

COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE

SUBCOORDINACIÓN DE CONTAMINACIÓN Y DRENAJE AGRÍCOLA

INFORME FINAL DEL PROYECTO RD-1310.1

SEGUIMIENTO AL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ENSALITRAMIENTO DE LOS SUELOS EN UN MÓDULO DE RIEGO

JIUTEPEC, MORELOS DICIEMBRE DE 2013

Directorio

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

M.I. Víctor Bourguett Ortiz
Director General del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Dr. Nahún Hamed García Villanueva
Coordinador de Riego y Drenaje

Dr. Heber Eleazar Saucedo Rojas
Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola

Distrito de Riego del Río Mayo, S. de R. L. de I. P. y C. V.

Lic. Jesús Tadeo Mendívil Valenzuela
Presidente del Consejo de Administración

M.C. Yamil Bisher Álvarez
Gerente General

Inocente Aragón Figueroa
Gerente de Operación

Módulo de Riego 05

Juan Gabriel Verdugo Leyva
Presidente

Ing. Javier Corral Robles
Tesorero

Ing. Heriberto Cázares Vega
Gerente

Distrito de Riego 038 Río Mayo

Ing. Jorge Luis Ruiz Lugo
Encargado de la Jefatura del Distrito de Riego



Seguimiento al impacto del cambio climático en el ensaltramiento de los
suelos en un módulo de riego



Ing. Casimiro Reyes Quezada
Jefe de Operación

Ing. Rosa Imelda Luque Rodríguez
Jefe de Riego y Drenaje

Autores por parte del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

M.C. Leonardo Pulido Madrigal
Jefe de Proyecto

Dr. Heber Eleazar Saucedo Rojas
Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola

M.A. Luis Arturo Brizuela Mundo
Especialista en Hidráulica

Autores por parte del Distrito de Riego del Río Mayo, S. de R. L. de I. P. y C. V.

Ing. Yamil Bisher Álvarez
Gerente General

Inocente Aragón Figueroa
Gerente de Operación

Ing. José Efraín Cervantes Luna
Apoyo técnico en trabajo de campo

Autor por parte del Módulo de Riego 05

Ing. Heriberto Cázares Vega
Gerente

Agradecimientos

Se agradece a las autoridades del Distrito de Riego del Río Mayo y del Módulo de Riego 05 por su interés para la realización del presente estudio, y por las facilidades brindadas y los apoyos otorgados para llevar a cabo exitosamente el presente estudio.

Se agradece a las autoridades del Distrito de Riego 038 Río Mayo por las facilidades proporcionadas para llevar a cabo exitosamente el presente estudio.

Se agradece la colaboración del Ing. Efraín Cervantes Luna por su apoyo en la ejecución del trabajo de campo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO	4
RESULTADOS ESPERADOS	4
METODOLOGÍA.....	5
Localización del proyecto	5
Muestreo de suelos y monitorización de la salinidad del suelo	7
Monitorización de niveles freáticos y de la salinidad del agua freática.....	10
Muestreo de rendimiento para estimar el impacto de la salinidad en la disminución de cosechas	11
Registro de datos climáticos del área del Módulo de Riego No. 05.....	12
Recopilación y análisis de información histórica sobre salinidad, drenaje y datos del clima.....	12
RESULTADOS	13
Condiciones iniciales de salinidad del suelo obtenidas mediante el muestreo de suelo	14
Calibración del sensor electromagnético EM-38.....	16
Mediciones mensuales de salinidad.....	17
Mediciones mensuales de niveles freáticos	25
Monitorización de la salinidad del agua de los pozos de observación.....	32
Temperatura, precipitación pluvial y evapotranspiración en el área de estudio.....	38
Análisis estadístico y gráfico de parámetros climáticos y agronómicos relacionados con la salinidad del suelo.....	42
CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49

INTRODUCCIÓN

En México las áreas de producción agrícola que presentan mayores problemas de salinidad y drenaje se localizan principalmente en los distritos de riego (DR) del norte del país. Debido a que los DR son las áreas agrícolas más productivas, la salinidad es considerada un problema serio ya que aproximadamente entre el 26 y el 30% del área está afectada por exceso de sales en diferente grado y por manto freático superficial (Fernández, 1990, De la Peña, 1993). En el DR 038 Río Mayo un 35% de su superficie está afectado por salinidad y aproximadamente un 53% de su área por manto freático superficial (Pulido *et al.*, 2010; De la Peña, 1993). La superficie afectada por salinidad de las aguas freáticas alcanza aproximadamente 23,560 ha, que equivalen al 22% de la superficie de riego de este distrito; el agua freática tiene una concentración media de sólidos disueltos totales de más de 4,000 mg L⁻¹ y se localiza en la parte de menor altitud del distrito, por abajo de la cota de los 11 m, principalmente en los módulos de riego aledaños a la costa (Pulido *et al.*, 2009).

En las predicciones del cambio climático se han considerado los escenarios de emisiones de CO₂ tales como A1B, A2 y B1 (en el caso de los trabajos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM) y A1B y SRES-A2 (en los trabajos del IMTA) y se han utilizado varios modelos climáticos globales desarrollados en diferentes países del mundo. Con respecto a México, los pronósticos de temperatura para diferentes escenarios indican que la temperatura media podría incrementarse 4 °C en promedio al final del presente siglo, respecto del promedio del periodo 1961-1990, y en algunas regiones del norte y noroeste, más de 5 °C. Estos incrementos de temperatura ocasionarían una mayor escasez de recursos hídricos en casi todo el país, además de disminuciones de producción por hectárea en numerosos cultivos (Nikolski *et al.*, 2011; Martínez y Patiño, 2012).

La importancia de estudiar la salinidad del suelo en los distritos de riego del norte de México 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 salinidad, por arriba del cual disminuyen los rendimientos y la producción de cosechas. Por ejemplo en los distritos de riego 076 Valle del Carrizo, 038 Río Mayo y 041 Río Yaqui se estimó que por causas de la salinidad la disminución de producción de trigo fue de 104,100 ton, 8,900 ton en algodón y 28,100 ton de sorgo, lo cual da un total de 141,100 ton, equivalentes al 14% de la producción estimada: 1'010,200 toneladas (Pulido *et al.*, 2003). Además, los distritos de riego que están más afectados por la salinidad se localizan en las regiones áridas y semiáridas de México en las cuales la agricultura depende del agua captada en las presas existentes en la región, por lo que el análisis conjunto de la salinidad de suelos y el cambio a climático es de gran importancia, y permitirá pensar y aplicar medidas preventivas para amortiguar su impacto negativo en la economía de las regiones y del país.

El objetivo de este trabajo fue estudiar el impacto del cambio climático en la salinidad del suelo en un módulo de un distrito de riego.

La CE del suelo puede medirse remotamente utilizando la metodología de inducción electromagnética. Los sensores de inducción electromagnética son muy adecuados para determinar la salinidad del suelo, puesto que responden a suelos más conductivos (más salinos), y además no requieren de un contacto directo con el suelo. Estos instrumentos inducen pequeñas corrientes eléctricas en el suelo en forma de remolino con círculos, las cuales miden la magnitud del campo magnético generado por dichas corrientes. La magnitud de la corriente es directamente proporcional a la CE del suelo en las inmediaciones de esos círculos de corriente. Cada círculo de corriente genera un campo electromagnético secundario que es proporcional al valor del flujo de corriente dentro del mismo. Una fracción del campo secundario electromagnético inducido de cada círculo es interceptado por la bobina receptora, y la suma de estas señales es amplificada y transformada en voltaje el cual está linealmente relacionado con la CE aparente (CE_a) de la profundidad ponderada del suelo (Rhoades, 1992).

La profundidad de exploración de estos aparatos está determinada por el espaciamiento entre las bobinas receptora y transmisora. Debido a que estos instrumentos promedian automáticamente la lectura de salinidad en un área lateral que es aproximadamente igual a la profundidad de exploración, proporcionan un valor muy exacto de la conductividad volumétrica del suelo y son capaces de captar muy pequeñas variaciones de ella (Mc Neill, 1980).

Mc Neill (1980) señala que los sensores de inducción electromagnética son muy adecuados para determinar la salinidad del suelo, puesto que responden a suelos más conductivos (más salinos), y además no requieren de un contacto directo con el suelo. Estos instrumentos inducen pequeñas corrientes eléctricas en el suelo en forma de remolino, las cuales miden la magnitud del campo magnético generado por dichas corrientes. Esta magnitud es directamente proporcional a la CE del suelo en las inmediaciones de esos círculos de corriente. La profundidad de exploración de estos aparatos está determinada por el espaciamiento entre las bobinas receptora y transmisora.

El sensor de salinidad comercial (Geonics EM-38) contiene un sistema de circuitos apropiado para minimizar la respuesta del instrumento a la susceptibilidad magnética del suelo y para maximizar su respuesta a la conductividad CE_a . El equipo dispone de un espacio de un metro entre bobinas, trabaja a una frecuencia de 13.2 kHz, es alimentado por una batería de 9 voltios y lee directamente la CE_a . La configuración de las bobinas, la frecuencia y el espacio entre las bobinas se seleccionaron para realizar mediciones de la CE_a hasta profundidades efectivas de exploración de aproximadamente un metro cuando se utiliza el sensor en una posición horizontal, y de dos m cuando se coloca en una posición vertical, aunque existen otros modelos que llegan a explorar a profundidades de varias decenas de m (Van Der Lelij, 1983; Rhoades, 1992).

En los DR la salinidad de los suelos irrigados es de naturaleza artificial relacionada principalmente con la elevación del nivel freático a profundidades menores de aproximadamente 1.5 m, causado por las pérdidas profundas de filtración en canales de riego y en su aplicación en las parcelas, así como a deficiencias en la remoción de las aguas freáticas en terrenos agrícolas, aunado a la ubicación geográfica cercana a la costa, a pesar de que existen sistemas de drenaje colector o de apoyo. Las aguas freáticas contienen sales disueltas tóxicas para los cultivos agrícolas y cuando están cerca de la superficie del suelo, participan en el proceso de evapotranspiración, dejando y acumulando sales en el suelo (Nikolskii *et al.*, 2011).

Para acelerar la remoción de las aguas freáticas, mantenerlas a una profundidad no menor de 1.5-1.7 m y combatir la salinidad de los suelos irrigados, se ha estado utilizando el drenaje parcelario subterráneo entubado y se le ha dado poca atención a reducir las aportaciones al nivel freático, así como tener una adecuada conservación en los sistemas de drenaje general. Según algunas estimaciones, actualmente en nuestro país actualmente existen alrededor de 80,000 ha de riego que cuentan con drenaje parcelario subterráneo entubado, lo que corresponde solamente a un 3% del área de los distritos de riego, mientras que por lo menos el 12% de esta área necesita medidas de combate contra el ensaltramiento, a través de instalación de drenaje parcelario (Nikolskii *et al.*, 2011).

Según las predicciones existentes para el año 2050 se espera una reducción de disponibilidad de agua para riego en 30% aproximadamente, debido a la reducción de la precipitación y al crecimiento de la evapotranspiración en las cuencas hidrográficas. El análisis de los datos de monitoreo en la cuenca del Mar de Aral del Asia Central señala que una reducción de la disponibilidad de agua en un 22% en el transcurso de 30 años y la falta de la construcción del drenaje parcelario, originó que el área afectada por salinidad creciera dos veces: de 25 a 50% del área bajo riego. Estos datos se pueden considerar como un indicador de lo que puede suceder en muchas regiones bajo riego de México en el Siglo XXI, con relación a los problemas de salinidad y drenaje (Nikolskii *et al.*, 2011).

En el océano Atlántico norte, entre México y Estados Unidos, han aumentado los huracanes de mayor intensidad desde hace 40 años, por lo que se espera que cada vez haya más fenómenos de este tipo, reportan los más recientes estudios internacionales sobre cambio climático. En el volumen 1 del más reciente informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), divulgado hace unos días, se prevé que a finales de siglo estos fenómenos incrementen su presencia, afecten ciudades costeras (La Jornada, 2013).

Este informe aporta mayores datos, pues cuenta con más elementos técnicos y apunta que hay 95 por ciento de certeza de que las causas del calentamiento de la atmósfera se deben a las emisiones de gases de efecto invernadero y al cambio de uso de suelo.

Se estima que la parte superficial del mar ha crecido 20 centímetros en cien años, pero lo que va a pasar a finales de siglo es que sea una elevación de 26 a 82 centímetros más, según el modelo, si el mar se incrementa medio metro desaparecerán ciudades costeras. No hay vuelta de hoja. Quizá desaparezcan las playas de Acapulco y Cancún, y habrá inundaciones más frecuentes en ciudades como Villahermosa. El impacto para México es que playas y ciudades desaparecerán (La Jornada, 2013).

Los pasados 30 años ha sido el periodo más caliente en mil 400 años y la temperatura se ha elevado 0.85 grados.

En un estudio llevado a cabo en 2012 sobre el impacto del cambio climático en los problemas de salinidad y drenaje en el Distrito de Riego 038 se concluyó que se identificaron los parámetros que están relacionados con la salinidad del suelo, como son la temperatura ambiental,

profundidad de los niveles freáticos, evapotranspiración, precipitación pluvial y salinidad del agua freática. Asimismo, se observó un efecto del clima en el contenido de sales tanto en el estrato superficial como en el estrato subsuperficial; por cuanto el aumento de la temperatura ambiental y la disminución de la humedad en el suelo incidieron en el ensalitramiento de los suelos (Pulido *et al.*, 2012).

El presente informe es continuación del estudio iniciado en 2012 sobre el impacto del cambio climático en los problemas de salinidad y drenaje en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, y presenta los resultados y conclusiones de las investigaciones llevadas a cabo durante el año 2013.

OBJETIVO

Monitorear y analizar las variables relacionadas con la medición del impacto del cambio climático en la salinidad del suelo en un módulo de riego.

RESULTADOS ESPERADOS

- ✓ Documento sobre el impacto del cambio climático en el ensalitramiento de los suelos en un distrito de riego.
- ✓ Un video sobre seguimiento del impacto del cambio climático en el ensalitramiento de los suelos.

METODOLOGÍA

Localización del proyecto

El presente estudio se realizó durante el año 2012 en el DR 038 Río Mayo, Son. El distrito se localiza entre los paralelos 26°21' y 28°31' N y meridianos 108°26' y 110°05', con una altura media de 40 msnm. El distrito de riego queda comprendido en los municipios de Navojoa, Etchojoa y Huatabampo, en el sur del estado de Sonora (ilustración 1); 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 extraída de pozos de bombeo. Su clima es estepario semiárido, la precipitación media anual es de 388 mm, la temperatura media anual es de 21.4° C, y la evaporación media anual es de 2,222 mm (Reyes, 1994).

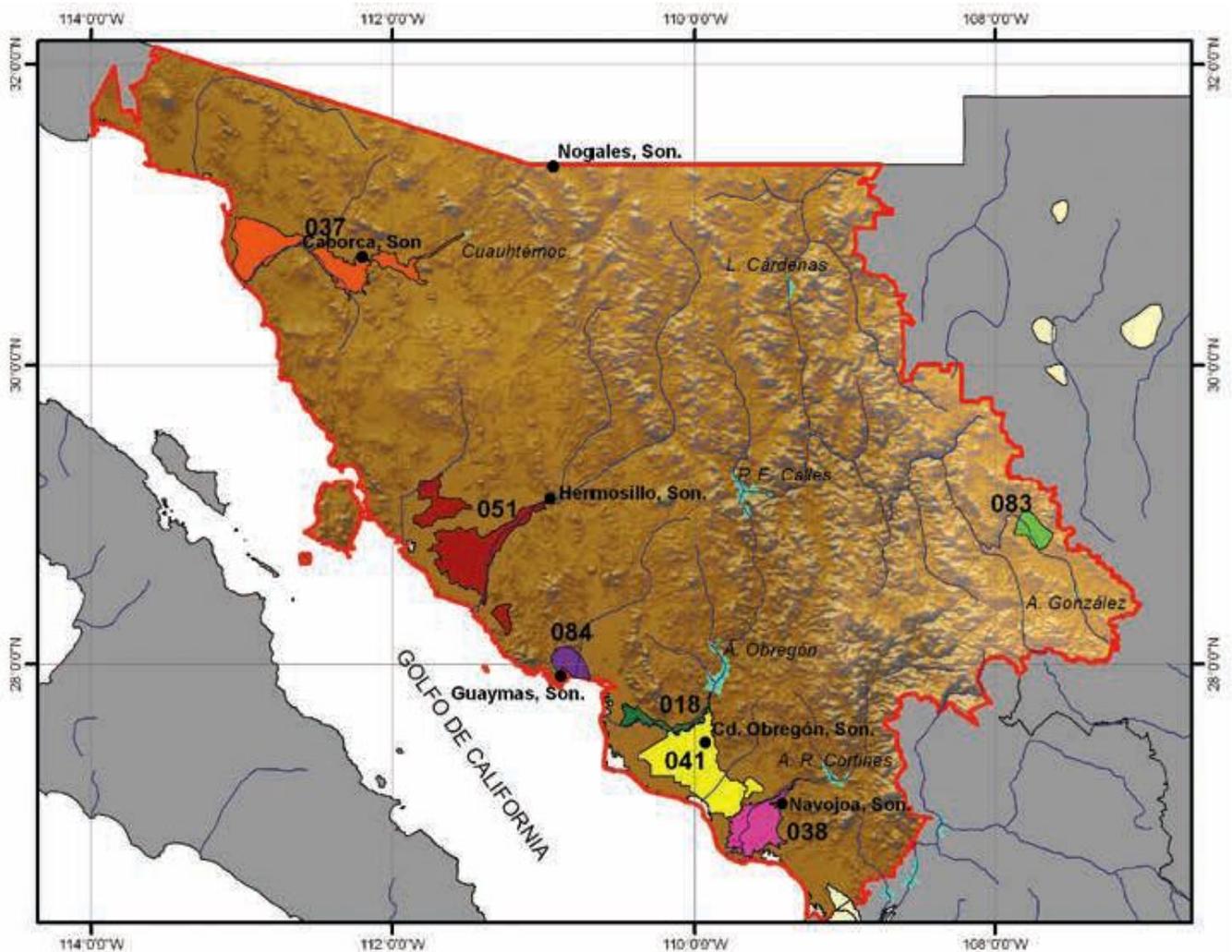


Ilustración 1. Localización del distrito de riego 038 Río Mayo, Sonora

Para cumplir con el objetivo trazado se seleccionó el Módulo de Riego No. 5 dado que en éste se encuentran grandes áreas afectadas por sales y por manto freático superficial; asimismo, también se seleccionó porque los directivos de este módulo de riego mostraron interés para la puesta en práctica del presente proyecto.

El DR está dividido en 16 módulos de riego, de los cuales los más afectados por salinidad y manto freático superficial se ubican desde el centro geográfico hacia el sur del DR, colindando con el Golfo de California; y corresponden a los módulos de riego números 1, 3, 5, 6, 7 y 8. Para cumplir con el objetivo trazado, se seleccionó el Módulo de Riego No. 5 por ser uno de los más afectados por salinidad, y debido a que sus autoridades mostraron interés y ofrecieron apoyo para la puesta en práctica del presente proyecto. Este módulo tiene una superficie bruta de 8,050 ha y una superficie de riego de 5,288 ha, es usufructuado por 1037 usuarios; se localiza en la parte más meridional del DR 038 (ilustración 2).

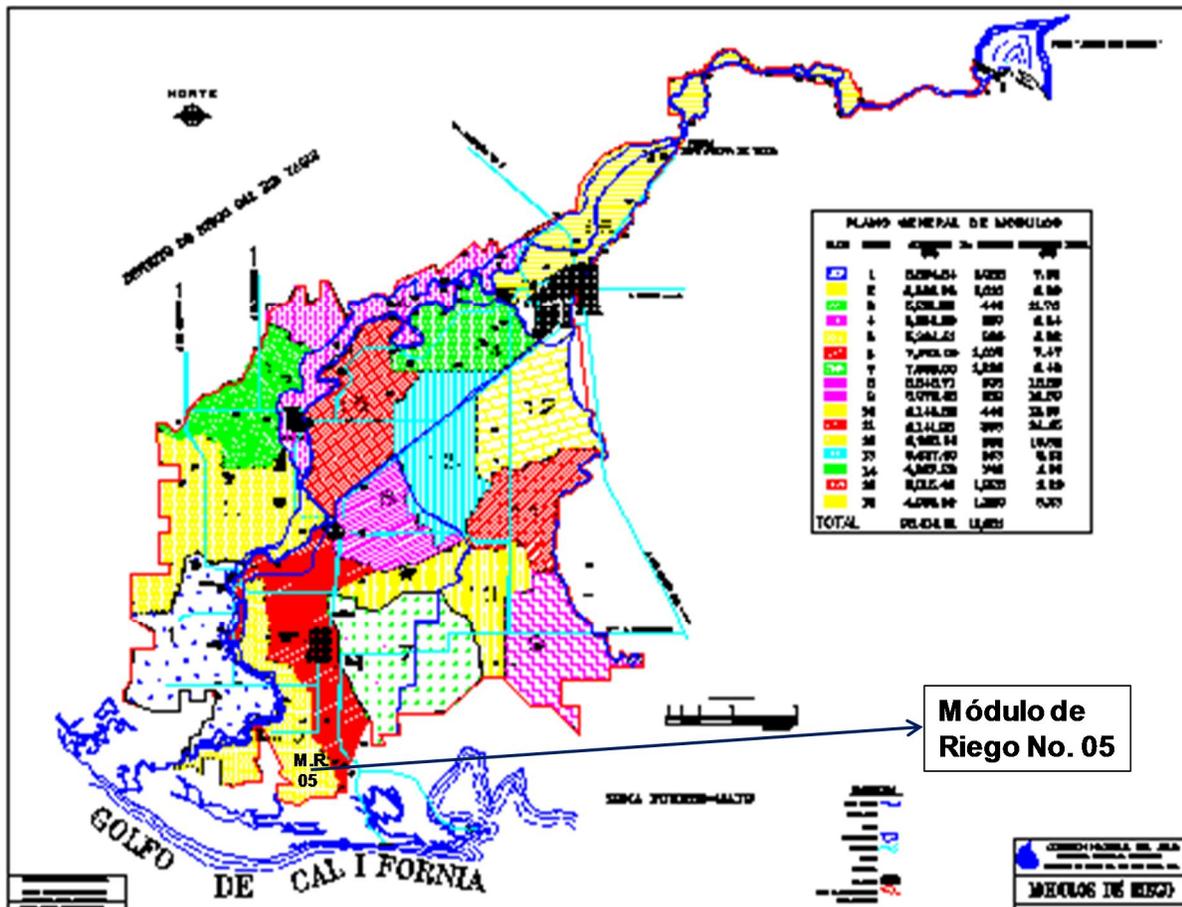


Ilustración 2. Localización del Módulo de Riego No. 05 en el Distrito de Riego 038 Río Mayo

Muestreo de suelos y monitorización de la salinidad del suelo

El muestreo de suelos y el monitoreo mensual de la salinidad se llevó a cabo en la red de 62 sitios establecida en el estudio de salinidad realizado en 2012 en este módulo de riego. La ubicación geográfica obtenida mediante receptores GPS, se señala en la ilustración 3 con marcadores en amarillo.

Se llevaron a cabo muestreos de suelo en las épocas de riego, en el ciclo de cultivo otoño-invierno y en verano, cuando las temperaturas en el ambiente son más altas (ilustración 4). En el primer caso el muestreo se hizo del 2-4 de abril y en verano del 13-15 de agosto. Las muestras se tomaron con una barrena agrológica, con la cual se colectaron muestras a 30, 60, 90 y 120 cm de profundidad, haciendo un total de 112 muestras en abril y 130 en verano; el total de muestras colectadas fue de 232. Éstas fueron enviadas para su análisis al Laboratorio de Suelos de la empresa Agroinsumos de Huatabampo, 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 y el Porcentaje de Sodio Intercambiable.

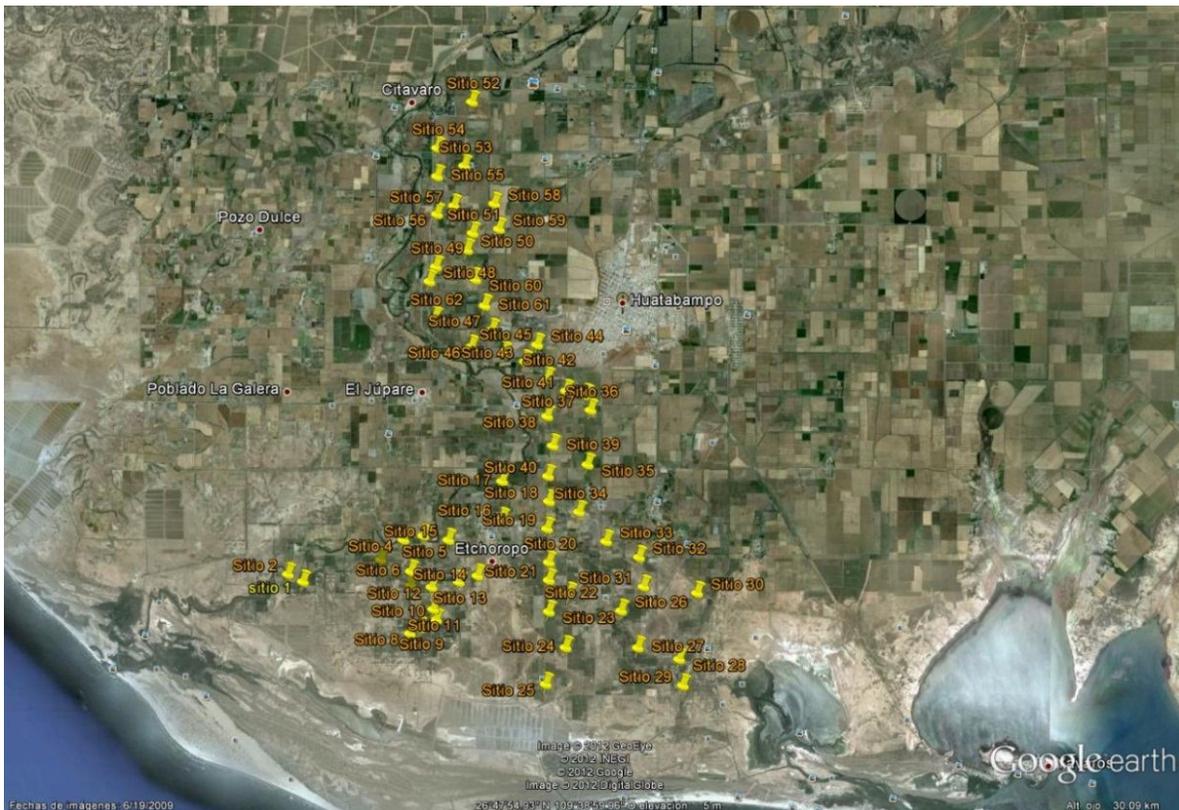


Ilustración 3. Ubicación espacial de la red de sitios de monitoreo de la salinidad del suelo



Ilustración 4. Muestreo de suelos el 04 de abril de 2013 para analizar la salinidad

En la red de 62 sitios referida, mensualmente se monitoreó la salinidad o conductividad eléctrica (CE) a las profundidades de 0-60 y 0-150 cm, 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 calibrarlo, se realizaron mediciones con el sensor en 62 sitios, y se utilizaron los análisis de conductividad eléctrica (CE) llevados a cabo en abril y agosto de 2013; las lecturas con el sensor EM-38 se hicieron en forma simultánea al muestreo de suelos. En cada sitio se tomaron las lecturas con el sensor en posiciones vertical y horizontal a una misma altura sobre la superficie del suelo, para determinar la conductividad eléctrica del estrato 0-60 cm de profundidad, y con el aparato colocado sobre la superficie del terreno para estimar la conductividad eléctrica hasta 150 cm de profundidad (ilustración 5). La calibración consistió en correlacionar estadísticamente los datos de salinidad analizados en laboratorio y las lecturas del sensor, para cada sitio de muestreo. La calibración posibilitó la obtención de un modelo estadístico que permitió estimar mensualmente la CE de los sitios de monitoreo.

Se utilizó un receptor GPS para obtener las coordenadas geográficas de cada sitio de medición, con el fin de ubicarlos geográficamente en un sistema de información geográfica (SIG), y así generar mapas de salinidad mensuales georeferenciados del Módulo de Riego No. 05.



Ilustración 5. Muestreo de suelos el 14 de agosto de 2013 para la calibración del sensor electromagnético EM-38 de Geonics Limited. El sensor está en posición vertical.

El número de 62 sitios de muestreo de suelo se determinó con base en la variabilidad de la población, y de la precisión y un nivel de confianza deseados, según el criterio señalado por Hanson y Grattan (1990); ecuación 1.

La cantidad de muestras de suelo analizadas de 186 se determinó con base en la variabilidad de la población, y de la precisión y un nivel de confianza deseados, según el criterio señalado por Hanson y Grattan (1990).

$$N = \left[\frac{(z)(CV)}{k} \right]^2 \quad (1)$$

donde: $z = 1.96, 1.64$ y 1.28 para niveles de confianza de 95%, 90% y 80%, respectivamente; CV = coeficiente de variación; $k = 0.1$ hasta 0.2 .

Se consideró un nivel de confianza de 80% y un error de la media de las muestras de 0.15.

Los modelos resultantes de la calibración se utilizaron para transformar en valores de CE las lecturas realizadas mensualmente (ilustración 6). Las mediciones se realizaron para determinar la CE en los estratos 0-60 y 0-150 cm de profundidad.



Ilustración 6. Medición de la salinidad en el estrato 0-60 cm de profundidad

Monitorización de niveles freáticos y de la salinidad del agua freática

En una red de 52 pozos de observación del manto freático superficial construida en 2012 en el Módulo de Riego No. 05, y en la cual se estuvo dando mantenimiento a la red de pozos, se llevaron a cabo mediciones mensuales de la profundidad al nivel freático. En estos pozos se obtuvieron muestras de agua para medir *in-situ* mensualmente la salinidad, pH, sólidos totales disueltos y temperatura, con un medidor portátil Hanna HI9811-5 (ilustraciones 7-9). Las mediciones de niveles freáticos y de la salinidad se utilizaron para elaborar mapas mensuales de isobatas mediante un sistema de información geográfica que se desarrolló.

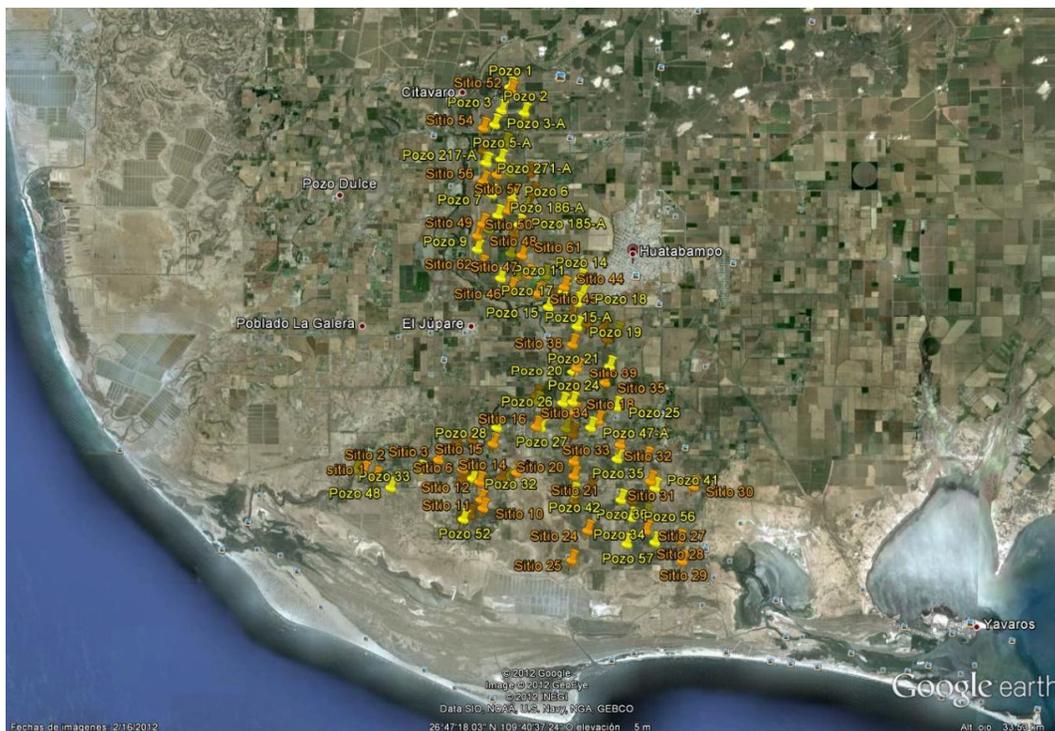


Ilustración 7. Distribución espacial de la red de pozos de observación del manto freático superficial. Los marcadores en amarillo indican la ubicación de los pozos.



Ilustración 8. Monitoreo mensual de niveles freáticos.



Ilustración 9. Monitoreo mensual de la salinidad del agua de los pozos de observación del manto freático superficial

Muestreo de rendimiento para estimar el impacto de la salinidad en la disminución de cosechas

Fueron tomadas muestras de 1 m² de espigas de trigo en parcelas afectadas por salinidad; en los sitios de muestreo se tomaron muestras de suelo para analizar la salinidad en laboratorio, y así estimar el impacto de la salinidad en la disminución de cosechas, mediante un análisis estadístico (ilustración 10).



Ilustración 10. Muestreo de trigo para estimar el impacto de la salinidad en el rendimiento.

Registro de datos climáticos del área del Módulo de Riego No. 05

Las condiciones de temperatura, precipitación pluvial y evaporación diarios registrados en el área del Módulo de Riego No. 05 durante 2013, se obtuvieron en la estación climatológica ubicada en la Ciudad de Huatabampo, Son., localizada según coordenadas geográficas 26.8167° de latitud norte y 109.6° de longitud oeste de Greenwich, y a 8 msnm; la estación es operada por el Distrito de Riego 038 Río Mayo de la CONAGUA (ilustración 11).



Ilustración 11. Estación climatológica utilizada para el registro y análisis de condiciones del clima en el área de estudio.

Recopilación y análisis de información histórica sobre salinidad, drenaje y datos del clima

Se consultó el archivo del DR 038 de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para obtener datos de estudios de salinidad y freaticimetría realizados entre 1971 y 1985. Se consultó datos hidrométricos y estadísticos del distrito de riego en los archivos de la Sociedad de Responsabilidad Limitada Distrito de Riego del Río Mayo. Asimismo, se tomaron datos de hidrometría del periodo referido sobre los volúmenes de riego, superficies de siembra,

rendimiento de cultivos, y eficiencias de conducción y de aplicación parcelaria. La información obtenida se correlacionó con los datos de temperatura y precipitación pluvial observados en el periodo de tiempo referido.

RESULTADOS

Condiciones iniciales de salinidad del suelo obtenidas mediante el muestreo de suelo

Los resultados de laboratorio del muestreo de suelos realizado en abril para analizar la salinidad en los 62 sitios de muestreo, se insertaron en un sistema de información geográfica (SIG) mediante el cual se generó un mapa de clases de salinidad del suelo.

De las 8,050 ha brutas del módulo de riego, se encontró que en el estrato 0-30 cm de profundidad el área del módulo presenta suelos normales en el 26.8% de su superficie, suelos salinos en el 67.5% y suelos salino sódicos en el 5.7% del área; no se encontraron suelos sódicos (ilustración - 12). Esto significa que en el 73.2% del área existente en este módulo los suelos presentan problemas de salinidad. Las áreas afectadas se encuentran desde la Cd. de Huatabampo hasta el sur, en la costa marítima. Históricamente, el Módulo de Riego No. 05 es de los más afectados por salinidad del suelo, ya que se ubica al sur del distrito de riego, en la zona con menor altitud por lo que recibe altas recargas de agua subsuperficial producto de sobrerriegos y de filtraciones de canales, y también se localiza en las proximidades de la costa marítima.

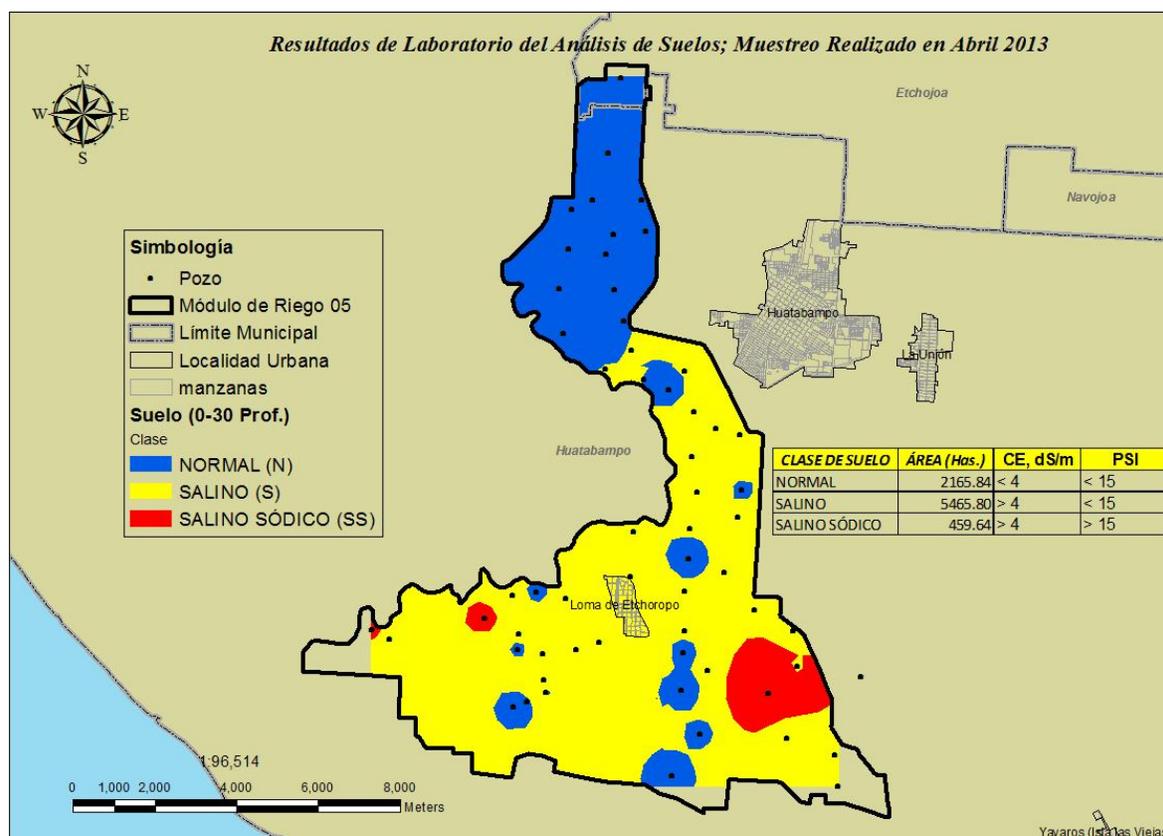


Ilustración 12. Clasificación de suelos por salinidad del Módulo de Riego No. 05. Muestreo realizado en abril de 2013.

Los resultados de clases de salinidad obtenidos en abril de 2013 difieren de los encontrados en marzo de 2012, ya que en 2013 se obtuvo una menor superficie de suelos normales y una mayor superficie de suelos salinos; la superficie afectada por suelos salino sódicos en 2013 resultó mayor que en 2012. La distribución de clases de salinidad por estrato de suelo y fecha de muestreo, considerando porcentajes de valores puntuales observados, se indica en la (ilustración 13. En 2013 no se encontraron suelos sódicos. Estos cambios están ligados fundamentalmente con las condiciones de volúmenes de agua de riego, mayores en 2013 donde hubo mayor disponibilidad de agua de riego que en 2012, y la temperatura ambiente; los volúmenes de agua de riego aplicados en 2013 aportaron mayor humedad al suelo, y aunado a una mayor temperatura ambiente registrada en marzo de 2013, de 17.9 °C contra 16.5 °C en marzo de 2012, pudieron influir para que se presentara un ascenso capilar de sales, mayor en 2013 que en 2012.

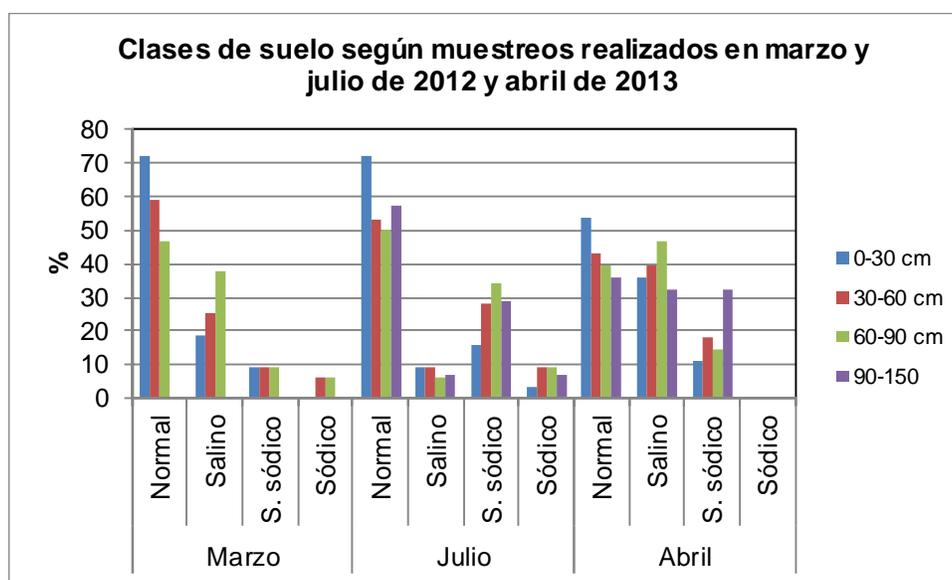


Ilustración 13. Clases de suelo por salinidad en cuatro estratos en marzo y julio de 2012 y abril de 2013, considerando mediciones puntuales.

La distribución de salinidad en los estratos estudiados, considerando valores puntuales medios, resultó más alta en el muestreo de abril de 2013 que en marzo de 2012; la salinidad aumentó a medida que incrementó la profundidad de observación (ilustración 14). La distribución de la sodicidad, considerando valores puntuales medios del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se señala en la ilustración 15. Los valores más altos de PSI se obtuvieron en el muestreo de julio de 2012, y los valores de menor magnitud, se encontraron en abril de 2013.

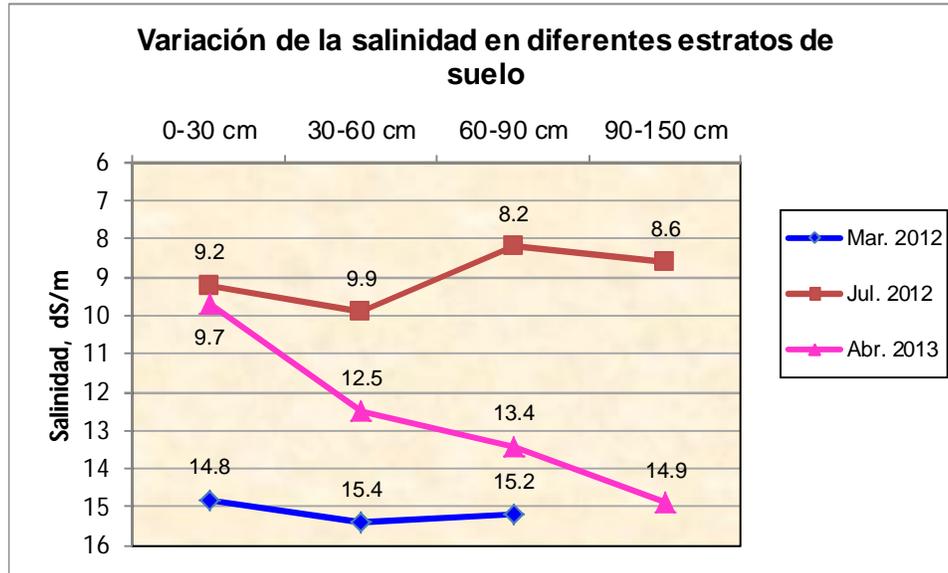


Ilustración 14. Variación temporal de valores medios de salinidad en 2012 y 2013, en diferentes estratos de suelo.

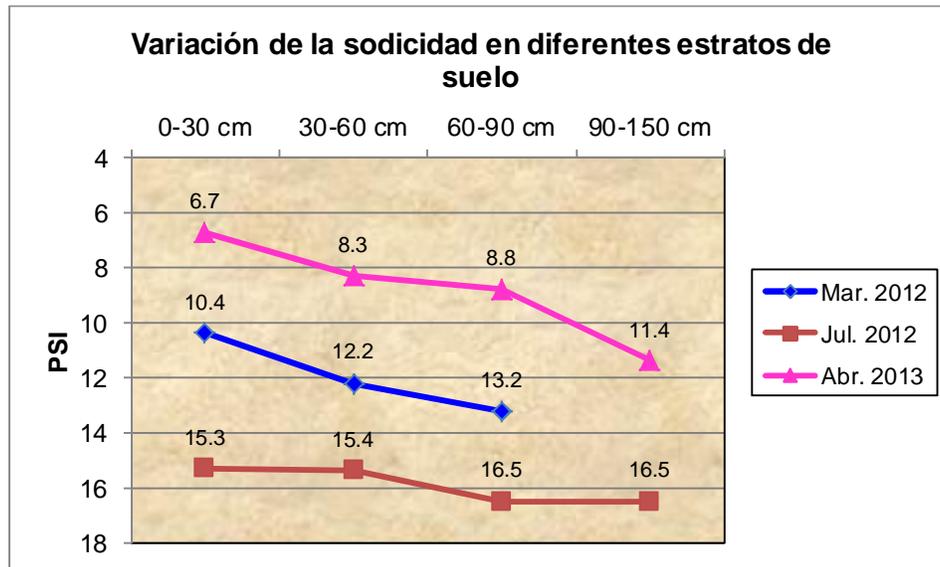


Ilustración 15. Variación temporal de valores medios de porcentaje de sodio intercambiable en 2012 y 2013, en diferentes estratos de suelo.

Calibración del sensor electromagnético EM-38

Los datos de salinidad medidos en laboratorio y las mediciones llevadas a cabo con el sensor electromagnético se analizaron estadísticamente para obtener el modelo de regresión lineal múltiple (1). Se realizaron mediciones con el sensor en las posiciones horizontal y vertical, para

estimar la CE en los estratos 0-60 y 0-150 cm de profundidad. La calibración se hizo de acuerdo con Rhoades *et al.*, (1999) y Pulido *et al.*, (2010).

$$CE = -1.7147 + 0.3743(EM_H) - 0.0922(EM_V); \quad r = 0.93; r^2 = 0.86 \quad (1)$$

donde EM_H es la conductividad eléctrica aparente en posición horizontal y EM_V es la lectura en posición vertical.

Las mediciones realizadas de la CE aparente en los 62 sitios de muestreo a las dos profundidades, dieron un total de 124 lecturas las cuales se sustituyeron en el modelo (1) y se obtuvieron valores de CE estimada, mismos que se correlacionaron para cada sitio con los valores de CE analizada. La similitud entre los valores de CE analizados y medidos se muestra en la ilustración 16. El modelo (1) fue utilizado para monitorear mensualmente la CE en la red de sitios establecida en el módulo de riego.

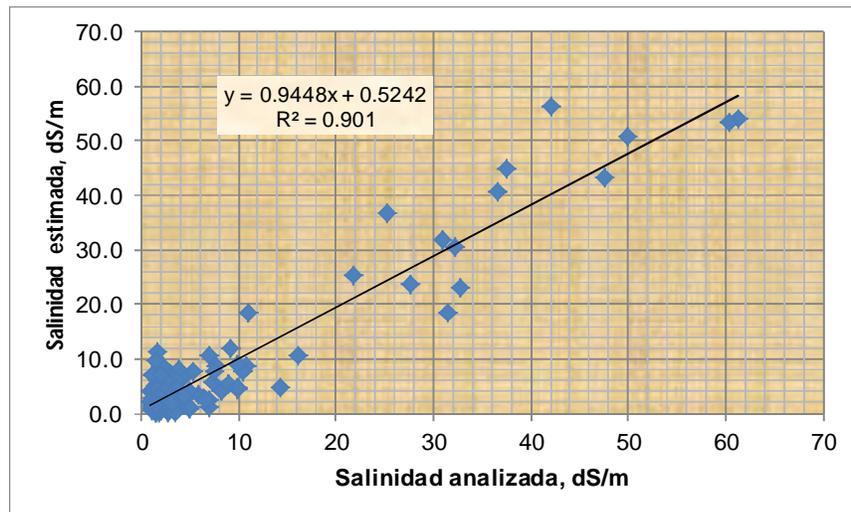


Ilustración 16. Similitud entre la salinidad del suelo medida en laboratorio y la salinidad estimada con el sensor electromagnético

Mediciones mensuales de salinidad

Con el monitoreo mensual de la salinidad en los primeros 60 cm de profundidad (estrato superficial) llevados a cabo con el sensor electromagnético EM-38, considerando valores medios, se determinó que en la red de 62 sitios en 2013 el valor medio de CE en el periodo marzo-agosto fue de 8.2 dS/m, más bajo que el obtenido en 2012, de 9 dS/m en el mismo periodo. En general se estimaron valores más bajos de salinidad en 2013 que en 2012, debido principalmente a que las condiciones de disponibilidad y aplicación de agua de riego en el distrito de riego, incluyendo el Módulo de Riego 05, en 2013 fueron superiores que en 2012; en 2012 se experimentó una sequía que limitó la disponibilidad de agua de riego en el ciclo de otoño-invierno. En los dos años referidos solo se ha sembrado cultivos en el ciclo de otoño-invierno en este distrito de riego.

En este estrato superficial se observó un incremento de la salinidad a partir de mayo, coincidente con el término del ciclo de cultivo otoño-invierno, y también cuando la temperatura ambiente empezó a incrementarse; esto es, los incrementos de valores de CE pudieron estar ligados a los decrementos en los niveles freáticos también (ilustración 17), que en su descenso dejaron sales en el perfil del suelo, principalmente en el estrato superficial. Por la escasez de agua de riego no se llevó a cabo el ciclo de primavera-verano. Un comportamiento semejante no se observó en 2012 en el que se registraron menores precipitaciones pluviales.

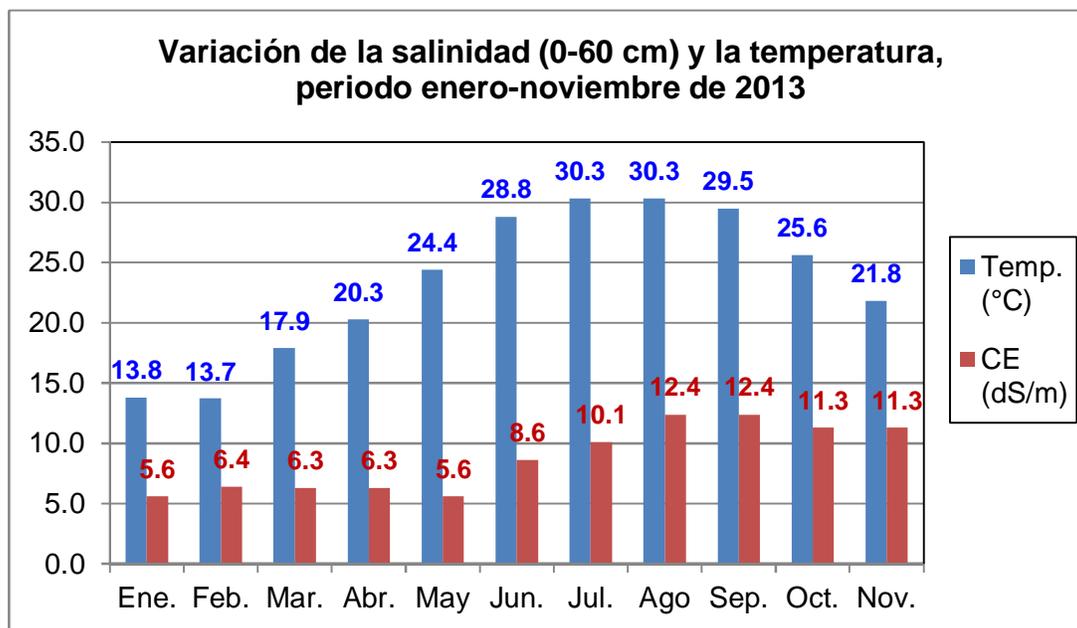


Ilustración 17. Distribución temporal de la temperatura ambiente media y valores puntuales medios de salinidad en el estrato 0-60 cm de profundidad.

Con datos proporcionados por la S.R.L. del Distrito de Riego del Río Mayo, en 2012 se dispuso de un volumen para riego de 613 hm³, de los cuales 482 hm³ fueron de almacenamiento de la presa Adolfo Ruiz Cortines y 131 hm³ de bombeo de pozos profundos; las condiciones de sequía determinaron un cambio en el patrón de cultivos en el que tradicionalmente predomina el trigo. En 2011-2012 se sembraron 85,700 ha a pesar de que la disponibilidad de agua fue de 613 hm³, de los cuales 482 hm³ se extrajeron de la presa y 131 hm³ de bombeo de pozos. La eficiencia en el uso del agua que se logró hizo acreedor al distrito de riego a un reconocimiento a nivel nacional. Mientras que en 2013 se dispuso de mejores condiciones de disponibilidad de agua, ya que en la citada presa se almacenaron 800 hm³, de los cuales se autorizaron para riego 766 hm³ más 159 hm³ de bombeo de pozos; en total para el ciclo de otoño invierno 2012-2013 se aplicaron 906 hm³ para el riego de 90,000 ha, en las que predominó el cultivo de trigo, con 73,071 ha.

La salinidad estimada para el estrato 0-150 cm de profundidad muestra que los valores mensuales medios en los meses de igual nombre en los años 2012 y 2013, tienen valores de magnitud semejante. Los promedios de CE durante marzo-agosto en ambos años resultaron de 10.4 y 10.3 dS/m para 2012 y 2013 (ilustración 18).

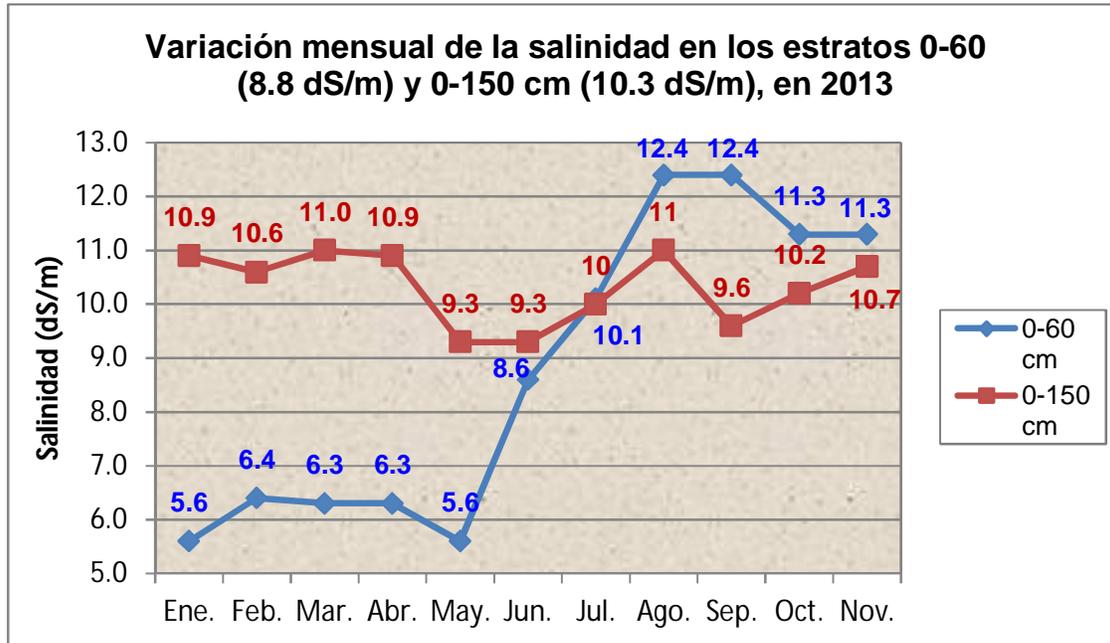


Ilustración 18. Variación temporal de la salinidad estimada en los estratos superficial y subsuperficial

Los valores mensuales de CE que resultaron en los monitorizados realizados entre enero y agosto se analizaron en un SIG para la obtención de mapas mensuales de isosalinidad, mediante la interpolación de valores; de acuerdo con la clasificación de suelos utilizada por la CONAGUA (De la Peña, 1982). La clasificación consiste en 5 clases; para cada una existe un color específico: 0-4 dS/m azul, 4-8 verde, 8-12 amarillo, 12-20 rojo, >20 dS/m café. Suelos que presentan una conductividad eléctrica >4 dS/m se clasifican como salinos (Richards, 1974).

En el estrato 0-60 cm de profundidad en enero se estimó una superficie afectada por sales, CE > 4 dS/m, equivalente al 34.6 % del área bruta del módulo de riego, mientras que en abril aumentó al 55.7 % y en julio tuvo su valor más alto, de 5,489 ha, equivalentes al 67.4 % del área total (ilustraciones 19-21). Las áreas afectadas se observaron desde la Ciudad de Huatabampo hacia el sur.

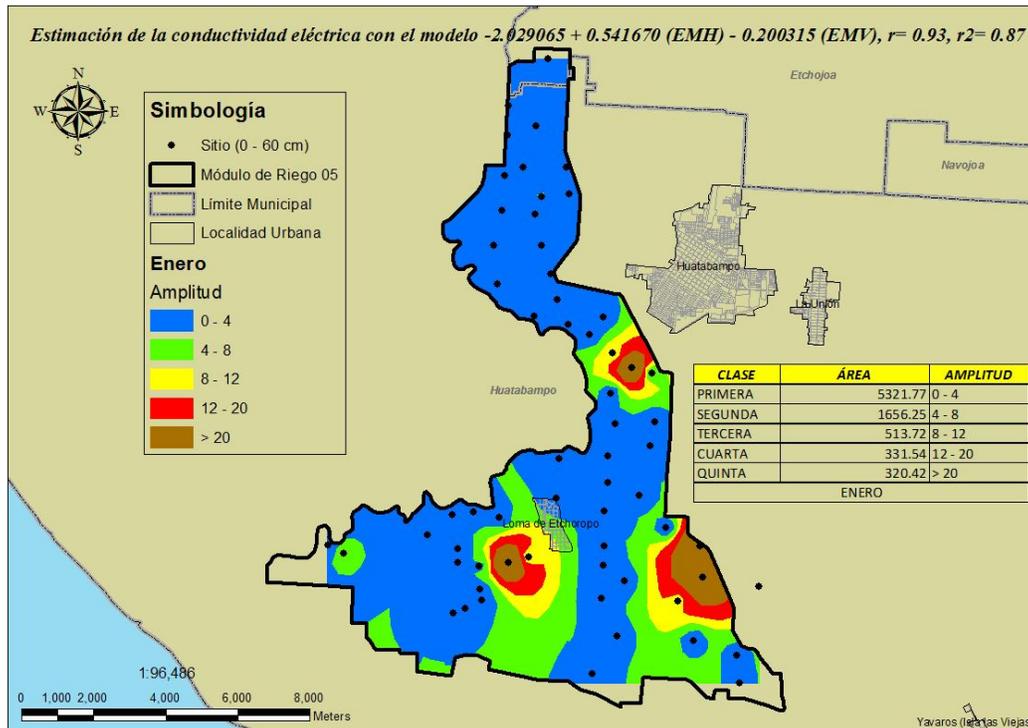


Ilustración 19. Distribución espacial de la salinidad del suelo en el estrato 0-60 cm de profundidad en enero de 2013, obtenida mediante el sensor electromagnético EM-38

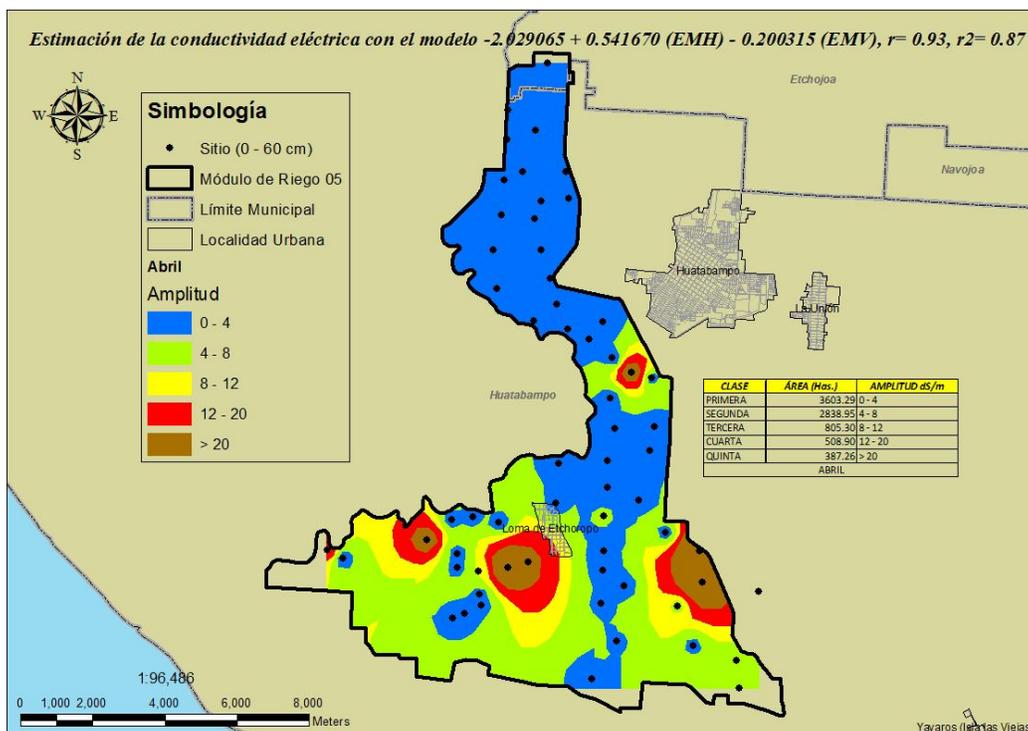


Ilustración 20. Distribución espacial de la salinidad del suelo en el estrato 0-60 cm de profundidad en abril de 2013, obtenida mediante el sensor electromagnético EM-38

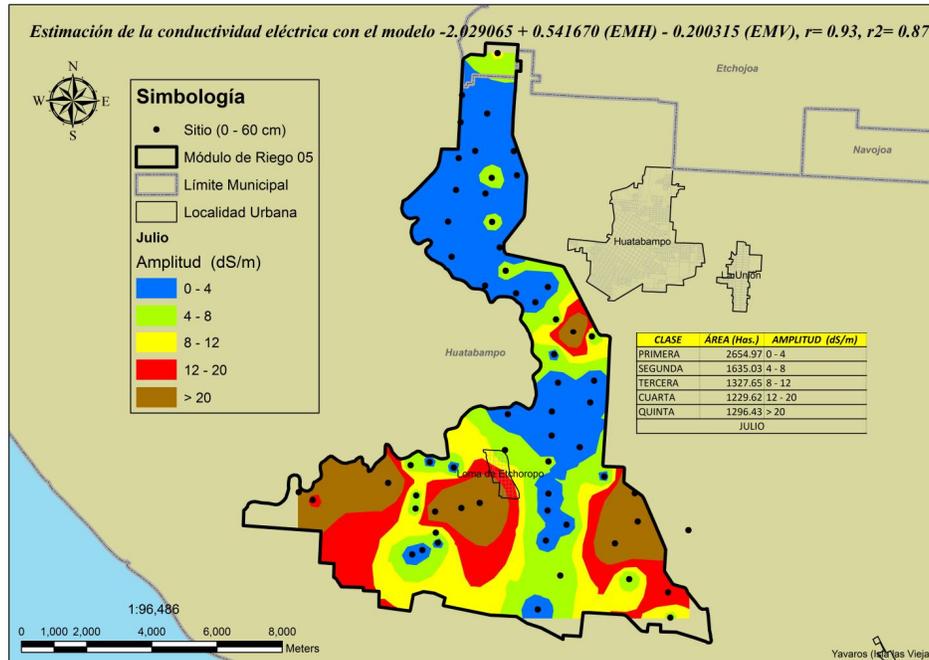


Ilustración 21. Distribución espacial de la salinidad del suelo en el estrato 0-60 cm de profundidad en julio de 2013, obtenida mediante el sensor electromagnético EM-38

El monitoreo mensual de la salinidad en el estrato 0-150 cm mostró que hasta esta profundidad las afectaciones por sales son mayores que en el estrato superficial. En enero se estimó una salinidad media de 10.9 dS/m, considerando valores puntuales, la cual por efecto de los riegos permaneció casi igual en febrero y marzo, siendo así que en este mes fue de 11.0 dS/m. Luego tuvo una tendencia decreciente por causa del descenso de los mantos freáticos debido a la finalización de riegos y del aumento de la temperatura; y la tendencia fue ascendente a partir de julio considerando un factor adicional que se refiere a la presencia de lluvias. La precipitación pluvial en la estación climatológica de Huatabampo durante 2013 tuvo una distribución distinta a la de 2012; en 2013 durante junio-agosto llovieron 261 mm mientras que en 2012 en el mismo periodo cayeron 114 mm, principalmente en julio y agosto, en ambos años. El ascenso de sales por capilaridad causado por las lluvias se ha visto reflejado en mayores superficies ensaltradas en los meses

En el estrato 0-150 cm la distribución temporal de las sales refleja con mayor claridad lo ocurrido en cuanto a la humedad existente hasta 150 cm y a las condiciones de clima y de inexistencia de cultivos entre los meses de mayo y octubre. Mientras hubo riegos el manto freático estuvo más alto; y cuando hubo lluvias también se recuperaron ligeramente los mantos freáticos y es por ello, además del incremento en la temperatura y la evapotranspiración, que los valores de salinidad estimados resultaron con un comportamiento distinto al del estrato superficial. A mayor profundidad del suelo, la influencia del manto freático en la salinidad del suelo es mayor que en el estrato superficial. Se observó, entonces, que las tendencias de salinidad estimadas entre uno y otro estrato están influenciadas por las condiciones de humedad del suelo, existencia de cultivos y clima.

Las superficies estimadas que resultaron afectadas por sales fueron variables a lo largo del periodo de estudio, con valores entre 84.6 % del área total en mayo, hasta 95.2 % del área total en marzo (ilustraciones 22-24).

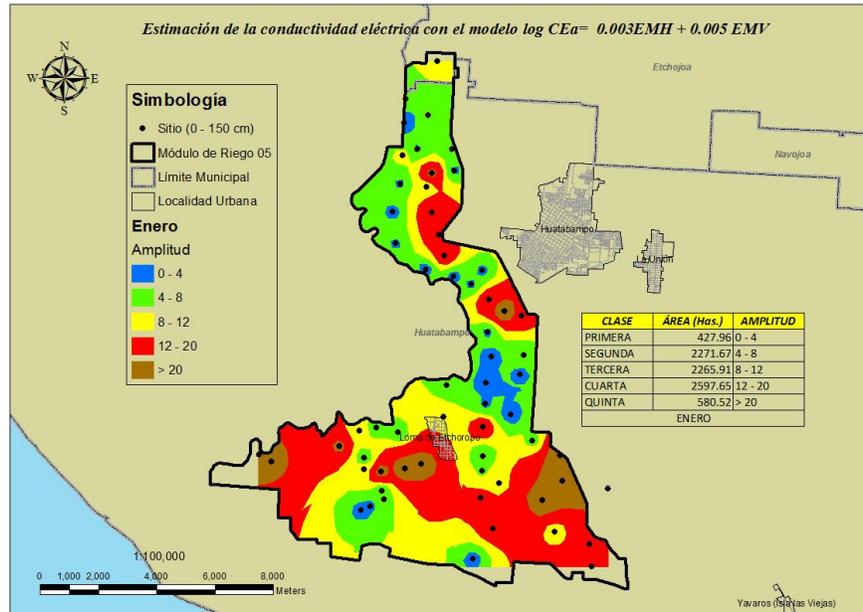


Ilustración 22. Distribución espacial de la salinidad del suelo en el estrato 0-150 cm de profundidad en enero de 2013, obtenida mediante el sensor electromagnético EM-38

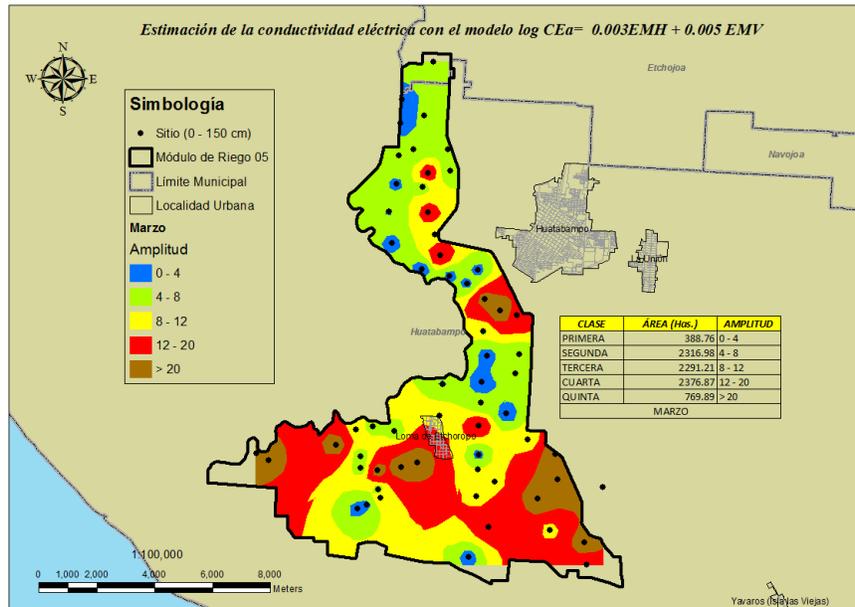


Ilustración 23. Distribución espacial de la salinidad del suelo en el estrato 0-150 cm de profundidad en marzo de 2013, obtenida mediante el sensor electromagnético EM-38

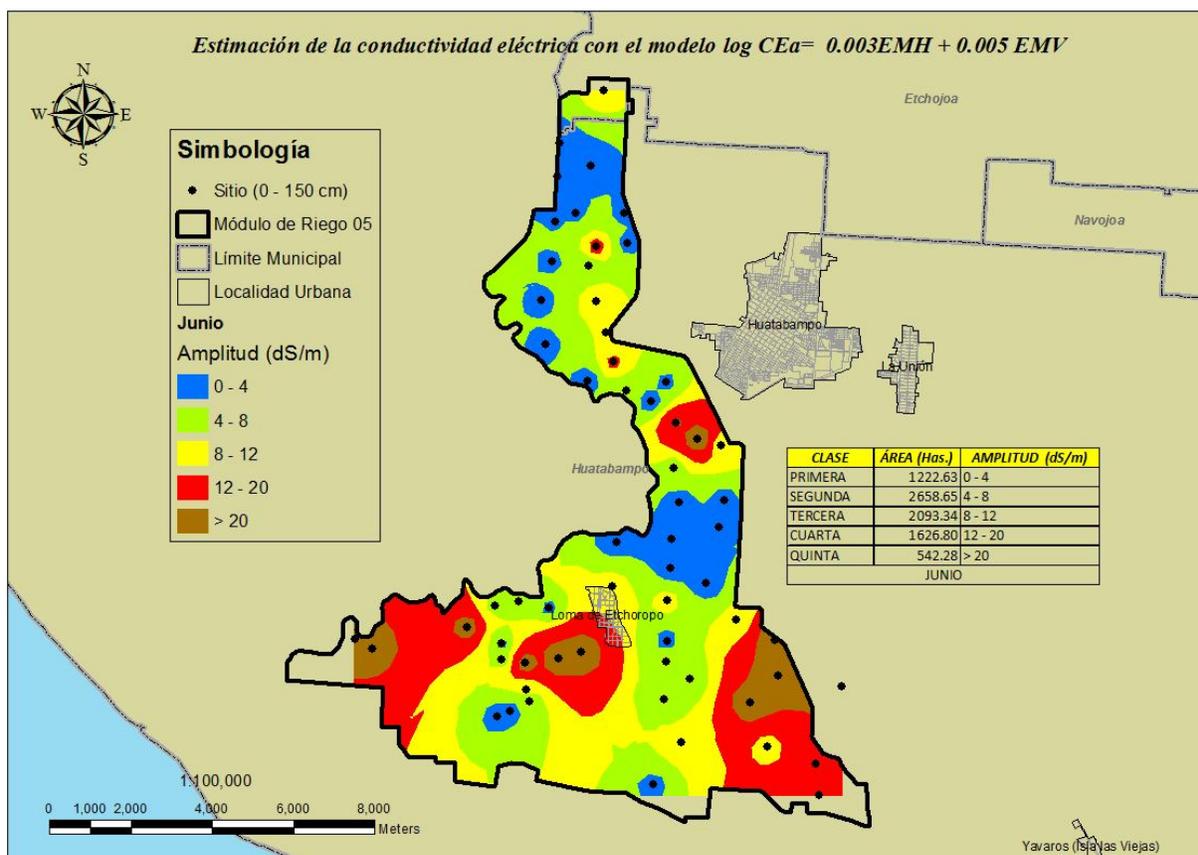


Ilustración 24. Distribución espacial de la salinidad del suelo en el estrato 0-150 cm de profundidad en junio de 2013, obtenida mediante el sensor electromagnético EM-38

En los estratos de suelo superficial (0-60 cm) y subsuperficial (0-150 cm) analizados, se encontró que las áreas más afectadas se localizan hacia el sur del módulo de riego, en la zona con menor altitud del módulo de riego, y próximas a la costa marítima, Las mayores afectaciones, $CE > 8$ dS/m se ubican a la altura de la población de Etchoropo.

Se observó entonces que existe una variación temporal en el contenido de sales en los estratos superficial y subsuperficiales, relacionada con el uso de agua de riego y de uso del suelo, y con el clima. La distribución de la salinidad es diferente durante la época de riegos, ciclo de cultivo otoño-invierno, comparada con la época de estiaje, donde no ha habido ciclo de verano, y que ha estado carente de cultivos. Cuando dejó de regarse, a principios de abril, los niveles de salinidad empezaron a decrecer como consecuencia de que la falta de humedad superficial impidió el ascenso capilar de las sales hacia la superficie del terreno.

En verano, cuando las temperaturas son más altas, es cuando se observan los valores más altos de evapotranspiración (ETo) (ilustración 25). Comparativamente, estos valores se registraron mayores en 2013 que en 2012, debido a que en 2013 ha habido una mayor precipitación pluvial y a que se dispuso de un mayor volumen de agua para riego, esto es, mayor evaporación; asimismo,

en 2013 se tuvo una mayor producción de biomasa derivada del patrón de cultivos, como fue más siembra de trigo, que en 2012.

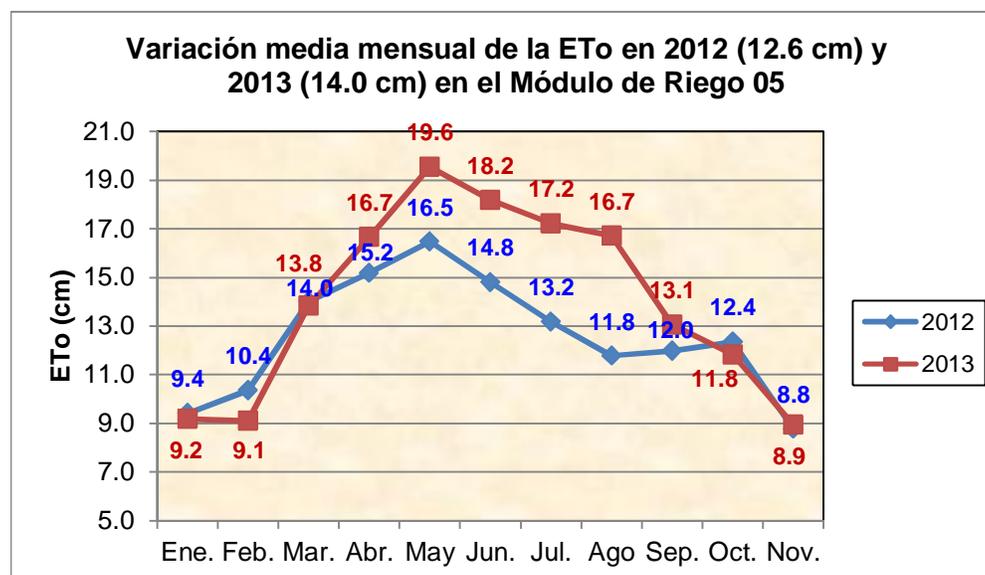


Ilustración 25. Variación temporal de la evapotranspiración de referencia en la estación climatológica de Huatabampo, Son.

La tendencia de áreas afectadas por sales entre enero y julio fue similar a la distribución realizada con valores puntuales, considerando ambos estratos (ilustración 26). En el estrato subsuperficial se cuantificaron las mayores afectaciones por salinidad que en el estrato superficial; y es de hacerse notar que algunos cultivos, como es el caso del cártamo y alfalfa, exploran radicularmente hasta esta profundidad, por lo cual estos cultivos se ven afectados. Afectaciones por sales en la superficie del módulo de un 95 % en marzo, en invierno, y de un 90 % en julio, en verano, son valores muy altos, por lo cual debe pensarse en medidas para corregir el problema en el corto plazo. Dichas medidas sin duda tienen que ver con mejorar el funcionamiento del drenaje interno de los suelos, y de aumentar la eficiencia de conducción y de riego parcelaria, que siguen estando por debajo de valores óptimos.

En el estrato superficial se estimaron porcentajes de áreas afectadas desde un 41-67%, que también es muy alto, sobre todo si se considera que todos los cultivos que se producen en el módulo de riego son de ciclo anual, como trigo, sorgo, frijol, cártamo, tomatillo, papa y maíz, entre otros, en los que el mayor volumen de sus raíces exploran el estrato superficial del suelo.

La influencia del clima, reflejada principalmente en la temperatura, precipitación pluvial y evaporación, aunada a la inexistencia de riegos y por ende de cultivos, gráficamente permiten entender que tienen una influencia en el incremento de superficies ensaltradas en el Módulo de Riego 05.

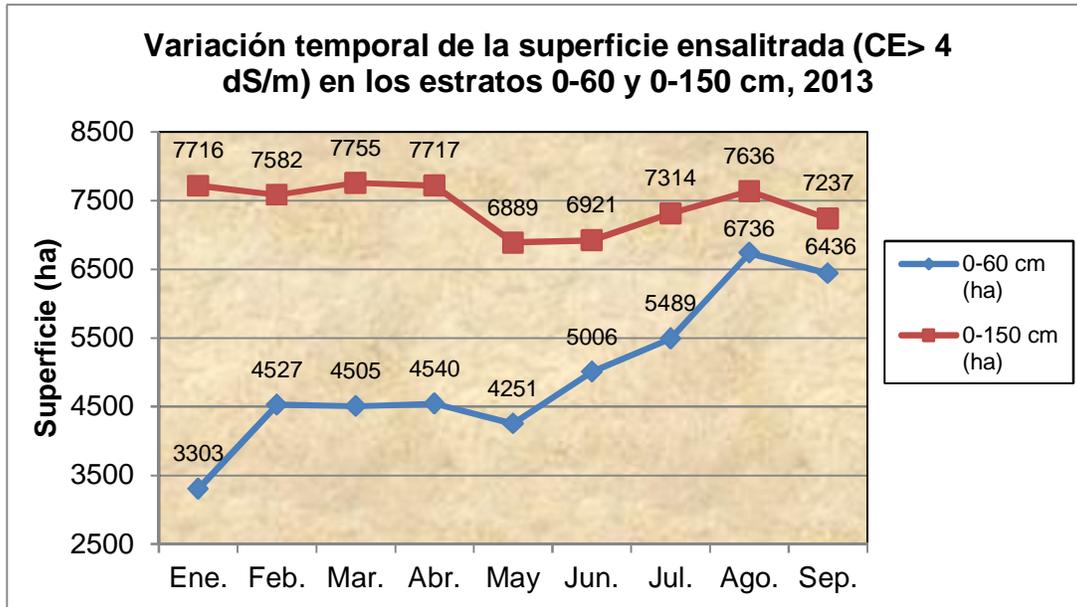


Ilustración 26. Variación temporal de las superficies afectadas por sales

Mediciones mensuales de niveles freáticos

El monitorizado de niveles freáticos se realizó desde enero hasta agosto de 2013 (ilustración 27). Los niveles medios más superficiales se observaron en febrero, con 1.65 m y marzo con 1.71 m; éstos empezaron a profundizar hasta agosto donde el nivel promedio de los 52 pozos fue de 2.45 m (ilustración 28). El incremento de profundidad de niveles freáticos ocurrió a la par de la conclusión del ciclo de siembra otoño-invierno y del incremento de temperatura ambiente.



Ilustración 27. Monitorización de niveles freáticos

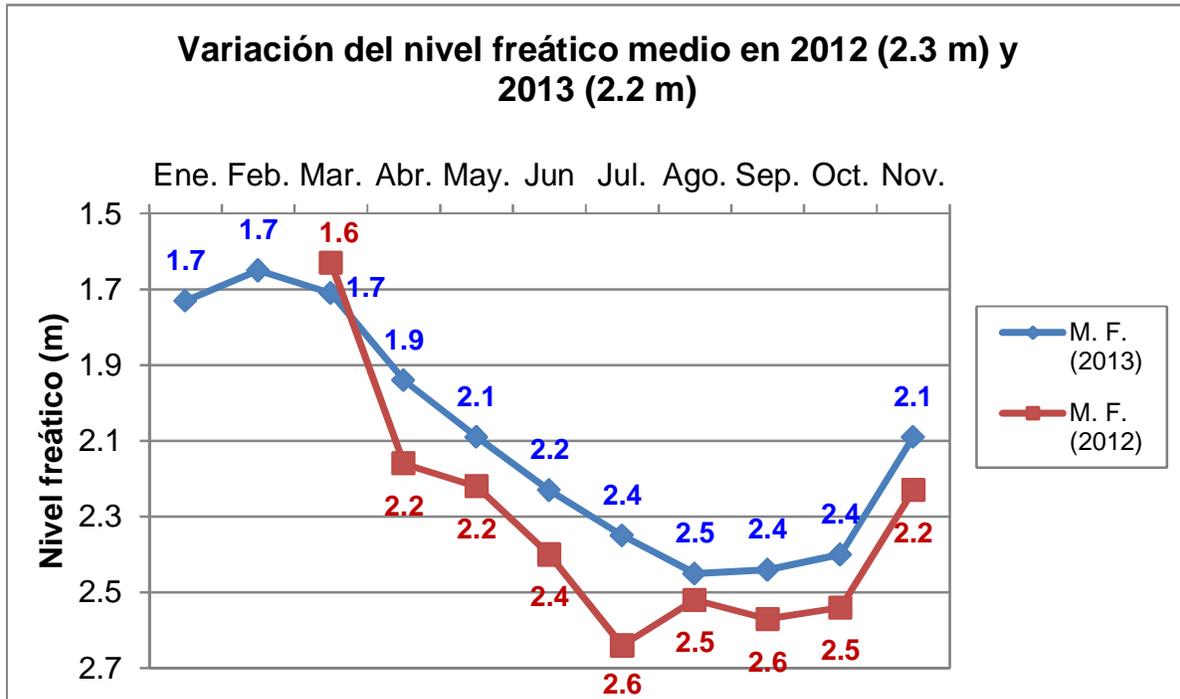


Ilustración 28. Variación mensual de la profundidad al nivel freático considerando valores medios

Con las lecturas mensuales de niveles freáticos analizadas en un SIG, se elaboraron mapas mensuales de isobatas que muestran curvas con igualdad de profundidad del nivel freático. Se utilizó la clasificación de niveles freáticos publicada en De la Peña, (1979) e IMTA (1997). Las zonas más afectadas se delimitaron en febrero, marzo y enero, en este orden; y las menos afectadas en julio y junio, en este orden (ilustraciones 29-31). En febrero las áreas con niveles freáticos por arriba de un metro y medio ocuparon el 63.7 % del módulo de riego; este dato es preocupante considerando que en febrero existían cultivos en alrededor del 98 % de la superficie total de riego; cultivos que en su mayoría estaban en la etapa fenológica de floración. Además, el agua freática normalmente presenta valores por arriba de 4 dS/m de conductividad eléctrica, que son muy dañinos para las plantas cuyas raíces están en contacto con el manto freático superficial.

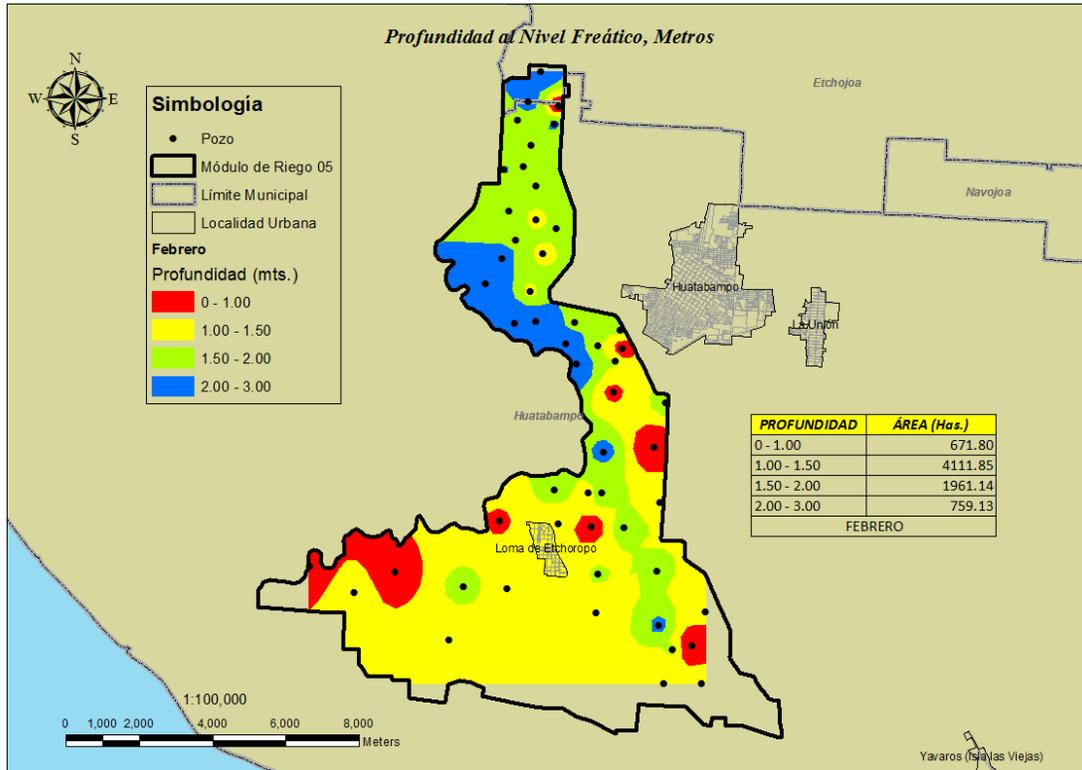


Ilustración 29. Isobatas de febrero

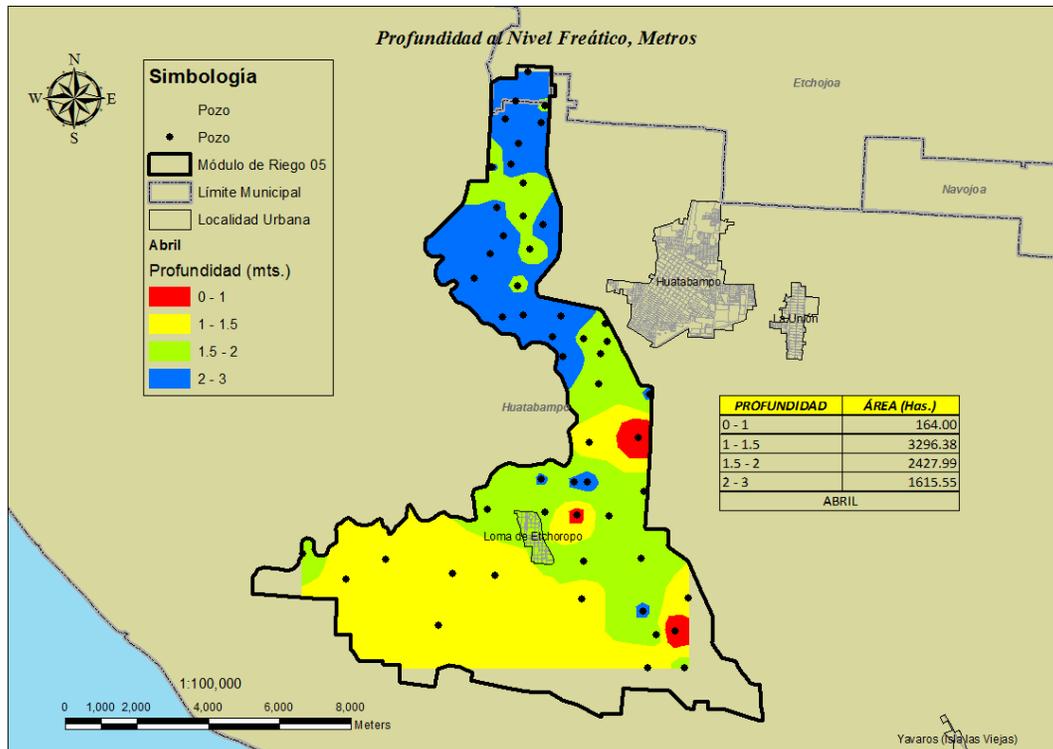


Ilustración 30. Isobatas de abril

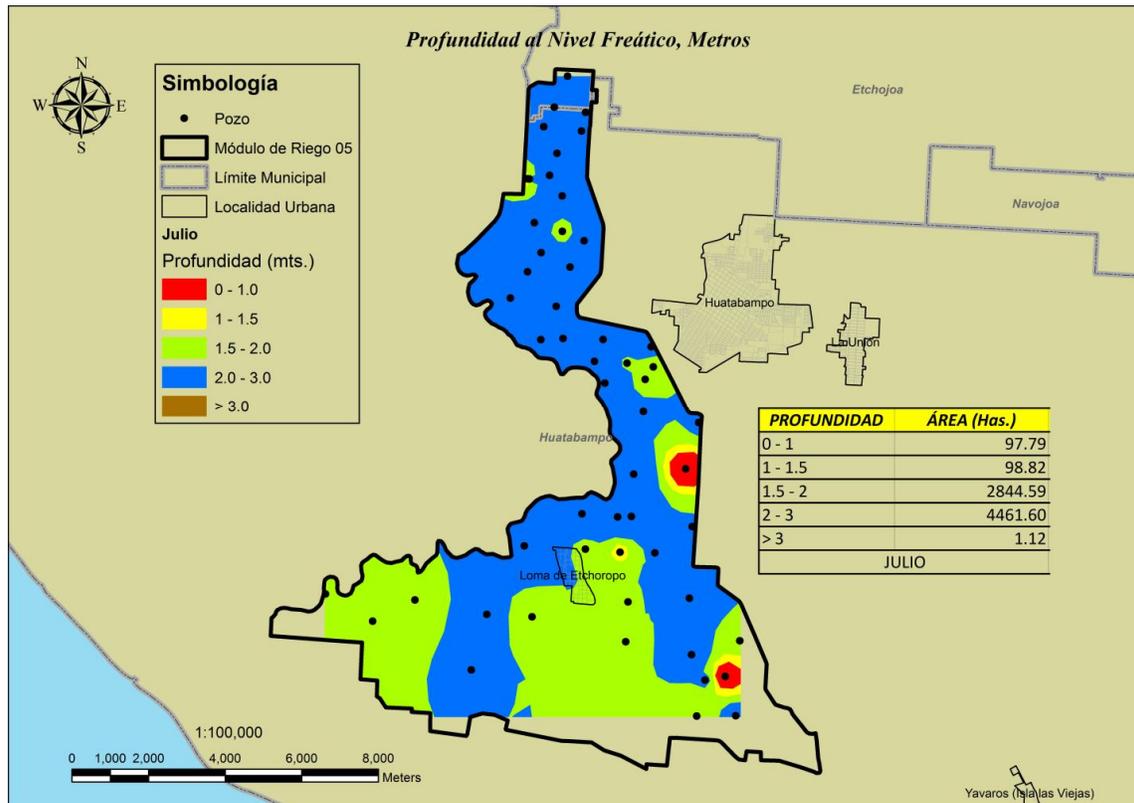


Ilustración 31. Isobatas de julio

En el módulo de riego los últimos riegos se aplicaron en abril ya que oficialmente el cierre de la presa Adolfo Ruiz Cortines fue el día 07 de abril de 2013, y es así que los niveles freáticos menores a 1.5 m de profundidad se observaron elevados en el 63 % de su superficie. Al concluir la aplicación de agua de riego en abril en los meses sucesivos se observó un descenso en la magnitud de las áreas afectadas; este descenso se observó drástico, ya que entre abril y julio las áreas con niveles freáticos por arriba de 1.5 m de profundidad cubrieron entre el 46.1-2.6% de la superficie del módulo, entre abril y julio, respectivamente (ilustración 32). En febrero prácticamente toda el área comprendida desde la Ciudad de Huatabampo hacia el sur del módulo hasta sus límites con el Golfo de California estuvo afectada; posteriormente en los meses de enero, marzo y abril las afectaciones se observaron de la mitad del módulo hacia el sur; en las zonas de menor altitud. La reducción de afectaciones fue en paralelo con la finalización del ciclo de cultivo otoño-invierno y del incremento de temperatura. En marzo de 2012 la superficie afectada fue mayor que en marzo de 2013; posteriormente en 2013 se obtuvieron mayores afectaciones hasta junio. En junio y julio en ambos años se observaron las menores superficies afectadas (ilustración 33).

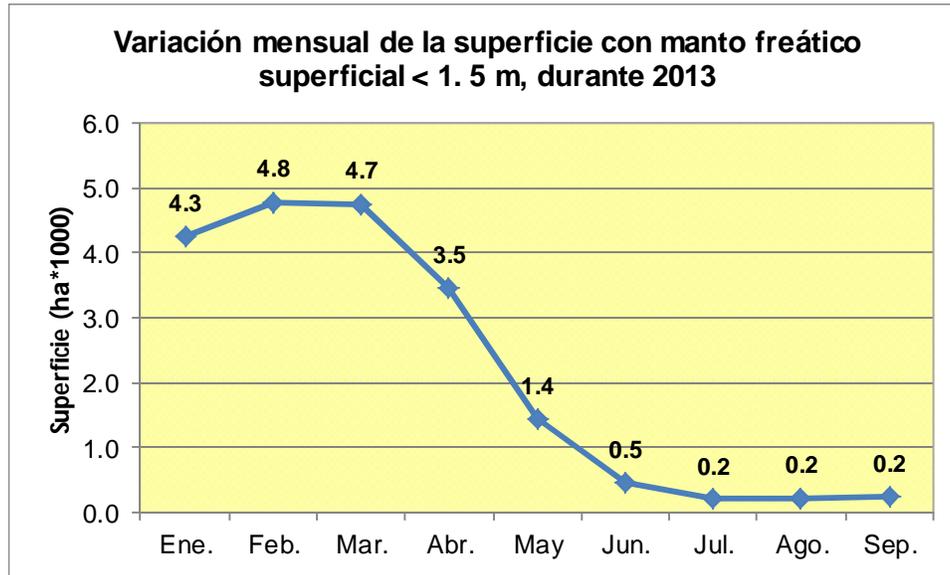


Ilustración 32. Variación temporal de la superficie afectada con un nivel freático < 1.5 m de profundidad.

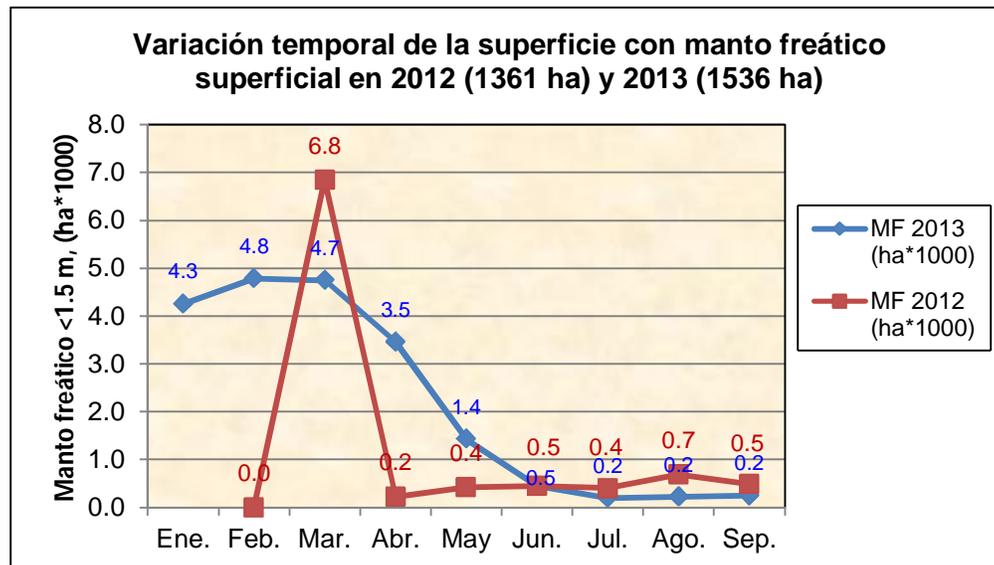


Ilustración 33. Variación temporal de la superficie afectada por manto freático superficial en 2012 y 2013.

Se analizó estadísticamente la relación entre los niveles freáticos con la temperatura y la salinidad, utilizando valores medios mensuales. Primero, se encontró que la profundidad al nivel freático está relacionada con la temperatura, en relación lineal, ya que mientras aumenta la temperatura, aumenta la profundidad al nivel freático, $r^2 = 0.95$; esto significa que la acción de la temperatura afecta el ascenso y descenso de los niveles freáticos, mediante la evapotranspiración. Este mecanismo también hace que las sales asciendan hacia la superficie del suelo por capilaridad cuando hay humedad (ilustraciones 34 y 35).

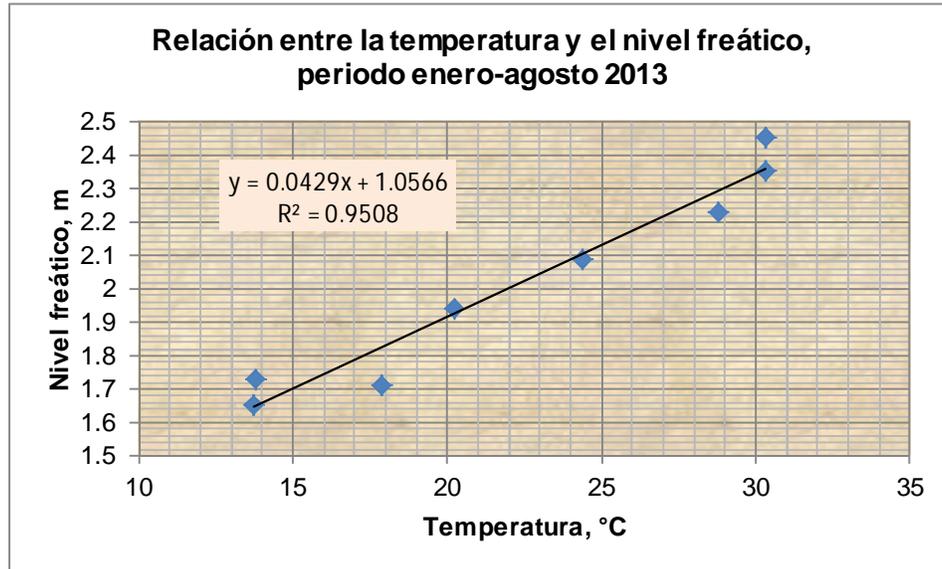


Ilustración 34. Relación entre la temperatura ambiente y la profundidad al nivel freático

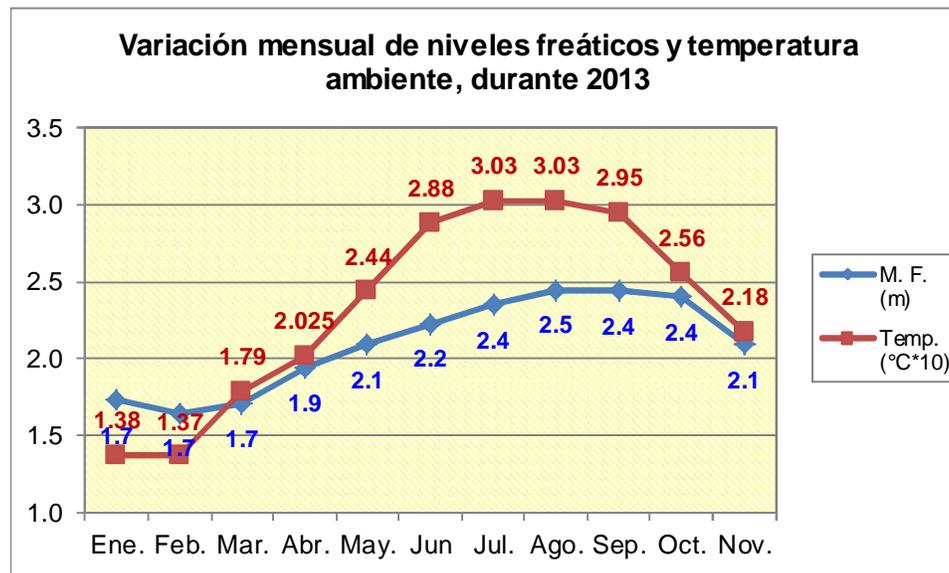


Ilustración 35. Variación de la temperatura y de los niveles freáticos en el periodo enero-agosto. Valores medios mensuales.

El análisis estadístico de la salinidad en el estrato 0-60 cm de profundidad, como variable dependiente con la profundidad al nivel freático entre los meses de mayo y agosto, arrojó un coeficiente de correlación de 0.99 que explica una alta dependencia de los contenidos de sales encontrados con respecto a los niveles freáticos observados entre marzo y julio, considerando el estrato 0-60 cm de profundidad (ilustración 36). Se observó que el incremento de los valores medios mensuales de salinidad, es directo con el aumento de la profundidad del nivel freático, también considerando valores medios mensuales.

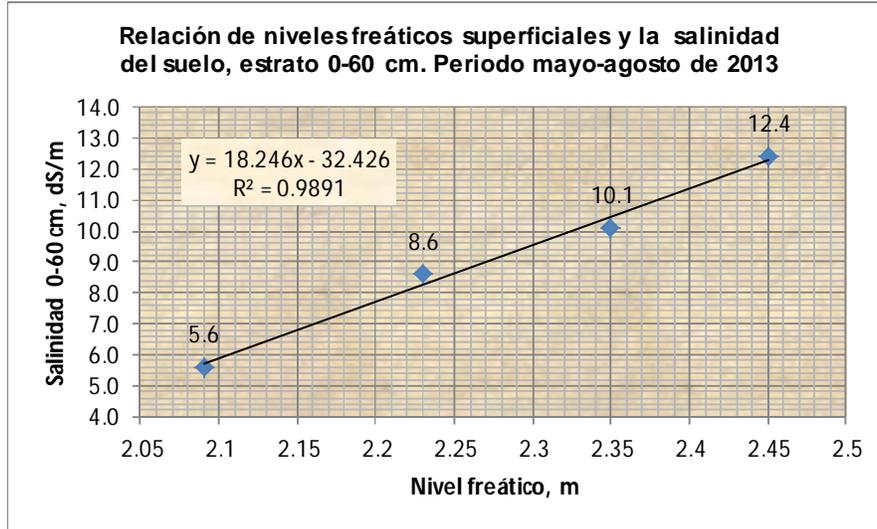


Ilustración 36. Relación de la salinidad en el estrato 0-60 cm de profundidad y la profundidad del nivel freático en el periodo mayo-agosto de 2013

En el periodo mayo-agosto referido, también se encontró una buena correlación entre la temperatura ambiente y la salinidad del suelo en el estrato 0-60 cm de profundidad; considerando valores medios mensuales en ambos casos (ilustración 37). Entonces, por lo que se ha mostrado, la salinidad del suelo está estrechamente ligada a la temperatura y a las condiciones de humedad del suelo. La presencia de valores de salinidad altos en el perfil del suelo también se explica por la presencia de lluvias, ya que estas cayeron entre los meses de junio-agosto en mayor magnitud. La humedad dejada en el suelo por las lluvias, además de las altas temperaturas registradas en este periodo de tiempo influyeron para que se presentara un ascenso capilar de sales que afectó principalmente el estrato superficial; en junio llovieron 16 mm, en julio 105 y en agosto 140 mm.

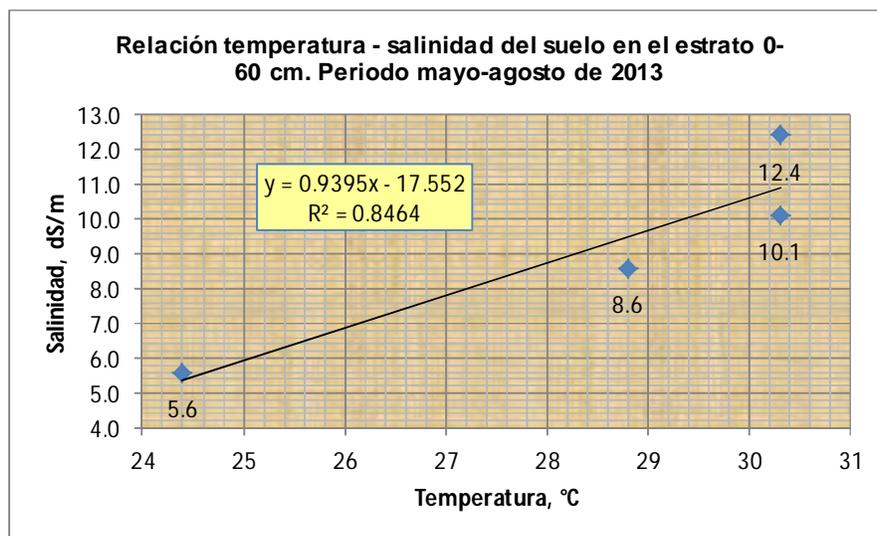


Ilustración 37. Relación entre la temperatura ambiente y la salinidad del suelo, en el periodo mayo-agosto de 2013.

Monitorización de la salinidad del agua de los pozos de observación

Mensualmente se monitorizó la salinidad del agua en los pozos de observación del manto freático superficial, para lo cual se obtuvieron muestras para analizar la salinidad *in-situ* con un medidor portátil Hanna HI9811-5 previamente calibrado en el Laboratorio de Calidad del Agua del IMTA; el equipo cuenta con soluciones para calibrar los parámetros de conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y pH; también se midió la temperatura del agua (ilustración 38).



Ilustración 38. Monitoreo mensual de la salinidad del agua freática

La salinidad del agua a lo largo del periodo de estudio tuvo un valor medio de 5.6 dS/m; el valor menor se registró en marzo, de 5.2 dS/m y el valor más alto en agosto, de 6.2 dS/m. Los valores más altos de salinidad del agua freática coincidieron con las lecturas de mayor profundidad de niveles freáticos. La distribución media de sales del agua freática coincidió con la CE tanto en el estrato 0-60 cm como en el estrato 0-150 cm, pero únicamente en el periodo mayo-agosto (ilustración 39); en este periodo la CE del agua tuvo los valores más altos. La curva de variación espacial muestra dos partes, donde el punto de inflexión es el mes de abril que es el mes en que finalizaron los riegos en el distrito de riego. Posiblemente las lluvias ocurridas a partir de junio lavaron sales y causaron dilución de las mismas, observado esto en el descenso de niveles en mayo y junio; los valores se incrementaron en julio y agosto influenciados por la temperatura y por la precipitación ya referida.

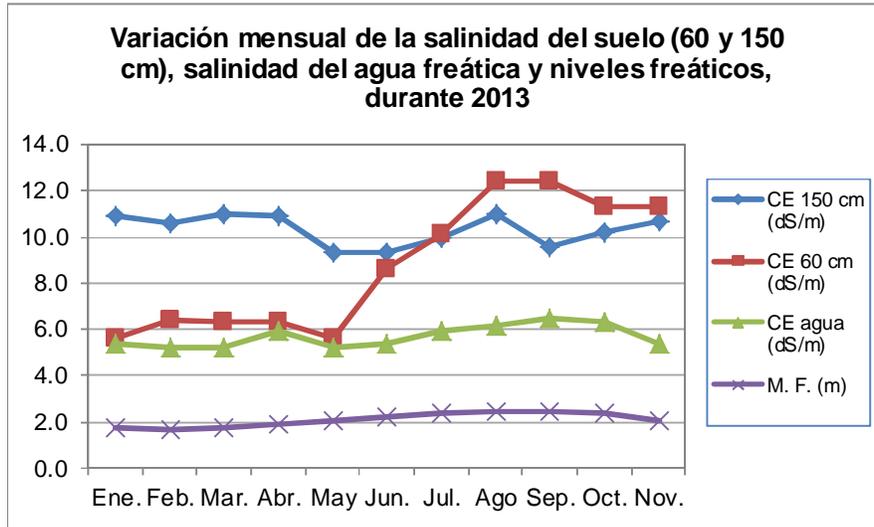


Ilustración 39. Variación temporal de la salinidad del agua freática, salinidad del suelo y de niveles freáticos

Se observó una relación lineal alta ($r^2 = 0.91$) entre la superficie ensaltrada del estrato 0-150 cm y la salinidad del agua de los pozos de observación medidas entre los meses de mayo y agosto, por lo que se puede concluir que la salinidad del agua freática tiene alta relación con la salinidad del suelo en este periodo de tiempo, específicamente; las sales del agua freática provienen del agua de riego y de la disolución de sales existentes en el suelo (ilustración 40). Similar análisis se realizó para el estrato 0-60 cm y se obtuvo también una buena correlación $r^2 = 0.88$. Estos resultados muestran que en la época de mayor temperatura ambiente en el área de estudio, los altos valores de salinidad del suelo observados, que son valores entre los más altos para el estrato 0-60 cm, la salinidad del agua freática influye en el ensaltramiento del suelo.

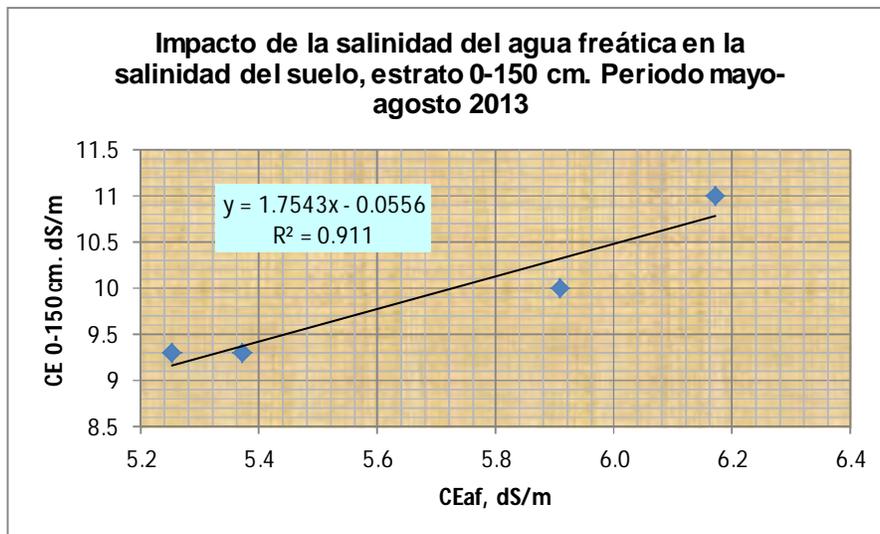


Ilustración 40. Relación entre la superficie ensaltrada en el estrato 0-150 cm y la salinidad del agua freática, en el periodo mayo-agosto. Mediciones mensuales.

Se llevó a cabo una regresión lineal múltiple considerando valores de CE del suelo puntuales medios mensuales, para el estrato 0-150 cm de profundidad, la salinidad del suelo como variable dependiente y la salinidad del agua freática y la profundidad al nivel freático como variables independientes. Se analizó el periodo diciembre 2012-agosto 2013. El resultado del análisis muestra una relación estrecha entre estas variables, $r^2= 0.91$; esto se interpreta que la salinidad del suelo está relacionada con la salinidad del agua freática y con la profundidad del manto freático. El modelo obtenido es:

$$CE=7.8753 + 18.2375*MF - 0.0061*CEaf; \quad r= 0.95; r^2= 0.91 \quad (2)$$

Donde CE es la conductividad eléctrica del estrato 0-150 cm de profundidad del suelo, M.F. es profundidad al nivel freático y CEa.f. es la salinidad del agua freática. Al analizar en conjunto las tres variables se pudo conocer que la salinidad del suelo observada en los meses estudiados, está estrechamente ligada a los parámetros referidos.

Los valores puntuales de salinidad del manto freático se transformaron a superficies mediante el programa Arc-Gis; los mapas de isoconductividad eléctrica del agua freática se muestran en las ilustraciones 41-43. Los valores medidos en campo se agruparon en tres categorías: $<700 \mu\text{S/cm}$, $700-3,000$ y $> 3,000 \mu\text{S/cm}$. Las superficies más afectadas con una $CE > 3,000 \mu\text{S/cm}$ se delimitaron hacia el sur del módulo, a partir del centro geográfico donde se localiza la Ciudad de Huatabampo; aunque también al norte de ésta se identificó un área afectada. Para delimitar la superficie del módulo en clases de salinidad del agua se utilizó la escala para calidad del agua de riego de la FAO (Ayers y Westcot, 1987). Por lo tanto, el contenido de sales medido en los pozos de observación se ubica en el nivel de “severo”, en más del 70% de la superficie del módulo de riego, si esta agua fuera para uso agrícola; esto es, la salinidad del agua freática es muy alta para aquellos cultivos cuyo sistema radicular esté en contacto con estas aguas, como el cártamo, cuyas raíces profundizan hasta cuatro metros.

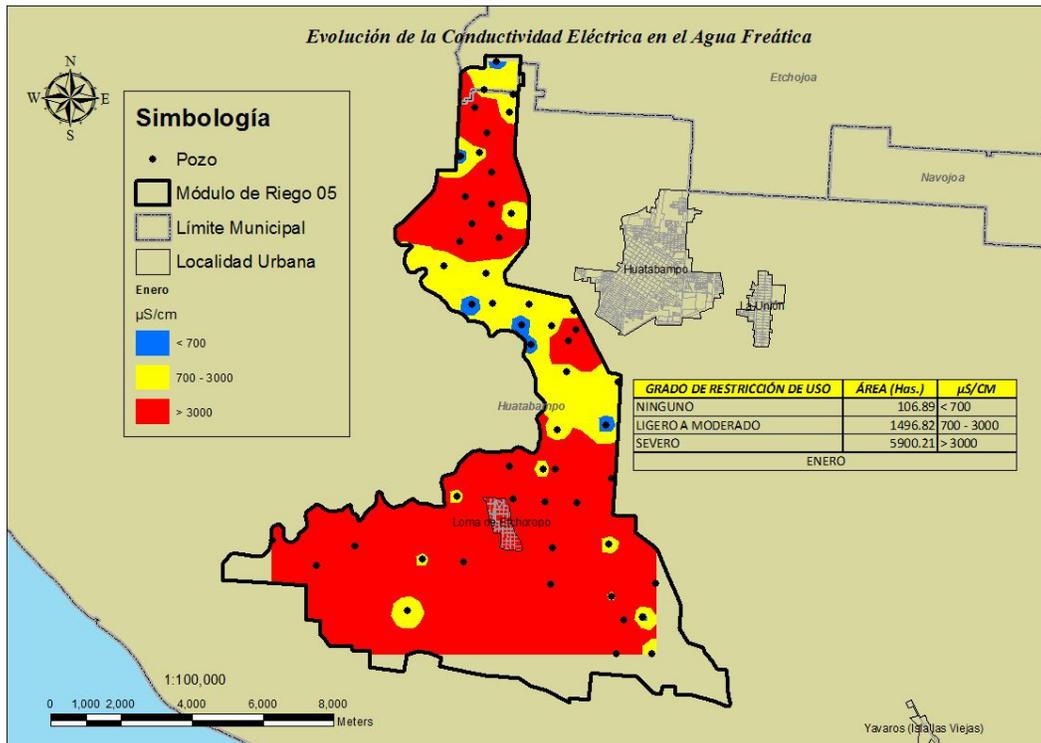


Ilustración 41. Distribución espacial del contenido de sales en el agua freática en marzo

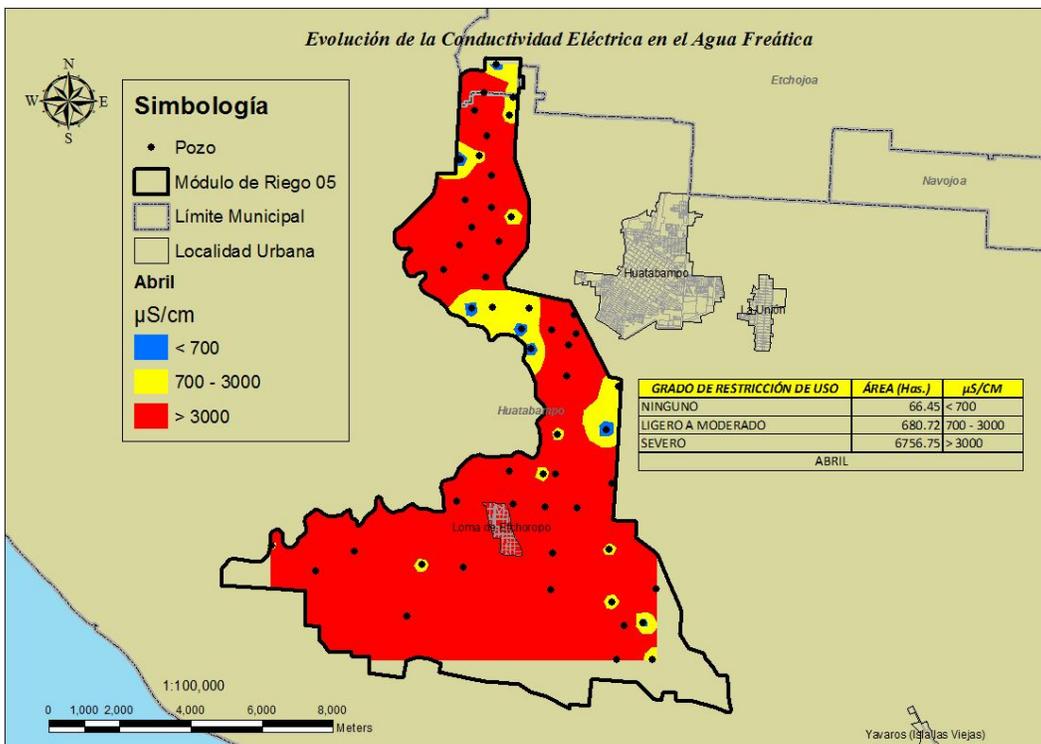


Ilustración 42. Distribución espacial del contenido de sales en el agua freática en abril

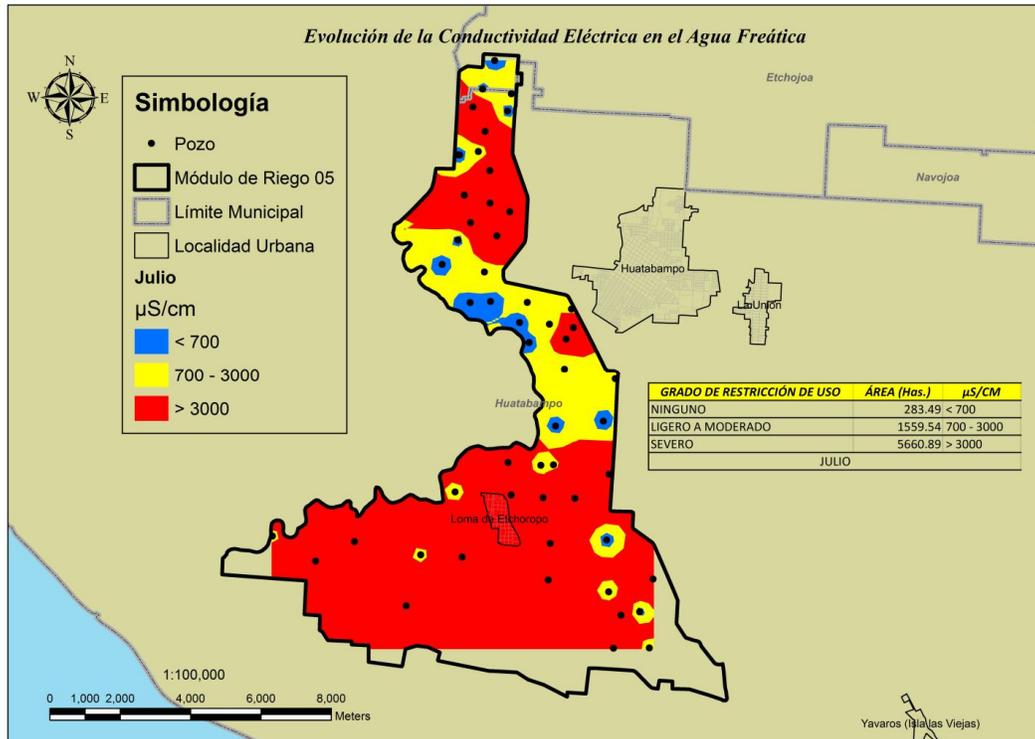


Ilustración 43. Distribución espacial del contenido de sales en el agua freática en julio

En enero la superficie con $\text{CE} > 3 \text{ dS/m}$ resultó equivalente al 79% de la superficie total del módulo de riego; en abril de 90, en mayo de 81, en junio de 74 y en julio de 75% (ilustración 44).

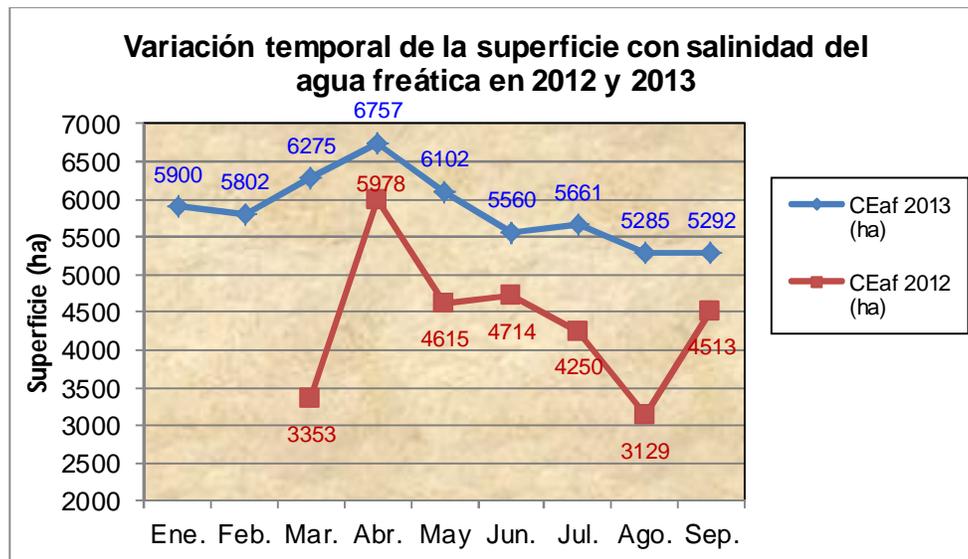


Ilustración 44. Variación espacial de la superficie con salinidad del agua freática.

Comparativamente, entre diciembre de 2012 y abril de 2013 se midió la conductividad eléctrica del agua de riego proveniente de la presa Adolfo Ruiz Cortines y de pozos profundos hacia el

norte del módulo de riego, que es mezclada y entregada al módulo de riego 05 mediante el Canal 3+300, en el punto de control ubicado en el km 29 + 345. La salinidad se midió con un medidor portátil Hanna HI9811-5 previamente calibrado en el Laboratorio de Calidad del Agua del IMTA ilustración 45.



Ilustración 45. Muestreo y medición de la salinidad del agua de riego en el punto de control, Canal 3+300.

Debido a la escasez de agua de riego por la sequía, se estuvo bombeando agua de drenes y de pozos profundos para complementar el insuficiente volumen de almacenamiento para riego de la presa Adolfo Ruiz Cortines; como consecuencia, se estuvieron aplicando a las parcelas altas cantidades de sales disueltas en el agua de riego, y ello también influyó en la salinidad del agua freática y en la salinidad del suelo que se encontraron. Algunos pozos profundos tienen agua con altos contenidos de sales, cercanos a 3 dS/m.

El agua mezclada de la presa y de bombeo tuvo valores de CE en diciembre de 2012 de 1.46 dS/m, en enero de 0.82, febrero de 0.69, marzo de 0.91 y abril de 0.95 dS/m. Estos valores se correlacionaron con las superficies mensuales afectadas por salinidad en el estrato 0-150 cm, y se obtuvo una $r^2 = 0.76$, que indica que hay un cierto efecto de las sales del agua de riego, en el ensaltramiento del suelo (ilustración 46).

Debido a la escasez recurrente de agua en el distrito de riego, que en los últimos 15 años se ha visto afectado por sequía, en el distrito es común el bombeo de agua de drenes para aplicarla en las parcelas; el agua se aplica a los cultivos previamente mezclada con agua de la presa o directamente desde los drenes hacia las parcelas (ilustración 47). Sin duda, este factor también está influyendo en el ensaltramiento de los suelos. Está claro entonces que el cambio climático está afectando de varias maneras en el ensaltramiento de los suelos del Módulo de Riego No. 05.

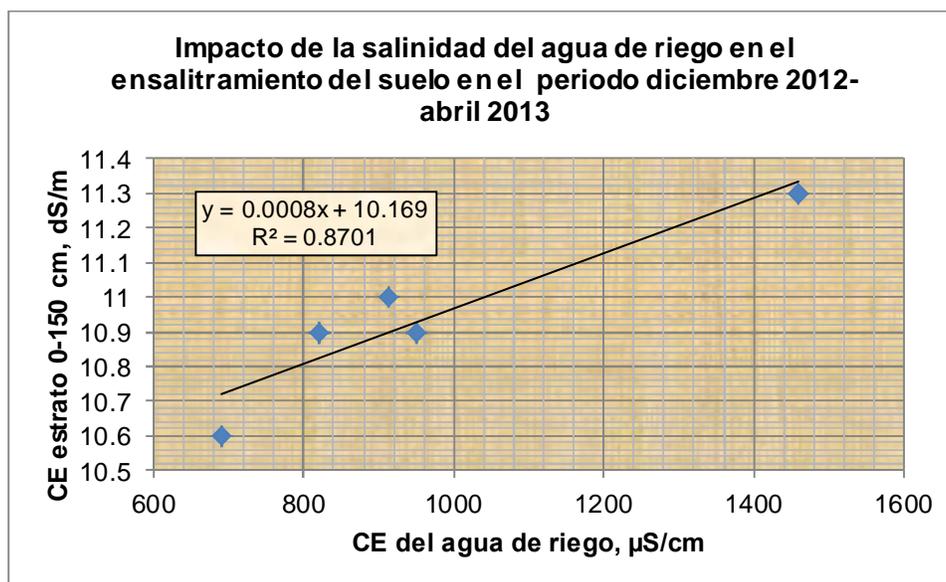


Ilustración 46. Relación entre el agua de riego y la salinidad del suelo, estrato 0-150 cm de profundidad.



Ilustración 47. Bombeo de agua de drenaje para riego, el 04 de abril de 2013.

Temperatura, precipitación pluvial y evapotranspiración en el área de estudio

El clima del Valle del Río Mayo es estepario semiárido. Con datos históricos de la estación climatológica del Campo Agrícola Experimental del CIANO del INIFAP, ubicada en el municipio de Navojoa, Son., se analizó que la temperatura media anual en un periodo de 43 años es de 19.5 °C con variaciones de un mínimo de 0 °C a un máximo de 48 °C. La temperatura alcanza un máximo en los meses de julio y agosto, mientras que enero, es el mes más frío. La precipitación, generalmente se incrementa de la costa al oriente, hacia las elevaciones más altas. La precipitación pluvial media entre 1969 y 2012 es de 382 mm (ilustración 48). La precipitación

cae, generalmente, entre julio y octubre y entre diciembre y enero. Más del ochenta por ciento de las lluvias ocurre en verano, y la precipitación dura cuarenta días en el año, como cifra media anual. Las lluvias de verano son breves comúnmente, y torrenciales y están limitadas a franjas o pequeñas áreas.

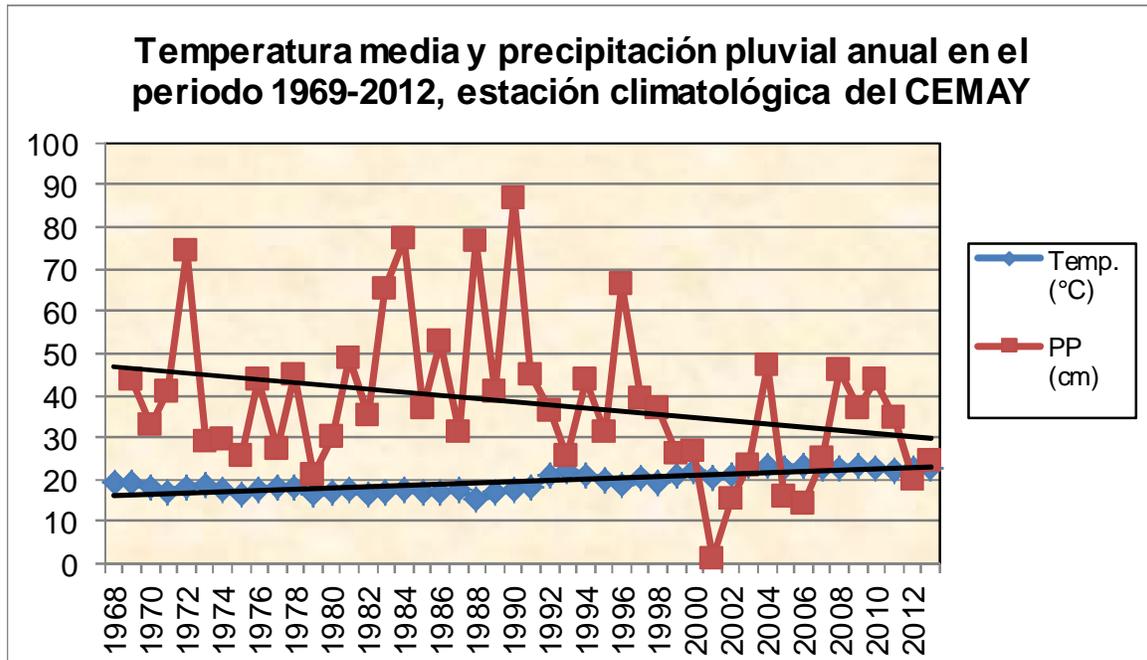


Ilustración 48. Variación de la temperatura y la precipitación en el periodo 1969-2012 en el Valle del Río Mayo.

Mediante el análisis de información histórica climatológica, se encontró que entre 1992 y 2005 hay una tendencia en la temperatura a incrementarse, ya que el valor medio es de 21.2 °C, que es superior al promedio histórico de 18.9 °C; mientras que en la precipitación pluvial la tendencia es hacia una disminución, con un valor medio entre 1992 y 2005, de 311 mm, que es inferior al promedio histórico, de 398 mm.

A lo largo de casi 40 años en el Valle del Río Mayo las condiciones de precipitación pluvial y temperatura están cambiando, probablemente como un fenómeno cíclico o debidas al cambio climático. En los últimos 20 años se observa un incremento en la temperatura y un decremento en la precipitación pluvial. Esto significa que su efecto en la salinidad del suelo tendrá consecuencias en cuanto al incremento de superficie afectada.

Con observaciones de temperatura y precipitación pluvial mensual entre enero y agosto de 2013, tomados de la estación climatológica localizada en la Ciudad de Huatabampo, Son., ubicada aproximadamente en el centro geográfico del módulo de riego, se encontró que durante este periodo de tiempo la temperatura media mensual es de 22.4 °C y la precipitación pluvial es de 269 mm, que son valores que están por encima del promedio en el caso de la temperatura y por debajo del promedio en cuanto a la precipitación. El valor medio de temperatura más alto se registró en julio y agosto; las lluvias cayeron entre junio y agosto (ilustración 49). La

evapotranspiración (ETo) más alta se observó en mayo; ésta descendió por efecto de la cosecha de cultivos y de que en verano prácticamente no hubo siembras. Los valores más altos observados de ETo se presentaron a partir de mayo, punto de inflexión, relacionados con el incremento de la temperatura y la presencia de lluvias.

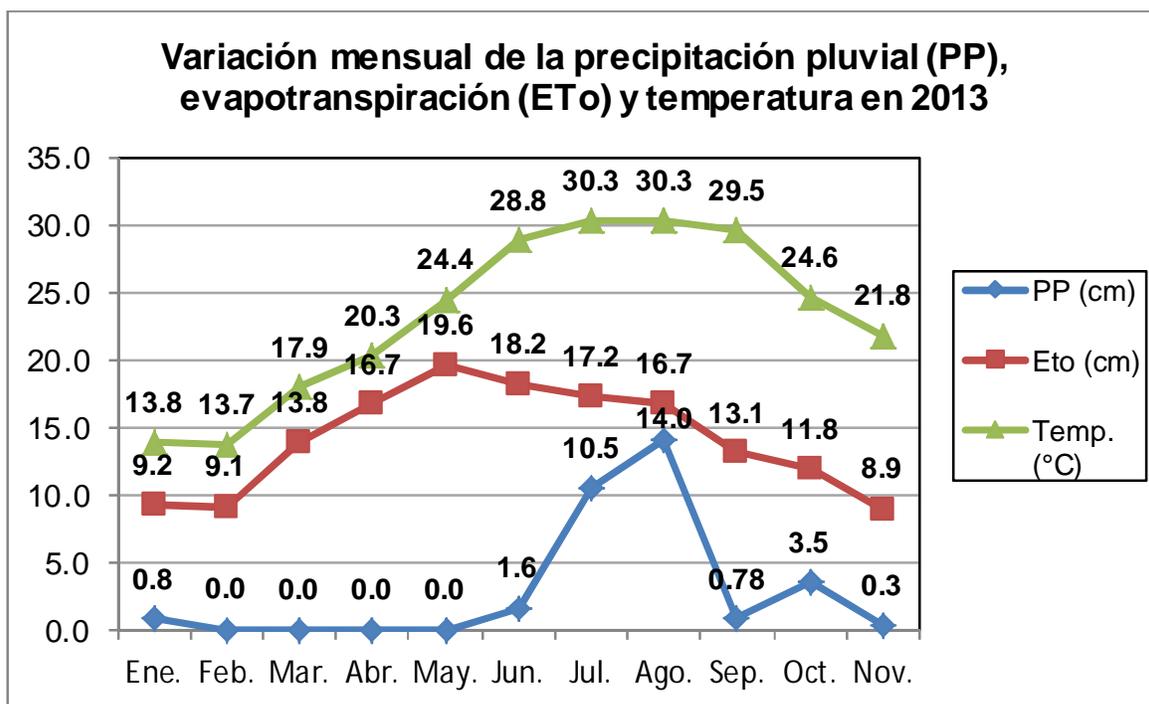


Ilustración 49. Temperatura ambiente, precipitación pluvial y evapotranspiración registrados en el área del módulo de riego en el periodo enero-noviembre de 2013.

El análisis gráfico y estadístico de la temperatura media mensual y valores puntuales medios de CE en el estrato 0-60 cm, reveló que existe una estrecha relación entre estas variables en el periodo mayo-agosto de 2013 ($r^2 = 0.84$), ya que a medida que aumenta la temperatura hay una tendencia al aumento de los valores de salinidad; esta tendencia coincide con la presencia de lluvias y la ausencia de riegos por la sequía. Una explicación es que las lluvias aportaron agua a los niveles freáticos, mismos que se elevaron por efecto de la temperatura en el estrato de estudio, 60 cm, y la evapotranspiración hizo que las sales solubles ascendieran hacia la superficie del terreno, transportadas por la humedad existente en el suelo. En la ilustración 50 se presenta la gráfica señalando la relación de la temperatura con la salinidad del suelo en el estrato 0-60 cm.

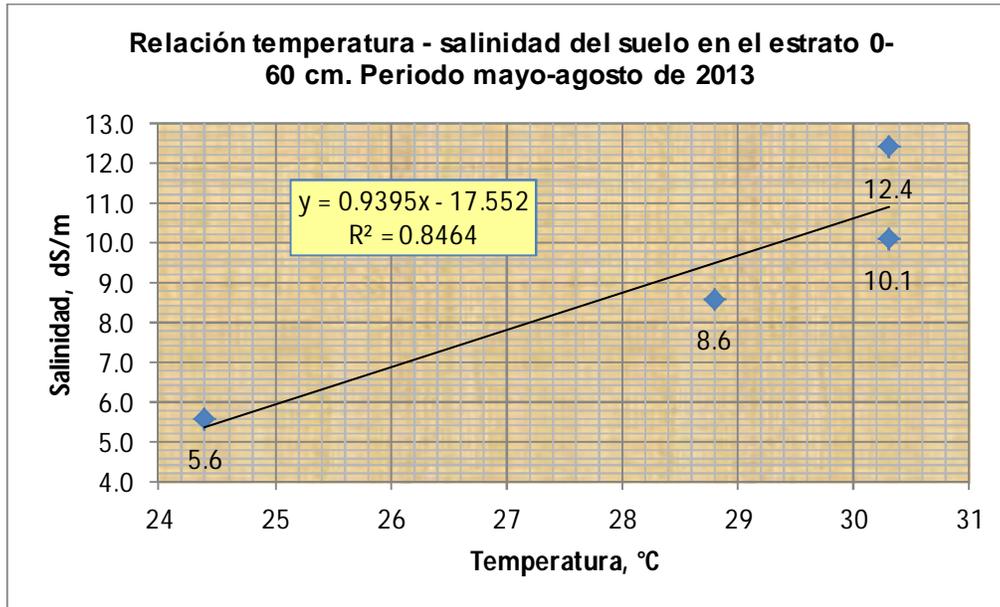


Ilustración 50. Relación entre la temperatura media mensual ambiente y la salinidad del suelo en el estrato 0-60 cm de profundidad

La relación entre la ETo y la salinidad en el periodo mayo-agosto es muy estrecha, pero inversamente proporcional, ya que a medida que disminuye la ETo, incrementa la CE, en el estrato 0-60 cm (ilustraciones 51 y 52).

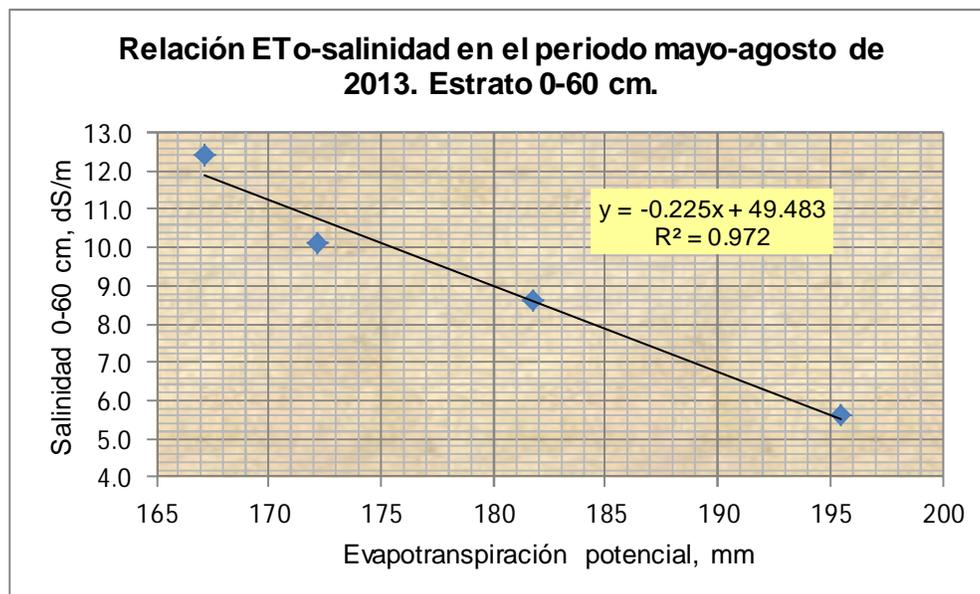


Ilustración 51. Relación de la ETo con la salinidad, en el periodo mayo-agosto.

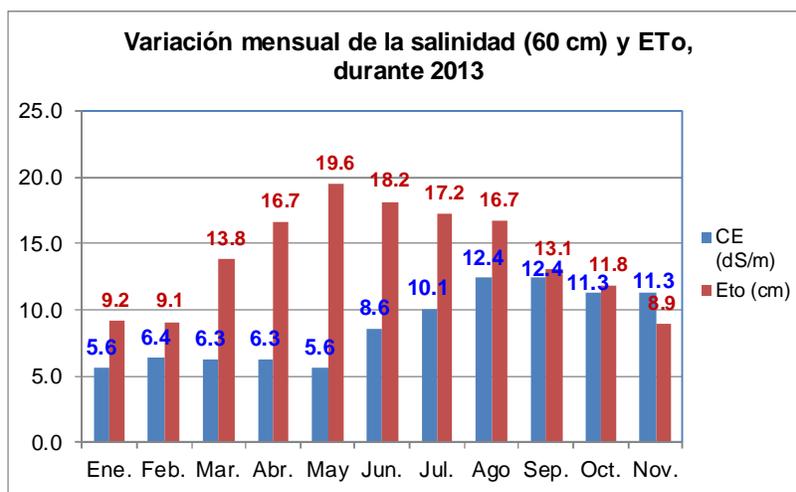


Ilustración 52. Variación de valores puntuales medios de salinidad en el estrato 0-60 cm y de la ETo, en el periodo enero-noviembre de 2013.

Análisis estadístico y gráfico de parámetros climáticos y agronómicos relacionados con la salinidad del suelo

Se identificaron y analizaron estadísticamente los parámetros que están relacionados con la salinidad del suelo, como son la temperatura, profundidad de los niveles freáticos, evapotranspiración, precipitación pluvial, salinidad del agua freática y salinidad del agua de riego. Con datos mensuales medios de estos parámetros se representó su variación dentro del periodo de tiempo estudiado, desde enero hasta agosto de 2013 (ilustración 53).

Vistas en conjunto todas las variables mencionadas, en el estrato 0-60 cm y tomando como punto de partida enero, se observa un incremento de los valores de salinidad a la par del incremento en la temperatura ambiental; este aumento en la salinidad del suelo, en valores puntuales, también está ligado con un ligero decremento en la salinidad del agua freática; una tendencia al descenso de la profundidad del nivel freático, un aumento de la evapotranspiración y una nula precipitación.

A partir de abril se suspendió la aplicación de riegos en el área del módulo, por lo que las condiciones de humedad del suelo sufrieron cambios que influyeron en el contenido de salinidad en el estrato superficial. Dicha modificación significó un incremento muy marcado en los valores de salinidad registrados en la red instalada de 62 sitios de observación. Las lluvias que se presentaron entre junio y agosto incidieron en la evapotranspiración que tuvo sus valores más altos entre mayo y agosto; estas lluvias también se reflejaron en los valores de salinidad del agua freática que también aumentaron ligeramente entre junio y agosto por causa del lavado de sales. Las lluvias, con valor de 261 mm entre junio y agosto de 2013, a diferencia de 114 mm en el mismo periodo de 2012, se reflejaron en los altos contenidos de sales del estrato superficial que fueron estimadas en 2013 mediante el sensor electromagnético EM-38. A diferencia de 2012 para el mismo periodo de tiempo, en 2013 los niveles de salinidad estimados en verano resultaron mayores que los observados en 2012.

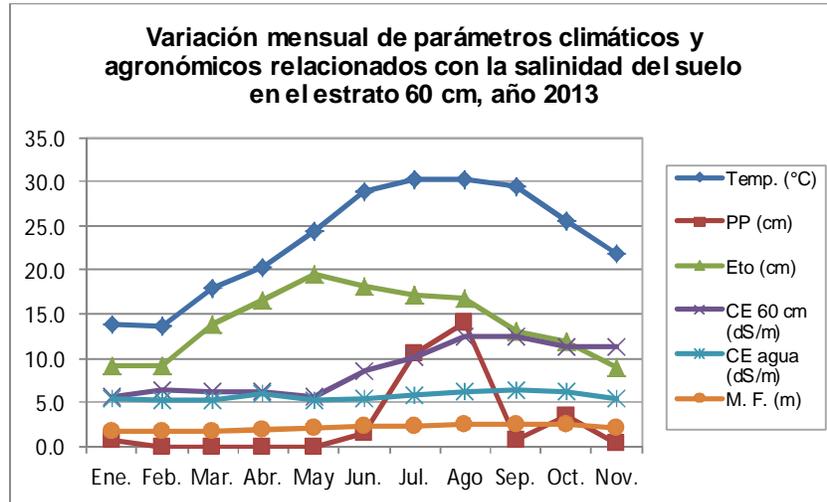


Ilustración 53. Variación temporal de los parámetros identificados que tienen relación con la salinidad del suelo en el estrato 0-60 cm, en el periodo enero-noviembre de 2013.

La variación de las superficies afectadas por sales en el estrato superficial durante 2012 y 2013 tiene una tendencia diferente, acorde con las condiciones de humedad en el suelo y del clima, como ya se señaló en el párrafo anterior. La superficie promedio ensaltrada durante el periodo marzo-agosto de cada año, resulta mayor en 2012, con 5656 ha, contra 5088 ha en 2013. En 2013 el valor más alto de afectación se observó en mayo, con 6726 ha mientras que en 2012 en agosto, con 6736 ha. La tendencia de las afectaciones fue creciente a partir de mayo, abarcando el verano cuando no hubo riegos y hubo valores de temperatura más elevados; mientras que en 2012 a partir de mayo la tendencia fue inversa, por cuanto las superficies afectadas se redujeron (ilustración 54).

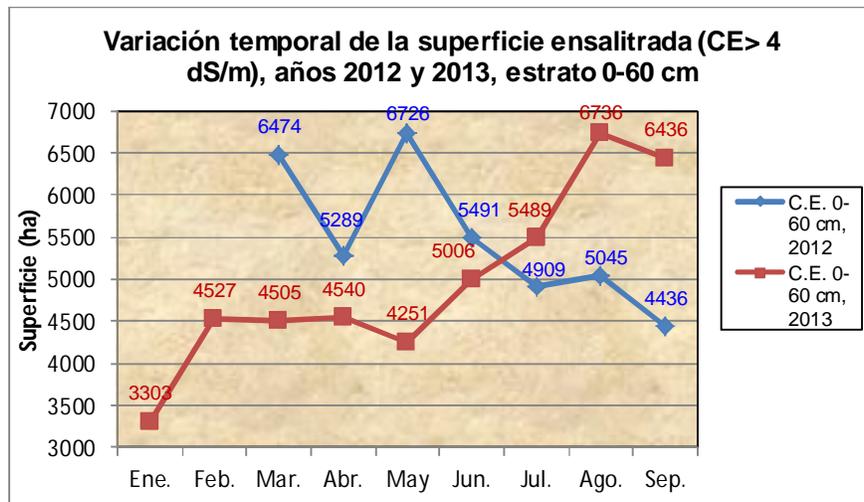


Ilustración 54. Variación de la superficie afectada por salinidad en el estrato 0-60 cm durante 2012 y 2013.

En el estrato 0-150 cm de profundidad los contenidos de sales estimados con el sensor a lo largo de ocho meses tuvieron un comportamiento distinto al del estrato superficial, básicamente influenciados por la proximidad de los niveles freáticos (ilustración 55).

En promedio los valores de salinidad del estrato subsuperficial resultaron mayores que en el estrato superficial. Este estrato es más sensible a la aplicación de volúmenes de agua mediante el riego de los cultivos mismo que aporta agua al manto freático, y a la aportación de humedad al manto freático que hacen las lluvias. Los valores más altos de salinidad se observaron en los periodos marzo-abril y julio-agosto. En marzo-abril los mantos freáticos están elevados y la temperatura ambiental no está en su nivel más alto, por lo que los problemas de salinidad se deben principalmente a las aportaciones de agua de riego por percolación; sin embargo, en el periodo julio-septiembre cuando la temperatura ambiental está más alta y que coincide con la época de lluvias, los niveles de salinidad tienden a aumentar.

Por lo tanto se observa un efecto del clima en el contenido de sales tanto en el estrato superficial como en el estrato 0-150 cm de profundidad; por cuanto el aumento de la temperatura, de la precipitación pluvial y de la evapotranspiración, tienen un efecto en el ensalitramiento de los suelos.

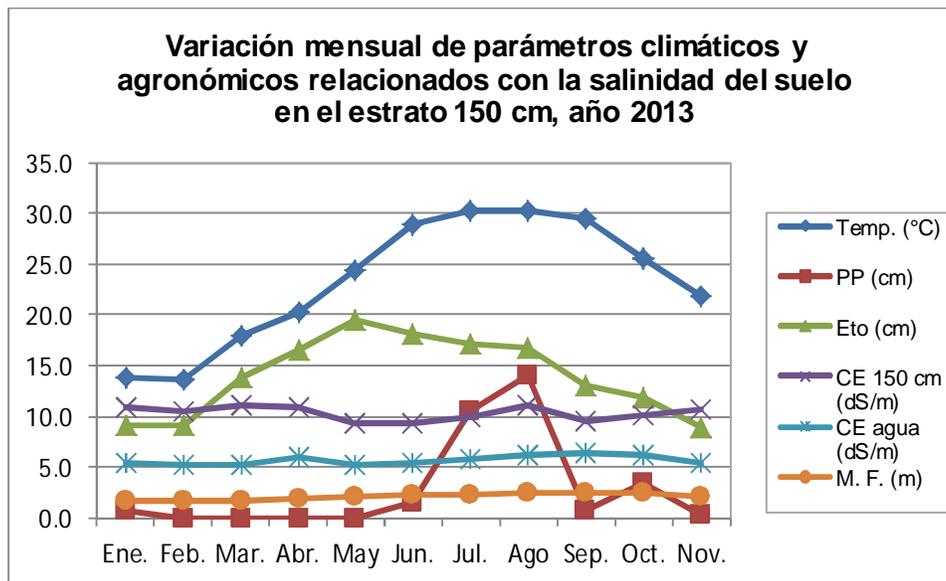


Ilustración 55. Variación temporal de los parámetros identificados que tienen relación con la salinidad del suelo en el estrato 0-150 cm, en el periodo enero-noviembre de 2013.

En el estrato subsuperficial las afectaciones por salinidad durante 2013 se estimaron mayores que en 2012. En el periodo marzo-agosto de ambos años el promedio de superficie afectada en 2013 fue de 7372 ha y en 2012 de 7060 ha. En 2012 se observó un descenso en los valores a partir de marzo, debido a que en este mes prácticamente terminaron los riegos por falta de agua en la presa; posteriormente hubo una recuperación de las afectaciones a partir de julio, coincidiendo con las lluvias y con altas temperaturas (ilustración 56). En 2013 en la época de riegos se alcanzó un pico en marzo, y a partir de allí un descenso hasta mayo; posteriormente inició una tendencia

al aumento y en agosto alcanzó su valor más alto. Las curvas tienen una tendencia semejante, pero los mayores volúmenes de agua de riego aplicados en 2013 que permitieron que la temporada de riegos concluyera en abril de este año, además de que la temperatura en el periodo marzo-agosto 2013, comparada con el mismo periodo de 2012 resultó mayor, de 25.3°C contra 24.9 °C, respectivamente. Asimismo, las lluvias de 2013 para el periodo junio-agosto también resultaron mayores que en 2012. Todos estos elementos influyeron para que los valores de salinidad en 2013 se observaran más altos que en 2012.

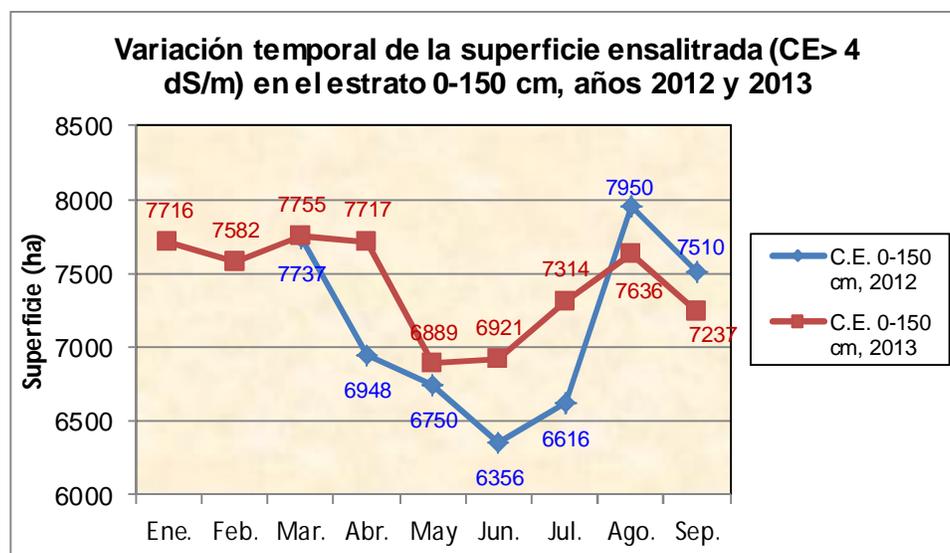


Ilustración 56. Variación de la superficie afectada por salinidad en el estrato 0-150 cm durante 2012 y 2013.

Al analizar conjuntamente mediante regresiones lineales múltiples las variables salinidad como dependiente y como independientes la temperatura, profundidad al nivel freático, evapotranspiración, precipitación pluvial y salinidad del agua freática, en diferentes periodos de tiempo se generaron modelos que mostraron una alta correlación entre estas variables (cuadro 1).

Estos modelos pueden ser útiles para estimar la salinidad según las condiciones climatológicas y agronómicas que existan. Se analizaron valores puntuales de salinidad del suelo y del agua freática, y de niveles freáticos; asimismo, se analizaron las superficies generadas mediante el SIG con base en los valores puntuales. En el caso de la salinidad del suelo, valores superiores a 4 dS/m; en cuanto a niveles freáticos, valores inferiores a 1.5 metros.

En los modelos del cuadro 1 destacan algunos cuya correlación es de 1.0 lo cual indica la estrecha relación entre la salinidad del suelo y las variables multiseñaladas. Por lo tanto y considerando el periodo de tiempo estudiado se puede concluir que el incremento de la salinidad del suelo está relacionado con el incremento de la temperatura ambiental; con la presencia de lluvias que aportan agua a los mantos freáticos superficiales y que también aportan agua de riego mediante los escurrimientos que capta la presa Adolfo Ruiz Cortines y ello define los ciclos de cultivo, patrón de cultivos y superficie de riego; con el manejo del agua de riego que aporta agua

por percolación a los estratos subsuperficiales; con la salinidad del agua freática y con la evapotranspiración; ocurridas todas estas variables a lo largo del año.

El cambio climático muy probablemente acarreará incrementos en la salinidad del suelo del Módulo de Riego No. 5.

Cuadro 1. Modelos estadísticos que relacionan la salinidad del suelo con la temperatura (T), profundidad de niveles freáticos (M.F.), precipitación pluvial (PP), evapotranspiración (ET_o), salinidad del agua freática (CE_{af}) y salinidad del agua de riego (CE_{ar})

Estrato de suelo (cm)	Periodo de medición	Salinidad estimada en:	Modelo estadístico
0-60	Enero-junio 2013	Superficie (ha)	CE= -6105.4685 + 735.4424*T + 0.0862*MF - 79.2743*Eto -177.5634*PP + 1.2818*CEaf; r= 1; r ² = 1
0-150	Enero-junio 2013	Superficie (ha)	CE= 3124.2826 + 25.4210*T + 0.2026*MF- 4.4362*Eto +24.7227*PP + 0.6090*CEaf; r= 1; r ² = 1
0-60	Diciembre 2012-agosto 2013	Sitios de monitorización	CE= 2.4702 + 0.4034*T - 2.9258*MF - 0.0297*Eto + 0.0206*PP + 0.0010*CEaf; r= 0.99 , r ² = 0.99
0-150	Diciembre-agosto 2013	Sitios de monitorización	CE= 2.0379 + 0.5458*T - 4.0406*MF- 0.0425*Eto + 0.0068*PP + 0.0013*CEaf; r= 0.99 , r ² = 0.99
0-60	Enero-abril 2013	Sitios de monitorización	CE= -37.8318 + 0.0678*ET _o + 0.0088*CEaf - 0.0126*CEar; r= 1; r ² = 1
0-150	Enero-abril 2013	Sitios de monitorización	CE= 30.2107 - 0.0208*ET _o - 0.0040*CEaf + 0.0052*CEar; r= 1; r ² = 1
0-60	Junio-noviembre 2013	Sitios de monitorización	CE= -19.6816 + 0.6497*T + 48.8396*MF - 0.1502*ET _o + 0.0054*PP - 0.0134*CEaf; r= 1; r ² = 1
0-150	Junio-noviembre 2013	Sitios de monitorización	CE= 6.0488 - 0.0557*T + 11.9927*MF - 0.0904*ET _o - 0.0112*PP - 0.0009*CEaf; r= 1; r ² = 1
0-60	Junio-septiembre 2013	Superficie (ha)	CE= 10616.3352 + 3.8247*MF + 17.9788*PP - 1.3707*CEaf; r= 1; r ² = 1
0-150	Junio-septiembre 2013	Superficie (ha)	CE= 10782.3560 - 0.8130*MF + 2.8304*PP - 0.6366*CEaf; r= 1; r ² = 1

CONCLUSIONES

- ❖ Se identificaron los parámetros que influyen en el ensalitramiento del suelo, como son: temperatura ambiente, manto freático superficial, evapotranspiración, salinidad del agua de riego, precipitación pluvial y salinidad del agua freática.
- ❖ En dos años de observaciones mensuales de los parámetros señalados, se encontró que en el Módulo de Riego 05 la superficie afectada por sales ocupa el 94% de su superficie.
- ❖ Las mayores superficies afectadas por sales se observaron en los meses de marzo-abril coincidentes con la época de riegos en invierno, y cuando se presentan las superficies mayores con niveles freáticos superficiales. Asimismo, las afectaciones también se manifestaron en el periodo de julio-agosto, cuando las temperaturas a lo largo del año son más altas. y en ausencia de cultivos.
- ❖ En 2013 en el módulo de riego se cuantificaron mayores afectaciones por sales que en 2012, en lo cual influyeron las mayores precipitaciones pluviales observadas en 2013, mayores volúmenes de agua de riego, y una más alta superficie de riego que en 2012.
- ❖ Al analizar conjuntamente mediante regresiones lineales múltiples las variables salinidad como dependiente y como independientes variables climáticas y agronómicas, se generaron modelos de regresión lineal múltiple que mostraron una alta correlación. Estos modelos pueden ser útiles para estimar la salinidad según las condiciones climatológicas y agronómicas que existan.
- ❖ La salinidad del suelo impactó negativamente en la producción de cosechas. El rendimiento de trigo disminuyó 0.314 ton/ha por cada dS/m de aumento en la salinidad del suelo, y el rendimiento en cártamo se redujo 0.136 ton/ha por cada dS/m de incremento en la salinidad del suelo.
- ❖ Si las predicciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático se cumplen, el aumento en la temperatura y la disminución de la precipitación pluvial incrementarán la salinidad de los suelos y ello se reflejará en reducciones en los volúmenes de cosechas en el Módulo de Riego No. 5 y en el Distrito de Riego 038.

RECOMENDACIONES

- ❖ Continuar con las investigaciones que se realizaron en el presente proyecto.
- ❖ Implementar proyectos para recuperar suelos ensalitrados, incluyendo drenaje parcelario horizontal y bombeo mediante energías alternativas como la eólica y solar.
- ❖ Investigar sobre drenaje vertical mediante bombeo de agua con energías alternativas, para recuperar suelos ensalitrados.
- ❖ Investigar sobre la aplicación del biodrenaje para recuperar suelos ensalitrados.
- ❖ Incrementar las eficiencias de operación en el módulo de riego para el ahorro de agua, y así reducir las aportaciones de sobrerriegos al manto freático superficial. De este modo se reducirían los problemas de salinidad.
- ❖ Llevar a cabo investigaciones sobre la adaptación de cultivos a suelos ensalitrados.

BIBLIOGRAFÍA

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 (CNA). 1997. Drenaje y salinidad en zonas áridas y semiáridas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Cuernavaca, Morelos.

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.

Fernández, G. R. 1990. Algunas experiencias y proposiciones sobre recuperación de suelos con problemas de sales en México. Terra. Vol. 8, núm.2, pp. 226-240.

Hanson, B. R and S. R. Grattan. 1990. Field sampling of soil, water, and plants. pp 186-200. In: Kenneth K. Tanji (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management. American Society of Civil Engineers, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. New York, NY, USA.

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.

McNeill, J. D. (1980). Electrical conductivity of soils and rocks. Technical Note TN-5. Geonics Limited, Mississauga, Ontario, Canada.

Nikolskii, G. Iourii; O. Palacios Vélez; O. Bakhlaeva E. y A. Llerena V. (2011). El cambio climático, drenaje y salinidad. Memorias del XVI Congreso Nacional de Irrigación, Culiacán, Sinaloa, México, 6-9 de septiembre de 2011.

Pulido, M. L., C. L. Wiegand, J. González Meraz, B. D. Robles Rubio, O. X. Cisneros Estrada y O. Lemus Ramírez. (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, Vol. XVIII, núm. 2, pp 83-97.

Pulido, M. L., J. González Meraz y M. Villarreal 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.

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.

Rhoades, J.D. (1992). Recent Advances in the Methodology for Measuring and Mapping Soil Salinity U.S. Salinity Laboratory. In: *International Symposium on Strategies for Utilizing Salt Affected Lands*. Bangkok, Thailand, Feb. 17-25, 1992.

Rhoades, J. D., F. Chanduvi, and S. Lesch. 1999. Soil salinity assessment. Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *Irrigation and Drainage Paper 57*. FAO. Rome, Italy.

Richards, L. A. (1974). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*, México, Limusa.

Van Der Lelij, A. (1983). Use of an Electromagnetic Induction Instrument (type EM38) for Mapping Soil Salinity. Water Resources Commission. Murrumbidgee Division. Australia.