



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY
UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION



INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS
34100 TRIESTE (ITALY) - P.O.B. 506 - MIRAMARE - STRADA COSTIERA 11 - TELEPHONE: 2340-1
CABLE: CENTRATOM - TELEX 460893-1

SMR/220-36

COLLEGE ON SOIL PHYSICS
2 - 20 November 1987

"Isotope and Radiation Techniques in Soil
Physics and Irrigation Studies 1983"

"Diagnostic Criteria for Soil and
Water Salinity in Venezuela"

Professor I. PLA SENTIS
Universidad Central de Venezuela
Maracay, Venezuela

Reprint from

**"ISOTOPE AND RADIATION TECHNIQUES
IN SOIL PHYSICS
AND IRRIGATION STUDIES 1983"**

Memoria encargada

**SISTEMA INTEGRADO
AGUA-CULTIVO-SUELO-MANEJO
PARA EVALUAR LA CALIDAD
DE AGUA PARA RIEGO**

I. PLA-SENTIS

Instituto de Edafología,
Facultad de Agronomía,
Universidad Central de Venezuela,
Maracay, Venezuela

Abstract-Resumen

**INTEGRATED WATER-CROP-SOIL-MANAGEMENT SYSTEM FOR EVALUATING THE
QUALITY OF IRRIGATION WATER.**

The authors make use of an independent balance of the salts and ions present in the water available for irrigation, based on the residence times in the soil solution that are allowed by solubility limits and drainage conditions, to develop an efficient system for evaluating the quality of such water which combines the factors: water, crop, soil and management. The system is based on the principle that such quality depends not only on the concentration and composition of the salts dissolved in the water, but also on existing possibilities and limitations in using and managing it in respect of the soil and crops, with allowance for the crop's tolerance of salinity, drainage conditions and hydrological properties of the soils, climate and current or potential practices for the management of the irrigation. If this system is used to quantify approximately the time behaviour of the concentration and composition of the salts in the soil solution, it is possible not only to predict the effects on soil, crops and drainage water, but also to evaluate the various combinations of irrigation water, soil, crops and management and to select the most suitable. It is also useful for fairly accurately diagnosing current problems of salinity and for identifying alternatives and possibilities for reclamation. Examples of its use for these purposes in Venezuela are presented with particular reference to the diagnosis of the present and future development of "salino-sodic" and "sodic" soils by means of low-salt irrigation water spread over agricultural soils with very poor drainage in a sub-humid or semi-arid tropical climate. The authors also describe the use of radiation techniques for gaining an understanding of the relations between the factors making up the system and for improving the quantitative evaluations required to diagnose problems and to select the best management methods for the available irrigation water.

**SISTEMA INTEGRADO AGUA-CULTIVO-SUELO-MANEJO PARA EVALUAR LA CALIDAD
DE AGUA PARA RIEGO.**

Se utiliza un balance independiente de las sales e iones presentes en las aguas disponibles para riego, basado en sus posibilidades de permanencia en la solución del suelo de acuerdo a los límites de solubilidad y condiciones de drenaje, con el fin de desarrollar un sistema

racional de evaluación de la calidad de dichas aguas, en el que se integran los factores agua, cultivo, suelo y manejo. Se basa en el principio de que dicha calidad no depende solamente de la concentración y composición de las sales disueltas en el agua, sino de las posibilidades y limitaciones para su uso y manejo en relación a suelos y cultivos, para lo cual se toman en cuenta la tolerancia del cultivo a la salinidad, las condiciones de drenaje y propiedades hidrológicas de los suelos, el clima y las prácticas actuales o potenciales para manejo del riego. La utilización del sistema para cuantificar en forma aproximada la evolución de la concentración y composición de las sales en la solución del suelo permite no solo prever los efectos sobre suelos, cultivos y aguas de drenaje, sino también evaluar las diferentes combinaciones de agua de riego, suelo, cultivos y manejo, y seleccionar las más convenientes. Asimismo es útil para realizar diagnósticos bastante precisos de problemas actuales de salinidad, y para establecer las alternativas y posibilidades de recuperación. Se presentan ejemplos de su uso para dichos fines en Venezuela, haciendo hincapié en el diagnóstico del desarrollo actual y potencial de suelos "salino-sódicos" y "sódicos" con aguas de riego de bajo contenido de sales en suelos agrícolas con drenaje muy deficiente, y con clima tropical subhúmedo o semiárido. Se señala la utilidad que podrían tener el uso de técnicas de radiación en el entendimiento de las relaciones entre los factores incluidos en el sistema, y en el mejoramiento de las evaluaciones cuantitativas requeridas para el diagnóstico de los problemas y la selección del mejor uso y prácticas de manejo del agua de riego disponible.

1. INTRODUCCION

Los problemas de salinización de suelos revisten particular importancia, especialmente en agricultura de regadío, por su acción sobre las propiedades físicoquímicas de los mismos, sobre los cultivos y sobre los animales y personas que los consumen. Dichos problemas han sido más estudiados en zonas áridas, donde tienen características específicas, ya que la agricultura bajo riego convencional se ha aplicado tradicionalmente en dichas áreas, mientras que en otros climas el riego se ha usado más que todo para el cultivo de arroz bajo inundación, condiciones bajo las cuales el problema de salinidad es menos frecuente. Al irse expandiendo el riego como fuente suplementaria de agua a zonas con climas semiáridos o subhúmedos, con distribución estacional de las lluvias, especialmente en suelos con drenaje restringido y en latitudes tropicales con altas tasas de evapotranspiración, se han presentado problemas de salinización de mayor complejidad [1-3], difíciles de detectar a corto plazo y, por ello, menos analizados. Sin embargo, por provocar efectos aún más permanentes y difíciles de resolver, estos casos deben estudiarse cuidadosamente, determinándose las prácticas que resulten convenientes para su prevención.

Aunque es de gran interés conocer el contenido y composición de sales en el agua desde el punto de vista de salinización de los suelos a los cuales va a aplicar con el riego, es necesario tener en consideración que, de acuerdo a las condiciones del clima, propiedades hidrológicas del perfil del suelo y facilidades del drenaje, dicha concentración y composición pueden variar mucho en la solución del suelo

resultante. Es por ello que la calificación de salinidad de aguas de riego no puede hacerse en forma aislada, sin tomar en cuenta los demás factores que inciden sobre las concentraciones finales de la solución del suelo. En el proceso de salinización revisten particular importancia los cambios que pueden ocurrir en la composición de la solución del suelo por la precipitación de ciertas sales de solubilidad limitada, tales como carbonatos de Ca y Mg y sulfatos de Ca. En cualquier caso, condiciones que favorezcan dicho proceso, como predominio de bicarbonatos y sulfatos en el agua, pérdidas de CO₂, mal drenaje, etc., contribuirán a un enriquecimiento relativo de Na en la solución del suelo y concurrentemente en el complejo de intercambio, aunque se presentará una disminución en el contenido total de sales en la solución.

2. REQUERIMIENTOS DE LIXIVIACION Y DRENAJE PARA CONTROL DE LA SALINIZACION DE LOS SUELOS

Las plantas no toman las sales en la misma proporción con que absorben agua y por ello las aportadas con el riego tienden a acumularse en la solución del suelo. Esto puede evitarse aplicando un exceso de agua de riego por encima del uso consuntivo del cultivo para lixiviar esas sales y evitar su acumulación en la zona crítica del suelo. Cuando este contiene originalmente una cantidad excesiva de sales en solución, será necesario aplicar también un exceso de agua para lixiviarlas. En cualquier caso, la cantidad de agua a aplicar en exceso dependerá del contenido y tipo de sales en el agua de riego [4], del contenido original de sales en la solución del suelo, del clima, y de la efectividad de la lluvia lixiviando sales en la estación húmeda [2]. El exceso de agua de riego requerido para el control de sales en el suelo ha sido llamado "requerimiento de lixiviación" [5].

Cuando el exceso de agua de riego o lluvia que penetra en el suelo no se elimina debido a déficits en el drenaje interno, su efecto sobre la salinización puede ser contraproducente, al provocar en algunos casos un incremento más acelerado de ella y, en otros, el ascenso de sales acumuladas en el subsuelo hasta el suelo superficial. Ambas situaciones son originadas por ascenso del nivel freático general, o por formación de mesas de agua colgantes cuando el déficit en drenaje interno se debe más que todo a la baja permeabilidad de algún estrato en el perfil del suelo. Para evitar que eso suceda, es necesario proveer un sistema de drenaje capaz de eliminar el exceso de agua, cuyo diseño y posibilidades prácticas y económicas dependerá tanto del "requerimiento de lixiviación" como de las propiedades hidrológicas del perfil del suelo.

Se ha planteado [6, 7] la posibilidad de reducir los requerimientos de lixiviación de sales del suelo utilizando métodos de riego que por su frecuencia y control preciso permitan, por un lado, que gran parte de las sales se acumulen y precipiten en zonas profundas del suelo y, por el otro, provoquen un mayor desarrollo y

actividad radicular, con la mayor absorción de agua, en zonas más superficiales libres de excesos de sales. Ello reduce los requerimientos de agua para riego y de drenaje, pero sólo es aplicable en situaciones donde sean económicos y prácticos la utilización y control preciso de dichos sistemas de riego. Además, no está claro ni probado si dicho sistema de control de sales puede mantenerse a largo plazo sin un incremento progresivo de la salinización en suelo cada vez más superficial. En climas donde en una parte del año hay aportes no controlables de agua de lluvia, sería sumamente peligroso adoptar este criterio de control de salinidad.

3. ESTIMACION DE LA CALIDAD DE AGUAS PARA RIEGO

Desde el punto de vista cuantitativo, para establecer el balance de sales en el suelo es necesario considerar algunos factores fijos o poco controlables, a saber:

- a) Suelo (propiedades físicas e hidrológicas)
 - b) Clima (precipitación y uso consuntivo)
 - c) Agua (cantidad y sales en solución)
- y de otros, controlables hasta cierto límite, como:

- a) Cultivos
- b) Drenaje artificial
- c) Manejo del riego

los cuales permiten atenuar, evitar o escapar de los problemas de afectación por sales o sodio derivados de los factores fijos.

En todas las aguas usadas para irrigación existen en forma predominante los iones bicarbonato, cloruro, sulfato, calcio, magnesio y sodio. Para calificarlas, generalmente se ha tomado en cuenta la salinidad total, sus contenidos de sodio y de bicarbonatos y, ocasionalmente, sus contenidos de ciertos elementos tóxicos como B, Li, etc. En cualquier caso, su calificación está determinada por el peligro potencial de causar problemas ya sea en cuanto a reducciones en rendimiento o calidad de los cultivos, o al requerimiento de prácticas especiales de manejo. Hoy en día existe la tendencia a definir cuantitativamente las posibilidades de uso de un agua de riego en base a las condiciones específicas en que dicha agua va a ser usada, incluyendo propiedades del suelo, clima, cultivos y manejo del riego [1, 8-11].

Usando un agua determinada, la acumulación de sales y sodio en el suelo dependerá de la fracción del agua infiltrada que pase a través y hacia abajo de la zona radicular y de las posibilidades de precipitación de sales poco solubles como carbonatos de Ca y Mg y en algunos casos sulfatos de Ca en el suelo [1, 4, 12, 13]. También dependerá de la eficiencia con que dicha agua infiltrada actúe lixiviando las sales, la cual está determinada fundamentalmente por el tipo de suelo y la forma de aplicación del agua de lixiviación. Esta eficiencia es menor en suelos pesados con tendencia a agrietarse, cuando el agua para lixiviación se aplica en

grandes cantidades de una sola vez, y es mayor en suelos livianos, con aplicaciones frecuentes y pequeñas de agua de lixiviación. Pla [1] demostró que en suelos con permeabilidad lenta, pero con escasa tendencia a agrietarse, situación típica de suelos aluviales limosos, la eficiencia de lixiviación de sales del suelo superficial aumentaba cuando se permitía un agotamiento mayor del agua utilizable o aprovechable antes del riego.

Los límites máximos de sales y sodio en el suelo, determinantes de la fracción del agua infiltrada que debe pasar a través de la zona radicular (requerimiento de lixiviación), dependerán de la tolerancia del cultivo a las sales y de las propiedades del suelo, respectivamente. La cantidad de agua de riego aplicada, además de la requerida para satisfacer el uso consuntivo del cultivo, debe proveer un exceso para cumplir con dichos requerimientos de lixiviación. Estos a su vez determinarán las necesidades de drenaje y la intensidad del sistema de drenaje artificial en el caso de que sea necesario corregir deficiencias en los drenajes naturales.

En conclusión, un esquema de clasificación para aguas de riego o cualquier ecuación para predecir sus efectos en el suelo debe tomar en cuenta las posibilidades o necesidades de lixiviación. Utilizando la relación que existe entre lixiviación y acumulación de Na y Ca + Mg en la solución del suelo, es posible predecir aproximadamente la concentración total de sales y la "Relación de Adsorción de Sodio" en dicha solución cuando nos acercamos a condiciones de equilibrio. Para ello es necesario considerar las solubilidades de las diferentes sales de Na, Ca y Mg bajo las condiciones prevalecientes en el suelo. Como los valores de "Relación de Adsorción de Sodio" en el extracto de saturación (RASES) pueden ser usados como índice bastante preciso de la acumulación de Na intercambiable en el suelo en el rango de 5-30 correspondiente a los límites de porcentajes de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos afectados por Na, pueden establecerse valores límites de RASES [9] dependiendo del suelo, cultivo, etc., en la misma forma que se ha hecho hasta ahora para salinidad total.

La predicción de las concentraciones de sales e iones en la solución del suelo cuando se alcance equilibrio es importante para clasificar las aguas de riego en relación a los requerimientos y posibilidades de lixiviación y, por lo tanto, con referencia a las condiciones de drenaje existentes o requeridas en áreas bajo riego. Ello es indispensable para una determinación general de las demandas de riego y drenaje de un área que va a ser regada con un agua específica. Para esto, conjuntamente con los requerimientos de lixiviación deben tomarse en cuenta los aportes de agua por lluvia o filtraciones subterráneas y el uso consuntivo de los cultivos en el área. La selección de las prácticas de manejo y cultivo más apropiados para cumplir con las necesidades así establecidas dependerá de consideraciones prácticas y económicas.

Uno de los sistemas de calificación más utilizado en las últimas décadas, y aún hoy en día, es el propuesto por el Laboratorio de Salinidad del Servicio de Investigaciones Agrícolas del Departamento de Agricultura de Estados Unidos [14],

desarrollado para condiciones promedio en la región árida del SO de Estados Unidos. La sencillez del sistema 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 y está provocando muchos errores en los diagnósticos de problemas de salinización, y en las recomendaciones de prácticas de manejo para prevenirlos. En fechas más recientes, y por iniciativa de investigadores de la misma Institución, se han establecido criterios y desarrollado sistemas de evaluación de calidad de aguas para riego que tratan de precisar y ampliar el rango de condiciones para su utilización [10, 15], los cuales se recogen en publicaciones de la FAO [16, 17], proponiéndose guías para su uso. Al establecer dichos criterios de calificación, se incurre en la utilización de ecuaciones empíricas basadas en resultados experimentales obtenidos bajo condiciones muy particulares de clima, suelos, drenaje, cultivos, y manejo de riego.

El hecho de que las diferentes ecuaciones propuestas sean de naturaleza eminentemente empírica, y las muy particulares condiciones asumidas o experimentadas para su formulación, hace que la utilización sea restringida a situaciones similares a ellas, y que aun ahí se puedan presentar desviaciones de lo predicho [18] por factores asumidos, difíciles de controlar en la práctica. Todo ello hace que el sistema no tenga aplicación universal, especialmente en los muy particulares problemas de salinización que pueden presentarse en zonas tropicales con clima semiárido o subhúmedo [3].

4. SISTEMA INTEGRADO AGUA-CULTIVO-SUELO-MANEJO PARA LA CALIFICACION DE AGUAS PARA RIEGO

El sistema de calificación que aquí presentamos ha sido desarrollado en base a numerosas evidencias experimentales y a observaciones de campo antes citadas, y evaluado bajo las más variadas situaciones en zonas de riego [19]. Se basa en un balance independiente de los iones más comunes en las aguas de riego y en la solución del suelo, de acuerdo a la fracción de lixiviación efectiva (LF) y a las solubilidades máximas de las sales bajo diferentes condiciones. Con ello, y al no asumir "a priori" condiciones particulares para su uso, no hay restricciones en cuanto al empleo del sistema para el diagnóstico de problemas potenciales de salinización bajo las más variadas condiciones de clima, suelo, cultivos y manejo del riego. Además, por la flexibilidad del sistema es posible establecer las combinaciones más apropiadas de suelos, cultivos y manejo del riego que conduzcan a los balances de sales e iones más adecuados para prevenir dichos problemas. Las bases teóricas del sistema y su desarrollo detallado aparecen en publicaciones previas [1, 4, 9, 20, 21]. Para facilitar su aplicación en la práctica se hacen algunas simplificaciones, basadas en deducciones teóricas y mediciones a nivel experimental y de campo, después de comprobar que no afectan apreciablemente la precisión

CUADRO I. ECUACIONES PARA CALCULAR L(ST)F Y L(NA)F PARA CADA GRUPO DE CONDICIONES Y EN FUNCION DE LOS VALORES MAXIMOS PREESTABLECIDOS DE STES Y RASES

CONDICIONES	L(ST)F	L(NA)F
BR ≤ CAR BR ≤ 10xLF CASR ≤ 30xLF	(NAR + CAR)/STES	$2xNAR^2/RASES^2 \times CAR$
BR ≤ CAR BR > 10xLF CASR ≤ 30xLF	(NAR+CAR-BR)/(STES-10)	$\frac{RASES^2 \times (CASR+CACLR)^2 + 80NAR^2}{20 RASES} - \frac{(CASR+CACLR)}{20}$
* BR ≤ CAR BR ≤ 10xLF CASR > 30xLF	(NAR+CAR-CASR)/(STES-30)	-----
BR ≤ CAR BR > 10xLF CASR > 30xLF	(NAR+CAR-BR-CASR)/(STES-40)	$\frac{RASES^2 \times CACLR^2 + (320xNAR^2)^{1/2}}{80 \times RASES} - \frac{CACLR}{80}$
BR > CAR	NAR/(STES-CAR)	$NAR/RASES \times (CAR/2)^{1/2}$

Br: Bicarbonatos; S: Sulfatos; Cl: Cloruros; CA: Ca + Mg; NA: Na; ST: Sales totales; RAS: Potencia de adsorción de sodio; ES: Extracto de saturación del suelo; R: Agua de riego; L: Requerimiento de lixiviación para control de (ST) o (NA); F: Eficiencia de lixiviación; CACLR = CAR-BR-SR; CASR = CAR-BR-CACLR. (* Situación poco frecuente).

de los diagnósticos. Como máxima concentración de bicarbonatos de Ca y Mg (CAB) en la solución del suelo, cuando en el agua de riego la concentración de Ca + Mg (CAR) es igual o mayor que la concentración de bicarbonatos (BR) se toma un valor fijo de 10 meq/L. Cuando BR es mayor que CAR, se espera que la máxima concentración de CAB en la solución de suelo se aproxime a CABR. En el caso del sulfato de Ca (CAS) se toman 30 meq/L como la máxima concentración en la solución del suelo. Aunque esta concentración puede subir apreciablemente en soluciones muy salinas, con alto contenido de cloruros, dentro de los rangos de salinidad permisible en la gran mayoría de los suelos para uso agrícola, las desviaciones a partir de ese valor no afectan en forma apreciable los diagnósticos. En el caso de los bicarbonatos de Ca y Mg, las desviaciones son aún menores y dependientes de la presión de CO₂ y de la proporción Ca/Mg en la solución.

Aunque en base a valores reportados por numerosos investigadores y a nuestra propia experiencia se propone el uso de valores de infiltración básica como índices de la permeabilidad del perfil del suelo (alta > 5 cm/h; mediana 0,5-5 cm/h; baja 0-1-0,5 cm/h; muy baja < 0,1 cm/h) y determinados valores límite de concentración de sales (STES) y de índices de Na (RASES) en el extracto de saturación,

CUADRO II. CLASIFICACION DE AGUAS DE RIEGO DE ACUERDO AL PELIGRO DE ACUMULACION DE SALES TOTALES (ST) O DE SODIO (NA) EN EL SUELO (L(ST)F y L(NA)F calculados con ecuaciones del Cuadro I)

PERMEABILIDAD DEL SUELO (infiltración hídrica)	STES MAXIMO (mm/l)	BASES MAXIMO	L(ST)F (para ST) - L(NA)F (para NA)																							
			< 0,1	0,01-0,02			0,02-0,05			0,05-0,10			0,10-0,20			0,20-0,30			> 0,30							
				ST ₁₁	NA ₁₁	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₁₁	NA ₁₁	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₁	NA ₂₁	ST ₂₂		NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₁	NA ₃₁	ST ₃₂	NA ₃₂
ALTA (>5 cm/hora)	40	20	ST ₁₁	NA ₁₁	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₁₁	NA ₁₁	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₁	NA ₂₁	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₁	NA ₃₁	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃
	80	30	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₁	NA ₂₁	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₁	NA ₃₁	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃	ST ₄₁	NA ₄₁	ST ₄₂	NA ₄₂	ST ₄₃	NA ₄₃	ST ₄₄	NA ₄₄
	160	40	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃	ST ₄₁	NA ₄₁	ST ₄₂	NA ₄₂	ST ₄₃	NA ₄₃	ST ₄₄	NA ₄₄	ST ₄₅	NA ₄₅	ST ₄₆	NA ₄₆	ST ₄₇	NA ₄₇
MEDIANA (0,5-5 cm/hora)	40	15	ST ₁₁	NA ₁₁	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₁₁	NA ₁₁	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₁	NA ₂₁	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₁	NA ₃₁	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃
	80	20	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₁	NA ₂₁	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₁	NA ₃₁	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃	ST ₄₁	NA ₄₁	ST ₄₂	NA ₄₂	ST ₄₃	NA ₄₃	ST ₄₄	NA ₄₄
	160	30	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃	ST ₄₁	NA ₄₁	ST ₄₂	NA ₄₂	ST ₄₃	NA ₄₃	ST ₄₄	NA ₄₄	ST ₄₅	NA ₄₅	ST ₄₆	NA ₄₆	ST ₄₇	NA ₄₇
BAJA (0,1-0,5 cm/hora)	40	10	ST ₁₁	NA ₁₁	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₁₁	NA ₁₁	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₁	NA ₂₁	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₁	NA ₃₁	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃
	80	15	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₁	NA ₂₁	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₁	NA ₃₁	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃	ST ₄₁	NA ₄₁	ST ₄₂	NA ₄₂	ST ₄₃	NA ₄₃	ST ₄₄	NA ₄₄
	160	20	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃	ST ₄₁	NA ₄₁	ST ₄₂	NA ₄₂	ST ₄₃	NA ₄₃	ST ₄₄	NA ₄₄	ST ₄₅	NA ₄₅	ST ₄₆	NA ₄₆	ST ₄₇	NA ₄₇
MUY BAJA (<0,1 cm/hora)	40	5	ST ₁₁	NA ₁₁	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₁₁	NA ₁₁	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₁	NA ₂₁	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₁	NA ₃₁	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃
	80	10	ST ₁₂	NA ₁₂	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₁	NA ₂₁	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₁	NA ₃₁	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃	ST ₄₁	NA ₄₁	ST ₄₂	NA ₄₂	ST ₄₃	NA ₄₃	ST ₄₄	NA ₄₄
	160	15	ST ₁₃	NA ₁₃	ST ₂₂	NA ₂₂	ST ₂₃	NA ₂₃	ST ₃₂	NA ₃₂	ST ₃₃	NA ₃₃	ST ₄₁	NA ₄₁	ST ₄₂	NA ₄₂	ST ₄₃	NA ₄₃	ST ₄₄	NA ₄₄	ST ₄₅	NA ₄₅	ST ₄₆	NA ₄₆	ST ₄₇	NA ₄₇

ST NA

1 - Muy buena calidad
2 - Buena calidad
3 - Mala calidad

4 - Muy mala calidad
5 - No utilizable

1 - Cultivo sensible a las sales (STES 40 mm/l)
2 - Cultivo tolerante a las sales (STES 40-80 mm/l)
3 - Cultivo muy tolerante a las sales (STES 80-160 mm/l)

ST₁₁ - Cultivo sensible a las sales (STES < 20 mg/l)
 ST₁₂ - Cultivo tolerante a las sales (STES 20-80 mg/l)
 ST₁₃ - Cultivo muy tolerante a las sales (STES 80-160 mg/l)

4 - Muy mala calidad
 5 - No utilizable

1 - Muy buena calidad
 2 - Buena calidad
 3 - Mala calidad

CUADRO III. EJEMPLOS DE CLASIFICACION DE CUATRO AGUAS DE RIEGO UTILIZADOS EN SUELOS DE LAS ZONAS DELIMITADAS EN EL MAPA DE LA FIG.1

AGUA DE RIEGO (2° Mapa)	mg/litro						PERM. DEL SUELO	STES MAX. mg/l	L(ST)F	BASES MAX.	L(NA)F	SALES PRECIP.	CLASIFICACION
	Ca	Mg	Cl	SO ₄	Na	CO ₃							
12	16,9	16,5	4,3	8,3	14,6	12,6	ALTA	40	0,07	20	0,12	---	ST ₁₁ NA ₂₁
								80	0,26	20	0,40	CAC, CAS	ST ₁₂ NA ₁₂
								160	0,09	40	0,06	" "	ST ₁₃ NA ₁₃
(13)	15,4	1,8	2,1	1,2	12,7	12,3	BAJA	40	0,43	10	0,04	---	ST ₁₁ NA ₂₁
								80	0,04	15	0,03	CAC, CAS	ST ₁₂ NA ₁₂
								160	0,02	20	0,02	" "	ST ₁₃ NA ₁₃
(17)	5,4	8,5	5,2	8,2	4,5	6,2	BAJA	40	0,02	10	0,02	CAC	ST ₁₁ NA ₂₁
								80	0,01	15	0,01	"	ST ₁₂ NA ₁₂
								160	0,01	20	0,01	"	ST ₁₃ NA ₁₃
(18)	2,7	8,7	4,0	6,2	6,2	-	MUY BAJA	40	0,02	5	0,10	CAC	ST ₁₁ NA ₂₁
								80	< 0,01	10	0,05	"	ST ₁₂ NA ₁₂
								160	< 0,01	15	0,03	"	ST ₁₃ NA ₁₃

CAC: Carbonatos de Ca y Mg CAS: Sulfato de Ca.

Interpretación del Cuadro III

- (6): Problemas de salinización predominando sobre los de sodificación en todas las situaciones. De muy mala, mala y buena calidad respectivamente para cultivos sensibles, tolerantes y muy tolerantes a las sales en suelos de alta permeabilidad, mientras que en suelos de mediana permeabilidad y para los mismos cultivos en orden creciente de tolerancia a las sales resulta ser no utilizable, de muy mala y de regular calidad. En el proceso de acumulación de sales precipitan carbonatos de Ca y Mg y sulfato de Ca en el suelo.
- (15): El problema de salinización predomina sobre el de sodificación en todas las situaciones. En suelos de baja permeabilidad el agua pasa de ser no utilizable para cultivos sensibles, a ser de regular a buena calidad para cultivos tolerantes y muy tolerantes a las sales respectivamente. En el proceso de salinización precipitan tanto carbonatos de Ca y Mg, como sulfato de Ca en el suelo.
- (17): El problema de sodificación predomina en suelos con muy baja permeabilidad, y anda asociado al de salinización en suelos de baja permeabilidad. En suelos de baja permeabilidad el agua es regular a buena calidad de acuerdo al nivel de salinidad tolerado por el cultivo, pero en suelos de muy baja permeabilidad, debido al peligro de sodificación, pasa a ser de mala calidad en el caso de niveles máximos de salinidad para cultivos sensibles.
- (18): El problema de sodificación predomina sobre el de salinización en todas las situaciones, siendo el agua no utilizable de muy mala y de mala calidad respectivamente para niveles máximos de salinidad correspondientes a cultivos sensibles, tolerantes y muy tolerantes en suelos de muy baja permeabilidad.

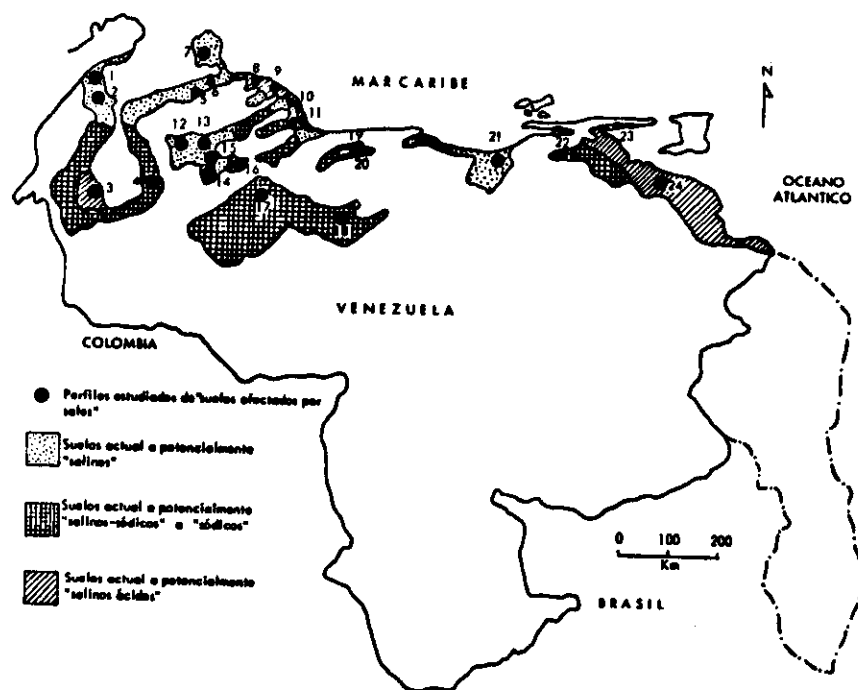


FIG. 1. Zonas con suelos actual o potencialmente afectados por sales en Venezuela.

de acuerdo a cultivos y suelos, la flexibilidad del sistema permite que, en casos donde la experiencia y condiciones locales así lo justifiquen, se modifiquen dichos límites sin alterar su uso.

Los índices utilizados para calificar las aguas de riego son los valores de lixiviación efectiva requerida para control de sales totales (L(ST)F) o sodio (L(NA)F) calculados con las ecuaciones del Cuadro I, para cada combinación de condiciones dadas. Su deducción puede facilitarse a través del uso de nomogramas desarrollados al efecto [21]. Con los valores de L(ST)F y L(NA)F se pueden encontrar las clases de agua para riego en el Cuadro II. En ese Cuadro las clases se basan en los valores de requerimientos de lixiviación para controlar la acumulación de sales y Na en la zona radicular, dentro de valores límites determinados por dificultades derivadas de tasas de percolación bajas, y altos requerimientos de drenaje. Los valores máximos de STES y RASES son presentados como valores de referencia para seleccionar cultivos, suelos y prácticas de manejo de riego para prevenir problemas potenciales de salinidad y permeabilidad.

En el Cuadro III se dan algunos ejemplos de clasificación, empleando el sistema aquí propuesto (véanse los Cuadros I y II), de cuatro aguas de riego utilizadas en suelos de las zonas delimitadas en el mapa de la Fig. 1.

5. APLICACIONES DEL SISTEMA

Una vez establecidos los requerimientos de lixiviación efectiva (L(ST)F o L(NA)F) para un determinado suelo (valores límites de RASES) y cultivo (valores límites de STES), pueden determinarse las posibilidades prácticas y económicas de aplicarlos, tomando en cuenta las diferentes alternativas. Las posibilidades prácticas dependerán fundamentalmente de la disponibilidad de agua para aplicar el exceso requerido para la lixiviación, y de las propiedades hidrológicas del suelo que permitan infiltrar y drenar ese sobrante en un período de tiempo razonable, sin causar problemas al cultivo. Las posibilidades económicas están supeditadas fundamentalmente a los requerimientos de drenaje artificial para eliminar el exceso de agua sin que ascienda el nivel freático y, en algunos casos, a los costos extra derivados de un control más preciso del riego y de la cantidad de agua y tiempo extra para aplicarla.

Los factores fundamentales a ser considerados serían, además del valor de L (el que resulta mayor entre L(ST) y L(NA)) y F, la tasa de infiltración básica, el uso consuntivo del cultivo, y la capacidad de almacenamiento del agua aprovechable para el cultivo del suelo, los cuales determinarán los requerimientos de riego (duración e intervalos) y drenaje.

La duración del riego tiene un máximo determinado por el suministro de agua, el costo de aplicación y el tiempo durante el cual el cultivo puede estar sometido a condiciones de mucha humedad y baja aireación, mientras se lleva a cabo. Se puede reducir la duración del riego bajando el intervalo entre riegos.

El requerimiento de drenaje puede resultar muy alto, en el sentido de exigir períodos de tiempo demasiado largos para la aplicación de los riegos, o sistemas de drenaje artificial imprácticos o antieconómicos. Si ese alto requerimiento de drenaje se debe a valores altos de L(ST), se puede recurrir a varias alternativas, de acuerdo a las circunstancias:

- Utilización de un cultivo más tolerante a las sales, con lo que subirá el valor de STES, y con ello bajará L(ST).
- Utilización de cultivos que no sufran deterioro con riegos prolongados.
- Aplicación del agua de lixiviación, no en forma constante con cada riego, sino de manera intensiva, sin cultivos, cada cierto período de tiempo, cuando se alcancen niveles críticos de sales en el suelo.

CUADRO IV. CONDICIONES PARA EL DESARROLLO DE DIFERENTES TIPOS DE "SUELOS AFECTADOS POR SALES" DE ACUERDO A LOS CRITERIOS DEL SISTEMA INTEGRADO DE CALIFICACION AQUI PRESENTADO

(véanse los Cuadros I—III)

AGUA	DRENAJE	CLIMA	SUELO "AFECTADO POR SALES"				
STR (mg/l) Composición iónica	Infiltración hídrica (mm/hora)	P > ETP (mm/año)	STES (mg/l)	Composición iónica	Sales precipitadas	Clasificación	No. en Mapa *
< 10 B > S > CL CA > NA	< 0,5	< 2	> 40	S > CL > B NA > CA	CAC CAS	SALINO	21
> 10 S > CL > B NA < CA	0,5-5,0	< 2	> 40	S > CL > B NA > CA	CAC (CAS)	SALINO	5, 6, 7
	< 0,5	< 2 (2-4)	> 40	S > CL > B (CL > S > B NA > CA (NA < CA)	CAC CAS	SALINO	1, 2 10, 11, 12 13, 14 15, 22, 23
< 10 B > S > CL CA > NA	< 0,5	4-6	> 40	S > CL > B NA > CA	CAC	SALINO -SÓDICO	4, 16 17, 19
			(Lixiviación. Condiciones de ensamblaje) $(2Na^+ + SO_4^{2-} + 2Cl^- + 2H_2O \rightleftharpoons S^{2-} + 2NaHCO_3)$				
			< 40	B > S > CL NA > CA	CAC	SÓDICO	19
< 10 B > S > CL NA > CA B > CA	0,5-5,0	< 2	20-40	B > S > CL	CAC	SÓDICO	18, 20
	< 0,5	2-4	< 40	NA > CA	CAC	SÓDICO	
	< 0,5	< 2	> 40	S > CL > B NA > CA	CAC	SALINO -SÓDICO	
			< 40	B > S > CL NA > CA	CAC	SÓDICO	

STR: Sales totales en el agua de riego; STES: Sales totales en el extracto de saturación del suelo.
P: Precipitación; ETP: Evapotranspiración potencial; (h) Ocasionalmente * Mapa en FIG. 1.

Si el alto requerimiento de drenaje se debe a L(NA), se puede recurrir a:

- Uso del suelo para cultivos que puedan ser manejados en condiciones de riego prolongados o por inundación continua.
- Uso de enmiendas en el suelo que al mejorar las condiciones hidrológicas logren bajar L(NA).
- Uso de enmiendas (generalmente yeso) en el agua de riego [20]. Esta alternativa, que permite bajar el valor de L(NA), puede resultar efectiva y práctica cuando las condiciones naturales de drenaje son muy pobres y difíciles de mejorar con drenes artificiales y cuando las aguas de riego tienen una baja concentración total de sales con alta proporción de bicarbonatos.

Ejemplos de estas aplicaciones para aguas, suelos y cultivos en zonas bajo riego en Venezuela, con evaluaciones positivas a nivel de campo, se han presentado en publicaciones previas [21]. Asimismo, el sistema ha sido utilizado para el establecimiento de criterios cuantitativos para regular el uso de aguas salinas en agricultura [22] y para determinar las alternativas de recuperación y manejo de suelos salino-sódicos [23] y salinos [24] con cultivos bajo riego en Venezuela.

La utilización del sistema en forma más general, y tomando en consideración los posibles efectos del clima sobre el régimen hídrico de los suelos ha permitido elaborar los esquemas de desarrollo del Cuadro IV. Estos, conjuntamente con estudios directos de perfiles de suelos y aguas, a nivel de campo y de laboratorio, se han utilizado para establecer el origen, distribución y diagnóstico de suelos afectados por sales en Venezuela [25], y delimitar las áreas con problemas actuales y potenciales de salinidad en sus diferentes manifestaciones (Fig. 1).

Entre los suelos actual o potencialmente "salinos" se incluyen aquellos cuya concentración, composición y distribución de sales en el perfil del suelo, asociado a condiciones climáticas, de drenaje y de composición y concentración de sales en las aguas disponibles, provoquen o puedan provocar al introducir el riego problemas en los cultivos derivados de la concentración total de sales en la solución del suelo. Según este criterio cualitativo, entran como "suelos salinos" aquellos que acumulan sulfato de sodio en climas áridos, o cloruro de sodio en climas áridos o semiáridos, independientemente de si los valores de relación de adsorción de sodio (RAS) de la solución son altos, ya que en ambos casos dicha acumulación va acompañada generalmente de precipitación de yeso, lo que unido a la baja hidrólisis del Na en ambas sales, en especial en el NaCl, permite su lixiviación del perfil del suelo sin un deterioro marcado en las propiedades físicas del suelo.

Los suelos actual o potencialmente "salino-sódicos" incluyen aquellos cuya concentración, composición y distribución de sales en el perfil del suelo, asociado a condiciones de drenaje, clima y de composición y concentración de sales en las aguas de uso potencial para riego, provoquen o puedan provocar al introducir el riego problemas de deterioro físico del suelo derivados de la acumulación de Na intercambiable. El desarrollo de suelos "sódicos" a partir de suelos salino-sódicos ricos en sulfato de Na parece ser un proceso común en áreas con drenaje muy deficiente donde se acumula materia orgánica y se mantienen condiciones de exceso de agua por períodos prolongados en la estación de lluvias, e incluso en la estación seca cuando el agua se aplica en forma de riego. Este proceso, de escasa significación en climas templados [26], parece ser la fuente actual y puede ser la fuente potencial de sodificación de grandes áreas de Venezuela donde se da la combinación de aguas, drenaje y clima señalados en el Cuadro IV. En los otros casos, la existencia aún en pequeñas cantidades de excesos de bicarbonato sobre Ca + Mg en las aguas aplicadas, llevarían en climas áridos, o en suelos con drenaje deficiente en otros climas, a la formación de suelos sódicos, en los cuales el Ca y Mg prácticamente desaparecen de la solución. Al airearse el suelo, y cerca de la superficie, parte

de esos bicarbonatos de Na se transforma en carbonato de Na, intensificando el problema.

Incluidos en el mapa, y no en los esquemas del Cuadro IV, están los suelos que hemos calificado como actual o potencialmente "salino-ácidos", los cuales son aquellos que conservando niveles, tipo y localización de sales totales que los ubicarían como salinos, presentan sin embargo pequeñas cantidades de Al (o mejor dicho, hidroxialuminio) en solución, lo que hace que su reacción sea ácida, con pH generalmente inferior a 5. Aunque este tipo de suelos aparece en muy escasas ocasiones en zonas templadas, en Venezuela ha sido detectado en zonas relativamente extensas [27], cuyos suelos se formaron aparentemente por procesos naturales de mejora de drenaje en sedimentos y suelos sulfato-ácidos. Las zonas donde aún las condiciones de drenaje mantienen los niveles freáticos altos en forma continua, son consideradas como potencialmente salino-ácidas. El proceso de desarrollo inicial de este tipo de suelos parece corresponder a la formación de suelos sulfato-ácidos [28, 29], acompañado de condiciones de clima árido a semiárido y drenaje deficiente.

6. USO DE ISOTOPOS Y TECNICAS DE RADIACION

La evaluación y utilización precisas de un sistema integrado como el propuesto requiere de un conocimiento continuo y detallado del balance de agua e iones específicos tanto en el suelo como en la planta, para las muy variables combinaciones de suelos, cultivos, clima y manejo del riego. Ello es particularmente importante, y a su vez difícil, en el caso menos estudiado y conocido del desarrollo de suelos salino-sódicos y sódicos en zonas tropicales semiáridas y subhúmedas, con suelos mal drenados, regados en la estación seca con aguas relativamente bajas en contenido de sales. Por lo lento y complejo del proceso, y la dificultad de detectar a corto plazo los efectos por otros procedimientos, se hace necesaria y conveniente la utilización de isótopos y técnicas de radiación que permitan detectar y precisar desde un comienzo la tendencia al desarrollo de dicho tipo de suelos afectados por sales, y su relación con el régimen hídrico del suelo tanto en la estación de lluvias como en la seca. Esto reviste particular importancia ya que, por la naturaleza prácticamente irreversible del problema, es indispensable un diagnóstico precoz que permita tomar a tiempo las medidas correctivas en cuanto a utilización y manejo de aguas y suelos para agricultura de riego en esas condiciones.

REFERENCIAS

[1] PLA-SENTIS, I., "Evaluation of the quality of irrigation waters with high carbonate content in relation to the drainage conditions", Trans. 9th Int. Congr. Soil. Sci. Adelaide, Australia, Vol. 1 (1968) 357.

- [2] PLA-SENTIS, I., Evaluación de la influencia de factores naturales y artificiales en la recuperación y prevención de desarrollo de suelos afectados por sales, *Agronomía Tropical* 21 5 (1971) 431.
- [3] PLA-SENTIS, I., "Salt and water balances in irrigated soils under tropical conditions", *New Developments in the Field of Salt Affected Soils, Proc. Symp. Cairo* (1972).
- [4] PLA-SENTIS, I., Evaluación cuantitativa de los efectos de los bicarbonatos en el agua de riego sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos y factores que influyen sobre la magnitud de tales efectos, *Rev. Fac. Agron., Maracay, Venezuela* (1967).
- [5] REEVE, R.C., "The relation of salinity to irrigation and drainage requirements", *Trans. 3rd. Congr. Int. Commission on Irrigation and Drainage, San Francisco* (1957) 10.175.
- [6] BERNSTEIN, L., FRANCOIS, L.E., Leaching requirements studies: Sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 37 (1973) 931.
- [7] RHOADES, J.D., et al., Minimizing the salt burdens of irrigation drainage water, *J. Environ. Qual.* 3 (4) (1974) 311.
- [8] PLA-SENTIS, I., "Calidad de aguas de riego y requerimientos de drenaje" (Memoria V Seminario Latinoamericano de Irrigación y III Jornadas Venezolanas de Riego, Caracas) Venezuela (1968) 85.
- [9] PLA-SENTIS I., "Calidad de aguas de riego como fuente de salinización y sodificación" (Actas VIII Reunión Latinoamericana de Fitotecnia, Bogotá) Colombia (1971) 213.
- [10] RHOADES, J.D., Quality of water for irrigation, *Soil Sci.* 113 (1972) 277.
- [11] SHALHEVET, J., Aspects of soil salinity and sodicity in relation to irrigation and reclamation (Symp. Israel-France, Bet Dagan, Israel), *Publ. Sp.* 39 (1974) 117.
- [12] DONEEN, L.D., Salinization of soil by salts in the irrigation water, *Trans. Am. Geophys. Union* 35 (1954) 943.
- [13] BOWER, C.A., OGATA, G., TUCKER, J.M., Sodium hazard of irrigation waters as influenced by leaching fraction and by precipitation of calcium carbonate, *Soil Sci.* 106 (1968) 29.
- [14] US SALINITY LABORATORY STAFF, Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, *US Dept. of Agriculture Handbook No. 60* (1954).
- [15] BERNSTEIN, L., Quantitative assessment of irrigation water quality, *Am. Soc. Test. Mater., Spec. Tech. Publ.* 416 (1967) 51.
- [16] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (Ed.), *Water Quality for Agriculture, Irrigation and Drainage, Paper No. 29, FAO, Rome* (1976).
- [17] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (Ed.), *Prognosis of Salinity and Alkalinity, FAO Soil Bull. No. 31, FAO, Rome* (1976).
- [18] BINGHAM, F.T., MAHLER, R.J., SPOSITO, G., Effects of irrigation water composition on exchangeable sodium status of a field soil, *Soil Sci.* 127 (4) (1976) 248.
- [19] PLA-SENTIS, I., DAPPO, F., "Field testing of a new system for qualifying irrigation waters", *Managing Saline Water for Irrigation (Proc. Int. Conf. Lubbock, Texas)* (1977) 376.
- [20] PLA-SENTIS, I., Calcium required as an amendment for irrigation waters with high bicarbonate content in relation to the drainage conditions, *Agrokém. Talajtan* 18 Budapest (1969) 183.
- [21] PLA-SENTIS, I., DAPPO, F., Sistema Racional para la Evaluación de Calidad de Aguas para Riego, *Suplemento Técnico No. 12, FUDECO, Barquisimeto, Venezuela* (1974).
- [22] PLA-SENTIS, I., DAPPO, F., "Criterios para regular el uso de aguas salinas en Agricultura", *Anales Juris Aquarum (Conf. Int. sobre Derecho y Administración de Aguas, Caracas)* Vol. 2 II, Venezuela (1975) 1085.

- [23] ALVAREZ, J.R., Requerimientos de lixiviación y alternativas de recuperación de un suelo salino-ácido en el Sistema de Riego El Cenizo, Tesis M.S., CIDIAT, Mérida, Venezuela, 1974.
- [24] SUCRE, R.E., Requerimientos de lixiviación y alternativas de recuperación de tres suelos afectados por sales en la depresión de Quíbor, Edo. Lara, Tesis M.S., UCV, Maracay, Venezuela (1982).
- [25] PLA-SENTIS, I., Origin, distribution and diagnosis of salt-affected soils in Venezuela, Experts Consultation Meeting, FAO, Rome (1977).
- [26] WHITTIG, L.D., JANITZKY, P., Mechanisms of formation of sodium carbonate in soils: I. Manifestation of biological conversions, J. Soil Sci. 14 (1963) 322.
- [27] PLA-SENTIS, I., FLORENTINO, A., "Diagnóstico de problemas de salinidad en suelos "salino-ácidos" de las llanuras costeras al norte de los Estados Falcón y Anzoátegui" (Memorias VII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo, San Cristóbal, 1982) Venezuela (1982).
- [28] PONS, L.J., "Outlines of the genesis, characteristics, classification and improvement of acid sulphate soils", Proc. Int. Symp. on Acid Sulphate Soils, Wageningen Vol. 1 (1973) 3.
- [29] FLORENTINO, A., PLA-SENTIS, I., "Características físico-químicas y mineralógicas de suelos "salino-ácidos" de las llanuras costeras del Estado Falcón" (Memorias VII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo, San Cristóbal, 1982) Venezuela (1982).

INTERNATIONAL CONFERENCE ON "SOIL SALINITY UNDER IRRIGATION -
PROCESSES AND MANAGEMENT"

BET-DAGAN, ISRAEL

MARCH 25-29, 1984

DIAGNOSTIC CRITERIA FOR SOIL AND WATER SALINITY IN VENEZUELA

by

I. PLA SENTIS
Universidad Central de Venezuela
Maracay, Venezuela

SUMMARY

The selection and use of appropriate diagnostic criteria for soil and water salinity under a particular set of conditions may be very useful both for deciding about the most convenient combination of crops and irrigation management to avoid potential salinization or sodification of soils, as well for the diagnosis of actual salinity problems. The relations between levels of salinity and sodicity (sodium adsorption ratio) in saturation extract and "effective leaching fraction", obtained through an independent balance of the different ions and salts present in irrigation water, are used as a basis for a salinity diagnostic model which allows the integration of the main factors involved, including water, crop, soil, and irrigation management. Both the theoretical and experimental basis for such balance, specially when precipitation of salts are involved, were reported in the past by the author.

The actual and potential salinity problems in present or projected irrigated areas in Venezuela are analyzed and reported based on the general use of the diagnostic model, the climate, and evidences of soils actually affected by salts. Eight situations, which cover the wide range of climate, soils and waters in those irrigate areas, from the more studied

actual or potential, salinization problems common in arid zones, to the much less known problems of sodification in semiarid to subhumid areas with soils of very low permeability and waters with very low electrolyte content, are presented as evidences of the rationality and flexibility of the model and diagnostic criteria included in it.

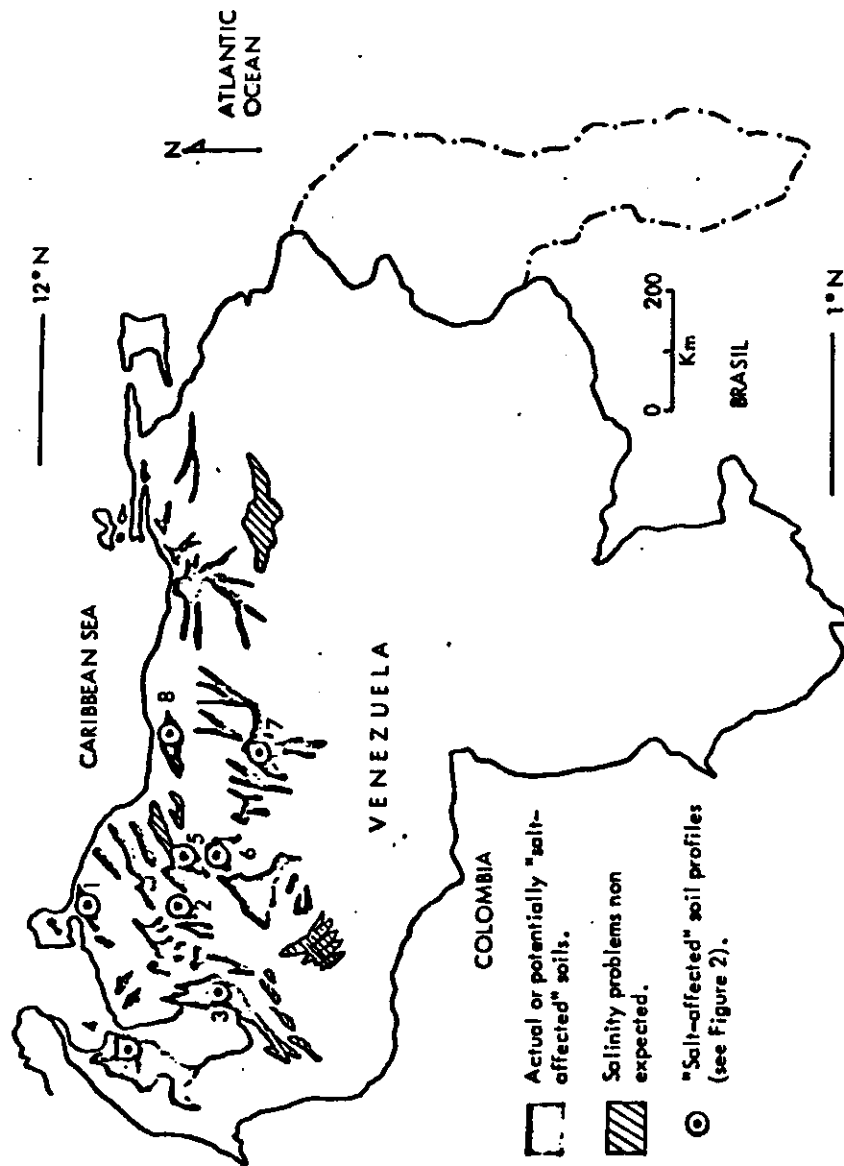
INTRODUCTION

The potential development of salinity problems in irrigated areas is universally accepted. Because of the difficulties and costs of reclamation of salt-affected soils, it is essential to prevent such development. This requires a diagnosis, with enough flexibility, to predict with easily available information, the possibilities of development of salinity problems, and the kind and levels to be reached under different conditions. Such diagnosis would allow to predetermine the possibilities, limitations, and alternatives for the development of irrigated agriculture in an area, and to decide about the best choice. In areas with very scarce previous experience on irrigated agriculture, this becomes even more important.

Although the dissolved salts in irrigation waters, and in cases the ones originally present in the soil, are the main sources for the development of "salt-affected" soils, the possibilities and levels of salinity to be reached, and the effects on crops and soils, will depend on other factors like climate, irrigation management, and drainage. Therefore, a rational diagnosis has to include such factors, instead of giving emphasis only to the "intrinsic quality" of the available irrigation water.

The more common problems of salt-affected soils are the ones directly or indirectly derived of accumulation of total salts (salinization), or sodium (sodification) in soil solution. For practical reasons, values of electrical conductivity or meq/l. (salinity) and of sodium adsorption ratio (sodicity), in saturation extract of the soil, are being used

Figure 1.- Actual or potentially "salt-affected" soils associated with present or projected irrigated areas in Venezuela.



- 3 -

to define such levels of accumulation. The levels to be reached in a given soil depth will depend on the balance between the addition and removal of salts or individual ions in soil solution through the moving water, or through dissolution or precipitation of some of them. This balance may be defined more precisely through the so called "leaching fraction", originally only used for total salinity, but now (Pla, 1967; Rhoades, 1968) also used for balances related with sodicity levels.

In Venezuela, there are projects to extend the irrigated agriculture to about two million Ha. (1.700.000 Ha. with surface water, and 300.000 with underground waters), but because of different reasons the progress in the past has been very slow. During the last 20-40 years more or less extended areas have been used for irrigated agriculture in most of the zones included in those projects. (Figure 1).

(Position of Figure 1)

They cover a wide range of climate, soils, and irrigation waters. With plenty of water available in most of the cases, and without a careful planning and control about its use, problems of salinity, with very different characteristics, have developed on many of these areas. This has allowed us, through continued studies in the field, greenhouse and laboratory, (Pla 1967, 1968, 1969; Pla and Dappo, 1977) the evaluation of the different factors responsible for the salinization and sodification of the soils in each case. Together with this, a diagnostic model, integrating those factors, has been progressively developed and tested (Pla 1967, 1968, 1983; Pla and Dappo, 1974). Presently, when the economical situation of the country requires of a fast increase in the agricultural production, it is proposed to rapidly expand the areas with irrigated agriculture, even in zones presently with rainfed crops. Therefore, the diagnosis of salinity problems becomes an urgent necessity,

In order to predetermine the possibilities and limitations of such development, and to select the best systems and management of irrigation. May of the areas are in semi-arid or subhumid zones, where the potential problems of salinity, and particularly of sodicity are more complex and difficult to be diagnosed than the more common ones in arid zones.

This paper presents the criteria proposed for such diagnosis, and their integration through a flexible model. The use of this model for the diagnosis of actual and potential problems of salinity and sodicity in a wide range of conditions in Venezuela, is also discussed.

DIAGNOSTIC CRITERIA

The main basis for the diagnosis here proposed is to find, for each potential irrigation water, the relation between effective leaching fraction and the equilibrium levels of total salinity, and sodium adsorption ratio (SAR) to be reached in soil solution. For that, an independent balance of the more common ions in irrigation water, according to leaching and maximum solubilities of salts like Ca sulfates and Ca and Mg carbonates, is calculated. Although we are aware of the influences of ionic strength, CO₂ pressure, Ca/Mg relations (Pla, 1967; Suarez, 1981) in the maximum concentration of these salts of limited solubility, the difficulties to preview them under very different and non controlled fields situations, has made necessary to use some simplifications, where fixed values are assumed for such concentrations. Experimental evidence (Pla 1968, 1977) shows that reasonable good predictions of the changes in concentration and composition of dissolved and exchangeable ions in the soil are obtained through such simplifications. For the most prevailing conditions to be found in agricultural soils in the process of sa-

SET OF CONDITIONS	LF for salinity [TS in sat. extract]	LF for sodicity [SAR in sat. extract]
$B \leq CA$ $B \leq 10LF$ $CAS \leq 30LF$	$(Na + Ca)/TS$	$D = Na^2/(SAR^2 + CA)$
$B \leq CA$ $B > 10LF$ $CAS \leq 30LF$	$(Na + Ca - B)/(TS - 10)$	$\sqrt{\frac{SAR^2 + (CAS + CACI)^2 + 80(Na^2)^2}{20 + SAR}} - \frac{(CAS + CACI)}{20}$
$B \leq CA$ $B \leq 10LF$ $CAS > 30LF$	$(Na + Ca - CAS)/(TS - 30)$	(No sodicity in any case)
$B \leq CA$ $B > 10LF$ $CAS > 30LF$	$(Na + Ca - B - CAS)/(TS - 40)$	$\sqrt{\frac{SAR^2 + CACI^2 + (320 + Na^2)^2}{80 + SAR}} - \frac{CACI}{80}$
$B > CA$	$Na/(TS - CA)$	$Na/SAR + (CA/7)^{1/2}$

Table 1.- Relations between effective leaching fraction (LF) and levels of salinity (TS: Total salinity in mg/l in saturation extract) and sodicity (SAR: Sodium adsorption ratio in saturation extract) to be reached in the soil for a given content of bicarbonates (B), sulfates (S), chlorides (Cl), sodium (Na), Ca + Mg (CA), Ca chloride (CACI) = CA - B - S), and CA sulfate (CAS = CA - B - CACI) in irrigation water (taken from Pla 1967, 1968, 1974, 1977, 1983).

linization or sodification, we assume as the maximum concentrations to be reached in soil solution:

- a) 30 meq/l for Ca SO_4
- b) 10 meq/l for bicarbonates of Ca and Mg, when no sodium bicarbonate is present.
- c) The same concentration of Ca and Mg bicarbonates in the irrigation water, for such salts, when sodium bicarbonate is present in the water and accumulates in soil solution.

With those basic approaches, the relations shown in Table 1, between effective "leaching fraction", and levels of salinity (meq/l.) and sodicity (SAR) to be reached in saturation extract, are obtained. Nomographs, to facilitate the use of these equations were presented elsewhere. (Pla and Doppo, 1974).

(Position of Table 1)

In addition to this relations based on the "leaching fraction", some special cases of sodification (Pla, 1972), and development of saline-acid soils (Pla and Fiorentino, 1983) have to take into consideration chemical reactions leading to important changes in the composition of soil solution. The formation of sodium bicarbonate from sodium sulfate under anaerobic conditions (Whittig and Janitzky, 1963) may be of great significance on subhumid tropical climates, with very low permeability soils, using irrigation water, low in salts and high in bicarbonates (see Table 2).

Once we have the above mentioned relations, the following evaluations are made:

- 1) Leaching fractions (LF) correspondent with critical levels of salinity for different crops and climates.
- 2) Leaching fractions (LF) corresponding to critical levels of sodicity (SAR) for

different soils and salinity levels, and in some cases, crops.

- 3) Leaching fractions (LF) below which precipitation of Ca and Mg carbonates, and/or Ca sulfate occurs.
- 4) Relationships between LF in (1) and (2) and the soil hydraulic properties (permeability or final infiltration rate), and climate (rainfall and evaporation).

With that we may be able to conclude about:

- 1) Predominance of problems of salinity or sodicity, and combination of factors leading to them in each case.
- 2) Required combinations of crops and irrigation management in order not to reach, with the available water and soil, critical levels of salinity and/or sodicity.
- 3) Drainage requirements for (2).

From this we may decide about the most convenient selection of crops and irrigation management, or about the requirements of management systems to reduce the leaching fraction to a minimum (Rhoades et al, 1974). Taking into consideration that the LF calculated in Table 1 assume an uniform distribution of salts and sodium in the soil rootzone, the selection of high-frequency irrigation systems (Dirksen, 1983) to reduce the leaching fraction without changing to more salt-tolerant crops, may be considered at this diagnostic level. Non arid climates, with excess rainfall part of the year, will make more difficult, and even dangerous, to apply such approach because of the problems to keep the depth of accumulated, non leached salts, out of the active root zone.

POTENTIAL KIND OF PROBLEM	SALTS IN IRR. WATER		Soil Permeability	CLIMATE R > PET (months)	SALT-AFFECTED SOIL Salts	
	Total (meq/l)	Composition			Solution	Precipitated
S A L I N I T Y	>10	S > Cl > B (Cl > S > B) Ca + Mg > Na	Very slow to Medium	< 2 (2-4)	S > Cl >> B (Cl > S >> B) Na ≥ Ca + Mg	C, G
			Very slow to slow	< 2 (2-4)	S > Cl > B Na > Ca + Mg	C, G
	< 10	B > S > Cl Ca + Mg ≥ Na				
S O D I C I T Y			Very slow	4-6	S > Cl > B Na > Ca + Mg (Anaerobic conditions) $(2\text{Na}^+ + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{S}^{2-} + 2\text{NaHCO}_3)$ B > S > Cl Na >> Ca + Mg	C
	< 10	B > S > Cl Na ≥ Ca + Mg B > Ca + Mg	Very Slow to Medium	< 2 (2-4)	B > S > Cl Na >> Ca + Mg	C

Table 2.- Potential kind of "salt-affected" soils to be developed under each set of conditions (R: Rainfall; PET: Potential Evapotranspiration; S: Sulfates; Cl: Chlorides; B: Bicarbonates; C: Ca and Mg carbonates; G: Calcium sulfates).

FIGURE 2.

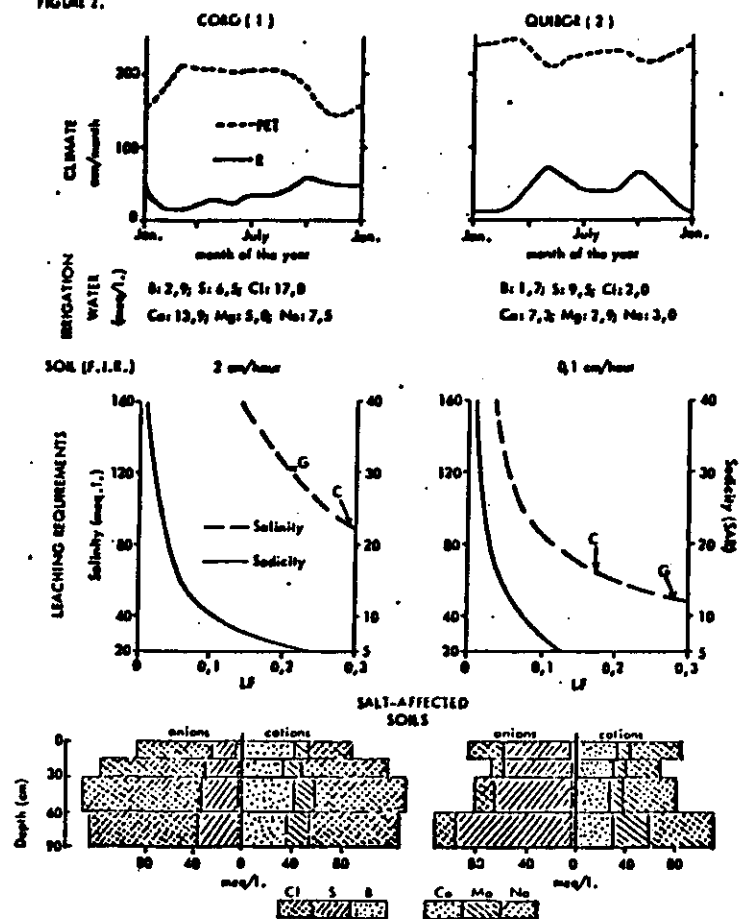


FIGURE 2.- (Continued)

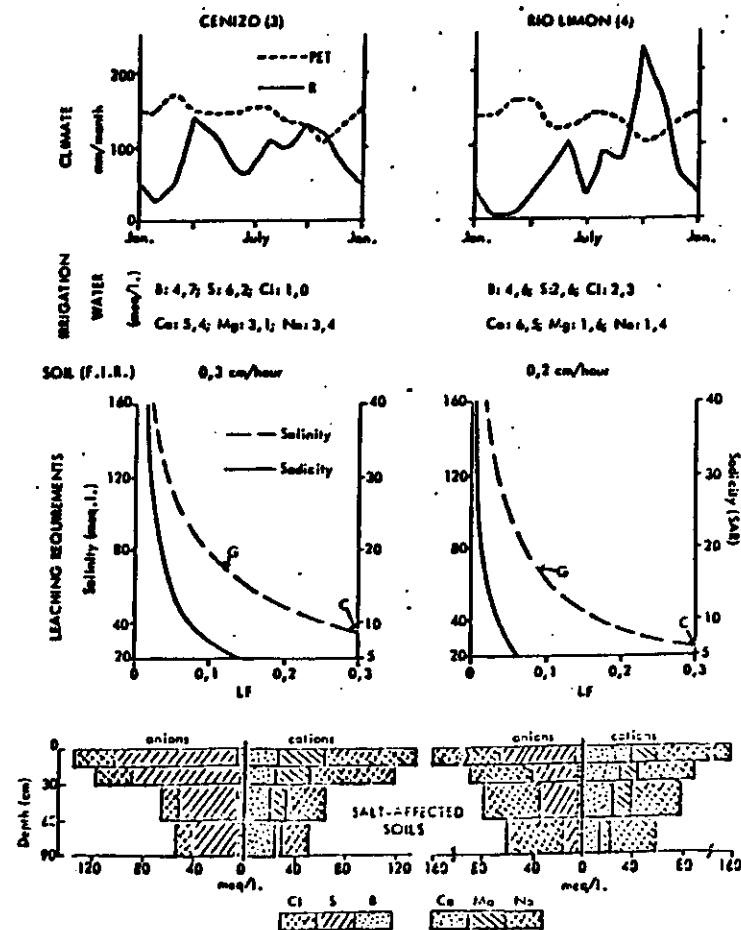


FIGURE 2. Actual "salt-affected" soils in irrigated areas of Venezuela (see Fig. 1) developed under the shown conditions of climate (R: Rainfall; PET: Potential Evapo-transpiration) irrigation water (B: Bicarbonates; S: Sulfates; Cl: Chlorides; Ca: Calcium; Mg: Magnesium; Na: Sodium), soil permeability (F.I.R.: Final Infiltration Rate), and relation for each irrigation water between "leaching fraction" (LF) and levels of salinity and sodicity (SAR: Sodium Adsorption Ratio) to be reached in soil solution (saturation extract). Precipitation of Ca sulfate (G) and Ca and Mg carbonate (C) occur at LF values lower than shown in the graphs.

FIGURE 2.- (Continued)

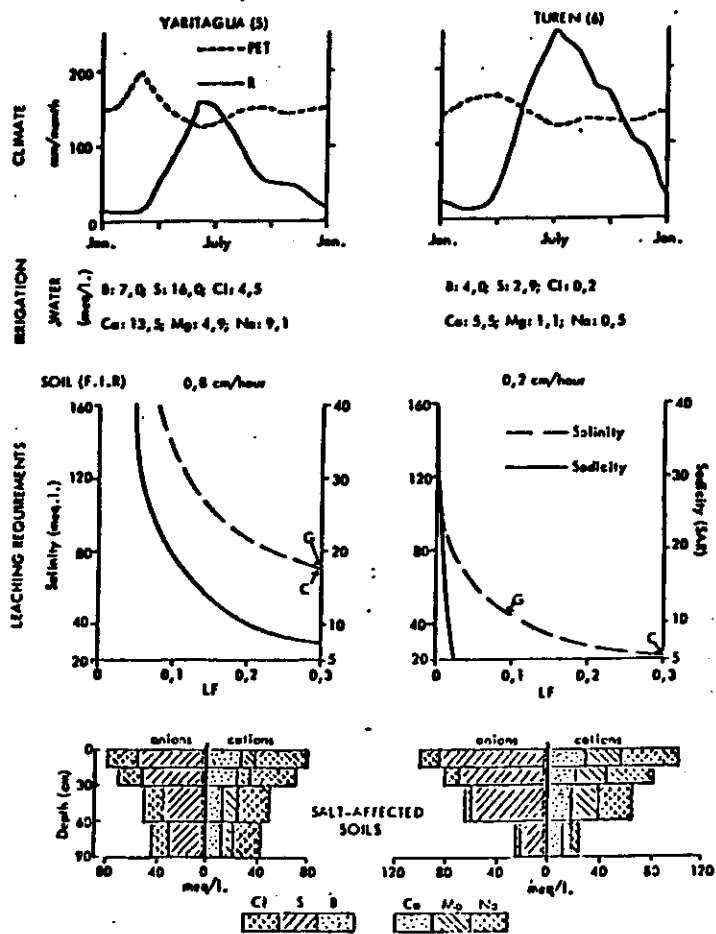
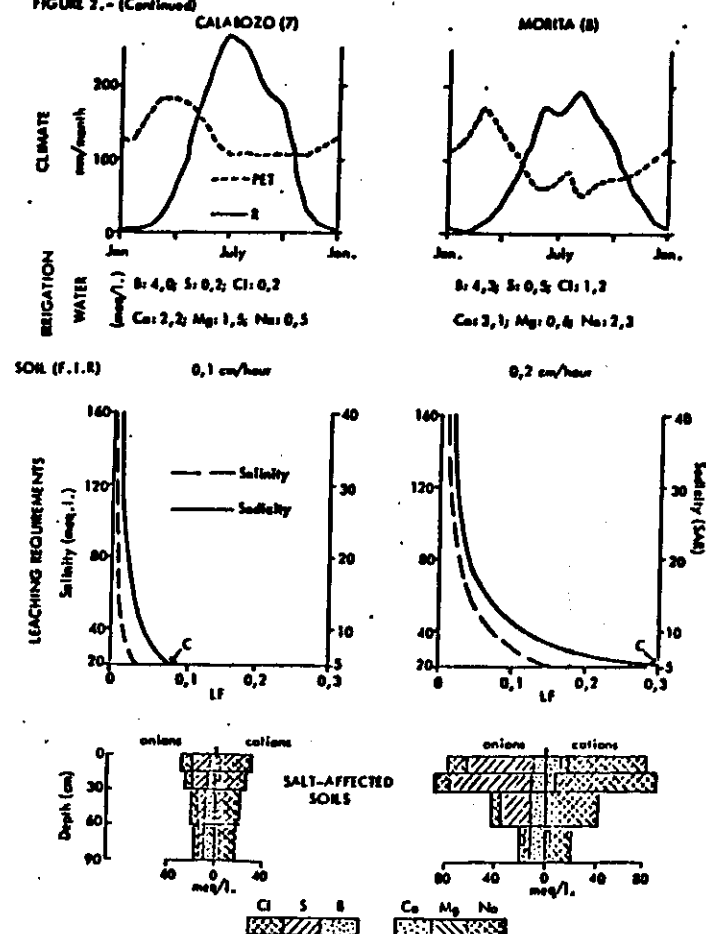


FIGURE 2.- (Continued)



DIAGNOSIS OF SOIL AND WATER SALINITY IN VENEZUELA

Table 2 presents a general combination of factors, based on the previous analysis, which allow us to make a general diagnosis of the potentiality for development of salinity and sodicity in soils under the more common conditions found in present and projected irrigated areas in Venezuela. Those areas, covering about 1.5 million Ha. are shown in Figure 1.

(Position of Table 2)

Eight sites, located in irrigated areas of Venezuela (Figure 1) with actual "salt-affected" soils of very different characteristics, were selected for this evaluation of the proposed diagnostic model. Figure 2 shows the salinity profiles in those sites, together with information about climate, salts in the available irrigation waters, final intake rates, and the relations between leaching fractions and levels of salinity and sodicity in saturation extract. In sites 1, 2, 3, 5 and 8, underground waters are used for irrigation, while in sites 4, 6 and 7, surface waters are the used for such purpose. The characteristics of the salt-affected soils in relation to climate, soil, and water, in all cases, agree very well with the general diagnosis of Table 2. Salinity problems are the predominant in sites 1, 2 and 4; sodicity is the situation in 7 and 8; while in 3, 5 and 6, the actual salinity problem would change, if the appropriate conditions shown in Table 2 are maintained, to sodicity.

The graphs in figure 2, showing the relations between LF and salinity/sodicity levels, and the values of LF (marked with arrows) below which precipitation of carbonates of Ca and Mg (C), and of Ca sulfate (G) occur, were calculated using equations of table 1. There we may find both the values of the index LF for each level of soil

salinity and/or sodicity, and the associated levels of salts and sodium to be reached with a fixed value of LF. From that, it is possible to deduce the potential problems according to the LF values of salinity or sodicity, as well as the salinity level accompanying each level of sodicity. This is very important, considering their contrary effects on the hydraulic properties of soils. Additionally we may predict the possibilities and combinations of crops and irrigation management to keep the LF values at achievable levels according to the infiltration and drainage characteristics of the soil, the water availability, the salt tolerance of crops, and the critical levels of sodicity. These critical levels will depend on the accompanying levels of salinity and the mineralogical and physical characteristics of the soil. When all or most of these relations are reasonable well known from local experience, it is possible to develop more precise tables (Pla and Dappo, 1977; Pla, 1983) to facilitate and precise more the diagnosis.

The knowledge of LF values, and of the levels of salinity and sodicity when precipitation of salts (C and/or G) occur, permits to deduce the LF values below which increase in salinity levels will be markedly reduced, and to know the level of salinity when this happens. A parallel deduction will be to know if critical levels of sodicity may be reached after the reduction in LF leads to precipitation of Ca and Mg salts, and if such levels are reached when Ca sulfate is being precipitated in the soil. All these deductions may have a great diagnostic value as a basis for predetermination of the possibilities, and for the planning of irrigation systems, like the ones proposed lately, which allow the reduction of LF requirements, with the accumulation and partial precipitation of salts at depths below the most active root zone.

The use of LF values as an index for diagnosis of potential salinity problems, do not consider before hand the different salt distributions to be reached in the root zone,

the water uptake distribution, or the dilution of salts kept in the soil solution, through the use of different irrigation management systems. In any case, values of LF considered to be too high will lead to the consideration of using some of these recently proposed high frequency irrigation systems, allowing a reduction in LF for a given salt-tolerance level of the crop. When LF is used as an index of potential sodicity, such flexibility in relation to irrigation management does not exist, and one of the few alternatives to reduce LF will be the addition of Ca amendments to the irrigation water, calculated (Pla, 1969) with a similar approach to the LF - salinity/sodicity relationships here presented. Anyway, the problem of sodicity appears to be more associated to irrigation waters of low salinity, used as a complementary source of water during the dry season in soils of very low permeability, under a semiarid or subhumid climate, some times through biological transformations in anaerobic conditions (Szabolcs, 1969). This is in agreement with the report of Kovda (1965) about the origin and development of alkaline soda-saline soils.

As a final remark, we may conclude that rational and flexible approaches like the one presented here, for the diagnosis and prevention of salinity and sodicity, may be more useful than some of the previously proposed (Ayers, 1976) more empirical systems, developed for very specific situations, mainly in arid climates. This becomes particularly true, when the diagnosis has to cover such varied combinations of climate, soils, and waters, with very little previous experience about the effects of different irrigation management systems, like the case of Venezuela.

REFERENCES

- AYERS, R.S. and D.W. WESTCOT. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Rome. 1976.
- DIRKSEN, C. Principles of root water uptake, soil salinity, and crop yield for optimizing irrigation management. Proc. Int. Symp. "Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies". IAEA, Vienna. 235-247. 1983.
- KOVDA, V.A. Alkaline Soda-Saline Soils. Agrakémia és Talajtan. Budapest. 14: 15-48. 1965.
- PLA, I. Evaluación cuantitativa de los efectos de los bicarbonatos en el agua de riego sobre las propiedades químicas y físicas de los suelos y factores que influyen sobre la magnitud de tales efectos. Revista Fac. Agronomía. Alcance 12. Maracay, Venezuela. 88 p. 1967.
- PLA, I. Evaluation of the quality of irrigation waters with high bicarbonate content in relation to drainage conditions. Trans. 9th. Int. Congr. Soil Sci. 1:357-370. 1968.
- PLA, I. Calcium required as an amendment for irrigation waters with high bicarbonate content in relation to the drainage conditions. Agrakémia és Talajtan. Budapest. 18:283-289. 1969.
- PLA, I. Salt and water balances in irrigated soils under tropical conditions. "New Developments in the Field of Salt Affected Soils. Proc. Symp. Cairo. 1972.
- PLA, I. Sistema integrado agua-cultivo-suelo-manejo para evaluar la calidad de agua para riego. Proc. Int. Symp. "Isotope and Radiation Techniques in Soil Physics and Irrigation Studies. IAEA. Vienna. 191-206. 1983.
- PLA, I. and A. FLORENTINO. Características y diagnóstico de suelos salino-ácidos en Venezuela. International Workshop on Salt-Affected Soils of Latin America. Proc. Maracay, Venezuela. 1983.
- PLA, I., and F. DAPPO. Sistema Racional para la Evaluación de Calidad de Aguas para Riego. Suplemento Técnico N° 12. FUDECO. Barquisimeto, Venezuela. 1974.
- PLA, I., and F. DAPPO. Field testing of a new system for qualifying irrigation waters. Managing Saline Water for Irrigation. Proc. Int. Conf., Lubbock (Texas). USA. 376-387. 1977.

RHOADES, J.D. Leaching requirement for exchangeable sodium control. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 32:652-656. 1968.

RHOADES, J.D., J.D. OSTER, R.D. INGVALSON, J.M. TUCKER, and M. CLARK. Minimizing the salt burdens of irrigation drainage waters. J. Environ. Quality. 3(4):311-316. 1974.

SUAREZ, D.L. Relation between pH and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil and drainage water. Soil Sci. Soc. Am. J. 45:469-475. 1981.

SZABOLCS, I. The influence of sodium carbonate on soil forming processes and on soil properties. Agrokémia és Talajtan. Budapest. 18:37-68. 1969.

WHITTIG, L.D. and P. JANITZKY. Mechanisms of formation of sodium carbonate in soils. I. Manifestation of biological conversions. J. Soil Sci. 14:322-333. 1963.