



III CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2017

Puebla, Pue., del 28 al 30 de noviembre de 2017

CALENTAMIENTO GLOBAL, SALINIDAD, DRENAJE Y PRODUCCIÓN AGRÍCOLA EN DISTRITOS DE RIEGO

Leonardo Pulido Madrigal^{1*}; Adán Jesús González Real²

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Mor. 62550.

lpulido@tlaloc.imta.mx (*Autor de correspondencia)

²Especialista en Tecnologías de la Información. Cuernavaca, Morelos.

Resumen

En el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, México se estudiaron los periodos 1970-2001 y 2012-2014, se ejecutaron análisis de varianza de regresión entre superficie ensalitrada y algunas variables agronómicas y climáticas. En el primer periodo se analizaron datos históricos de salinidad del suelo, freaticimetría, hidrometría, volumen de producción agrícola, temperatura y precipitación pluvial. Se estimó que la superficie ensalitrada aumentó 24.1% y 15.8% en los estratos de suelo a 30 y 60 cm de profundidad, respectivamente. Las zonas con niveles freáticos superficiales crecieron 21.9%. Debido a la salinidad y niveles freáticos la producción agrícola disminuyó 18.9%, mientras que la temperatura, precipitación pluvial, volumen de riego y superficie de cultivo redujeron la producción en 15.2%. La investigación del segundo periodo se realizó en el Módulo de Riego 05 del mismo distrito, se adquirieron datos mensuales de salinidad mediante análisis químico de muestras de suelo y muestreo in-situ; se midieron niveles freáticos superficiales y salinidad del agua freática para elaborar mapas. Se consultaron registros diarios de temperatura, precipitación pluvial y evapotranspiración. Se estimó un incremento de superficie ensalitrada de 468 ha por cada grado centígrado, equivalente a un 24%. La superficie ensalitrada creció en 3 % debido al aumento de niveles freáticos. El incremento de temperatura generó pérdidas de 1.5 Mg ha⁻¹ de trigo (23.4 %) y 0.3 Mg ha⁻¹ de cártamo (15.3%); el aumento de superficie ensalitrada redujo la producción de trigo (19.1%) y cártamo (10.6%). Respecto al 2012, en 2013 la superficie ensalitrada creció 5%, y en 2014 aumentó 1.6%.

Palabras clave adicionales: variables climáticas, nivel freático, suelos ensalitrados, cambio climático.



Introducción

En México los distritos de riego (DR's) son las áreas agrícolas más productivas, y la salinidad del suelo (CE) es considerada un problema serio ya que aproximadamente un 47 % de las afectaciones a nivel nacional se localizan en DR's del noroeste del país; y es en esta región en la que se ubica el Distrito de Riego (DR) 038 Río Mayo, en el estado de Sonora. En este DR se tienen afectadas por CE un 32% y por un nivel freático superficial (MF) un 37% de su superficie (De la Peña, 1993; Pulido *et al.*, 2003 y 2010).

En las zonas áridas y semiáridas, donde la precipitación pluvial es menor que la evaporación, las sales se pueden acumular sobre la superficie del suelo cuando la profundidad del nivel freático es menor de 1.5 m. La acumulación de sales en la superficie del suelo es consecuencia del movimiento ascendente del agua freática y del subsecuente transporte de sales en el perfil del suelo debidas a la capilaridad, impulsada por un proceso de evaporación. Sin embargo, la causa más común de la acumulación de sales es la evapotranspiración (ET), que aumenta la concentración de sales a medida que profundiza la zona radicular (Corwin *et al.*, 2012). En términos generales, las causas potenciales o fuentes de excesos de sales incluyen agua de riego salina, lixiviación inadecuada, drenaje inadecuado, sales del suelo nativas, y procesos continuos de inundación y evaporación con aguas cargadas de sal (Rhoades, 2012). Las sales contenidas en el agua de riego, con independencia de su origen, pueden salinizar las tierras agrícolas si el volumen de sales que sale de la zona radicular, es menor que la cantidad de sales que entra en esta zona por un período prolongado de tiempo (Grieve *et al.*, 2012).

En orden de importancia, las causas que dan origen al problema de CE y de MF en el DR 038 río Mayo son: los métodos de riego ineficientes, el mantenimiento deficiente de la red de drenaje, las pérdidas de agua por conducción, la falta de capacitación de usuarios, las condiciones de topografía, la ubicación y condiciones de descarga de la red de drenaje, la calidad del agua de riego y la intemperización química de los materiales terrestres, es decir minerales que son constituyentes de rocas y suelos (Pulido *et al.*, 2009; Tanji & Wallender, 2012)

Los escenarios que indican el impacto del cambio climático en variables como temperatura (T) y precipitación pluvial (PP) son llamados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés); el escenario RCP8.5 es el más extremo y supone un aumento de 8.5 W/m^2 para el año 2100 debido al aumento de gases de efecto de invernadero (IPCC, 2014). Según este escenario, se estima que para el periodo 2075-2099 en el sur del estado de Sonora la temperatura máxima en primavera-verano aumentará entre 5.0 y 5.4 °C y la precipitación pluvial decaerá un 16.9% (Salinas *et al.*, 2015). El IPCC (2014) expresa que el cambio climático ha afectado negativamente los rendimientos de trigo y maíz en muchas regiones y en el agregado global. Los efectos sobre el rendimiento de arroz y soya han sido menores en las principales regiones de producción y en todo el mundo.



La CE afecta más al rendimiento cuando el contenido de humedad ambiental es bajo (Maas, 1990; Rhoades, 2012). Diferentes experimentos han mostrado que la cebada (*Hordeum vulgare*), frijol, maíz (*Zea mays*), algodón, cebolla y rábano (*Raphanus sativus*) resultaron más sensibles a las sales en ambientes con bajos contenidos de humedad ambiental comparados con altos niveles de la misma. Las tolerancias de remolacha y trigo (*Triticum aestivum*) no fueron mayormente afectados por la humedad ambiente (Maas, 1990).

Los objetivos de este trabajo son: 1) Estudiar la relación que tienen con la salinidad del suelo y con el rendimiento de trigo y cártamo, el calentamiento global a través de la temperatura ambiente, evapotranspiración, precipitación pluvial, niveles freáticos superficiales, salinidad del agua de riego y salinidad del agua freática en el Módulo de Riego 05 del Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, durante los periodos 1970-2001 y 2012-2014. 2) Determinar el impacto en términos de incrementos de superficie ensalitrada y de disminución del rendimiento de trigo y cártamo, de la temperatura ambiente, precipitación pluvial, niveles freáticos superficiales, salinidad del agua de riego y salinidad del agua freática en el Módulo de Riego 05 del Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, durante los periodos 1970-2001 y 2012-2014.

Materiales y métodos

La presente investigación se llevó a cabo con la recopilación, análisis y generación in-situ de datos de salinidad del suelo, superficie ensalitrada, niveles freáticos superficiales, superficie con un nivel freático superficial, producción agrícola, superficie de cultivo, volumen de agua de riego, concentración de sales en agua de riego y en agua freática, temperatura ambiente, evapotranspiración y precipitación pluvial, obtenidos en los intervalos 1970-2001 y 2012-2014 en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, México.

El DR 038 Río Mayo se localiza entre los paralelos 26°21' y 28°31' N y meridianos 108°26' y 110°05', en el sur del estado de Sonora; tiene una superficie de riego de 96 951 ha, la cual es regada por gravedad con agua de la presa Adolfo Ruiz Cortines, y con agua de bombeo de pozos. Su clima es estepario semiárido, con precipitación media anual de 388 mm, temperatura media anual de 21.4 °C, y evaporación media anual de 2 222 mm. El área que constituye la zona de riego se integra a la planicie costera del noroeste de la República Mexicana, con suelos sensiblemente planos con pendientes menores del 1%. Su altitud oscila entre 2 y 50 metros sobre el nivel medio del mar (Reyes, 1994).

En el área del DR están identificadas 10 series de suelo (Reyes, 1994). Con excepción de la serie Camoa, todas las series presentan problemas de salinidad; se observa en el subsuelo un estrato salino-sódico (50-90 cm), con salinidad (CE) > 4 dSm¹ y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) mayor que 15%. Asimismo, con excepción de las series Navojoa y Camoa las restantes tienen también las características de presentar manto freático superficial (Reyes, 1994).



Periodo 1970-2001

Se analizaron datos de estudios de CE y MF realizados entre 1965 y 2001. Además, se adquirieron datos sobre VOL, S, R y calidad del agua de riego. Se consultaron informes de proyectos de salinidad y drenaje llevados a cabo en el DR 038 río Mayo y en otros distritos de riego del noroeste del país (Pulido *et al.*, 2003 y 2010; IMTA, 1997).

Entre 1971-2001 se reportaron 11 estudios de CE. Los estudios hasta 1985 consistieron en tomar muestras de suelo hasta una profundidad de entre 60 y 120 cm; para cada muestra de suelo se analizó en el laboratorio la salinidad (conductividad eléctrica, dS m^{-1}) y se obtuvo el PSI excepto en 1996 y 2001; en estos años se cartografió la salinidad en el estrato a 60 cm a través de imágenes de satélite y un sensor electromagnético (Pulido *et al.*, 2010). En el presente trabajo se considera como suelo salino a una $\text{CE} > 4 \text{ dS m}^{-1}$ (Richards, 1974).

Los estudios de MF empezaron a realizarse en 1965; se llevaron a cabo 20 estudios hasta el año 2001. Con las monitorizaciones se elaboraron mapas mensuales de isobatas para las profundidades $< 1\text{m}$, $1-1.5 \text{ m}$, $1.5-2.0 \text{ m}$, $2-3 \text{ m}$ y $> 3.0 \text{ m}$, de acuerdo con la metodología señalada por De la Peña (1979).

Se utilizaron datos de T y PP promedio anuales publicados entre 1969-2001 por el Campo Agrícola Experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicada aproximadamente en el centro geográfico del DR 038. De igual forma, los datos de clima fueron obtenidos de IMTA (2000) y a través de la Red de Estaciones Meteorológicas de Sonora.

El agua de riego proviene del Río Mayo y del bombeo de un acuífero subterráneo. La calidad química del agua de la presa no tiene restricciones para uso agrícola considerando su salinidad, ya que en promedio su CE era de 0.29 dS m^{-1} . El agua subterránea exhibió un contenido medio de sales disueltas del orden de 2.24 dS m^{-1} , que la clasificaron con un grado de restricción de ligera a moderada para su aprovechamiento agrícola; por ello se diluyó con el agua de la presa para reducir su concentración de sales (Ayers & Westcot, 1987; Beltrán *et al.*, 1999).

Se correlacionaron mediante modelos de regresión lineal simple, la superficie afectada por sales, la T, superficie afectada por MF, VOL, CE_{ar} , PP y producción agrícola (PROD). Se llevaron a cabo regresiones lineales múltiples para determinar la relación entre las superficies ensalitradas y la producción agrícola, con las variables referidas. El análisis estadístico se hizo a través del programa Excel 2010.

Periodo 2012-2014

En el periodo 2012-2014 el estudio se desarrolló en el Módulo de Riego 05 (MR05) perteneciente al DR 038. Se tomaron muestras de suelo en marzo de 2012, abril de 2013, y abril de 2014. El muestreo se llevó a cabo en una red de 62 sitios



establecida ex profeso en el área del MR05. Las muestras se tomaron manualmente a 30 y 60 cm de profundidad, y se analizaron en un laboratorio. En cada muestra se analizaron el pH (en pasta), la conductividad eléctrica, calcio, magnesio, sodio, potasio, carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos; con los contenidos de calcio, sodio y magnesio se calcularon la relación de adsorción de sodio (RAS) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI). Mensualmente se monitorizó la CE a las profundidades de 0-60 (estrato superficial) y 0-150 cm (estrato subsuperficial), para lo cual se utilizó un sensor electromagnético EM-38 de Geonics Limited. Se utilizó un receptor GPS Garmin Etrex Venture HC para determinar en cada sitio las coordenadas geográficas latitud y longitud, así como las coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator), y así desarrollar mapas de salinidad mensuales georeferenciados. Con los valores de CE del análisis químico y de las monitorizaciones, se generaron mapas de clases de salinidad.

En una red de 52 pozos de observación del MF construida ex profeso, se llevaron a cabo mediciones mensuales del nivel freático hasta una profundidad de tres metros. En estos pozos mensualmente se midió in-situ la salinidad del agua freática (CE_{af}) con un medidor portátil Hanna HI9811-5. Con las mediciones de MF y de CE_{af} se elaboraron mapas de isobatas y de CE_{af} . En el lapso diciembre-abril 2012-2013 y diciembre-marzo 2013-2014, se midió in-situ la salinidad del agua de riego (CE_{ar}); las mediciones se hicieron con el medidor referido.

En 2012 y 2013 fueron tomadas muestras de 1 m² de plantas de trigo y se estimó el impacto de la salinidad en la disminución de rendimiento de trigo. En parcelas de cártamo (*Carthamus tinctorius*) se adquirieron datos de los rendimientos logrados en 2013, mediante entrevistas a propietarios; de este modo se estimó la pérdida de rendimiento causada por la salinidad.

Las condiciones de T, PP y evapotranspiración (ET) diarias se extrajeron de www.agroson.org.mx. Se adquirieron datos sobre volúmenes de riego (VOL), superficies de siembra (S), y rendimientos unitarios (R) logrados durante el periodo 2012-2014, consultando los archivos del Distrito de Riego 038 río Mayo y de la S.R.L. Asimismo, se realizaron consultas de las estadísticas agrícolas (CONAGUA, 2015).

Se correlacionaron mediante modelos de regresión lineal simple, la CE y superficie afectada por sales, MF, superficie afectada por niveles freáticos superficiales, CE_{af} y superficie afectada por salinidad del agua freática, volumen de riego, CE_{ar} , T, ET y PP; asimismo los rendimientos de trigo y cártamo. Se llevaron a cabo regresiones lineales múltiples para determinar la relación entre las superficies ensalitradas con las variables climáticas y agronómicas mencionadas. Se estimó el impacto de la salinidad, MF y temperatura en la pérdida de rendimiento de trigo y cártamo.



Análisis y discusión de resultados

Periodo 1970-2001

En promedio en el estrato 0-30 cm se cuantificaron 25 578 ha (23%); en el estrato 30-60 cm se cuantificaron 31 458 ha (28%), y en el estrato 60-90 cm se promediaron 50 563 ha (45%). El promedio global de superficie ensalitrada resultó de un 32% del área total del DR. Los valores de superficie afectada más altos, superiores a 35,000 ha en los tres estratos, se registraron en el periodo 1975-1980, y en el año 1996.

La superficie anual promedio de afectación por MF (< 1.5 m) fue de poco más de 6 000 ha durante 1965, 1975 y 1980; en 1985 resultó cercana a 41 500 ha, siete veces mayor que en aquellos tres años. La superficie media anual afectada por MF resultó de 20 000 ha para el periodo 1970-2001. Durante el periodo 1981-1999 se estimaron las mayores afectaciones; los meses con mayores problemas fueron febrero y marzo, que también fueron los meses en los que se aplicaron mayores volúmenes de agua para riego. Las áreas con mayores afectaciones coincidieron aproximadamente con las áreas afectadas por CE, de lo que se infirió una relación entre ambas.

En el lapso de 1970-2001, la T y la PP tuvieron valores medios de 18.4°C y 415 mm, respectivamente. La T empezó a incrementarse a partir de 1992, y entre este año y 2001 el valor medio fue de 20.6°C; el aumento de 2.2 °C fue equivalente al 12.2%; esta elevación concordó con el comportamiento registrado a nivel nacional, con observaciones entre 1970-2008 (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2012). También entre 1992-2001 la PP disminuyó a un valor medio de 333 mm anuales, con respecto al periodo 1968-1991; la reducción de 82 mm equivalió al 19.6% del total anual. Más del ochenta por ciento de las lluvias ocurrieron en el verano.

En el periodo 1968-2001 el VOL promedio anual fue de 925.03 hm³. Esta cantidad cambió al separar el periodo en dos etapas: una primera que incluye desde el inicio de observaciones en el ciclo agrícola 1970-1971 y hasta que se empezaron a observar cambios en el comportamiento de la T y la PP, que fue de 1970-1992, donde el promedio de agua aplicado en el DR fue de 939.16 hm³; y otra etapa que comprendió los años 1993-2001, donde la T media se incrementó 1.9 °C (10.6%) y la PP promedio disminuyó 76 mm (18.3), y en la cual el promedio anual de agua de riego fue de 901.53 hm³; este decremento de 37.63 hm³ representó el 4.2%.

La superficie media anual cosechada entre 1983-2001 fue de 103,660 ha; entre los años 1983-1992 el promedio fue de 108,240 ha, y en el periodo comprendido de 1993-2001, en el cual se observó un incremento de la T y una reducción de la PP, la superficie cosechada fue de 99,080 ha; la disminución de 9 159 ha significó el 9.2%. La PROD media anual en el periodo 1983-2001 fue de 578 708 Mg; en el periodo de 1983-1991 el promedio fue de 522 775 Mg; y en el periodo de 1992-2001, se obtuvo una media de 623 454 mega gramos.



En el análisis de regresión lineal simple las variables dependientes fueron CE y PROD; como variables independientes se analizaron T, PP, VOL, MF y CE_{ar} (Tabla 1). El efecto del aumento de T en el incremento de la superficie ensalitrada se observó en el estrato 0-30 cm, considerando el periodo 1977-1996 (modelo 1, r²= 0.91). El efecto se debió a que es el estrato de suelo que está más expuesto al ascenso capilar de sales por la elevación de MF y por efecto de la ET. Sin embargo, en los estratos subsuperficiales a 30-60, 60-90 y 0-120 cm (modelo 2), los valores de CE más altos (registrados en 1976) se cuantificaron cuando las temperaturas fueron más bajas (1970-1991).

Tabla 1. Modelos de regresión lineal simple que relacionan salinidad, temperatura, superficie con niveles freáticos superficiales, producción de cosechas y superficie de siembra.

Periodo	Estrato (cm)	Modelo	Modelo de regresión	R ²
1977-1996	0-30	1	CE= 13670(T) - 210123	0.91
1971-2001	30-60	2	CE= -2731.5(T) + 80478	0.70
1977-1996	0-30	3	CE= 0.814(MF) + 14322	0.89
1971-2001	0-30	4	CE= 82.93 (VOL.) – 34597.63	0.85
1971-2001	30-60	5	CE= 47.98 (VOL.) – 14111.3	0.91
1970-2001		6	MF= 45.039(VOL.) - 23561	0.69
1971-2001	0-30	7	CE=204.34(PP) + 20518	0.54
1994-2001		8	PROD.= -68.0967(T) + 2058.7	0.71
1985-2001		9	PROD.= -0.0092(MF) + 910.70	0.93
1996-2000		10	PROD.= -386.60(CE _{ar}) + 1035.82	0.90
1973-1980	0-30	11	CE= 42014.117 – 969.0305*T + 0.7997*MF – 18.2083*VOL + 19.2406*PP	0.91
1971-2001	30-60	12	CE= 65291.175 – 1267.718*T + 0.7369*MF – 27.1452*VOL + 10.7613*PP	0.94
1993-2001		13	PROD.= 1066.5374 + 57.8349*T - 0.3071*PP + 2.3622*VOL – 0.0375*SUP	0.93
1985-2001		14	PROD.= 728.5121 + 0.0014*CE - 0.0079*MF	0.98

¹CE= superficie ensalitrada (ha); T= temperatura (°C); MF= superficie con niveles freáticos <1.5 m (ha); PP= precipitación pluvial (cm); VOL= volumen de agua utilizado para riego (hm³); PROD= producción (Mg*1000); CE_{ar}= conductividad eléctrica del agua de riego (dS m⁻¹); SUP= superficie cosechada (ha).

La influencia de MF en el incremento de superficie ensalitrada se observó en el periodo 1971-1996, en el estrato 0-30 cm (modelo 3, r²= 0.89). Igualmente, en este lapso se registraron las más altas superficies ensalitradas (años 1976, 1977 y 1996), que coincidieron con parte de la época con temperaturas más altas. Estos resultados confirmaron que los MF tuvieron relación con el ensalitramiento de los suelos (De la Peña, 1979; Ayers & Westcot, 1987; Rhoades, 2012).

Se estableció una relación entre la superficie ensalitrada y los volúmenes de agua de riego aplicados considerando los estratos 0-30 (modelo 4, R²= 0.85, periodo 1971-2001) y 30-60 cm (modelo 5, R²= 0.91, periodo 1971-2001). Comparativamente, en el periodo 1970-1992 se utilizaron para riego 939.16 hm³,



mientras que en el periodo 1993-2001 se aplicaron 901.5 hm^3 ; la diferencia fue de 37.63 hm^3 y es equivalente al 4.2%.

Los volúmenes de riego influyeron en el desarrollo de superficies con niveles freáticos superficiales (modelo 6, $R^2= 0.69$); por lo que el agua de riego es una de las principales causas de un MF. Además, el agua de riego contiene sales disueltas que contribuyen al ensalitramiento del suelo. Al respecto, durante el ciclo agrícola 1998-99 la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) varió de 640 hasta $1\ 229 \text{ mg L}^{-1}$; en este periodo se evaluó el impacto del contenido de sales del agua de riego en el suelo, y se observó que se elevaron los valores de CE, de 7.5 a 10 dS/m y de PSI de 8.8 a 12.1% (Beltrán *et al.*, 1999).

La presencia de áreas ensalitradas en el estrato 0-30 cm se explicó también por el efecto del agua de las lluvias que disuelven las sales y aportan humedad al manto freático; y éste por efecto de la temperatura y evaporación asciende a la superficie del suelo y deja sales en el estrato superficial (modelo 7, $R^2= 0.54$). Entre 1992-2001 cuando las precipitaciones pluviales fueron más bajas, en promedio de 333 mm, y la temperatura media fue de $20.6 \text{ }^\circ\text{C}$, las superficies ensalitradas fueron en promedio de 32 789 ha. Mientras que en el periodo 1970-1990 la precipitación pluvial promedio fue de 452 mm, la temperatura media fue de $17.4 \text{ }^\circ\text{C}$, y la superficie media ensalitrada resultó de 25 578 hectáreas; el incremento llegó a un 28%.

Es así que en el periodo 1994-2001 con una temperatura media anual de $20.4 \text{ }^\circ\text{C}$ se encontró un impacto negativo de ésta en la producción agrícola, por cuanto se distinguió una disminución en el volumen de cosechas (modelo 8, $R^2= 0.71$). Una explicación de esta reducción en la producción es debida a que la mayor parte de cultivos producidos en el DR 038 río Mayo tienen fotosíntesis tipo C3, cuya temperatura óptima está entre 15 y $20 \text{ }^\circ\text{C}$, como en el trigo, frijol, papa y tomate (Luo, 2011; Reilly, 1996). Otra explicación es que durante 1993-2001 la superficie de siembra fue de 98 084 ha, menor que la superficie cultivada entre 1983-2001 de 103 660 ha; también la baja en el volumen de producción se debió a una menor disponibilidad de agua de riego. Con base en el modelo 8 se estimó una pérdida de cosecha de 67 986 Mg equivalentes al 10.4% por cada grado Celsius de aumento, a partir de los $19.2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se estimó el impacto de la superficie afectada por MF en la producción de cosechas (modelo 9, $R^2= 0.93$), equivalente a 71 429 Mg (10.9%). A partir del modelo 10 ($R^2= 0.90$) se estimó una pérdida de cosecha del 25.3% por efecto de incrementar la salinidad del agua de riego de 0.67 a 1.4 dS m^{-1} . Beltrán *et al.* (1999) verificaron en el trigo un decremento en la producción de grano de 1.0 Mg ha^{-1} , al aumentar de 0.67 a 1.4 dS m^{-1} la concentración de sales en el agua de riego.

Con el modelo 11 ($R^2=0.91$) de la Tabla 1 se estimó el impacto de las variables T, MF, VOL y PP, en el aumento de la salinidad en el estrato 0-30 cm. Como resultado se obtuvo una superficie ensalitrada de 31 739 ha, que restada a la



superficie media ensalitrada de 25 578 ha en el estrato 0-30 cm del periodo 1971-2001, dio un incremento de 6 161 ha, equivalente al 24.1%. Con base en el modelo 12 ($R^2=0.94$) de la Tabla 1 elaborada para el estrato 30-60 cm de profundidad, se determinó que las mismas variables del modelo 11 causaron un incremento en la superficie ensalitrada de 4 977 ha, que representaron el 15.8%.

De las estimaciones en cuanto a superficie ensalitrada desarrolladas con los modelos 11 y 12, se concluyó que con el calentamiento global en los estratos a 0-30 y 30-60 cm de profundidad se incrementaría la superficie ensalitrada. El estrato de suelo más afectado fue el de 0-30 cm, seguido del estrato a 30-60 cm de profundidad; en ambos estratos es donde se concentra el sistema radicular de la mayoría de cultivos que se practicaron en este DR. Ello se explicó por el incremento de T y disminución de PP; esta última responsable de un menor volumen de agua de riego. El incremento de T favoreció el aumento de la ET que influyó en el ascenso capilar de humedad y de sales hacia la superficie del suelo; es también responsable del desarrollo de MF. Estos resultados concordaron con Richards (1974), Rhoades (2012) y Jurinak y Suarez (1990).

Con base en el modelo número 13 se calculó una pérdida de cosecha influenciada por las variables T, PP, VOL y S, de 83 914 Mg equivalentes al 15.2% para el periodo 1993-2001, donde hubo temperaturas más altas y menores volúmenes de riego. Para la mayoría de cultivos que se produjeron durante el periodo 1970-2001 en el DR 038, los niveles altos de sales causaron decrementos en su rendimiento debido a las diferencias en cuanto a la tolerancia a las sales, de acuerdo con lo establecido por Ayers y Westcot (1987), Maas (1990) y Grieve *et al.*, (2012). Es por ello que se desarrolló el modelo 14 ($R^2=0.98$) que considera el periodo 1985-2001, en el cual el volumen de producción agrícola es la variable dependiente y la superficie ensalitrada y la superficie con un nivel freático superficial son las variables independientes. Con base en este modelo se calculó una disminución de 100 898 Mg de producción agrícola, equivalentes al 18.9%.

Periodo 2012-2014

Se encontró que en 2013 en el estrato 0-30 cm la distribución de suelos normales (Richards, 1974), salinos, y salino sódicos, se determinaron las mayores afectaciones tanto de salinidad como de sodicidad, en conjunto del orden de un 73.2%. Las menores afectaciones se cuantificaron en 2014, equivalentes al 44.2% de la superficie física del módulo; por su parte en 2012 las afectaciones fueron del 67.8%. El incremento de superficie ensalitrada en 2013 con respecto a 2012 fue del 5.4%; sin embargo, en 2014 se calculó un decremento del 23.6% con respecto al año 2012. No se encontraron suelos sódicos. Por su parte, en el estrato 30-60 cm se determinó que con respecto a 2012 en forma global la superficie ensalitrada con suelos salinos y salino sódicos incrementó en 2013 un 16.0% y en 2014 un 14.7%. Las mayores afectaciones se evaluaron en 2013; de igual forma, entre los dos estratos las mayores afectaciones se estimaron en el estrato a 30-60 cm. Esto es, en los tres años en los primeros 30 cm de profundidad el promedio de afectaciones fue del 61.8%, y en el estrato a 30-60 cm fue del 75.8%.



Con la monitorización mensual de la salinidad en el estrato superficial (0-60 cm) en 2013 se cuantificó un incremento de superficie ensalitrada del 1.8% con respecto a 2012, mientras que en 2014 en el mismo estrato se valoró un decremento del 12.6%; por su parte en el estrato subsuperficial y también con respecto a 2012, se calcularon incrementos de afectaciones del orden del 2.4% en 2013 y de 0.5% en 2014. Comparativamente en ambos estratos de suelo, las más altas afectaciones por sales se valoraron en 2013, tanto en los meses de diciembre, febrero y marzo en invierno durante el ciclo agrícola O-I, como en agosto, durante el verano y en la temporada de lluvias, que coincidió cuando aproximadamente el 90% de la superficie de siembra estaba sin cultivar.

Al comparar los niveles freáticos superficiales medios de los tres años (1.90, 1.76 y 1.79 m, en 2012, 2013 y 2014, respectivamente), y considerando el promedio del nivel freático estacional (noviembre-mayo), en 2013 se determinó el nivel más superficial, que coincidió con las más altas afectaciones de salinidad del suelo. En el ciclo de cultivo O-I la variable nivel freático superficial fue una de las más importantes que explicaron el ensalitramiento de los suelos, debido a que en invierno es cuando se encontraron las mayores superficies afectadas por drenaje y por salinidad. Se infirió que la profundidad al nivel freático superficial está en función de las aportaciones de humedad al manto freático que se desarrollan a lo largo del ciclo de cultivo, debidas a sobrierigos y a las filtraciones de agua originadas en los canales de riego.

En 2013 se cuantificaron las mayores superficies con nivel freático superficial (57.4%), seguidas de 2014 (52.9%) y 2012 (48.1%). Al correlacionar como variable independiente los promedios del porcentaje de superficie con nivel freático superficial de 2012, 2013 y 2014 con los porcentajes de superficie ensalitrada como variable dependiente, cuyos valores son 91.4, 94.4 y 92.4, respectivamente, la correlación fue alta, $R^2=0.96$ (modelo 1, Tabla 2). Según este modelo, un incremento del 10% en superficie con MF impactaría en un aumento del 3.3% en superficie ensalitrada; esto equivale a 33 ha ensalitradas por cada 100 ha con nivel freático superficial. El anterior resultado explicó en buena medida la existencia de superficies afectadas por salinidad en el módulo de riego, específicamente durante los ciclos agrícolas de otoño-invierno. Las áreas afectadas por niveles freáticos superficiales se distribuyeron geográficamente desde la Ciudad de Huatabampo hacia la costa, en coincidencia con la distribución espacial de las áreas ensalitradas.

Los volúmenes de agua de riego que se aplicaron en el MR05 durante los años 2012, 2013 y 2014 fueron de 18.52, 25.58 y 24.41 hm^3 , respectivamente. Se correlacionaron la superficie afectada por niveles freáticos superficiales y los volúmenes de riego, misma que dio una $R^2=0.88$ (modelo 2, Tabla 2). Con este resultado se infirió que las aportaciones de humedad al manto freático superficial derivadas de bajas eficiencias de riego parcelarias, filtraciones de humedad en los canales de riego, a la par de un drenaje de suelos deficiente e insuficiente, propiciaron la formación de niveles freáticos superficiales y de extensas superficies con niveles freáticos superficiales (Pulido *et al.*, 2009). Asimismo, la



correlación entre la superficie media ensalitrada del estrato 30-60 cm y los volúmenes de riego, arrojó una $R^2=0.99$ (modelo 3, Tabla 2). Por lo tanto, los problemas de salinidad del módulo de riego también están ligados estrechamente con los volúmenes de agua de riego.

Tabla 2. Modelos de regresión lineal simple que relacionan variables agronómicas y climáticas desarrolladas en el Módulo de Riego 05 durante el periodo 2012-2014.

Periodo	Estrato (cm)	No. de modelo	Modelo de regresión	R^2
2012-2014	0-150	1	$CE^1 = 75.511 + 0.326(MF)$	0.96
2012-2014	----	2	$MF = 26.213 + 1.163(VOL)$	0.88
2012-2014	30-60	3	$CE = 22.404 + 2.34(VOL)$	0.99
2012-2014	0-60	4	$CE = -5.591 + 2.215(CEaf)$	0.95
Diciembre-marzo 2013-2014	0-150	5	$CE = 91.197 + 3.017(CEar)$	0.96
2012-2014	0-150	6	$Rt = 36.885 - 0.357(CE)$	0.99
2012-2014	----	7	$Rt = -1.558 + 3.949(MF)$	0.54
2012-2014	----	8	$Rc = 8.496 - 0.075(CE)$	0.98
2012-2014	----	9	$Rc = 0.060 + 0.934(MF)$	0.79
2012-2014	30-60	10	$CE = -59.01 + 7.632(T)$	0.84
2012-2014	0-30	11	$CE = -53.9 + 0.894(ET)$	0.94
2012-2014	----	12	$ET = -48.422 + 0.047(MF)$	0.75
Mayo-octubre 2013	0-150	13	$CE = 86.425 + 0.048(PP)$	0.61
2012-2014	----	14	$Rt = 41.406 - 1.512(T)$	0.95
2012-2014	----	15	$Rc = 9.286 - 0.312(T)$	0.89

¹CE= superficie ensalitrada (%); T= temperatura (°C); ET= evapotranspiración de referencia (mm); MF= superficie con niveles freáticos <1.5 m (%); PP= precipitación pluvial (mm); VOL= volumen de agua utilizado para riego (hm³); CEaf= conductividad eléctrica del agua freática (dS m⁻¹); CEar= conductividad eléctrica del agua de riego (dS m⁻¹); Rt= rendimiento de trigo (ton ha⁻¹); Rc= rendimiento de cártamo (ton ha⁻¹).

Las concentraciones de sales más altas del agua freática en promedio anual se determinaron en 2012 (6.7 dS m⁻¹), 2014 (5.6 dS m⁻¹) y 2013 (5.4 dS m⁻¹). Las mayores afectaciones en superficie se cuantificaron en 2013 (82.4%), seguidas de 2014 (77.0%) y de 2012 (63.5%). Se observó que en cada uno de los tres años los valores medios mensuales más altos se obtuvieron al finalizar los ciclos agrícolas, en abril y mayo en coincidencia con los niveles freáticos superficiales más altos; y por su parte durante el verano se obtuvieron las superficies con menores afectaciones de salinidad del agua freática, también en correspondencia con las menores superficies afectadas por niveles freáticos superficiales. Las superficies más afectadas se delimitaron hacia el sur del módulo de riego. Se evaluó que el nivel de salinidad del agua freática tiene una clara influencia en el ensalitramiento de los suelos en el estrato 0-60 cm, ya que la correlación entre estas variables arrojó una $R^2= 0.95$ (modelo 4; Tabla 2).

Se analizó la influencia de la salinidad del agua de riego en el ensalitramiento del suelo. Los datos analizados cubrieron el periodo diciembre 2013-marzo 2014. Los



datos de salinidad del agua de riego variaron de 0.70-1.38 dS m⁻¹, y la superficie ensalitrada en el estrato subsuperficial varió de 93.1-96.2% (R²= 0.96, modelo 5, Tabla 2). Estos resultados permitieron concluir que la concentración de sales del agua de riego que fue utilizada en el módulo de riego contribuyó en el ensalitrado del suelo.

Los rendimientos medios de trigo del periodo 2012-2014 fueron de 6.93, 6.61 y 5.56 Mg ha⁻¹ para 2012, 2013 y 2014, respectivamente (CONAGUA, 2015). Con los porcentajes de superficies medias afectadas de CE en el estrato 0-150 cm se correlacionaron ambas variables (R²=0.99, modelo 6; Tabla 2); con base en este modelo se estimó una pérdida de rendimiento de 1.43 Mg ha⁻¹. En promedio en el mes de abril las afectaciones por un nivel freático superficial fueron de 2.16, 1.94 y 1.92 m en los años 2012, 2013 y 2014, respectivamente; con estos datos y los rendimientos de trigo referidos se calculó una R²=0.54 (modelo 7; Tabla 2); con base en dicho modelo se calculó el impacto de un nivel freático <1.5 m de profundidad en 2.60 Mg ha⁻¹ de trigo. El rendimiento medio de cártamo fue de 2.18, 2.08 y 1.88 Mg ha⁻¹, en 2012, 2013 y 2014, correspondientemente (CONAGUA, 2015). Con los datos estimados de superficies ensalitradas se determinó una pérdida de rendimiento de cártamo de 0.302 Mg ha⁻¹ (R²=0.98, modelo 8; Tabla 2); el impacto de niveles freáticos superficiales en el rendimiento fue de 0.61 Mg ha⁻¹ de cártamo (R²=0.79) (modelo 9, Tabla 2).

La temperatura media anual de los años 2012, 2013 y 2014 fue de 22.7, 22.6 y 23.6 °C, respectivamente; los meses con temperaturas medias más altas fueron agosto con 29.7 °C, julio con 30.3 y junio con 30.9 °C, en los años señalados. La evapotranspiración anual acumulada en 2012, 2013 y 2014 resultó de 1455, 1607 y 1491 mm en cada año; en cada uno de estos años en mayo se obtuvo el valor más alto y en diciembre el más bajo. La precipitación pluvial anual acumulada en 2012 fue de 201 mm, en 2013 de 324 mm y en 2014 de 221 mm; los meses con mayores volúmenes de lluvia fueron julio y agosto.

Las temperaturas medias en marzo de los tres años, de 16.5, 17.9 y 18.6°C, respectivamente, correlacionaron con las superficies ensalitradas estimadas en el estrato superficial, de 65.6 a 81.6% (R²=0.84, modelo 10; Tabla 2); por cuanto al aumentar las temperaturas también aumentaron los valores de salinidad. El impacto de la temperatura en la salinidad estimado con dicho modelo, representó un 7.6% de incremento en superficie ensalitrada, equivalentes a 469 ha por cada °C. El incremento en la ET acumulada del mes de marzo, de 140, 138 y 110 mm se correlacionó con el porcentaje medio de superficie ensalitrada, analizada en el estrato 0-30 cm de profundidad, que varió de 44.2 a 73.2% (R²= 0.94; modelo 11; Tabla 2), ya que al aumentar la evapotranspiración también se calculó un aumento de la superficie ensalitrada; el aumento de ET en 10 mm fue equivalente a 547 ha de CE. De igual manera, la correlación con datos anuales de ET acumulada de 1455 a 1607 mm y porcentaje de superficie afectada por un nivel freático superficial de 18.1 a 26.5, dio una R²=0.75 (modelo 12; Tabla 2). Se determinó que las lluvias aportaron humedad al suelo que contribuyó en la salinización de los suelos debido al ascenso por capilaridad de sales solubles, ya que las mayores



precipitaciones anuales cayeron en la época de temperaturas más altas, en el verano. Durante mayo-octubre de 2013 se registraron PP hasta de 140 mm en agosto y en este mes se calculó la mayor superficie ensalitrada, de 93.8% del área del MR05; en la regresión lineal entre estas variables se calculó una $R^2 = 0.61$ (modelo 13; Cuadro 2).

Se analizó la relación entre el rendimiento medio anual de trigo que varío de 5.56-6.93 Mg ha^{-1} (CONAGUA, 2015) y la temperatura media anual del periodo 2012-2014, que fue de 22.9-23.7 °C, de lo cual resultó una $R^2 = 0.95$ (modelo 14; bla 2) que explicó la ocurrencia de altas temperaturas, coincidiendo con menores rendimientos; con el modelo desarrollado se estimó una pérdida de 1.5 Mg ha^{-1} de trigo por cada °C de incremento en la temperatura. En cártamo también se calculó el decremento en su rendimiento generado por el incremento en la temperatura; se analizaron rendimientos medios de 1.88 - 2.18 Mg ha^{-1} en los años 2012-2014 (CONAGUA, 2015); de la correlación realizada se obtuvo una $R^2 = 0.89$ (modelo 15; Tabla 2), por medio de este modelo se estimó una pérdida de 0.312 Mg ha^{-1} de cártamo por cada °C de incremento en la temperatura.

Conclusiones y recomendaciones

En el ensalitramiento del suelo en el Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora en los periodos de tiempo analizados: 1970-2001 y 2012-2014, intervinieron las variables: temperatura ambiente, evapotranspiración, precipitación pluvial, niveles freáticos superficiales, concentración de sales en el agua freática y concentración de sales en el agua de riego. Asimismo, en los niveles de estas variables se observó una tendencia ascendente; sobre todo en el segundo periodo en el cual se obtuvo una mayor superficie ensalitrada en 2013 y 2014 comparada con la estimada en 2012, y como consecuencia, se establecieron incrementos en la superficie ensalitrada acordes con los incrementos en temperatura, evapotranspiración, y los aumentos en superficies afectadas con niveles freáticos superficiales.

Por efectos del calentamiento global manifestado en incrementos en temperatura y evapotranspiración, y en reducciones de la precipitación pluvial, se redujo la producción agrícola en el periodo 1970-2001 y en el periodo 2012-2014 disminuyó el rendimiento de trigo y cártamo. Estos resultados suponen un escenario de mayor superficie ensalitrada y de disminución del rendimiento de cultivos, en el Distrito de Riego 038 río Mayo, como consecuencia del calentamiento global.

Para enfrentar los problemas derivados del calentamiento global, es recomendable aplicar estrategias y programas para rehabilitar suelos ensalitrados, mediante un mejor uso del agua de riego para aumentar eficiencias de riego parcelarias, así como el revestimiento de canales para disminuir pérdidas por filtración; también es necesario mejorar el mantenimiento y conservación de la red de drenaje a cielo abierto. Es aconsejable la instalación drenaje parcelario subsuperficial donde la altitud, topografía y las texturas del suelo lo permitan. En las partes bajas de las planicies costeras donde los problemas de salinidad y drenaje son mayores, es



recomendable la investigación del drenaje parcelario y bombeo del drenaje con energías renovables. Es necesario incrementar la asistencia técnica y capacitación a los agroproductores en prácticas de manejo del agua y del suelo, para la conservación de estos recursos; implementar estrategias de ajustes a los calendarios de siembra, ya que en el periodo 2012-2014 se observaron inviernos más cálidos que afectaron la producción de trigo, que requiere horas-frío. Es necesaria la investigación agrícola, para determinar medidas de mitigación y adaptación ante los efectos del calentamiento global.

Referencias bibliográficas

- Ayers, R. S. y D. W. Westcot. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO, Riego y Drenaje. Núm 29, rev.1, Roma, 172 p.
- Beltrán, F. M. de J., C. F. Cabrera, B. J. M. Lam y Z. A. Lozano. 1999. Efecto del uso conjunto del agua subterránea y superficial en la productividad de los suelos del Valle del Mayo. Informe 1998. INIFAP, Campo Agrícola Experimental Valle del Mayo. Navojoa, Sonora, México.
- Conagua (Comisión Nacional del Agua). 2015. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego, años agrícolas 2011-2012, 2012-2013 y 2013-2014. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. Recuperado de www.conagua.gob.mx
- Corwin, D. L.; Lesch, S.M y Lobell, D.B. 2012. Laboratory and field measurements. En Wallender, W.W. y Tanji, K.K (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (pp.295-341). Reston, VA: ASCE
- De la Peña, I. 1979. Principios y solución de drenaje parcelario, Boletín Técnico No. 9, Ciudad Obregón, Sonora: SARH
- De la Peña, I. 1993. Problemas de salinidad y drenaje en México. Documento de circulación interna. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional en el Noroeste, Subgerencia de Riego y Drenaje, Cd. Obregón, Sonora.
- Grieve, C.M., Grattan, S.R. y Maas, E.V. 2012. Plant salt tolerance. En W.W. Wallender y K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (pp 405-459). Reston, VA: ASCE
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 1997. Proyecto ejecutivo de drenaje parcelario para recuperar 5,000 ha en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. Eric II: Extractor rápido de información climatológica, 1929-1998. Jiutepec México: Comisión Nacional del Agua; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (ed.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- Jurinak J. J. y Suarez, D.L. 1990. The Chemistry of Salt-Affected Soils and Waters. Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of



- Civil Engineers. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71.
- Luo, Q. 2011. Temperature thresholds and crop production: a review. *Climatic change* 109: 583-598. Springer Science+Business Media B.V. 2011. Recuperado de www.locean-ipsl.upmc.fr/
- Maas, E. V. 1990. *Crop Salt Tolerance: Agricultural Salinity Assessment and Management*. American Society of Civil Engineers. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71.
- Martínez, A. P. F. y C. Patiño-Gómez. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3,1, 5-20.
- Pulido M., L., Wiegand, C.L., González Meraz, J., Robles Rubio, B.D, Cisneros Estrada, X. y Lemus Ramírez, O. 2003. La salinidad del suelo y su efecto en el rendimiento de los cultivos estudiados con imágenes de satélite en tres distritos de riego. *Ingeniería Hidráulica en México*, 18,2, 83-97.
- Pulido, M., L.; González Meraz, J. y Villarreal, M. 2009. Metodología para el diagnóstico, manejo y control de la salinidad, aplicada en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, 24, 1, 55-72.
- Pulido, M. L.; González Meraz, J. Wiegand, C.J, Infante Reyes, J. y Delgado, J.M. 2010. Monitoreo de la salinidad mediante sensores remotos. *Terra Latinoamericana*, 28, 1, 15-26.
- Reilly, J. 1996. Agriculture in a changing climate: impacts and Adaptation. En R.T. Watson, M.C., Zinyowera & R.H. Moss (eds.), *Climate change 1995: impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific technical analyses* (pp 427-467). Cambridge: Cambridge Univ. Press
- Reyes, Q. C. 1994. Estudio agrológico semidetallado del Distrito de Riego 038 Río Mayo. Navojoa, Sonora: Comisión Nacional del Agua.
- Rhoades, J. D. 2012. Diagnosis of salinity problems and selection of control practices: An overview. En: W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. *Agricultural Salinity Assessment and Management* (pp 27-55). Reston, VA: ASCE
- Richards, L. A. 1974. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*, México: Limusa.
- Salinas, P, J. A., Colorado Ruiz, G. y Maya Magaña, M.E. 2015. Escenarios de cambio climático para México. En: *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
- Tanji, K.K. y Walleneder, WW. 2012. Nature and extent of agricultural salinity and sodicity. En W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. *Agricultural Salinity Assessment and Management* (pp 1-25). Reston, VA: ASCE