



Winter 1978

En Balance de Sales del Distrito de Riego de Mexicali, B.C.

Oscar Palacios Velez

Macedonio Escamilla

Alfonso Reyes

Recommended Citation

Oscar P. Velez, Macedonio Escamilla & Alfonso Reyes, *En Balance de Sales del Distrito de Riego de Mexicali, B.C.*, 18 Nat. Resources J. 49 (1978).

Available at: <https://digitalrepository.unm.edu/nrj/vol18/iss1/5>

This Article is brought to you for free and open access by the Law Journals at UNM Digital Repository. It has been accepted for inclusion in Natural Resources Journal by an authorized editor of UNM Digital Repository. For more information, please contact amywinter@unm.edu, lsloane@salud.unm.edu, sarahrk@unm.edu.

EN BALANCE DE SALES DEL DISTRITO DE RIEGO DE MEXICALI, B.C.†

OSCAR PALACIOS VELEZ* and MACEDONIO ESCAMILLA**
and ALFONSO REYES**

RESUMEN

Se analizan los resultados de balance de entradas y salidas principales de sales a un área de estudio que cubre prácticamente al distrito de Riego de Mexicali, B.C. (273,000 ha). Estas observaciones se iniciaron en 1971, mostrando que entran anualmente en promedio 2.5 millones de toneladas de sales más de las que salen. Los datos reflejan también los aumentos de salidas de sales por los drenes nuevos o reconstruidos durante los trabajos de rehabilitación. Se ha pretendido, con éxito parcial, verificar estas conclusiones con muestreos sucesivos de suelos, en los que solo se cuantifican las sales solubles, que son las de mayor importancia por su impacto sobre los cultivos. Se espera mejorar la metodología de muestreo e iniciar el análisis de balances iónicos.

SUMMARY

The analysis of salt balance results for an area covering almost the complete Mexicali Valley Irrigation District (273,000 ha) is presented. The salt input and output observations started in 1971 and actually the results show that there is a salt accumulation of 2.5 million tons per year. An increase of the salt output through the new and reconstructed (during the so-called rehabilitation works) drainage system was detected. These results have been checked by means of successive soil salinity surveys oriented to determine soluble salts, which have a great influence on crops growth, but only a partial success has been obtained. To improve this verification some changes in used soil sampling methodology will be introduced and ionic balances inside the area will be carried out.

†Trabajo que viene siendo desarrollado conjuntamente por la Dirección General de Distrito de Riego y el Colegio de Postgraduados de Chapingo, dependencias de la SARH.

*Profesor-Investigador, Rama de Riego y Drenaje, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

**Técnicos de la Oficina de Ingeniería de Ingeniería de Riego y Drenaje del Distrito de Riego No. 14, Rfo Colorado, B.C.

INTRODUCCION

Para asegurar una agricultura de riego permanente y próspera, se tiene como una condición indispensable el alcanzar un balance equilibrado de entradas y salidas de sales totales y de iones específicos. En caso contrario se tendría una tendencia a la salinización (que es lo más frecuente) ó lixiaviación (que puede ocurrir temporalmente) que podría poner en peligro la producción agrícola.

El estudio del balance iónico es muy importante si se recuerda que algunas sales son notablemente más dañinas que otras. Por ejemplo, algunos autores consideran que normalmente es posible permitir la acumulación en los suelos de carbonato de calcio por períodos muy prolongados, de decenas e incluso centenas de años, puesto que esta sal de baja solubilidad se acumula en forma de precipitados y prácticamente no influye en los procesos de elevación de presión osmótica de la solución del suelo. En cambio, otras sales, como el cloruro de sodio, si se acumulan tienen efectos indeseables sobre los cultivos y la estructura de los suelos.

En el caso del distrito de Riego de Mexicali, B.C., por su localización en una zona árida se tiene una tendencia natural a la salinización al introducir el riego. Esta situación se agudizó a partir de febrero de 1961 en que se empezaron a entregar a México, como parte de su cuota de riego, mezclas de aguas del Río Colorado y aguas fósiles del canal Wellton-Mohawk, provenientes del bombeo subterráneo del Proyecto de Recuperación del Gila en Arizona. Aunque esta situación se regularizó en 1973 mediante un acuerdo entre los gobiernos de México y los EE.UU. que asegura que la salinidad del agua de riego usada en México será solo un poco mayor que la de la Presa Imperial en los EE.UU., el desarrollo agrícola, industrial y energético de la cuenca del Río Colorado aumentarán, sin duda, el problema de salinidad en ambos lados de la frontera.

Estas consideraciones son las que han motivado la realización del presente trabajo, a partir de 1970, cuyo propósito fundamental es caracterizar el régimen hídrico y salino de los suelos del distrito de riego, lo que puede servir de base para pronosticar las condiciones futuras de salinidad, así como para evaluar el efecto sobre estas condiciones de algunos trabajos que están realizándose, como revestimiento de canales, construcción o reconstrucción de drenes y mejora en la técnica de riego, etc.

Este trabajo ha consistido de 2 partes: Por un lado se aforan y cuantifican periódicamente las sales que entran y salen a un área de estudio, a través de drenes, canales y pozos de bombeo. El procesamiento de esta información permite formular balances diarios,

mensuales y anuales, cuyos resultados, por otro lado, podrían ser verificados, en principio, mediante el muestreo de suelos, lo que constituye la segunda parte del estudio.

MATERIALES Y METODOS

Balance de Entradas y Salidas de Sales

El área de estudio comprende alrededor de 273.000 hectáreas, en cuyo perímetro se han localizado 7 entradas y 48 salidas de canales y drenes. Esta área es aproximadamente igual a la superficie del distrito de riego, aunque han quedado fuera la parte sur del mismo, puesto que, de otra manera, no hubiera sido fácil el acceso por carretera a todos los puntos de control.

Se tiene además alrededor de 640 pozos de bombeo a los que a partir de 1972 se han adicionado alrededor de 60 de la llamada Mesa Arenosa de San Luis. Ante la imposibilidad de llevar un control de la operación de todos estos pozos, se toman datos exclusivamente de 30 de los 640 dentro del distrito, más los pozos de la Mesa Arenosa que se aforan en conjunto en un acueducto que colecta sus caudales. Los volúmenes bombeados y las sales que se mueven con ellos son extrapolados a todo el conjunto de pozos, a través de factores de proporcionalidad determinados y verificados anteriormente.

La frecuencia de afores y tomas de muestras (a las que se les determina sales totales en solución, así como contenido de iones específicos: Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, CO₃+HCO₃) se ha venido afinando para cada tipo de fuente muestreada, variando esta frecuencia desde diaria hasta mensual, según el caso.

Estas operaciones se iniciaron en Abril de 1971 y han proseguido en forma continua hasta el presente. Con estos datos se formula un balance diario para cada una de las secciones de control y los resultados se grafican además por grupos de entradas y salidas, siendo las principales las que se indican a continuación:

- a) Entradas principales:
 - i) Presa Morelos
 - ii) Pozos de Bombeo
 - iii) Río Colorado, Puente San Luis
- b) Salidas principales:
 - i) Río Colorados, Puente del Ferrocarril
 - ii) Drenes que desembocan en el Golfo de California
 - iii) Drenes que desembocan hacia el Mar de Salton.

Se formulan además balances mensuales y anuales que permiten estimar las cantidades de sales que se acumulan en los suelos. Estos

balances deben ser vistos con mucha precaución, debido a que hay una serie de factores no considerados. Entre ellos deben mencionarse los siguientes.

- a) Aportaciones del manto freático en la evapotranspiración de los cultivos. En el muestreo de suelos, según, se verá más adelante, se ha considerado un espesor de suelo de tres metros, de tal manera que las aportaciones capilares provenientes de mayor profundidad no están siendo consideradas.
- b) Filtraciones en canales y percolación de aguas de riego más allá de 3 metros. Estos conceptos, al igual que el anterior, que caracterizan al intercambio hídrico entre el espesor superior de 3 m de suelo y el subsuelo más profundo, no es fácil de medir y puede variar apreciablemente de lugar a lugar.
Podría pensarse que a nivel regional estas componentes se equilibran, por lo menos parcialmente. Es decir, algunas filtraciones en canales y percolaciones de agua de riego pueden más tarde constituirse en aportaciones del manto freático. Otra parte puede pasar a formar parte del flujo de los drenes, aunque, en principio, puede haber una cierta corriente subterránea que no sale del área de estudio a través de los drenes, por lo que no es contabilizada.
- c) La precipitación de carbonatos de calcio en los suelos, la disolución de sales del suelo por las aguas de riego, así como en menor grado los procesos de intercambio catiónico, que ocurren sobre la base de valencia, no de peso, pueden alterar significativamente la interpretación de los resultados del balance. Esta situación podrá ser estimada cuando se realicen los balances iónicos que están en preparación.

Muestreo de suelos

El muestreo de suelos que se realiza anualmente¹ —hacia el mes de noviembre— ha tenido como propósito caracterizar las variaciones de los contenidos de sales solubles y eventualmente verificar de una manera indirecta el proceso de ensalitramiento que aparentemente esta teniendo lugar en este distrito de riego, según datos del balance de entradas y salidas.

El método de muestreo puede ser calificado como *estratificado*, *bietápico* y *secuencial*, según se explica a continuación.

En el *muestreo estratificado* se divide a la población ó área de estudio en estratos dentro de los cuales se tiene una menor variación de la salinidad. Esta variación puede ser apreciada a simple vista o en base al análisis de información existente, como pueden ser planos de salinidad levantados con anterioridad, como fué el presente caso. De acuerdo con esto se dividió al área de estudio en tres estratos a los

1. Los dos primeros muestreos se realizaron con solo seis meses de intervalo.

cuales se les estimó una variabilidad proporcional a los números 1, 1.5 y 2, coincidiendo con las áreas menos salinas, las intermedias y las más fuertemente afectadas. La definición del número total de sitios de muestreo se explica más adelante y su distribución entre los diferentes estratos se hizo de acuerdo a la conocida fórmula de Neyman.²

En el *muestreo bietápico* se considera que la población ó estrato está constituido de por ejemplo N unidades primarias ó sitios muestreables y dentro de cada sitio puede haber M unidades secundarias, subsitios ó localidades donde pueden hacerse las barrenaciones para extracción de muestras de suelo. En el muestreo polietápico se considera la existencia de unidades terciarias dentro de las secundarias, etc.

La muestra queda comprendida por n unidades primarias ó sitios y m subsitios por unidad primaria, haciendo un total de n m elementos. En este estudio se consideraron además seis capas ó profundidades de muestreo: 0-30, 30-60, 60-90, 90-150, 150-210 y 120-300 cms., pero se manejaron en forma integrada como se muestra más adelante.

Cuando N y M tienden a infinito, como sucede evidentemente en este caso, no es importante mantener constante m ni es indispensable estimar la varianza dentro de las unidades primarias. Esto sugiere que los m subsitios dentro de cada sitio pueden localizarse sistemáticamente y no al azar, lo que es mucho más fácil y económico. Parece razonable establecer $m = 3, 4, 5$ ó más subsitios y localizarlos en los vértices de un triángulo, de un cuadrado ó equidistantes en una circunferencia. La superficie del subsitio puede ser aparentemente desde unas decenas hasta unas centenas de metros cuadrados. La idea es evitar que todas las perforaciones pueden localizarse en un manchón de sales. Además se puede tomar una muestra del suelo por cada profundidad mezclando las correspondientes de todos los subsitios. Aunque no se ha hecho, se ha pensado que los m subsitios podrían distribuirse también dentro de una misma parcela de riego (en este caso m sería del orden de 10) la que constituiría un sitio ó unidad primaria de muestreo.

En el *muestreo secuencial*, el tamaño de muestra y su distribución entre los diferentes estratos se define en varias etapas secuenciadas. En la primera etapa se establece un tamaño de muestra arbitrario, el que se distribuye en estratos de acuerdo con el área y varianza estimada o supuesta. De los datos obtenidos de este primer muestreo se

2. Vélez Oscar, *Sobre el desarrollo de una metodología de muestreo de suelos salinos*, 14 REVISTA AGROCIENCIA (1973).

pueden estimar las varianzas por estrato, con las cuales se vuelven a definir tanto el tamaño de muestra como la distribución por estratos. Este proceso puede continuarse hasta llegar a un tamaño de muestra que esté acorde con la precisión requerida. En este estudio con base en los primeros dos muestreos de suelos y de su comparación, se estableció la conveniencia tanto de ampliar el tamaño de muestra como el intervalo entre muestreos, que son dos formas de facilitar la detección de los incrementos de salinidad esperados en el área de estudio.

El tamaño de muestra inicial se consideró de mil muestras, equivalentes a 167 sitios, considerando que en cada sitio se muestreaban seis profundidades. Esta cifra se incrementó a 178 para tener un cierto margen de seguridad. Este tamaño de muestras se definió fundamentalmente de acuerdo con la capacidad del laboratorio de análisis de suelos del Distrito de Riego. Además, para no sobrecargar al laboratorio, del total de muestras de suelo a analizar se hicieron las determinaciones usuales de aniones y cationes al 25% de ellas y al 75% restante solo se le determinó la conductividad eléctrica del extracto de saturación, para determinar el contenido de sales en partes por millón, de acuerdo a un coeficiente de proporcionalidad que resultó diferente para cada zona (alrededor de 0.7). En general la fórmula empleada para el cálculo de la cantidad de sales fué del tipo: ppm = 0.7 CE (en micromhos/cm a 25°C).

La primera distribución de sitios entre los diferentes estratos quedó como se indica a continuación:

| <i>Zona</i> | <i>Área</i> | <i>Desviacion Típica (Supuesta)</i> | <i>Numero de Sitios</i> |
|-------------|-------------|---|-------------------------|
| A | 105 440 ha | 1 | $n_A = 47$ |
| B | 53 880 | 1.5 | $n_B = 35$ |
| C | 113 340 | 2 | $n_C = 96$ |
| Suma | 272 660 | | $n_0 = 178$ |

Después de procesar los datos de los dos primeros muestreos se definió el segundo tamaño de muestra de $n_2=400$ y utilizando los valores de la desviación típica por área ó estrato estimada en el primer muestreo se hizo la distribución de los siguientes tamaños de muestra en la forma indicada a continuación:

| Zona | Desviacion Tipica (calculada) | No. Necesario de Sitios | No. Complementario de Sitios |
|------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| A | 0.25878 | $n_A = 167$ | 120 |
| B | 0.22971 | $n_B = 76$ | 41 |
| C | 0.22619 | $n_C = 157$ | 61 |
| Suma | | 400 | 222 |

En general el tamaño de muestra puede ser definido de acuerdo con la siguiente formula (1):

$$(1) \quad n_1 = \frac{t^2 S^2}{(\log C)^2}$$

donde:

t—es la t de Student para n-1 grados de libertad y α porciento de confianza

S—es la varianza general (de los logaritmos) estimada en el muestreo previo de tamaño n. Por las razones que se discutirán más adelante, se verá que se trabaja con los logaritmos (decimales ó naturales) de los cocientes de las cantidades de sales por sitio del segundo ó último muestreo, divididas entre las correspondientes cantidades obtenidas en el primer o anterior muestreo (en los mismos sitios respectivamente).

C—es la razón deseada del cociente mediano verdadero entre el cociente mediano estimado (al dividir la cantidad total de sales determinada en un muestreo, entre la determinada en otro muestreo anterior, por lo que se requieren de los muestreos previos antes de definir un nuevo tamaño de muestra). Se sugiere seleccionar el valor de C de la siguiente expresión, que da un grado de resolución a nuevos muestreos de aproximadamente un quinto del incremento esperado en la salinidad:

$$CTS \left(C - \frac{1}{C} \right) = \frac{B}{5} \cdot$$

Despejando C y despreciando los términos de menor orden de magnitud, se tiene:

$$(2) \quad C = 1 + \frac{B}{10 CTS}$$

donde:

B—Es la diferencia absoluta esperada o detectada entre las en-

tradas y salidas totales de sales al área de estudio durante el tiempo comprendido entre dos muestreos sucesivos de suelos.

CTS—Es la cantidad total de sales en los suelos, determinada en el último muestreo.

Si el valor de n_1 resultara muy grande debido a que $(\log C)^2$ es muy pequeño, puede ampliarse el intervalo entre muestreos, lo que se traduce en un valor mayor de B, mayor de C y menor de n_1 .

En el estudio se había obtenido de los primeros dos muestreos un $S^2 = 0.038498$ y al hacer los cálculos con la fórmula (1), se obtuvieron los siguientes tamanos de muestra para diferentes valores de α :

| α : | n_1 : |
|------------|---------|
| 0.95 | 3535 |
| 0.90 | 2478 |
| 0.80 | 1512 |
| 0.60 | 647 |
| 0.40 | 246 |

Se decidió tomar $n_1 = 400$, aunque corresponde a un bajo valor de α , debido a que se consideró que la S^2 podrá ser disminuida a base de aumentar el número de subsitios, prestando más cuidado a su localización y llevando un mejor control sobre el laboratorio.

Comparación de dos Muestreos Sucesivos

La interpretación de datos y los cálculos de los sucesivos tamaños de muestra, para garantizar una cierta precisión, dependen significativamente del tipo de distribución estadística de la variable "cantidad de sales por sitio de muestreo." Esta cantidad se evaluó en cada sitio de la siguiente manera:

$$(3) \quad x_i = \sum_{j=1}^6 a_i e_j d_{ij} W_{ij} Y_{ij},$$

donde:

a_i = Área de influencia del i -ésimo sitio y calculada proporcionalmente al número de sitios localizados en suelos de la misma serie agrológica y a la superficie cubierta por los suelos de esa serie.

e_j = Es el espesor de la capa muestreada; $j = 1, 2, \dots, 6$ siendo los correspondientes espesores de $e_j = 30, 30, 30, 60, 60, 90$ cm.

d_{ij} = Es la densidad aparente del espesor j -ésimo en el i -ésimo sitio de muestreo. Este y los datos anteriores se consideraron constantes de un muestreo a otro. Las densidades aparentes se tomaron de acuerdo a la serie del suelo donde se localizó cada sitio.

W_{ij} = Porcentaje de saturación sobre peso de suelo seco, de la profundidad j -ésima, en el sitio i -ésimo. Se determinó en cada muestreo.

Y_{ij} = Contenido de sales en ppm de la j -ésima profundidad e i -ésimo sitio. Se determinó por análisis químico de los iones en el 25% de las muestras de cada estrato de muestreo y por un coeficiente de proporcionalidad de la CE del extracto de saturación en el 75% de las muestras restantes.

Los sitios se localizaron mediante dos coordenados, generadas al azar, correspondientes a un marco de muestreo formado por los puntos de intersección de una cuadrícula con equidistancia de 1 Km. Esto equivale a suponer que $N = 2726$, de donde se tomaron $n = 178$ sitios en los 3 estratos. Para los muestreos futuros se amplió el marco de muestreo reduciendo la equidistancia de la cuadrícula a 250 m. En general la salinidad de los suelos no se distribuye regularmente, por lo que el marco de muestreo puede corresponder a una cuadrícula. En caso de duda (cuando existen canales y drenes a distancias múltiples o submúltiplos de la equidistancia) debe modificarse el marco.

Debe observarse que se tomaron áreas de influencia por sitio cuya suma es el área de estudio. Por tanto $\sum_{i=1}^n x_i$ es un estimador de la cantidad total de sales. Es claro que la precisión del estimador subirá a medida que se incrementa "n" y disminuya el área de influencia a la que se le atribuye un mismo nivel de salinidad.

En un estudio posterior³ se hizo un cuidadoso análisis de la bondad de ajuste a estas dos distribuciones, utilizando el criterio de "omega cuadrada" de Smirnov, que tiene una serie de ventajas sobre el conocido criterio de χ^2 de Pearson, habiéndose llegado a la conclusión de que la distribución log-normal es adecuada para representar a las variaciones de la cantidad de sales por sitio de muestreo.

Aunque el interés principal del estudio es medir los incrementos o decrementos de la salinidad total del área de balance y calcular los correspondientes intervalos de confianza, reviste interés evaluar inicialmente la "cantidad total de sales" (CTS) y sus intervalos de confianza. La expresión adecuada para este propósito es la siguiente:⁴

$$(4) \quad \bar{x} \cdot 10^{-St/\sqrt{n}} < \mu_x < \bar{x} \cdot 10^{+St/\sqrt{n}},$$

donde:

3. Vélez Oscar & Renaud Baltasar, *La distribución de sales en los suelos*, MEMORIAS DEL VII CONGRESO NACIONAL DE LA SMCS (Guanajuato, Gto.).

4. Vélez Oscar, *Sobre el desarrollo de una metodología de muestreo de suelos salinos*, 14 REVISTA AGROCIENCIA (1973).

μ_x = Contenido medio verdadero de sales por sitio.

\bar{x} = Contenido medio estimado de sales por sitio.

t = "t" de Student de α nivel de confianza y $n - 1$ grados de libertad.

n = número de sitios.

$\frac{S}{\sqrt{n}}$ = Desviación típica de la media de los logaritmos. En muestreo estratificado esta cantidad se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$(5) \quad S_{\text{med}} = \sqrt{\sum p_i^2 \frac{S_i^2}{n_i}}$$

donde:

$P_i = \frac{n_i}{n}$, "peso" de cada estrato,

S_i^2 = Estimador de varianza de $\log x_i$ por estrato.

Para calcular los intervalos de confianza de la "cantidad total de sales real" ($CTS_r = n\mu_x$), observese que su estimador es:

$$(6) \quad CTS = \sum_{i=1}^n x_i = n\bar{x}$$

Multiplicando por "n" la expresión (4), queda:

$$(7) \quad CTS \cdot 10^{-S_{\text{med}} \cdot t} < CTS_r < CTS \cdot 10^{+S_{\text{med}} \cdot t}$$

La comparación entre 2 series de valores, en particular de sus medias, puede hacerse en términos de sus diferencias algebraicas y también de sus cocientes. Esta última alternativa parece ser la indicada cuando las variables se distribuyen como log-normal, puesto que en ese caso su cociente también se distribuye como log-normal, no así su diferencia algebraica, la que tendrá una distribución desconocida y mucho más difícil de procesar. Por lo anterior, para establecer la comparación entre los datos del segundo y el primer muestreo de suelos se calcularon sus cocientes respectivos " C_i " (en ambos casos se muestrearon aproximadamente los mismos sitios).

El intervalo de confianza del cociente CTS_{r2} sobre CTS_{r1} en función de su estimador CTS_2 sobre CTS_1 (los números 1 y 2 se refieren al primero y segundo muestreo), se calcula utilizando la siguiente fórmula:⁵

5. *Id.*

$$M_c \cdot 10^{-Sct/\sqrt{n}} < M_c < M_c \cdot 10^{+Sct/\sqrt{n}},$$

donde:

$M_c \approx \frac{\mu_y}{\mu_x}$ = mediana poblacional de los cocientes, aproximada y asintóticamente igual al cociente de medias de "y" y "x," cuando $\sigma_y^2 - \sigma_x^2 \rightarrow 0$.

$M_c \approx \frac{\bar{y}}{\bar{x}}$ = mediana muestral de los cocientes.

μ_x, \bar{x} = contenido medio de sales por sitio de muestreo, poblacional y estimado para el primer muestreo.

μ_y, \bar{y} = lo mismo para el segundo muestreo.

$\frac{Sc}{\sqrt{n}}$ = desviación típica de la media de los valores $\log C_i$. En muestreo estratificado se calcula mediante una fórmula análoga a (5), pero referida a los logaritmos de los cocientes.

t = "t" de Student de α nivel de confianza y n-1 grados de libertad.

Multiplicando y dividiendo por "n" los diferentes miembros de (8), se obtiene:

$$(9) \quad \frac{CTS_2}{CTS_1} \cdot 10^{-Sct/\sqrt{n}} < \frac{CTS_{r2}}{CTS_{r1}} < \frac{CTS_2}{CTS_1} \cdot 10^{+Sct/\sqrt{n}}.$$

En lugar de calcular los intervalos de confianza de $\frac{CTS_{r2}}{CTS_{r1}}$ pueden

calcularse las probabilidades de que el cociente real sea igual o menor a ciertos valores de interés.

RESULTADOS Y DISCUSION

Balance de Entradas y Salidas

En el cuadro No. 1 se dan de una manera muy resumida los resultados de los balances anuales de sales e hídrico, así como de las concentraciones medias de sales solubles resultantes de los cocientes correspondientes. En este cuadro se presentan únicamente algunas entradas y salidas principales, así como grupos de salidas.

Del análisis de este cuadro es posible hacer las siguientes observaciones:

CUADRO I
Resultados de los Balances de Sales e Hidrico y Concentraciones Medias de Sales Solubles

| Año | Balance de Sales (miles de ton) | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---|----------------------------------|---------|--|--|
| | Entradas Principales | | | | | Salidas Principales | | | | |
| | Presa Morelos | Pozos Bombeo | Río Colorado Punto San Luis | Río Colorado Punto Ferrocarril | Río Colorado Punto Colorado | Drenes Hacia el Golfo de California* | Drenes Hacia el Mar de Salton | Balance | | |
| 1971-72 | 2 144 | 1 508 | 383 | 135 | 209 | 551 | 2 824 | | | |
| 1972-73 | 1 833 | 1 424 | 526 | 284 | 224 | 553 | 2 422 | | | |
| 1973-74 | 1 574 | 1 601 | 702 | 381 | 243 | 545 | 2 521 | | | |
| 1974-75 | 1 638 | 1 910 | 635 | 329 | 269 | 541 | 2 684 | | | |
| 1975-76 | 1 800 | 1 798 | 614 | 276 | 288 | 552 | 2 786 | | | |
| <i>Balance Hidrico (millones de m³)</i> | | | | | | | | | | |
| 1971-72 | 1 634 | 1 043 | 107 | 43 | 38 | 110 | | | | |
| 1972-73 | 1 583 | 1 022 | 172 | 107 | 42 | 110 | | | | |
| 1973-74 | 1 534 | 1 090 | 194 | 120 | 50 | 109 | | | | |
| 1974-75 | 1 614 | 1 398 | 180 | 94 | 61 | 110 | | | | |
| 1975-76 | 1 774 | 1 209 | 179 | 92 | 69 | 104 | | | | |
| <i>Concentracion Media (ppm)</i> | | | | | | | | | | |
| 1971-72 | 1 312 | 1 447 | 3 592 | 3 181 | 5 566 | 4 996 | | | | |
| 1972-73 | 1 158 | 1 392 | 3 062 | 2 667 | 5 384 | 5 047 | | | | |
| 1973-74 | 1 026 | 1 468 | 3 610 | 3 178 | 4 870 | 4 978 | | | | |
| 1974-75 | 1 016 | 1 366 | 3 522 | 3 503 | 4 414 | 4 912 | | | | |
| 1975-76 | 1 015 | 1 488 | 3 433 | 3 006 | 4 171 | 5 312 | | | | |

*No se ha incluido al dren "Dos Tubos" que colecta agua y sales provenientes principalmente del Dren Geotermico, que no es agricola.

1. Como puede apreciarse la principal fuente de sales son las aguas provenientes de la presa Morelos, aunque los pozos de bombeo ya están aportando también cantidades conmensurables de sales solubles. Aunque se nota una disminución en la cantidad de sales que aporta la presa Morelos, lo cual se traduce también en una reducción de la concentración media de sales solubles, este efecto es parcialmente compensado por el incremento de la cantidad de sales que entran por el Río Colorado, sobre todo a partir de 1972 y 1973, que es cuando el Gobierno Mexicano decidió en forma unilateral no utilizar mas aguas provenientes del Wellton-Mohawk para el riego de cultivos, por lo que todas esas aguas empezaron a ser vertidas en el Río Colorado a través del canal de desvío.
2. Puede observarse que la cantidad de sales que entra por el Río Colorado a la altura del puente San Luis, es mayor que la que sale del mismo Río Colorado en la parte baja, en el llamado Puente del Ferrocarril. Además la concentración de sales en la salida es menor que la concentración de sales en la entrada. Todo lo anterior sugiere que las aguas que ingresan no son necesariamente las mismas que salen. Esto se ha comprobado indirectamente al observarse que en algunas ocasiones el Río desaparece por completo, para renacer más abajo poco antes del Puente del Ferrocarril. En este renacimiento puede haber una mayor participación de aguas de riego, lo cual trae como consecuencia una reducción de la concentración de sales. Sin embargo los volúmenes que se desfogan son menores que los volúmenes que se aportan. Esta diferencia debe ir a los acufferos desde donde posiblemente es reciclada por el bombeo de pozos profundos. En el momento en que empiece a operar el canal revestido por el cual han de desforgarse los volúmenes provenientes del Wellton-Mohawk, este efecto desaparecerá.
3. Como puede verse, la cantidad de agua que desfogan los drenes que van hacia el Golfo de California, así como la cantidad de sales que llvan en solución estas aguas, ha venido aumentando consistentemente, lo cual refleja en cierta forma el avance de los trabajos de rehabilitación que comprenden la construcción de nuevos drenes y la reconstrucción de los existentes. Se observa asimismo una disminución de las concentraciones de sales en solución en estas aguas.
4. Ni la cantidad de sales ni los volúmenes desfogados y por tanto tampoco la concentración salina ha variado apreciablemente en todas las salidas de la vertiente norte que van hacia el mar de Salton, donde ha habido un menor ritmo de construcción de drenes durante la rehabilitación del distrito.
5. Como puede apreciarse en todos los años el balance de entradas y salidas ha sido positivo y generalmente un poco mayor de 2.5 millones de toneladas de sales que anualmente se están quedando en el Distrito de Riego.

Muestreo de Suelos

Los dos primeros muestreos de suelos, realizados con 6 meses de intervalo en el año de 1971, permitieron obtener una primera estimación sobre la cantidad total de sales existente en el área de balance, así como de su distribución estadística, con lo cual se definió un mayor tamaño de muestra y se pudo afinar la metodología del estudio.

Como se mencionó anteriormente, el primer tamaño de muestra se definió de una manera hasta cierto punto arbitraria en 178 sitios. La cantidad total de sales existente en las 273 000 ha estudiadas y los 3 metros superiores de suelo, resultó de 31 961 068 toneladas para el primer muestreo y de 30 922 951 para el segundo muestreo. La variable "cantidad de sales por sitio de muestreo" se distribuyó log-normalmente, habiéndose definido los siguientes intervalos de confianza de acuerdo con la metodología indicada anteriormente:

| α : | Intervalo de confianza: |
|------------|--|
| 95% | $27'206,320 < CTS_1 < 35'147,307$ ton. |
| 90% | $27'778,134 < CTS_1 < 34'423,797$. |
| 60% | $29'279,831 < CTS_1 < 32'658,279$. |

Estos intervalos de confianza corresponden a los datos del segundo muestreo de suelos. Como puede verse, la simple comparación de las dos cantidades totales de sales (CTS_2 y CTS_1) no hubiera aportado ninguna conclusión, puesto que los intervalos resultan demasiado amplios. Por esta razón y aprovechando que se había muestreado aproximadamente los mismos sitios en ambos muestreos, se estudió la variable C_j , es decir el cociente de la cantidad de sales por sitio de muestreo del segundo entre el primer muestreo. Es interesante observar que el antilogaritmo del logaritmo medio de C_j resultó de $C_M = 0.9738$. De acuerdo con algunas consideraciones teóricas expuestas en,⁵ si la distribución es realmente log-normal otro estimador de este cociente mediano es:

$$\frac{CTS_2}{CTS_1} = \frac{30\,922\,951}{31\,961\,068} = 0.9675.$$

Como puede apreciarse estas dos cantidades coinciden de una manera aceptable, lo cual es una comprobación más de que tanto la variable "cantidad de sales por sitio de muestreo," como el cociente de dos cantidades de sales por sitio de muestreo obtenidas en dos muestreos sucesivos, sigue una distribución log-normal.

En este caso la probabilidad de que este cociente mediano sea menor de 1 es:

$$P\left(\frac{CTS_2}{CTS_1} < 1.0\right) = 0.62.$$

Esto significa que existe toda vía un 48% de probabilidades de que ese cociente es mayor de 1. En estas circunstancias no puede hacerse ninguna afirmación contundente, aunque fue inesperado el hecho de que la cantidad de sales en el segundo muestreo resultara un poco menor que en el primer muestreo.

Del resultado de dos levantamientos numero 6 y 5, sobre 400 sitios de muestreo, se observó lo siguiente:

1. El antilogaritmo del logaritmo medio de los cocientes de las cantidades de sales por sitio de muestreo del sexto entre el quinto muestreo, resultó de:

$$C_m = 1.0377482.$$

2. Otro estimador del cociente mediano, obtenido de dividir la cantidad total de sales estimada en el sexto muestreo entre la obtenida en el quinto muestreo, resultó de:

$$\frac{CTS_6}{CTS_5} = \frac{27\ 778\ 331}{26\ 769\ 771} = 1.037675.$$

3. Como puede observarse en este caso la estimación del cociente mediano resultó muy parecida por ambos métodos, lo cual indica que en este caso la variable "cantidad de sales por sitio de muestreo" así como el cociente de las cantidades respectivas obtenidas en dos muestreos sucesivos, se apegó muy satisfactoriamente a la distribución log-normal.
4. La probabilidad de que el cociente mediano sea mayor de 1 resultó de:

$$P\left(\frac{CTS_6}{CTS_5} > 1.0\right) = 0.73.$$

Aunque esta probabilidad se considera todavía relativamente baja, con base en los datos de estos muestreos se obtiene una verificación de que efectivamente está teniendo lugar un proceso de ensalitramiento.

En relación al muestreo de suelo surgen 2 preguntas a las que no ha sido posible todavía darles una respuesta definitiva. La primera se relaciona con el tipo de sales en los suelos que debe ser determinado. Como se sabe, las sales pueden estar en 3 formas:

- a) En estado soluble, cuando hay cierta humedad en el suelo.
- b) En forma precipitada para sales de baja solubilidad y en condiciones de poca humedad.
- c) En forma adsorbida en el complejo de intercambio.

La proporción de las sales totales que se encuentran en cada uno de estos 3 estados es variable en el tiempo, dependiendo principalmente de la humedad media del suelo, es decir de la época de riego, de los cambios en la calidad del agua, etc.

Hasta el momento presente las determinaciones de laboratorio se han orientado a cuantificar las sales e iones específicos en solución, considerando que la cantidad de sales adsorbidas y precipitadas se mantienen aproximadamente constantes, lo cual podría ser aceptable para el caso de las sales adsorbidas, pero no es así para las sales precipitadas. Las aguas del Río Colorado, que se utilizan para riego de estos suelos, son ricas en carbonato de calcio, razón por la cual es de esperar que una cierta proporción de esta sal se precipite sin constituir un peligro serio a corto plazo.

Al contabilizar solamente las sales solubles se está tomando en cuenta exclusivamente las que tienen influencia sobre los cultivos en forma directa, pero no puede esperarse entonces que este incremento coincida con el balance de las entradas y salidas, por el efecto de las sales precipitadas. De todas maneras podría argumentarse que en la medida que aumentan las sales totales en los suelos, se incrementan tanto las sales solubles como las precipitadas. Por esta razón un incremento sistemático de las sales solubles podría confirmar indirectamente un balance positivo, aunque la cantidad exacta no podría estimarse si no se contabilizaron de los 3 tipos de sales.

El segundo problema del muestreo de suelos se refiere a la dificultad de incrementar significativamente el tamaño de muestra (por ejemplo hasta 1000 ó 2000 sitios de muestreo) para disminuir la varianza y aumentar la precisión que permita hacer conclusiones más contundentes que verifiquen los resultados del balance de entradas y salidas. Un problema que aparentemente se ha tenido ha sido la dificultad de muestrear los mismos suelos en diferentes ocasiones. Por esta razón en algunas ocasiones se han tenido cocientes del orden de 10 ó de 1/10, lo que significa que la cantidad de sales aumento o disminuyo de un año a otro en 10 veces, lo cual no es posible explicar sino por el hecho de que no se muestrearon los mismos sitios. Esta situación está sugiriendo la conveniencia de muestrear parcelas que sean más fácilmente identificables por su número ó por el nombre de su propietario, dentro de las cuales se podrían localizar los subsitios o unidades secundarias de muestreo, que podrían ser

alrededor de 10. Esto aparentemente permitiría obtener mejores resultados.

Debe por otro lado tenerse presente que los estudios del balance de sales no dan información sobre la distribución de las sales dentro del área de estudio, razón por la cual estos trabajos deben completarse con los estudios de salinidad de suelos y estudios freáticos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Se ha formulado desde 1971 un balance diario, mensual y anual de las principales entradas y salidas de sales a un área de estudio que coincide apreciablemente con los límites del Distrito de Riego, aforándose y tomándose muestras de canales, drenes y pozos de bombeo.

2. Este balance ha permitido establecer la importancia de las diferentes componentes de entrada y salida, confirmándose que aunque la principal fuente de provisionamiento de sales siguen siendo las aguas derivadas de Presa Morelos, los pozos de bombeo ya empiezan a aportar cantidades de sales similares, que, correspondiendo a volúmenes un poco menores, tienen por tanto mayores concentraciones salinas.

3. Como puede apreciarse en todos los años el balance de entradas y salidas ha sido positivo, de alrededor de 2.5 millones de toneladas de sales que se están quedando en el Distrito de Riego, aunque es posible que una buena proporción de éstas esté constituida por carbonatos de calcio que al precipitarse dejan de constituir un peligro a corto plazo.

4. De los resultados del balance puede observarse que la cantidad de sales que entran por el Rio Colorado a la altura del Puente San Luis son en general mayores que las que salen por el mismo río en la parte baja del área de estudio, en el llamado Puente del Ferrocarril. Además la concentración de sales es menor a la salida que a la entrada, todo lo cual sugiere que las aguas que ingresan no son necesariamente las mismas que salen. Esta diferencia va a alimentar los acuíferos y posiblemente es reciclada por los pozos de bombeo profundo.

5. La cantidad de agua y sales que desfogon los drenes que van hacia el Golfo de California ha venido aumentando consistentemente, lo cual refleja en cierta forma el avance de los trabajos de rehabilitación, que comprende la construcción de nuevos drenes y la reconstrucción de los existentes.

6. Se ha definido una metodología de comparación de dos muestreos sucesivos de suelos, que permite calcular las probabilidades del

aumento ó disminución de dicha salinidad. Esto se ha basado en el hecho de que la cantidad de sales por sitio de muestreo se distribuye log-normalmente, lo cual también es válido para los cocientes de estas cantidades obtenidas en dos muestreos sucesivos y en los mismos sitios.

7. Las sales en los suelos pueden estar en tres estados: a) Estado soluble, b) en forma de precipitados y c) en forma adsorbida. Actualmente se están considerando solamente los cambios habidos en las sales solubles, por lo que no es de esperar una coincidencia absoluta entre los incrementos de salinidad detectados en los suelos y el balance de entradas y salidas.

8. Se recomienda la continuación de este estudio en forma indefinida, por la oportunidad que brinda para conocer y pronosticar las condiciones de salinidad, así como para evaluar desde este punto de vista la influencia que tienen algunos trabajos de rehabilitación como son la construcción o reconstrucción de drenes, el revestimiento de canales, la compactación de áreas de riego, la mejora en la técnica de riego, etc. Estos trabajos deben sin embargo complementarse con estudios de salinidad de suelos y estudios freaticos.

ABSTRACT

This study of the fluctuation of salt levels in the Mexicali irrigation district is being made with the cooperation of technicians under the Secretary of Water Resources, who are in charge of administering and making technical reports on the irrigation district. The study began in 1970 and is concerned with two aspects of the situation. First, an area of approximately 270,000 hectares, which includes almost the entire irrigation district, has been under study. Slightly more than 50 points at which water enters or leaves the area through drains and canals have been identified and are periodically examined and sampled, as are 40 pumping wells which have also been selected for the study. These 40 wells are considered representative of the more than 700 such wells in the area. This sampling permits the compilation of data concerning daily, monthly, and yearly fluctuations in the salt content of the water. Thus comparisons between the figures may reveal the impact of several factors. One example of this would be the increased salt removal through use of the newly constructed drains. If this data can be accurately interpreted, it will facilitate predictions regarding the salinity conditions in the area as well as the evaluation of the efficiency of methods in use.

The second part of the study includes yearly soil sampling which makes successive comparisons possible. The goal of this study is to

statistically evaluate the results of salinity fluctuation in incoming and outgoing water. To carry this out it has been necessary to develop a methodology for sampling saline soils, and many questions regarding that have yet to be answered.

Additionally studies are being made over the fact that salts may be found in three states—precipitates, absorbed, and soluble. Until recently attention has been focused on soluble salts only.