



### **3) METODOLOGIA PARA EL ESTABLECIMIENTO DE NIVELES GUIA DE CALIDAD DE AGUA AMBIENTE PARA RIEGO**

#### **3.1) *Introducción***

Se pueden referir desarrollos de criterios y metodologías para la derivación de niveles guía y estándares de calidad de agua para irrigación de cultivos elaborados por agencias gubernamentales y universidades de diversos países. Se mencionarán, entre ellos, los sustentados por las autoridades ambientales de E.E.U.U. y Canadá.

#### **3.1.1) *Criterios sustentados por la Agencia de Protección Ambiental de E.E.U.U. (U.S. EPA)***

En sus criterios para agua de irrigación, la U.S. EPA contempla diversos aspectos que son sucintamente expuestos a continuación.

##### **3.1.1.a) *Efectos sobre el crecimiento de las plantas:***

Las plantas pueden ser afectadas desfavorablemente tanto por condiciones de alta presión osmótica o por presencia de constituyentes fitotóxicos en el agua de irrigación. La presencia de constituyentes indeseables puede traducirse en supresión del crecimiento vegetativo, desarrollo reducido del fruto, calidad inadecuada del producto para el consumo o una combinación de estos efectos. La presencia de sedimentos, plaguicidas o microorganismos patógenos en el agua de irrigación, que puede no influir específicamente sobre el crecimiento de la planta, puede afectar la aceptabilidad del producto. Otro aspecto a considerar es la presencia de sustancias en el agua de irrigación que aún no siendo adversas para los cultivos pueden acumularse en ellos en niveles peligrosos para los animales o el hombre.

Cuando se emplea riego por aspersión o inundación el efecto de la calidad del agua sobre la planta es determinado por la composición de la solución del suelo (medio disponible para las raíces luego de que el agua y el suelo han entrado en contacto). El crecimiento de la planta puede ser afectado indirectamente a través de la influencia de la calidad del agua en el suelo. Por ejemplo, la adsorción de sodio del agua por el suelo resulta en la dispersión de la fracción arcillosa, disminuyendo la permeabilidad del suelo e impidiendo la germinación de la semilla. Los suelos irrigados con aguas salinas tienden a poseer altas tasas de infiltración.

##### **3.1.1.b) *Tolerancia del cultivo a la salinidad:***

El efecto de la salinidad o de la concentración de sólidos disueltos totales sobre la presión osmótica de la solución del suelo es una de las consideraciones más importantes relativas a la calidad del agua. La capacidad de la planta de extraer agua del suelo es determinada por la expresión:

$$STS = SM + SS$$



donde:

STS: succión total del suelo

SM: succión de la matriz (atracción física del agua por el suelo)

SS: succión del soluto (presión osmótica del agua del suelo)

La succión total del suelo representa la fuerza con la que se retiene el agua en el suelo, impidiendo la toma por la planta.

La salinidad del agua de riego puede expresarse en términos de la conductividad eléctrica (CE) y la del suelo por la conductividad eléctrica del extracto saturado (CEe). Bernstein dio valores de CEe relacionados con 10 %, 25 % y 50 % de decrecimiento en el rendimiento de cultivos (cereales, oleaginosas, forrajeras y hortalizas). Estos datos indican que CEe comprendidos en el rango 8-10 mmhos/cm producen una disminución de 10 a 50 % en el rendimiento para la mayoría de los cultivos de una manera aproximadamente lineal (U.S. EPA, 1973).

### **3.1.1.c) Efectos nutricionales:**

Entre los parámetros de calidad de agua de riego que pueden tener efectos nutricionales sobre los cultivos cabe citar: temperatura, cloruros, carbonatos ácidos, sodio y nitratos. En 1972, la U.S. EPA sólo daba recomendaciones para el sodio por la posibilidad de afectar tanto al cultivo como al suelo (U.S. EPA, 1973). Bernstein señala que aguas de riego con valores de relación de adsorción de sodio (RAS) de 4-8 pueden afectar a plantas sensibles al sodio (U.S. EPA, 1973).

### **3.1.1.d) Efectos sobre suelos:**

#### **3.1.1.d.1) Peligro sódico:**

El sodio en el agua de irrigación puede incrementar la presión osmótica en la solución del suelo y afectar específicamente a los frutales. Genera problemas en la estructura del suelo y altera la tasa de infiltración. Cuando la cantidad de sodio adsorbido excede a 10-15 % del total de cationes en el complejo de intercambio del suelo, la arcilla se dispersa y disminuye la permeabilidad.

Para estimar el grado en que el sodio del agua de irrigación será adsorbido por el suelo, el Laboratorio de Salinidad de E.E.U.U. propuso la relación de adsorción de sodio (RAS) (U.S. EPA, 1973):

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

que vincula las concentraciones iónicas de  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  en el agua de irrigación, expresadas en mequivalentes/l.

RAS puede vincularse con la cantidad de cationes intercambiables del suelo, la que se denomina porcentaje de sodio intercambiable del suelo (PSI). La ecuación para predecir PSI a partir de RAS, de origen empírico, es:



$$PSI = (100 a + b RAS) / (1 + a + b RAS)$$

donde:

a (ordenada al origen que representa el error experimental): (-0,06) – 0,01

b (pendiente de la curva de regresión): 0,014 - 0,016

Para cultivos en general, dependiendo del tipo de arcilla, de la concentración de electrolitos en el agua y de otras variables, usualmente se considera tolerable una RAS comprendida entre 8 y 18. Para frutales sensibles, el valor de RAS tolerable se encuentra próximo a 4 (U.S. EPA, 1973).

Valores de PSI comprendidos entre 10 y 15 % se consideran excesivos si hay arcillas de tipo montmorillonita. Sin embargo, PSI comprendidos entre 60 y 70 % fueron satisfactorios para cultivos de alfalfa, algodón y aceitunas en suelos del Valle de San Joaquín (California, E.E.U.U.) (U.S. EPA, 1973).

La predicción de los niveles de equilibrio de PSI a partir de los niveles de RAS del agua de riego es complicada debido a que el contenido de sales se concentra en la solución del suelo. Dado que la RAS aumenta en proporción a la raíz cuadrada de las concentraciones de calcio y magnesio, la U.S. EPA emplea una RAS de 2-3 veces la correspondiente al agua de riego a los fines de estimar el peligro (U.S. EPA, 1973).

#### **3.1.1.d.2) Demanda bioquímica de oxígeno y aeración del suelo:**

Dada la necesidad de disponibilidad de oxígeno para la planta, se requiere que el agua de riego no posea alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) ni alta demanda química de oxígeno (DQO). Además de los efectos negativos sobre el cultivo por deficiencia de oxígeno, la reducción de elementos tales como hierro y manganeso a formas divalentes más solubles puede crear condiciones tóxicas. No obstante lo expuesto, la U.S. EPA no ha recomendado guías para DBO y DQO en el agua de riego.

#### **3.1.1.d.3) Acidez y alcalinidad:**

Dado que el suelo posee un pH regulado, éste puede ser solamente afectado por niveles extremos de pH en el agua de riego. Los efectos de la acidez y la alcalinidad en el agua de riego sobre el suelo y el crecimiento de las plantas son diversos. Entre ellos puede mencionarse el aumento de la movilidad de hierro, aluminio y manganeso desde el suelo y la generación de efectos tóxicos sobre los cultivos. La U.S. EPA cita el rango de pH: 4,5-9,0 como apropiado para el agua de riego en la medida que no sean detectados efectos adversos (U.S. EPA, 1973).

#### **3.1.1.d.4) Sólidos suspendidos y coloidales:**

La presencia de alta turbidez (coloides) y/o sólidos suspendidos en el agua de irrigación puede inhibir la infiltración del agua, reducir la aeración del suelo e impedir el desarrollo de la planta. Inversamente, aguas con alto contenido de limos pueden mejorar la textura,



consistencia y capacidad de retener humedad en suelos arenosos. La U.S. EPA tampoco recomienda niveles guía para este parámetro de calidad de agua de riego.

### **3.1.1.e) Requerimientos específicos de calidad de agua para zonas áridas y semiáridas:**

#### **3.1.1.e.1) Drenaje y requerimiento de percolado:**

En toda agricultura de irrigación parte del agua de riego debe pasar a través del suelo para remover sales incorporadas al mismo por el agua; el volumen requerido de agua de drenaje está relacionado con la cantidad de sales en el agua de riego. Para estimar la fracción del agua de irrigación que debe percolar para controlar la salinidad, el Laboratorio de Salinidad de E.E.U.U. derivó la siguiente expresión aplicable a estado estacionario (U.S. EPA, 1973):

$$RP = Ddw/Diw = CEiw/CEdw$$

donde:

RP: fracción del agua de irrigación requerida para percolar por debajo de la zona radicular

Ddw: agua de percolado [mm]

Diw: agua de irrigación [mm]

CEiw: conductividad eléctrica del agua de irrigación

CEdw: conductividad eléctrica del agua percolando la zona radicular del cultivo

Bernstein, por su parte, estableció la siguiente expresión de cálculo (U.S. EPA, 1973):

$$FP = 1 - (ETc/I T_1)$$

donde:

FP: fracción de agua aplicada percolante

E: tasa promedio de evapotranspiración durante el ciclo de riego, Tc

I: tasa de infiltración media durante el período de infiltración, T<sub>1</sub>

Comparando la fracción del agua de irrigación requerida para percolar (RP) y la fracción de agua aplicada percolante (FP), es posible verificar si la condición de percolado es satisfactoria. No obstante, debe mencionarse que las expresiones mencionadas presentan limitaciones para su aplicación en la práctica real debido, por una parte, a las premisas en que se basan, y, por otra, a la variabilidad de los suelos y de las formas de riego (U.S. EPA, 1973).

#### **3.1.1.e.2) Peligro de salinidad:**

Para casos de riego de cultivos con un nivel estático del acuífero freático no alto, la U.S. EPA considera que concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT) en el agua de irrigación comprendidas en el rango 500-5000 mg/l requieren algún tipo de consideración local. Por debajo de 500 mg/l no se reportan problemas y por arriba de 5000 mg/l el agua no se recomienda para riego (U.S. EPA, 1973).



De acuerdo a lo expuesto, la U.S. EPA clasifica las aguas para riego en zonas áridas y semiáridas teniendo en cuenta no sólo el contenido de sólidos disueltos totales (SDT) sino también los iones presentes a través de la conductividad eléctrica (CE), según se observa en la Tabla 3.1 (U.S. EPA, 1973):

**TABLA 3.1 – CLASIFICACION DE AGUAS DE RIEGO EN FUNCION DE LA SALINIDAD**

Tipo de Agua	SDT [mg/l]	CE [mmhos/cm]
Aguas sin efectos detrimentales	500	0,75
Aguas que pueden ser perjudiciales para cultivos sensibles	500-1000	0,75-1,50
Aguas que pueden ser perjudiciales para muchos cultivos y que requieren prácticas de manejo cuidadosas	1000-2000	1,50-3,00
Aguas que pueden aplicarse para cultivos resistentes en suelos permeables con prácticas de manejo cuidadosas	2000-5000	3,00-7,50

### 3.1.1.e.3) Peligro de permeabilidad:

Los dos criterios utilizados en la evaluación del efecto de la salinidad del agua de irrigación sobre la permeabilidad del suelo son: a) RAS y su relación con PSI, y b) la presencia de carbonatos ácidos.

Se ha reconocido que el peligro de permeabilidad de aguas de irrigación conteniendo carbonatos ácidos es mayor que el indicado por el valor de RAS. Bower y sus colaboradores realizaron elaboraciones relacionadas con el equilibrio carbonatos – carbonatos ácidos en el sistema suelo para evaluar el peligro de permeabilidad de este último. Así, modificaron el Índice de Langelier (PI) para el sistema antedicho (U.S. EPA, 1973). PI es calculable a partir de:  $PI = 8,4 - pH_c$ , donde 8,4 es el pH del suelo y  $pH_c$  es el pH de una suspensión de carbonato de calcio con las mismas concentraciones de calcio y carbonatos ácidos que la del agua de riego, calculándose  $pH_c$  para el sistema suelo según:

$$pH_c = pK_2 - pK_c + p(Ca + Mg) + pAlk$$

donde:

$pK_2 = -\log K_2$ , siendo  $K_2$  la constante correspondiente al equilibrio carbonatos ácidos-carbonatos:  $HCO_3^- + H_2O \rightleftharpoons CO_3^{2-} + H_3O^+$

$pK_c = -\log K_c$ , siendo  $K_c$  la constante correspondiente al equilibrio de solubilidad del carbonato de calcio:  $CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{2+} + CO_3^{2-}$

$p(Ca + Mg) = -\log ([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])$

siendo:

$[Ca^{2+}]$ ,  $[Mg^{2+}]$ : concentraciones molares de iones calcio y magnesio, respectivamente

$pAlk = -\log$  alcalinidad



Calculando PI con RAS y simplificando resulta:

$$RAS_{se} = 2 RAS_{iw} (1 + PI)$$

donde:

$RAS_{se}$ : corresponde al extracto saturado del suelo

$RAS_{iw}$ : corresponde al agua de riego

La respuesta de cada suelo ante el incremento de RAS en cuanto a alteración de la permeabilidad es distinta. En general, la permeabilidad de los suelos comienza a verse disminuida a valores de RAS comprendidos en el rango 8-18. A  $RAS > 18$ , los efectos verificados son usualmente adversos (U.S. EPA, 1973).

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), en sus directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego, considera el peligro de reducción de infiltración (peligro de permeabilidad) estableciendo grados de restricción de uso en función de rangos de RAS vinculados a la conductividad eléctrica (CE) de dichas aguas, según se observa en la Tabla 3.2.

**TABLA 3.2 – DIRECTRICES PARA INTERPRETAR LA CALIDAD DE LAS AGUAS PARA EL RIEGO RESPECTO A PELIGRO DE REDUCCION DE INFILTRACION (FAO, 1987)**

RAS	GRADO DE RESTRICCIÓN DE USO DEL AGUA DE RIEGO EN FUNCION DE LA RAS Y LA CE		
	NINGUNO	LIGERO A MODERADO	SEVERO
	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA [mmhos/cm]		
0-3	> 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

La FAO también considera la cuestión asociada a la presencia de carbonatos ácidos y a la estabilidad de los suelos a través de lo que se define como relación de adsorción de sodio corregida ( $RAS^0$ ). Esta puede calcularse mediante la siguiente expresión (FAO, 1987):

$$RAS^0 = Na / [(Ca^0 + Mg) / 2 ]^{1/2}$$

donde:

Na: contenido de sodio en el agua de riego, en miliequivalentes/l.

$Ca^0$ : concentración de calcio en el agua del suelo, contenida cerca de la superficie y que resulta del riego, en miliequivalentes/l.

Mg: contenido de magnesio en el agua del riego, en miliequivalentes/l.

$Ca^0$  es el contenido de calcio corregido respecto al contenido en el agua del riego. El mismo representa la concentración final de calcio que permanecería en solución en el suelo como resultado de aplicar un agua de determinada salinidad y contenido relativo de



carbonatos ácidos/calcio ( $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}$ ).  $\text{Ca}^0$  puede calcularse a través de los valores de las variables antedichas que se exponen en la Tabla 3.3.

**TABLA 3.3 – CONCENTRACION DE CALCIO EN EL AGUA DEL SUELO CONTENIDA CERCA DE LA SUPERFICIE QUE RESULTARIA DE REGAR CON AGUAS DE DETERMINADO VALOR  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}$  Y CONDUCTIVIDAD CE ( $\text{Ca}^0$ ), (FAO, 1987) (1) (2)**

	Salinidad del agua aplicada expresada en términos de CE [mmhos/cm]											
	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0
<b>0,05</b>	13,20	13,61	13,92	14,40	14,79	15,26	15,91	16,43	17,28	17,97	19,07	19,94
<b>0,10</b>	8,31	8,57	8,77	9,07	9,31	9,62	10,02	10,35	10,89	11,32	12,01	12,56
<b>0,15</b>	6,34	6,54	6,69	6,92	7,11	7,34	7,65	7,90	8,31	8,64	9,17	9,58
<b>0,20</b>	5,24	5,40	5,52	5,71	5,87	6,06	6,31	6,52	6,86	7,13	7,57	7,91
<b>0,25</b>	4,51	4,65	4,76	4,92	5,06	5,22	5,44	5,62	5,91	6,15	6,52	6,82
<b>0,30</b>	4,00	4,12	4,21	4,36	4,48	4,62	4,82	4,98	5,24	5,44	5,77	6,04
<b>0,35</b>	3,61	3,72	3,80	3,94	4,04	4,17	4,35	4,49	4,72	4,91	5,21	5,45
<b>0,40</b>	3,30	3,40	3,48	3,60	3,70	3,82	3,98	4,11	4,32	4,49	4,77	4,98
<b>0,45</b>	3,05	3,14	3,22	3,33	3,42	3,53	3,68	3,80	4,00	4,15	4,41	4,61
<b>0,50</b>	2,84	2,93	3,00	3,10	3,19	3,29	3,43	3,54	3,72	3,87	4,11	4,30
<b>0,75</b>	2,17	2,24	2,29	2,37	2,43	2,51	2,62	2,70	2,84	2,95	3,14	3,28
<b>1,00</b>	1,79	1,85	1,89	1,96	2,01	2,09	2,16	2,23	2,35	2,44	2,59	2,71
<b>1,25</b>	1,54	1,59	1,63	1,68	1,73	1,78	1,86	1,92	2,02	2,10	2,23	2,33
<b>1,50</b>	1,37	1,41	1,44	1,49	1,53	1,58	1,65	1,70	1,79	1,86	1,97	2,07
<b>1,75</b>	1,23	1,27	1,30	1,35	1,38	1,43	1,49	1,54	1,62	1,68	1,78	1,86
<b>2,00</b>	1,13	1,16	1,19	1,23	1,26	1,31	1,36	1,40	1,48	1,54	1,63	1,70
<b>2,25</b>	1,04	1,08	1,10	1,14	1,17	1,21	1,26	1,30	1,37	1,42	1,51	1,58
<b>2,50</b>	0,97	1,00	1,02	1,06	1,09	1,12	1,17	1,21	1,27	1,32	1,40	1,47
<b>3,00</b>	0,85	0,89	0,91	0,94	0,96	1,00	1,04	1,07	1,13	1,17	1,24	1,30
<b>3,50</b>	0,78	0,80	0,82	0,85	0,87	0,90	0,94	0,97	1,02	1,06	1,12	1,17
<b>4,00</b>	0,71	0,73	0,75	0,78	0,80	0,82	0,86	0,88	0,93	0,97	1,03	1,07
<b>4,50</b>	0,66	0,68	0,69	0,72	0,74	0,76	0,79	0,82	0,86	0,90	0,95	0,99
<b>5,00</b>	0,61	0,63	0,65	0,67	0,69	0,71	0,74	0,76	0,80	0,83	0,88	0,93
<b>7,00</b>	0,49	0,50	0,52	0,53	0,55	0,57	0,59	0,61	0,64	0,67	0,71	0,74
<b>10,00</b>	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,45	0,47	0,48	0,51	0,53	0,56	0,58
<b>20,00</b>	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37
<b>30,00</b>	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,27	0,28

Notas:

(1): Supone: a) una fuente de calcio proveniente de silicatos o caliza ( $\text{Ca CO}_3$ ); b) no existe precipitación de magnesio; c) la presión relativa al  $\text{CO}_2$  cerca de la superficie del suelo es 0,0007 atmósferas.

(2):  $\text{Ca}^0$  y  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}$  expresados en miliequivalentes/l.

A los efectos de evaluar el peligro de reducción de infiltración en relación a concentraciones relativamente altas de sodio o bajas de calcio en las aguas de riego, se aplica  $\text{RAS}^0$  para utilizar la Tabla 3.2.

### 3.1.1.f) Fitotoxicidad debida a trazas de elementos:

Las sustancias a niveles de trazas normalmente ocurren en aguas y suelo (solución) en concentraciones frecuentemente menores que 100  $\mu\text{g/l}$ . Algunas pueden ser esenciales para el crecimiento de la planta mientras que otras, además de no ser esenciales, resultan tóxicas.

Cuando una sustancia tóxica presente en el agua de riego es agregada al suelo, puede combinarse con él para disminuir la concentración de la forma tóxica e incrementar su almacenamiento en el suelo. Si el agregado de agua de irrigación conteniendo sustancias en niveles tóxicos continúa, la capacidad del suelo para reaccionar con las mismas será saturada. Puede llegarse a un estado estacionario en el que la masa de la sustancia tóxica que abandona



el estrato radicular del suelo con el agua de drenaje se hace igual a la masa agregada con el agua de irrigación sin ningún otro cambio en su concentración en el suelo. La sustancia tóxica se puede asimismo remover del estrato radicular del suelo a través de la acumulación en el cultivo y la posterior cosecha del mismo. En muchos casos, los suelos poseen altas capacidades para reaccionar con las sustancias tóxicas en concentraciones a niveles de trazas, por lo que se puede regar con agua conteniendo niveles tóxicos de aquéllas durante muchos años antes de alcanzarse el estado estacionario.

La U.S. EPA estableció un programa de trabajo para los elementos fitotóxicos (U.S. EPA, 1973) con el fin de determinar sus límites aceptables en el agua de riego, en el que resaltó tres cuestiones:

- Muchos son los factores que influyen sobre la captación y tolerancia de sustancias tóxicas por parte de las plantas. Los más importantes están vinculados a la variabilidad natural en la tolerancia de plantas y de sus consumidores, a las reacciones en el suelo y a las interacciones con nutrientes, particularmente en la planta misma.
- Los niveles de tolerancia para las sustancias fitotóxicas deben tener en cuenta las consideraciones antes señaladas respecto a salinidad, efectos nutricionales, peligro sódico, aeración del suelo, acidez-alcalinidad y sólidos suspendidos.
- Los límites aceptables para el agua de riego están sujetos a la limitada disponibilidad de información fitotoxicológica.

La U.S. EPA recomendó concentraciones máximas de sustancias en agua de riego teniendo en cuenta las concentraciones de las mismas en la solución del suelo, asumiendo estado estacionario y considerando los niveles en que tales sustancias mostraron efectos fitotóxicos (U.S. EPA, 1973). Se empleó una tasa de riego de 3 acre \* pie/(acre \* año) para calcular la captación anual de sustancias tóxicas susceptibles de incorporarse por riego sin efecto para el cultivo. Las correspondientes concentraciones máximas resultantes para un conjunto de 21 metales y no metales fueron asignadas para dos condiciones:

- agua de riego usada continuamente en todo tipo de suelo.
- agua de riego usada durante 20 años en suelos de textura fina de pH entre 6,0 y 8,5.

Ciertas características del suelo tales como pH, disponibilidad de fósforo y el coeficiente de partición de tóxicos ( $K_p$ ) modifican la tolerancia de las plantas a los tóxicos presentes en el agua de riego. Así, el incremento del pH en el suelo disminuye la fitotoxicidad de compuestos de manganeso, cobalto, zinc, cobre y boro.

### **3.1.2) Criterios sustentados por el Consejo Canadiense de Ministros del Ambiente (CCME)**

CCME estableció un protocolo para derivar niveles guía de calidad de agua para riego en 1993 y lo actualizó en 1999 (CCME, 1999), elaborando recomendaciones sobre concentraciones tolerables para aproximadamente 25 sustancias, no contemplando efectos de mezclas de tóxicos sino los efectos que los mismos causan en forma individual.



Anteriormente, los niveles guía canadienses para agua de irrigación, de carácter interino, se basaron en los criterios establecidos por la U.S. EPA (EPA, 1973).

Los principios asumidos por CCME en el mencionado protocolo son:

- Consideración de las sensibilidades de las especies cultivadas en Canadá.
- Establecimiento de un único valor como nivel guía para un parámetro de calidad de agua de riego basado en datos de fitotoxicidad para la especie más sensible, preferentemente referidos a estudios crónicos, si están disponibles.
- Consideración de tasas de irrigación máximas.
- Referencia de los niveles guía a concentraciones totales del contaminante (sustancia original y productos de transformación en muestras no filtradas del agua de riego aplicada).

CCME establece como requerimiento mínimo para la derivación de niveles guía disponer de, al menos, tres estudios sobre tres o más especies de cereales, gramíneas o pasturas y de, al menos, tres estudios sobre cinco o más especies de otros cultivos que incluyan al menos dos especies de las siguientes familias: *Leguminosae* (no incluidas como pasturas), *Compositae*, *Cruciferae*, *Cucurbitaceae*, *Liliaceae*, *Solanaceae*, *Umbelliferae* y *Chenopodiaceae*, debiendo las especies consideradas ser cultivadas en Canadá. Se requiere que tanto para cereales, gramíneas y pasturas, como para el otro grupo de cultivos se cuente con al menos dos estudios que cubran el ciclo completo de la planta y consideren observaciones biológicamente relevantes. En el caso de no disponerse de los datos mínimos antes mencionados, CCME indica condiciones de derivación de niveles guía con carácter interino.

### **3.2) Metodología para establecer niveles guía de calidad de agua para riego**

Sobre la base de los antecedentes presentados se ha considerado conveniente diseñar la metodología para establecer los niveles guía de calidad de agua para riego observando las siguientes premisas:

- Asumir como consideración central la fitotoxicidad de las sustancias presentes a niveles de trazas en el agua de riego sobre los cultivos más sensibles.
- Contemplar la diversidad presente y futura de cultivos regados.
- Contemplar la anisotropía de los suelos regados.
- Contemplar las diversas condiciones climáticas y geográficas del territorio argentino.
- Verificar que las concentraciones máximas aceptables de las sustancias tóxicas en el agua de riego no modifican la concentración preexistente en el agua subterránea freática.



- Verificar que las concentraciones totales de sales, sodio y acidez-alcalinidad en el agua de riego no alteran las características del suelo.

Estas premisas dan lugar a que se considere la información fitotoxicológica sobre especies cultivadas en la Argentina en general, no acotando el análisis a los cultivos actualmente bajo riego.

Se desarrollan a continuación los procedimientos para la derivación de niveles guía de calidad de agua para riego. Estos comprenden una secuencia de operaciones para establecer tales niveles y la ulterior verificación de la ausencia de riesgo asociado al agua de riego sobre el acuífero freático, según se ilustra en la Figura 3.1. Se explicitan además pautas para la verificación de ausencia de riegos asociados al agua de riego sobre el suelo.

### ***3.2.1) Secuencia de operaciones para el establecimiento de niveles guía de calidad de agua de riego***

#### ***3.2.1.1) Selección de datos fitotoxicológicos***

La consideración central de la fitotoxicidad de una sustancia presente en el agua de riego se traduce en el cálculo de una concentración máxima aceptable de dicha sustancia en el agua de riego que resulta protectora para la especie cultivada más sensible. Para tal cálculo se plantea como requerimiento contar con suficiente información fitotoxicológica relativa a las especies cultivadas en el territorio argentino, asignándose mayor relevancia a los estudios de irrigación de largo término, particularmente a aquéllos que cubren el período total de desarrollo de la planta y consideran efectos biológicamente significativos.

La concentración máxima aceptable es calculada con carácter pleno cuando se cuenta con información fitotoxicológica sobre por lo menos tres de las especies ubicadas en los doce primeros lugares del ranking productivo, que representan alrededor del 65 % de la superficie total cultivada y corresponden al Grupo Cereales para grano y Forrajeras anuales y perennes y al Grupo Oleaginosas e Industriales, según se exhibe en la Tabla 3.4, y con información fitotoxicológica sobre por lo menos cinco del resto de las especies cultivadas, debiendo como mínimo tres de ellas pertenecer al Grupo Hortalizas y Legumbres y al Grupo Frutales.

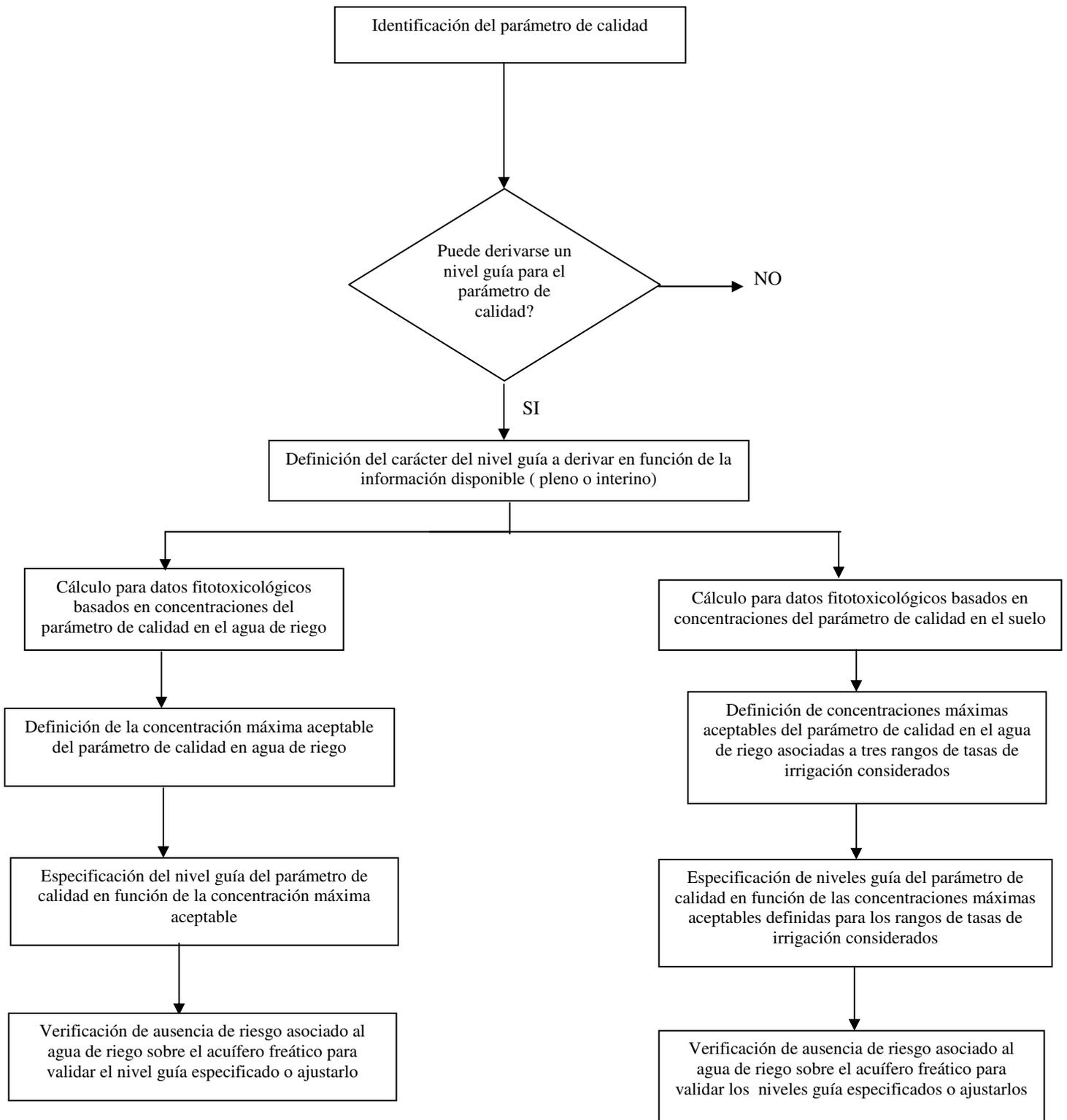


Figura 3.1- Secuencia operativa para el establecimiento de niveles guía de calidad de agua para riego



**TABLA 3.4 - RANKING DE CULTIVOS SEGUN LA INCIDENCIA EN LA SUPERFICIE CULTIVADA TOTAL**

N° de orden	Cultivo	Grupo	% Superficie Total Cultivada
1	Soja	Oleaginosas e Industriales	13,08
2	Trigo	Cereales para grano y Forrajeras anuales y perennes	11,97
3	Avena	Cereales para grano y Forrajeras anuales y perennes	10,16
4	Maíz	Cereales para grano y Forrajeras anuales y perennes	9,83
5	Sorgo	Cereales para grano y Forrajeras anuales y perennes	5,39
6	Alfalfa	Cereales para grano y Forrajeras anuales y perennes	4,00
7	Girasol	Oleaginosas e Industriales	3,40
8	Pasto llorón	Cereales para grano y Forrajeras anuales y perennes	2,71
9	Algodón	Oleaginosas e Industriales	1,37
10	Lino	Oleaginosas e Industriales	1,28
11	Centeno	Cereales para grano y Forrajeras anuales y perennes	1,18
12	Agropyro	Cereales para grano y Forrajeras anuales y perennes	1,12

Nota:

Ranking elaborado en base a datos del Censo Nacional Agropecuario 1988 (INDEC, 1992)

De no contarse con suficiente información fitotoxicológica para definir la concentración máxima aceptable con carácter pleno, es procedente el establecimiento de tal concentración con carácter interino cuando se cuenta con información fitotoxicológica sobre por lo menos una de las especies ubicadas en los doce primeros lugares del ranking productivo, según se exhibe en la Tabla 3.4, y con información fitotoxicológica sobre por lo menos tres del resto de las especies cultivadas, debiendo como mínimo dos de ellas pertenecer al Grupo Hortalizas y Legumbres y al Grupo Frutales.

### **3.2.1.2) Cálculo de la concentración máxima aceptable en el agua de riego de una sustancia considerada**

Evaluada la información fitotoxicológica disponible, definida la posibilidad de determinación de la concentración máxima aceptable para un parámetro de calidad y establecido si su carácter es pleno o interino, se procede a calcular según se detalla a continuación.

#### **3.2.1.2.1) Cálculo para datos fitotoxicológicos basados en concentraciones en el agua de riego:**

Este cálculo es procedente para los casos donde los ensayos de fitotoxicidad vinculan concentraciones en el agua de riego con sus efectos sobre los cultivos.

Para cada especie para la cual se dispone de datos de fitotoxicidad consistentes se calcula la concentración máxima aceptable de una sustancia considerada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$SMATC_i = (LOEC_i * NOEC_i)^{1/2} / FI$$



donde:

SMATC<sub>i</sub>: concentración máxima aceptable de la sustancia en el agua de riego para la especie *i* [ $\mu\text{g/l}$ ].

LOEC<sub>i</sub>: mínima concentración de la sustancia en el agua de riego para la cual se registra un efecto para la especie *i* [ $\mu\text{g/l}$ ].

NOEC<sub>i</sub>: concentración de la sustancia en el agua de riego para la cual no se registra efecto para la especie *i* [ $\mu\text{g/l}$ ].

FI: factor de incertidumbre.

Cuando no se conoce NOEC<sub>i</sub> o ésta es igual a cero, a los efectos de calcular SMATC<sub>i</sub> se hace la siguiente estimación:

$$\text{NOEC}_i = \text{LOEC}_i / 4,5$$

La expresión estimadora surge de evaluaciones estadísticas realizadas por Environment Canada sobre relaciones LOEC/NOEC para diversas plantas expuestas a un grupo de plaguicidas. 4,5 resulta el límite superior de un intervalo de confianza del 95 % (CCME, 1999).

El factor de incertidumbre es empleado para cubrir posibles errores de estimación de condiciones de protección atribuibles a diversas fuentes de imprecisión. El uso de un FI = 10 se considera recomendable en general, pudiendo aumentarse tal factor hasta 100 en situaciones particulares (CCME, 1999).

Cuando no se conoce LOEC<sub>i</sub> y se dispone de NOEC<sub>i</sub>, el cálculo de SMATC<sub>i</sub> se efectúa según la expresión siguiente:

$$\text{SMATC}_i = \text{NOEC}_i / \text{FI}$$

empleándose en general para FI un valor igual a 5.

La concentración máxima aceptable en agua de riego para la sustancia considerada queda definida por la menor SMATC<sub>i</sub> calculada.

### **3.2.1.2.2) Cálculo para datos fitotoxicológicos basados en concentraciones en el suelo:**

Este cálculo es procedente para los casos en que la información fitotoxicológica disponible proviene de ensayos que vinculan concentraciones totales en el suelo con efectos sobre los cultivos.

Para cada especie para la cual se dispone de datos de fitotoxicidad consistentes se calcula la concentración máxima aceptable en el suelo de una sustancia considerada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\text{ASC}_i = (\text{LOEC}_i * \text{NOEC}_i)^{1/2} / \text{FI}$$



donde:

ASC<sub>i</sub>: concentración máxima aceptable de la sustancia en el suelo para la especie i [mg/kg suelo].

LOEC<sub>i</sub>: mínima concentración de la sustancia en el suelo para la cual se registra un efecto para la especie i [mg/kg suelo].

NOEC<sub>i</sub>: concentración de la sustancia en el suelo para la cual no se registra efecto para la especie i [mg/kg suelo].

FI: factor de incertidumbre.

Para el cálculo de ASC<sub>i</sub> son aplicables las consideraciones expuestas en 3.1.2.1 en relación a la estimación de SMATC<sub>i</sub> cuando no se conoce NOEC<sub>i</sub> o cuando ésta es igual a cero y también cuando no se conoce LOEC<sub>i</sub> y se dispone de NOEC<sub>i</sub>; es asimismo aplicable lo comentado en 3.1.2.1 respecto al factor de incertidumbre.

Dado que los datos fitotoxicológicos están expresados sobre base seca (mg/kg sólidos), a los efectos de su aplicación para el cálculo de ASC<sub>i</sub> y SMATC<sub>i</sub> se ajustan a condiciones de contenido de humedad a capacidad de campo según la expresión siguiente:

$$x \text{ [mg/kg suelo]} = x' \text{ [mg/kg sólidos]} / [ 1 + (\theta_{Fc} * d_w) / (1 - \theta) * d_{sól} ] \text{ [ kg suelo/kg sólidos]}$$

donde:

x: NOEC<sub>i</sub> o LOEC<sub>i</sub> [mg/kg suelo]

x': NOEC<sub>i</sub> o LOEC<sub>i</sub> [mg/kg sólidos]

$\theta_{Fc}$ : contenido de humedad a capacidad de campo [ l agua/l suelo]

$d_w$ : densidad del agua [kg agua/l agua]

$\theta$ : porosidad [l fracción no sólida del suelo/l suelo]

$d_{sól}$ : densidad de sólidos del suelo [kg sólidos/l sólidos]

Empleándose para tal ajuste:

$\theta_{Fc}$ : 0,29 l agua/l suelo

$d_w$ : 1 kg agua/l agua

$\theta$ : 0,47 l fracción no sólida del suelo/l suelo

$d_{sól}$ : 2,65 kg sólidos/l sólidos

resulta:

$$x \text{ [mg/kg suelo]} = x' \text{ [mg/kg sólidos]} / 1,21 \text{ [ kg suelo/kg sólidos]}$$

Los valores de  $\theta_{Fc}$  y  $\theta$  antedichos corresponden a valores medios obtenidos para las doce clases texturales mediante el programa Calculadora de propiedades hidráulicas desarrollado a partir del trabajo de Saxton et al. (1986), que considera una  $d_{sól} = 2,65$  kg sólidos/l sólidos.



La concentración máxima aceptable de la sustancia en el agua de riego para la especie  $i$  se calcula de acuerdo a la expresión que se expone seguidamente, que es empleada en las estimaciones efectuadas por Environment Canada (CCME, 1999):

$$SMATC_i = ASC_i * d_s * V_s / T_r$$

donde:

$SMATC_i$ : concentración máxima aceptable de la sustancia en el agua de riego para la especie  $i$  [ $\mu\text{g/l}$ ]

$ASC_i$ : concentración máxima aceptable de la sustancia en el suelo para la especie  $i$  [ $\text{mg/kg}$  suelo]

$d_s$ : densidad bruta del suelo [ $\text{kg}$  suelo/ $\text{m}^3$  suelo]

$V_s$ : volumen de suelo [ $\text{m}^3$  suelo/ $\text{ha}$ ]

$T_r$ : tasa de riego efectiva anual [ $\text{m}^3/\text{ha}$ ]

siendo:

$$V_s: h \text{ [m]} \times 10^4 \text{ [m}^2/\text{ha]}$$

donde:

$h$ : profundidad típica de avance de la sustancia en el suelo [ $\text{m}$ ]

Para  $h$  se utilizan datos empíricos de percolación de la sustancia en el suelo. En caso de no disponerse de ellos, se adopta el valor 0,15 m.

Para el cálculo de  $SMATC_i$  se adopta  $d_s = 1300 \text{ kg/m}^3$  y se asumen los siguientes escenarios relativos a tasas de riego efectivas anuales:

- $T_r = 3500 \text{ m}^3/\text{ha}$  (contempla situaciones de riego hasta dicha tasa)
- $T_r = 7000 \text{ m}^3/\text{ha}$  (contempla situaciones de riego con  $3500 \text{ m}^3/\text{ha} < T_r \leq 7000 \text{ m}^3/\text{ha}$ )
- $T_r = 12000 \text{ m}^3/\text{ha}$  (contempla situaciones de riego con  $7000 \text{ m}^3/\text{ha} < T_r \leq 12000 \text{ m}^3/\text{ha}$ )

Ello conlleva a la determinación de tres concentraciones máximas aceptables de la sustancia para la especie, asociadas a sendos escenarios de riego:

$$\begin{aligned} &SMATC (1), \text{ para } T_r = 3500 \text{ m}^3/\text{ha} \\ &SMATC (2), \text{ para } T_r = 7000 \text{ m}^3/\text{ha} \\ &SMATC (3), \text{ para } T_r = 12000 \text{ m}^3/\text{ha} \end{aligned}$$

Para el caso particular de sustancias agroquímicas como los plaguicidas, para los cuales los datos fitotoxicológicos están referidos a las tasas de aplicación, en lugar de calcular  $ASC_i$  puede estimarse la tasa aceptable de aplicación del ingrediente activo de acuerdo a la siguiente expresión:



$$AAR_i = (LOEAR_i * NOEAR_i)^{1/2} / FI$$

donde:

AAR<sub>i</sub>: tasa anual aceptable de aplicación del ingrediente activo sobre la especie i [kg ingrediente activo/ha]

LOEAR<sub>i</sub>: tasa mínima de aplicación del ingrediente activo con efecto observado sobre la especie i [kg ingrediente activo/ha]

NOEAR<sub>i</sub>: tasa de aplicación del ingrediente activo sin efecto observado sobre la especie i [kg ingrediente activo/ha]

FI: factor de incertidumbre

Para la estimación de AAR<sub>i</sub> cuando no se conoce NOEAR<sub>i</sub> o ésta es igual a cero o bien cuando no se conoce LOEAR<sub>i</sub> y se dispone de NOEAR<sub>i</sub> son aplicables las consideraciones efectuadas para el cálculo de ASC<sub>i</sub> con relación a NOEC<sub>i</sub> y LOEC<sub>i</sub>. También son aplicables las consideraciones expuestas con anterioridad con relación al factor de incertidumbre.

La concentración máxima aceptable de la sustancia en el agua de riego para la especie i resulta en este caso de aplicar la expresión siguiente:

$$SMATC_i = AAR_i * 10^6 / Tr$$

donde:

SMATC<sub>i</sub>: concentración máxima aceptable de la sustancia en el agua de riego para la especie i [µg/l]

AAR<sub>i</sub>: tasa anual aceptable de aplicación del ingrediente activo sobre la especie i [kg ia/ha]

Tr: tasa de riego efectiva anual [m<sup>3</sup>/ha]

Para el cálculo se asumen los escenarios potenciales planteados relativos a tasas de riego efectivas anuales. Ello conlleva la determinación de tres concentraciones máximas aceptables de la sustancia para la especie asociadas a sendos escenarios de riego.

Las concentraciones máximas aceptables para la sustancia considerada en agua de riego quedan definidas por las menores SMATC<sub>i</sub> calculadas para los escenarios asumidos, que se identifican como:

$$SMATC (1'), \text{ para } Tr = 3500 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$SMATC (2'), \text{ para } Tr = 7000 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$SMATC (3'), \text{ para } Tr = 12000 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Esta modalidad de definición de las concentraciones máximas corresponde a los casos en que la única vía de exposición a la sustancia es el agua de riego.



### **3.2.1.3) Especificación del nivel guía para una sustancia considerada en agua de riego**

La especificación del nivel guía para una sustancia considerada depende de la forma en que se calcula la concentración máxima aceptable en el agua de riego, como se detalla a continuación.

#### **3.2.1.3.1) Para datos fitotoxicológicos basados en concentraciones en el agua de riego:**

En este caso el nivel guía para la sustancia en agua de riego (NGAR) queda especificado en función de la concentración máxima aceptable en el agua de riego, referido a la muestra de agua sin filtrar, según:

$$\text{NGAR} \leq (\text{menor SMATC}_i \text{ calculada})$$

#### **3.2.1.3.2) Para datos fitotoxicológicos basados en concentraciones en el suelo:**

En este caso resultan niveles guía diversos para la sustancia en agua de riego (NGAR) en función de las variantes planteadas para el cálculo de SMATC según se detalla a continuación.

Para cálculos basados en  $\text{ASC}_i$  se especifican los siguientes niveles guía para los escenarios de riego planteados, referidos a la muestra de agua sin filtrar:

$$\begin{aligned} \text{NGAR (1)} &\leq \text{SMATC (1)} \quad (\text{para Tr} = 3500 \text{ m}^3/\text{ha}) \\ \text{NGAR (2)} &\leq \text{SMATC (2)} \quad (\text{para Tr} = 7000 \text{ m}^3/\text{ha}) \\ \text{NGAR (3)} &\leq \text{SMATC (3)} \quad (\text{para Tr} = 12000 \text{ m}^3/\text{ha}) \end{aligned}$$

Para cálculos basados en  $\text{AAR}_i$  se especifican los siguientes niveles guía para los escenarios de riego planteados, referidos a la muestra de agua sin filtrar:

$$\begin{aligned} \text{NGAR (1')} &\leq \text{SMATC (1')} \quad (\text{para Tr} = 3500 \text{ m}^3/\text{ha}) \\ \text{NGAR (2')} &\leq \text{SMATC (2')} \quad (\text{para Tr} = 7000 \text{ m}^3/\text{ha}) \\ \text{NGAR (3')} &\leq \text{SMATC (3')} \quad (\text{para Tr} = 12000 \text{ m}^3/\text{ha}) \end{aligned}$$

### **3.2.2) Consideración de riesgos para el suelo y el acuífero freático asociados al agua de riego**

Esta consideración comprende evaluaciones inherentes a las condiciones de las áreas cultivadas bajo riego relacionadas con aspectos climáticos, la naturaleza de los suelos, la profundidad del acuífero freático, las características de los cultivos, las prácticas culturales y los sistemas de riego y drenaje.



Las evaluaciones antedichas deben asentarse en el análisis de información histórica de las diversas variables de riesgo involucradas y en determinaciones obtenidas en programas de seguimiento de tales variables.

### **3.2.2.1) Consideración de riesgos para el suelo**

Esta consideración comprende evaluaciones relativas a peligro de permeabilidad, alteración de la condición buffer del suelo y peligro de salinización, según se detalla a continuación.

#### **3.2.2.1.1) Con respecto al peligro de permeabilidad**

Se asume en este sentido para el agua de riego la observancia de las directrices establecidas por la FAO que se exponen en la Tabla 3.2.

La aplicación de estas directrices deberá estar en concordancia con la evaluación de las condiciones locales, lo cual involucra la consideración de las características físicas y químicas del suelo a los efectos de precisar el grado de restricción de uso del agua de riego.

#### **3.2.2.1.2) Con respecto a la no alteración de la condición buffer del suelo**

Se asume como condición aceptable para el agua de riego que los valores de pH estén comprendidos en el rango 4,5 – 9, en la medida que se verifique la no detección de efectos perjudiciales tales como desequilibrios de nutrición de los cultivos o aumentos significativos de la movilidad de iones tóxicos hacia la solución del suelo.

#### **3.2.2.1.3) Con respecto al peligro de salinización**

Para el agua de riego se asume la observancia de los criterios establecidos por la U.S. EPA que se exponen en la Tabla 3.1.

La aplicación de dichos criterios deberá estar en concordancia con la evaluación de las condiciones locales inherentes a tipo de suelo, condiciones climáticas, profundidad del acuífero freático, tipo de cultivos, prácticas de manejo de suelo y prácticas de riego, adquiriendo particular relevancia la verificación de que la condición de percolado sea satisfactoria.

### **3.2.2.2) Verificación de ausencia de impactos del agua de riego sobre el acuífero freático**

Para verificar la ausencia de alteración de la calidad del agua subterránea en las zonas regadas, se fija como criterio que la concentración de la sustancia tóxica que alcanza el acuífero freático luego de percolar por la capa no saturada debe ser despreciable, preservando el nivel de concentración basal de la sustancia en el acuífero, supuesto éste no contaminado.

Asumiendo condiciones estacionarias de carga de la sustancia por riego y de concentración de la misma en el suelo y flujo pistón del frente de la sustancia percolando en el suelo, se realiza la verificación antedicha empleando un modelo de tamizado desarrollado por



Rao et al. (1985). Este modelo se basa en el hecho de que muchas sustancias atenúan su concentración a medida que van recorriendo la capa no saturada a través de procesos de retardo y decaimiento. Estos procesos pueden ser medidos, aplicando una serie de simplificaciones, mediante el factor de atenuación (AF), el cual se calcula según la siguiente expresión adimensional:

$$AF = \exp [-0,693 * h_{fr} * RF * \theta_{Fc} / (q * t^{1/2})]$$

siendo:

$$RF = 1 + (d_s * f_{oc} * K_{oc})/\theta_{Fc} + (na * K_H)/\theta_{Fc} \quad (\text{para tóxicos orgánicos})$$

$$RF = 1 + (d_s * K_p)/\theta_{Fc} \quad (\text{para tóxicos inorgánicos})$$

donde:

$h_{fr}$ : profundidad de la capa freática [m]

RF: factor de retardo en el suelo, adimensional

$\theta_{Fc}$ : contenido de humedad del suelo a capacidad de campo [l agua/ l suelo]

q: recarga neta anual del acuífero freático [m/año]

$d_s$ : densidad bruta del suelo [kg suelo/m<sup>3</sup> suelo]

$f_{oc}$ : fracción de carbono orgánico del suelo [kg carbono orgánico/kg sólidos]

na: porosidad aérea del suelo [l aire/l suelo]

$K_H$ : constante de Henry de la sustancia [l agua/l aire]

$K_p$ : coeficiente de partición sólido/líquido de la sustancia inorgánicas en el suelo [l agua de poro/kg sólidos]

$K_{oc}$ : coeficiente de partición normalizado por el contenido de carbono orgánico en el suelo [l agua de poro/kg carbono orgánico]

$t^{1/2}$ : vida media de la sustancia en el suelo [años]

En el Apéndice 3.1 se listan valores de  $K_p$  correspondientes a diversos elementos (de Sheppard et al., 1992).

La recarga neta anual del acuífero freático se calcula en función del balance hídrico:

$$q \text{ [m/año]} = P + T_R - ET - ES$$

donde:

P: precipitación anual media [m/año]

$T_R$ : tasa de riego anual [m/año]

ET: evapotranspiración anual [m/año]

ES: escurrimiento superficial [m/año] (en caso de desconocerse se asume igual a cero)

La tasa de riego anual a ser empleada en el cálculo adopta los siguientes valores, según el escenario de riego correspondiente:

- $T_R = 0,35$  m/año (contempla situaciones de riego hasta dicha tasa)



- $T_R = 0,7$  m/año (contempla situaciones con  $0,35 \text{ m} < T_R \leq 0,7 \text{ m}$ )
- $T_R = 1,2$  m/año (contempla situaciones con  $0,7 \text{ m} < T_R \leq 1,2 \text{ m}$ )

La concentración de la sustancia que alcanza la capa freática ( $C_F$ ) se calcula a partir de:

$$C_F [\mu\text{g/l}] = C_o * AF$$

donde:

$C_o$ : concentración de la sustancia en el agua de poro de la superficie del suelo [ $\mu\text{g/l}$ ]

calculándose  $C_o$  según:

$$C_o = SMATC * Tr/q$$

Dado que es suficiente que  $AF$  sea muy pequeño para asegurar que la sustancia tóxica no alcanza el acuífero freático, la condición a satisfacer es:

$$AF \cong 0$$

Cabe señalar que para sustancias tóxicas muy persistentes (tiempo de vida medio  $> 1$  año) y muy fuertemente adsorbidas por el suelo (constantes de partición  $\geq 10^5$  l/kg), como es el caso de los metales pesados y los compuestos organoclorados,  $AF$  tiene valores próximos a 1. Para estas sustancias se requiere verificar la preservación de la condición del acuífero freático a través de la aplicación de la expresión de cálculo:

$$C_F [\mu\text{g/l}] = C_o * AF$$

debiendo cumplirse que:

$$C_F \leq \text{nivel guía asociado al destino especificado para el acuífero}$$

### 3.3) Referencias

CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 1999. Canadian Environmental Quality Guidelines.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1987. La Calidad del Agua en la Agricultura. Estudio FAO, Riego y Drenaje, 29, Rev. 1.

INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos). 1992. Censo Nacional Agropecuario 1988, Resultados generales, 26.

Saxton, K.E. et al., 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Amer. J. 50(4): 1031-1036.

Rao, P.S.C., A.G. Hornsby and R.E. Jessup, 1985. Indices for ranking the potential for pesticide contamination of groundwater. Soil Crop Science Society. Florida. Proc., 44, pp: 1-8.



República Argentina  
Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación

Sheppard, S.C., C. Gaudet, M.J. Sheppard, P.M. Cureton and M.P. Wong. The development of assessment and remediation guidelines for contaminated soils, a review of the science. *Canadian Journal of Soil Science* 72: pag: 359-394. November 1992.

U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1973. *Water Quality Criteria 1972. Section V. Agricultural Uses of Water. Water for Irrigation.* EPA R3.73.035.



**APENDICE 3.1**  
**COEFICIENTES DE PARTICION SOLIDO/LIQUIDO EN EL SUELO**

<b>Elemento</b>	<b>ln K<sub>p</sub> [l/kg]</b>						
Ac	7,3	Cs	8,4	Na	4,6	Sc	6,9
Ag	4,8	Cu	3,6	Nb	7,6	Se	5,0
Al	7,3	F	5,0	Ni	5,7	Si	4,7
Am	9,2	Fe	6,7	Np	3,2	Sn	6,1
As	5,3	Fr	5,5	Os	6,1	Sr	3,0
At	2,3	Ga	7,3	P	3,2	Ta	6,8
Au	3,2	Ge	3,2	Pa	7,5	Tc	-2,3
B	1,1	Hf	7,3	Pb	9,7	Te	7,5
Ba	4,1	Hg	2,3	Pd	5,2	Th	8,1
Be	6,7	I	1,5	Po	6,0	Ti	6,9
Bi	6,1	In	7,3	Pt	4,5	Tl	7,3
Br	2,0	Ir	5,0	Pu	7,1	U	2,5
C	2,9	K	4,0	Ra	10,5	V	6,9
Ca	3,4	La	6,5	Rb	5,2	W	5,0
Cd	3,7	Li	5,7	Re	3,7	Y	6,6
Cl	-1,4	Mg	1,5	Rh	4,1	Zn	7,2
Cm	9,8	Mn	6,6	Ru	6,9	Zr	7,7
Co	7,2	Mo	4,8	S	5,7		
Cr	3,4	N	-0,7	Sb	5,0		