



II CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2016

Chapingo, Edo. de México, del 08 al 10 de septiembre

IMPACTO DEL CALENTAMIENTO GLOBAL EN LA SALINIDAD Y EL DRENAJE DEL DISTRITO DE RIEGO 038 RÍO MAYO, SONORA

**Leonardo Pulido Madrigal^{1*}; Heber Eleazar Saucedo Rojas¹; Inocente Aragón
Figueroa²; José Efraín Cervantes Luna²; Heriberto Cázares Vega³**

¹Coordinación de Riego y Drenaje, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Mor. C.P. 62550. lpulido@tlaloc.imta.mx. (*Autor para correspondencia).

²Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego del Río Mayo, Otero S/N entre Josefa Ortiz de Domínguez y Amado Nervo, Navojoa, Sonora, 85,870

³Módulo de Riego 05, Huatabampo, Sonora.

Resumen

Durante el periodo 2012-2014 se llevó a cabo una investigación en el Módulo de Riego 05 del Distrito de Riego 038 río Mayo, Son., con la finalidad de determinar el impacto del calentamiento global en los problemas de salinidad y drenaje del Distrito de Riego 038 río Mayo, Son. Para tal propósito se estudiaron *in-situ* las variables salinidad del suelo, profundidad del nivel freático superficial, salinidad del agua freática, y se adquirieron datos de volumen de riego, temperatura, precipitación pluvial y evapotranspiración. Los datos de salinidad del suelo, agua freática, y de niveles freáticos se analizaron en un sistema de información geográfico, con el cual se desarrollaron mapas mensuales de clasificación por salinidad, isobatas y salinidad del agua freática. El conjunto de datos agronómicos y climáticos se analizó estadísticamente, y así se determinó el impacto de las distintas variables en el ensalitramiento del suelo. De los tres años analizados, en 2014 se registró una temperatura media anual mayor. En consecuencia, y con base en los modelos estadísticos desarrollados se estimó un incremento de superficie ensalitrada del 7.6% por el aumento de cada grado centígrado; de igual manera, por el aumento de un 10 % de superficie con un nivel freático superficial se calculó un incremento del 3.3% en superficie ensalitrada. En comparación con 2012, se determinó que en 2013 la superficie ensalitrada creció en un 5%, y en 2014 el aumento fue de 1.6%. Se encontró que las áreas ensalitradas ocupan el 94% de la superficie del módulo; las mayores afectaciones se observaron en los meses de marzo-abril y en el periodo de julio-agosto. Los resultados alcanzados muestran un escenario de mayores superficies ensalitradas en el módulo de riego 05 y en el Distrito de Riego 038 Río



Mayo, como consecuencia del calentamiento global que se está sintiendo en el planeta.

Palabras clave adicionales: Agricultura, temperatura, precipitación pluvial, evapotranspiración, nivel freático, causas del ensalitramiento, incremento en el ensalitramiento

Introducción

La importancia de estudiar la salinidad (CE) del suelo es por el impacto negativo que las sales en exceso causan en la producción de cosechas, ya que todas las especies cultivadas tienen un nivel de tolerancia a la CE, por arriba del cual disminuyen los rendimientos (Ayers y Westcot, 1987; Maas, 1990; Grieve *et al.*, 2012). En el Distrito de Riego (DR) 038 río Mayo, Son. las áreas afectadas por CE mantienen una relación estrecha con las áreas afectadas por MF (De la Peña, 1979; Pulido *et al.* 2001 y 2009). En este DR en estudios de CE realizados entre 1970 y 2001 se determinó que el principal origen de los mantos freáticos superficiales está relacionado con las aplicaciones de agua de riego. Esto es, las diferencias encontradas en las áreas afectadas por CE, están ligadas a la disponibilidad de agua de riego; y a su vez esta disponibilidad está influenciada por las condiciones climáticas ocurridas en la cuenca hidrográfica del río Mayo, Sonora; específicamente la temperatura (T) y precipitación pluvial (PP). En el DR 038 a partir de la década de los noventa del siglo XX se observó un incremento en la T y una disminución en la PP; estos parámetros, además de las áreas afectadas por niveles freáticos superficiales y los volúmenes de agua de riego aplicados, correlacionaron significativamente con las áreas afectadas por CE (Pulido *et al.* 2012; Pulido, 2016).

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no tienen precedentes en las últimas décadas a milenios. Los nuevos escenarios que indican el impacto del cambio climático en variables como temperatura y precipitación pluvial son llamados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) basados en el desbalance energético (entre la radiación entrante y la saliente) y se refieren al posible aumento global de energía radiativa en W/m^2 ; 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). 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). Diversos estudios de impactos del cambio climático basados en respuestas biofísicas de los cultivos indican que podría provocar repercusiones adversas en la agricultura, que se manifestarán en disminuciones de rendimiento por hectárea en varios cultivos (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012; Ojeda *et al.*, 2010).

Los principales tipos de estrés abiótico que se espera aumenten en respuesta al cambio climático son el calor, sequía, salinidad, saturación del suelo e inundación



(Reynolds y Cruz, 2010). Los suelos afectados por sales son componentes naturales de los paisajes áridos. Su presencia se debe a una limitada PP, es decir, la evaporación excede a la PP durante la mayor parte del año (Richards, 1974). En las zonas áridas y semiáridas, donde la PP 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 a 1.5 m, dependiendo de la textura del suelo. 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).

Después de más de 50 años de operación, el DR 038 Río Mayo, Sonora, está considerado como uno de los que tienen mayores problemas de CE y drenaje de suelos a nivel nacional, ya que aproximadamente el 32% de su superficie presenta afectaciones (De la Peña, 1993; Pulido *et al.*, 2009; Pulido, 2016). En orden de importancia, las causas que dan origen al problema de CE y de MF en este DR son: los métodos de riego ineficientes, los MF, T, ET, PP, salinidad del agua freática (CEaf), 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; 2016; Tanji y Wallender, 2012).

Los objetivos de este trabajo son: 1) Estudiar y analizar las variaciones temporales y espaciales de la salinidad del suelo en los estratos superficial y subsuperficiales, niveles freáticos superficiales y salinidad del agua freática, en el Módulo de Riego 05 del Distrito de Riego 038 río Mayo, Son., en el periodo 2012-2014. 2) Determinar el impacto en términos de incrementos de superficie ensalitrada, de la temperatura ambiente, evapotranspiración, precipitación pluvial, niveles freáticos superficiales y salinidad del agua freática en el Módulo de Riego 05 del Distrito de Riego 038 río Mayo, Sonora, durante el periodo 2012-2014.

Materiales y métodos

El presente estudio se realizó durante el periodo 2012-2014 en el DR 038 Río Mayo, Son. Este DR queda comprendido en los municipios de Navojoa, Etchojoa y Huatabampo, Son.; tiene una superficie bruta de 112,489 ha y de riego de 96,951 ha. Su clima es estepario semiárido, con una precipitación media anual de 366 mm, una temperatura media anual de 19.7 °C, y una evaporación media anual de 2,222 mm (Reyes, 1994; Pulido, 2016). En el DR existen 16 módulos de riego, entre los que se encuentra el Módulo de Riego 05 (MR05). Para cumplir con los objetivos trazados en el presente trabajo se seleccionó el MR05, ya que es uno de los módulos con mayores problemas de salinidad. Tiene una superficie de riego de



5,288 ha y es usufructuado por 1037 usuarios; se localiza en la parte más meridional del DR 038; la principal población es la Ciudad de Huatabampo, Sonora.

Se tomaron muestras de suelo en la época de riegos, que corresponde con el ciclo agrícola de otoño-invierno (O-I), en marzo de 2012 y abril de 2013 y de 2014. El muestreo se llevó a cabo en una red de 62 sitios establecida ex profeso en el área del MR05, utilizando la misma ubicación de sitios de muestreo de un estudio de salinidad ejecutado en 2001 (Pulido *et al.*, 2010). Las muestras se tomaron a 30 y 60 cm de profundidad; las muestras se analizaron en un laboratorio ubicado en la Ciudad de Huatabampo, Sonora. 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).

En la red de 62 sitios referida, mensualmente entre marzo de 2012 y octubre de 2014, 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. El sensor fue calibrado en forma previa a su aplicación extensiva, para lo cual se utilizaron los análisis de suelo referidos. El procedimiento de calibración y aplicación de dicho sensor se explica en Pulido *et al.* (2003 b). Se utilizó un receptor GPS Garmin etrex Venture HC para determinar en cada sitio de medición, las coordenadas geográficas latitud y longitud así como las coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) con el fin de ubicarlos geográficamente en un SIG, y así desarrollar mapas de salinidad mensuales georeferenciados del MR05. Para el desarrollo del SIG se utilizó el software ArcGis versión 9.1.

En una red de 52 pozos de observación del MF de 3 m de profundidad construida ex profeso durante marzo y abril de 2012, y distribuida geográficamente en el MR05, se llevaron a cabo mediciones mensuales del nivel freático hasta una profundidad de tres metros; las mediciones se hicieron entre marzo de 2012 y octubre de 2014. En estos pozos se midió *in-situ* la CE, pH, sólidos totales disueltos y temperatura, mensualmente con un medidor portátil Hanna HI9811-5, el cual fue calibrado en el Laboratorio de calidad del Agua del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Con las mediciones de MF y de CEaf se elaboraron mapas mensuales de isobatas y de salinidad del agua mediante el SIG referido.

Las condiciones de T, PP y ET diarios registrados en el área de estudio durante el periodo 2012-2014 se obtuvieron en la página de internet www.agroson.org.mx, los cuales se generan en una estación meteorológica ubicada en la Ciudad de Huatabampo, Son. Se consultaron datos hidrométricos sobre los volúmenes de riego, láminas de riego por cultivo y eficiencias de riego utilizados en el MR05. Los datos se adquirieron de los archivos del Distrito de Riego 038 río Mayo de la Conagua, y de la S. de R. L. Se consultaron las estadísticas agrícolas de los distritos de riego de los años agrícolas 2011-2014, a través de la página www.conagua.gob.mx (Conagua, 2015).



Se analizaron estadísticamente mediante un análisis de regresión lineal simple la CE y superficie afectada por sales como variables dependientes, y como variables independientes los MF, superficie afectada por niveles freáticos superficiales, CEaf y superficie afectada por salinidad del agua freática; volumen de riego; T, ET y PP. Asimismo, se correlacionó el MF como variable dependiente y la T, volumen de riego aplicado y PP como variables independientes. El análisis estadístico se hizo a través del programa Excel 2010. Se estimó el impacto de las superficies con MF, T y ET en incremento de superficie ensalitrada.

Análisis y discusión de resultados

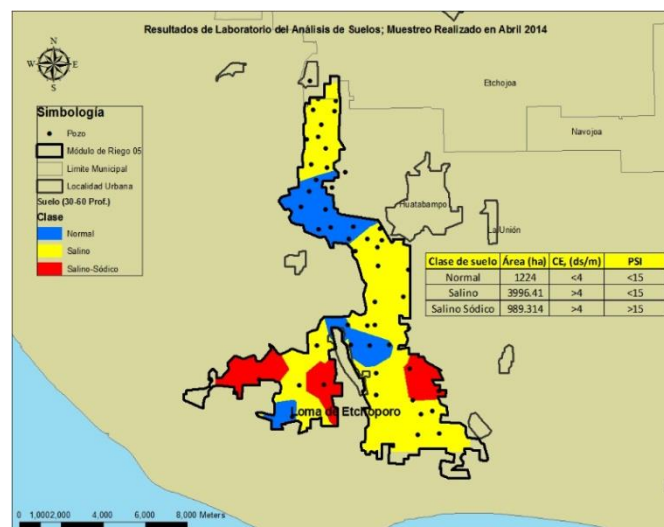
El análisis de los resultados de laboratorio de la CE del estrato 0-30 cm en 2012 dio un promedio (\bar{X}) de 9.2 dS m⁻¹, con valores extremos de 1.1 y 68.1 dS m⁻¹, una desviación estándar (DESV) de 17.2 dS m⁻¹ y un coeficiente de variación (CV) de 187.4%; en 2013 el \bar{X} fue de 9.7 dS m⁻¹, con variaciones entre 1.0 y 46.5 dS m⁻¹, una DESV de 12.3 dS m⁻¹ y un CV de 126.7%; y en 2014 el \bar{X} de salinidad obtenido fue 9.6 dS m⁻¹, con límites entre 1.1 y 57.4 dS m⁻¹, una DESV de 15.5 dS m⁻¹ y un CV de 160.5%. En cuanto al estrato 30-60 cm, en 2012 el análisis de CE en laboratorio arrojó un \bar{X} de 9.4 dS m⁻¹, con variaciones entre 1.0 y 67 dS m⁻¹, la DESV resultó de 17.1 dS m⁻¹ y el CV fue del 183.0%; en 2013 el \bar{X} de CE calculado fue de 12.5 dS m⁻¹, con datos extremos de 0.8 y 53.4 dS m⁻¹, la DESV fue 45.8 dS m⁻¹, y el CV de 126.6%; en 2014 el \bar{X} de CE fue de 12.2 dS m⁻¹, con fluctuaciones de 0.8 hasta 27.4 dS m⁻¹; una DESV de 19.0 dS m⁻¹ y un CV de 155.8%. En ambos estratos en los tres años analizados los valores medios más altos se midieron en 2013 y 2014; y también en el estrato a 30-60 cm se encontraron mayores niveles de salinidad en comparación con el estrato superficial.

Se calcularon promedios de CE en cada año para cada estrato, y se desarrolló un análisis de varianza (ANOVA) para un factor. En el estrato a 0-30 cm los valores medios fueron de 9.2, 9.7 y 9.6 dS m⁻¹ para 2012, 2013 y 2014, respectivamente, mientras que en el estrato a 30-60 cm dichos valores fueron de 9.4, 12.5 y 12.2 dS m⁻¹, en el orden referido de años. Independientemente de la profundidad del suelo, los promedios por año fueron de 9.3, 11.1 y 10.9 dS m⁻¹, en el orden referido de años. Con respecto a 2012 los incrementos de la CE fueron del 19.3 y 17.2 % para 2013 y 2014, respectivamente. El ANOVA dio por resultado una falta de significancia con el 95% de confianza, ya que el valor de F calculado (F_c) resultó de 0.79 mientras que el valor de F crítico (F_t) fue de 9.55. El resultado se interpreta que a pesar de los incrementos de CE calculados con promedios totales anuales en 2013 y 2014 con respecto a 2012, del orden de 19.4% y 17.2% respectivamente, su magnitud no resultó estadísticamente significativa. Por otro lado, los promedios totales calculados de los tres años por estrato de suelo, resultaron de 9.5 y 11.4 dS m⁻¹ para 0-30 y 30-60 cm, respectivamente; en el ANOVA desarrollado tampoco se obtuvieron diferencias significativas, con $F_c = 3.49$ y valor $F_t = 7.70$. Al respecto, los incrementos de salinidad observados en 2013 y 2014, respecto de 2012 de 5.4 y 4.3% en el estrato a 0-30 cm, y de 33.0% y 29.8% en el estrato a 30-60 cm,

probablemente están relacionados con las condiciones agronómicas y climáticas que se experimentaron en el MR05 en el intervalo 2012-2014.

De las 6,139 ha físicas del MR05, en marzo de 2012 se encontró que en el estrato a 0-30 cm presenta suelos normales (N, menos de 4 dS m⁻¹ de salinidad y menos de 15 por ciento de sodio intercambiable, PSI) (Richards, 1974; De la Peña, 1982) en el 32.2 % de su superficie; suelos salinos (S, más de 4 dS m⁻¹ de salinidad y menos de 15 PSI) en el 57.5%; y suelos salino sódicos (SSO, más de 4 dS m⁻¹ de salinidad y más de 15 PSI) en el 10.3% del área; no se encontraron suelos sódicos (menos de 4 dS m⁻¹ de salinidad y más de 15 PSI). En abril de 2013 en el mismo estrato de suelo las cifras para suelos N, S, y SSO fueron del 26.8%, 67.5% y 5.7%, respectivamente. En abril de 2014 el porcentaje estimado de suelos N, S, y SSO fue del 55.8, 33.9 y 10.3, respectivamente. En consecuencia, se encontró que en 2013 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% de la superficie total del MR05. 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.

En el estrato a 30-60 cm considerando la superficie total del MR05, en 2012 el porcentaje obtenido de suelos N, S, y SSO resultó del 34.4, 44.7 y 20.9, respectivamente. En 2013 los porcentajes de clases de salinidad de estos suelos fueron del 18.4, 73.3 y 8.3, respectivamente. Por último, en 2014 los porcentajes de suelos N, S, y SSO estimados fueron del 19.7, 64.4 y 15.9, respectivamente. Por lo tanto, en este estrato de suelo se encontró que con relación a 2012 en conjunto la superficie ensalitrada con suelos S y SSO incrementó en 2013 un 16.0% y en 2014 un 14.7% (Gráfica 1).



Gráfica 1. Mapa de clasificación por salinidad y porcentaje de sodio intercambiable en 2014 en el Módulo de Riego 05.



En los tres años que duró esta investigación las mayores afectaciones se evaluaron en 2013, asimismo, comparativamente entre los dos estratos las mayores afectaciones se obtuvieron en el estrato a 30-60 cm. Esto es, en los tres años en los primeros 30 cm de profundidad el \bar{X} de afectaciones fue del 61.8%, y en el estrato a 30-60 cm la superficie afectada \bar{X} fue del 75.8%; estas tendencias concuerdan con los resultados reportados por Pulido (2016), en cuanto a que en el DR 038 río Mayo en los estratos subsuperficiales las afectaciones por salinidad son mayores.

Se realizó un ANOVA para determinar diferencias significativas en los porcentajes de superficies ensalitradas, que incluyen suelos S y SSO. Entre años, los \bar{X} totales de afectaciones expresados en porciento de superficie para ambos estratos fueron en 2012 del 66.7, en 2013 del 77.4 y en 2014 del 62.3%. No se encontró diferencias estadísticas significativas con un 95% de confianza, ya que el valor de F_c de 0.53 resultó menor que el valor de F_t de 9.55. Por otro lado, los promedios totales entre estratos en los tres años fueron del 61.8% de suelos S y SSO en el estrato superficial y del 75.8% en el estrato subsuperficial; de igual forma, en el ANOVA que se llevó a cabo para determinar diferencias estadísticas entre estratos, no se obtuvo significancia con un 95% de confianza, dado que $F_c= 1.88$, mientras que $F_t= 7.70$.

Con los valores mensuales de CE de las monitorizaciones, se generaron mapas mensuales georeferenciados de clases de salinidad mediante el SIG multicitado, siguiendo el criterio de clasificación de suelos por salinidad utilizado por la Conagua (De la Peña, 1982) y por trabajos desarrollados en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (Pulido *et al.*, 2003a,b; 2009, 2010). La clasificación consiste en cinco clases; para identificar cada una se utiliza un color específico: 0-4 dS m⁻¹ azul, 4-8 verde, 8-12 amarillo, 12-20 rojo, >20 dS m⁻¹ café. Suelos que presentan una conductividad eléctrica >4 dS m⁻¹ se clasifican como salinos (Richards, 1974).

En el estrato superficial en 2012 los mayores porcentajes de CE (CE>4 dS m⁻¹) se evaluaron en marzo con 80.4 y mayo, 83.6; el \bar{X} anual de superficie ensalitrada fue del 64.2%; la DESV= 10.5% y el CV= 16.3%. En el año 2013 los meses con más altos porcentajes de afectación resultaron agosto con el 82.7 y diciembre con el 87.9; en \bar{X} se delimitaron afectaciones de salinidad en el 66.0% de la superficie del módulo; la DESV= 14.8% y el CV= 22.3%. En 2014 en este estrato los niveles de CE más altos se determinaron en febrero, con el 51.2%, en mayo con el 53.6%, y en agosto con 60.7%; el \bar{X} anual equivalió al 51.6%; la DESV= 4.3% y el CV= 8.4%.

Por su parte en el estrato subsuperficial, en 2012 las mayores superficies ensalitradas en el MR05 se delimitaron en marzo en el 96.1% del área, en agosto, 97.6% y en diciembre, 96.2%; en \bar{X} se calcularon afectaciones en el 89.3%, la DESV= 6.6% y el CV= 7.4%. En 2013 los meses con mayores problemas de CE fueron marzo, agosto y diciembre, con 95.2, 93.8 y 94.7%, respectivamente; la superficie \bar{X} ensalitrada resultó del 91.7%, la DESV= 3.8% y el CV= 4.2%.



Finalmente, en 2014 las áreas más afectadas se manifestaron en marzo y agosto, con el 94.8 y 96.8%, respectivamente; la superficie media afectada resultó del 89.8%, la DESV= 5.9 y el CV= 6.6%.

En el ANOVA para determinar diferencias estadísticas entre estratos con promedios totales de los tres años, se encontró significancia con un 95% de confianza para los promedios de 60.6% en el estrato superficial, y 90.3% en el estrato subsuperficial. Con base en las afectaciones estimadas en 2012, en 2013 en el estrato superficial se cuantificó un incremento del 1.8%, 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 periodo de riegos, como en agosto, durante el verano y en la temporada de lluvias, que coincidió cuando aproximadamente el 90% de la superficie de cultivo estaba en descanso. La ubicación geográfica de las áreas más afectadas con una $CE > 8 \text{ dS m}^{-1}$ es a partir de la Cd. de Huatabampo hacia el sur del módulo de riego.

La monitorización mensual de niveles freáticos se realizó desde marzo de 2012 hasta octubre de 2014. En 2012 los niveles medios más superficiales se observaron en marzo con 1.6 m, y el nivel más profundo se observó en septiembre con 2.57 m; la profundidad media anual fue de 2.29 m, la DESV= 0.31 m y el CV= 13.60%. En 2013 tanto los datos \bar{X} mensuales más superficiales como los más profundos se presentaron en febrero y agosto, con 1.65 y 2.45 m, respectivamente; el \bar{X} estacional fue de 1.76 m. La DESV de los promedios mensuales fue de 0.29 m y el CV= 14.11%. Durante 2014 los meses con promedios del MF más superficial y el más profundo fueron febrero y junio, con 1.70 y 2.31 m, respectivamente; el \bar{X} anual fue de 2.01 m; el \bar{X} estacional fue de 1.79 m; la DESV= 0.34 m y el CV= 16.74%.

Con las lecturas mensuales de MF analizadas por medio de un SIG, se elaboraron mapas mensuales de isobatas. Para la clasificación del área del MR05 según la profundidad del MF, se utilizó la clasificación de niveles freáticos de De la Peña, (1979). En 2012 las zonas más afectadas con un nivel freático $< 1.5 \text{ m}$ de profundidad se delimitaron en marzo con 93.1% y las menos afectadas en abril con el 3.0% de la superficie del módulo de riego; las afectaciones \bar{X} de este año fueron de un 18.1%, la DESV= 27.5% y el CV= 152.1%. El \bar{X} estacional de la superficie afectada fue del 48.0%. En 2013 las mayores áreas con niveles freáticos superficiales se obtuvieron en febrero con un 63.8% y en marzo con un 63.3%; en julio se determinó la menor superficie de 2.6% del área total; la superficie afectada \bar{X} anual fue del 26.5%; la DESV= 25.1% y el CV= 94.7%. En 2013 el \bar{X} estacional fue del 57.4%. El año 2014 se obtuvieron las mayores afectaciones en marzo, del 63.9% y las menores en octubre, del 2.7%; el \bar{X} anual fue del 24.0%; la DESV= 26.7% y el CV= 111.2%. El \bar{X} estacional de afectaciones resultó del 52.9%.



Al comparar los promedios estacionales de los tres años se encontró que en 2013 se cuantificaron las mayores superficies con MF (57.4%), seguidas de 2014 (52.9%) y 2012 (48.0%). Esta tendencia es similar a la presentada por las afectaciones superficiales de salinidad obtenidas con el sensor electromagnético en el estrato 0-150 cm en el periodo estacional, ya que al correlacionar como variable independiente los promedios del porcentaje de superficie con MF de 2012, 2013 y 2014, equivalentes a 48.0, 57.4 y 52.9, respectivamente, con los porcentajes de superficie ensalitrada como variable dependiente, cuyos valores son 91.3, 94.4 y 92.4, respectivamente, la correlación fue alta, $R^2=0.96$ (Cuadro 1); según este modelo, con un incremento del 10% en superficie con MF impactaría en un incremento del 3.3% en superficie ensalitrada. Este resultado explica en buena medida la existencia de superficies afectadas por salinidad en el MR05, específicamente durante los ciclos agrícolas O-I.

En el MR05 las afectaciones por MF se manifiestan a lo largo del ciclo agrícola O-I que se desarrolla regularmente entre noviembre y abril, tal y como se explicó previamente, las cuales se relacionan con los volúmenes de agua de riego (VOL) que se aplican por gravedad en el DR (Pulido, 2016), y en más del 90% de la superficie del módulo; las eficiencias de riego parcelarias son bajas, lo cual implica que durante el ciclo agrícola se hacen aportaciones de humedad al manto freático superficial (Pulido *et al*, 2001). De esta manera, los volúmenes que se aplicaron en el módulo durante los años 2012, 2013 y 2014 fueron de 18.52, 25.58 y 24.41 hm³, respectivamente; en 2011 se presentó una sequía reflejada en un menor volumen para riego en 2012. Para saber si hubo una relación entre los VOL y la superficie con MF, se correlacionó la superficie promedio estacional afectada por MF de los años 2012-2014 como variable dependiente, y los VOL como variable independiente, misma que dio una $R^2=0.88$ (Cuadro 1). Asimismo, mediante una regresión lineal entre la superficie media ensalitrada del estrato 30-60 cm, de los años 2012-2014 como variable dependiente, y los VOL como variable independiente, se determinó una $R^2=0.99$ (Cuadro 1).

La CEaf en los pozos de observación del MF el año 2012 tuvo los promedios más altos en marzo y junio, con 7.0 y 6.9 dS m⁻¹, respectivamente y el valor más bajo se registró en agosto y fue de 5.5 dS m⁻¹; el valor \bar{X} anual fue de 6.3 dS m⁻¹ y el \bar{X} estacional fue de 6.7 dS m⁻¹, la DESV= 0.58 dS m⁻¹ y el CV= 9.13 %. El año 2013 la CEaf vario de 6.5 dS m⁻¹ en septiembre, a 5.2 dS m⁻¹ en marzo; los promedios anual y estacional resultaron de 5.7 en el primer caso y de 5.5 dS m⁻¹ en el segundo, la DESV = 0.47 dS m⁻¹ y el CV= 6.86%. En 2014 los promedios más alto y más bajo se calcularon en octubre de 6.5 y junio de 5.3 dS m⁻¹; el promedio anual fue de 5.8 y el estacional de 5.5 dS m⁻¹, la DESV= 0.40 dS m⁻¹ y el CV= 6.86%. Las concentraciones de sales más altas 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 lecturas de salinidad del nivel freático superficial (CEaf) se transformaron a superficies por medio del SIG, expresadas en porcentajes. En el año 2012 se obtuvo como superficie media mensual más alta 81.3% en abril y la más baja 42.5% en



agosto; el promedio anual con una CEaf $> 3 \text{ dS m}^{-1}$ anual resultó de 63.3% y el estacional fue de 63.5%, la DESV anual fue de 12.83% y el CV anual fue de 20.26%. El año 2013 se obtuvieron valores extremos en abril y octubre de 90.0% en el primer caso y 68.1%, en el segundo; los promedios anual y estacional resultaron de 77.0 y 82.4%, correspondientemente, la DESV anual fue = 6.14% y el CV anual fue = 7.98%. En 2014 se calcularon como valor más alto en mayo de 84.8% y el más bajo en octubre de 61.5%; el área \bar{X} anual afectada equivalió al 73.3% y el área \bar{X} del periodo estacional fue del 77.0%; la DESV anual fue = 7.83% y el CV anual fue = 10.69%. Las mayores afectaciones se cuantificaron en 2013 (82.4%), seguidas de 2014 (77.0%) y de 2012 (63.5%).

Los valores de CEaf medios estacionales más altos se obtuvieron en 2012 (6.7 dS m^{-1}), luego en 2014 (5.6 dS m^{-1}) y finalmente en 2013 (5.4 dS m^{-1}); la distribución media anual de las concentraciones de CEaf en orden de menor a mayor coincidieron con los VOL, por cuanto los mayores VOL se utilizaron en 2013 (25.6 hm^3), seguido de 2014 (24.4 hm^3) y 2012 (18.5 hm^3), por lo cual al haberse utilizado mayores VOL en 2013 y 2014, las concentraciones de salinidad en el agua freática bajaron debido a procesos de disolución de sales. Es así que con datos medios puntuales de CEaf ($5.4\text{-}6.7 \text{ dS m}^{-1}$) y VOL de $18.5\text{-}25.6 \text{ hm}^3$, y en porcentaje de superficie afectada con CEaf entre 63.5-82.4%, se corrieron regresiones lineales entre ellas, que dieron coeficientes $R^2= 0.99$ y 0.98 , respectivamente (Cuadro 1). Los promedios anuales de CEaf tanto de datos puntuales como de afectaciones expresadas en porcentajes, utilizando datos del promedio estacional se compararon con los de MF, de lo que se obtuvo una coincidencia. Al respecto, se correlacionaron la CEaf como variable dependiente y el MF (con variaciones de $1.76\text{-}1.90 \text{ m}$, y $48.1\text{-}57.4\%$) como independiente con valores puntuales, de lo cual se calculó una $R^2= 0.98$ en el primer caso y con superficies afectadas $R^2= 0.95$ en el segundo (Cuadro 1); con tales resultados se puede concluir que la influencia del MF en el contenido de CEaf es determinante. También se evaluó que el nivel de CEaf tiene una clara influencia en el ensalitramiento de los suelos en el estrato $0\text{-}60 \text{ cm}$ de profundidad, ya que la correlación entre estas variables arrojó un coeficiente de $R^2= 0.95$ (modelo 10; Cuadro 1), con datos puntuales de CE de $6.2\text{-}9.2 \text{ dS m}^{-1}$ y de CEaf de $5.4\text{-}6.7 \text{ dS m}^{-1}$.

La temperatura media anual de los años 2012, 2013 y 2014 fue de 22.7 , 22.6 y 23.6 °C, respectivamente. En 2012 la temperatura media mensual más alta fue en agosto, con 29.7 °C y la menor en diciembre con 15.3 °C; la DESV= 5.9 °C y el CV= 26.31% ; en 2013 los promedios mensuales mayor y menor fueron de 30.3 y 13.7 °C, respectivamente, la DESV= 6.3 °C y el CV= 27.74% , en este año se registraron promedios más altos en siete meses, que en 2012; en 2014 los meses con datos extremos fueron junio y enero, con 30.9 y 16.2 °C, correspondientemente, la DESV= 5.8 °C y el CV= 24.56% , en este año en nueve meses se tuvieron promedios mensuales más altos que en 2013. La ETo 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 PP 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 PP fueron julio y agosto.

Las temperaturas medias de marzo de 2012, 2013 y 2014, de 16.5, 17.9 y 18.6°C, respectivamente, correlacionaron ($R^2=0.83$) (Cuadro 1) con los promedios de CE de los muestreos de suelo en el estrato 30-60 cm, de 9.4, 12.5 y 12.2 dS m⁻¹ efectuados en marzo y abril de estos años, y también correlacionaron ($R^2=0.84$, Cuadro 1) con las superficies ensalitradas estimadas, de 65.6, 81.6 y 80.3%, respectivamente; por cuanto al aumentar la temperatura también aumentaron los valores de salinidad; el impacto de la temperatura en la salinidad estimado con este modelo, representó el 7.6% de incremento en superficie ensalitrada. Estos resultados se obtuvieron en los inicios de primavera cuando las temperaturas medias anuales aún son bajas, y dentro del ciclo de cultivo O-I y en la temporada de riegos. El incremento en la ETo acumulada del mes de marzo, de 140, 138 y 110 mm correlacionó ($R^2= 0.94$) (Cuadro 1) con el porcentaje de superficie ensalitrada, analizada en el estrato 0-30 cm de profundidad, de 67.8, 73.2 y 44.2% de 2012, 2013 y 2014, correspondientemente, ya que al aumentar la ETo también se calculó un aumento de la superficie ensalitrada. De igual manera, con datos anuales de ETo acumulada de 1455, 1607 y 1491 mm y porcentaje de superficie afectada por MF de 18.1, 26.5 y 24.0 en los años 2012, 2013 y 2014, respectivamente, se correlacionaron de lo que se obtuvo una $R^2=0.75$ (Cuadro 1). También la ETo anual acumulada de este periodo de estudio se analizó estadísticamente con la CEaf media anual estimada en porcentaje de 63.3, 77.0 y 73.3, de lo que se calculó una $R^2= 0.72$ (Cuadro 1), en el sentido de que los aumentos en la ETo influyeron en mayores superficies con CEaf.

Como resultado de la monitorización mensual de CE MF y CEaf realizada durante 2012-2014, en cuanto a la CE se determinó que a lo largo de cada uno de los años estudiados existen dos periodos de mayores afectaciones por sales; uno que comprende desde noviembre hasta abril y que incluye el ciclo agrícola O-I, y el otro que cubre el verano dentro de la época de lluvias, cuando no hay cultivos y en la época de mayores temperaturas medias anuales. En este sentido, se determinó un incremento de la superficie ensalitrada en el estrato 0-150 cm entre los meses de junio-septiembre de 2013, cuando las temperaturas medias mensuales variaron de 28.8-30.3 °C, y las superficies ensalitradas fluctuaron entre 85-94% ($R^2=0.79$; Cuadro 1). Asimismo, en el estrato 0-60 cm del año 2012 se determinó un aumento promedio mensual de la CE de 6.6-8.0 dS m⁻¹ en el periodo julio-noviembre ($R^2=0.94$, Cuadro 1), cuando la temperatura media mensual varió de 21.4-30.1 °C. El incremento de T correlacionó con el aumento de la superficie con CEaf en el periodo enero-mayo de 2014 ($R^2= 0.88$; Cuadro 1), cuando la T media mensual varió de 16.2-24.8 °C, y la superficie con CEaf estuvo entre 72.8-84.8%.

También el incremento en la ETo se relaciona con aumentos en la CE del suelo; en el periodo marzo-diciembre de 2012 en el estrato 0-60 cm la ETo varió de 72 mm en diciembre hasta 165 mm en mayo, y la CE cambió de 6.6 dS m⁻¹ en noviembre hasta 9.4 dS m⁻¹ en mayo; la correlación obtenida entre estas variables fue de $R^2=0.76$ (Cuadro 1). Igualmente, en 2012 la ETo más elevada y la mayor superficie



ensalitrada (83.6%) en el estrato a 60 cm se obtuvieron en mayo, así que la correlación entre ambas arrojó una $R^2=0.69$ (Cuadro 1); esto es, a medida que la ETo es más alta, las áreas ensalitradas cubren mayor superficie. Al incrementar la ETo de 86-183 mm y la superficie con CEaf de 72.8-84.8% entre enero y mayo de 2014, se logró una $R^2=0.91$ (Cuadro 1), que demuestra en buena medida la correlación entre estas variables, y explica una de las causas de la salinidad del suelo en el MR05. Por otro lado, al incrementar la ETo, disminuye la superficie expresada en por ciento con MF; esto se observó en el periodo enero-junio de 2014; los valores de ETo variaron de 51 mm en febrero a 183 mm en junio, mientras que la superficie con MF vario de 3.6% en junio a 63.9% en marzo; se obtuvo $R^2=0.86$ (Cuadro 1) que explica que la disminución de superficie afectada se debe a la profundización del MF debido a pérdida de humedad en el perfil del suelo por el mecanismo de ETo.

Cuadro 1. Modelos de regresión lineal simple que relacionan salinidad, temperatura, evapotranspiración, precipitación pluvial, superficie con niveles freáticos superficiales y salinidad del agua freática.

Periodo	Estrato (cm)	Modelo	Modelo de regresión	R ²	n	Fc	Ft
2012-2014	0-150	1	CE ¹ = 75.511+0.326(MF)	0.96	3	26.92	161.44
2012-2014	----	2	MF26.213+1.163(VOL)	0.88	3	7.45	161.44
2012-2014	30-60	3	CE= 22.404+2.34(VOL)	0.99	3	147.65	161.44
2012-2014	----	6	CEaf= 10.052-0.182(VOL)	0.99	3	159.82	161.44
2012-2014	----	7	CEaf= 15.862+2.558(VOL)	0.98	3	61.88	161.44
2012-2014	----	8	CEaf= -11.00+9.300(MF)	0.98	3	59.85	161.44
2012-2014	----	9	CEaf= 33.782+2.046(MF)	0.95	3	19.40	161.44
2012-2014	0-60	10	CE= -5.591+2.215(CEaf)	0.95	3	20.99	161.44
2012-2014	30-60	20	CE= -14.69+1.474(T)	0.83	3	5.02	161.44
2012-2014	30-60	21	CE=-59.01+7.632(T)	0.84	3	5.39	161.44
2012-2014	0-30	22	CE= -53.9+0.894(ETo)	0.94	3	17.34	161.44
2012-2014	----	23	ETo= -48.422+0.047(MF)	0.75	3	2.98	161.44
2012-2014	----	24	ETo= -43.352+0.075(CEaf)	0.72	3	2.60	161.44
Junio-septiembre 2013	0-150	25	CE= 42.439+4.433(T)	0.79	4	7.53	18.51
Julio-noviembre 2012	0-60	26	CE= 3.329+0.148(T)	0.94	5	51.20	10.12
Enero-mayo 2014	----	27	CEaf= 49.158+1.500(T)	0.88	5	21.96	10.12



Periodo	Estrato (cm)	Modelo	Modelo de regresión	R ²	n	Fc	Ft
Marzo-diciembre 2012	0-60	28	CE= 2.886+0.042(ETo)	0.76	10	25.79	5.31
Abril-noviembre 2012	0-60	29	CE= 18.976+0.337(ETo)	0.69	8	13.45	5.98
Enero-mayo 2014	----	30	CEaf= 66.254+0.106(ETo)	0.91	5	32.22	10.12
Enero-junio 2014	----	31	MF= 98.124-0.481(ETo)	0.86	6	24.42	7.70
Mayo-octubre 2013	0-150	32	CE= 86.425+0.048(PP)	0.61	6	6.27	7.70

¹CE= superficie ensalitrada (%); n= número de observaciones; T= temperatura (°C); ETo= 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); Fc= valor de F calculado con 95% de confianza; Ft= valor de F crítico, α=0.05 de significancia.

Conclusiones

En el ensalitramiento del suelo en el Módulo de Riego 05 intervienen las variables: temperatura ambiente, evapotranspiración, precipitación pluvial, volumen de agua de riego, niveles freáticos superficiales y concentración de sales en el agua freática. En el periodo de estudio que comprendió los años 2012 al 2014, se registró un aumento en la temperatura media anual que fue mayor en 2014 que en 2012 y 2013, y en consecuencia se obtuvo una mayor superficie ensalitrada en 2013 y 2014, en comparación con la calculada en 2012. Con base en los modelos estadísticos desarrollados se calculó un incremento de superficie ensalitrada del 7.6% por el aumento de cada grado centígrado; de igual manera, por el aumento de un 10 % de superficie con un nivel freático superficial se calculó un incremento del 3.3% en superficie ensalitrada. En comparación con 2012, se determinó que en 2013 la superficie ensalitrada creció en un 5%, y en 2014 el aumento fue de 1.6%. Se encontró que las áreas ensalitradas ocupan el 94% de la superficie del módulo; las mayores afectaciones se observaron en los estratos subsuperficiales, en los meses de marzo-abril y en el periodo de julio-agosto de cada año. Los resultados alcanzados muestran un escenario de mayores superficies ensalitradas en el módulo de riego 05 y en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, como consecuencia del calentamiento global que se está sintiendo en el planeta.

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; 1987, pp 172.



- Comisión Nacional del Agua (Conagua). 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. www.conagua.gob.mx.
- Corwin, D. L.; S. M. Lesch, and D. B. Lobell. 2012. Laboratory and field measurements. pp 295-341. In: W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition). ASCE, Reston, VA.
- De la Peña, I. 1979. Principios y solución de drenaje parcelario, Boletín Técnico No. 9, SARH, Ciudad Obregón, Sonora, México.
- De la Peña, I. 1982. Salinidad de los suelos agrícolas. Su origen, clasificación, prevención y recuperación. Boletín Técnico No. 10, México, SARH, pp 107.
- 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., S.R. Grattan y E.V. Maas. 2012. Plant salt tolerance. pp 405-459. In: W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition). ASCE, Reston, VA.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 1997. Drenaje y salinidad en zonas áridas y semiáridas. Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, pp. 282.
- 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 pp.
- Maas, E. V. 1990. Crop Salt Tolerance. pp 262-304. In: 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, vol. III, núm. 1, pp 5-20.
- Ojeda B. W; M. Iñiguez Covarrubias y J. M. González Camacho. 2010. Vulnerabilidad de la agricultura de riego en México ante el cambio climático. En: Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen III. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Editores: Polioptro Martínez Austria y Carlos Patiño Gómez. Jiutepec, Morelos.



- Pulido, M. L., J. González Meraz, C. Fuentes Ruiz, M. Villarreal Pulido, R. Armendáriz Rubio y J. L. L. Medina Ruiz. 2001. Informe final del proyecto: Desarrollo y aplicación de una metodología para formular un plan director para el manejo y control de la salinidad en un distrito de riego. IMTA, CNA, Jiutepec, Morelos, México.
- Pulido, M. L., C. L. Wiegand, J. González Meraz, B. D. Robles Rubio, O. X. Cisneros Estrada y O. Lemus Ramírez. 2003a. 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, Vol. XVIII, núm. 2, pp 83-97.
- Pulido, M.L., B.D Robles Rubio, J. González Meraz y O.X. Cisneros Estrada. 2003b. Manual para identificación de salinidad del suelo y cartografía del rendimiento de cultivos con sensores remotos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje. Jiutepec, Morelos, México.
- Pulido, M. L.; J. G. Meraz y M. V. Pulido. 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, Vol. XXIV, núm. 1, pp 55-72.
- Pulido, M. L.; J. González Meraz; C. L. Wiegand; J. Infante Reyes y J.M. Delgado. 2010. Monitoreo de la salinidad mediante sensores remotos. Terra Latinoamericana, Vol. 28, núm. 1, pp 15-26.
- Pulido, M. L. 2016. Cambio climático, ensalitramiento de suelos y producción agrícola en áreas de riego. Terra Latinoamericana, Vol. 34, núm. 2, pp 2017-218.
- Reyes, Q. C. 1994. Estudio agrológico semidetallado del Distrito de Riego 038 Río Mayo. Comisión Nacional del Agua. Distrito de Riego 038 Río Mayo. Navojoa, Sonora, México.
- Reynolds, M. P. y R. Cruz. 2010. Adapting crops to climate change: a summary. In: Climate change and crop production. International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT). Editado por M. P. Reynolds. CAB International 2010. www.cabi.org.
- Richards, L. A. 1974. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos, México, Limusa.
- Salinas, P, J. A.; G. Colorado Ruiz y M. E. Maya Magaña. 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. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor.



Tanji, K.K. and W. W. Wallender. 2012. Nature and Extent of Agricultural Salinity and Sodicity. pp 1-25. In: W.W. Wallender and K.K. Tanji (eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Agricultural Salinity Assessment and Management (2nd Edition). ASCE, Reston, VA.