

Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua para riego

Álvaro García O.*

(Primera parte)

Introducción

La calidad de agua para riego ha sido objeto de innumerables investigaciones orientadas hacia la evaluación y definición de parámetros para calificar sus características físicas y químicas, lo cual ha conducido a la proposición de varios sistemas para su clasificación. Algunos de ellos como el de USDA (1954), aunque usados ampliamente no son completamente satisfactorios, lo que hace que periódicamente se propongan alternativas cada una de las cuales ha constituido una etapa importante dentro del proceso.

Cuando la cantidad de sales que entran en la solución del suelo excede a la cantidad que es removida por el agua de riego en su movimiento a través del perfil del suelo se presentan problemas los cuales pueden variar en clase y magnitud dependiendo de la concentración y el tipo de sales disueltas, ya que los suelos y las plantas reaccionan de manera diferente a diferentes sales.

En la práctica el clima, las condiciones físicas de los suelos, la mineralogía de las arcillas, el tipo de agricultura predominante, el cultivo a sembrar y las características particulares de cada caso son los parámetros que van a determinar en qué forma la acumulación de sales puede restringir la producción de los cultivos. Por estas razones, se considera que los criterios a usar para clasificar el agua de riego no pueden ser rígidos y se deben basar en las condiciones propias de cada caso. Los problemas más comunes resultantes del uso del agua para riego se relacionan con salinidad, alcalinidad, infiltración del agua en el suelo, toxicidad de iones presentes en ella, combinaciones de los anteriores y efectos causados por sólidos en suspensión, metales pesados, corrosividad, etc.

Los parámetros a utilizar para la predicción del efecto potencial del agua, para crear condiciones en el suelo que puedan afectar el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos y que hagan necesario restringir su uso o la adopción de técnicas de manejo especiales para mantener producciones aceptables, están por consiguiente relacionados con las siguientes condiciones:

- El tipo y concentración de las sales solubles las cuales, en el suelo o en el agua, reducen la disponibilidad de ésta para las plantas afectando los rendimientos.

- La concentración relativa de sodio (Na) y, en ocasiones de magnesio (Mg), con respecto a otros cationes. Cuando el contenido de calcio (Ca) es bajo, el Na y Mg reducen la velocidad de infiltración del agua en el suelo al causar dispersión de las partículas finas de arcilla, las cuales ocluyen macro y micro poros trayendo como consecuencia un bajo suministro de agua disponible para las plantas.
- Algunos iones como Na⁺, Mg²⁺, cloro (Cl⁻), sulfato (SO₄⁼), y elementos traza provenientes del agua de riego o presentes en el suelo, se pueden acumular y llegar a concentraciones que afectan los cultivos dependiendo del grado de tolerancia de los mismos a un ión dado.
- Efectos misceláneos: Dentro de este grupo se incluyen combinaciones de los casos anteriores, desbalances nutricionales ocasionados por excesos de determinados iones que traen como consecuencia reducciones en la cantidad y/o en la calidad de las cosechas, corrosión o deposición en equipos de riego y oclusión de tubería enterrada de drenaje, o de sólidos en suspensión que pueden hacer que el agua no sea apta para consumo humano o animal.
- Alcalinidad debida a la presencia de iones como bicarbonatos, calcio, magnesio y sodio.

Las anteriores propiedades pueden inducir desbalances nutricionales y la consecuente reducción en cantidad y calidad de la cosecha, o también ocasionar daños y corrosión en los equipos de riego, bloqueo de tuberías de drenaje y la producción de sólidos en suspensión que pueden volver al agua como no apta para consumo. Para cada uno de los criterios anteriores existen índices cuantitativos y determinaciones analíticas específicas que conducen a la necesidad de implementar diversos sistemas de tratamiento.

La muestra para análisis

Obtención de una muestra representativa

Cuando se muestrean ríos, lagos o canales grandes, las propiedades del agua pueden variar con la profundidad, el flujo, la distancia a la orilla y el tiempo. En estos casos se debe tomar una muestra compuesta desde la superficie hasta el fondo en el medio de la corriente y no de sitios en donde se producen

* Ing. Agr., M.Sc., Ph.D. Chair Person Soil Fertility and Plant Nutrition Commission, International Union of Soil Sciences (IUSS). Correo electrónico: agarciao58@yahoo.es

estancamientos. Cuando se requiere solo una muestra se debe obtener en el medio de la corriente y a media profundidad. Cuando se trata de aguas de pozo las muestras se deben tomar después de que la bomba haya trabajado por algún tiempo.

Los recipientes a usar (plásticos o de vidrio) se deben enjuagar previamente dos o tres veces en el agua a colectar, se llenan hasta el tope y se deben tapar herméticamente. La cantidad mínima que se necesita para análisis químicos ordinarios es de un litro.

Almacenamiento

En caso necesario, las muestras se deben conservar refrigeradas y analizar tan rápidamente como sea posible para reducir al mínimo los cambios químicos que se puedan presentar durante el almacenamiento como resultado de la actividad biológica, pérdida de CO₂ disuelto y reacciones químicas de precipitación y oxidación. Para prevenir la precipitación de CaCO₃, se puede agregar una gota de una solución de hexametáfosfato de sodio (100 mg l⁻¹) por cada 25 ml de la muestra. Si las muestras son muy turbias, se pueden separar por centrifugación o filtración.

Determinaciones analíticas necesarias

En la **Tabla 1** se detallan las determinaciones de laboratorio y los cálculos necesarios para evaluar la calidad de un agua para riego.

Conductividad eléctrica (CEa)

El agua pura es un mal conductor de la electricidad pero cuando tiene sales disueltas puede conducirla en forma proporcional a la cantidad de sales presentes. Este concepto se usa para la medición de su salinidad en términos de conductividad eléctrica la cual se expresa en S m⁻¹.

La mayoría de las aguas para riego tienen conductividades eléctricas (CEa) menores de 0.1 S m⁻¹ aunque las aguas subterráneas generalmente presentan valores mayores, por lo cual el uso de subunidades como el decisiemen y el microsiemen (1 dS m⁻¹ = μS cm⁻¹ x 10⁶) facilita su expresión de una manera más conveniente y práctica en la mayoría de los casos.

Conviene tener presente que antes del establecimiento del Sistema Internacional de Unidades (SI) la unidad, aún en uso por técnicos y muchos laboratorios, era el μmho cm⁻¹ equivalente al μS cm⁻¹.

Tabla 1. Determinaciones de laboratorio necesarias para evaluar la calidad del agua para riego (Adaptado de Ayers y Westcot, 1985).

Parámetro	Símbolo	Unidad	Rango usual
Salinidad			
Conductividad eléctrica	CEa	dS m ⁻¹	0 - 3
Total sólidos disueltos	TSD	mg l ⁻¹	0 - 2000
Cationes y aniones			
Calcio	Ca ⁺⁺	cmol(+) l ⁻¹	0 - 20
Magnesio	Mg ⁺⁺	cmol(+) l ⁻¹	0 - 5
Sodio	Na ⁺	cmol(+) l ⁻¹	0 - 40
Potasio	K ⁺	cmol(+) l ⁻¹	0 - 0.2
Carbonatos	CO ₃ ⁼	cmol(+) l ⁻¹	0 - 0.1
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻	cmol(+) l ⁻¹	0 - 10
Cloruros	Cl ⁻	cmol(+) l ⁻¹	0 - 30
Sulfatos	SO ₄ ⁼	cmol(+) l ⁻¹	0 - 20
Nitratos	NO ₃ ⁻	cmol(+) l ⁻¹	0 - 5
Misceláneos			
Boro	B	mg l ⁻¹	0 - 2
Reacción	pH		6 - 8.5
Relación adsorción de sodio	RAS*	[cmol(+) l ⁻¹] ^{1/2}	0 - 15

* RAS = $Na / [(Ca + Mg) / 2]^{1/2}$

Existen algunas relaciones entre la CE, la concentración de sales y la presión osmótica que son bastante útiles para realizar cálculos y para verificar la calidad del análisis:

- Suma de cationes (cmol l^{-1}) \approx Suma de aniones (cmol l^{-1}) \approx 10 CE (dS m^{-1}).
- Concentración de sales (cmol l^{-1}) \approx 640 CE (dS m^{-1}).
- Potencial osmótico a 25 °C (bar) \approx CE (dS m^{-1}).

Para la determinación, en campo o en laboratorio, es recomendable usar equipos que hagan termo-compensación automática ya que se debe tener presente que la CE aumenta a medida que aumenta la temperatura (aproximadamente 2% por cada °C).

Total de sólidos disueltos (TSD)

Este parámetro se utilizó inicialmente para apreciar la salinidad de las aguas de riego y, hoy todavía se utiliza cuando no se dispone de un conductímetro. Para su determinación se procede a evaporar un volumen conocido de agua completamente. La presencia de agua higroscópica en la mezcla de sales resultante hace que el TSD dependa de las condiciones usadas para el secamiento. La concentración de las sales en la mayoría de las aguas de riego es menor de 100 mg l^{-1} pero las aguas subterráneas pueden tener valores de TSD mayores.

Determinación de cationes y aniones

En las aguas usadas para riego existen en forma predominante los cationes calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+) y los aniones bicarbonato (HCO_3^-), cloruro (Cl^-), sulfato ($\text{SO}_4^{=}$), nitrato (NO_3^-) y carbonato ($\text{CO}_3^{=}$). Para la determinación de los iones mencionados se siguen las mismas metodologías usadas en el extracto de saturación de suelo.

Boro

Microelemento esencial para las plantas requerido en cantidades muy pequeñas (<5 ppm en el suelo), el cual puede ser tóxico para las mismas, en concentraciones muy cercanas a las adecuadas. Aunque los cultivos difieren en la cantidad de boro que requieren y algunas especies presentan cierto grado de tolerancia a los excesos, es necesario manejar con cuidado la aplicación de aguas de riego ricas en este nutrimento dado ya que en exceso causa toxicidad a muchas plantas. Es el caso de algunas zonas en proximidades del volcán Cotopaxi (Ecuador), donde se aprecian toxicidades en cultivos hortícolas regados con aguas con alto contenido de este nutriente.

Por esta razón es recomendable monitorear las aguas en aquellas zonas donde se presume pueden resultar depósitos de minerales ricos en boro. Para el efecto se

siguen las mismas técnicas analíticas utilizadas para su determinación en los extractos de suelos.

Molibdeno

Aunque el contenido de este elemento en las aguas de riego es normalmente muy bajo, en algunas ocasiones se pueden presentar toxicidades en animales que se alimentan con plantas regadas continuamente con aguas que lo contienen. Su determinación se realiza en la misma forma que para plantas después de obtener el digestado. Es necesario filtrar la muestra antes de analizarla.

Elementos traza y metales pesados

Aunque no todos los elementos traza son tóxicos y de hecho algunos son esenciales para el crecimiento de las plantas (Fe, Cu, Mn, Zn), cuando están presentes en cantidades excesivas se presentan diversos efectos como acumulaciones en los tejidos, reducciones en el crecimiento, quemazones y muerte de las plantas.

Historia de los criterios para evaluar el agua de riego

El sistema propuesto por el Laboratorio de Salinidad del USDA en el Manual 60 (Richards, 1954) fue desarrollado para las condiciones promedio de la región árida del Suroeste de los Estados Unidos. Según Plá (1979) la sencillez del sistema y la falta de criterio sobre sus limitaciones por parte de los usuarios, ha conducido a un uso general e indiscriminado en situaciones muy diferentes y con alcances más allá de los previstos cuando fue desarrollado. Ello ha provocado muchos errores en los diagnósticos de problemas de salinización, y en las recomendaciones de prácticas de manejo.

La iniciativa de los investigadores de la Universidad de California Riverside y del Laboratorio de Salinidad del USDA. Ha permitido establecer criterios modernos que progresivamente llevaron a abandonar los planteados en el Manual 60 de Richards (1954). Varios sistemas se propusieron con posterioridad, entre los cuales se pueden mencionar las propuestas de Bernstein (1967), Bower et al. (1968), Rhoades (1968), Bernstein y Francois (1973) y Rhoades (1974) las cuales fueron recogidas por la FAO (1976a, 1976b).

Suárez (1981) propuso variaciones de fondo fundamentado en sus investigaciones sobre los procesos de precipitación de carbonatos que han llevado a construir criterios modernos.

Con base en la tendencia existente hoy en el mundo a definir una forma más cualitativa que cuantitativa las posibilidades de uso de un agua de riego haciendo que los criterios de clasificación se usen en una forma elástica y particular para cada caso, aquí se hace referencia a los criterios propuestos por Ayers y

Westcot en el Manual 29 de la FAO (1985) los cuales resumen la mayoría de los principios en uso por el Laboratorio de Salinidad del USDA (USSLab.) y la Universidad de California Riverside.

Estos también se vienen usando exitosamente para la evaluación de las sustancias comúnmente encontradas en las aguas usadas para el riego de cultivos en varias áreas del mundo, incluyendo aguas superficiales, aguas subterráneas, aguas de drenaje y aguas negras.

Hipótesis sobre las cuales se basan las guías para la evaluación de aguas según la FAO (1985)

En general se asumen las siguientes situaciones:

- Suelos con buen drenaje interno.
- Clima seco donde la lluvia no juega un papel significativo en el suministro de agua a las plantas.
- Métodos de riego y manejo de los mismos mediante aplicación no periódica, sino cuando el cultivo ha utilizado una porción considerable del agua de suelo (50% o más).
- Al menos 15% del agua aplicada debe percolar por debajo de la zona radicular.

A pesar de que las plantas de cultivo tienen diferentes patrones de absorción de agua, se asumen condiciones fisicoquímicas del suelo que permiten un patrón de absorción del 40% en el cuarto superior del sistema radicular, 30% en el segundo, 20% y 10% en los subsiguientes.

Estas hipótesis llevan a la conclusión de que la salinidad en la zona de raíces inferior del suelo es de poca importancia, siempre que se mantenga libre de sales y con buena humedad la zona radical activa.

En la **Tabla 2** se presentan dichos criterios.

Efectos de las sales sobre las plantas

El objetivo primario del riego es proporcionar agua a los cultivos en la cantidad adecuada y en el momento oportuno, para evitar pérdidas en producción debidas a los largos períodos de escasez de agua durante las etapas críticas de crecimiento.

El riego continuado con aguas que tienen sales en solución puede traer como consecuencia la salinización de los suelos, reduciendo la disponibilidad de agua para planta. Las sales incrementan el esfuerzo que la planta debe ejercer para extraer el agua: ésta fuerza adicional es la que se conoce como efecto osmótico o potencial osmótico. Este es el efecto más común de las sales y es independiente de la clase de sales disueltas. El tipo de daño producido se conoce como la presión relacionada con el potencial osmótico y se identifica por una reducción en la producción proporcional al aumento en

la salinidad del suelo por encima de un cierto nivel crítico.

Maas y Hoffman (1977) describen el efecto osmótico en términos de producción relativa (Y) y de CEa mediante la ecuación:

$$Y = 100 - B (CEa - A) \quad (1)$$

Donde:

- Y = Producción relativa en porcentaje.
- CEa = Conductividad eléctrica del extracto en $dS m^{-1}$.
- B = Disminución en el rendimiento por unidad de aumento en la salinidad por encima del nivel crítico.
- A = Valor crítico de la salinidad en $dS m^{-1}$.

La ecuación (1) implica la existencia de unos valores A y B característicos para una especie dada. La **Tabla 3**, resultado de trabajos de evaluación relativa de la tolerancia a las sales, proporciona los dos parámetros esenciales para expresar la tolerancia a las sales para diferentes cultivos, así:

- A. Salinidad máxima permisible sin que ocurra reducción en los rendimientos o nivel crítico.
- B. Porcentaje de disminución en el rendimiento por unidad de aumento en la salinidad más allá del nivel crítico. Esta información se obtuvo analizando todas las referencias sobre salinidad existentes en el período entre 1950 y 1975 lo cual dio origen al establecimiento de la ecuación citada. Usando la ecuación (1) y la información de la **Tabla 3** se puede deducir el efecto probable de la salinidad del suelo sobre un cultivo dado.

Si se acepta como corriente la utilización de un exceso de agua de 15 a 20% (fracción de lavado = 0.15 a 0.20) se puede utilizar la salinidad de riego (CEa) para predecir o estimar la salinidad del suelo CEas, usando las siguientes relaciones.

$$CEas = 3 CEa$$

$$CEe = 1.5 CEa$$

$$CEas = 2 CEe$$

Donde:

- CEas = CE del agua del suelo.
- CEa = CE del agua de riego.
- CEe = CE del extracto de saturación.

Con base en los trabajos de Maas y Hoffman (1977) se han desarrollado tablas de tolerancia y producción potencial para diversos cultivos que son útiles en muchas circunstancias (**Tabla 4**).

Efecto del sodio sobre las propiedades físicas de los suelos

El agua puede causar una reducción severa en la permeabilidad de los suelos cuando su concentración de sales es muy baja ($< 0.5 \text{ dS m}^{-1}$) y, especialmente, cuando es menor de 0.2 dS m^{-1} porque es corrosiva y tiende a lavar la superficie dejándola libre de minerales solubles y sales, especialmente de Ca reduciendo su influencia fuertemente estabilizadora sobre los agregados y sobre la estructura del suelo, facilitando su

dispersión y la oclusión de los poros más finos (Ayers y Westcot, 1985).

Cuando en el agua de riego hay una alta concentración de sodio este elemento aumenta el contenido del mismo en la solución del suelo, y por ende, la saturación de Na intercambiable (PSI). Algunos factores de los cationes involucrados, pueden influenciar el equilibrio mencionado y hacer variar la relación. Generalmente, la acumulación de Na intercambiable en los suelos a niveles superiores al 10% o 20% de la CIC

Tabla 2. Criterios para evaluar la calidad de aguas para riego⁽¹⁾.

Problema potencial	Unidades	----- Grado de restricción en el uso -----		
		Ninguno	Ligero o Moderado	Severo
Salinidad ⁽²⁾				
CEa	dS m ⁻¹	< 0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
TSD	mg l ⁻¹	< 450	450 - 2000	> 2000
Infiltración ⁽³⁾				
RAS = 0 - 3 y CEa		> 0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
= 3 - 6		> 1.2	1.2 - 0.3	< 0.3
= 6 - 12		> 1.9	1.9 - 0.5	< 0.5
= 12 - 20		> 2.9	2.9 - 1.3	< 1.3
= 20 - 40		> 5.0	5.0 - 2.9	< 2.9
Toxicidad de iones específicos				
Sodio (Na⁺) ⁽⁴⁾				
Riego superficial	RAS	< 3.0	3.1 - 9.0	> 9.0
Riego por aspersión	cmol(+) l ⁻¹	< 3.0	> 3.0	
Cloruros (Cl⁻) ⁽⁵⁾				
Riego superficial	cmol(+) l ⁻¹	< 4.0	4.0 - 10	> 10
Riego por aspersión	cmol(+) l ⁻¹	< 3.0	> 3.0	
Boro (B) ⁽⁶⁾	mg l ⁻¹	< 0.7	0.7 - 0.3	> 3.0
Elementos traza (ver tabla 11)				
Nitratos (N-NO ₃ ⁻) ⁽⁷⁾	mg l ⁻¹	< 5	5.0 - 30	> 30
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	mg l ⁻¹	< 1.5	1.5 - 8.5	> 8.5
pH		Rango Normal 6.5 - 8.4		

¹ Adaptación hecha por Ayers y Westcot (1985).

² La salinidad afecta la disponibilidad de agua para las plantas. La CEa se reporta en términos de decisiememes por metro a 25 °C (dS m^{-1}) o en milimhos por centímetro (mmho cm^{-1}). Ambas medidas son equivalentes siendo la primera la unidad adoptada por el Sistema Internacional de Unidades. TSD equivale a total de sólidos en solución y se expresa en mg l^{-1} .

³ Se refiere al efecto del agua de riego sobre las propiedades hídricas de los suelos causando disminución en la velocidad de infiltración del agua. Se evalúa considerando la CEa y la relación de adsorción de sodio simultáneamente. Esto hace referencia al efecto floculante de las sales y al efecto dispersivo del sodio. A un valor de RAS dado, la velocidad de infiltración incrementa a medida que la salinidad del agua aumenta.

⁴ El Na tiene un efecto tóxico sobre muchas especies, además de su capacidad para deteriorar las propiedades físicas de los suelos. La Tabla 8 muestra la tolerancia de cultivos al Na. (Las tablas 5-9 se presenta en la segunda parte del artículo)

⁵ Vease Tabla 7: Tolerancia de los cultivos al Cl⁻

⁶ Vease Tabla 9: Tolerancia de los cultivos al B

⁷ N-NO₃ se refiere al nitrógeno nítrico reportado en términos de N elemental.

Tabla 3. Tolerancia de algunos cultivos a las sales (Maas y Hoffman, 1977).

Cultivo	Nivel crítico dS m ⁻¹ (A)	Disminución (%) en el rendimiento / unidad de aumento en la salinidad mas allá del nivel crítico (B)	Clasificación
Alfalfa	2.0	7.3	MS
Almendro	1.5	19.0	S
Aguacate	-	-	S
Albaricoque	1.6	24	S
Algodón	7.7	5.2	T
Arroz	3.0	12	MS
Brócoli	2.8	9.2	MS
Uva	1.5	9.6	MS
Zanahoria	1.0	14	S
Cebada (Grano)	8.0	5.0	T
Caupí	1.3	14	MS
Cebolla	1.2	16	S
Ciruela	1.5	18	S
Dátil	4.0	3.6	T
Espinaca	2.0	7.6	MS
Trigo	6	7.1	MT
Fresa	1.0	33	S
Frijól	1.0	19	S
Limón	-	-	S
Lechuga	1.3	13	MS
Soya	5.0	20	MT
Maní	3.2	29	MS
Maíz Dulce	1.7	12	MS
Naranja	1.7	16	S
Toronja	1.8	16	S
Tomate	2.5	9.9	MS
Pimienta	-	14	MS
Papa	1.7	12	MS
Pasto Bermuda	6.9	6.9	T
Ryegrass perenne	5.6	7.6	MT
Pasto Rhoades	-	-	MS
Pasto Sudán	2.8	4.3	MT
Rábano	1.2	13	MS
Repollo	1.8	9.7	MS
Remolacha	4.0	9.0	MT

S = Susceptible, MS = Medianamente susceptible, MT = Medianamente tolerante, T = Tolerante

trae como consecuencia el deterioro de la estructura del suelo, puesto que a esas saturaciones se presentan los fenómenos de dispersión y expansión los cuales están interrelacionados e influenciados por la sodicidad y las características electrolíticas del agua del suelo. Ambos fenómenos ejercen una marcada influencia sobre la conductividad hidráulica del suelo.

La dispersión promueve el movimiento de partículas al interior de los poros y la disminución del diámetro efectivo de los poros reduciendo la conductividad hidráulica. También puede ocurrir la oclusión total. Este fenómeno se puede presentar a valores de PSI relativamente bajos (entre 10 y 20%).

La expansión de las arcillas también reduce el diámetro de los poros y, por ende, la conductividad hidráulica (CH). Este fenómeno ocurre, generalmente, a valores de PSI mayores de 25%. La dispersión causada por el PSI a valores más bajos que los necesarios para la expansión se atribuye al efecto de la composición de cationes intercambiables sobre la integridad estructural de las partículas de arcilla.

Las partículas motmorilliniticas saturadas con Ca consisten de paquetes de 4 a 6 laminillas agrupadas con un espesor de 9 Å. Estos paquetes reciben el nombre de tactoides. La superficie efectiva del tactoide se limita a las caras superior e inferior y a los bordes. La expansión es restringida debido a que las laminas individuales son mantenidas fuertemente unidas por el Ca^{2+} presente en las posiciones interlaminares del tactoide. A medida que el PSI excede de 15 y se aproxima a 20 se crean fuerzas repulsivas entre tactoides debido a la formación de dobles capas difusas más fuertes, las cuales envuelven el tactoide. De esta manera se favorece la dispersión pero el tactoide permanece intacto hasta que el PSI supera el 25%. Este nivel de saturación de Na es lo suficientemente alto como para saturar todas las superficies exteriores y para promover la entrada del Na^+ al interior desplazando el Ca^{2+} , cuando esto sucede se desarrollan dobles capas difusas en las interláminas creando las correspondientes fuerzas repulsivas entre cargas de igual signo(+) lo cual causa la ruptura del tactoide en unidades pequeñas. La ruptura total se alcanza a valores de PSI cercanos a 50.

Ambos fenómenos son responsables de reducción en el tamaño de los poros y en el bloqueo de los mismos en suelos con materiales arcillosos y expansibles, pero solamente la dispersión lo es en suelos ricos en minerales no expandibles. La conductividad hidráulica depende del tipo y contenido de arcilla, de la presencia de agentes cementantes especialmente Fe_2O_3 , de la textura, de la conductividad eléctrica y de la RAS.

Por las razones mencionadas los suelos sódicos tienden

a dispersarse y, cuando se humedecen, se tornan pegajosos y difíciles de laborar. Cuando se secan se forman costras duras y la penetración del agua se restringe fuertemente. A causa de su carácter disperso frecuentemente son salinos debido a su mal drenaje.

Puesto que las sales tienen un efecto floculante o agregante su remoción por lavado causa el taponamiento de poros y microporos, por lo cual las técnicas de recuperación generalmente contemplan la construcción de drenajes y la adición de yeso como enmienda: el yeso proporciona Ca^{2+} para el desplazamiento de Na^+ del complejo de cambio y como es un electrolito mantiene la floculación del suelo.

Estimación del efecto del sodio (Uso de las RAS)

Para la predicción de un problema potencial ocasionado por el sodio, se han usado una serie de criterios en el pasado, tales como el carbonato de sodio residual (CSR) y el porcentaje de sodio posible (PSP) (Eaton, 1954; USDA, 1954) propuso el uso de la relación de adsorción de sodio (RAS) cuya ecuación se presenta a continuación:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (2)$$

Donde:

Na, Ca y Mg se expresan en $\text{cmol}_{(+)} \text{l}^{-1}$.

Esta relación da idea del peligro potencial debido a un exceso de Na sobre el Ca y el Mg. Las investigaciones realizadas por el Laboratorio de Salinidad del USDA, a nivel de campo e invernadero, sobre el equilibrio entre aguas altas en sodio y el PSI han demostrado que la RAS es un índice efectivo del peligro potencial de un agua en equilibrio con el suelo.

La relación RAS-PSI se estableció inicialmente para 59 suelos del Oeste de los Estados Unidos (USDA, 1954). En suelos de la India, Agarwal y Yadav (1956) encontraron que solo el 50% de las muestras analizadas presentaron una buena correlación entre los dos parámetros. García y Castillo (1991) obtuvieron resultados similares (49.7%) en suelos del Valle del Cauca (Colombia) mientras que Groennewegen (1961) encontró que en suelos de Australia hay buena correlación cuando estos tienen valores de pH superiores a 6.5. Para suelos de Israel, Levy y Mor (1965) encontraron que la relación funciona bien.

Esta variabilidad en resultados se puede deber a diferencias en la cantidad y tipo de arcillas y también, puede ser debida al tipo de aniones acompañantes y a la solubilidad de compuestos presentes en los suelos, sin que se puedan descartar efectos del clima.

Tabla 4. Producción relativa de algunos cultivos bajo influencia de salinidad en el agua riego (CEa) o en el suelo (CEe).

	100%		90%		75%		50%		0%	
	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe	CEa
Cebada	8.0	5.3	10	6.7	13	8.7	18	12	28	19
Algodón	7.7	5.1	9.6	6.4	13	8.4	17	12	27	18
Remolacha Azucarera	7.0	4.7	8.7	5.8	11	7.5	15	10	24	16
Sorgo	6.8	4.5	7.4	5.0	8.4	5.6	9.9	6.7	13	8.7
Trigo	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.3	13	8.7	20	13
Soya	5.0	3.3	5.5	3.7	6.3	4.2	7.5	5.0	10	6.7
Caupí	4.9	3.3	5.7	3.8	7.0	4.7	9.1	6.0	13	8.8
Maní	3.2	2.1	3.5	2.4	4.1	2.7	4.9	3.3	6.6	4.4
Arroz	3.0	2.0	3.8	2.6	5.1	3.4	7.2	4.8	11	7.6
Caña de Azúcar	1.7	1.1	3.4	2.3	5.9	4.0	10	6.8	19	12
Maíz	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Frijol	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	6.3	4.2
Zuchino	4.7	3.1	5.8	3.8	7.4	4.9	10	6.7	15	10
Remolacha	4.0	2.7	5.1	3.4	6.8	4.5	9.6	6.4	15	10
Calabaza	3.2	2.1	3.8	2.6	4.8	3.3	6.3	4.2	9.4	6.3
Brócoli	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14	9.1
Tomate	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13	8.4
Pepino	2.5	1.7	3.3	2.2	4.4	2.9	6.3	4.2	10	6.8
Espinaca	2.0	1.3	3.3	2.2	5.3	2.5	8.6	5.7	15	10
Apio	1.8	1.2	3.4	2.3	5.8	3.9	9.9	6.6	18	12
Papa	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	5.7
Repollo	1.8	1.2	2.8	1.9	4.4	2.9	7.0	4.6	12	8.1
Maíz Dulce	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10	6.7
Batata	1.5	1.0	2.4	1.6	3.8	2.5	6.0	4.0	11	7.1
Pimienta	1.5	1.0	2.2	1.5	3.3	2.2	5.1	3.4	8.6	5.8
Lechuga	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.1	3.4	9.0	6.0
Rabano	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	8.9	5.9
Cebolla	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	7.4	5.0
Zanahoria	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.0	8.1	5.4
Nabo	0.9	0.6	2.0	1.3	3.7	2.5	6.5	4.3	12	8.0
Agropiron	7.5	5.0	9.9	6.6	13	9.0	19	13	31	21
Pasto Bermuda	6.9	4.6	8.5	5.6	11	7.2	15	9.8	23	15
Cebada Forrajera	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.4	13	8.7	20	13
Ryegrass	5.6	3.7	6.9	4.6	8.9	5.9	12	8.1	19	13

Tabla 4. Continuación...

	100%		90%		75%		50%		0%	
	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe	CEa	CEe	CEa
Festuca Alta	3.9	2.6	5.5	3.6	7.8	5.2	12	7.8	20	13
Pasto Sudán	2.8	1.9	5.1	3.4	8.6	5.7	14	9.6	26	17
Caupí Forrajero	2.5	1.7	3.4	2.3	4.8	3.2	7.1	4.8	12	7.8
Alfalfa	2.0	1.3	3.4	2.2	5.4	3.6	8.8	5.9	16	10
Maíz Forrajero	1.8	1.2	3.2	2.1	5.2	3.5	8.6	5.7	15	10
Trébol Alexandrino	1.5	1.0	3.2	2.2	5.9	3.9	10	6.8	19	13
Trébol Rojo	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Trébol Ladino	1.5	1.0	2.3	1.6	3.6	2.4	5.7	3.8	9.8	6.6
Dátil	4.0	2.7	6.8	4.5	11	7.3	18	12	32	21
Toronja	1.8	1.2	2.4	1.6	3.4	2.2	4.9	3.3	8.0	5.4
Durazno	1.7	1.1	2.2	1.5	2.9	1.9	4.1	2.7	6.5	4.3
Albaricoque	1.6	1.1	2.0	1.3	2.6	1.8	3.7	2.5	5.8	3.8
Vid	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12	7.9
Almendra	1.5	1.0	2.0	1.4	2.8	1.9	4.1	2.8	6.8	4.5
Ciruelo	1.5	1.0	2.1	1.4	2.9	1.9	4.3	2.9	7.1	4.7
Fresa	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4.0	2.7
Naranja	1.7	1.1	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8.0	5.3

Adaptado de Mass y Hoffman (1977) y Mass (1984)

CEe = Salinidad promedio de la zona radicular determinada como CE del extracto de saturación en decisiemens por metro ($dS\ m^{-1}$) o en milimhos por cm ($mmho\ cm^{-1}$) a 25°

CEa = Salinidad del agua de riego expresada en $dS\ l^{-1}$.

La composición del agua de riego, el manejo del riego y el drenaje (fracción del lavado) y las características del suelo son los tres factores principales que afectan la RAS. Esta relación cuando se expresa según la fórmula usada en el Manual 60 de USDA (1954), no considera los cambios que suceden en la solución del suelo debido a la solubilidad del Ca presente, como resultado de los procesos de dilución o precipitación que tienen lugar rápidamente después de un riego. La precipitación ocurre cuando hay presencia de cantidades suficientes de calcio y de carbonatos, bicarbonatos o sulfatos los cuales, al combinarse y formar carbonato de Ca o yeso, exceden su producto de solubilidad.

La dilución de minerales se ve favorecida por la presencia de CO_2 disuelto en el agua y por remoción de los iones por las plantas o por procesos de lavado. Poco después del riego pueden ocurrir procesos de dilución o precipitación que cambian la concentración de calcio y hacen que se establezca una nueva situación de equilibrio diferente de aquella presente en el agua de riego (Ayers y Wetscot, 1985), mientras tanto, el Na

soluble permanece en equilibrio con el Na intercambiable.

La ecuación (2) usada en el Manual 60 de USDA (1954) no toma en cuenta esos cambios, por lo que se pueden presentar errores en la predicción, razón por la cual esta fórmula y el nomograma para calificación del agua para riego ($C_x S_x$) cayeron en desuso.

Bower y Maasland (1963), propusieron el uso de la RAS ajustada la cual toma en cuenta los procesos de precipitación y dilución mediante la inclusión del índice de saturación de Langelier (1936), el cual considera simplemente que al alcanzar el punto de saturación en presencia de bicarbonatos el calcio se precipitará como $CaCO_3$. Este índice fue diseñado para uso en tuberías que conducen agua caliente y se define como la diferencia entre el pH actual del agua (pHa) y un pH calculado (pHc) del agua en equilibrio con el $CaCO_3$. Se expresa matemáticamente:

$$IS = pHa - pHc \quad (3)$$

Valores positivos indican tendencia del CaCO_3 a precipitar mientras que valores negativos indican tendencia a disolver.

La RAS ajustada se calcula:

$$\text{RAS(aj)} = \text{RAS} \{ 1 + (8.4 - \text{pHc}) \} \quad (4)$$

Donde:

$$\text{pHc} = (\text{pK}_2 - \text{pKc}) + \text{p}(\text{Ca} + \text{Mg}) + \text{p}(\text{Alk}) \quad (5)$$

pHc = pH del agua en equilibrio con el CaCO_3

pK_2 = Logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del H_2CO_3

pKc = Logaritmo negativo de la constante de solubilidad del CaCO_3

$\text{p}(\text{Ca} + \text{Mg})$ = Logaritmo negativo de la concentración equivalente de $(\text{Ca} + \text{Mg})$

$\text{p}(\text{Alk})$ = Logaritmo negativo de la concentración equivalente de $(\text{CO}_3 + \text{HCO}_3)$

Bower y Maasland (1963) aceptaron un valor de $\text{pH}_a = 8.4$, con base de que el suelo tiene más capacidad amortiguadora que el agua, y en que un suelo no sódico que contenga CaCO_3 tiene un pH de 8.4.

Investigaciones más recientes han demostrado que la RAS ajustada según la ecuación 4, sobreestima el peligro de sodificación (Oster y Rhoades, 1977; Oster y Schröer, 1979; y Suárez, 1981). Inicialmente, se sugirió el uso de un factor 0.5 para ajustar el valor obtenido [$\text{RAS}(\text{aj}) \times 0.5$] pero Ayers y Westcot (1985) indican que dicho procedimiento no debe recomendarse en lo sucesivo.

Suárez (1981) propuso un nuevo procedimiento para calcular las RAS que toma en consideración el efecto de las concentraciones de CO_2 y del bicarbonato (HCO_3) y la salinidad (CEa) sobre los procesos de dilución y precipitación del calcio. La ecuación sugerida por Suárez es similar a la inicial así:

$$\text{RAS(aj)} = \text{Na} / \{ (\text{Ca}_x + \text{Mg}) / 2 \}^{1/2} \quad (6)$$

Donde:

Na^+ y Mg^{2+} = Iones presentes en el agua de riego (me l^{-1})

Ca_x = Valor modificado del calcio tomado de la **Tabla 5**.

Estudios de Laboratorio de Salinidad del USDA han demostrado que tanto la ecuación (2) como la ecuación (6) de Suárez dan valores más reales que la fórmula de la RAS(aj) de Bower y Maasland (1963) (ecuación 4).

Bibliografía

- Agarwal, R.R., and J.S.P. Yadav. 1956. Diagnostic techniques for the saline and alkaline soils of the Indian Gangeic. *J. Soil Sci.* 7:109-121.
- Ayers, R.S., and D.W. Westcot. 1985. Water quality for agriculture, FAO Irrigation and Drainage paper 29, FAO, Roma, 156 p.
- Bernstein, L., and L.E. Francois. 1973. Leaching requirements studies: Sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37:931-943.
- Bernstein, L. 1967. Quantitative assessment of irrigation water quality. *Amer. Soc. Testing and Materials Spec. Tech. Publ.* 416:51-65.
- Bower, C.A., G. Ogata, and J.M. Tucker. 1968. Sodium hazard of irrigation waters are influenced by leaching fraction and by precipitation of solution of calcium carbonate. *Soil Science* 10:29-34.
- Bower, C.A., and M. Maasland. 1963. Sodium hazard of Punjab ground waters. In symposium of water logging and salinity in West Pakistan. *Erg. Cong.* 50:309 p.
- Eaton, F.M. 1954. Formulas for estimating leaching and gypsum requirements of irrigation waters. *Texas Agr. Exp. Sta. Misc. Publ.* 111.
- FAO. 1976a. Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage Paper No 29, Rome.
- FAO. 1976b. Prognosis of salinity and alkalinity. *FAO Soils Bulletin* 31, Rome.
- Groenewegen, H. 1961. Composition of the soluble and exchangeable ions of the salty of the Mirrol irrigation areas (New South Wales). *J. Soil Sci.* 12:129-141.
- Langelier W.F. 1936. The analytical control of anticorrosion water treatment. *J. American Water works Association* 28:1500-1521.
- Levy, R. and E. Mohr. 1965. Soluble and exchangeable cation relations in some soils of Israel. *J. Soil Sci.* 16:290-295.
- Maas, E.V. and C.J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance current assessment. *Journal of irrigation and Drainage Division. ASCE, Vol. 103, No. 1R 2. Proc. Paper 12993 June, 1977, pp. 115-134.*
- Maas, E. 1984. Salt tolerance of plants. In: *The Handbook of Plant Science in Agriculture*. B.R. Christie (ed). CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Oster, J.D., and J.D. Rhoades. 1977. Various indices for evaluating the effective salinity and sodicity of irrigation waters. In: *Proc. International Salinity Conference, Lubbock, Texas, 16-20 August 1976. pp. 1-14.*
- Oster, J.D., and F.W. Schroer. 1979. Infiltration as influenced by irrigation water quality. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 43:444-447.
- Pla, I. 1979. Calidad y uso de agua para riego. *Memorias VI Coloquio de Suelos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Palmira, 19-21 septiembre 46 p.*
- Rhoades, J.D. 1968. Drainage for salinity control. In: *Drainage for Agriculture. Van Schilfgaarde J. (ed). Amer. Soc. Agron. Monograph No. 17, pp. 433-462.*
- Rhoades, J.D. 1974. Leaching requirement for exchangeable sodium control. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32:652-656.
- Suárez, D.L. 1981. Relation between pHc and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an alternate method of estimating SAR of soil or drainage Waters. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 45:469-475.
- USDA. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture Handbook No. 60 L.A. Richards (ed). 160 p.*