

Manual práctico de fertirriego



AN
373

Manual práctico de fertirriego

Efrén Peña Peña
Mario A. Montiel Gutiérrez

Título

Manual Práctico de Fertirriego

Autores

Ing. Efrén Peña Peña

Ing. Mario A. Montiel Gutiérrez

2ª Edición

ISBN 968-7417-19-6

Diseño de Portada:

Francisco Salinas

Colección Manuales

Coordinación de impresión

Dr. Guillermo Larios

© Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1998

Reservados todos los derechos

Paseo Cuauhnáhuac Núm. 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos

Tel.: (73) 19-40-00

Internet: <http://www.imta.mx>

E-mail: cocom@tlaloc.imta.mx

Hecho en México

Made in Mexico

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INDICE | 1 |
| INDICE DE LÁMINAS | 3 |
| INDICE DE CUADROS | 5 |
| | |
| EL FERTIRRIEGO | 5 |
| | |
| Definición | 5 |
| Ventajas | 5 |
| Inconvenientes | 6 |
| | |
| MÉTODOS DE RIEGO Y FERTIRRIEGO | 7 |
| | |
| Eficiencia de aplicación | 7 |
| Eficiencia de distribución | 9 |
| - Gravedad o superficial | 10 |
| - Presurizado | 11 |
| | |
| EL SUELO Y EL FERTIRRIEGO | 14 |
| | |
| Textura | 14 |
| Capacidad de intercambio catiónico | 14 |
| Salinidad | 14 |
| pH de la solución del suelo | 16 |
| | |
| AGUA DE RIEGO Y FERTIRRIEGO | 18 |
| | |
| Solubilidad de fertilizantes | 18 |
| Prueba de solubilidad | 20 |
| Acondicionadores de fertilizantes granulados | 21 |
| Soluciones frías de mezclas de fertilizantes | 21 |
| Formas insolubles de precipitados | 22 |
| Compatibilidad de fertilizantes | 22 |
| Calidad del agua | 23 |
| Uso de ácidos | 26 |
| Clorinación | 26 |
| | |
| FERTILIZANTES Y FERTIRRIEGO | 31 |
| | |
| Nitrogenados | 31 |
| - Amoníaco anhidro | 31 |
| - Orgánicos | 32 |

| | |
|--|----|
| - Urea | 32 |
| Fosforados | 33 |
| Potásicos | 33 |
| Fertilizantes con azufre | 33 |
| Micronutrientes | 33 |
| | |
| PROGRAMA DE FERTILIZACIÓN | 34 |
| | |
| Fundamentos de un programa | 34 |
| Recomendaciones para elaborar programás | 34 |
| | |
| SISTEMÁS DE INYECCIÓN | 36 |
| | |
| Inyector de orificio | 36 |
| Vénturi | 37 |
| - Vénturi con válvula | 37 |
| - Vénturi con bomba | 38 |
| Bomba inyectora | 39 |
| Tanque de inyección | 40 |
| Inyección central o Unidades móviles de inyección | 42 |
| | |
| GASTOS Y TIEMPOS DE INYECCIÓN | 43 |
| | |
| Gasto de inyección del fertilizante | 43 |
| Gasto de inyección de campo | 43 |
| Tiempo de riego | 46 |
| | |
| COMPARACIÓN DE COSTOS DE FERTILIZANTES | 48 |
| | |
| EJEMPLOS DE FERTIRRIEGO | 50 |
| | |
| Fertirriego en tuberías con compuertas | 50 |
| Fertirriego con goteo | 51 |
| | |
| ANEXO 1 | 57 |
| | |
| Procedimiento químico para reducir el pH en aguas de riego adicionando ácido sulfúrico. | 59 |

Indice de Láminas

| | | |
|------------|---|----|
| Lámina 1a | Cabezal de control de un sistema de inyección de fertilizantes | 5 |
| Lámina 1b | Campos cultivados con fertirriego | 5 |
| Lámina 2a | Fertirriego con método de riego por aspersión con alta uniformidad de aplicación | 7 |
| Lámina 2a | Fertirriego con método de riego por surcos con tuberías de compuertas | 7 |
| Lámina 3 | Distribución del agua en riego por gravedad con gasto pequeño. | 10 |
| Lámina 4 | Riego con el gasto adecuado | 11 |
| Lámina 5 | Riego con el gasto excesivo | 11 |
| Lámina 6 | Tiempo de riego grande en aspersión | 12 |
| Lámina 7 | Tiempo de riego menor en aspersión | 13 |
| Lámina 8 | Tiempo de riego menor que el indicado en riego por aspersión | 13 |
| Lámina 9 | Influencia del pH del suelo en los cultivos | 16 |
| Lámina 10 | Influencia del pH sobre el aprovechamiento de los nutrimentos por parte de las plantas. | 17 |
| Lámina 11 | Adición del agua de la fuente al tanque | 20 |
| Lámina 12 | Suministro del fertilizante a un tanque de fertirriego | 20 |
| Lámina 13 | Diferentes soluciones frías de mezclas de fertilizante | 22 |
| Lámina 14a | Inyector de fertilizantes para tuberías con compuertas en riego por gravedad | 36 |
| Lámina 14b | Acercamiento al inyector de carga constante con flotador | 36 |
| Lámina 15a | Vénturi con válvula | 37 |
| Lámina 15b | Vénturi funcionando con válvula | 37 |
| Lámina 16 | Vénturi funcionando con bomba centrífuga | 39 |
| Lámina 17a | Principio de operación de una bomba fertilizadora | 39 |
| Lámina 17b | Bomba fertilizadora | 39 |
| Lámina 18 | Dosificador de tanque | 40 |
| Lámina 19 | Cabezal de control con inyección central móvil | 42 |

Indice de Cuadros

| | | |
|-----------|--|----|
| Cuadro 1 | Tolerancia de los cultivos a la salinidad del extracto de saturación del suelo. | 15 |
| Cuadro 2 | Composición y acidez de algunos fertilizantes. | 18 |
| Cuadro 3 | Fórmulas y solubilidad de algunos fertilizantes | 19 |
| Cuadro 4 | Normas para interpretación de la calidad de aguas de riego, según Ayers y Westcot, 1976. | 23 |
| Cuadro 5 | Calidad del agua de riego por peligro de salinización | 24 |
| Cuadro 6 | Clasificación de aguas por porcentaje de sodio | 25 |
| Cuadro 7 | Contenidos máximos permisibles de los iones tóxicos | 25 |
| Cuadro 8 | Relación entre el pH y el % de N que puede volatizarse | 31 |
| Cuadro 9 | Consumo de nutrientes en el cultivo de tomate | 35 |
| Cuadro 10 | Características de los inyectores por succión | 38 |
| Cuadro 11 | Resumen de costos de nutrientes | 49 |
| Cuadro 12 | Gastos de inyección por fertilizante | 55 |

EL FERTIRRIEGO

Definición

Fertirriego o fertirrigación es la aplicación de fertilizantes a los cultivos por medio del agua de riego. A la aplicación de los agroquímicos al suelo o a los cultivos por este medio, se le denomina quimigación.



Lámina 1a. Cabezal de control de un sistema de inyección de fertilizantes.



Lámina. 1b. Campos cultivados con fertirriego.

Ventajas

- Incrementa rendimientos y mejora la calidad de los productos debido a que:
 - Las cantidades y concentraciones de nutrientes en este método, pueden dosificarse de acuerdo con los requerimientos del cultivo y sus etapas de desarrollo.
 - Al aplicar los fertilizantes en forma soluble, se asimilan más rápidamente porque se distribuyen en la zona de las raíces. Algunos fertilizantes son asimilables directamente, otros requieren transformación química en el suelo.
 - Las raíces del cultivo no se dañan con el fertirriego, como sucede con las técnicas convencionales, y el suelo se compacta menos.

- Ahorro en los costos de la fertilización, debido a que:
 - Cuando se riega con eficiencia y con alta uniformidad de distribución del agua, se requieren menos fertilizantes, que en los métodos tradicionales.
 - Se usa menos equipo y menos energía para aplicar los fertilizantes.
 - Se reducen las labores agrícolas.
 - Se necesita menos personal para supervisar la fertilización.

- Facilita las labores agrícolas.
 - Se puede fertilizar cuando el suelo o el cultivo impiden la entrada de la maquinaria de fertilización convencional.

- Reduce la contaminación.
 - Si el agua se aplica uniformemente y con alta eficiencia, los excedentes de riego son mínimos y la percolación, así como el escurrimiento de agua con fertilizante disminuyen.

Inconvenientes

- Se requiere inversión inicial.
 - Se necesita personal calificado.
 - Deben adquirirse el equipo de fertirriego y accesorios de seguridad.
 - Los fertilizantes solubles son caros.

- Defectos de fertilización en sistemas mal diseñados, mal operados o con fugas.
 - Desperdicio de fertilizantes.
 - Contaminación de acuíferos o corrientes superficiales.

- Necesidad de capacitar personal para:
 - Seleccionar, manejar y dosificar fertilizantes, así como operar el sistema de riego

- Peligros al usar mezclas de fertilizantes:
 - Precipitan los fertilizantes no compatibles con otros o con el agua de riego.
 - Se necesita conocer la compatibilidad química de los fertilizantes, con el agua de riego.
 - Puede haber reacciones violentas.

MÉTODOS DE RIEGO Y FERTIRRIEGO

Con todos los métodos de riego bien diseñados e instalados o construídos, se pueden obtener altas eficiencias de aplicación del agua y uniformidad en su distribución. El fertirriego debe usarse sólo con sistemas de riego bien diseñados y operados, para evitar desperdicios de fertilizantes, que a su vez, representan pérdidas de dinero y problemas de contaminación.

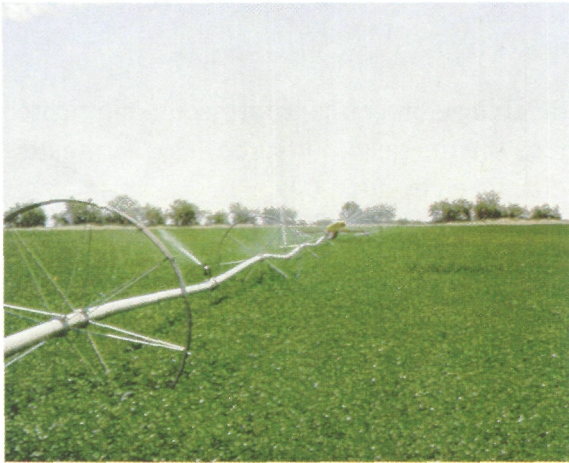


Lámina 2a. Fertirriego con método de riego por aspersión con alta uniformidad aplicación



Lámina 2b. Fertirriego con método de riego por surcos con tuberías de compuertas

Eficiencia de aplicación

Con la eficiencia de aplicación se evalúa la cantidad de agua aprovechada con respecto a la que se aplica y se expresa en por ciento.

Para asegurar el éxito con fertirriego, deben obtenerse eficiencias iguales o mejores que las siguientes: 80% en riego superficial o por gravedad, 90% en riego por aspersión y 95% en microrriego (microaspersión y goteo).

Con estas eficiencias se evitan pérdidas significativas por percolación o escurrimientos y problemas de contaminación.

Se obtiene con la fórmula siguiente:

$$E_a = \frac{LRP \cdot 100}{LRA}$$

Donde: E_a [%] es la eficiencia de aplicación del riego, LRP [cm] es la lámina de riego que se proyecta o necesita aplicar y LRA [cm] es la lámina que se aplica en el campo.

Ejemplo 1. En una parcela con surcos, se proyectó aplicar una lámina de riego de 10 cm, y al finalizar el riego, se determinó una lámina aplicada de 12.3 cm ¿Cuál fue la eficiencia de aplicación?

$$E = \frac{10 \cdot 100}{12.3} = 81.3\%$$

Ejemplo 2. Se requiere determinar la eficiencia de aplicación con la información siguiente: longitud del surco 200m; espaciamiento entre surcos 0.9 m; gasto por surco 1 l/s; lámina de riego proyectada 10 cm y tiempo de aplicación del agua en el surco 6 h.

$$LRA = \frac{TR \cdot Q \cdot 3.6}{Ls \cdot Es} = \frac{6 \cdot 1 \cdot 3.6}{200 \cdot 0.9} = 0.12m$$

$$E_a = \frac{10 \cdot 100}{12} = 83.3\%$$

Ejemplo 3. En riego por goteo se proyectó aplicar una lámina de 6 mm, si el sistema aplica una lámina media de 2.5 mm/hora y se regó durante 3 horas. ¿Cuál es la eficiencia de aplicación?

$$LA = 2.5 \cdot 3 = 7.5mm$$

$$E_a = \frac{LP \cdot 100}{LA} = \frac{6 \cdot 100}{7.5} = 80\%$$

Ejemplo 4. En riego por aspersión portátil manual se aplicaron 7 horas de riego con una intensidad de aplicación de 15 mm/hora, si se quería aplicar una lámina de 70 mm ¿Cuál es la eficiencia de aplicación?

$$LA = 7 \cdot 15 = 105mm$$

$$E_a = \frac{LP \cdot 100}{LA} = \frac{70 \cdot 100}{105} = 66.7\%$$

Eficiencia de distribución

La eficiencia de distribución sirve para conocer las diferencias de aplicación de láminas de riego dentro de una sección de riego o una tendida de riego. Para tener éxito en el fertirriego, la eficiencia de distribución del agua debe ser mayor al 90% en cualquier método de riego, con la finalidad de que las plantas reciban cantidades prácticamente iguales de agua y fertilizantes.

Se obtiene con la fórmula siguiente:

$$ED = \frac{LR_{\min} \cdot 100}{LR_{\text{med}}}$$

Donde: ED [%] es la uniformidad de distribución del agua a lo largo de la franja de terreno regada, LR_{\min} [cm] es la lámina de riego mínima aplicada en el campo o de proyecto y LR_{med} [cm] es la lámina de riego media aplicada.

Ejemplo 5. Se aplicó un riego en una melga y se muestreó la humedad en el perfil del suelo para conocer las láminas de riego infiltradas a lo largo de la melga, obteniéndose $LR_{\min} = 8$ cm y $LR_{\text{med}} = 9.5$ cm. Encontrar la uniformidad de distribución en el riego.

$$ED = \frac{8 \cdot 100}{9.5} = 84\%$$

Ejemplo 6. En un sistema de riego por goteo, se aforaron goteros en la parte final (zona crítica) de una sección de riego y se obtuvo la media aritmética de 2 l/h y después se aforó en diferentes partes de la sección de riego y el gasto medio fue de 2.20 l/h. El espaciamiento entre goteros es de 0.5 m y el espaciamiento entre tuberías regantes es de 1.2 m. ¿Cuáles son las láminas de riego y la eficiencia de distribución si se regó durante 3 horas?

$$LR = \frac{\text{Vol}}{\text{Sup}} = \frac{Q \cdot TR}{\text{Sup}}$$

$$TR = 3 \text{ h}$$

$$LR_{\min} = \frac{2 \cdot 3}{0.5 \cdot 1} = 12 \text{ mm}$$

$$LR_{\text{med}} = \frac{2.2 \cdot 3}{0.5 \cdot 1} = 13.2 \text{ mm}$$

$$ED = \frac{12 \cdot 100}{13.2} = 91\%$$

Ejemplo 7. En un sistema de riego por aspersión el gasto de los aspersores que operan al final de la tubería (Q_{ult}), tienen 2.5 l/s de gasto y los primeros (Q_{prim}) tienen gasto de 2.8 l/s. Los aspersores están instalados en las tuberías con (espaciamiento de 9 m) entre ellos y 15 m entre las tuberías regantes. Se quiere conocer la eficiencia de distribución de la tubería de aspersión.

Primero se calcula el gasto medio, con la media geométrica de los gastos medidos:

$$Q_{med} = (Q_{ult} \cdot Q_{prim})^{1/2} = (2.5 \cdot 2.8)^{1/2} = 2.651 / s$$

$$ED = \frac{2.5 \cdot 100}{2.65} = 94.3\%$$

Riego por gravedad o superficial

Para surcos o melgas se presentan tres esquemas de distribución del agua bajo diferentes condiciones de gasto.

- Gasto pequeño. Tendencia al avance lento del agua y a la percolación

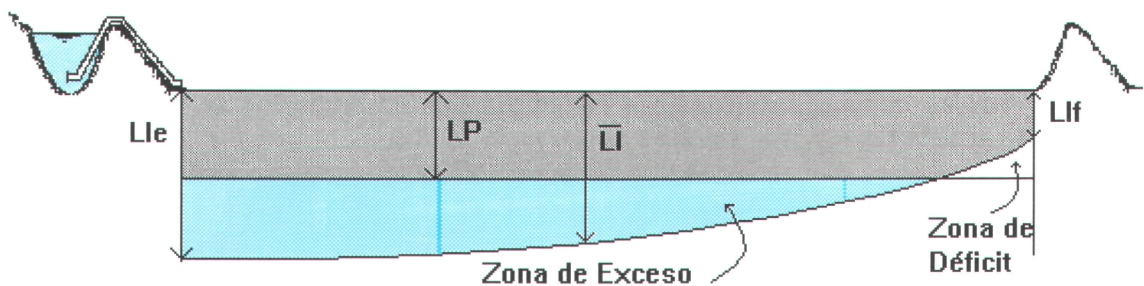


Lámina 3. Distribución del agua en riego por gravedad con gasto pequeño.

De acuerdo con la lámina 3, al manejar un gasto pequeño se presenta un exceso por percolación profunda y se observa que no hay escurrimientos superficiales. También puede verse que hay un déficit de riego en la parte final. Si se aplicara el fertilizante con el agua de riego, se distribuiría mal, con peligro de contaminar el subsuelo o el acuífero subterráneo y se desperdicia inversión en el fertilizante.

· Gasto adecuado para fertirriego. Avance adecuado al tiempo necesario para que se infiltre la lámina de riego requerida en todo lo largo del surco o la melga.

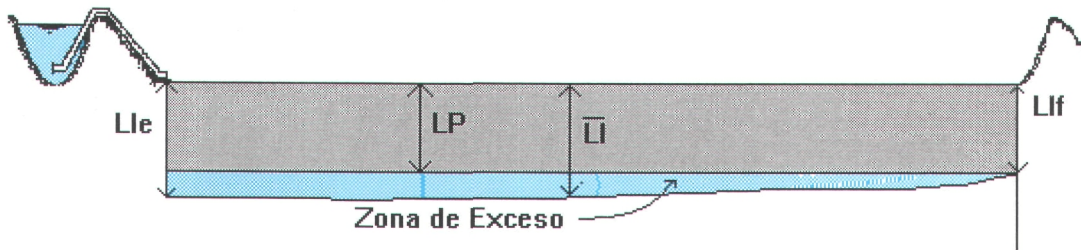


Lámina 4. Riego con el gasto adecuado.

En la lámina 4 se observa que se cubren las necesidades de humedecimiento con un pequeño exceso, con alta uniformidad, aplicando la lámina de riego proyectada al final de la tirada de riego. Esta es la condición excelente para el fertirriego.

Gasto grande. Tendencia del agua a escurrir fuera del surco o la melga y con posibilidad de erosionar el suelo.

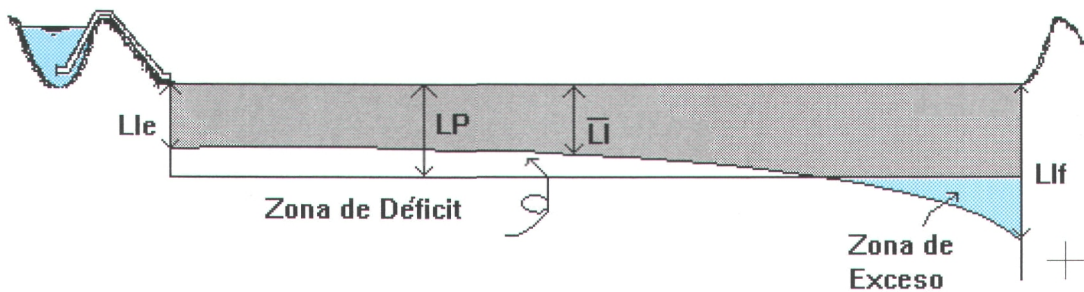


Lámina 5. Riego con el gasto excesivo.

En la lámina 5 se observa que el riego no humedece lo suficiente al principio del surco y tiene exceso de percolación y cuando los surcos o melgas no son cerrados al final puede haber escurrimiento de agua al final de la tendida de riego.

Presurizado

- Aspersión. En sistemas de aspersión estándar bien diseñados, la diferencia de gastos entre el último y primer aspersor de la tubería regante es igual o menor al 10 %. La diferencia máxima de láminas también corresponde al 10 % de la lámina del último aspersor. En estos casos, la dosificación de agroquímicos se realiza con las condiciones apropiadas de alta uniformidad, sin embargo, deben cuidarse la eficiencia de la aplicación y la lámina de riego total, debido a que puede haber percolación de fertilizantes con las consecuencias lógicas que eso implica.
- Microrriego. Este caso es similar al de riego por aspersión estándar, sólo que la comparación de las láminas se hace a nivel de sección de riego. Cuando hay goteros o microaspersores con regulador de presión o las tuberías regantes tienen regulador de presión, la uniformidad de distribución del agua aumenta.
- Tiempo de riego grande, se puede aplicar excesos de agua en riego por aspersión al regar más tiempo del recomendado para aplicar la lámina de riego programada.

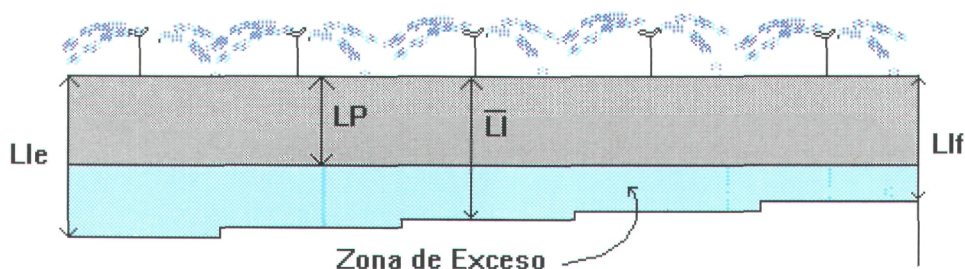


Lámina 6. Tiempo de riego grande en aspersión.

Tiempo de riego menor que el necesario en riego por aspersión. Se deja de humedecer el suelo correctamente dejando un volumen con déficit de agua, que las plantas deben resentir, bajando los rendimientos.

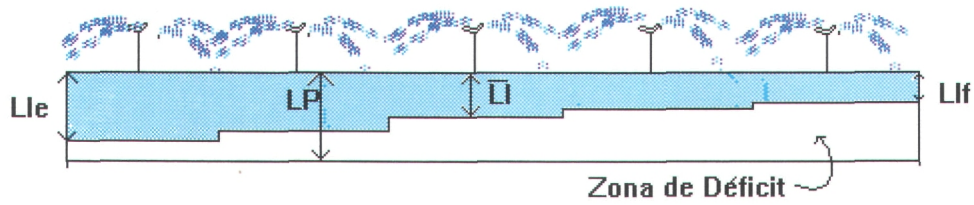


Lámina 7. Tiempo de riego menor que el indicado en riego por aspersión.

· Tiempo de riego adecuado en riego por aspersión, permite la distribución correcta de la lámina de riego, regando uniformemente y desperdiciando un mínimo de agua por percolación.

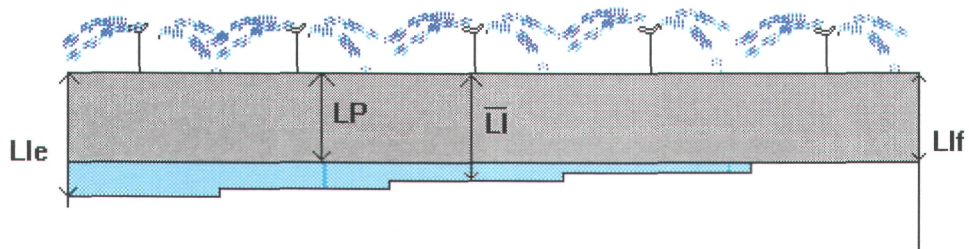


Lámina 8. Tiempo de riego adecuado en riego por aspersión.

EL SUELO Y EL FERTIRRIEGO

Los principales factores del suelo que influyen al fertirriego son: la textura, la capacidad de intercambio catiónico, la salinidad y el pH de la solución del suelo.

Textura

El fertirriego con sistema de riego presurizado, es más ventajoso en los suelos arenosos que en los arcillosos, específicamente en la aplicación del nitrógeno. En el caso del fósforo, se mueve a mayor distancia en los suelos arenosos que en los arcillosos. Los suelos ligeros o arenosos retienen menor humedad aprovechable y generalmente son menos fértiles que los arcillosos, a menos que tengan materia orgánica, por lo que el riego frecuente, con láminas pequeñas y fertirriego, favorece especialmente el desarrollo de los cultivos.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), se considera muy baja cuando es menor de 5 meq/l, baja de 5 a 15, media de 15 a 20, alta de 20 a 40 y muy alta mayor de 40 meq/l.

En los suelos con alta capacidad de intercambio catiónico (arcillosos, franco arcillosos o con alto contenido de materia orgánica descompuesta) los nutrientes, micronutrientes, herbicidas, fungicidas y nematicidas, pueden perder su efectividad por la acción de este intercambio.

En los suelos arenosos, la fertilización tiene efecto directo sobre el desarrollo de los cultivos, porque tiene baja capacidad de intercambio catiónico, y no inhibe la acción benéfica de los nutrimentos. En los arcillosos, la capacidad de intercambio catiónico, puede inhibir el efecto de los nutrimentos. Deben estar en buen nivel de fertilidad al momento de iniciar el fertirriego para evitar problemás de inhibiciones de nutrimentos.

Salinidad

Los fertilizantes son sales que, agregadas al agua de riego, forman una solución salina que se aplica al suelo. Se tienen efectos benéficos cuando las sales son fertilizantes y se dosifican sin exceder los límites de calidad del agua y además se previene el sobrerriego. Sin embargo, los efectos que producen las sales a las plantas cuando se sobrepasan los límites permisibles, son: el efecto de salinidad y el efecto tóxico (cloro, sodio y boro principalmente). Para evitar problemás con el efecto de salinidad se aconsejan dos acciones, primero no sobrepasar una conductividad eléctrica de 3 dS/cm y segundo, no aplicar soluciones con iones tóxicos para cultivos.

Se recomienda ver la tolerancia de los cultivos a las sales en el cuadro 1.

Cuadro 1. Tolerancia de los cultivos a la salinidad del extracto de saturación del suelo. Fuente (De la Peña, 1979).

| Cultivos | Tolerantes | Moderadamente tolerantes | Sensibles |
|----------------------------|---|--|---|
| <i>Comunes</i> | $8 < CE_w < 12$ <i>dS/cm</i> | $4 < CE_w < 8$ <i>dS/cm</i> | $CE_w < 3.2$ <i>dS/cm</i> |
| | Cebada Remolacha Azucarera Nabo Algodón | Centeno Trigo Avena Mijo Sorgo Soya | Maíz Arroz Lino Girasol Higuerilla Frijol |
| <i>Hortícolas</i> | $5 < CE_w < 8$ | $3 < CE_w < 3$ | $CE_w < 3$ |
| | Betabel Espárrago Espinaca | Jitomate Brócoli Col Coliflor Lechuga Maíz Dulce Patata Camote | Pimiento Zanahoria Cebolla Chícharo Melón Calabaza Pepino Rábano Apio Ejote |
| <i>Cultivos Forrajeros</i> | $6 < CE_w < 12$ | $3 < CE_w < 6$ | $CE_w < 3$ |
| | Pasto salado Pasto Bermuda Pasto Rhodes | Trébol dulce Pasto inglés Pasto Dallis Sudán Alfalfa Centeno (para heno) | Avena (heno) Dactilo Gramma Azul Trébol grande Bromo Suave Trébol Blanco holandés Trébol Híbrido Trébol |
| <i>Frutales</i> | $6 < CE_w < 8$ | $3 < CE_w < 8$ | $CE_w < 3 CE_w$ |
| | Palma datilera | Granada Higuera Olivo Vid | Naranja Toronja Limón Manzana Pera Ciruela de Damasco Ciruela Almendra Durazno Chabacano Zarzamora Frambuesas Aguacate Fresa |

Cuando hay problemas de salinidad puede ser útil usar nitrato de potasio y fosfato de potasio en lugar de cloruro de potasio y por otra parte el nitrato de amonio y la urea deben ser seleccionados en lugar del sulfato de amonio. Los fertilizantes que contienen sodio como el nitrato de sodio son fuentes no recomendables por los efectos del sodio sobre suelos arcillosos o por la toxicidad sobre las plantas.

pH de la solución del suelo

El pH del suelo influye en la capacidad de las plantas de absorber nutrientes; en general puede considerarse de 6.5 a 7.5 como valores normales. Sin embargo, cada cultivo tiene un rango específico para su mejor desarrollo, como se muestra en la lámina 9.

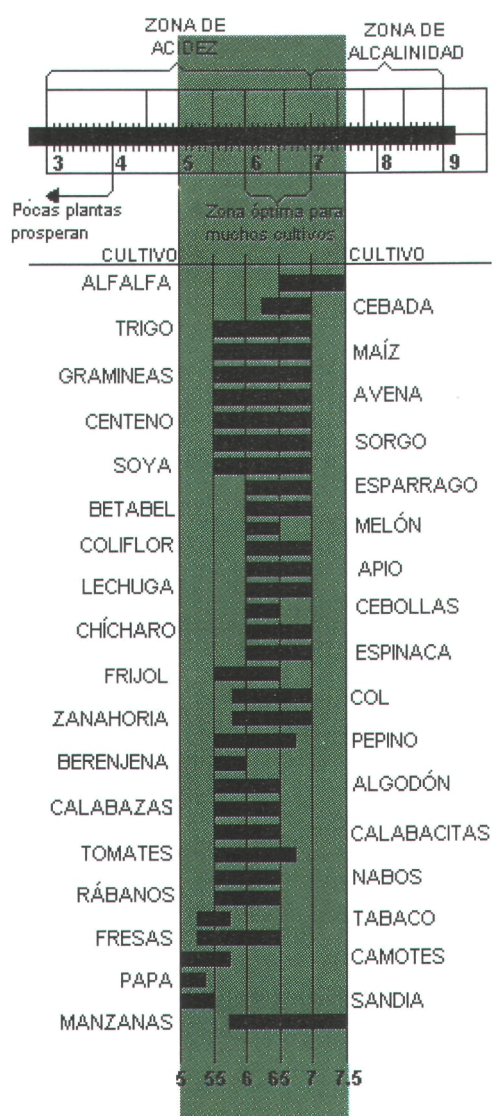


Lámina 9. Influencia del pH del suelo en los cultivos (NPFI, 1996).

El pH del suelo depende de la cantidad y tipo de cationes presentes: mientras que en un suelo con pH bajo tiene pocos iones intercambiables, los suelos alcalinos están cercanos a la saturación de bases. El pH del suelo puede originar desbalances nutritivos, debido a que la concentración de los iones nutritivos puede aumentar o disminuir bajo condiciones ácidas.

Los pH altos en el suelo pueden disminuir la disponibilidad de zinc, hierro y fósforo para las plantas, como se muestra en la lámina 10.

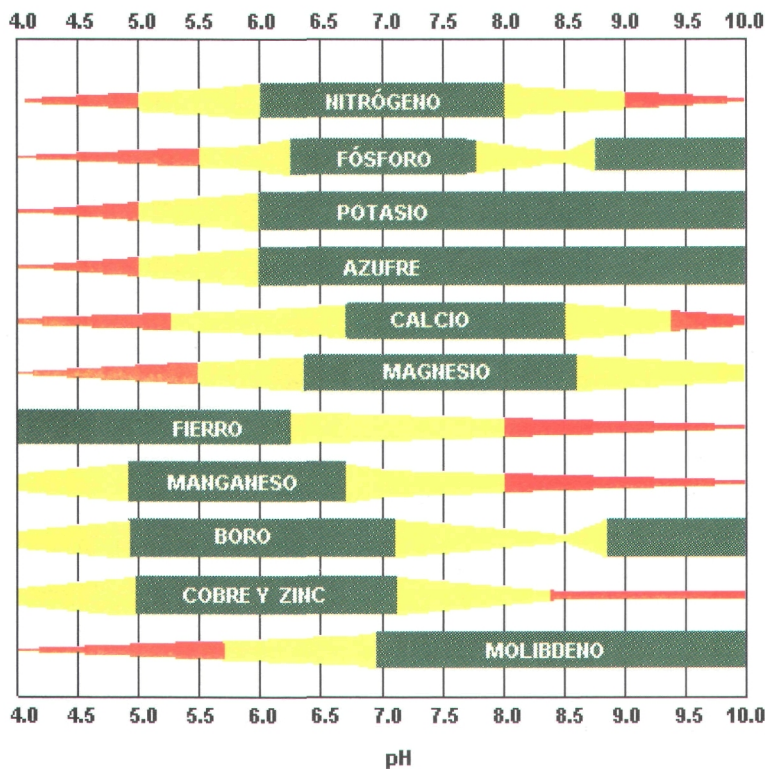


Lámina 10. Influencia del pH sobre el aprovechamiento de los nutrimentos por parte de las plantas (NPFI, 1996).

No se recomienda el uso de amonio en el fertirriego, porque puede elevar el pH cuando se inyecta en el agua de riego. Los ácidos nítrico, ortofosfórico y sulfúrico pueden reducir el pH del agua de riego. A continuación se presenta el cuadro de composición y acidez de fertilizantes:

Cuadro 2. Composición y acidez de algunos fertilizantes

| Fertilizantes | %N | %K | %P | %C _a | %S | Equivalente de acidez* |
|--------------------|------|----|----|-----------------|----|------------------------|
| Nitrato de amonio | 33.5 | | | | | 62 |
| Sulfato de amonio | 21 | | | | 24 | 110 |
| Aquaamonía | 20 | | | | | 36 |
| Nitrato de calcio | 15.5 | | | 21 | | -20 |
| Urea | 45 | | | | | 71 |
| Cloruro de potasio | | 60 | | | | Neutro |
| Nitrato de potasio | 13 | 44 | | | | 23 |
| Sulfato de potasio | | 50 | | | | Neutro |
| Fosfato diamónico | 18 | | 46 | | | 70 |
| Fosfato amónico | 11 | | 48 | | | 58 |
| Ácido fosfórico | | | 52 | | | 110 |

* Kg de C_aCO₃ que son requeridos para neutralizar 100 Kg de fertilizante.

En suelos de pH bajo, se pueden usar fertilizantes de efecto residual alcalino y en suelos de pH alto, se pueden usar los fertilizantes de efecto residual ácido.

Para casos de extremos de acidez o alcalinidad (pH) se recomienda tratar al suelo, con mejoradores adecuados y luego proceder al análisis del fertirriego

AGUA DE RIEGO Y FERTIRRIEGO

Solubilidad de fertilizantes

Los fertilizantes ideales no corren o tapan los componentes del sistema de riego, son solubles en el agua de riego, no forman precipitados, grumos o natas y no cambian el pH de la solución del suelo a condiciones problemáticas.

Es importante que se conozca la solubilidad de los fertilizantes en el agua, para evitar problemas de taponamientos por inyectar soluciones saturadas que puedan generar precipitados fácilmente.

El cuadro No. 3 muestra algunos fertilizantes comunes y su solubilidad aproximada en agua. La fórmula química y la temperatura empleada para la medida de la solubilidad, se incluyen en los renglones correspondientes.

Cuadro 3. Fórmulas y solubilidad de algunos fertilizantes

| | Contenido | Fórmula | Temperatura °C | Solubilidad gr/lt |
|----------------------------------|----------------|---|-------------------|----------------------|
| Fertilizante Nitrogenados | | | | |
| Nitrato de amonio | 34 - 00 - 00 | NH_4NO_3 | 0 | 1182 |
| Polisulfuro de amonio | 20 - 00 - 00 | NH_4S_x | | Alta |
| Sulfato de amonio | 21 - 00 - 00 | $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$ | 0 | 706 |
| Tiosulfato de amonio | 12 - 00 - 00 | $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$ | | Muy Alta |
| Amoníaco anhidro | 82 - 00 - 00 | NH_3 | 15 | 380 |
| Aqua ammonia | 20 - 00 - 00 | $\text{NH}_3\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_4\text{OH}$ | | Alta |
| Nitrato de calcio | 15.5 - 00 - 00 | $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ | 17.77 | 1212 |
| Urea | 46 - 00 - 00 | $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ | | 1000 |
| Acido sulfúrico urea | 28 - 00 - 00 | $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ | | Alta |
| Nitrato de amonio urea | 32 - 00 - 00 | $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{NH}_4\text{NO}_3$ | | Alta |
| Fertilizantes fosforados | | | | |
| Fosfato de amonio | 08 - 24 - 00 | $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ | | Moderado |
| Polifosfato de amonio | 10 - 34 - 00 | $(\text{NH}_4)_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ y otros | | Alta |
| Polifosfato de amonio | 11 - 37 - 00 | $(\text{NH}_4)_7\text{P}_5\text{O}_{16}$ y otros | | Alta |
| Acido fosfórico, verde | 00 - 52 - 00 | H_3PO_4 | | 457 |
| Acido fosfórico, blanco | 00 - 54 - 00 | H_3PO_4 | | 457 |
| Fertilizantes Potásicos | | | | |
| Cloruro de potasio | 00 - 00 - 60 | KCl | 20 | 346 |
| Nitrato de potasio | 13 - 00 - 44 | KNO_3 | 0 | 132 |
| Sulfato de potasio | 00 - 00 - 50 | K_2SO_4 | 25 | 120 |
| Fosfato de potasio monobásico | 00 - 52 - 34 | KH_2PO_4 | | 330 |

Prueba de solubilidad

La prueba de solubilidad de fertilizantes, individual o mezclas, se realiza de la manera siguiente:

- Con las dosis de fertilizantes que se desean inyectar en el sistema de riego, con los gastos del sistema de riego y de inyección, se definen los volúmenes de agua y de solución fertilizadora para realizar la prueba.
- Se toma agua de la fuente de abastecimiento que sea representativa de la calidad del agua para riego, y se pone en el recipiente.



Lámina 11. Adición de agua de la fuente al tanque.

- Se agregan los fertilizantes en la cantidad proporcional que les corresponde para preparar la solución fertilizadora, que debe inyectarse al sistema de riego.

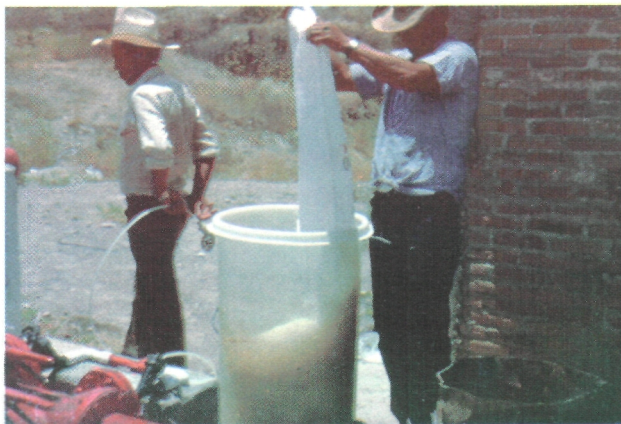


Lámina 12. Suministro del fertilizante a un tanque de fertirriego.

- Se agrega la solución fertilizadora al recipiente, en la proporción que corresponde a la relación de gastos que hay entre el gasto de inyección y el gasto del sistema.

- Se mezcla, agitando la solución y se deja reposar por 24 horas, luego se observa si se generan precipitados, grumos y natas.

- Los precipitados indican que la solución fertilizadora, los puede generar dentro del sistema de riego. Los grumos y las natas también pueden obstruir los sistemas, adhiriéndose a las paredes de los conductos y de los dispositivos del sistema de riego.

- Cuando se presentan precipitados, grumos o natas, se requiere realizar la mezcla 24 horas antes de la aplicación y decantarla o poner la toma arriba del fondo para evitar succionar los precipitados; las natas se eliminan de la superficie de la solución fertilizadora y los grumos deben eliminarse al pasar por el sistema de filtración.

- Se recomienda probar otras mezclas que no originen estos problemas y también aplicar un fertilizante cada día, para evitar la presencia de mezclas y concentraciones altas de fertilizantes en la solución.

Al hacer la prueba de solubilidad de los fertilizantes, es imprescindible tener las precauciones siguientes:

- Siempre adicionar ácido al agua, para evitar peligro de explosión y salpicaduras de ácido. **Nunca el agua en el ácido.**

- Nunca mezcle un ácido o producto acidificado con cloro. Se puede generar gas tóxico.

- No debe mezclar amoníaco anhidro o aquamonía directamente con cualquier ácido. La reacción es inmediata y violenta.

Acondicionadores de fertilizantes granulados

La mayoría de los fertilizantes sólidos secos se fabrican con una cubierta que los protege de la humedad. Se recomienda hacer la prueba de solubilidad de los fertilizantes para definir su manejo. Deberá evitar que esos materiales originen problemas de taponamiento en mallas y emisores

Soluciones frías de mezclas de fertilizantes

La mayoría de los fertilizantes nitrogenados sólidos absorben calor del agua cuando son mezclados. Se enfría mucho el líquido y puede llegar a congelarse el agua afuera del tanque de la mezcla. Para evitar estos problemas, debe diluirse parte del fertilizante a mezclar, dejar reposar hasta que se caliente la mezcla y luego volver a agregar fertilizante y mezclar, de esta manera se disolverá el fertilizante más fácilmente.

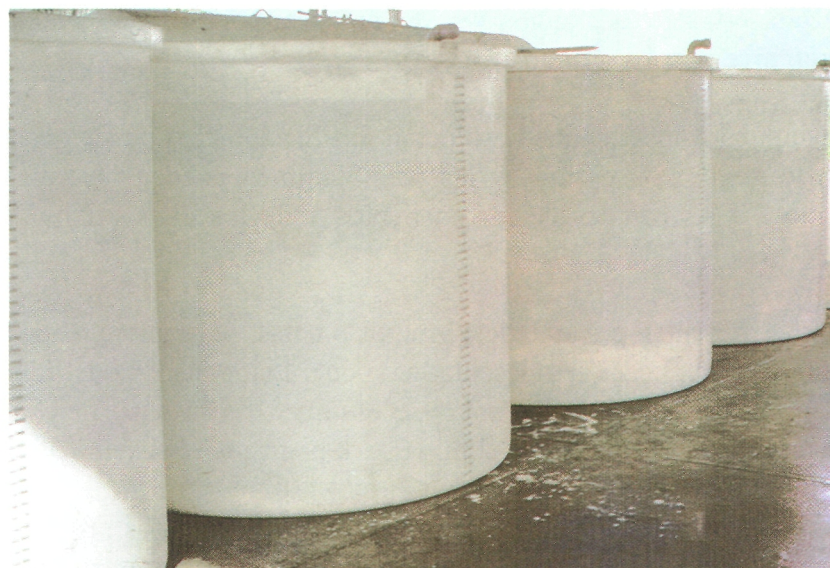


Lámina 13. Diferentes soluciones frías de mezclas de fertilizante

Formas insolubles de precipitados

Deben considerarse las reacciones químicas que se realizarán entre los fertilizantes y el agua de riego, debido a que pueden generarse precipitados insolubles que obstruirán el sistema de riego. Cuando el pH del agua de riego es alto, puede causar que iones de calcio y magnesio en el agua formen precipitados con los aniones, como son: hidróxidos y carbonatos de calcio y magnesio.

Compatibilidad de fertilizantes

En general no se recomienda combinar o mezclar químicos para aplicarlos por medio de los sistemas de riego.

Los fertilizantes con calcio no deben usarse con fertilizantes de azufre en el fertirriego. Por ejemplo, mezclar nitrato de calcio y sulfato de amonio en la misma agua de riego, originará formación de sulfato de calcio, que puede precipitar. Si bien cada uno de ellos es bastante soluble, el yeso o sulfato de calcio es de baja solubilidad, esto puede causar taponamiento de los emisores de los sistemas de riego.

Cuando se requiere mezclar fertilizantes para bajar costos de fertilización, se recomienda hacer la prueba de solubilidad.

Calidad del agua

La calidad del agua de riego es un término que se utiliza para indicar la conveniencia o limitación del empleo del agua con fines de riego para cultivos agrícolas para cuya determinación generalmente se tornan las características químicas del agua. Existen diversas clasificaciones según los parámetros indicativos que se analizan.

- *Clasificación de aguas por salinidad.* A continuación se presentan el cuadro propuesto por Ayers y Wescot (1976) para la interpretación de análisis de aguas de riego:

Cuadro 4. Normas para la interpretación de la calidad del agua de riego (Ayers y Westcot, 1976).

| PROBLEMA | GRADO DEL PROBLEMA | | |
|--|---------------------------|--------------------|----------------|
| | Sin problema | Problema creciente | Problema agudo |
| SALINIDAD (afecta la disponibilidad de agua para las plantas) EC _w (mmho/cm) * | < 0,75 | 0,75-3,0 | > 3,0 |
| PERMEABILIDAD (afecta la velocidad de infiltración en el suelo) EC _w (MMHO/CM) SAR ajustado (tipo de arcilla dominante) | > 0.5 | 0,5-0,2 | < 0,2 |
| Montmorillonita | < 6 | 6-9 | > 9 |
| Illita-Vermiculita | < 8 | 8-16 | > 16 |
| Coalinita-sesquióxidos | < 16 | 16-24 | > 24 |
| TOXICIDAD IÓNICA ESPECIFICA (afecta a cultivos semisensibles) | - | - | - |
| Sodio (SAR aj.) | < 3 | 3-9 | > 9 |
| Cloruros (meq/l) | < 4 | 4-10 | > 10 |
| Boro (g/l) | < 0,75 | 0,75-2,0 | > 2,0 |
| EFFECTOS VARIOS (afecta a cultivos susceptibles) | | | |
| Nitrógeno, NH o NO (mg/l) | < 5 | 5-30 | > 30.00 |
| Bicarbonatos (meq/l) en riego por aspersión | < 1,5 | 1,5-8,5 | > 8.50 |
| pH | (Rango normal: 6.5 - 8.4) | | |

* EC_w - Conductividad eléctrica. (mmhos/cm = dS/cm)

La calidad del agua depende de sus características físicas y químicas, y también de los problemas potenciales que puede generar a los cultivos, a los suelos y al sistema de riego, dando lugar al uso condicionado del agua de riego, dependiendo del cultivo y del suelo específico de que se trate.

- *Características físicas.* Se consideran las sustancias que lleva en suspensión, como: tierra (arena, limo y arcilla), materia orgánica muerta (restos de plantas), y materia orgánica viva (insectos, plantas acuáticas, bacterias y algas).

Los materiales sólidos de mayor densidad que el agua, se eliminan con decantación (con tanques decantadores o hidrociclones) y los materiales orgánicos con filtración del agua.

- *Características químicas.* Se consideran las sustancias diluidas en el agua de riego, en cantidad y en proporción de diversas sales y el pH del agua. A continuación se presentan los índices más importantes.

- *El pH del agua de riego.* Indica la acidez o la alcalinidad, el pH = 7 corresponde al agua neutra, pH mayor de siete a alcalina y menor de siete a ácida. Alcalinidad mayor de ocho se considera agua con problemás de uso en fertirriego, porque hay peligro de que se presenten precipitados de calcio y magnesio o de colaborar en que se eleve el pH del suelo a niveles en que los nutrimentos no puedan aprovecharse.

- *Contenido de sales.* El contenido total de sales engloba el peligro de acumulación de sales solubles en el suelo, que pueden generar problemás de presión osmótica, es decir producen dificultades de absorción del agua para las plantas.

Para medir el contenido total de sales en el agua de riego, se acostumbra utilizar las siguientes unidades: milímhos/cm (mmhos/cm) o deciSiemen/m (dS/m) que equivalen unitariamente a (0.64g/l).

Estos se usan para aguas con contenidos de sales muy altos o para extractos de solución del suelo.

Los micromhos/cm se usan para las aguas de riego normales y equivalen a una milésima de las anteriores.

El miliequivalente por litro (meq/l) es la milésima parte del peso molecular o atómico de los iones, dividido por su valencia, disuelto en un litro de agua. Ejemplo. El sulfato (SO₄) tiene como peso molecular 96 y su valencia es 2, luego entonces se tiene que:

$$\frac{1\text{meq}(\text{so}_4)}{1} = \frac{96}{2 \bullet 1000} = 0.048 \text{ g / l}$$

- *Peligro de salinización del suelo.* Se estima con el contenido total de sales solubles en el agua de riego y se utiliza el cuadro 5 para clasificar el agua por el peligro de salinización.

Cuadro 5. Calidad del agua por peligro de salinización.

| Clave | CE (Micromhos/cm) |
|-------------|-------------------|
| Excelente | < 250 |
| Buena | 250 - 750 |
| Media | 750 - 2000 |
| Mala | 2000 - 3000 |
| No indicada | > 3000 |

Para aplicación del agua debe considerarse la tolerancia de los cultivos a la salinidad, la textura del suelo y la posibilidad de lavado por drenaje natural o artificial.

En suelos arenosos, con buen drenaje pueden usarse con menos de 2,000 micromhos/cm y habrá riesgos a partir de 2,000. Por otra parte, en suelos arcillosos puede haber peligro de salinización con conductividades mayores de 1,500 micromhos/cm, regando varios años.

- *Contenido de sodio.* Puede llegar a desplazar a iones de calcio y magnesio en el complejo de intercambio catiónico, originando en el suelo pérdida de estructura y haciéndose impermeable. El límite de tolerancia es 0.25 g/l o 10.87 meq/l. El agua se puede clasificar por porcentaje de sodio respecto al total de cationes.

Cuadro 6. Clasificación de agua por porcentaje de sodio.

| Clase | Na (% del total de cationes) |
|-------------|------------------------------|
| Excelente | < 20 |
| Buena | 20 - 40 |
| Media | 40 - 60 |
| Mala | 60 - 80 |
| No indicada | > 80 |

- *Contenidos máximos permisibles de los iones tóxicos.* Se consideran límites máximos permisibles del contenido de los iones en las aguas analizadas en laboratorios y se presentan a continuación:

Cuadro 7. Contenidos máximos permisibles de los iones tóxicos.

| Ion | Cantidad del Ion | |
|-----------------------------|------------------|-------|
| | g/l | meq/l |
| Cloro (Cl) | 0.60 | 14.1 |
| Sodio (Na) | 0.25 | 10.9 |
| Sulfatos (SO ₄) | 0.30 | 6.3 |
| Boro (B) | 2.00 | ---- |

Se pueden usar los límites para interpretar análisis de aguas, sin embargo, es necesario tomar en cuenta el suelo y los cultivos.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) puede inhibir el efecto de toxicidad de los iones cuando es alta, pero si la CIC es baja, el efecto de toxicidad puede ser directo. Los cultivos tienen diferentes grados de tolerancia a los iones tóxicos por lo que deben tomarse en cuenta los cultivos tolerantes al nivel de contenidos de iones en el agua.

Uso de ácidos

Cuando el pH del agua es mayor que 7.5 y hay presencia de calcio y magnesio se pueden precipitar carbonatos de calcio y de magnesio. Para evitar o reducir la precipitación de carbonatos dentro de los sistemas de riego, se aplican ácidos para disminuir el pH del agua.

Se pueden usar ácido sulfúrico (H_2SO_4), clorhídrico (HCl) y fosfórico ($H_2 PO_4$), este último con doble objetivo, debido a que además de bajar el pH aporta fósforo en forma de P_2O_5 que sirve como fertilizante.

Al bajar el pH se ayuda a controlar las bacterias. Si el pH del agua de riego llega a bajar temporalmente a 4, se generan condiciones para solubilizar carbonatos de calcio y magnesio y eliminar bacterias; sin embargo, esto puede encarecer el proceso.

Prueba de acidificación. A un volumen unitario de agua de riego se le agrega una solución de ácido, se mezcla y se mide el pH, esto se repite con dosis mayores de solución ácida para bajar el pH, hasta que se llegue al valor deseado.

En el anexo 1 del presente manual, se contempla una metodología para disminuir el pH en aguas de riego, utilizando ácido sulfúrico realizada con fórmulas químicas.

Clorinación

Para evitar o reducir la actividad microbiana se usa la clorinación mediante el hipoclorito de sodio (líquido) o hipoclorito de calcio (sólido). Estos compuestos tienen reacción alcalina y se considera que con un pH mayor que 7.5 se requiere aplicar ácido para evitar problemas. Con la clorinación se pueden reducir los depósitos de sulfuros y de hierro originados por bacterias.

Ejemplo 8. De un análisis de aguas de riego realizado en 703 pozos del D.R. 066 en Santo Domingo, B.C.S. se seleccionaron las aguas con mayor y menor contenido de sales o Conductividad Eléctrica (C.E_w), así como las de mayor y menor pH, (que para éste caso en particular, la de menor pH resultó ser la de mayor C.E_w), se obtuvieron los siguientes registros de aguas:

| Pozo | pH | C.E _w | Ca | Mg | Na | SO ₄ | Cl | CO ₃ | HCO ₃ | %Na | RAS |
|---------|------|------------------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-----------------|------------------|-----|-----|
| | | μmhos/cm | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | % | |
| pozo 96 | 8.13 | 2050 | 3.6 | 6 | 6 | 0.8 | 15.2 | 0.4 | 4.2 | 38 | 5 |
| pozo 27 | 7.06 | 10000 | 17.6 | 35 | 47.4 | 5.8 | 90.6 | 0 | 3.8 | 47 | 9.2 |
| pozo 61 | 7.83 | 710 | 1.2 | 1.4 | 4.5 | 0.4 | 3.2 | 0 | 3.8 | 64 | 3.9 |

Los suelos que corresponden a estas parcelas son de textura franco-arenosa, con bajo porcentaje de materia orgánica, con los siguientes resultados del análisis de suelos:

| Parcela | pH | C.E _w | Ca | Mg | Na | SO ₄ | Cl | CO ₃ | HCO ₃ | RAS |
|---------|------|------------------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-----------------|------------------|-----|
| | | μmhos/cm | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | |
| Lote 96 | 7.6 | 1200 | 2.4 | 3.6 | 6.2 | 2.1 | 8.6 | 0 | 1.6 | 3.6 |
| Lote 27 | 7.6 | 4000 | 6.7 | 11.3 | 21.7 | 1.4 | 36.3 | 0 | 1.9 | 7.3 |
| Lote 61 | 7.91 | 700 | 0.7 | 0.7 | 5.9 | 0.9 | 3 | 0.3 | 2.9 | 7.2 |

Utilizando el Manual para clasificar la calidad del agua por pozo según el criterio de Ayers y Westcot, (Cuadro 4) se tiene:

| Pozo | pH | SALINIDAD | PERMEABILIDAD | TOXICIDAD IÓNICA | |
|---------|--------|------------------|------------------|------------------|--------------|
| | | C.E _w | C.E _w | Sodio (SAR AJ.) | Cloruros |
| Pozo 96 | Normal | Prob. Creciente | Sin Problema | Prob. Creciente | Prob. Agudo |
| Pozo 27 | Normal | Prob. Agudo | Sin Problema | Prob. Creciente | Prob. Agudo |
| Pozo 61 | Normal | Sin Problema | Sin Problema | Prob. Creciente | Sin problema |

Continúa...

| Pozo | EFECTOS VARIOS | | OBSERVACIONES |
|---------|----------------|-----------------|--|
| | Nitrógeno | Bicarbonatos | |
| Pozo 96 | ----- | Prob. Creciente | Agua apta para riego con problemás de cloruros y sodio |
| Pozo 27 | ----- | Prob. Creciente | Agua no apta para riego. |
| Pozo 61 | ----- | Prob. Creciente | Sin problemás para aplicar el fertirriego |

Considerando ahora una segunda clasificación, pero ahora con los diversos parámetros mencionados en los cuadros 5, 6 y 7 del Manual, se tendrían los siguientes resultados respecto a la clase de agua de riego:

| Pozo | Peligro de Salinización | Porcentaje de Sodio | Contenidos Máximos de Iones Tóxicos | | | |
|---------|-------------------------|---------------------|-------------------------------------|----|-----------------|------|
| | | | Na | Cl | SO ₄ | Boro |
| | Clase | Clase | | | | |
| Pozo 96 | Mala | Buena | FR | FR | DR | --- |
| Pozo 27 | Mala | Media | FR | FR | DR | -- |
| Pozo 61 | Buena | Mala | DR | DR | DR | ---- |

FR = Fuera del rango normal.
 DR = Dentro del rango normal.

De un análisis general de estas tres aguas se puede decir que corresponden a tres diferentes tipos de aguas, correspondientes a una clase buena para el pozo 61, de tipo medio para el pozo 96 y una muy mala como la del pozo 27, pues su agua es de 10 mmhos/cm de C.Ew, sin embargo, como los suelos son arenosos su aplicación puede considerarse, ya existe la posibilidad de lavarse con un sobreriego y utilizar cultivos resistentes a la salinidad.

Para efectos de fertirriego, las aguas de riego de la zona fluctúan en un rango de pH normal entre 7 y 8.2, lo que no es restrictivo, sin embargo para los pozos con aguas de pH por arriba de 8, como el pozo 96, es necesario por la concentración de Ca, Mg y HCO_3 (4.2 meq/l), aplicar ácido sulfúrico para reducir el pH hasta 6.5, rango recomendado en la aplicación del agua de riego. La calibración de volumen de ácido por volumen de agua aplicado, se puede cuantificar por una prueba de acidificación en campo, como se mencionó anteriormente.

Ejemplo 9. De un estudio de aguas de riego, realizado en la región vitivinícola de Pesqueira en Sonora, se seleccionaron 4 muestras de aguas correspondientes a las de mayor y menor pH, así como las de mayor y menor conductividad eléctrica: (Zamudio G. B. et al, 1997)

| Pozo | pH | C.E μmhos/cm | Ca meq/l | Mg meq/l | Na meq/l | SO ₄ meq/l | Cl meq/l | HCO ₃ meq/l | RASaj | %Na % |
|--------------|------|-----------------|-------------|-------------|-------------|--------------------------|-------------|---------------------------|-------|----------|
| Río Blanco 1 | 7.52 | 457 | 0.26 | 0.08 | 3.90 | 0.79 | 0.74 | 3.25 | 7.57 | 91 |
| Cuesta 4 | 6.46 | 533 | 2.66 | 2.30 | 1.5 | 0.94 | 1.3 | 3.58 | 1.71 | 23 |
| Tracalita 2 | 7.09 | 364 | 0.38 | 0.06 | 3.00 | 0.34 | 0.47 | 3.20 | 6.40 | 89 |
| San Fco 6 | 6.81 | 2391 | 9.58 | 3.4 | 10.9 | 4.8 | 10.83 | 7.62 | 11.12 | 45 |

Utilizando el Manual para analizar estos cuatro tipos de agua, según el criterio de Ayers y Westcot:

| Pozo | pH | SALINIDAD | PERMEABILIDAD | TOXICIDAD IÓNICA | |
|--------------|--------------|------------------|------------------|------------------|--------------|
| | | C.E _w | C.E _w | (SAR AJ.) | Cloruros |
| Río Blanco 1 | Sin Problema | Sin Problema | Prob. Creciente | Prob. Creciente | Sin Problema |
| Cuesta 4 | Sin Problema | Sin Problema | Sin Problema | Sin problema | Sin Problema |
| Tracalita 2 | Sin Problema | Sin Problema | Prob. Creciente | Sin Problema | Sin Problema |
| San Fco 6 | Sin Problema | Prob. Creciente | Sin Problema | Prob. Agudo | Prob. Agudo |

Continúa...

| Pozo | EFECTOS VARIOS | | OBSERVACIONES |
|--------------|----------------|-----------------|---|
| | Nitrógeno | Bicarbonatos | |
| Río Blanco 1 | ----- | Prob. Creciente | Agua apta para riego, inicio de problemás de Na |
| Cuesta 4 | ----- | Prob. Creciente | Agua apta para riego |
| Tracalita 2 | ----- | Prob. Creciente | Agua apta para riego.inicio problemás de Na |
| San Fco 6 | ----- | Prob. Creciente | Con problemás fuertes de salinidad, HCO ₃ , y Na |

De igual manera, en una segunda clasificación, pero ahora con los diversos parámetros mencionados en los cuadros 5, 6 y 7 del Manual, la clase de agua de riego, sería:

| Pozo | Peligro de Salinización | Porcentaje de Sodio | Contenidos Máximos de Iones Tóxicos | | | |
|--------------|-------------------------|---------------------|-------------------------------------|----|-----------------|------|
| | | | Na | Cl | SO ₄ | Boro |
| | Clase | Clase | | | | |
| Río Blanco 1 | Buena | No indicada | DR | DR | DR | --- |
| Cuesta 4 | Buena | Buena | DR | DR | DR | --- |
| Tracalita 2 | Buena | No indicada | DR | DR | DR | -- |
| San Fco 6 | Mala | Media | FR | DR | DR | ---- |

FR = Fuera del rango normal.

DR = Dentro del rango normal.

Del presente análisis, se puede mencionar que a excepción del pozo San Francisco 6, las aguas son de buena calidad tendiendo a media por la presencia de sodio y sobretodo de bicarbonatos, ya que todas sobrepasan el límite permisible. Para la zona, este dato es importante porque si el riego es por aspersión, pueden manchar la fruta y reducir su calidad.

Para los pozos con pH por arriba de 7 y con problemás de RAS ajustado, se justifica la aplicación de H₂SO₄ y yeso micronizado para reducirlos respectivamente. De nueva cuenta la cantidad de ácido se podría calcular con una prueba de acidificación en campo o mediante la metodología presentada en el anexo 1.

Ejemplo 10. Los siguientes análisis de aguas corresponden a pozos de bombeo del D.R 081 en el Estado de Campeche, y son utilizados como aguas de riego en suelos característicos de la Península de Yucatán:

| Sitio | pH | C.E | Ca | Mg | Na | SO ₄ | Cl | HCO ₃ | %Na | RAS |
|----------|-----|----------|-------|-------|-------|-----------------|-------|------------------|-----|------|
| | | µmhos/cm | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | % | |
| NOHACAL5 | 7.3 | 960 | 5.54 | 2.76 | 1.66 | 1.06 | 2.1 | 6.80 | 16 | 0.8 |
| NOHALAL1 | 7.0 | 2360 | 9.52 | 4.24 | 16.14 | 18.34 | 5.80 | 5.72 | 54 | 6.15 |

Utilizando el Manual para clasificar la calidad del agua por pozo según el criterio de Ayers y Westcot, (Cuadro 3) se tiene:

| SITIO | pH | SALINIDAD | PERMEABILIDAD | TOXICIDAD IÓNICA | |
|-----------|--------|------------------|------------------|------------------|----------------|
| | | C.E _w | C.E _w | Sodio (SAR AJ.) | Cloruros |
| NOHACAL 5 | Normal | Prob. Creciente | Prob. Creciente | Sin problema | Sin problema |
| NOHALAL 1 | Normal | Prob. Creciente | Prob. Creciente | Prob. Creciente | Prob.Creciente |

Continúa...

| SITIO | EFECTOS VARIOS | | OBSERVACIONES |
|-----------|----------------|-----------------|--|
| | Nitrógeno | Bicarbonatos | |
| NOHACAL 5 | ----- | Prob. Creciente | Agua apta para riego |
| NOHALAL 1 | ----- | Prob. Creciente | Agua media con inicio de problemás de Na, HCO ₃ y Sales |

En una segunda clasificación, pero ahora con los diversos parámetros mencionados en los cuadros 5, 6 y 7 del Manual:

| SITIO | Peligro de Salinización | Porcentaje de Sodio | Contenidos Máximos de Iones Tóxicos | | | |
|-----------|-------------------------|---------------------|-------------------------------------|----|-----------------|------|
| | | | Na | Cl | SO ₄ | Boro |
| | Clase | Clase | | | | |
| NOHACAL 5 | Media | Excelente | DR | DR | DR | --- |
| NOHALAL 1 | Mala | Media | FR | DR | FR | ---- |

FR = Fuera del rango normal.

DR = Dentro del rango normal.

Del análisis anterior se puede concluir que el tipo de aguas de la región tienen un alto número de cationes de Ca, Mg y aniones como sulfatos lo que indica que son aguas de alta dureza, lo que puede repercutir en taponamientos en sistemas de riego presurizado al precipitar por efectos de pH alcalinos.

FERTILIZANTES Y FERTIRRIEGO

Nitrógenados

Los fertilizantes nitrogenados que con mayor frecuencia se usan para inyectar en los sistemas de riego son: urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio y nitrato de calcio.

Los fertilizantes nitrogenados como el amoníaco anhidro, el agua amoniacal y el fosfato de amonio, pueden formar precipitados insolubles al inyectarse en aguas con pH alto o con contenidos elevados de calcio y magnesio, por ello se usan en aguas neutras o ácidas.

El uso efectivo de los fertilizantes nitrogenados requiere del conocimiento de las interacciones con el agua de riego, y sus transformaciones y movimientos en el suelo.

- *Amoníaco anhidro*. El amoníaco anhidro es un gas licuado y debe manejarse con equipo especial para mantener la alta presión requerida para almacenarlo. Cuando el amoníaco anhidro se inyecta en el agua de riego se forma agua amoniacal o hidróxido de amonio.



El amoníaco anhidro agregado al agua puede formar agua amoniacal, esta a su vez puede formar amonio e hidroxido en forma iónica y esto es reversible hasta su forma inicial.

El agua amoniacal se vende como fertilizante 20-0-0.

Al usar amoníaco libre en los fertilizantes se corre el riesgo de que se volatilice en la atmósfera. Al disolver amoníaco en el agua se libera calor. También se transforma el amoníaco en el ión amonio (NH_4^+) y en el ión hidróxido (OH^-); este ión es la causa del pH elevado. El pH del agua o del suelo tratados con suministro rápido de amoníaco puede llegar de 10.5 a 12; la reacción puede invertirse y formar amoníaco en forma de gas y volatilizarse.

Cuadro 8. Relación entre pH y % de N que puede volatilizarse

| pH | % N que puede volatilizarse |
|------|-----------------------------|
| 7.2 | 0.1 |
| 8.2 | 10.0 |
| 9.2 | 50.0 |
| 10.2 | 90.0 |
| 11.2 | 99.0 |

Esto indica que se puede volatilizar el amoníaco en aguas con pH de 8 o mayor y considerando que la reacción del amoníaco con el agua de riego eleva el pH, el problema se

agudiza. Inyectando agua amoniacal en el agua de riego normal elevará el pH arriba de 9.4, donde las pérdidas de amoníaco pueden ser de 30 a 50% del nitrógeno aplicado. Las pérdidas de nitrógeno son mayores si el aire es muy seco y hay viento.

Para evitar pérdidas de amoníaco por volatilización, es mejor fertirrigar con amoníaco o fertilizantes de amonio en días frescos, húmedos y con poco viento, reduciendo también la turbulencia en el flujo del agua en canales y surcos. La mejor manera de evitar las pérdidas de amoníaco es acidificar el agua de riego antes de inyectar el fertilizante y conservar la forma amonio (NH_4^+).

Los fertilizantes amoniacaes no deben aplicarse por aspersion, debido a que el amoníaco se desprende de las gotas de agua y el gas amoníaco puede dañar severamente las hojas de las plantas.

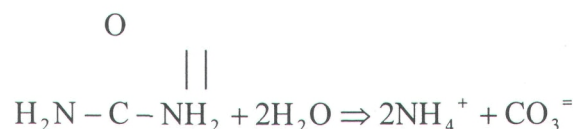
La molécula de amonia (NH_3) no tiene carga eléctrica pudiendo entrar libremente por las células de las plantas, lo que puede perjudicar a las plantas hasta matarlas. El amonio se usa como defoliante en el cultivo algodnero.

- *Orgánicos*. Los fertilizantes nitrogenados orgánicos no son rápidamente solubles en el agua por esta razón no se usan en fertirriego.

- *Urea*. No es corrosivo para la mayoría de los metales. Se vende como 46-0-0 sólido y 23-0-0 líquido. La urea es muy soluble en el agua (1g de urea en 1 cm^3). La alta solubilidad de la urea y el hecho de que no ioniza en solución, permite su aplicación directa a las hojas de los cultivos en soluciones de 0.5 a 1.0% sin riesgos para las plantas, pero debe usarse urea recristalizada.

Como la urea no tiene carga eléctrica tiene gran movilidad en el suelo, hasta que es transformada por microorganismos.

Las plantas y microorganismos producen la enzima ureasa, la cual transforma la urea en amonio y carbonato.



Una molécula de urea con dos de agua forma dos iones de amonio y uno de carbonato.

Como el amonio tiene carga eléctrica (+) es retenido por las arcillas y partículas de materia orgánica; esta transformación puede ocurrir en horas, después de su aplicación. Cuando la urea se aplica en seco sobre la superficie del suelo puede llegar a volatizarse a menos que se riegue o se cubra con suelo.

Fosforados

La fertilización con fósforo por medio del agua de riego no se ha usado debido a la baja solubilidad de los compuestos de fósforo y a la reducida movilidad del fósforo en el suelo.

Por lo anterior, en riego por gravedad se recomienda seguir aplicando el fósforo en la forma tradicional, en el caso de microrriego, sólo se puede aplicar como fosfatos monoamónico o diamónico y ácido fosfórico, lo cual puede resultar costoso.

Potásicos

El cloruro de potasio se usa combinado con sulfato de potasio y magnesio, nitrato de potasio y fosfato de potasio. Debe tenerse en cuenta que el cloro puede intoxicar algunos cultivos y ante la presencia de calcio y magnesio en el agua de riego, el sulfato y los fosfatos pueden crear precipitados. Los fertilizantes de potasio deben probarse por solubilidad para evitar problemas de impurezas que puedan crear grumos y precipitados.

Fertilizantes con azufre

Los fertilizantes que contienen azufre pueden mejorar el riego superficial. Los fertilizantes con azufre acidifican la superficie del suelo durante el riego y ayudan a la infiltración del agua en el suelo. Cuando el agua contiene calcio y magnesio hay peligro de que se forme yeso que puede precipitar.

Fertilización con micronutrientes

No hay evidencias definitivas del éxito de fertirriego con micronutrientes, por lo que no se recomienda.

PROGRAMA DE FERTILIZACIÓN

Fundamentos de un programa

Los programas de fertilización se fundamentan en: El agua es el principal alimento y vehículo de transporte de los nutrimentos. Cada vez que se riega debe fertilizarse para dosificar fraccionadamente el nutrimento y de acuerdo con las demandas de la planta en cada etapa de desarrollo. Las demandas parciales deben sumar las demandas anuales o por ciclo del cultivo. Los análisis de suelo, agua y plantas son útiles para orientar y hacer ajustes de fertilización.

Recomendaciones para elaborar programás

Debe prepararse un programa de riego previo al ciclo de cultivo y ajustarse de acuerdo con el desarrollo del cultivo y del tiempo (meteorológico) en condiciones reales.

Recomendaciones para preparar un programa de fertirriego:

- La fertirrigación en frutales debe aplicarse al inicio de la vegetación y terminar con la caída de las hojas en los árboles de hoja caduca. En los de hoja perenne, cuando finalice la última brotación.
- Durante el ciclo se requiere aplicar los nutrimentos de acuerdo con las etapas de desarrollo, por ejemplo, nitrógeno en brotación, crecimiento y llenado de grano; fósforo en prefloral, floral y final de maduración; potasio en llenado de grano y maduración; Magnesio en maduración, y calcio en brotación, crecimiento y llenado de grano.
- Los programás hortícolas de fertirriego, durarán todo el ciclo vegetativo.
- Para preparar el programa de fertilización se deben tomar en cuenta: la textura del suelo (CIC), la fertilidad inicial del suelo, el requerimiento de nutrimentos minerales por ciclo del cultivo, los nutrimentos necesarios para producir una tonelada del producto agrícola y el porcentaje de nutrientes que se consumen en cada etapa de desarrollo.
- De acuerdo con la información de las demandas de nutrimentos de los cultivos, el número de riegos, la fertilidad inicial del suelo y los fertilizantes disponibles para inyectar en el sistema de riego, debe prepararse el programa de fertirriego.
- Los programás de fertirriego se pueden preparar por el número de riegos, por dosificación semanal o en diferentes periodos de tiempo.
- En suelos arenosos tiene mayor ventaja aplicar el fertirriego con el mayor número de riegos; en el caso del riego por goteo debe ser diario. Cuando hay suelos arcillosos debe

evitarse provocar excesos de humedad, por lo que pueden aplicarse dosificaciones de fertilizantes semanales.

En el cuadro 9 se presenta el consumo de nutrimentos en el cultivo de tomate.

Cuadro 9. Consumo de nutrientes en el cultivo de tomate

| Intervalo días | (kg/ha/día) | | |
|----------------|-------------|-------------------------------|------|
| | N | P ₂ O ₅ | K |
| 1-10 | 0.30 | 0.01 | 0.40 |
| 11-20 | 0.30 | 0.02 | 0.50 |
| 21-30 | 0.30 | 0.03 | 0.50 |
| 31-40 | 0.40 | 0.03 | 0.50 |
| 41-50 | 0.40 | 0.03 | 0.55 |
| 51-60 | 0.45 | 0.04 | 0.55 |
| 61-70 | 0.50 | 0.04 | 0.60 |
| 71-80 | 1.10 | 0.18 | 2.20 |
| 81-90 | 2.80 | 1.22 | 4.80 |
| 01-100 | 1.30 | 0.10 | 2.90 |
| 101-110 | 2.70 | 0.30 | 5.70 |
| 111-120 | 4.60 | 0.60 | 7.80 |
| 121-130 | 3.90 | 0.45 | 7.00 |
| 131-150 | 2.70 | 0.17 | 1.00 |
| 151-200 | - | - | - |
| Total | 250 | 24 | 370 |

SISTEMAS DE INYECCIÓN

Los equipos de inyección dependen del tipo de sistema de riego que se utiliza. Se considera que los sistemas de riego por gravedad y de baja presión con tuberías con compuertas, se pueden aprovechar para fertilizar con depósitos de carga constante y un inyector de orificio calibrado. Los sistemas de riego presurizado requieren de inyectores de bomba, de tanque y venturís. Estos equipos permiten aplicar fertilizantes, fungicidas, herbicidas y soluciones para prevenir taponamientos en los goteros y en las tuberías, y pueden emplear energía eléctrica para su operación o energía hidráulica del mismo sistema de riego.

Inyector de orificio

Se denomina así a un equipo de fertirriego que consta de tanque de la solución fertilizadora, depósito de carga constante, válvula de flotador, dispositivo de inyección y accesorios.

El tanque alimenta al depósito de carga constante por medio de una manguera y tiene válvula de cierre y apertura. La válvula del flotador abre cuando se descarga solución fertilizadora aguas abajo por el inyector de orificio y permite el paso del líquido del tanque al depósito de carga constante. Cuando sale un gasto menor al de la válvula del flotador, éste regula el gasto para igualarlo haciendo que la carga hidráulica sea constante. Al permanecer la carga constante, el gasto del inyector de orificio permanece también constante.

El inyector del fertilizante puede descargar a un canal abierto o puede conectarse a la salida del hidrante de un sistema de tuberías con compuertas, como se puede observar en la lámina 14a. Este sistema se usa para fertirrigar surcos y melgas y tiene la ventaja de ser fácil de instalar y de calibrar en campo.



Lámina. 14a. Inyector de fertilizante, para tuberías con compuertas en riego por gravedad.



Lámina.14b. Acercamiento al inyector de carga constante con flotador.

Vénturi

Reciben este nombre los inyectores de soluciones fertilizadoras que funcionan por succión generada por un estrechamiento y ampliación del área de paso del flujo en una tubería, y se pueden hacer funcionar de dos formas: a) por presión diferencial generada por válvula y b) por presión generada por bomba centrífuga.

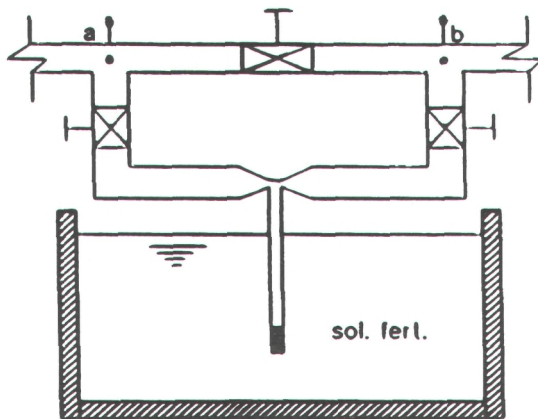


Lámina 15a. Vénturi con válvula.



Lámina 15b. Vénturi funcionando con válvula.

- *Vénturi de válvula.* Estos inyectores se instalan para derivar un caudal de la tubería principal del sistema de riego, aguas arriba de una válvula. El agua derivada entra en un ramal de menor diámetro, en el cual se coloca un dispositivo conocido como "vénturi" que consiste en una reducción del área de paso del agua, de manera que al pasar el agua aumenta de velocidad en el estrechamiento al iniciar la ampliación se conecta una entrada de agua o solución, debido a que en ese punto se genera una succión que se aprovecha para aplicar soluciones de agroquímicos.

En la lámina 15a se observa que al cerrar parcialmente la válvula de la tubería principal y estando abiertas las dos válvulas de derivación, se obliga al flujo a pasar por el ramal desde el punto (a) al punto (b), entre más cerrada esté la válvula de la tubería principal, mayor será el caudal que pasará por el vénturi, y mayor es la succión en el tanque fertilizador.

Para conocer los caudales que se inyectan al sistema, es necesario medir la diferencia de presiones que se presente entre los puntos (a) y (b) y anotar el caudal de solución correspondiente, para calibrar el sistema fertilizador o aplicador de agroquímicos.

En el cuadro 10, se presentan características de inyectores de agroquímicos por succión incluyendo presión a la entrada, caudal mínimo de agua que debe pasar por el inyector, % de pérdida de carga y máxima capacidad de succión.

Cuadro 10. Características de los inyectores por succión.

| Modelo | Presión de entrada (m) | Con limitador | | | Sin limitador | | |
|-------------|------------------------|--|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------|-----------------------------------|
| | | Caudal mínimo de agua a través de la bomba (l/h) | Pérdida de carga (%) | Máxima capacidad de succión (l/h) | Caudal mínimo de agua a través de la bomba (l/h) | Pérdida de carga (%) | Máxima capacidad de succión (l/h) |
| A(3/4"x.5) | 10 | 300 | 28-43 | 47 | 240 | 30-70 | 105 |
| | 20 | 280 | 37-60 | 48 | 340 | 25-75 | 110 |
| | 30 | 45 | 33-46 | 45 | 400 | 25-60 | 102 |
| | 40 | 500 | 31-45 | 44 | 475 | 25-55 | 95 |
| | 50 | 550 | 28-42 | 44 | 525 | 25-50 | 90 |
| | 60 | 600 | 28-35 | 46 | 575 | 25-45 | 86 |
| | 70 | 650 | 27-37 | 47 | 625 | 25-45 | 84 |
| A(3/8"x.9)9 | 15 | 600 | 33-60 | 48 | 450 | 30-75 | 200 |
| | 20 | 750 | 35-50 | 86 | 645 | 30-70 | 220 |
| | 30 | 890 | 31-45 | 87 | 820 | 28-60 | 200 |
| | 40 | 990 | 30-42 | 89 | 940 | 27-52 | 190 |
| | 50 | 1090 | 28-40 | 94 | 1040 | 26-48 | 178 |
| | 60 | 1160 | 26-37 | 97 | 1120 | 25-43 | 168 |
| | 70 | 1240 | 24-36 | 100 | 1210 | 25-40 | 160 |
| C(2"x8) | 15 | 4600 | 13-22 | 60 | 7500 | 10-23 | 100 |
| | 20 | 4750 | 12-19 | 60 | 8500 | 10-21 | 101 |
| | 30 | 4750 | 13-16 | 60 | 10000 | 8-18 | 102 |
| | 40 | 6900 | 8-15 | 60 | 11000 | 8-16 | 103 |
| | 50 | 7250 | 8-13 | 60 | 12000 | 10-15 | 104 |
| | 60 | 7600 | 7-13 | 60 | 13000 | 8-14 | 105 |
| | 70 | | 7-12 | 60 | 13650 | 7-14 | 106 |

Como puede analizarse en el cuadro anterior, las pérdidas de carga que produce el dispositivo constituyen un cierto porcentaje importante de la carga de presión que proporciona la bomba para el sistema de riego. La instalación del venturi en la línea principal, no es conveniente sobre todo cuando el costo de energía es significativo. Ante esta situación, es más conveniente optar por instalar una bomba que proporcione, la carga necesaria para su funcionamiento, como se explicará más adelante.

- *Venturi con bomba.* En este caso se usa la bomba centrífuga para generar una diferencia de presiones entre dos puntos de la tubería principal del sistema de riego, que permita la inyección de la solución fertilizadora. La succión de la bomba se instala en la tubería principal y la descarga se conecta al fertilizador venturi, de manera que al funcionar, bombea un gasto adecuado para que pase por el cuerpo del venturi generando la succión de la solución fertilizadora que se incorpora a la tubería y es conducida hasta la tubería principal para ser distribuida en el sistema de riego.

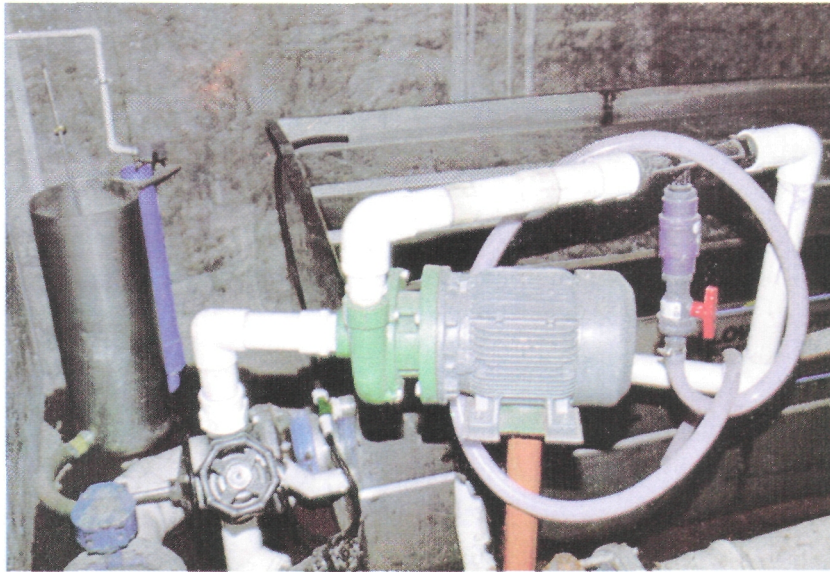


Lámina 16. Vénturi funcionando con bomba centrífuga.

- Bomba inyectora

Las bombas inyectoras de fertilizantes funcionan con energía eléctrica o con energía hidráulica. Generalmente son bombas de pistón que operan con una cámara de bombeo que se llena de solución fertilizadora al desplazarse el pistón hacia afuera de la cámara transportándola hacia el sistema de riego al impulsarla al pistón o émbolo hacia dentro de la cámara. Cada ciclo envía un volumen de solución fertilizadora equivalente al de la cámara de bombeo. El número de pulsos por unidad de tiempo, permite calcular el gasto promedio de inyección que genera la bomba.

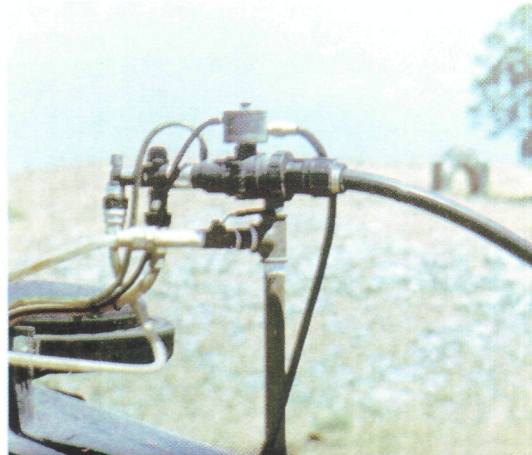
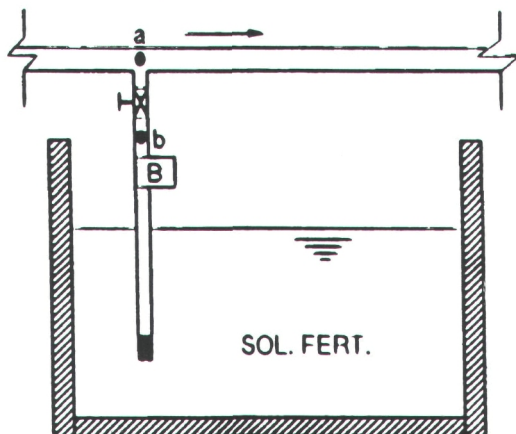


Lámina 17a. Principio de operación de una Lámina 17b. Bomba fertilizadora.
bomba fertilizadora.

Las bombas fertilizadoras usan cualquiera de las dos formas de energía para inyectar la solución dentro de la tubería, en un punto donde la presión es menor que la generada por la bomba fertilizadora, de manera que la solución pueda entrar en el sistema. La presión que genera la bomba debe ser mayor que la de la tubería; entre mayor sea la diferencia de presiones, mayor será el caudal inyectado en la tubería.

Como puede observarse en la lámina 17a, la presión que genera la bomba (*b*) debe ser mayor que la del punto (*a*), para que pueda existir flujo desde (*b*) hasta (*a*), entre mayor sea la diferencia de presiones mayor será el caudal inyectado en la tubería. Para conocer el caudal inyectado se pone una escala (regla) en la pila o tanque de la solución fertilizadora, después de un tiempo se mide el desnivel en dicha escala; al multiplicar el área de la pila o tanque por el desnivel, se obtiene el volumen aplicado de solución. Si éste se divide entre el tiempo transcurrido, se obtiene el caudal inyectado.

- Tanque de inyección

Es un dosificador de agroquímicos en el que se diluyen las soluciones, y emplea el método de presión diferencial para aprovechar la energía hidráulica e inyectar los fertilizantes. Se emplea un tanque conectado aguas arriba de la válvula de la tubería principal (1), ver lámina 18, parte del agua que fluye en la tubería principal (*a*) se desvía hacia el tanque por la tubería (*b*) cuando las válvulas 2 y 3 se encuentran abiertas, el flujo entra donde se encuentra la solución del agroquímico con una concentración inicial y al entrar y salir agua mediante el flujo (*c*) se diluye continuamente y sale solución fertilizadora cada vez más diluida por la tubería (*d*) y entra a la tubería principal aguas abajo de la válvula 1, para mezclarse con el flujo de la tubería y llevarla al sistema de riego para su distribución en el campo.

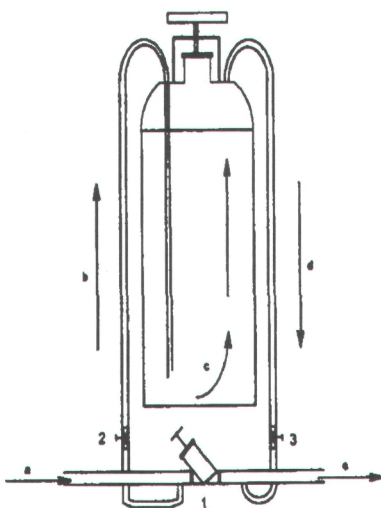


Lámina 18. Dosificador de tanque.

Con la finalidad de exponer claramente la inyección por medio del dosificador de tanque fertilizador, se realizará un ejemplo de inyección variando la concentración de la solución.

Ejemplo 11. Se requiere aplicar una solución fertilizadora que está diluída en un volumen total de 1000 l y se quiere aplicar en 60 minutos. La solución fertilizadora se introduce en el tanque fertilizador de 1000 l de capacidad y se considera que la concentración que tiene la solución real, es equivalente a la concentración relativa inicial de 100 %. Al pasar el agua a través del tanque, diluye la solución original y se considera que dejando que el agua se diluya hasta una concentración relativa de 2%, prácticamente se ha aplicado la dosis de fertilización.

Se usa la fórmula para dosificadores de fertilizante por dilución:

$$Q_{iny} = \frac{V}{t} \left(-Ln \frac{C_f}{C_i} \right)$$

donde:

- Q_{iny} es el gasto de la solución fertilizadora en l/min
- V es el volumen en l
- t es el tiempo de aplicación del fertilizante (min)
- C_i es la concentración inicial relativa en el tanque (%)
- C_f es la concentración final relativa en el tanque (%)

Aplicando la fórmula se obtiene el siguiente resultado:

$$Q_{iny} = \frac{1000}{60} \left(-Ln \frac{2}{100} \right) = 16.666 * -(-3.912) = 65.2 \text{ l / m}$$

Debe introducirse un gasto de 65.2 l/m al tanque de inyección para que diluya la solución fertilizadora y transporte el agroquímico hacia el sistema de riego. El inyector de tanque debe tener un medidor de gasto que puede ser un rotámetro para que físicamente se conozca la descarga del fertilizador o con una curva de calibración del dosificador y la presión diferencial.

Inyección central y unidades móviles de inyección

De acuerdo con el tamaño y tipo del sistema de riego, se pueden usar métodos de inyección central fijos o móviles que inyecten fertilizantes en secciones de riego específicas.

- *Inyección central*

Cuando los sistemas de riego dominan toda la superficie con riego simultáneo, es necesario usar sistemas de inyección central, tales como pivote central y sistemas de microrriego pequeños. Requieren de un tanque con capacidad para diluir la dosis del fertilizante del área que riega simultáneamente. En microaspersión y goteo también se usan unidades centrales de fertirriego, con capacidad para inyectar el fertilizante por secciones de riego.

- *Unidades móviles de inyección*

Se usan tanques de plástico ligeros o tanques montados en remolques, con equipos de bombeo de gasolina, para generar la presión diferencial o se tiene el sistema diseñado para que operen los fertilizadores en cada sección de riego. En este caso el inyector, ya sea bomba, vénturi o tanque dosificador, se traslada a cada sección que se regará, esto ahorra costos del sistema de fertirriego.



Lámina 19. Cabezal de control con inyección central

GASTOS Y TIEMPOS DE INYECCIÓN

Gasto de inyección del fertilizante

Para determinarlo se deben seguir los pasos siguientes:

- *Cantidad de nutriente.* Se determina la cantidad necesaria por hectárea, dependiendo del número de fertirriegos y de la dosis de nutriente por fertirriego, según la etapa de desarrollo.

Ejemplo 12. Se requiere aplicar 200 Kg de nitrógeno/ha y se aplicará en 10 riegos, para simplificar se usan cantidades iguales de nutrimento por riego, por lo que:

$$\frac{N}{\text{RIEGOS}} = \frac{200}{10} = 20 \frac{\text{Kg}}{\text{ha}} / \text{riego}$$

- *Selección de fertilizante.* Se escoge el fertilizante que se usará de acuerdo con el precio unitario, el tipo de suelo, calidad del agua y programa de manejo. Se tienen dos condiciones:

- i) Sólido. Se selecciona urea (46-0-0)
- ii) Líquido. Se selecciona urea-nitrato de amonio (32-0-0).

- *Cantidad de fertilizante/ha*

Se calculan los kilogramos que deben usarse por hectárea.

i) Fertilizante sólido

$$\frac{\text{Kgfert}}{\text{ha}} = \frac{\text{Kgnut} / \text{ha} \cdot 100}{\% \text{nut}}$$

$$\frac{\text{Kgkfert}}{\text{ha}} = \frac{20 \cdot 100}{46} = 43.5 \text{Kg/ha}$$

ii) Fertilizante líquido:

$$\frac{\text{Kgurea32}}{\text{ha}} = \frac{20 \cdot 100}{32} = 62.5 \text{Kg/ha}$$

- Volumen de agua

Se calculan cuántos litros de agua se necesitan de acuerdo con su solubilidad en k/l, para los dos tipos de fertilizante:

- i) Fertilizante sólido. Se considera una solubilidad de 0.78 Kg/l para la urea.

$$V_a = \frac{\text{Kgfert/ha}}{\text{Kgfert/l}} = \frac{43.5}{0.78} = 55.71/\text{ha}$$

- ii) Fertilizante líquido. Se usa la densidad de la urea nitrato de amonio (32-0-0) 1.34 Kg/l.

$$V_a = \frac{\text{Kgfert/ha} \cdot \text{l/fert}}{\text{Kgfert/l}} = \frac{62.5 \cdot 1}{1.34} = 46.61$$

- Puesta de riego

Se considera como puesta de riego a la superficie que se riega simultáneamente y que se fertiliza durante el riego con una inyección de fertilizante. En riego por gravedad es un número de surcos o melgas que se riegan simultáneamente con el gasto modular parcelario. En riego presurizado equivale a la superficie que se riega con aspersores, microaspersores o goteros que funcionan simultáneamente y pueden ser: una tubería regante de aspersión o secciones de riego en microaspersión y goteo. Ejemplo, se consideran 5 ha de riego simultáneo.

- Volumen por puesta de riego

Se calcula el volumen de agua necesario para cada puesta o sección de riego.

- i) Fertilizante sólido: urea (46-0-0)

$$V_{t_s} = V_a \times \text{ha} = 55.7 \times 5 = 278.5 \text{ l}$$

- ii) Fertilizante líquido: urea (32-0-0)

$$V_{t_l} = V_a \times \text{ha} = 46.6 \times 5 = 233.0 \text{ l}$$

- *Tiempo de inyección*

Generalmente es el tiempo total de riego, el tiempo de inyección y se aplica a todos los métodos de riego, sin embargo, es posible que se inyecte fertilizante sólo en una fracción del tiempo. Para el ejemplo se considera que el tiempo de riego por puesta es de 16 h, e inyectar los fertilizantes durante todo el tiempo de riego.

- *Gasto de inyección*

Se calcula dividiendo el volumen de solución entre el tiempo de inyección:

- i) Fertilizante sólido. La solución de urea tiene mayor volumen que el agua necesaria para diluirla, por lo que se puede tomar el doble del volumen necesario, para garantizar que el tanque tenga capacidad de suficiente.

$$Q_i = \frac{V_t}{T} = \frac{278.5 \cdot 2}{16} = 34.81 / h = 580 \text{cm}^3 / \text{min}$$

- ii) Fertilizante líquido. Se puede calcular directo, puesto que es soluble:

$$Q_i = \frac{V_t}{T} = \frac{233}{16} = 14.61 / h = 243 \text{cm}^3 / \text{min}$$

Gasto de inyección de campo

Para comprobar o calibrar un inyector de fertilizantes, es necesario aforar la descarga de la siguiente forma:

- *Recipiente*

Se escoge un recipiente graduado para conocer el volumen de descarga.

- *Tiempo*

Se selecciona un tiempo de captación del gasto, de manera que la precisión de la lectura sea menor de 1% del gasto de inyección.

- *Fórmula*

Se usa la fórmula siguiente:

$$Q_i = \frac{V \cdot 0.06}{T}$$

Donde: Q_i [l/h] es el gasto de inyección, V [cm³] es el volumen captado en el tiempo T [min].

Ejemplo. Se afora la descarga de un inyector de fertilizantes y se encuentra que llena un recipiente de $V = 500$ [cm³] en un tiempo $T = 12$ min, por lo que:

$$Q_i = \frac{500 \cdot 0.06}{12} = 2.51 / h = 41.7 \text{ cm}^3 / \text{min}$$

Tiempo de riego

Se calcula con la fórmula siguiente:

$$TR = \frac{27.8 \cdot LRN \cdot S}{Q_m \cdot E_a}$$

Donde: TR [h] es el tiempo de riego necesario para aplicar una lámina neta de riego (LRN) [cm] en una superficie (S) [ha], con un gasto modular (Q_m) [l/s] y una eficiencia de aplicación (E_a) [%].

Ejemplo 13. Riego por surcos.

Se riegan 80 surcos con 1.0 l/s por surco, los cuales tienen 200 m de longitud y espaciamiento de 0.9 m, considerando una $LRN = 10$ cm con eficiencia de aplicación (E_a) = 0.8.

$$S = \frac{200 \cdot 0.9 \cdot 80}{10000} = 1.44 \text{ ha}$$

$$TR = \frac{27.8 \cdot 10 \cdot 1.44}{80 \cdot 1 \cdot 0.8} = 6.26 \text{ h}$$

Al iniciar el riego, debe observarse el avance y hacer el ajuste siguiente: si el avance es lento, debe incrementarse el gasto por surco y reducir el número de surcos de la puesta de riego o viceversa.

Ejemplo 14. Riego por aspersión.

Se riega con tres líneas o tuberías de riego con aspersores, espaciadas entre ellas 18 m y entre aspersores de la tubería 12 m, la longitud de las tuberías es de 240 m, el gasto medio de los aspersores es de 0.7 l/s, se requiere aplicar una lámina de riego neta LRN = 7 cm con eficiencia de aplicación $E_a = 0.85$.

Se puede calcular de la siguiente forma:

$$LPH = \frac{Q_{asp} \cdot 360}{E_{asp} \cdot E_{tr}} = \frac{0.7 \cdot 360}{12 \cdot 18} = 1.17 \text{ cm / h}$$

Donde: LPH [cm/h] es la lámina precipitada horaria, Q_{asp} [l/s] es el gasto del aspersor, E_{asp} [m] es el espaciamiento entre aspersores y E_{tr} [m] es el espaciamiento entre tuberías.

$$TR = \frac{LRN}{E_a \cdot LPH} = \frac{7}{0.85 \cdot 1.17} = 7h$$

COMPARACIÓN DE COSTOS DE FERTILIZANTES

Cuando se pueden usar varios fertilizantes para suministrar el nutrimento que se quiere aplicar al cultivo, es conveniente analizar los factores técnicos y los costos de los fertilizantes.

Si los precios están dados en pesos por tonelada de fertilizante, el costo por kilo de nutrimento se calcula con la fórmula siguiente:

$$C = \frac{\text{P\$ / ton} \cdot 100\% \text{fert} \cdot 1 \text{ton}}{\% \text{nut} \cdot 1000 \text{k}}$$

Ejemplo 15. Se quiere comparar los costos de nitrógeno, utilizando: urea, sulfato de amonio, nitrato de amonio, nitrato de potasio y nitrato de calcio. Sustituyendo el costo del fertilizante y el porcentaje del nutriente en la fórmula, se tiene:

$$C = \frac{2780 \cdot 100 \cdot 1}{46 \cdot 1000} = 6.04\$ / \text{kdeN} \quad (\text{urea})$$

$$C = \frac{1400 \cdot 100 \cdot 1}{21 \cdot 1000} = 6.67\$ / \text{kdeN} \quad (\text{sulfato de amonio})$$

$$C = \frac{2300 \cdot 100 \cdot 1}{33.5 \cdot 1000} = 6.86\$ / \text{kdeN} \quad (\text{nitrato de amonio})$$

$$C = \frac{6200 \cdot 100 \cdot 1}{13 \cdot 1000} = 47.69\$ / \text{kdeN} \quad (\text{nitrato de potasio})$$

$$C = \frac{2800 \cdot 100 \cdot 1}{15.5 \cdot 1000} = 18.19\$ / \text{kdeN} \quad (\text{nitrato de calcio})$$

Cuadro No. 11. Resumen de costos de nutriente

| Fertilizante | %N | Costo fert. \$/ton | Costo N \$/k |
|--------------------|------|-----------------------|-----------------|
| Urea | 46.0 | 2,750 | 6.04 |
| Sulfato de Amonio | 21.0 | 1,400 | 6.67 |
| Nitrato de Amonio | 33.5 | 2,300 | 6.86 |
| Nitrato de potasio | 13.0 | 6,000 | 47.69 |
| Nitrato de Calcio | 15.5 | 2,820 | 18.19 |

Al comparar costos de los fertilizantes debe tomarse en cuenta que algunos de ellos proporcionan otros nutrientes. El sulfato de amonio proporciona 24% de azufre, además del nitrógeno; el nitrato de potasio proporciona 44% de potasio y el nitrato de calcio proporciona 21% de calcio, por eso son más caros.

EJEMPLOS DE FERTIRRIEGO

Ejemplo 16. Fertirriego con tuberías con compuertas

Se requiere preparar el programa de fertirriego para un lote de 3.84 hectáreas, con cultivo de trigo. Se aplican 4 riegos con láminas de 10 cm.

Longitud de surcos 320 m

Espaciamiento entre surcos 0.75 m

Gasto parcelario 80 lps

Gasto por surco 1 lps

Dosis de nitrógeno por hectárea 200 kg

- Cantidad de nitrógeno por riego

$$C_n = 200/4 = 50 \text{ k}$$

- Cantidad de fertilizante por hectárea

Se usará sulfato de amonio

$$C_{S \text{ de } A} = (50 \times 100)/20.5 = 244 \text{ k/ha}$$

- Volumen de agua necesario

Solubilidad del sulfato de amonio 0.71 k/l

$$V_a = (244 \times 1)/0.71 = 344 \text{ l}$$

- Volumen total por puesta de riego

Se determina la superficie de la tendida de riego.

$$N_{\text{surcos}} = Q_{\text{parcelario}}/Q_{\text{surco}} = 80/1 = 80 \text{ surcos}$$

$$S = (80 \times 0.75 \times 320)/10,000 = 1.92 \text{ ha}$$

$$V_t = 344 \times 1.92 = 660 \text{ l}$$

Gasto de inyección

Se determina el tiempo de riego:

$$TR = (320 \times 0.75 \times 0.10)/(1 \times 3,600) = 6.66 \text{ h}$$

Se considera un tanque que reciba el volumen del fertilizante, considerando 1 kilo como 1 litro y el volumen del agua, por lo que:

$$V = 660 + 468 = 1,128 \text{ l}$$

Ejemplo 17. Fertirriego con riego por goteo

Se requiere preparar el programa de fertirriego para un lote de 22.36 hectáreas, que riega 5 secciones de 4.472 ha, con gasto de $Q = 26$ lps. La dosis de fertilización para el cultivo del melón es: 200-60-100 de N, P_2O_5 y K_2O respectivamente y 13 Kg de magnesio.

Para el cultivo de melón usando híbrido de ciclo corto y con fertilización preventiva del consumo de N por microorganismos de 50 Kg de sulfato de amonio. El fertirriego se aplica en forma semanal y durante 6 semanas.

Los 50 Kg de N del sulfato de amonio no se toman en cuenta para el programa de fertirriego, debido a que los consumirán los microorganismos del suelo.

Como en este caso no hay información de la demanda de nutrimentos por etapas de desarrollo y se tiene que se aplican riegos diarios, se decide hacer fertilizaciones semanales, con un fertilizante cada día.

El suelo tiene $pH = 6.0$ y tiene contenidos bajos de calcio y magnesio, por lo que se requiere aplicar nitratos de calcio y magnesio.

El plan de fertirriego requiere de aplicación de fósforo, que puede ser inyectado como fosfato monoamónico. También requiere de potasio que puede ser aplicado como nitrato de potasio. Por último se requiere la aplicación de nitrato de calcio para cubrir las necesidades de calcio y se deben considerar las aportaciones de nitrógeno para calcular el faltante y cubrirlo con sulfato de amonio.

- Fósforo

Cantidad de fósforo:

$$C_{p/semana} = 60 \text{ Kg/ha}/6 = 10 \text{ Kg de } P_2O_5 /semana$$

Cantidad de fertilizante/ha (MAP)

$$C_{\text{fert/ha}} = 10 \text{ \%/ha} \times 100/61 = 16.4 \text{ Kg de MAP/ha}$$

Volumen de agua para dilución.

$$V_a = 16.4 \text{ Kg/ha} / 0.25 \text{ Kg/l} = 65.6 \text{ l/ha}$$

Volumen por puesta de riego para MAP.

$$V_i = 65.6 \text{ (l/ha)} \times 4.472 \text{ (ha)} = 293.4 \text{ l de agua.}$$

Tiempo de inyección. Considerando LR = 0.6 cm

$$Q = 26 \text{ lps} \quad IR = 1 \quad \text{y} \quad E_t = 0.9$$

$$TR = (27.8 \times 4.472 \times 0.6) / (26 \times 1 \times 0.9) = 3.19 \text{ h} = 3 \text{ h } 11 \text{ min.}$$

Si se considera que el sistema debe lavarse durante los 30 minutos finales, se tiene que el tiempo de inyección $T_i = 2 \text{ h } 40 \text{ min.}$

$$Q_i = 293.4 \text{ l} / 2.66 \text{ h} = 110.3 \text{ l/h} = 1,838 \text{ cm}^3/\text{min.}$$

- Potasio

Cantidad de potasio

$$C_{\text{Kg2O/semana}} = 100 \text{ (Kg/ha)} / 6 = 16.7 \text{ Kg/semana}$$

Cantidad de nitrato de potasio

$$C_{\text{fert/ha}} = (16.7 \times 100) / 44 = 38 \text{ Kg/ha}$$

Volumen de agua para dilución.

$$V_a = 38 \text{ (Kg/ha)} / 0.13 \text{ (k/l)} = 292 \text{ l/ha}$$

Volumen por puesta de riego para potasio

$$V_i = 292 \times 4.472 = 1,305 \text{ l de agua}$$

Gasto de inyección

$$Q_i = 1,305 \text{ l} / 2.66 \text{ h} = 490.9 \text{ l/h} = 8,182 \text{ cm}^3/\text{min}$$

- Calcio

Se requiere aplicar 42 Kg de calcio por hectárea.

Cantidad de calcio

$$C_{ca/semana} = 42 \text{ (Kg/ha)}/6 = 7 \text{ Kg de Ca/semana}$$

Cantidad de fertilizante/ha

$$C_{N \text{ de Ca/ha}} = 7 \text{ (Kg/ha)} \times 100/21 = 33.3 \text{ de N de Kg/ha}$$

Volumen de agua para dilución:

$$V_a = 33.3 \text{ (Kg/ha)}/1.02 \text{ (Kg/l)} = 32.7 \text{ l/ha}$$

Volumen por puesta de riego

$$V_t = 32.7 \times 4.472 = 146.1 \text{ l}$$

Gasto de inyección

$$Q_i = 146.1 \text{ (l)}/2.66 \text{ (h)} = 54.9 \text{ l/h} = 915.7 \text{ cm}^3/\text{min.}$$

- Nitrógeno

Se consideran las aportaciones de nitrógeno al aplicar fosfato monoamónico, nitrato de potasio y nitrato de calcio y luego se calcula el faltante con sulfato de amonio.

Se aplican 16.4 Kg de fosfato monoamónico (MAP) y como tiene 12% de nitrógeno, se tiene que:

$$C_{N1} = 16.4 \times 12/100 = 1.97 \text{ Kg de nitrógeno}$$

Se aplican 38 k de nitrato de potasio, los cuales tienen 13% de nitrógeno, por lo que:

$$C_{N2} = 38 \times 13/100 = 4.94 \text{ Kg de nitrógeno.}$$

Se aplican 33.3 k de nitrato de calcio, los cuales tienen 15.5% de nitrógeno, por lo que:

$$C_{N3} = 33.3 \times 15.5/100 = 5.16 \text{ Kg de nitrógeno}$$

Aplicando un fertilizante por día, se aplicarían 12.07 Kg de nitrógeno al aplicar esos tres fertilizantes.

Cantidad de nitrógeno por semana

$$C_N = 200 \text{ (Kg/ha)}/6 = 33.33 \text{ Kg/semana.}$$

La cantidad de N faltante será:

$$C_{NF} = 33.33 - 12.07 = 21.26 \text{ Kg/semana}$$

Cantidad de sulfato de amonio:

$$C_{\text{fert/ha}} = 21.66 \times 100/21 = 100 \text{ Kg/ha}$$

Volumen de agua para dilución:

$$V_a = 100 \text{ (Kg/ha)}/0.706 \text{ (Kg/l)} = 141.6 \text{ l/ha}$$

Volumen de agua por puesta de riego:

$$V_i = 141.6 \times 4.472 = 633 \text{ l}$$

Gasto de inyección:

$$Q_i = 633 \text{ (l)}/2.66 \text{ (h)} = 238 \text{ l/h} = 3,966.1 \text{ cm}^3/\text{min.}$$

- Magnesio

Cantidad de magnesio

$$C_{Mg} = 13 \text{ (Kg/ha)}/6 \text{ semanas} = 2.16 \text{ Kg/semana}$$

Cantidad de sulfato de magnesio:

$$C_{\text{fer/ha}} = 2.16 \times 100/9.8 = 22.1 \text{ Kg de fert/ha}$$

Volumen de agua para dilución:

$$V_a = 22.1 \text{ Kg/ha}/0.85 \text{ Kg/l} = 26 \text{ l/ha}$$

Volumen total:

$$V_t = 26 \times 4.472 = 116.3 \text{ l}$$

Gasto de inyección:

$$Q_i = 116.3/2.66 = 43.7 \text{ l/h} = 728.8 \text{ cm}^2/\text{min.}$$

El programa de aplicaciones queda integrado inyectando un fertilizante cada día durante 2.66 horas, con diferentes gastos de inyección cada día y se presenta en el cuadro siguiente:

Cuadro 12. Gastos de inyección por fertilizante

| Fertilizante | Kg/ha | Kg/puesta | Vol. de agua l | Q _i /h | Nutriente Kg/ha |
|----------------------------|-------|-----------|----------------|-------------------|-----------------|
| MAP | 16.4 | 74 | 293.4 | 110.3 | 10.0 |
| Nitrato de K | 38.0 | 170 | 1305.0 | 490.9 | 16.7 |
| Nitrato de Ca | 33.3 | 149 | 146.1 | 54.9 | 7.0 |
| Sulfato de NH ₃ | 100.0 | 447 | 633.0 | 238.0 | 21.3 |
| Sulfato de Mg | 22.1 | 99 | 99 | 43.7 | 2.2 |

Si se quiere aplicar un solo gasto de inyección se puede usar el tanque de fertilización a su máxima capacidad, poniendo el fertilizante necesario y agregando agua, hasta 1,500 l, debido a que el volumen total máximo necesario fue 1,305 l para el nitrato de potasio. Así cada solución fertilizadora tendrá la dosis de fertilizante y concentración necesaria.

ANEXO 1

Procedimiento químico para reducir el pH en aguas de riego, adicionando ácido sulfúrico.

El potencial hidrógeno o **pH** de una solución, es un término universal que define las condiciones de acidez o alcalinidad de una solución.

El número entero de pH representa el valor negativo de la potencia a la cual hay que elevar al 10 para obtener la actividad del ion hidrógeno. Entonces, se podría también expresar numéricamente como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno mediante la fórmula:

$$pH = -\log[H^+]$$

Por esta consideración, se toma como base la capacidad de disociación del agua destilada en condiciones ideales de temperatura y presión, la cual disocia $1 \cdot 10^{-14}$ moléculas de H_2O , correspondientes a $1 \cdot 10^{-7}$ para el OH^- y $1 \cdot 10^{-7}$ para el H^+ .

De ahí que el agua con un pH de 7 se considere neutra, las mayores de 7 sean alcalinas y ácidas aquellas soluciones que tengan un pH inferior a 7.

Entonces, si se tiene un agua que tenga un pH de 8.5, el contenido de iones hidrógeno será igual a $10^{-8.5}$ y de los OH^- será igual $10^{-(14-8.5)} = 10^{-5.5}$

Una de las características más importantes de una agua alcalina, corresponde a un gran presencia de aniones de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) y por supuesto los iones oxidrilos OH^- , que en conjunto producen el grado de alcalinidad del agua, dicho de otra manera, la concentración de estos iones está directamente relacionada con el pH alcalino de una solución.

Al proceso de eliminación de este tipo de sales, corresponde a reacciones basadas en la acción mutua entre ácidos y bases, a los cuales se les denomina reacciones de neutralización. En el presente trabajo, se analizará el procedimiento químico para determinar el volumen de ácido sulfúrico que hay que adicionarle a un agua, para eliminarle o neutralizarle cierto grado de alcalinidad, de manera que su pH sea el factor de regulación.

El ácido sulfúrico (H_2SO_4), es el compuesto químico más utilizado para neutralizar bases, y eliminar alcalinidad. De acuerdo con el peso molecular de sus componentes: para el hidrógeno: H = 1, para el azufre: S = 32 y para el oxígeno: O = 16, resulta entonces, que calculando su masa molecular:

| | | |
|--------------------------|---|----------|
| 2 moléculas de hidrogeno | = | 2 g/mol |
| 1 de azufre | = | 32 g/mol |
| 4 de oxígeno | = | 64 g/mol |

La masa total de ácido sulfúrico = 98 g/mol.

Por otra parte, para un volumen dado de ácido sulfúrico, la concentración de ácido puro a un 98% viene siendo de 1,850.17 g/l.

La molaridad de una solución se define como la relación que existe entre el número de moles del elemento por unidad de masa o de volumen; entonces la molaridad del H_2SO_4 en un litro de solución sería igual.

$$Mol_{H_2SO_4} = \frac{1850.17 \text{ g/l}}{98.9 \text{ g/mol}} = 18 \text{ mol/l}$$

Un cálculo de la molaridad de una mezcla entre soluciones sería por ejemplo, si tuviéramos un volumen de agua = 1000 l y 10 l de ácido sulfúrico, la molaridad sería ahora igual a:

$$Mol_{mezcla} = \frac{\text{Molaridad en un litro del ácido} * (\text{volumen ácido})}{(\text{volumen ácido} + \text{volumen agua})}$$

$$Mol. \text{ mezcla} = \frac{18 \text{ mol/l} * 10 \text{ l}}{(1000 + 10) \text{ l}} = 0.1782 \text{ mol/l}$$

La molaridad de mezcla de agua + ácido, en análisis de agua de riego, se da en términos de equivalentes o miliequivalentes por litro, este término se obtiene al multiplicar el número de moles/l por la valencia de elemento químico que se trate; por ejemplo, para un litro de ácido sulfúrico (Mol = 18 mol/l), según la fórmula química, existen 2 hidrógenos por 1 mol. de ácido, entonces:

$$\text{Molaridad} = 2 \times 18 = 36 \text{ eq/l} = 36,000 \text{ meq/l}$$

Entonces, el ácido sulfúrico al 98%, tiene una concentración de:

$$36,000 \text{ meq/l} \text{ ó } 36 \text{ eq/l}$$

1.- Reducción del pH a valores neutros o de 7.

Con base en los resultados anteriores podemos calcular el siguiente ejemplo:

Si tenemos un volumen de agua igual a 2500 l. con un pH inicial de 8.5, donde el análisis químico nos dice que se tienen las siguientes concentraciones de aniones:

$$\text{Carbonatos } CO_3^{+2} = 0.0667 \text{ meq/l}$$

$$\text{Bicarbonatos } HCO_3^{-1} = 0.328 \text{ meq/l}$$

y se desea neutralizar el agua hasta llevar su pH a un valor de 7.

La alcalinidad del agua se define como el contenido total de aniones en una solución, los aniones como se especificó en el cuadro anterior lo constituyen en este caso en particular, los carbonatos, bicarbonatos y los OH del agua. Para calcular la concentración de iones OH se utiliza la forma.

$$Mol_{OH} = 10^{-(14-PH)} = 10^{-(14-8.5)} = 0.0000316eq / l = 0.00316meq / l$$

Entonces para calcular la alcalinidad total, se suman el contenido de aniones en la solución.

$$\text{Alcalinidad total} = \sum \text{aniones} = 0.0667 + 0.328 + 0.00316$$

$$\text{Alcalinidad total} = 0.398 \text{ meq/l}$$

Un problema de reducción de alcalinidad se refiere a determinar la cantidad o el volumen de H_2SO_4 que neutraliza las bases. Utilizando H_2SO_4 puro a 98°, cuya molaridad o concentración es de 36 eq/l como se cálculo previamente, el volumen de ácido requerido al realizar la mezcla del ácido y el agua será:

$$\text{Vol Acido} = \frac{\text{Alcalinidad total} * \text{Vol. Agua}}{\text{Concentracion de Acido}}$$

$$\text{Vol Acido} = \frac{0.398 \text{ meq} / l \cdot 2500l}{36000 \text{ meq} / l}$$

$$\text{Vol Acido} = 0.0276 \text{ l} = 27.6ml$$

Esto significa que si, a un volumen de agua de 2500 l con un pH de 8.5, se le agregan 27.6 ml de ácido sulfúrico de 98° se elimina la alcalinidad existente, bajando el pH de éstas hasta un valor neutro o de 7.

Considerando la fórmula anterior, para 10 m³ de agua con las mismas condiciones de carbonatos y bicarbonatos, la cantidad de ácido necesaria sería:

$$\text{Vol Acido} = \frac{0.398meq / l \cdot 10000l}{36000meq / l} = .110l$$

2.- Reducción del pH a valores menores de 7.

Otro problema bastante común y de aplicación práctica en sistemas de riego, consiste en determinar la cantidad de ácido que hay que aplicar para llevar el agua desde un pH inicial hasta un pH final, generalmente por abajo de 7 para acidificar el agua.

El procedimiento a seguir es semejante al propuesto anteriormente, primero se debe determinar el total de iones alcalinos o la concentración de CO_3^- , HCO_3^- y OH^- que existen a un pH inicial. Después se debe proponer una alcalinidad final, es decir, hasta que grado se requiere dejar sin carbonatos o bicarbonatos el agua. El grado final de carbonatos y bicarbonatos puede ser considerado tomando como base los valores máximos permisibles propuestos en el presente manual. (Cuadro 4).

Supongamos que se tiene un volumen de agua de 1000 l con un pH inicial de 8.5 y se quiere llevar hasta un pH final (pHf) de 6. Según el análisis químico se determinó que las concentraciones de carbonatos y bicarbonatos era de:

$$\begin{aligned}\text{CO}_3 &= 0.0892 \text{ meq/l} \\ \text{HCO}_3 &= 0.953 \text{ meq/l}\end{aligned}$$

Se desea reducir el total de carbonatos a concentraciones mínimas de 0.000029 meq/l y de .309 meq/l para los bicarbonatos. El procedimiento a seguir es el siguiente:

A) *Cálculo de la alcalinidad inicial*

La alcalinidad inicial será la suma de carbonatos, bicarbonatos y OH^- , los 2 primeros ya son conocidos y los OH^- del agua se calculan con la fórmula:

$$\text{Mol}_{\text{OH}} = 10^{-(14-\text{PH})} = 10^{-(14-8.5)} = 0.0000316 \text{ eq / l}$$

La alcalinidad inicial será igual a la suma total de aniones y será igual a:

$$0.0892 + 0.953 + 0.00316 = \underline{1.0453 \text{ meq/l}}$$

B) *Cálculo de la alcalinidad final.*

Ahora considerando que el agua será llevada a un pH de 6 y se reducirán los carbonatos a los valores dados; la alcalinidad final, será igual a la suma de carbonatos y bicarbonatos más los contenidos de OH^- que para este caso serán iguales a:

$$\text{Mol}_{\text{OH}} = 10^{-(14-\text{PHf})} = 10^{-(14-6)} = 0.00000001 \text{ eq / l}$$

La alcalinidad final será entonces

$$\text{CO}_3^- \quad \text{HCO}_3^- \quad \text{OH}^- \\ 0.000029 + 0.309 + .000001 = \underline{0.309 \text{ meq/l}}$$

C) *Cálculo del cambio de alcalinidad.*

Entonces el cambio en la alcalinidad total será igual

$$\text{Alcalinidad inicial} - \text{Alcalinidad final} = \text{Cambio}$$

$$1.0453 \text{ meq/l} - 0.309 \text{ meq/l} = \underline{0.736 \text{ meq/l}}$$

Esta alcalinidad es la que hay que eliminar con la aplicación de ácido.

D) *Cambios en el ion hidrógeno.*

Sin embargo, en los cambios de pH del agua, también hay que considerar los cambios en el ion hidrógeno. La concentración de iones hidrógeno se calculan de la siguiente forma:

$$\text{Concentración inicial de ion hidrógeno} = 10^{-(\text{pH})}$$

$$\text{Concentración final del ion hidrógeno} = 10^{-(\text{pHf})}$$

Entonces:

$$\text{Concentración inicial} = 10^{-\text{PH}} = 10^{-8.5} = 3.1622 \text{ E} - 9$$

$$\text{Concentración final} = 10^{-\text{PHf}} = 10^{-6} = 0.000001$$

El cambio total en el ion hidrógeno será igual a la resta entre la concentración final y la inicial:

$$.000001 - 3.1622\text{E-}9 = \underline{9.9683\text{E-}07}$$

E) *Determinación del grado de alcalinidad total.*

El cambio de alcalinidad calculado anteriormente, al afectarlo por el cambio en el ion hidrógeno, será igual ahora a la suma entre los cambios de concentraciones:

$$0.736323 \text{ meq/l} + 9.968\text{E-}04 \text{ meq/l} = \underline{0.73732 \text{ meq/l}}$$

F) *Determinación del volumen de ácido.*

Si se utiliza un ácido sulfúrico al 98% la concentración del ácido es de 36,000 meq/l y el volumen de ácido requerido será igual a:

$$Vol\ ácido = \frac{[Cambio\ de\ alcalinidad + cambio\ de\ ion\ hidrogenado] * Volumen\ de\ Agua}{Concentracion\ del\ ácido}$$

$$Vol\ ácido = \frac{0.73732\ meq / l \cdot 1000\ l}{36000\ meq / l} = 0.0204\ l.\ de\ H_2SO_4$$

Se necesitan 20.4 ml de H₂SO₄ por cada 1000 l de agua para reducir un pH desde 9 hasta 6, en esta agua de riego.

Ejemplo 18. El exceso de bicarbonatos en regiones vitivinícolas es perjudicial, sobretodo cuando se considera utilizar riego por aspersión, ya que puede dañar la calidad del fruto. Del análisis de aguas de riego en Pesqueira, Hermosillo, Sonora, se calcularon los volúmenes de ácido necesario de H₂SO₄, para eliminar el 50% de bicarbonatos de las aguas de riego en la zona, considerando un volumen de 1000 m³.

Para el presente ejercicio se consideraron las siguientes aguas:

| Pozo | pH | C.E | Ca | Mg | Na | SO ₄ | Cl | HCO ₃ | RASaj | %Na |
|--------------|------|----------|-------|-------|-------|-----------------|-------|------------------|-------|-----|
| | | µmhos/cm | meq/l | meq/l | meq/l | meq/l | Meq/l | meq/l | | % |
| Río Blanco 1 | 7.52 | 457 | 0.26 | 0.08 | 3.90 | 0.79 | 0.74 | 3.25 | 7.57 | 91 |
| Cuesta 4 | 6.46 | 533 | 2.66 | 2.30 | 1.5 | 0.94 | 1.3 | 3.58 | 1.71 | 23 |
| Tracalita 2 | 7.09 | 364 | 0.38 | 0.06 | 3.00 | 0.34 | 0.47 | 3.20 | 6.40 | 89 |
| San Fco 6 | 6.81 | 2391 | 9.58 | 3.4 | 10.9 | 4.8 | 10.83 | 7.62 | 11.12 | 45 |

Como se puede apreciar en las aguas de riego de la zona, existe una gran cantidad de bicarbonatos, que sobrepasan el límite permisible de 1.5 meq/l. En términos generales como se observa en el cuadro, el pH no es un problema fuerte y está dentro de los rangos normales, por tal motivo con fines demostrativos, el procedimiento de cálculo se realizará sólo con la eliminación del 50% de bicarbonatos en las aguas de riego, ya que no presentan carbonatos en su composición.

Según la metodología anterior para el pozo Río Blanco 1, la alcalinidad inicial será igual a la suma de bicarbonatos y OH, los primeros son ya conocidos (3.25 meq/l) y los OH del agua se calculan con la fórmula:

$$Mol_{OH} = 10^{-(14-PH)} = 10^{-(14-7.52)} = 0.00000036116\ eq / l = 0.000361\ meq / l$$

La alcalinidad inicial será igual a la suma total de aniones y será igual a:

$$3.25 + 0.0003611 = \underline{3.25033 \text{ meq/l}}$$

B) *Cálculo de la alcalinidad final.*

Ahora considerando que el agua será llevada a un pH de 6 y se reducirán los bicarbonatos a un 50% de los valores dados; la alcalinidad final, será igual a la suma de bicarbonatos más los contenidos de OH⁻ que para este caso serán iguales a:

$$Mol_{OH} = 10^{-(14-PHf)} = 10^{-(14-6)} = 0.0000001 \text{ eq / l}$$

La alcalinidad final será entonces

$$50\% \text{ HCO}_3^- \quad \text{OH}^- \\ 1.625 + .000001 = \underline{1.625001 \text{ meq/l}}$$

C) *Cálculo del cambio de alcalinidad.*

Entonces el cambio en la alcalinidad total será igual

$$\text{Alcalinidad inicial} - \text{Alcalinidad final} = \text{Cambio}$$

$$3.25033 \text{ meq/l} - 1.625001 \text{ meq/l} = \underline{1.625329 \text{ meq/l}}$$

Esta alcalinidad es la que hay que eliminar con la aplicación de ácido.

D) *Cambios en el ion hidrógeno.*

La concentración de iones hidrógeno se calculan de la siguiente forma:

$$\text{Concentración inicial de ion hidrógeno} = 10^{(-pH)}$$

$$\text{Concentración final del ion hidrógeno} = 10^{(-pHf)}$$

Entonces:

$$\text{Concentración inicial} = 10^{-PH} = 10^{-7.5} = 3.1622 \text{ E} - 8$$

$$\text{Concentración final} = 10^{-PHf} = 10^{-6} = 0.000001$$

El cambio total en el ion hidrógeno será igual a la resta entre la concentración final y la inicial:

$$.000001 - 3.1622\text{E}-8 = \underline{9.9683\text{E}-06}$$

Este valor incluso, se puede suprimir del cálculo, ya que es bastante pequeño.

E) *Determinación del grado de alcalinidad total.*

El cambio de alcalinidad calculado anteriormente, al afectarlo por el cambio en el ion hidrogenado, será igual ahora a la suma entre los cambios de concentraciones:

$$1.625329 \text{ meq/l} + 9.968\text{E-}06 \text{ meq/l} = \underline{1.625329 \text{ meq/l}}$$

F) *Determinación del volumen de Ácido.*

Entonces si se utiliza un ácido sulfúrico al 98% la concentración del ácido es de 36,000 meq/l y el volumen de ácido requerido será igual a:

$$\text{Vol ácido} = \frac{[\text{Cambio de alcalinidad} + \text{cambio de ion hidrogenado}] * \text{VolumendeAgua}}{\text{Concentracion del acido}}$$

$$\text{Vol ácido} = \frac{1.625329 \text{ meq} / \text{l} \cdot 1,000,000 \text{ l}}{36000 \text{ meq} / \text{l}} = 45.148 \text{ l. de H}_2\text{SO}_4$$

Se necesitan **45.148 l de H₂SO₄ por cada 1000 m³ de agua de riego**, para reducir un pH desde 7.52 hasta 6, y eliminar el 50% de los bicarbonatos existentes.

Procediendo de manera semejante para los demás pozos se encontraron los siguientes valores:

| Pozo | pH | HCO ₃ | Vol. H2SO4 Calculado | Vol. H2SO4 revisado (Zamudio, 1997) |
|--------------|------|------------------|-------------------------|--|
| | | meq/l | l | |
| Río Blanco 1 | 7.52 | 3.25 | 45.148 | 46.6 |
| Cuesta 4 | 6.46 | 3.58 | 49.65 | 51.3 |
| Tracalita 2 | 7.09 | 3.20 | 44.38 | 45.8 |
| San Fco 6 | 6.81 | 7.62 | 105.69 | 109.2 |

Estos valores de volúmenes de ácido fueron calculados por Zamudio, *et al*, (1997), y recomiendan valores muy aproximados (columna 5, del cuadro anterior). Como se puede observar la metodología propuesta, está basada en principios químicos y su aplicación práctica es bastante eficiente en campo.

Cálculo del gasto de inyección del ácido. Siguiendo con el ejemplo anterior, los 45.148 l de ácido calculado, al relacionarlos con los 1,000 m³ ó 1,000,000 l, la proporción de la mezcla será igual a:

$$\text{Pr op.} = \frac{45.138\text{l}}{1000000\text{l}} = 0.000045138$$

Esta relación entre el ácido y el agua es la que debe existir en la mezcla del agua de riego. Si se considera que existirá un volumen de agua aplicado en la unidad de tiempo, que para el presente caso, (pozo de bombeo) podría ser del orden de 40 l/s, entonces, el gasto de inyección (Q_{iny}) será igual a:

$$Q_{iny} = 0.000045138 * 40 \text{ l / s} = .00180552 \text{ l / s}$$

al convertirlos a litros por minuto y por hora:

$$Q_{iny} = .00180552 \text{ l / s} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = .18033 \text{ l / min}$$

$$Q_{iny} = .18033 \frac{\text{l}}{\text{min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 6.49 \text{ l / h}$$

Entonces para un gasto de 40 l/s del pozo de bombeo, es necesario aplicar 6.49 l/h de ácido. La aplicación de ácido sulfúrico concentrado es bastante peligroso en su utilización, por lo que se recomienda, que el gasto calculado con anterioridad sea diluído en agua para reducir riesgos en su uso.

BIBLIOGRAFIA

- Burt Charles, 1995. Fertigation Chemicals. Memorias del 2do Simposium Internacional de Ferti-Irrigación. Queretaro, México.
- Choppin G.R. y Summerlin L.R. 1978. Chemistry. 1ra de. Burdetl Company. Morristown New Jersey. USA.
- De la Peña I. 1979. Salinidad de Suelos Agrícolas. Boletín Técnico 10. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México D. F.
- IMTA. 1997. Manual para Diseño de Zonas de Riego Pequeñas. 1ra Edición. Jiutepec, Morelos, México.
- National Plant Food Institute. 1996. Manual de Fertilizantes. Editorial LIMUSA. Noriega Editores. México. D.F.
- Peña P. E. 1989. Operación, Conservación y Evaluación de Sistemas de Riego por Goteo en el Salvador. 1ª ed. México. D.F.
- Peña P. E. 1994. Funcionamiento Hidráulico de Sistemas de Riego Presurizado. Memorias del III Curso Internacional de Sistemas de Riego. Volumen IV. Chapingo, México.
- Rendón P.L. *et. al* ,1997. La Fertirrigación en Baja Presión y Tuberías con Compuertas. Memorias del 2do Simposium Internacional de Ferti-Irrigación. Queretaro, México.
- Zamudio B. *et al*. 1997. Diagnóstico y Tratamiento Agronómico de Aguas de Riego en Pesqueira, Hermosillo, Sonora. Memorias del VII Congreso Nacional de Irrigación. Vol I. Hermosillo Sonora, México.



IMTA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGIA DEL AGUA

CENTRO DE CONSULTA DEL AGUA

PAPELETA DE DEVOLUCION

El lector se obliga a devolver este libro antes del
vencimiento del préstamo señalado por el último sello

| | | |
|--|--|--|
| | | |
|--|--|--|

Apartado Postal 202 CIVAC, Mor. 62500
Jutepec, Mor

