte, la provincia de Chubut posee depósitos asignados a la Formación Salamanca, los que forman un extenso afloramiento horizontal, presentándose en color gris oscuro a negro y con grano fino. Otros bancos de yeso en la misma provincia presentan disposición horizontal, ubicándose al sur del lago Cohué Huapí.

Otras áreas con yacimientos de yeso se encuentran en el NO argentino en las provincias de Salta, correspondiendo a depósitos lacustres de tipo continental; Tucumán como evaporitas de cuencas continentales endorreicas y Catamarca con depósitos típicos de climas áridos formados en lagos y lagunas.

El Centro Oeste del país presenta yacimientos en las provincias de La Rioja originados en lagos (evaporíticos lacustres) con intercalaciones de areniscas y limolitas; San Juan del mismo tipo que en La Rioja con niveles de arcillas, limolitas y areniscas de grano fino. San Luis por su parte, posee canteras donde el yeso se presenta en bancos o bochas.

Santiago del Estero posee varios yacimientos aunque en algunos, la calidad del yeso se encuentra comprometida por su calidad química; la litología está formada por evaporitas lacustres constituyendo las Formaciones Las cañas y Río Salí.

Otros recursos yesíferos se encuentran en Buenos Aires en la cuenca del Río Quequén y en La Pampa en la Formaciones Luján y Lobos. En ambas provincias se corresponden con depósitos de evaporitas formados en lagos. También la calidad para su empleo agronómico se encuentra limitada en parte por las características químicas. Los yacimientos de la provincia de La Pampa se localizan en el extremo sudoeste de la provincia, en las cercanías de la localidad de Puelches, a ambos lados del río Salado; son bancos de yeso de más de 2 metros de espesor con tres horizontes de diferente calidad, asociados con lentes de limos y arcillas de ambiente lacustre intercalados en areniscas fluviales

Entre Ríos posee depósitos de yeso cuyo origen lacustre-palustre dentro de materiales arcillosos y/o arcillo-limosos de ambiente semiárido. Los yacimientos pertenecen a la Formación Hernandiarías (del Pleistoceno medio) presentando formas lenticulares con concentraciones epigénicas casi esféricas de distribución diseminada. Los depósitos se desarrollan en el oeste de la provincia entre las localidades de Paraná y La Paz con los yacimientos de Piedras Blancas y Santa Elena (Puerto Buey).

En el gráfico n° 23 se muestra el mapa de Argentina con la ubicación de los principales yacimientos de yeso para la provisión al agro y las fajas de rocas geológicamente favorables para su formación.

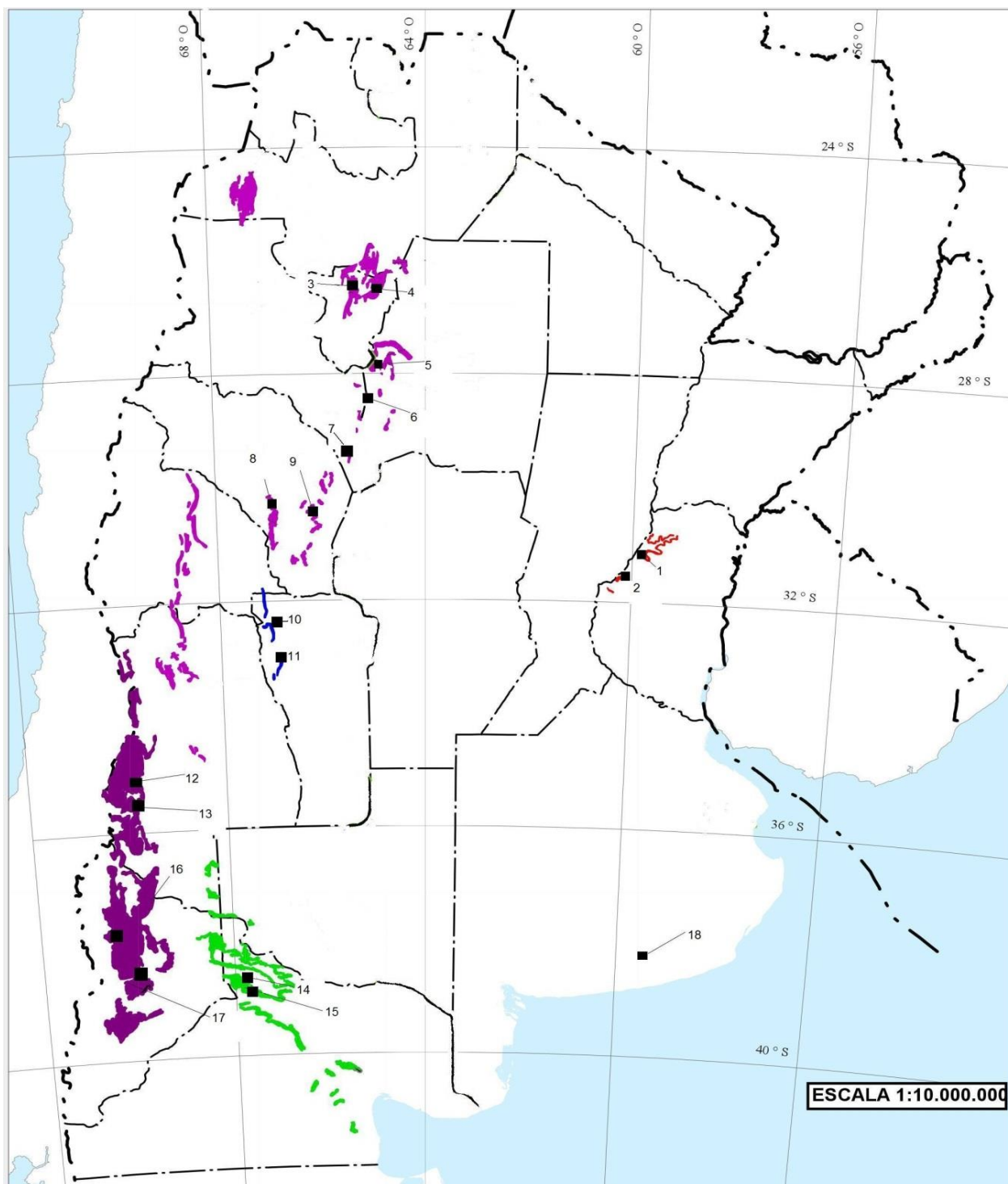
Tabla XIII: Principales yacimientos de yeso para la provisión al agro.

Provincia	Canteras / Yacimientos/ Localidad	Ubicación en mapa adjunto(*)
Entre Ríos	Piedras Blancas	1
	Hernandarias	2
Tucumán	Tapia, Raco, Vipos y Ticucho	3
	Timbó Viejo y Taruca Pampa	4
	El Tableado, El Jumeal, La Melita	5
Santiago del Estero	Sa de Guasayán	6
Catamarca	Canteras La Rosana, El Recreo, Las Gemelas Norma Ester, Búfalo, El Cerrito	7
La Rioja	Mara uno, Rafael y otras (San Ramón)	8
	La Salvadora, Paz, Progreso	9
San Luis	Canteras Doña Julia, El Milagro, La Unión, Tres Canteras, José Antonio	10
	Canteras Joluisa y Sierra de Varela	11
Mendoza	Cañada Ancha	12
	Canteras Las Negras y Las Torrecillas. Canteras Pequenco y Cerro Alto. Canteras Malargüe.	13
Río Negro	Cantera Don Eugenio	14
	Cantera Lucía	15
Neuquén	Auquilco	16
	Sa de Vaca Muerta	17
Buenos Aires	Río Quequén - Salado	18

Fuente: Dr. Carlos Herrmann, SEGEMAR (2019).

(*) Los números corresponden a su ubicación en el mapa.

Gráfico 23: Mapa de Argentina con la ubicación de los principales yacimientos de yeso para la provisión de yeso al agro.



Nota: Las áreas coloreadas en el mapa corresponden a fajas de rocas geológicamente favorables para la formación de depósitos de yeso.

Vista de una cantera de yeso (provincia de Mendoza-Malargüe)



MINERÍA DE LAS CANTERAS DE YESO

Entre los métodos de minería cielo abierto el más extendido entre los yacimientos de yeso del país es el llamado “Minería de Contorno”, el que consiste en la excavación tanto del estéril como del mineral en sentido transversal al afloramiento, dejando un talud de banco único y progresión longitudinal siguiendo el afloramiento. La altura del talud o banco dependerá del espesor del afloramiento y de la facilidad de remoción del estéril superior, el cual por otra parte, una vez removido queda en disponibilidad para la futura etapa de remediación.



Voladura y carga con cargador frontal - Mendoza

En función del espesor del banco de mineral se decide el sistema operativo, o sea la metodología y tecnología de extracción. Por lo general los yacimientos de “Cuenca Neuquina” suelen tener una potencia superior a aquellos Terciarios de Precordillera superando comúnmente los tres metros de potencia, razón por la cual se practica perforación, carga, voladura y achique de bloques al pie de cantera para luego ser transportado a planta de molienda. Para espesores que promedian en metro y medio pueden evitarse los procesos de perforación carga y voladura en el proceso de extracción y perforar el banco con martillo neumático autoportante montado sobre brazo hidráulico, para luego ser transportado a planta de molienda.



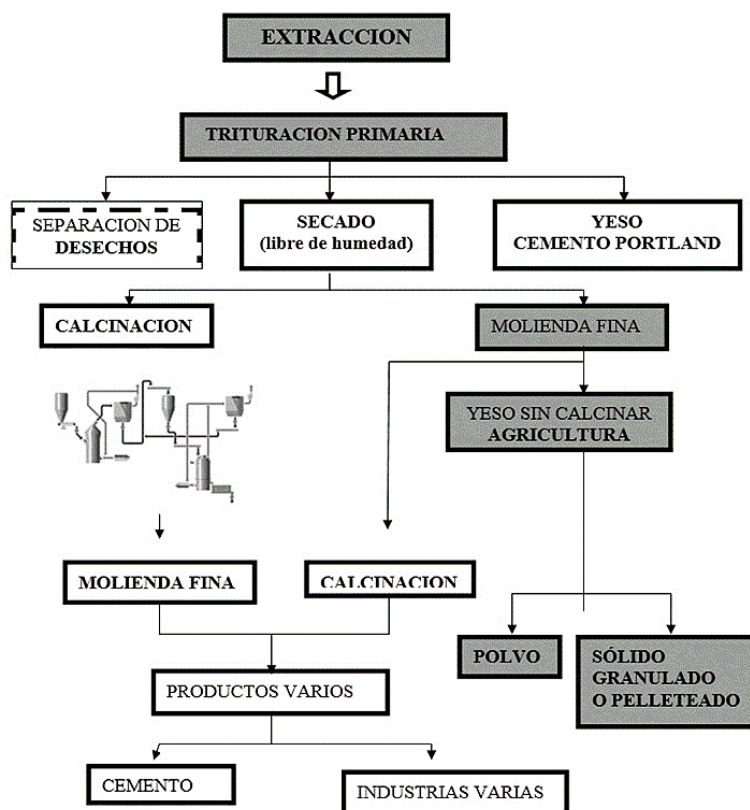
Excavación y carga con cargador frontal – Entre Ríos

En la provincia de Entre Ríos (Fm Hernandarias), un ambiente evaporítico de pantanos y playas de edad Pleistocena dio lugar a la formación de yeso tipo nodular dentro de pelitas verdosas y limos calcáreos inconsolidados. Las operaciones mineras consisten en la excavación con cargadores frontales hasta el nivel productivo, ubicado entre 2,5 a 4 metros de profundidad. Los nódulos de yeso extraídos se dejan en cancha para el secado de la arcilla que lo cubre, la cual se quita posteriormente mediante una zaranda rotatoria.

PROCESAMIENTO DEL YESO AGRÍCOLA

Una vez extraído de la cantera, el yeso se someta a un proceso de trituración primaria y secundaria hasta alcanzar la granulometría deseada según el destino del mineral.

Gráfico 24: esquema general del procesamiento de yeso según su destino



Fuente: Ponce y Torres Duggan (2005).

El procesamiento del yeso crudo depende del uso final. El que tiene por destino la fertilización azufrada o la corrección de suelos esencialmente se modifica la granulometría y es usado crudo.

Se suele producir un granulado a partir de la molienda simple o bajo la forma de pellets producto obtenido por molienda primero llevándolo a una granulometría muy fina y luego aglutinado el producto. Cualquier otro tratamiento en el que se incluya la temperatura, indica la aplicación en la fabricación de cemento, revoques y yesos especiales para las industrias medicinales y odontológicas, eventualmente en moldes y como carga mineral.

Los procesos de beneficio como flotación, separación gravitacional, etc. no se aplican a yesos que se destinan al uso agropecuario como fertilizante o enmienda, sino a usos industriales que justifiquen el mayor costo derivado de la aplicación de estos métodos de beneficio.

PRODUCCIÓN NACIONAL

La producción de yeso en la Argentina, en 2017 fue de 1.275.608 toneladas, distribuidas en distintas regiones argentinas.

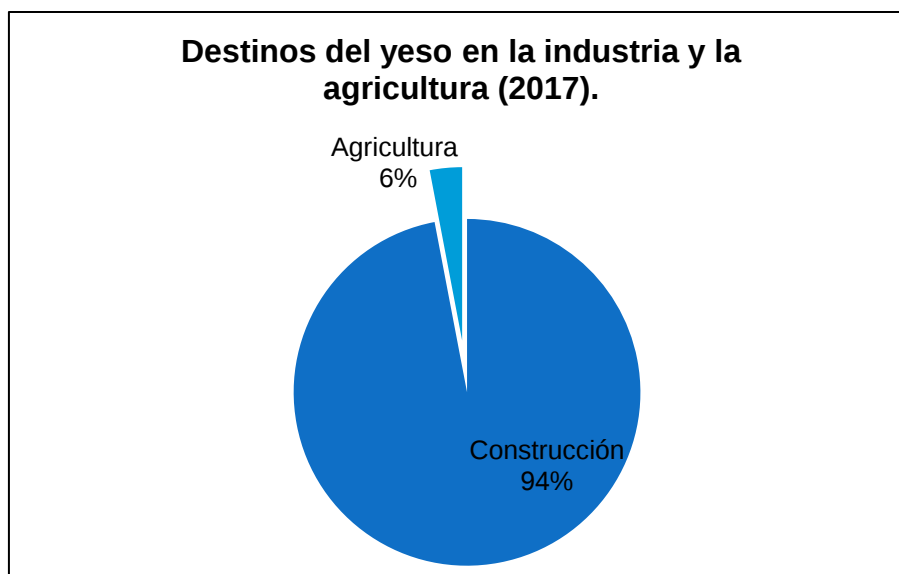
Tabla XIV: producción total de yeso – año 2017 por provincia

Provincia	Volumen (TM)
Catamarca	166.932
Chubut	1.477
Entre Ríos	240.036
La Rioja	7.800
Mendoza	360.447
Neuquen	23.171
Rio Negro	445.496
Salta	4.750
Santiago del Estero	26.660
Tucumán	1.905
Total	1.275.608

Fuente: Elaboración propia en base a datos del Centro de Información Minero Argentino (CIMA).

PRODUCCIÓN TOTAL DE YESO
 -AÑO 2017-
 1.275.608 Toneladas

Gráfico 25: Participación del yeso agrícola en el mercado argentino según destino (2017e)



Fuente: Elaboración propia en base a datos provistos por las delegaciones provinciales de minería.

DATOS ESTADÍSTICOS DE ALGUNAS PROVINCIAS PRODUCTORAS DE YESO AGRÍCOLA

En las tablas XV y XVI se muestran los datos de producción de yeso agrícola en las provincias de Neuquén y Santiago del Estero.

Tabla XV: Producción de yeso agrícola en la provincia de Neuquén

Año	2014	2015	2016	2017	2018
Producción	42.073	45.381	31.721	20.913	19.190(*)
Toneladas					

(*)Datos provisorios. Fuente: Dirección de Minería-Sector Estadísticas-Provincia de Neuquén.

Tabla XVI. Producción de yeso agrícola en la provincia de Santiago del Estero

Año	2014	2015	2016	2017	2018
Producción	36.960	26.040	17.416	26.600	40.460
Toneladas					

Fuente: Dirección General de Minería, Geología y Suelo de la Provincia de Santiago del Estero.

Por otro lado, según información enviada por la Dirección de Minería de la Provincia de Mendoza, la producción promedio de yeso agrícola, durante el periodo 2014-2018 fue de entre 15.000 a 17.000 TM. /año.

De acuerdo con la información, y tomando como base la producción de yeso del 2017 (Censo Minero), y la oferta de yeso agrícola reportada por las provincia de Neuquén, Santiago del Estero y Mendoza, que son las más significativas en términos de abastecimiento al ámbito agropecuario, la participación de yeso agrícola en la demanda total de yeso del país se ubica en el 6%. Esta magnitud se la puede considerar como baja o incipiente considerando la experiencia internacional. Por consiguiente existe un gran potencial de expansión del uso de yeso agrícola en el futuro cercano. La demanda actual de yeso agrícola incluye tanto el yeso que se utiliza como fertilizantes azufrado como así también como enmienda para el mejoramiento de suelos.

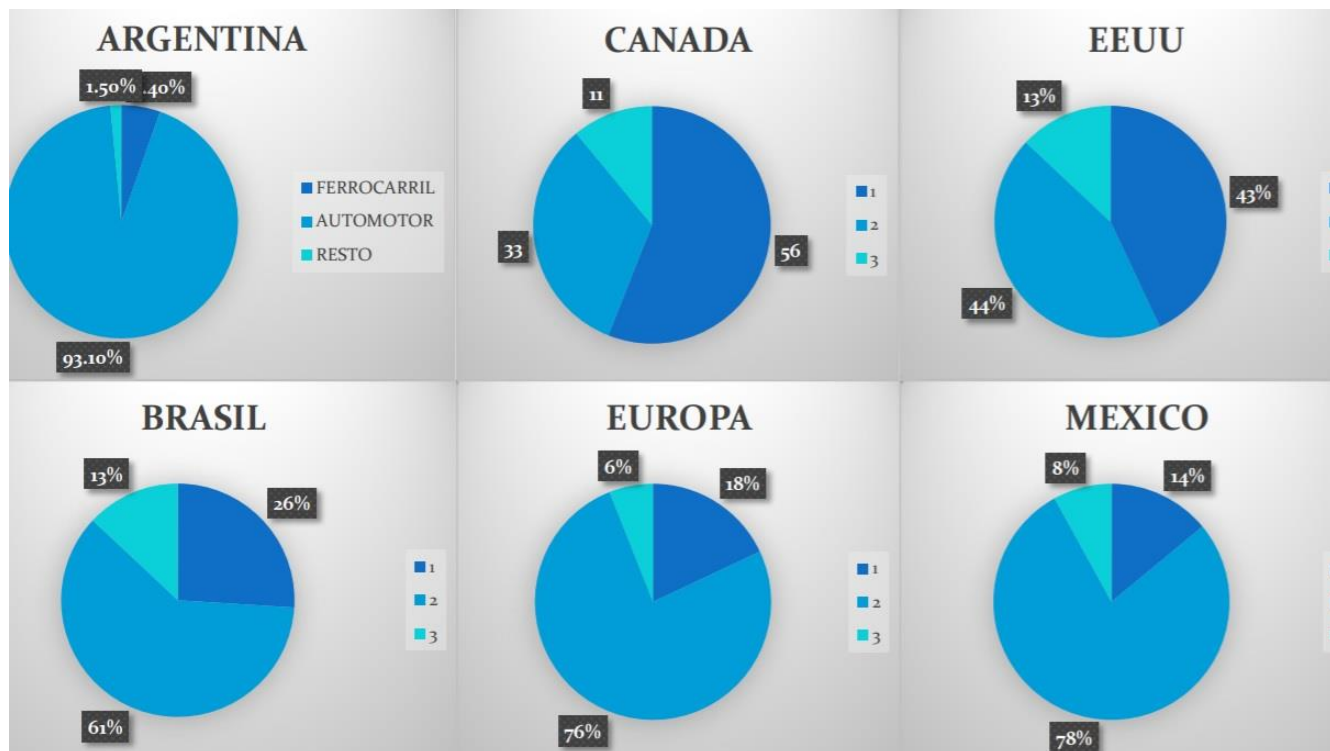
Por otra parte, las explotaciones de canteras y empresas productoras del producto en cuestión en Argentina, son desarrolladas por medianos y pequeños productores.

INFRAESTRUCTURA Y LOGÍSTICA

PANORAMA DEL SISTEMA LOGÍSTICO DE FERTILIZANTES EN ARGENTINA

Uno de los aspectos más desfavorables del sistema logístico argentino, es la matriz de medios de transporte que dispone.

Gráfico 26: Matriz logística comparada de Argentina con otras regiones y países del mundo.



Fuente: Pussetto (2017)

La Argentina, a diferencia de países como EE.UU o Canadá, tiene como principal medio de transporte de fertilizantes y enmiendas el automotor (camiones principalmente), que es el de mayor costo relativo y el menos eficiente de todos. La participación del ferrocarril es menor, aunque se están realizando inversiones para que vuelva a tener el protagonismo que supo tener en la historia del país (la Argentina tiene una amplia red férrea, pero fue literalmente abandonada en las últimas décadas).

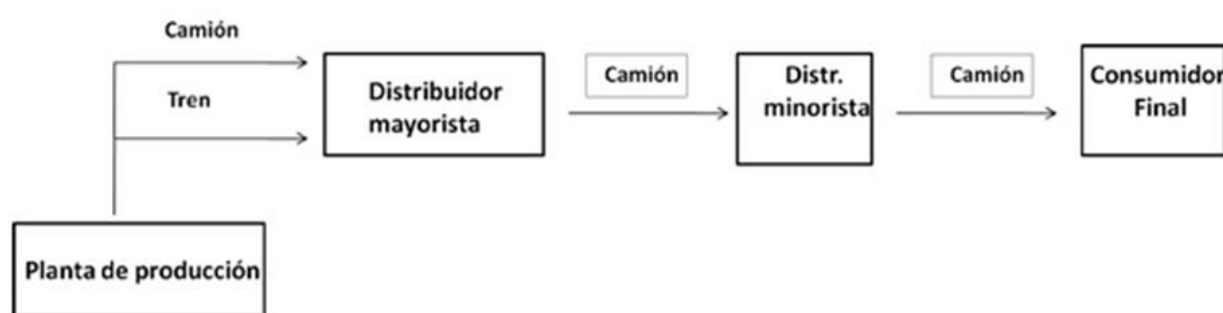
Los costos relativos de los diferentes medios de trasportes son en la Argentina: 0,035; 0,025 y 0,010 USD/t/km para el vial, ferroviario y fluvial, respectivamente (datos de enero de 2017). Para profundizar en la historia y evolución de temas de logística portuaria e infraestructura del sector fertilizantes se recomienda consultar el trabajo de Garré et al. (2012).

LOGÍSTICA DE FERTILIZANTES DESDE EL DISTRIBUIDOR AL CAMPO

En cuanto al sistema de abastecimiento, los fertilizantes se transportan en a granel en camiones que cargan 29 o 30 t desde los depósitos portuarios o bien desde los centros de distribución minoristas hasta el campo. Los proveedores de fertilizantes (sobre todo los que cuentan con centros de distribución en las zonas de demanda) ofrecen el servicio de almacenamiento, siendo poco común que los productores dispongan de estructuras fijas para el almacenamiento en chacra de fertilizantes sólidos. Sin embargo, en los últimos años se está utilizando los “silobolsas” que, si bien fueron diseñados para almacenar granos, permiten el almacenamiento de fertilizantes sólidos. Por el contrario, el almacenamiento de fertilizantes líquidos en tanques rotomoldeados de 28 t de capacidad es habitual en especial en campos grandes.

Las distancias y los costos de flete asociados inciden marcadamente en los precios del yeso agrícola pagados por el productor agropecuario. En particular los yesos provenientes de Mendoza presentan una alta incidencia de costo de flete, inclusive igualando al costo del mineral en boca mina.

Gráfico 27: Transporte y distribución de yeso agrícola en la argentina



Fuente: Elaboración propia

Carga de yeso agrícola en camión



Transporte en ruta

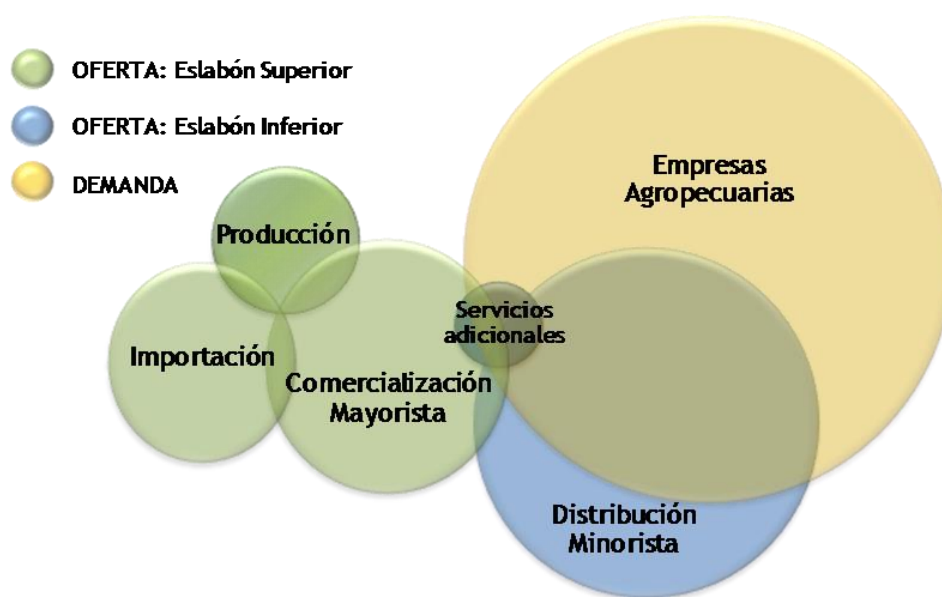


CARACTERÍSTICAS DE LA DEMANDA

ESTRUCTURA DE LA DEMANDA Y DE LA CADENA DE VALOR DEL YESO AGRÍCOLA

Las empresas agropecuarias constituyen la demanda de yeso agrícola y siguen un patrón general de inserción dentro del sistema de abastecimiento similar al de los fertilizantes y enmiendas que se utilizan en el país.

Gráfico 28: Estructura de la oferta y demanda de fertilizantes. El área de los círculos representa el tamaño relativo de cada componente.



Fuente: Garre et al. (2012)

A diferencia de la mayor parte de los fertilizantes que se demandan en el país, provenientes de la importación y/o la producción local en plantas de producción, el yeso agrícola se obtiene de la explotación minera, tal como se describió previamente cuando se analizó la oferta de este agromineral. Sin embargo, además de la oferta minera (producción del yeso agrícola), también se puede describir la oferta comercial del yeso agrícola que se encuentra configurada por la distribución mayorista y la minorista (Gráfico 28). La distribución mayorista consiste en el abastecimiento desde las zonas de producción (yacimientos) hasta los distribuidores minoristas, que se localizan geográficamente en la zona de demanda de los fertilizantes y enmiendas.

La mayor parte de las empresas agropecuarias adquieren los fertilizantes de distribuidores y/o comercios minoristas. Alrededor del 75% de estas empresas compran los fertilizantes demandados de uno o dos comercios y/o distribuidores. Sin embargo, algunas empresas agropecuarias de gran escala compran los fertilizantes sin intermediación directamente a empresas mayoristas, que importan y/o producen los

fertilizantes en el país. En Garré et al. (2012) se dispone de más detalles de la estructura de la oferta y demanda de fertilizantes en la Argentina, el sistema de logística y distribución, financiamiento a los productores, entre otros temas.

La distribución minorista está representada por una amplia y heterogénea red de abastecimiento en contacto directo con las empresas agropecuarias que demandan el yeso agrícola. Se pueden incluir diversos tipos de negocios de distribución exclusiva, comercios independientes, agronomías locales, cooperativas federadas e independientes, entre otras. Así, de acuerdo con Garré et al. (2012), existen alrededor de 1500 firmas que operan en el abastecimiento minorista de fertilizantes, por lo cual se considera que la provisión de productos no está concentrada, sino que por el contrario es sumamente competitiva. El radio de influencia de los distribuidores minoristas es de 50 km, con carteras medias de 50 clientes. El 35, 23 y 35% de estas firmas venden anualmente menos de 1000 TM, entre 1000 y 4000 y más de 4000 TM/año de fertilizantes, respectivamente.

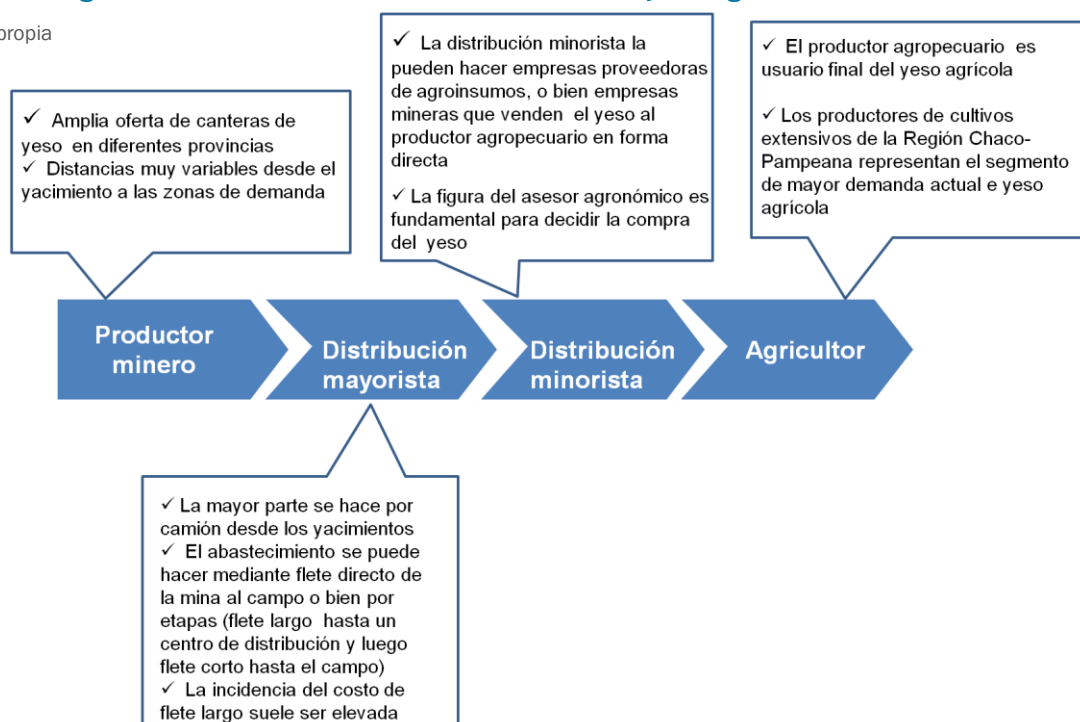
Las empresas que operan en el abastecimiento minorista de yeso agrícola compran el yeso agrícola y otros fertilizantes o enmiendas a proveedores del eslabón superior (mayoristas) aunque también hay empresas mineras que proveen el yeso agrícola en forma directa a los productores, es decir se encuentran integrados en la cadena de valor.

CADENA DE VALOR DE YESO AGRICOLA

En el gráfico 29 se muestra un esquema general de los actores involucrados en la comercialización del yeso agrícola, desde la producción mineral hasta uso por parte del productor agropecuario.

Gráfico 29: Esquema general de la cadena de comercialización del yeso agrícola

Fuente: elaboración propia



Las cadenas de valor de las empresas proveedoras de yeso agrícola tienen diferentes tipos de integración vertical. Algunas de ellas comercializan el yeso agrícola comprándolo a diversos productores mineros, sin demasiada integración, mientras otras están integradas verticalmente y han adquirido yacimientos propios y/o tienen alianzas comerciales establecidas con productores mineros. También existen productores mineros de yeso agrícola que venden su mineral a diversos demandantes, sin demasiada coordinación y/o involucramiento con la comercialización minorista y/o con los productores agropecuarios. Así, este tipo de empresario minero en general vende el yeso agrícola a distribuidores mayoristas quienes compran el mineral y lo comercializan ya sea con distribuidores minoristas o lo venden directamente a productores agropecuarios.

EL PERFIL DEL PRODUCTOR AGROPECUARIO ARGENTINO

Una de las claves para ser exitoso en cualquier proyecto comercial de venta de agroinsumos al sector agropecuario es conocer con gran detalle el perfil del productor a quien se pretende vender un producto, en este caso un fertilizante. Si bien esta meta escapa el objetivo del presente estudio, se mencionarán algunos rasgos distintivos del productor argentino.

Como es esperable, no es sencillo describir “el perfil” del productor agropecuario ya que en realidad existen diversos perfiles, según el criterio que consideremos: disposición a la adopción tecnológica; tamaño de las explotaciones; estilo de comunicación o estilo ante la compra de agro insumos; sistema de tenencia de la tierra; región geográfica, entre muchos otros ejemplos.

Uno de los rasgos principales de los productores agropecuarios argentinos es su relativa juventud, hecho que se vincula con el gran recambio generacional que está teniendo lugar en estos años. Asimismo, debemos resaltar que aproximadamente el 50-70% de la superficie cultivada de la Región Pampeana argentina se alquila en contratos de corto plazo, en general de un año. También debemos tener en cuenta que la mayor parte de las labores agrícolas (con la excepción de la pulverización) se lleva a cabo por contratistas, que son contratados por los arrendatarios para realizar la siembra y la cosecha. La figura del contratista es muy relevante en el país, y representa un segmento de gran relevancia puesto que son quienes adquieren y renuevan el parque de maquinaria agrícola.

Independientemente del perfil psicosocial y/o de actitud frente al uso de la tecnología, existe una muy clara diferencia en el manejo de la fertilización en general y de la fosfatada en particular según el régimen de tenencia de la tierra (propietario o arrendatario). Así, los productores que alquilan el campo tienden a priorizar la rentabilidad de corto plazo por sobre el mantenimiento de la calidad de los suelos. Esto queda evidenciado por el dominio de la monocultura de soja y la muy baja o nula fertilización de los cultivos en estos sistemas.

Por el contrario, en campo propio, el propietario tiene una mayor consideración o preocupación sobre el mantenimiento de la calidad del suelo, hecho que se manifiesta en la implementación de rotaciones con diferentes cultivos además de la soja (e.g. trigo, cebada, maíz, etc.) y un uso más intensivo de fertilizantes. Asimismo, en los últimos años, debido a la generalización de los procesos de degradación de suelos a nivel regional, algunos productores están adoptando rápidamente el uso de cultivos de cobertura. Estos cultivos se

siembran antes de la implantación de los cultivos de cosecha y tienen como finalidad mantener el suelo cubierto con un tapiz vegetal vivo (que se interrumpe mecánica o químicamente previo a la siembra del cultivo destinado a la cosecha de grano). Esta cobertura aporta varios beneficios a los agrosistemas como el control de malezas problemáticas, mejorar la infiltración de agua, incrementar el stock de carbono del suelo, entre otras. Dentro de ellas, el control de malezas que se logra con estos cultivos de cobertura permite ahorros de hasta el 80% en gastos de herbicidas y consiguientemente, menor impacto ambiental del uso de fitosanitarios.

Parte III: Intercambio comercial

Siglas:

- NCM = Nomenclatura Común del Común.
- AEC = Arancel Externo Común.
- DIE = Derecho de Importación Extrazona.
- TE = Tasa Estadística.
- DII=Derecho de Importación Intrazona
- DEE = Derecho de Exportación Extrazona.
- RE = Reintegro Extrazona.
- DEI = Derecho de Exportación Intrazona.
- RI = Reintegro Intrazona

CLASIFICACIÓN ARANCELARIA



ESTRUCTURA ARANCELARIA

La estructura arancelaria de la posición 2520.10.19, Los demás Yeso natural:

IMPORTACIÓN				EXPORTACIÓN			
AEC	DIE	TE	DII	DEE	RI	DEI	RI
4%	4%	2,5%	0%	12%	0%	12%	0%

El decreto 793/2018 fija hasta el 31/12/2020 un derecho de exportación del 12 % a la exportación para consumo de todas las mercaderías comprendidas en las posiciones arancelarias de NCM. Para las posiciones arancelarias detalladas en el Anexo I, ese límite sería de pesos tres (\$3) por cada dólar estadounidense del valor imponible o del precio oficial FOB, según corresponda.

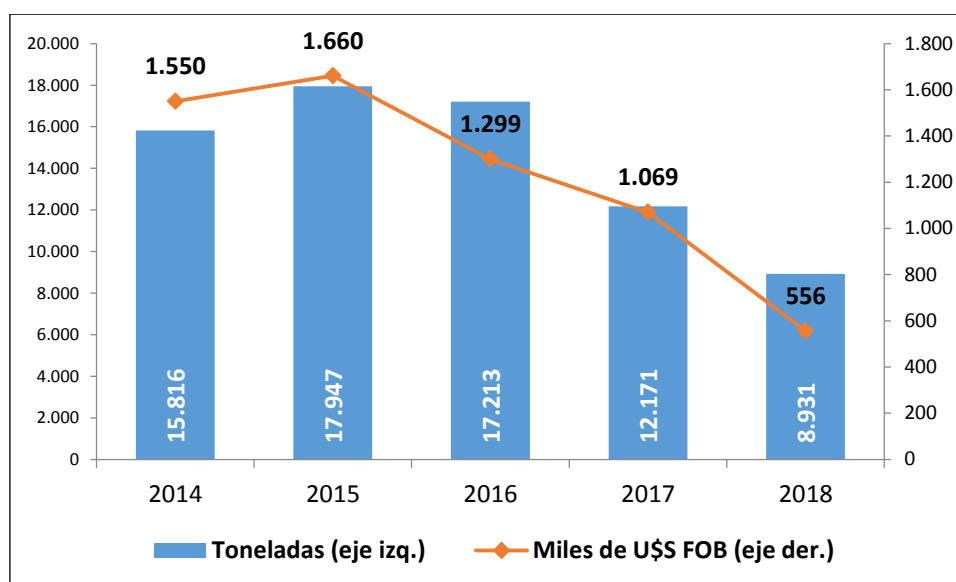
El Decreto N°280/2019 desgrava hasta diciembre 2020, el derecho de exportación fijado por el Decreto N° 793/18, a la exportaciones de las Micro-Pequeñas y Medianas Empresas, definidas en el Art.2 de la Ley 24.467, que excedan, en términos de su valor FOB, a las realizadas por cada empresa anterior.

EVOLUCIÓN DEL COMERCIO INTERNACIONAL

En el siguiente gráfico se presenta la evolución de las exportaciones de yeso agrícola del período 2014-2018. Se observa que el año con menor exportación fue el 2018, donde se registraron 8.931 toneladas y un monto de 566 miles USD FOB, mientras que en el año 2015 se alcanzó la mayor exportación con 17.947 toneladas y 1.660 miles de USD FOB. (Gráfico30).

Cabe señalar, que a partir del 2016 las exportaciones de dicho producto comienzan a disminuir, como consecuencia, entre otros factores, de la pérdida del mercado paraguayo, que recientemente comenzó a abastecerse desde Bolivia a precios más competitivos.

Gráfico 30: Evolución de las exportaciones de yeso agrícola



Fuente: Elaboración en base datos del Centro de Información Estadístico Minero (CIMA).

El principal país de destino de estas exportaciones fue Chile, con participación mayor al 88%, seguido por Uruguay y Paraguay.

Por otra parte, cabe destacar que durante el período bajo a análisis (2014-2018) no se registraron operaciones de importaciones de yeso agrícola.

Parte IV: Precios

PRECIOS NACIONALES:

De acuerdo a información suministrada por el sector privado, se muestra precios de referencia pagados por el productor agropecuario –zonas de Región Pampeana-. :

El precio del yeso agrícola comercializado molido ronda entre los 90 a 130 USD /TM más IVA, dependiendo de su granulometría y su calidad.

PRECIOS INTERNACIONALES

Cabe destacarse que el mercado del yeso agrícola es muy pequeño en relación al del yeso como mineral industrial, que se destina principalmente a la construcción. Por esta razón no se dispone de un mercado internacional de referencia del yeso agrícola. Asimismo, por esta razón la dinámica de precios del yeso agrícola en el ámbito local no se encuentra afectado por el contexto de los precios internacionales del yeso como mineral industrial, sino por el contrario se suele considerar el precio de productos potencialmente sustitutos como el superfosfato simple de calcio. La Argentina cuenta con una amplia oferta de este fertilizante.

Parte V: Situación internacional

La producción mundial de yeso natural durante el año 2016 se estimó en 263 millones de toneladas. De los cuales 5 países representan más del 70 % de la producción global: China (49,3%), Irán (6%), Estados Unidos (5,8%), Turquía (4,9%) y Tailandia (4,5%).

En Latinoamérica el principal país productor es México, seguido de Brasil y Argentina.

TABLA XVII - Producción Mundial de Yeso (Miles de toneladas)	
Países Productores	Producción (2016 e.)
Total	263,402.69
Alemania	1,800.00
Arabia Saudita	1,900.00
Argelia	2,300.00
Argentina	1,500.00
Australia	2,600.00
Brasil	3,300.00
Canadá	1,600.00
China	130,000.00
España	7,000.00

EE.UU.	15,500.00
Francia	3,300.00
India	3,500.00
Irán	16,000.00
Italia	8,600.00
Japón	4,700.00
México	5,402.69
Omán	6,500.00
Pakistán	1,700.00
Reino Unido	1,200.00
Rusia	4,000.00
Tailandia	12,000.00
Turquía	13,000.00
Otros Países	16,000.00

e. Cifras estimadas

Fuente: Mineral Commodity Summaries, 2017.

Debido al bajo precio del yeso y a su vez al relativamente alto costo del transporte, sumado al hecho de que se trata de un mineral de amplia difusión en casi todo el mundo, es que este tiende a ser producido y consumido en el mercado interno de cada país. Por las razones mencionadas, el yeso agrícola no es muy transado internacionalmente. Solo unos pocos países son importantes exportadores del mineral: Canadá, México, España y Tailandia. Se considera aproximadamente un 20 % de producción mundial estimada (2016), participa en el comercio internacional.

Bibliografía

- Carciochi, WD; GA Divito; NI Reussi Calvo y HE Echeverría. 2015. ¿Qué sabemos del diagnóstico de azufre en los cultivos de la región Pampeana Argentina. Actas del Simposio de Fertilidad 2015. IPNI-Fertilizar Asociación Civil. p 125-132.
- Cisneros, J.M.; Degioanni, A.; J. J. Cantero; A. Cantero. 2008. Caracterización y manejo de suelos salinos en el área Pampeana. En: La salinización de suelos en la Argentina, su impacto en la producción agropecuaria. E. Taleisnik; K. Grunberg & G. Santa María (eds). Capítulo 2. Editorial Universidad Católica de Córdoba. P 17-46.
- Darwich, N. 1998. Manual de fertilidad de suelos y uso de fertilizantes. Talleres de Gráfica Armedenho. Mar del Plata. 182 p
- Fertilizer Manual. 1998. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) and International Fertilizer Development Center (IFDC). 615 p.
- García, F.O. and F. Salvagiotti. 2009. Eficiencia de uso de nutrientes en sistemas agrícolas del Cono Sur de Latinoamérica. En: Actas del XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Simposio “Eficiencia de la Utilización de Nutrientes en Sistemas Agrícolas”. San José, Costa Rica., 18 p.
- Garré, P, V González; L Pederiva, N Udaquiola; F Mayer; S Campos Carlés. Mercado de fertilizantes Argentina y el Mundo. CREA. 113 p
- Lavado, RS y MA Taboada. 2009. Alteraciones de la fertilidad del suelo causado por halomorfismo. En: Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones. Capítulo 1. M.A. Taboada y R.S Lavado (Eds). Editorial Facultad de Agronomía (UBA). p 1-44.
- Melchiori, R. G Alberenque y A Kemmerer. 2018. Evolución y cambios en la adopción de la agricultura de precisión en Argentina. Actas del Curso Internacional de Agricultura y Ganadería de Precisión. INTA Manfredi. P 41-47.
- Ponce, B y Torres Duggan, 2005. Yeso. En: Minerales para la agricultura en Latinoamérica. Hugo Nelson y Roberto Sarudianski (Editores). 574 p. CyTED.UNSAM-OLAMI.
- Prystupa, P.; Torres Duggan; M.; Ferraris, G. 2012. Fuentes y formas de aplicación de azufre y micronutrientes en la Región Pampeana. En: Fertilización de Cultivos y Pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Capítulo 6. Sección 2. Álvarez, R; Prystupa, P; Rodríguez, M.; Álvarez, C. (editores). Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 623 p.
- Pusetto. 2017. Competitividad del sistema logístico argentino. Fertilizer Latino Americano Conference. Buenos Aires, Argentina.

- Pusetto, P. 2012. Agronomic Outlook and fertilizer demand in Argentina. Fertilizer Latinoamericano Conference. CRU. Buenos Aires. 18-20 de enero.
- Richards LA. (1973). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Editorial Limusa. México. 172 pp.
- Sainz Rozas, 2019. Mapas de nutrientes en suelos de la Región Pampeana. Simposio de Fertilidad. 8 y 9 de mayo. Rosario, Argentina.
- Steinbach, H.S y R. Alvarez. 2017. Respuesta a la fertilización azufrada. En: Trigo. Su rol en los sistemas de producción agrícola. M. Suárez (Editora). CREA. p 43-47.
- Steinbach, HS & R Alvarez. 2012. Revisión del efecto de la fertilización con azufre sobre el rendimiento de trigo, maíz y soja en La Región Pampeana XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina. 16-20 de abril
- Taboada, MA; Damiando F. y RS. Lavado. 2009. Inundaciones en la Región Pampeana. Consecuencias sobre los suelos. En: Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones. M.A. Taboada y R.S Lavado (Eds). Editorial Facultad de Agronomía (UBA). 164 p.
- Torres Duggan, M.; Alvarez, CR y H Rimski Korsakov. 2017. Evaluación de la calidad del agua y del suelo regado en forma complementaria en la región pampeana argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (IAH). Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI). p 17-23.
- Torres Duggan, M y MB Rodríguez. 2017. Bases conceptuales y pautas para el manejo de yeso en suelos afectados por sales. En: Ambientes salinos y alcalinos de la Argentina. Recursos y aprovechamiento productivo. Edith Taleisnik y RS Lavado (Compiladores). 251-274
- Torres Duggan, M.; Melgar, R.; Rodriguez, M.B.; Lavado, R.S.; Ciampitti, I.A. 2012. Sulfur fertilization in the argentine Pampas region: a review. Agronomia & Ambiente, 32 (1-2) 61-73.
- Vázquez, ME y GJ Millán. 2017. Acidez del suelo. Origen, diagnóstico, consecuencias y tratamiento. En: Manejo y conservación de suelos. ME Vázquez (Editora). Capítulo 8. p 229-306.