

COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE

SUBCOORDINACIÓN DE CONTAMINACIÓN Y DRENAJE AGRÍCOLA

INFORME FINAL DEL PROYECTO RD-1402.1

DRENAJE PARCELARIO Y SISTEMAS DE BOMBEO CON ENERGÍA ALTERNATIVA PARA MITIGAR Y CONTROLAR EL ENSALITRAMIENTO EN SUELOS AGRÍCOLAS

JIUTEPEC, MORELOS DICIEMBRE DE 2014

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. Benito Coronado
Ing. en Jefe del Distrito de Riego



Drenaje parcelario y sistemas de bombeo con energía alternativa para mitigar y controlar el ensaltramiento en suelos agrícolas

SEMARNAT
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



Ing. Rosa Imelda Luque Rodríguez
Jefe de Operación

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

Ing. Héctor Enrique Escalante Esquer
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 de la S. de R. L. de I. P. y C. V. 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 de la CONAGUA por las facilidades proporcionadas para la realización del presente estudio.

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

Se agradece al propietario de la parcela piloto, Profr. Víctor Manuel Mendívil por las facilidades concedidas para llevar a cabo el presente estudio.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| OBJETIVO | 4 |
| METODOLOGÍA..... | 4 |
| 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..... | 9 |
| Monitorización de la salinidad del agua de riego..... | 11 |
| Registro de datos climáticos del área del Módulo de Riego No. 05..... | 12 |
| Instalación de parcela piloto de drenaje con energía eólica | 13 |
| Preparación del terreno y lavado de suelo para la siembra de trigo en la parcela piloto.. | 15 |
| RESULTADOS | 18 |
| Clasificación por salinidad y porcentaje de sodio intercambiable | 18 |
| Monitorización de la salinidad en los estratos superficial y subsuperficial | 20 |
| Mediciones mensuales de niveles freáticos | 26 |
| Monitorización de la salinidad del agua de los pozos de observación..... | 28 |
| Monitorización de la salinidad del agua de riego | 31 |
| Temperatura, precipitación pluvial y evapotranspiración en el área de estudio..... | 32 |
| Análisis estadístico y gráfico de parámetros climáticos y agronómicos relacionados con la salinidad del suelo | 36 |
| Variación temporal y espacial de la salinidad del suelo en la parcela piloto | 45 |
| CONCLUSIONES..... | 63 |
| RECOMENDACIONES..... | 65 |

| |
|-------------------|
| BIBLIOGRAFÍA..... |
|-------------------|

| |
|----|
| 66 |
|----|

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. Los DR son las áreas agrícolas más productivas, y la salinidad de los suelos 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 bióxido de carbono (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 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.

La conductividad eléctrica del suelo (CE, dS/m) 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 y 2013 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 ensaltramiento de los suelos (Pulido *et al.*, 2012; 2013).

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 2014.

OBJETIVO

Establecer una parcela piloto equipada con drenaje y sistemas de bombeo con energía eólica o solar. Medir y analizar las variables relacionadas con la evolución de la salinidad y los efectos del drenaje en el mejoramiento del suelo y la producción agrícola.

METODOLOGÍA

Localización del proyecto

El presente estudio se realizó durante el año 2012 en el DR 038 Río Mayo, Son. Éste se localiza entre los paralelos $26^{\circ}21'$ y $28^{\circ}31'$ N y meridianos $108^{\circ}26'$ y $110^{\circ}05'$, con una altura media de 40 msnm. El DR 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).

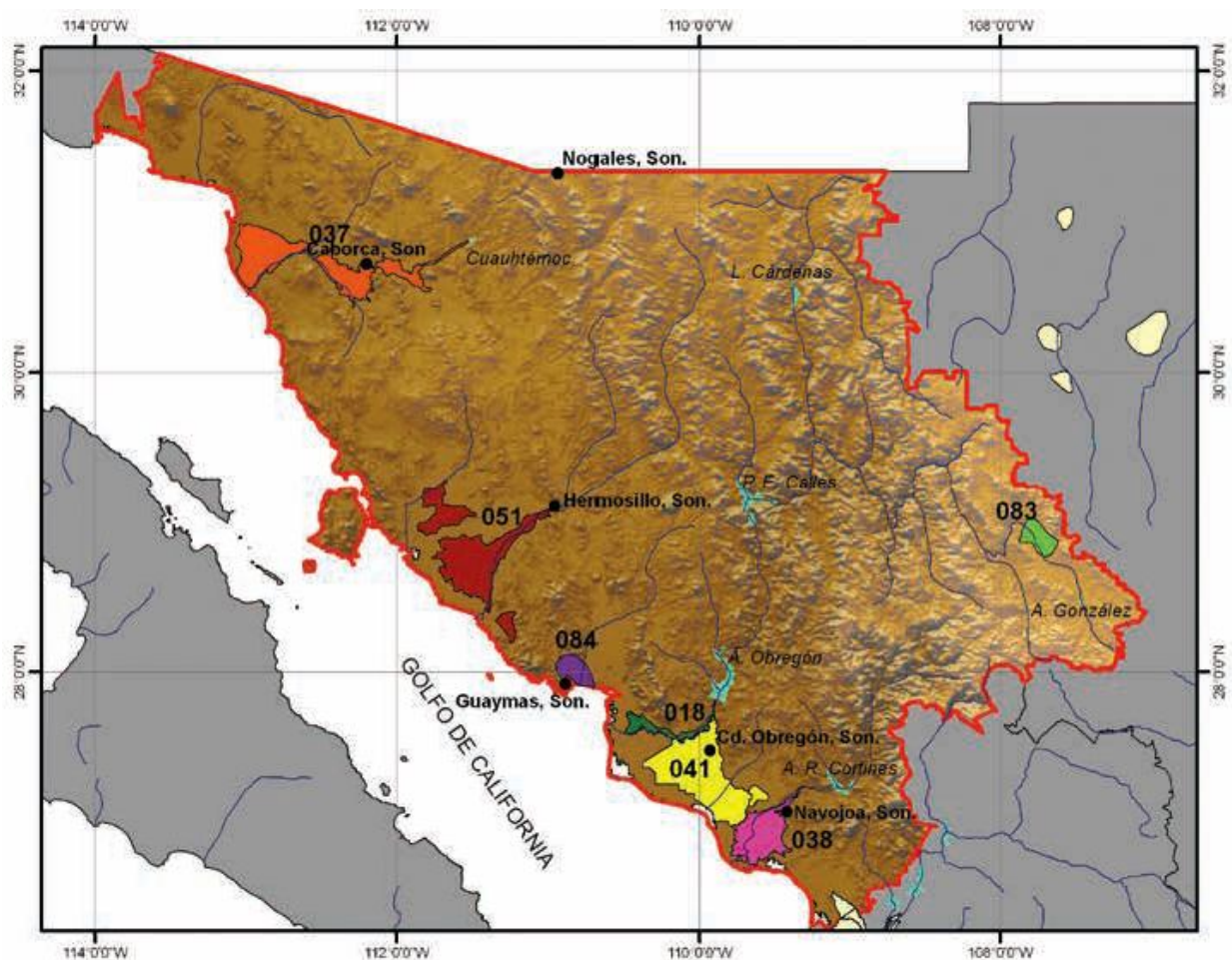


Ilustración 1. Localización del distrito de riego 038 Río Mayo, Sonora

Para cumplir con el objetivo trazado se seleccionaron los módulos de riego 05 y 06, dado que en éstos se encuentran grandes áreas afectadas por sales y por manto freático superficial; asimismo, porque sus directivos mostraron interés para la puesta en práctica del presente proyecto. En el año 1998 se instaló drenaje subsuperficial y un cárcamo de bombeo en una parcela de 4.5 ha localizada en el ejido Moroncarit, Módulo 06, propiedad del agricultor Víctor Manuel Mendivil; esta parcela se utilizó como piloto para rehabilitar suelos ensaltrados con un nivel freático superficial, a través de bombeo con energía eólica.

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 distrito, colindando con el Golfo de California; y corresponden a los módulos de riego números 1, 3, 5, 6, 7 y 8. El Módulo de Riego 05 tiene una superficie bruta de 6,139 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). El Módulo de Riego 06 se sitúa al oriente del Módulo 05, junto a éste.

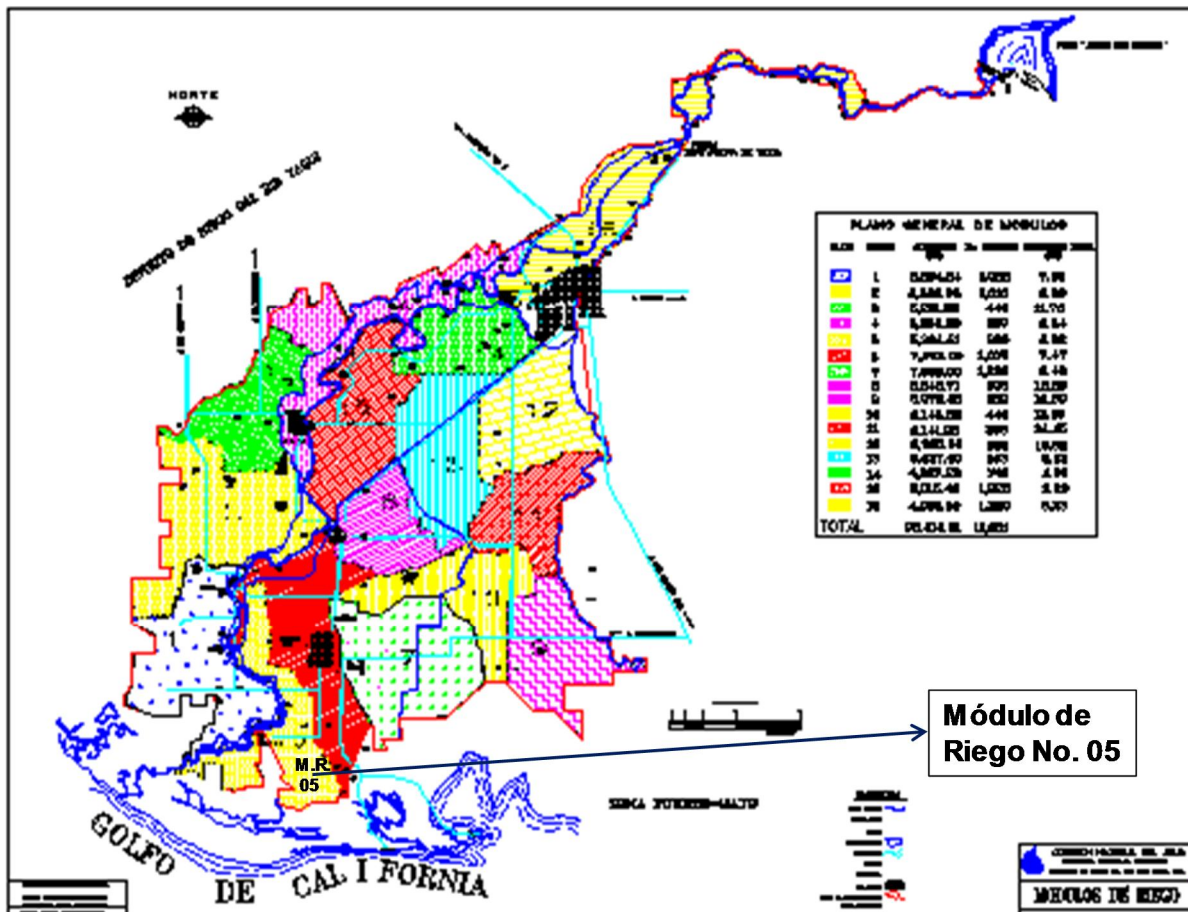


Ilustración 2. Localización de los módulos de riego 05 y 06 en el Distrito de Riego 038 Río Mayo

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 una red de 62 sitios establecida en el año 2012 en el Módulo de Riego 05y en la parcela piloto. La ubicación geográfica de los sitios de monitorización, con marcadores en amarillo, se obtuvo mediante un receptor GPS (ilustración 3); en esta red se tomaron muestras en 28 sitios. La ubicación geográfica de la parcela piloto se señala en la ilustración 4; en ésta se ubicaron 14 sitios.

Se realizó un muestreo de suelo en la época de riego durante en el ciclo de cultivo otoño-invierno, a principios de mayo (ilustración 5). Las muestras se tomaron con una barrena agrológica, con la cual se colectaron muestras a 30 y 60 cm de profundidad, haciendo un total de 84 muestras, de las cuales 58 se colectaron en el módulo 05 y 26 en la parcela piloto. Todas las muestras fueron enviadas para su análisis al laboratorio de suelos de la empresa Agroinsumos de Huatabampo, 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).

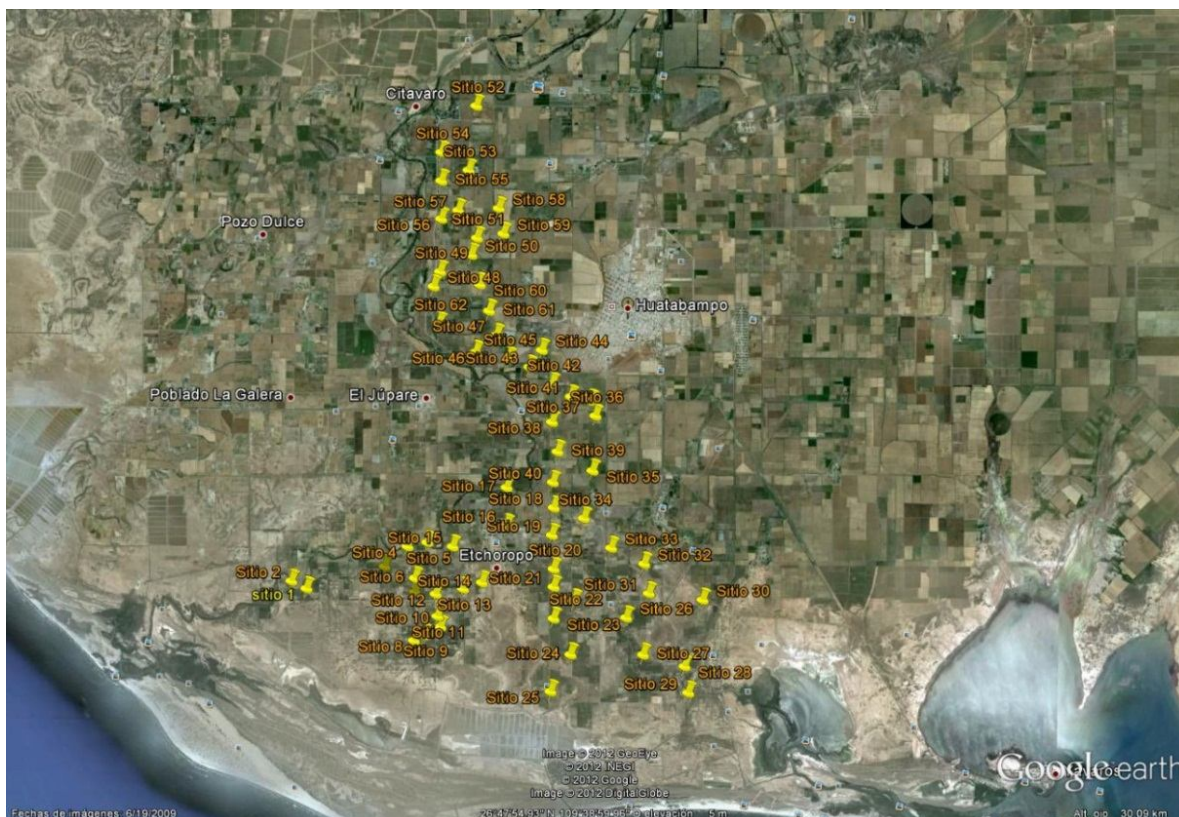


Ilustración 3. Ubicación espacial de la red de sitios de monitoreo de la salinidad del suelo

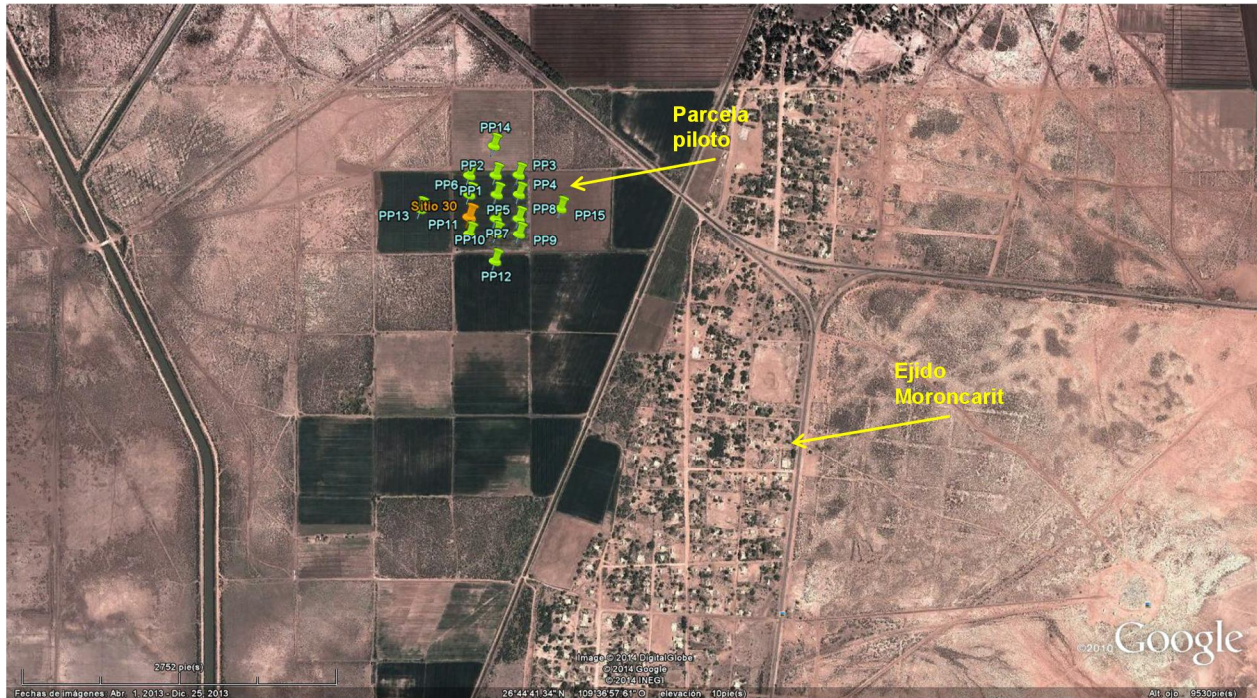


Ilustración 4. Ubicación de la parcela piloto con los sitios de muestreo



Ilustración 5. Muestreo de suelos el 01 de mayo de 2014 en la parcela piloto

En la red de 62 sitios referida, mensualmente se monitorizó 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 (ilustración 6). Se utilizó un receptor GPS para obtener las

coordenadas geográficas de cada sitio de medición, y así poder ubicarlos geográficamente en un sistema de información geográfica (SIG) que se elaboró; y de este modo se generaron mapas de grados de salinidad mensuales georeferenciados tanto del Módulo de Riego No. 05 como de la parcela piloto.



Ilustración 6. Medición de la salinidad en el estrato 0-150 cm de profundidad con el sensor en posición vertical, en marzo de 2014

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, 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 el SIG referido en el párrafo anterior.

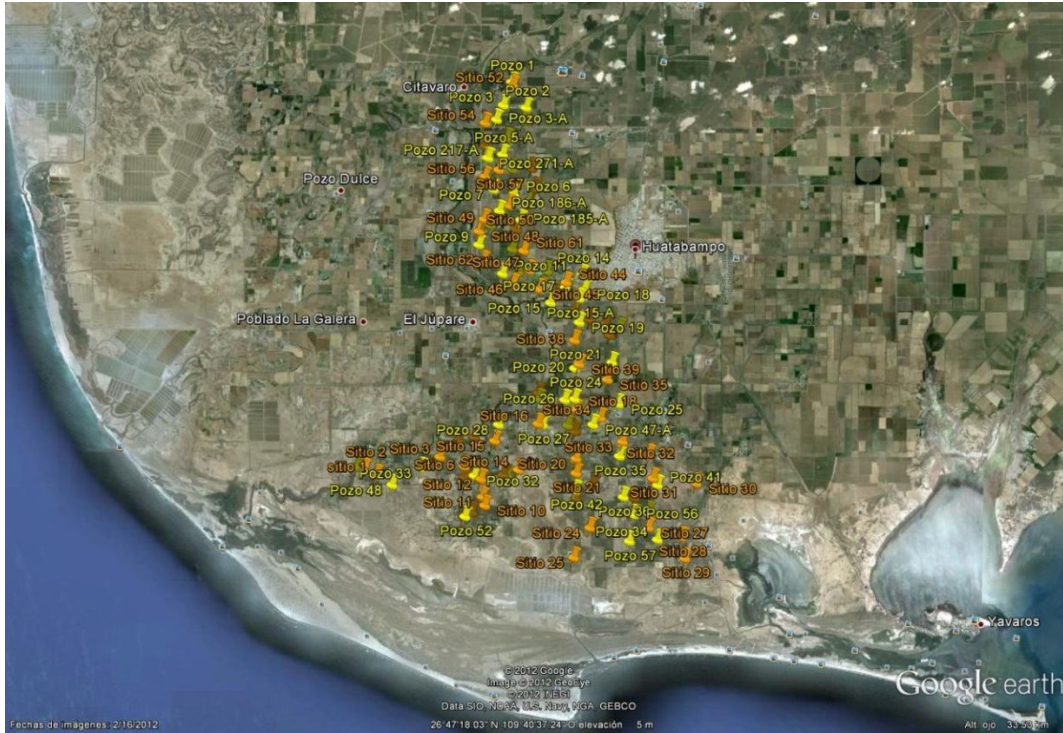


Ilustración 7. Distribución espacial de la red de pozos de observación del manto freático superficial. Los marcadores en amarillo indican la ubicación de los pozos.



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

Monitorización de la salinidad del agua de riego

Semanalmente entre diciembre de 2013 y abril de 2014, a lo largo del ciclo de cultivo otoño-invierno en el que solo se dispuso de agua de riego ya que no se realizó el ciclo de primavera-verano por falta de agua, se midió la conductividad eléctrica del agua de riego con un medidor portátil Hanna HI9811-5 previamente calibrado en el Laboratorio de Calidad del Agua del IMTA. Las mediciones se efectuaron en el puente canal de aforo del Módulo de Riego 05 que es utilizado para medir el agua que es entregada al módulo de riego, en el canal 3+300 (ilustración 10).



Ilustración 10. Muestreo de agua de riego en el canal 3+300 en el punto de control del Módulo de Riego 05

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 2014, 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 (ilustración 11).



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

Instalación de parcela piloto de drenaje con energía eólica

Se seleccionó una parcela de 4.5 ha que cuenta con un sistema de drenaje subsuperficial y de un cárcamo de bombeo, construidos por el IMTA en 1998 en el ejido Moroncarit en el Módulo de Riego 06. El drenaje se instaló en líneas de tubería corrugada de plástico con ranuras, separadas a 30, 40 y 50 m y a una profundidad de 1.5 m (IMTA, 1998). El agua drenada por el sistema de drenaje principalmente durante el ciclo de cultivo otoño-invierno, se recibe en un cárcamo construido de concreto y con dimensiones de 4x4 m de lado y 2.4 m de profundidad (ilustración 12). Sin embargo, desde su construcción el agua que drenan las líneas de tubería en el cárcamo queda estancada hasta que se evapora, ya que no existe algún mecanismo que impulse el agua hacia la red de drenaje a cielo abierto más próxima a la parcela. En las actuales condiciones la red de drenaje y el cárcamo de bombeo no son capaces de provocar el descenso del nivel freático y así propiciar la rehabilitación de los suelos con altos contenidos de sales.

Es así que se decidió utilizar la infraestructura construida en 1998, para lo cual se dotó a la parcela piloto de una línea de tubería enterrada para desaguar el cárcamo, y se instaló un molino de viento para extraer e impulsar por gravedad hacia la red de drenaje a cielo abierto el agua que es descargada en el cárcamo de bombeo. Para lograrlo se trazó la línea que debería seguir la tubería de descarga, buscando que fuera lo más corta posible y que siguiera la calle que divide a las parcelas que se encuentran entre la parcela piloto y el punto final de descarga del agua de drenaje. Se corrió una nivelación para determinar el grado de la pendiente, que resultó de 0.14% favorable para la descarga del molino de viento hacia el dren T-O. Se instaló un molino de viento para bombear el agua con el uso de la fuerza del viento; se colocó tubería de PVC RD-32.5 de 2" de diámetro y a 1.0 m de profundidad, entre el cárcamo de bombeo y el dren T-O que se encuentra a 900 m de separación del molino de viento. Para proteger del vandalismo al molino se construyó una con malla ciclónica con alambre de navajas (ilustraciones 13-16).

El molino de viento se instaló el 24 de julio. Este es un modelo de aparato del No. 12 constituido de una hélice de 18 aspas galvanizadas, una torre galvanizada de 10 m de altura, pistón y cilindro de bronce de 5", pichancha y tubería galvanizada cédula 40 de 2 ½". La capacidad de bombeo es de 4,900 l/h con vientos de 24 km/h, aproximadamente. El equipo fue adquirido directamente en la fábrica ubicada en Apodaca, N.L.

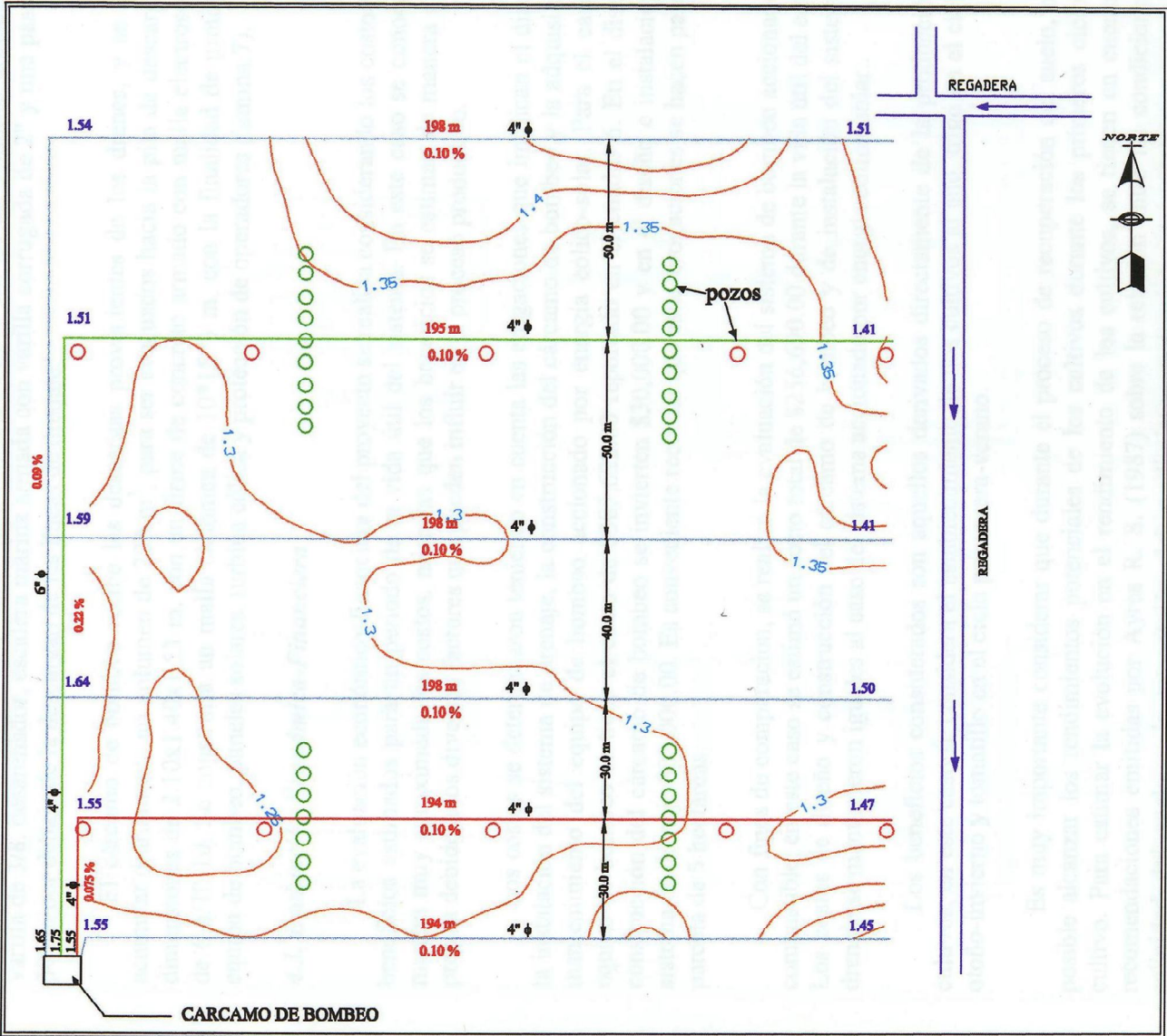


Ilustración 12. Diseño del sistema de drenaje parcelario (IMTA, 1998)



Ilustración 13. Armazón del molino de viento a un lado del cárcamo de bombeo, en julio



Ilustración 14. Colocación del molino de viento y prueba de extracción de agua, en julio



Ilustración 15. Instalación de la tubería de descarga, en octubre



Ilustración 16. Protección del molino de viento con malla ciclónica y visita de agro productores interesados en este proyecto

Preparación del terreno y lavado de suelo para la siembra de trigo en la parcela piloto

El último cultivo que se sembró en la parcela piloto en el ciclo de cultivo otoño-invierno 2013-2014 fue cártamo, el cual no rindió fruto debido a que las plantas fueron dañadas por mal manejo (ilustración 17). En julio se realizó un desbroce para limpiar el terreno y seguidamente se dio un rastreo cruzado con equipo agrícola (ilustración 18). En septiembre se hizo el surcado para sembrar posteriormente trigo, y se levantaron bordos para formar melgas. Entre el 9 y 10 de octubre se dio un riego de lavado de sales (ilustración 19). La lámina de riego aplicada fue de 21 cm. Se midió *in-situ* la concentración de sales en el agua de riego, procedente de la presa Adolfo Ruiz Cortines, y que resultó de 0.26 dS/m equivalente a 130 ppm; el pH fue de 7.4, lo que significa que no tiene ningún grado de restricción para su uso (Ayers y Westcot, 1987). El nivel freático observado en el cárcamo de bombeo antes del riego de lavado fue de 1.41 m, el cual se redujo a 0.93 m de profundidad por efecto de las descargas del sistema de drenaje en el cárcamo de bombeo (ilustración 20). La conductividad eléctrica del agua de drenaje medida *in-situ* en el cárcamo de bombeo fue > de 10,000 ppm; el pH tuvo un valor de 7.7.



Ilustración 17. Cártamo en la parcela piloto en marzo (foto izquierda) y junio (foto derecha)



Ilustración 18. Preparación del terreno en julio, para la siembra de trigo proyectada para diciembre



Ilustración 19. Lavado del suelo de la parcela piloto, el 9 y 10 de octubre



Ilustración 20. Nivel freático antes y después del riego de lavado, en octubre

RESULTADOS

Clasificación por salinidad y porcentaje de sodio intercambiable

Los resultados de laboratorio del muestreo de suelos realizado en abril para analizar la salinidad en los de los estratos 0-30 y 30-60 cm de profundidad, se insertaron en un sistema de información geográfica (SIG) mediante el cual se generaron dos mapas de clases de salinidad del suelo. El muestreo de suelos se llevó a cabo en los días en que finalizó la extracción de agua de la presa para riego y con esto concluyó el ciclo de cultivo otoño-invierno 2013-2014.

De las 6,200 ha brutas del módulo de riego, se determinó que en el estrato 0-30 cm de profundidad el área del módulo presenta suelos normales en el 56% de su superficie, suelos salinos en el 34% y suelos salino sódicos en el 10% del área (cuadro 1). Esto significa que en el 44% del área los suelos presentan problemas de salinidad y sodicidad. Comparativamente con los muestreos de 2013 y 2012, en 2014 incrementó la superficie con suelos salino-sódicos, del 6-10%; los suelos normales en 2012 ocuparon el 32%, en 2013 el 27% y en 2014 los suelos normales cubrieron el 56% del área total del módulo. Estos cambios están ligados fundamentalmente con las condiciones de volúmenes de agua de riego; en el ciclo de cultivo 2013-2014 se aplicaron mayores volúmenes de riego que en los ciclos 2011-2012 y 2012-2013, por lo que hubo mayor lavado de sales. El lavado de sales es benéfico hasta cierto punto; debe ser controlado con láminas de riego acordes con el grado de afectación por salinidad; cuando el lavado de sales solubles es excesivo, se puede transformar los suelos salinos en salino-sódicos. Las áreas afectadas con una conductividad eléctrica > 4 dS/m y > 15 PSI se encuentran desde la Cd. de Huatabampo hasta el sur, en el límite del módulo de riego.

En el estrato a 30-60 cm de profundidad se calculó que en abril de 2014 el área afectada por sales resultó del 80% del área total del módulo, tan alta como en 2013 (82%), y mayor que la estimada en 2012 (66%) (ilustración 21). En comparación con los muestreos realizados en 2013 y 2012, se determinó que las afectaciones por sales fueron más bajas en 2014 (64% del área) que en 2013 (73% del área) y más altas en 2014 que en 2012 (45% del área). En 2014 se distinguió una mayor superficie con suelos salino-sódicos (16%) que en el muestreo de 2013 (8%), y en 2014 con el 21% del área total. El porcentaje de suelos salino-sódicos fue mayor en 2014 (16%) que en 2013 (8%). En 2014 no se encontraron suelos sódicos, a diferencia del muestreo realizado en 2012 en el que se clasificó el 0.02% del área con suelos sódicos. Estos resultados se explican, entre otras posibles causas, por las aportaciones de sales del estrato superficial, debidas a los riegos que en general se dan con abundante agua; también por el efecto del incremento de la temperatura debida al calentamiento global. Cuando hay agua en abundancia, como fue el caso, los agro productores en cada riego aplican láminas de sobre riego, con lo que las sales solubles del estrato superficial son enviadas hacia estratos de suelo más profundos. Geográficamente los suelos salinos y salino-sódicos se distribuyen desde la Ciudad de Huatabampo hacia el sur del módulo de riego; cubriendo toda su parte sur (ilustración 22).

En los estratos de suelo analizados en 2014 se cuantificaron mayores afectaciones por salinidad y sodicidad en el estrato subsuperficial que en el estrato superficial; a 0-30 cm se determinó un

34% de suelos salinos contra 64% en el estrato 30-60 cm; de suelos salino-sódicos la proporción fue de 10% contra 16% en el estrato superficial y subsuperficial, respectivamente. En el estrato superficial los suelos normales ocuparon el 56% mientras que en el estrato subsuperficial representaron el 20% del área. En el estrato superficial el lavado de sales es más intenso que en estratos de suelo inferiores.

Históricamente, el Módulo de Riego No. 05 es de los más afectados por salinidad, 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 sobrierigos y de filtraciones de canales, y también se localiza en las proximidades de la costa marítima.

Cuadro 1. Clasificación por salinidad de los estratos 0-30 y 30-60 cm del análisis de suelos de abril de 2014, en el Módulo de Riego 05

| Clasificación | Porcentaje de superficie, profundidad 0-30 cm | | |
|---------------|--|---------------|---------------|
| | Marzo de 2012 | Abril de 2013 | Abril de 2014 |
| Normal | 32.21 | 26.77 | 55.77 |
| Salino | 57.45 | 67.55 | 33.89 |
| Salino sódico | 10.34 | 5.68 | 10.34 |
| Clasificación | Porcentaje de superficie, profundidad 30-60 cm | | |
| Normal | 34.37 | 18.39 | 19.71 |
| Salino | 44.70 | 73.29 | 64.36 |
| Salino sódico | 20.91 | 8.32 | 15.93 |
| Sódico | 0.02 | | |

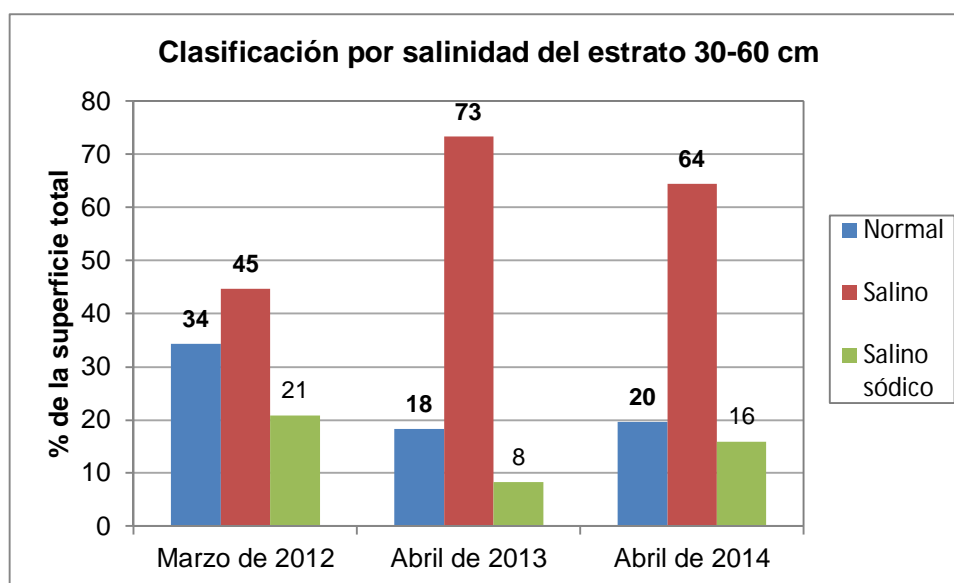


Ilustración 21. Clases de suelo por salinidad en el estrato 30-60 cm en 2012, 2013 y 2014

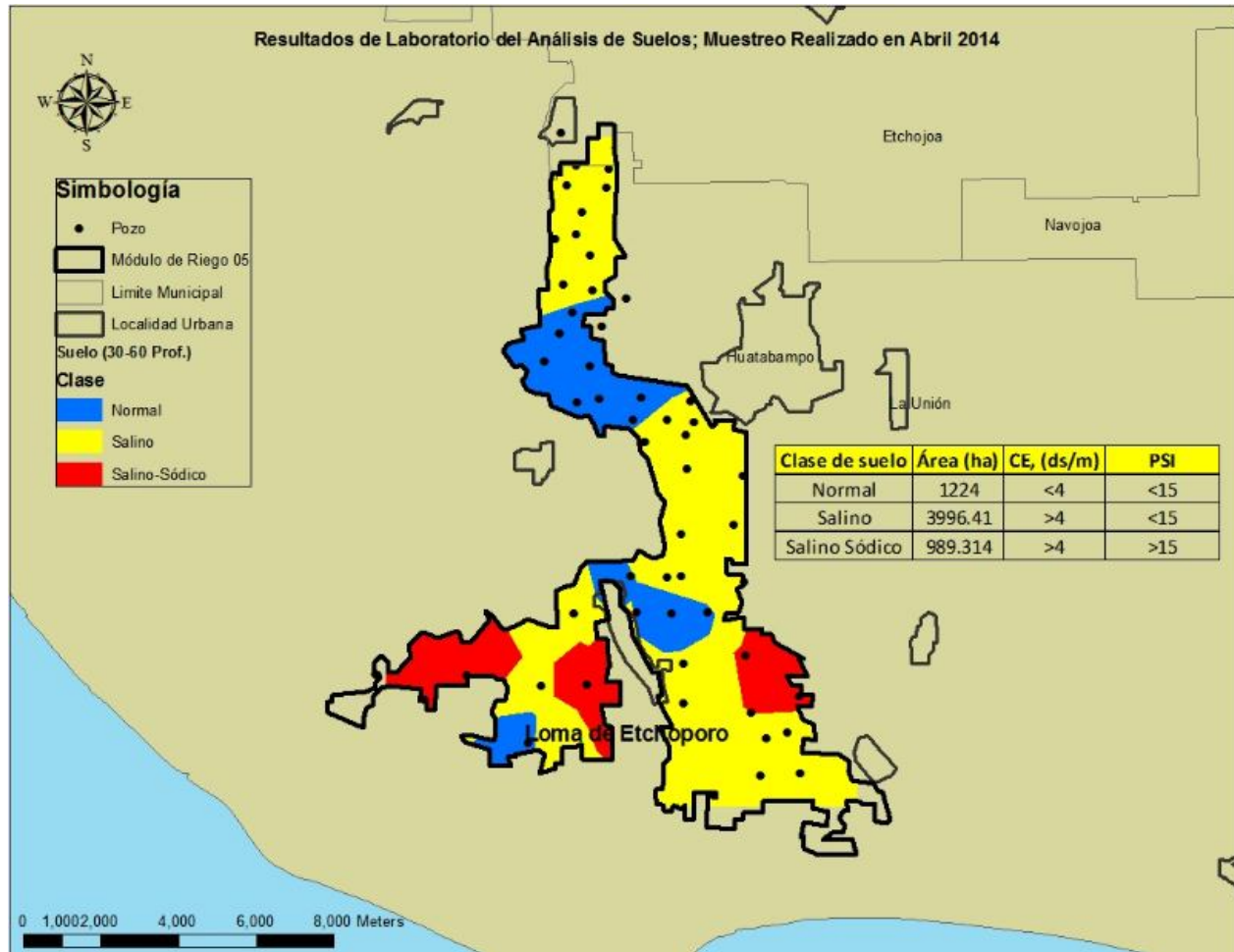


Ilustración 22. Clasificación de suelos por salinidad del estrato 30-60 cm. Muestreo realizado en abril de 2014.

Monitorización de la salinidad en los estratos superficial y subsuperficial

Con la monitorización mensual de la conductividad eléctrica en los primeros 60 cm de profundidad (estrato superficial) llevados a cabo con el sensor electromagnético EM-38, y considerando valores medios, se determinó que en la red de 62 sitios en 2014 el valor medio de CE en el estrato 0-60 cm de profundidad, en el periodo enero-octubre fue de 7.3 dS/m, más bajo que el promedio de 11.3 dS/m obtenido en 2013 (ilustración 23). En el estrato 0-150 cm la CE media mensual estimada resultó de 10.4 dS/m en 2014 contra 10.2 dS/m 2013 (ilustración 24). En el estrato a 60 cm se observaron valores más altos en 2013, mientras que en el estrato 0-150 cm los valores más altos en promedio se obtuvieron en 2014. En los dos años referidos solo se utilizó el riego para la siembra de cultivos en el ciclo de otoño-invierno.

En el estrato superficial los valores más altos se encontraron en la época de mayor temperatura, en los meses de mayo, julio y agosto; en comparación con el estrato 0-150 cm, los mayores contenidos de sales se notaron en marzo coincidiendo con los niveles freáticos más superficiales

y una menor temperatura media anual; y también en agosto, cuando las temperaturas medias anuales fueron mayores. Los niveles de salinidad en el año 2014 se obtuvieron más altos en el estrato subsuperficial que en el estrato superficial (ilustración 25); estos resultados son consistentes con los que se obtuvieron en 2012 y 2013 en el estudio que se ha venido desarrollando en el Módulo de Riego 05.

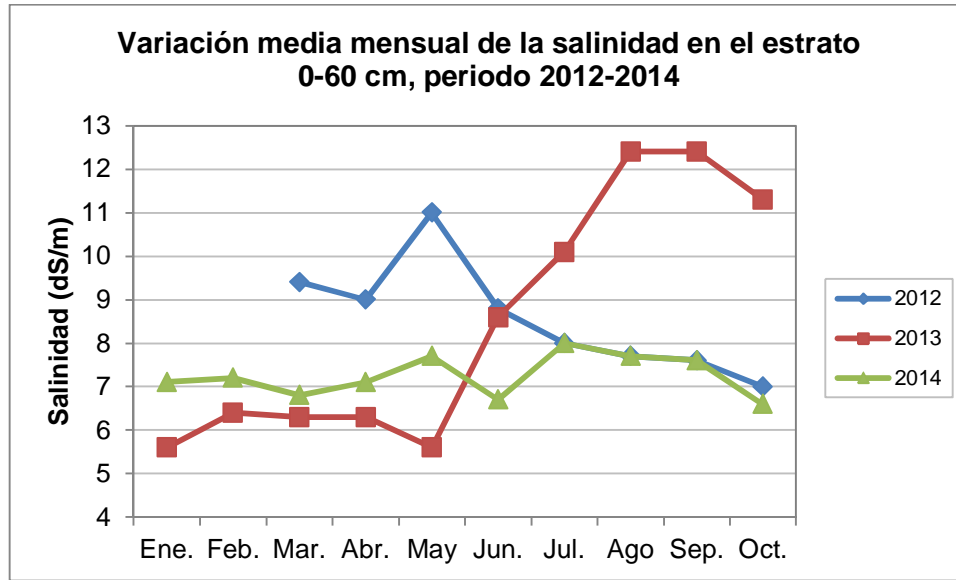


Ilustración 23. Variación de la salinidad en el estrato superficial en el periodo 2012-2014 en el Módulo de Riego 05.

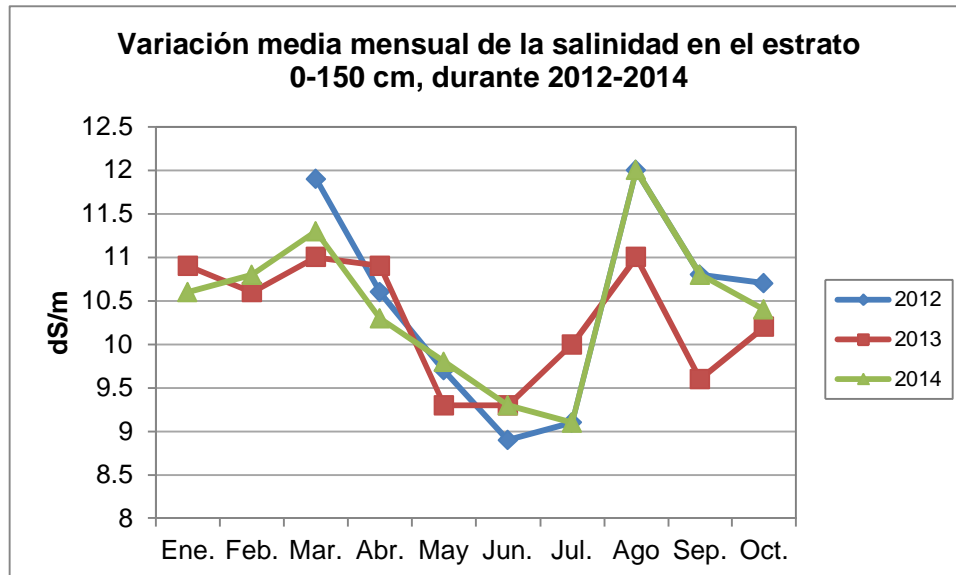


Ilustración 24. Variación de la salinidad en el estrato subsuperficial en el periodo 2012-2014 en el Módulo de Riego 05.

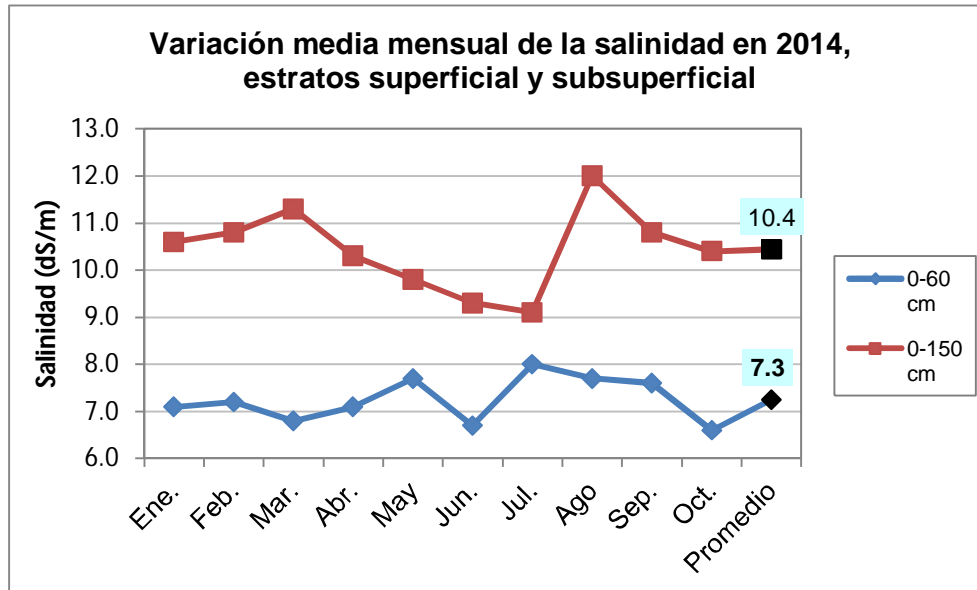


Ilustración 25. Variación de la salinidad en los estratos superficial y subsuperficial en el año 2014.

Los valores mensuales de CE que resultaron en las monitorizaciones realizadas entre enero y octubre se analizaron en un SIG para la obtención de mapas mensuales de clases de salinidad, 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 marzo se estimó una superficie afectada por sales, CE > 4 dS/m, equivalente al 47.2 % del área bruta del módulo de riego, de 6,139 ha; mientras que en mayo aumentó al 53.6 % y en agosto tuvo su valor más alto, de 3,725 ha, equivalentes al 60.7 % del área total (ilustraciones 26-28). La superficie promedio anual afectada por sales se calculó de un 51.6%. Las áreas afectadas se observaron desde la Ciudad de Huatabampo hacia el sur del módulo de riego.

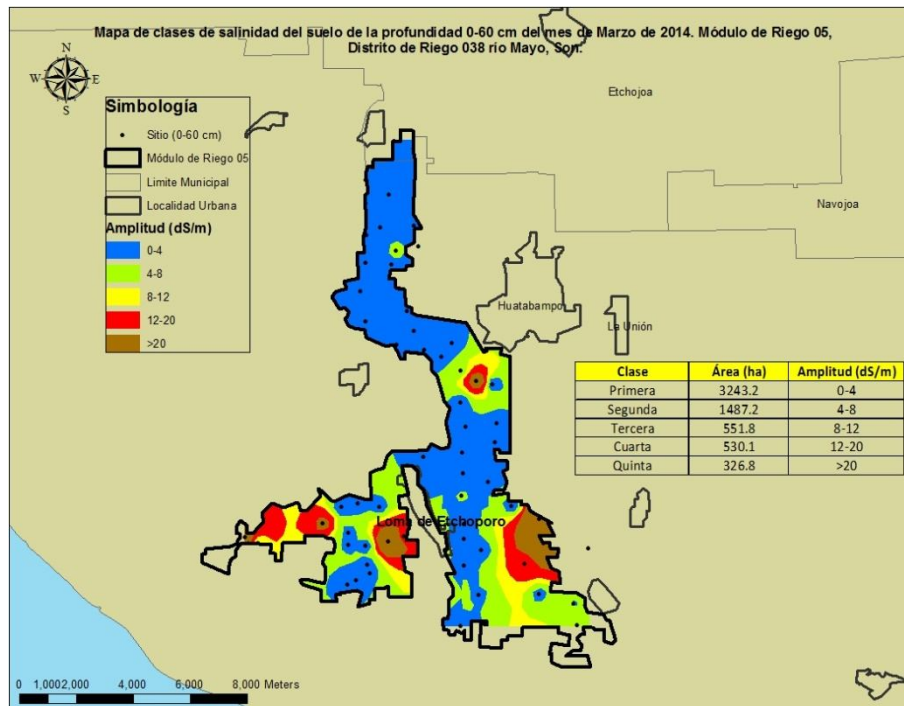


Ilustración 26. Distribución espacial de la superficie ensaltrada en el estrato 0-60 cm de profundidad en marzo de 2014, obtenida mediante el sensor electromagnético EM-38

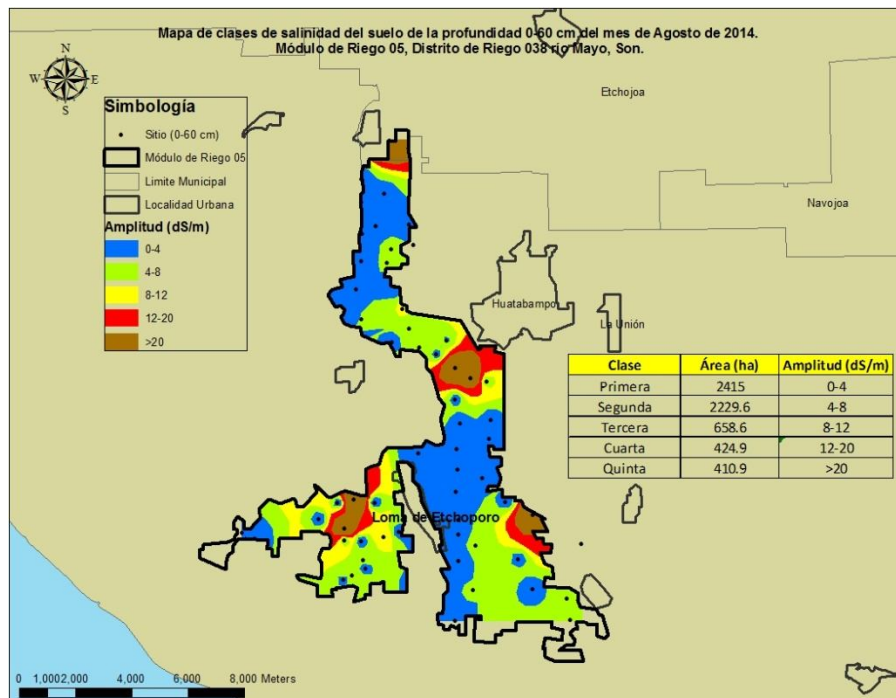


Ilustración 27. Distribución espacial de la superficie ensaltrada en el estrato 0-60 cm de profundidad en agosto de 2014, obtenida mediante el sensor electromagnético EM-38

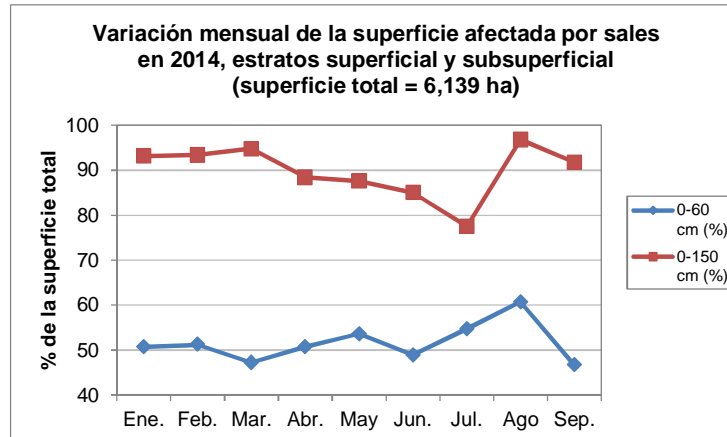


Ilustración 28. Variación media mensual de la superficie ensaltrada, en el estrato superficial y en el subsuperficial en 2014 en el Módulo de Riego 05

Las superficies estimadas que resultaron afectadas por sales en el estrato 0-150 cm fueron variables a lo largo del periodo enero-octubre de 2014; en marzo el porcentaje de superficie afectada fue del 94.8%, en julio del 77.5% y en agosto, en donde se obtuvo el porcentaje de afectación más alto, fue del 96.8% que en superficie es de 5,944 ha (ilustraciones 29 y 30). Las mayores afectaciones se obtuvieron en marzo en el periodo de riego, y en agosto, cuando se registró la temperatura media mensual más alta del año y coincidiendo con el periodo de lluvias; entre junio y octubre no hubo siembra de cultivos debido a la escasez de agua en la presa Adolfo Ruiz Cortines. Considerando el estrato de suelo 0-150 cm de profundidad, se encontró que todo el módulo de riego está afectado por sales con valores más altos que 4 dS/m.

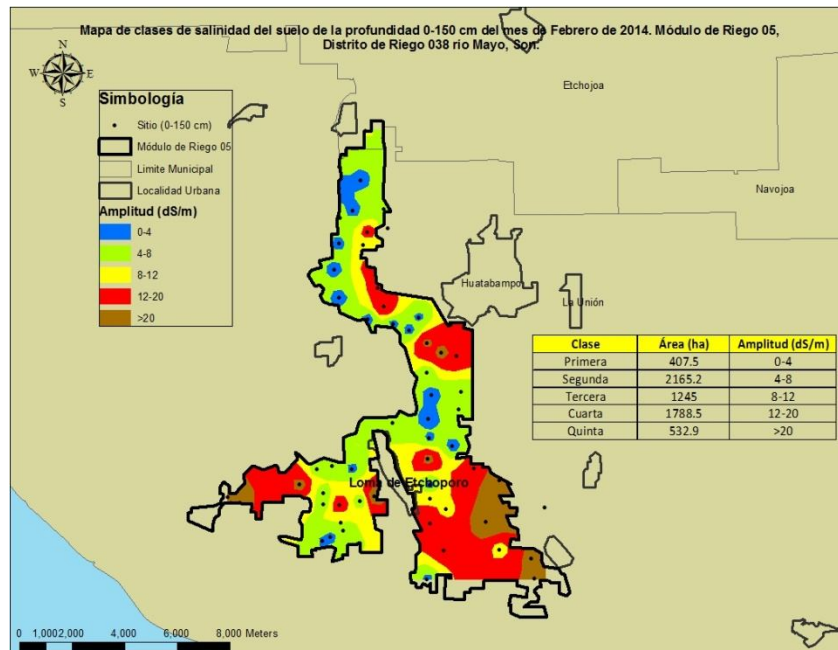


Ilustración 29. Distribución espacial de la superficie ensaltrada en el estrato 0-150 cm de profundidad en febrero de 2014, obtenida mediante el sensor electromagnético EM-38

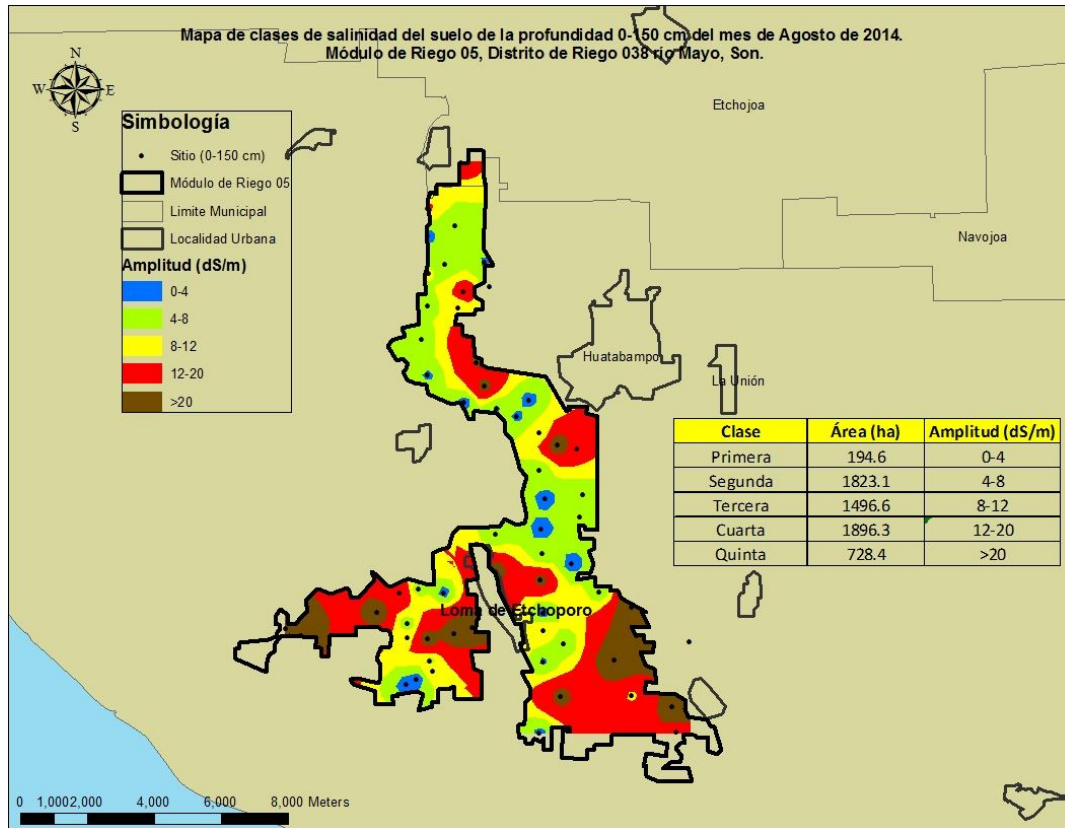


Ilustración 30. Distribución espacial de la superficie ensalitrada en el estrato 0-150 cm de profundidad en agosto de 2014, obtenida mediante el sensor electromagnético EM-38

Se observó entonces que existe una variación temporal en el contenido de sales tanto en el estrato superficial como en el subsuperficial, 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, dentro del ciclo de cultivo otoño-invierno comparada con la época de estiaje, donde no hubo ciclo de cultivos de verano.

Cuando dejó de regarse a principios de abril, en el estrato superficial las superficie ensalitrada empezó a aumentar como consecuencia del incremento de la temperatura y de la evapotranspiración que influyeron en el ascenso capilar de sales hacia la superficie del suelo; es por ello que las mayores afectaciones se alcanzaron en agosto, coincidiendo con las temperaturas más altas. En la ilustración 28 se puede ver que en junio hubo un decremento y posteriormente en julio y agosto se presentaron las mayores afectaciones en superficie. Estos resultados coinciden con los daos reportados en 2012 y 2013 (Pulido et al. 2012 y 2013).

Por su parte, en el estrato subsuperficial se tuvieron dos picos en cuando a las mayores afectaciones. El primero se observó en marzo, cuando la aplicación de agua de riego normalmente está en su apogeo, y en este caso la temperatura no influye marcadamente en el ensalitramiento, pero normalmente si influyen los niveles freáticos que históricamente se

observan más altos entre febrero y marzo de cada año. El segundo pico se logró en agosto coincidiendo con las temperaturas más altas y con la época de lluvias que aportan agua al manto freático y propician el ascenso de sales hacia la superficie del suelo por capilaridad.

Mediciones mensuales de niveles freáticos

El monitoreo de niveles freáticos se realizó desde enero hasta octubre de 2014. Los niveles medios más superficiales se observaron en febrero y marzo con 1.7 m; éstos empezaron a profundizar hasta julio, donde el nivel promedio de los 52 pozos fue de 2.6 m (ilustración 31). El incremento de profundidad de los niveles freáticos ocurrió a la par de la conclusión del ciclo de siembra otoño-invierno y del incremento de temperatura ambiente.

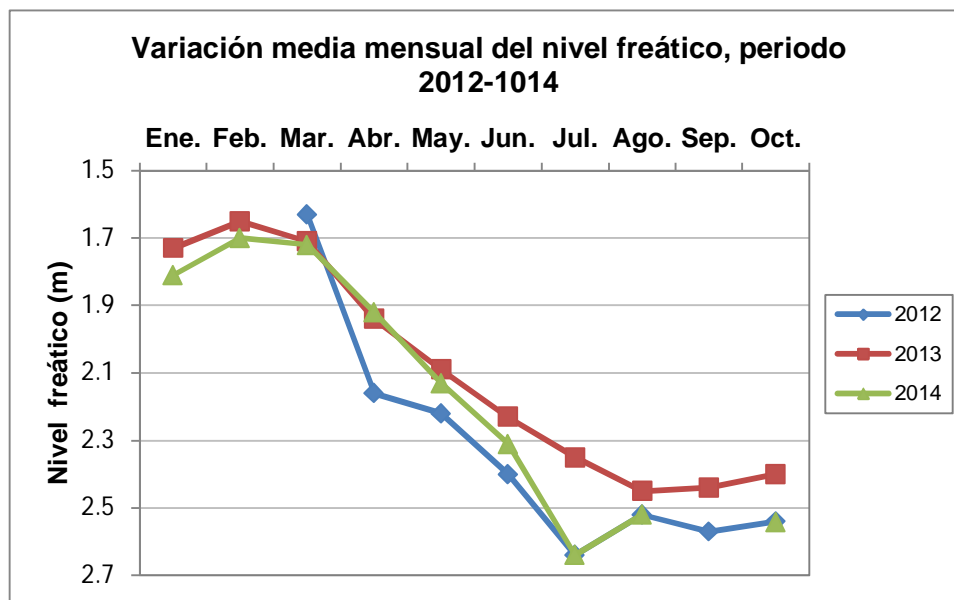


Ilustración 31. Variación mensual de la profundidad al nivel freático considerando valores medios

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, y se calcularon las superficies de cada clase 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 enero, febrero y marzo; y las menos afectadas en junio y septiembre (ilustraciones 32-33). En marzo las áreas con niveles freáticos por arriba de un metro y medio ocuparon el 63.9 % de la superficie del módulo de riego; este dato es preocupante considerando que en esta época existían cultivos en alrededor del 98 % de la superficie total; cultivos que en su mayoría estaban en la etapa fenológica de fructificación. Además, el agua freática normalmente presenta valores por arriba de 5.8 dS/m de conductividad eléctrica, que son muy dañinos para las plantas cuyas raíces están en contacto con el manto freático superficial.

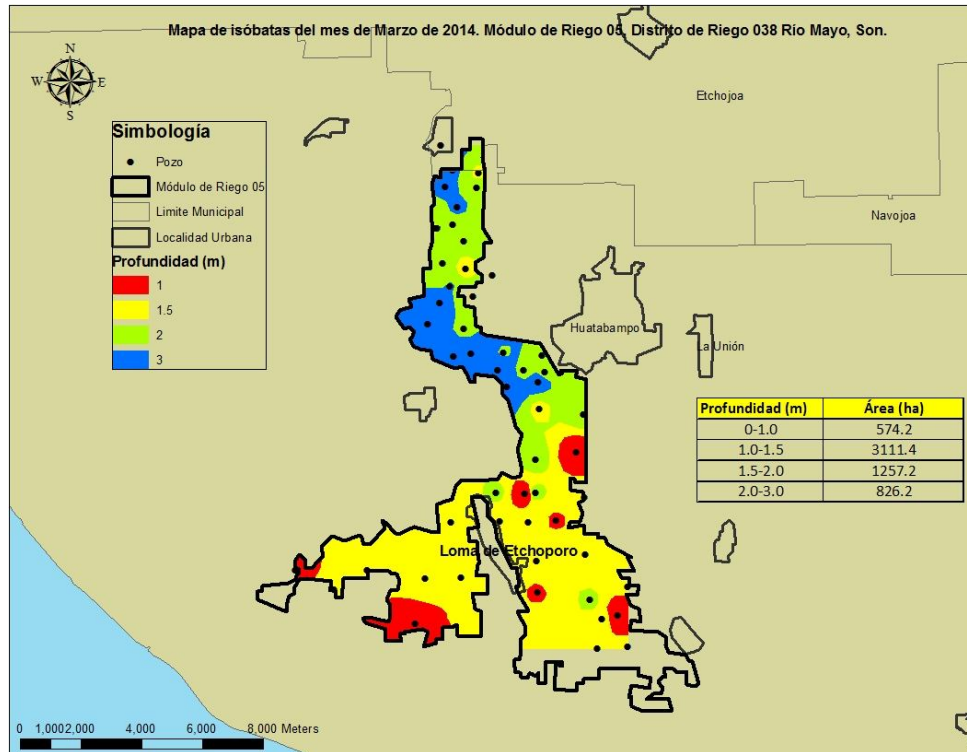


Ilustración 32. Isobatas de marzo

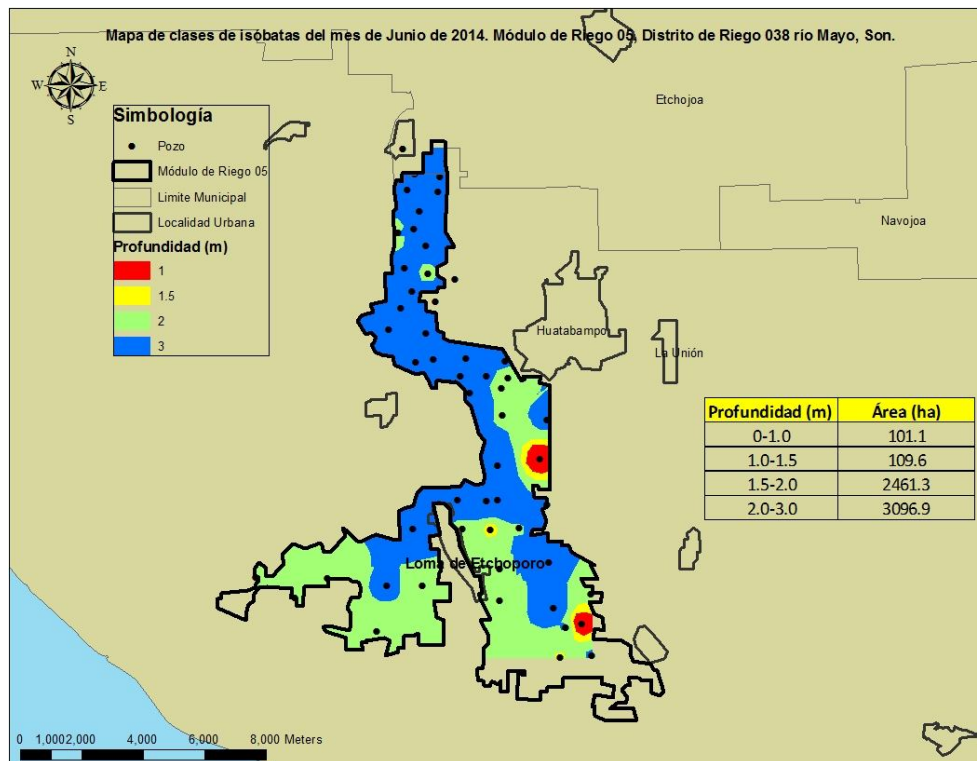


Ilustración 33. Isobatas de junio

En el módulo de riego los últimos riegos se aplicaron en abril ya que oficialmente el cierre de la presa Adolfo Ruiz Cortines fue a mediados de abril, y a partir de este mes los niveles freáticos empezaron a descender. En total se aplicaron 24.41 hm³ para el cultivo de 4,114 ha. Al concluir la aplicación de agua de riego 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 octubre las áreas con niveles freáticos por arriba de 1.5 m de profundidad cubrieron entre el 27.7-2.7% de la superficie del módulo (ilustración 34). En febrero prácticamente la totalidad del área comprendida desde la Ciudad de Huatabampo hasta el sur del módulo de riego en sus límites con el Golfo de California estuvo afectada. La reducción de afectaciones fue en paralelo con la finalización del ciclo de cultivo otoño-invierno y del incremento de temperatura. Las afectaciones calculadas en 2104 fueron equivalentes a las que se estimaron en 2013, ya que en marzo que es el mes con mayor superficie afectada, cubrieron el 64% del módulo.

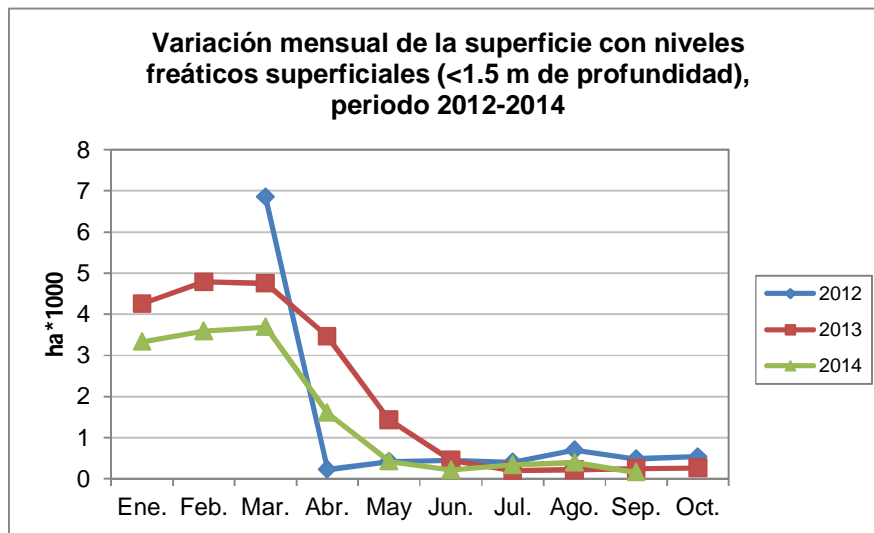


Ilustración 34. Variación temporal de la superficie afectada por manto freático superficial en el periodo 2012-2014.

Monitorización de la salinidad del agua de los pozos de observación

La salinidad del agua freática monitorizada en los pozos de observación a lo largo del periodo de estudio tuvo un valor medio de 5.8 dS/m; el valor menor se registró en junio, de 5.2 dS/m y el valor más alto en octubre, de 6.5 dS/m (ilustración 35). Comparando los valores medios anuales de salinidad del agua freática de los años 2012-2014, éstos fueron de 6.5, 5.7 y 5.8, respectivamente. Los valores más altos de salinidad del agua freática coincidieron con las lecturas de mayor profundidad de niveles freáticos.

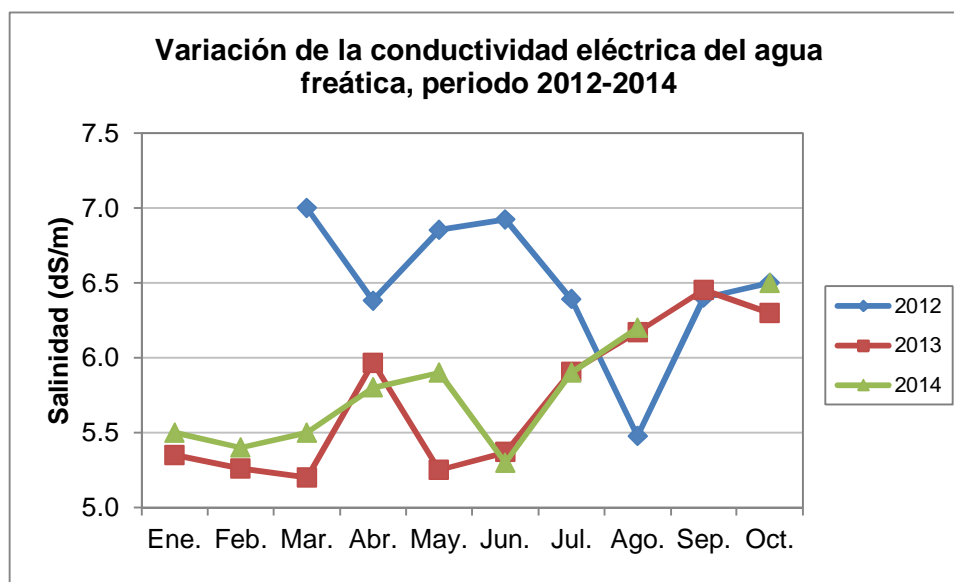


Ilustración 35. Salinidad del agua freática en el periodo 2012-2014

Los valores puntuales de salinidad del manto freático se transformaron a superficies mediante el programa Arc-Gis y se obtuvieron mapas de isoconductividad eléctrica (ilustraciones 36 y 37). Los valores de CE del agua medidos en campo se agruparon en tres categorías: $<700 \mu\text{S}/\text{cm}$, $700-3,000$ y $> 3,000 \mu\text{S}/\text{cm}$. 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. La variación espacial mensual de la salinidad del agua permite observar que la superficie más afectada se cuantificó en mayo (85% del área del módulo) coincidiendo con la finalización del periodo de riegos y con el inicio de la época de verano con temperaturas más altas; y la menor en octubre (61%) en la época de otoño, con menores temperaturas en el ambiente que las registradas en verano, con bajos niveles freáticos, y cuando ya se estaban dando los primeros riegos como parte del ciclo de cultivo otoño-invierno 2013-2014. En los años 2012 y 2013 las mayores superficies con sales en el agua freática se cuantificaron en abril 81% y 90%, respectivamente. Una comparación de la superficie con mayores afectaciones ($\text{CE} > 3 \text{ dS}/\text{m}$) en el periodo 2012-2014 evidencia que los porcentajes medios anuales más altos se estimaron en 2013, 2014 y 2012, con 76.7, 73.2 y 60.3 %, respectivamente (ilustración 38). Las superficies más afectadas con una $\text{CE} > 3,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ se delimitaron hacia el sur del módulo de riego, a partir del centro geográfico donde se localiza la Ciudad de Huatabampo; aunque también al norte de esta ciudad se identificó un área afectada de menor extensión que la delimitada en el sur del módulo.

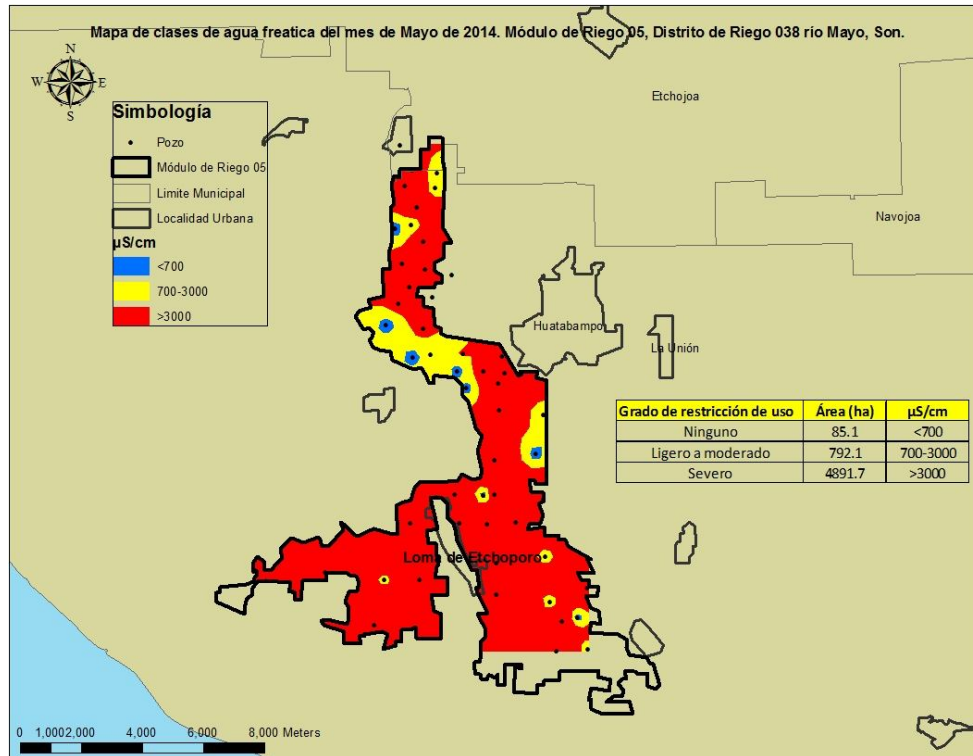


Ilustración 36. Distribución del contenido de sales en el agua freática en abril de 2014

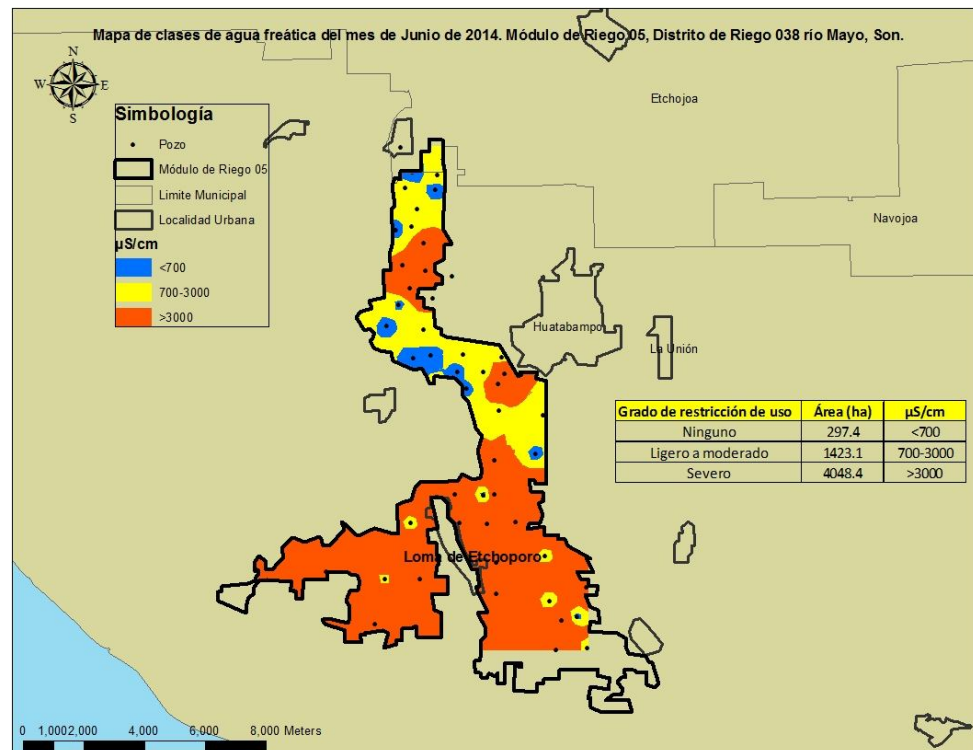


Ilustración 37. Distribución del contenido de sales en el agua freática en junio de 2014

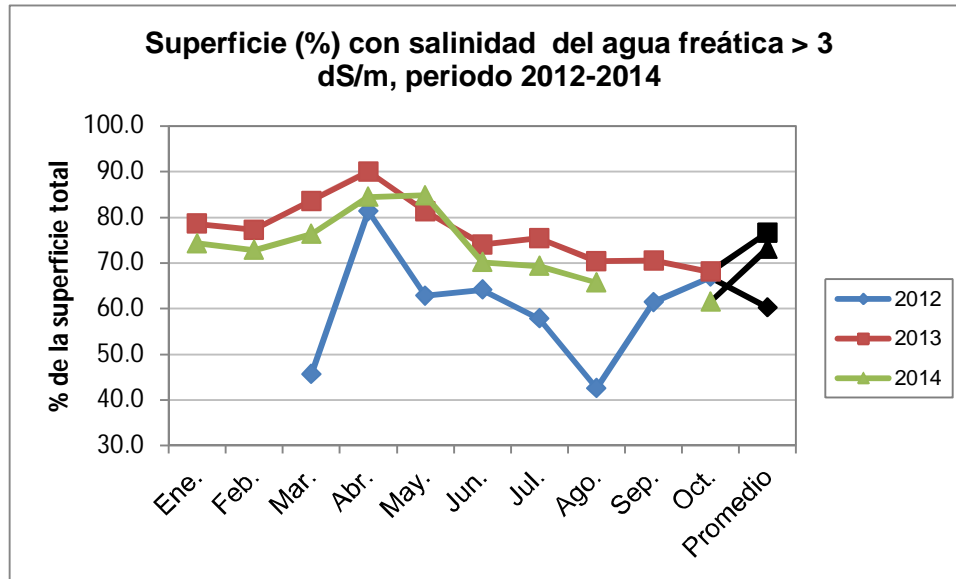


Ilustración 38. Variación mensual de la superficie con salinidad del agua freática en el periodo 2012-2014

Monitorización de la salinidad del agua de riego

La conductividad eléctrica del agua de riego media mensual más alta se encontró en diciembre y abril. En promedio en los cinco meses que duraron las monitorizaciones se calculó un promedio de 0.90 dS/m. Este nivel de sales es considerado como de ligero a moderado para riego, por sus efectos en el suelo y en la producción de cultivos sensibles a las sales, como son frijol, maíz, papa, jitomate y alfalfa, que se siembran en el módulo de riego (Ayers y Westcot, 1987). Comparativamente, los niveles de sales medidos semanalmente en los mismos meses entre 2012 y 2013, fueron en promedio de 0.97 dS/m en el periodo referido, mayores que los obtenidos en los meses de diciembre 2013-abril 2014 (ilustración 39). Debe observarse que entre los meses de enero-marzo de 2014 los contenidos medios mensuales de sales fueron iguales o inferiores a 0.7 dS/m; este nivel se clasifica según la FAO (Ayers y Westcot, 1987) como sin ninguna restricción para riego, tomando en cuenta su conductividad eléctrica.

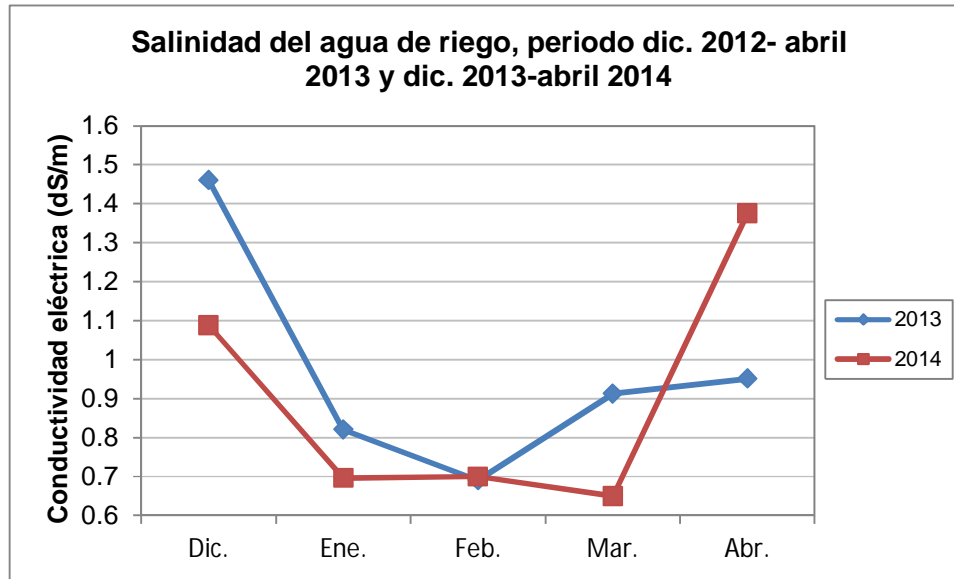


Ilustración 39. Variación media mensual de la salinidad del agua de riego en el punto de control, Canal 3+300.

Temperatura, precipitación pluvial y evapotranspiración en el área de estudio

A lo largo de casi 50 años de observaciones meteorológicas en el Valle del Río Mayo se puede establecer que las condiciones de precipitación pluvial y temperatura están cambiando, probablemente debidas al calentamiento global. En los últimos 22 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.

El clima del Valle del Río Mayo es estepario semiárido. Con datos históricos obtenidos de la estación climatológica del Campo Agrícola Experimental del CIANO del INIFAP (www.agroson.org.mx), ubicada en el municipio de Navojoa, Son., se analizó que la temperatura media anual en un periodo de 48 años es de 19.7 °C con variaciones de un mínimo de 15.5 °C en 1988 hasta un máximo de 23.7 °C en 2014. La temperatura alcanza un máximo en los meses de julio y agosto, mientras que enero, es el mes más frío. La precipitación pluvial media entre 1969 y 2014 es de 366 mm (ilustración 40). 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.

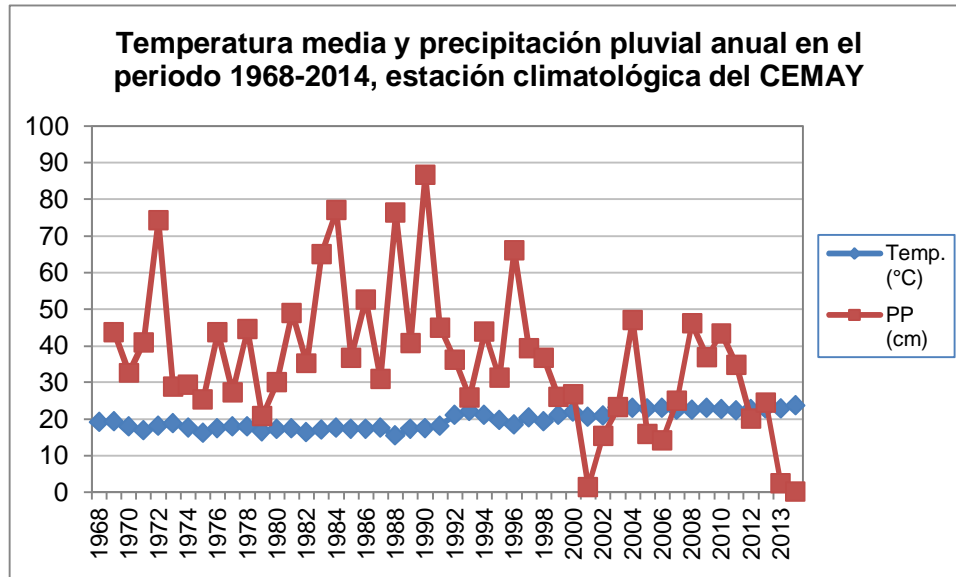


Ilustración 40. Variación de la temperatura y la precipitación en el periodo 1969-2014 en la estación meteorológica del Sitio Experimental Valle del Mayo.

Mediante el análisis de información histórica climatológica, se encontró que a partir de 1992 hay una tendencia en la temperatura a incrementarse, es así que en 2014 se registró la temperatura más alta; y en este periodo su valor medio es de 21.8 °C, que es superior al promedio histórico de 19.7 °C; mientras que en la precipitación pluvial la tendencia es hacia una disminución, con un valor medio entre 1992 y 2005, de 288 mm, que es inferior al promedio histórico, de 333 milímetros. Los valores medios anuales de temperatura en este periodo de tiempo fueron superiores a los 20 °C, lo cual coincide con los datos publicados por Martínez-Austria y Patiño-Gómez (2012). El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) establece que el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar (IPCC, 2007 citado por Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012) (ilustración 41).

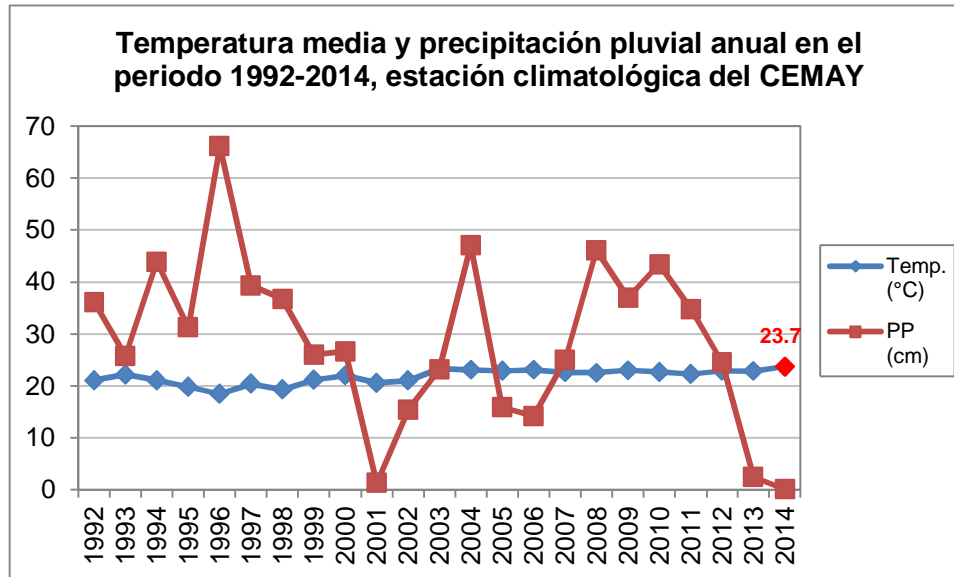


Ilustración 41. Variación de la temperatura y la precipitación en el periodo 1992-2014 en la estación meteorológica del Sitio Experimental Valle del Mayo.

Con observaciones de temperatura y precipitación pluvial mensual entre enero y diciembre de 2014, tomados de la estación meteorológica localizada en La Unión, municipio de Huatabampo, Son.; ubicada aproximadamente en el centro geográfico del módulo de riego, con coordenadas geográficas 26° 49' 30.36" de latitud norte y 109° 36' 41.76" de longitud oeste, se analizó que durante este periodo de tiempo la temperatura media mensual es de 23.6 °C y la precipitación pluvial es de 221 mm; mientras que la evapotranspiración de referencia (ET_o) es de 1,491 mm (ilustraciones 42-44). El valor medio de temperatura más alto se registró en junio; las lluvias cayeron entre julio y noviembre, y en agosto se registró la precipitación más alta durante el año. La evapotranspiración más alta se observó en junio; ésta descendió por efecto de la cosecha de cultivos y de que en verano prácticamente no hubo siembras. Los niveles más altos de temperatura, precipitación pluvial y ET_o, coinciden cuando se presenta la época de lluvias (ilustración 45). Al comparar los datos de clima del periodo 2012-2014, se puede ver que en 2014 se registró la temperatura más alta; la menor precipitación se observó en 2012 y la mayor ET_o se notó en 2012.

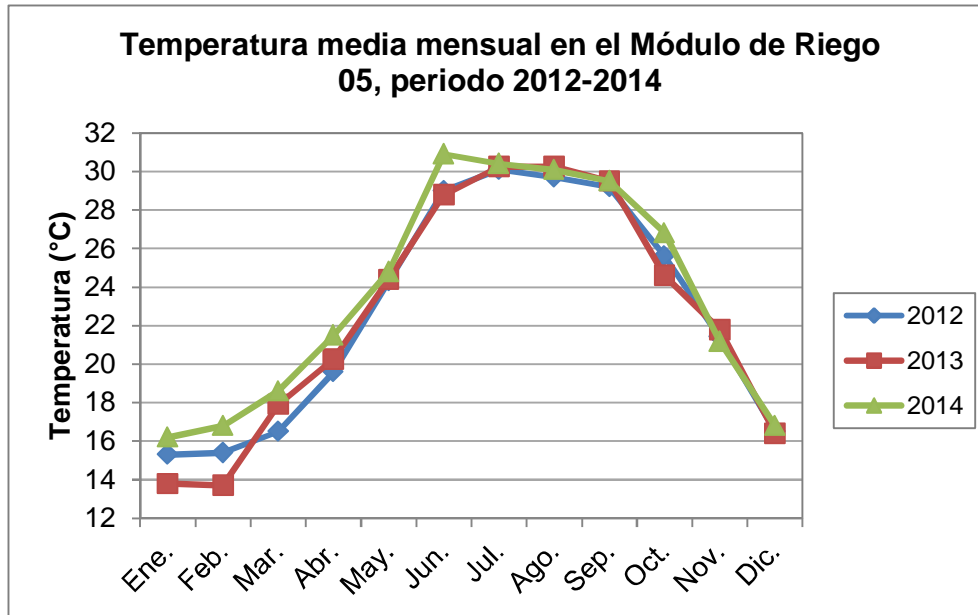


Ilustración 42. Variación de la temperatura en el periodo 2012-2014 en la estación meteorológica de Huatabampo, Sonora

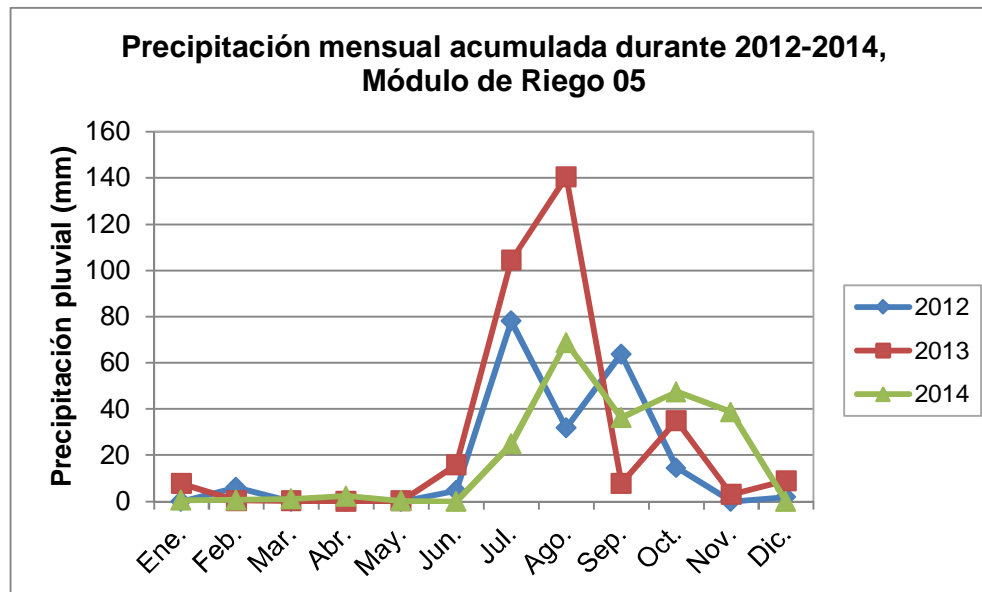


Ilustración 43. Variación de la precipitación pluvial en el periodo 2012-2014 en la estación meteorológica de Huatabampo, Sonora

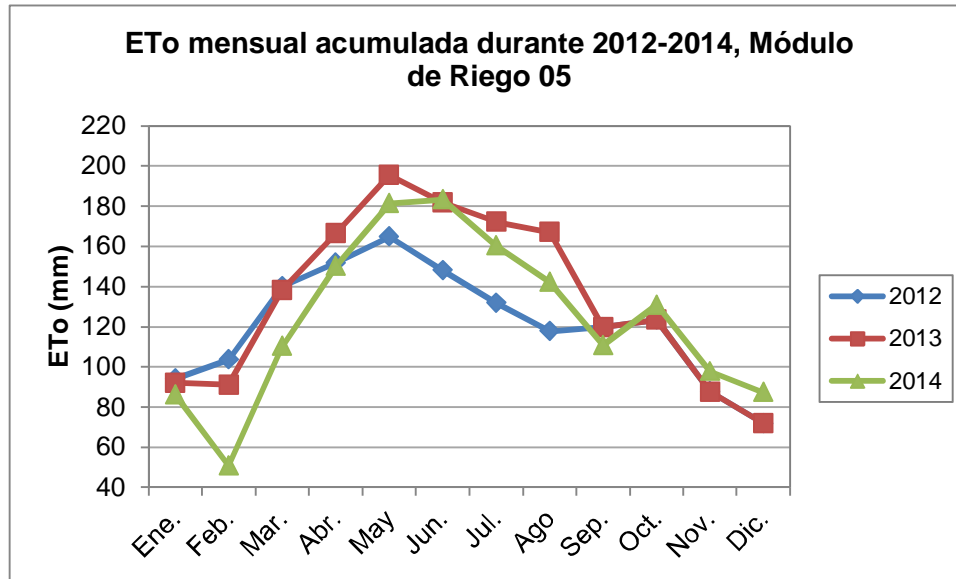


Ilustración 44. Variación de la evapotranspiración de referencia en el periodo 2012-2014 en la estación meteorológica de Huatabampo, Sonora

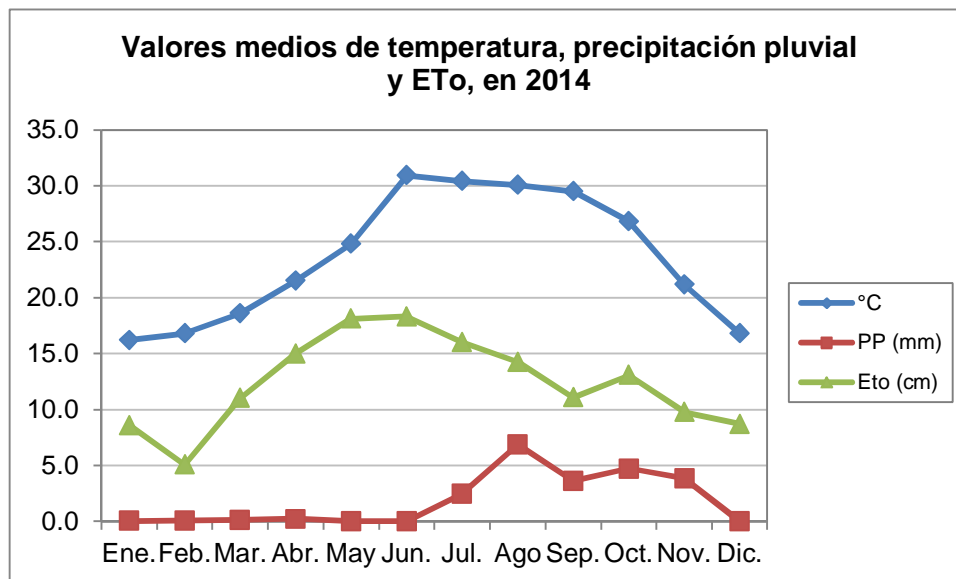


Ilustración 45. Variación de la temperatura, precipitación pluvial y evapotranspiración de referencia en 2014 en la estación meteorológica de Huatabampo, Sonora

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

Se analizaron estadísticamente a través de modelos de regresión lineal simple y múltiple los parámetros que están relacionados con la salinidad del suelo, como son la temperatura, profundidad de niveles freáticos, evapotranspiración, precipitación pluvial, salinidad del agua freática y salinidad del agua de riego; la salinidad del suelo se consideró como variable

dependiente mientras que las otras variables señaladas, como independientes (ilustración 46). Estos parámetros fueron reportados como los causantes del ensalitramiento de los suelos en el Módulo de Riego 05, en los estudios realizados en 2012 y 2013 (Pulido et al, 2012 y 2013).

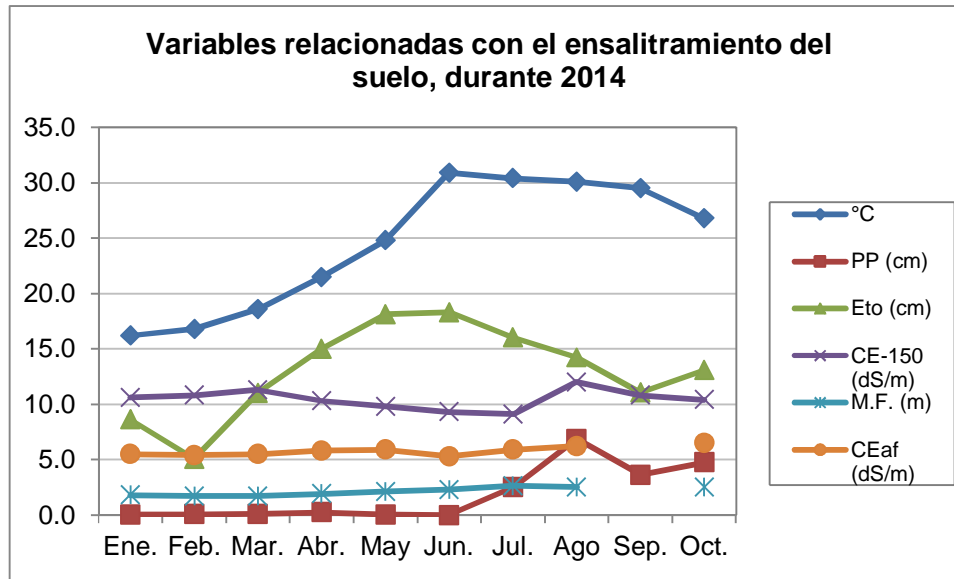


Ilustración 46. Variables que influyen en el ensalitramiento del suelo

Se descubrió que la temperatura ambiente influye en el ensalitramiento del suelo en los estratos 0-60 y 0-150 cm (ilustraciones 47 y 48); a medida que aumenta la temperatura, también incrementa la superficie con sales (> 4 dS/m). En el estrato 0-150 cm entre los meses de abril y junio se observó una tendencia negativa, por cuanto el incremento de temperatura correlacionó con una reducción de la superficie con sales (ilustración 49). Esto último se explicaría por la presencia de lluvias que cayeron a partir de julio y que lavaron las sales; ya que las lecturas de salinidad *in-situ* del mes de junio se llevaron a cabo en la primera quincena de julio (ilustración 50). En el análisis estadístico entre la ETo y la superficie ensalitrada en el estrato 0-60 cm en el periodo marzo-mayo dio, dio una $r^2=1$, que explica claramente el efecto del aumento de la temperatura en el ensalitramiento del suelo, en la época en que los cultivos están en periodo de máxima actividad fotosintética; más alto contenido de biomasa, y en la época en la que los niveles freáticos están más superficiales (ilustración 51). Por sí misma, está gráfica reúne varios elementos que permiten entender el origen de la salinidad del suelo, así como su aumento, en el Módulo de Riego 05 y en el Distrito de Riego 038 Río Mayo.

El incremento de temperatura que se ha venido registrando en el planeta a partir de 1992, y que se confirma con las temperaturas observadas en 2014 en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, las más altas desde 1992, probablemente impactarán en el aumento de la superficie ensalitrada, en el futuro inmediato. Este aumento impactará negativamente en la producción de cosechas.

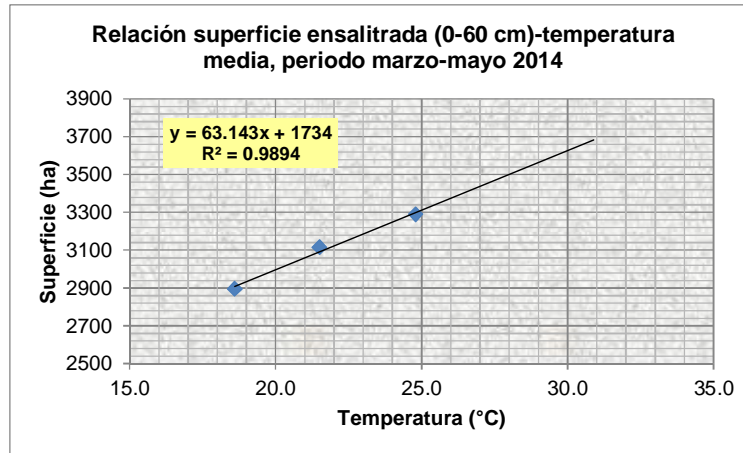


Ilustración 47. Relación entre la superficie ensaltrada del estrato 0-60 cm y la temperatura ambiente, periodo marzo-mayo de 2014

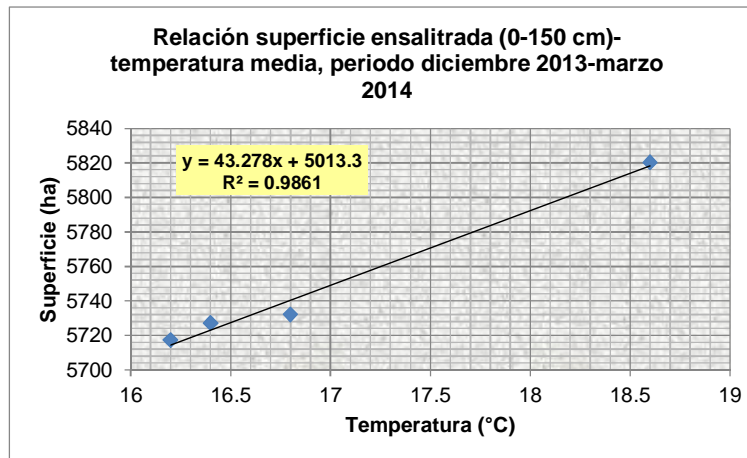


Ilustración 48. Relación entre la superficie ensaltrada del estrato 0-150 cm y la temperatura ambiente, periodo diciembre de 2013-marzo de 2014

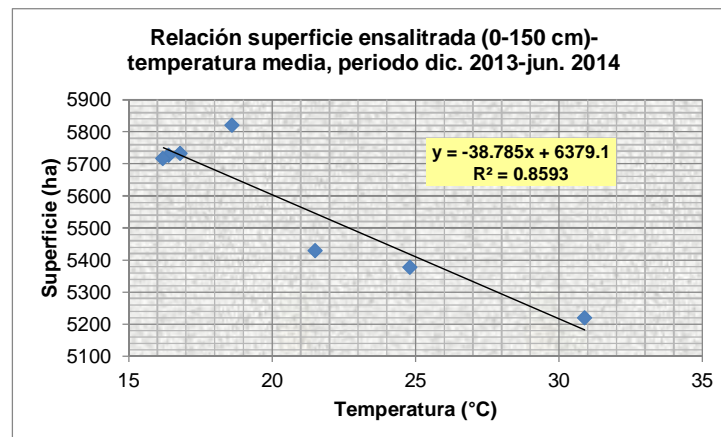


Ilustración 49. Relación entre la superficie ensaltrada del estrato 0-150 cm y la temperatura ambiente, periodo diciembre de 2013-junio de 2014

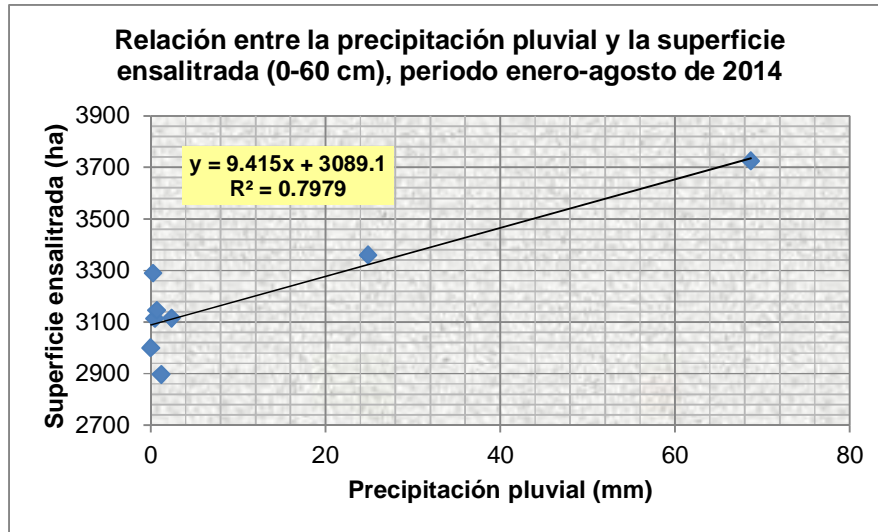


Ilustración 50. Relación entre la precipitación pluvial media mensual y la superficie ensaltrada del estrato 0-60 cm, periodo enero-agosto de 2014

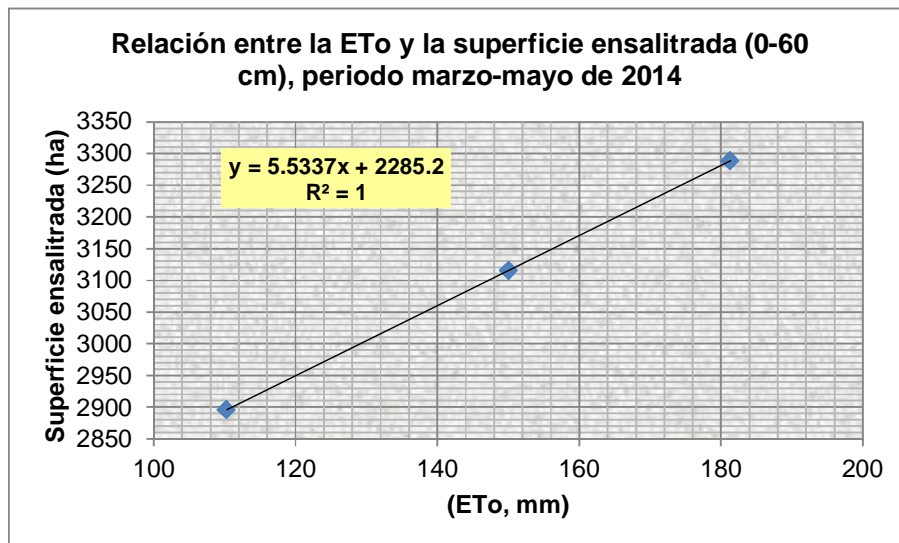


Ilustración 51. Relación entre la ETo y la superficie ensaltrada del estrato 0-60 cm, en el periodo marzo-mayo de 2014

El impacto del aumento de temperatura a lo largo del año se refleja en una disminución de la superficie con niveles freáticos superficiales, con excepción de los meses de enero-marzo en los cuales la aplicación de los riegos está en su nivel más alto y esto se manifiesta en incrementos en superficie con nivel freático superficial, y coincide con el incremento de temperatura media mensual, de 16.2°C en enero a 18.6 °C en marzo. En general la reducción de superficies con niveles freáticos superficiales se debe a que las altas temperaturas, que coinciden con la conclusión de los riegos y la cosecha de cultivos que en su mayoría son anuales, evaporan la humedad y así profundizan los niveles freáticos. Entre abril y agosto se notaron los valores más

altos de ETo, en coincidencia con las cifras más bajas de superficies con niveles freáticos superficiales (ilustración 52). Se obtuvo niveles de correlación altos entre la temperatura y la superficie con niveles freáticos, y entre la superficie con sales dependiente de la superficie con niveles freáticos superficiales. Se puede concluir que los niveles freáticos superficiales son un factor importante que produce el ensaltramiento de los suelos (ilustraciones 53 y 54). Estos resultados están de acuerdo con los reportados en los estudios llevados a cabo en 2012 y 2013 (Pulido et al, 2012 y 2013).

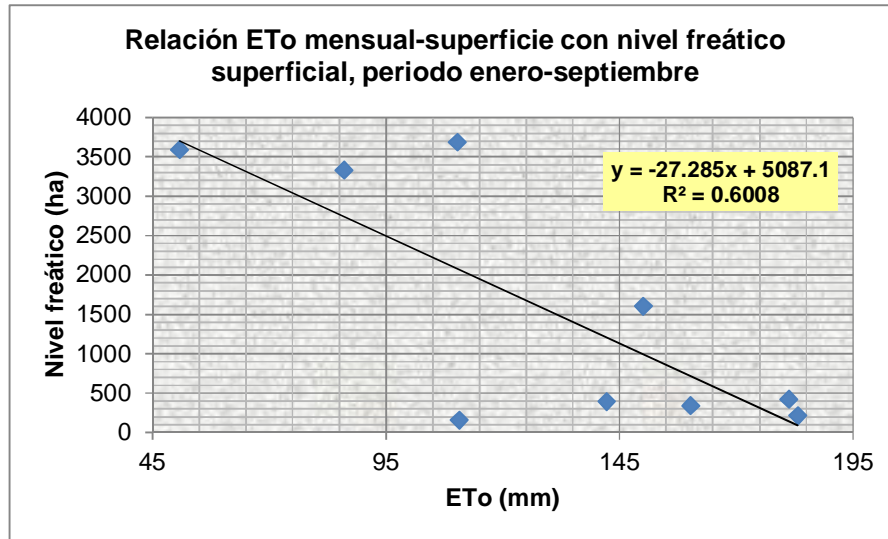


Ilustración 52. Relación entre la ETo y la superficie con niveles freáticos superficiales, periodo enero-septiembre de 2014

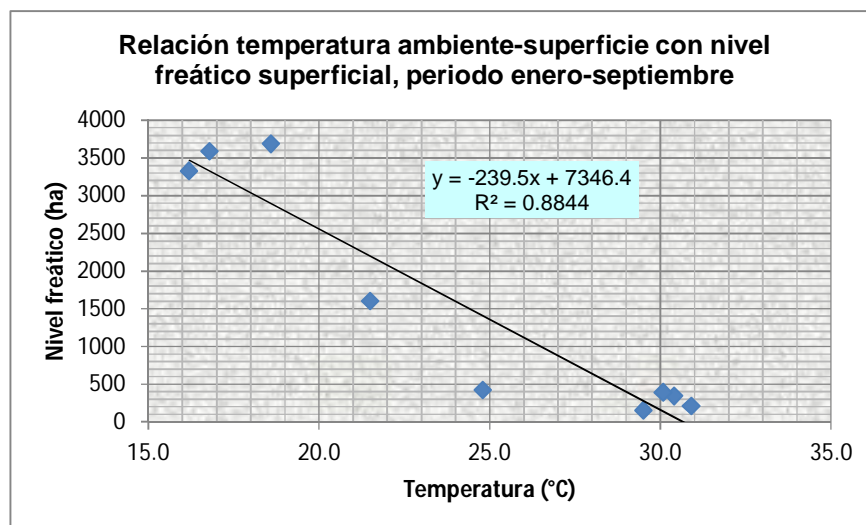


Ilustración 53. Relación entre la temperatura ambiente y la superficie con un nivel freático superficial, en el periodo enero-septiembre de 2014

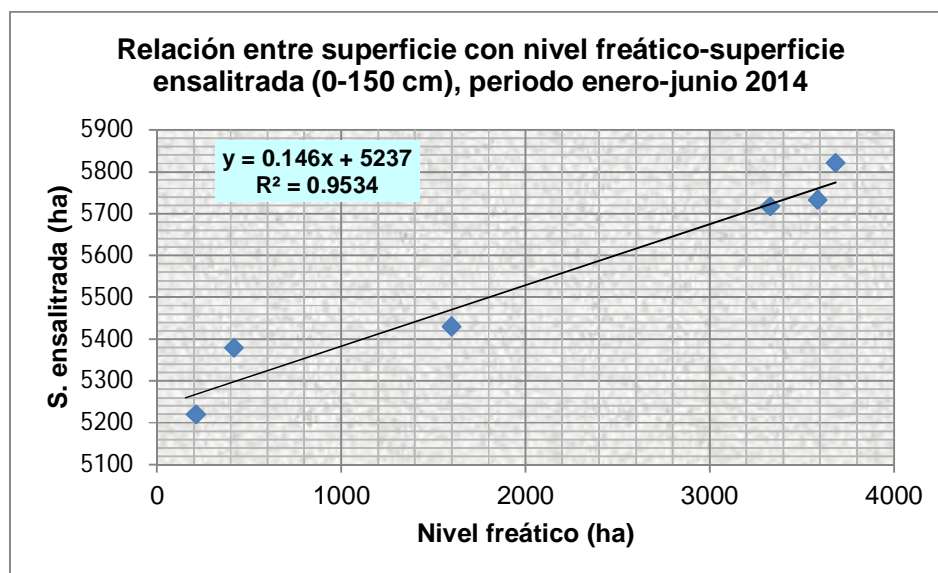


Ilustración 54. Relación entre la superficie ensaltrada y la superficie con un nivel freático superficial, en el periodo enero-junio de 2014

La conductividad eléctrica del agua freática, medida en los pozos de observación del manto freático superficial, resultó con un valor medio anual de 5.8 dS/m; su magnitud alta que es de casi nueve veces mayor a la que debe tener una agua de riego de buena calidad, limitarían su uso con fines agrícolas. El origen de las sales del agua freática se relaciona con las sales contenidas en el agua de riego, que en el Módulo de Riego 05 son de las más altas en el distrito de riego, ya que el agua que utiliza el módulo proviene de la presa Adolfo Ruiz Cortines y de pozos profundos con altos contenidos de sales. También las sales del agua freática se originan por procesos químicos como son la solución de los minerales presentes en el suelo; carbonatación, hidrólisis, oxidación y reducción.

El desarrollo de la temperatura durante el año correlacionó con la elevación de la superficie con niveles altos de sales ($CE > 3$ dS/m) (ilustración 55); la posible explicación de este comportamiento es porque al evapotranspirarse el agua del subsuelo deja sales en el perfil del suelo, cuya concentración aumenta. Estas sales correlacionaron ($r^2 = 0.53$) con la superficie ensaltrada en el periodo marzo-junio (ilustración 56). Esto muestra que en el ensaltramiento de los suelos tomando en cuenta el estrato superficial, el contenido de sales del agua freática es una variable a considerar, como parte del análisis de las causas y crecimiento del ensaltramiento de los suelos originados por el calentamiento global.

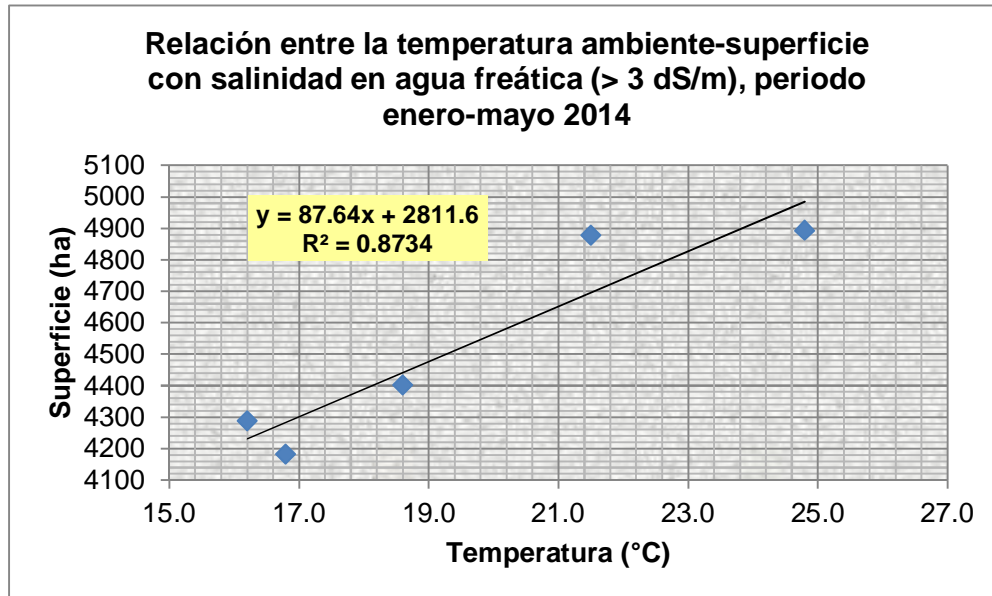


Ilustración 55. Efecto de la temperatura en el incremento de superficie con niveles altos de sales en el agua freática

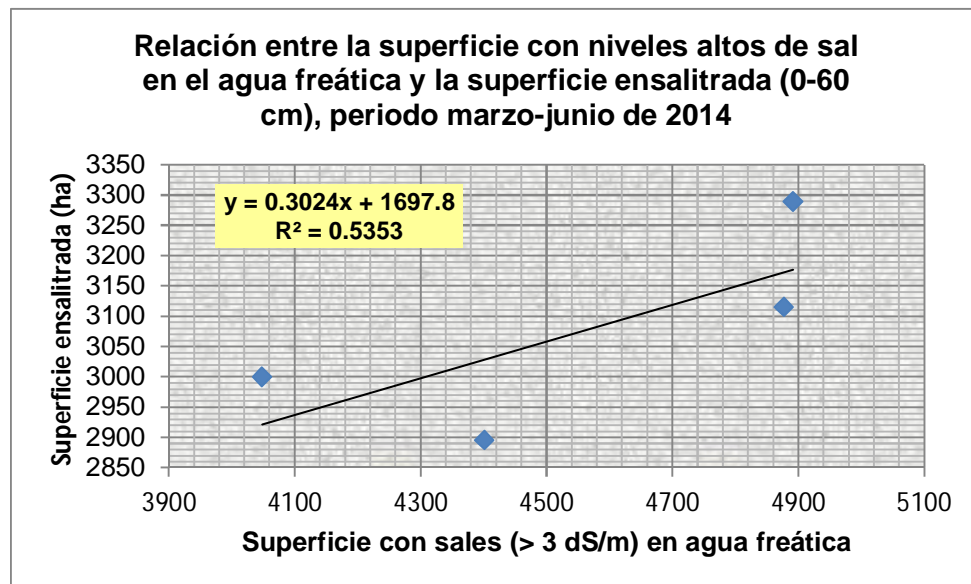


Ilustración 56. Relación entre la superficie con altos niveles de sales en el agua freática y la superficie ensaltrada del estrato 0-60 cm, periodo

Otra variable que tiene una estrecha relación con el aumento del contenido de sales en el suelo y con el aumento de superficie ensaltrada, es la conductividad eléctrica del agua de riego. Su valor medio a lo largo del ciclo de cultivo otoño-invierno, entre noviembre y abril, fue de 0.9 dS/m; la magnitud de la concentración de sales clasifican el agua con un grado de moderado en cuanto a su impacto en el suelo y los cultivos. La concentración de sales del agua que es servida al módulo de riego por la S. de R. L. Distrito de Riego del Río Mayo, tiene como origen elevado contenido de sales de los pozos profundos cuya agua es mezclada con agua de la presa, y así es entregada al

módulo. El resultado de regar con agua cuya salinidad es casi de un dS/m; además de la alta concentración de sales, de alrededor de 4 dS/m del agua bombeada desde los drenes para aplicarla directamente en las parcelas cuando escasea el agua en los canales, se exhibe en el desarrollo de superficie con sales, principalmente en el estrato superficial. Ambos parámetros correlacionan muy bien ($r^2 = 0.99$), con datos medios mensuales del periodo diciembre 2013-marzo 2014 (ilustración 57).

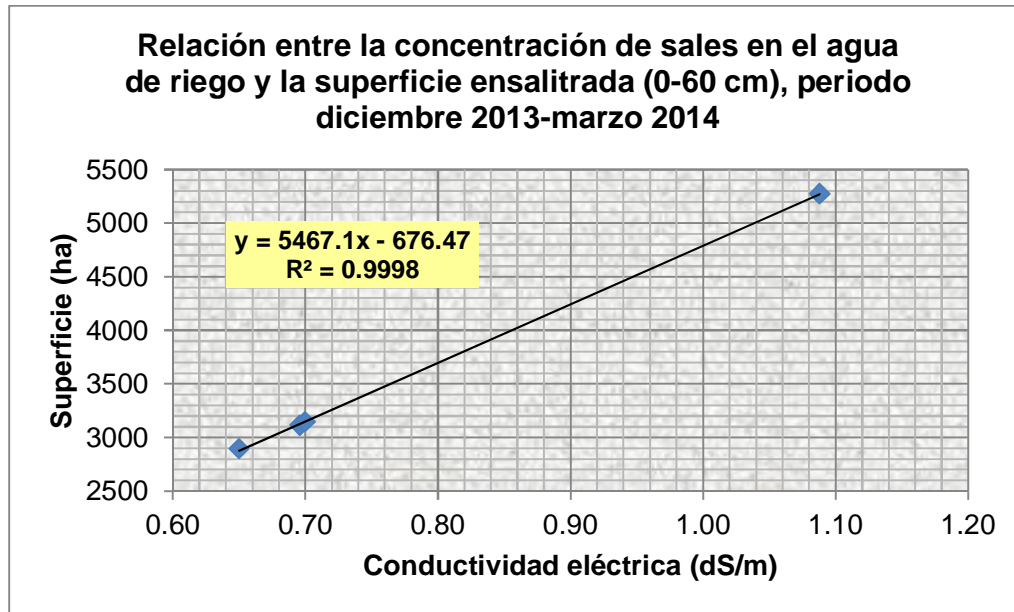


Ilustración 57. Relación entre la salinidad del agua de riego y la superficie ensaltrada, estrato 0-60 cm

Al analizar conjuntamente mediante regresiones lineales múltiples las variables superficie ensaltrada como dependiente y la temperatura, superficie con nivel freático superficial, evapotranspiración de referencia, precipitación pluvial y superficie con salinidad del agua freática como independientes, para los estratos superficial y subsuperficial, en diferentes periodos de tiempo correspondientes al año 2014, se generaron modelos estadísticos que resultaron con una alta correlación (cuadro 2). El análisis de los datos por periodos de tiempo que se relacionan con la época de temperaturas altas o bajas, ciclo de cultivo que involucra la existencia de biomasa y aplicación de riegos, y época de lluvias, posibilitó elaborar modelos con coeficientes de determinación de 1 que representa una correlación perfecta. Así, los modelos números 2 y 6 que comprenden el periodo de tiempo enero-junio dieron una correlación de 1; en estos modelos todas las variables independientes tienen algún grado de efecto por lo que explican el ensaltramiento de los suelos en los estratos superficial y subsuperficial. En este periodo de tiempo se registraron los datos más altos de afectaciones por niveles freáticos (marzo), la temperatura más alta del año se anotó en junio; la ETo más elevada se registró en junio, y la superficie más alta con sales en el agua freática se estimó en mayo. Las superficies con mayores afectaciones por sales se estimaron en mayo (estrato 0-60 cm) y junio (estrato 0-150 cm).

Cuadro 2. Modelos estadísticos que relacionan la salinidad del suelo con la temperatura (T), profundidad de niveles freáticos (M.F.), precipitación pluvial (PP), evapotranspiración (ETo), salinidad del agua freática (CEaf)

| Número del modelo | Estrato de suelo (cm) | Periodo de observación | Modelo estadístico | r ² |
|-------------------|-----------------------|------------------------|---|----------------|
| 1 | 0-60 | Enero-septiembre 2014 | $CE^1 = 981.1011 + 9.3585 \cdot T + 0.0466 \cdot MF + 0.4232 \cdot Eto + 11.7471 \cdot PP + 0.3920 \cdot CEaf$ | 0.61 |
| 2 | 0-60 | Enero-junio 2014 | $CE = 3268.2290 - 19.5238 \cdot T - 0.1811 \cdot MF - 3.7167 \cdot Eto - 64.8723 \cdot PP + 0.2604 \cdot CEaf$ | 1 |
| 3 | 0-60 | Enero-abril | $CE = 7644.9632 - 0.3030 \cdot MF - 0.7044 \cdot Eto - 0.8076 \cdot CEaf$ | 1 |
| 4 | 0-60 | Junio-septiembre 2014 | $CE = 7045.1873 + 3.9547 \cdot MF + 10.3852 \cdot Eto - 1.6754 \cdot CEaf$ | 1 |
| 5 | 0-150 | Enero-septiembre 2014 | $CE = 9914.6563 - 119.7289 \cdot T - 0.0744 \cdot MF + 5.3852 \cdot Eto + 11.6654 \cdot PP - 0.5336 \cdot CEaf$ | 0.62 |
| 6 | 0-150 | Enero-junio 2014 | $CE = 3563.9599 + 15.0850 \cdot T + 0.2316 \cdot MF + 0.2932 \cdot Eto - 76.2153 \cdot PP + 0.2683 \cdot CEaf$ | 1 |
| 7 | 0-150 | Enero-abril | $CE = 4864.7189 + 0.2113 \cdot MF + 1.0868 \cdot Eto + 0.0128 \cdot CEaf$ | 1 |
| 8 | 0-150 | Junio-septiembre 2014 | $CE = 33473.7982 + 3.4221 \cdot MF + 59.9216 \cdot Eto - 9.8701 \cdot CEaf$ | 1 |

CE¹= superficie ensaltrada (ha), conductividad eléctrica > 4 dS/m; T= temperatura (°C); MF= superficie con niveles freáticos < 1.5 m (ha); Eto= evapotranspiración de referencia (mm); PP= precipitación pluvial (mm); CEaf= superficie con salinidad del agua freática > 3 dS/m (ha)
r²= coeficiente de determinación

Se analizaron los datos correspondientes a los periodos enero-abril en los dos estratos de suelo analizados y de igual forma que en el periodo enero-junio, se calculó un coeficiente de determinación de 1 (modelos números 3 y 7). Sin embargo, los parámetros que explican la presencia de sales en el suelo son la existencia de niveles freáticos superficiales, la evapotranspiración y la concentración de sales en el agua freática.

En contraste con los periodos enero-junio y enero-abril discutidos, en el lapso junio-septiembre se estimaron las mayores superficies ensaltradas en ambos estratos de suelo; se notaron las más altas temperaturas del año; cayeron las mayores cantidades de lluvia del año; los niveles freáticos estuvieron más profundos por lo que la superficie con manto freático superficial fue la menor del año. Los modelos números 4 y 8 elaborados a partir de los datos obtenidos para este periodo de tiempo dieron una $r^2 = 1$. Las variables manto freático, ETo y salinidad del agua freática explican la presencia de superficies ensaltradas.

Contrariamente a lo expuesto en los párrafos precedentes, los resultados obtenidos mediante el análisis de los datos de enero-septiembre rindieron coeficientes de determinación de 0.61 y 0.62 (modelos 1 y 5). De estos resultados se puede concluir que es necesario analizar por periodos de tiempo los datos relacionados con la salinidad del suelo, atendiendo a las variaciones que los parámetros presentan a lo largo del año, y que se relacionan con el clima y con la siembra de cultivos con riego.

Los modelos del cuadro 2 pueden ser útiles para estimar la salinidad según las condiciones climatológicas y agronómicas que existan. La estructura de estos modelos permite entender la importancia del manejo cuidadoso del agua de riego para reducir la presencia de niveles freáticos superficiales; reducir los contenidos de sales en el agua de riego por el efecto adverso que causa en el suelo y en los cultivos, así como el impacto que tienen en el contenido de sales del agua freática. El aumento de temperatura debido al calentamiento global influye en la pérdida de humedad que a su vez demanda mayores volúmenes de agua de riego. Se ha analizado que hay

una tendencia a la reducción en la precipitación pluvial a partir de 1992; entonces con el calentamiento global aumentarán los problemas de salinidad ya que las mayores ETo se tienen cuando hace más calor y por lo tanto el ascenso capilar de sales es mayor, como se demostró a lo largo de este informe. La insuficiente agua de riego será limitante para aplicar sobre riegos y lavado de sales, y las parcelas que queden sin cultivar, ubicadas prácticamente desde la población de Etchojoa hacia el sur del distrito de riego, se ensalitrarán con rapidez y será difícil y costosa su rehabilitación.

De entre las variables analizadas y que tienen un efecto en los problemas de drenaje y salinidad, la que corresponde a la formación de niveles freáticos por exceso de aplicaciones de agua de riego, demanda atención por parte de CONAGUA, directivos del módulo de riego, directivos de la S. de R. L. y de los agro productores; esta consiste en implementar una mejoría en el funcionamiento del drenaje parcelario y probablemente en la red de drenaje a cielo abierto. Esto significa que hay la necesidad de instalar sistemas de drenaje parcelario e investigar sobre el uso de tecnología que resulte económica para el bombeo de agua de drenaje, y así rehabilitar una superficie extensa del módulo de riego que actualmente no dispone de drenaje parcelario. Hay una extensa superficie que por sus condiciones de topografía plana demanda del bombeo de agua de drenaje hacia la red de drenaje a cielo abierto existente, lo cual solo se puede lograr con el bombeo mediante energía eléctrica, gasolina, diésel; o bien intentarlo a través de bombeo con energía eólica y solar.

Por todo lo que se ha planteado en el presente informe, y que es continuación de las investigaciones iniciadas en marzo del año 2012, el calentamiento global muy probablemente acarreará incrementos en la salinidad del suelo del Módulo de Riego No. 5. Para enfrentar sus efectos es necesario atender una de las causas del incremento en el ensalitramiento de los suelos, y que es inherente al mal manejo del agua de riego; bien sea por exceso de aplicación de riego y por filtraciones del agua en canales y por deficiente operación y conservación de la red de drenaje. Esta causa es la formación de mantos freáticos superficiales los cuales se presentan y crecen desde el inicio hasta la finalización de los ciclos de cultivo otoño-invierno.

En concordancia con los resultados mostrados en el presente informe, y que coinciden con las conclusiones y recomendaciones expuestas en los informes de los estudios llevados a cabo en el Módulo de Riego 05 en 2012 y 2013 (Pulido *et al.* 2012 y 2013), uno de los objetivos del proyecto es establecer una parcela piloto equipada con drenaje y sistemas de bombeo con energía eólica o solar.

Variación temporal y espacial de la salinidad del suelo en la parcela piloto

Como producto de los datos obtenidos de las monitorizaciones de salinidad en la parcela piloto, se elaboraron mapas de clases de salinidad para los estratos 0-60 y 0-150 cm de profundidad. Entre marzo y octubre las mediciones se realizaron en 12 sitios ubicados dentro de esta parcela, cuya superficie es de 4.3 ha, además de cuatro sitios distribuidos en cuatro parcelas que la rodean. A partir de noviembre la red de sitios se incrementó de 16 a 36.

En el estrato a 0-60 cm (ilustración 58) se delimitaron suelos de primera (0-4 dS/m) a cuarta clase (12-20 dS/m). Las más grandes afectaciones se cuantificaron en dos periodos: uno en marzo-abril, y el otro en septiembre-octubre. En el primer periodo las afectaciones correspondieron con los niveles freáticos más superficiales, tanto en la parcela piloto como en el Módulo de Riego 05 y en el Distrito de Riego 038 Río Mayo; en el segundo periodo las afectaciones cuantificadas en septiembre-octubre concordaron con la época de lluvias y con las temperaturas más altas del año. En mayo y junio se estimaron mayores superficies de suelo de segunda clase (4-8 dS/m) debido al descenso del nivel freático que arrastró sales hacia estratos más profundos, y que se notaron en aumentos de superficie con suelos de tercera clase (8-12 dS/m).

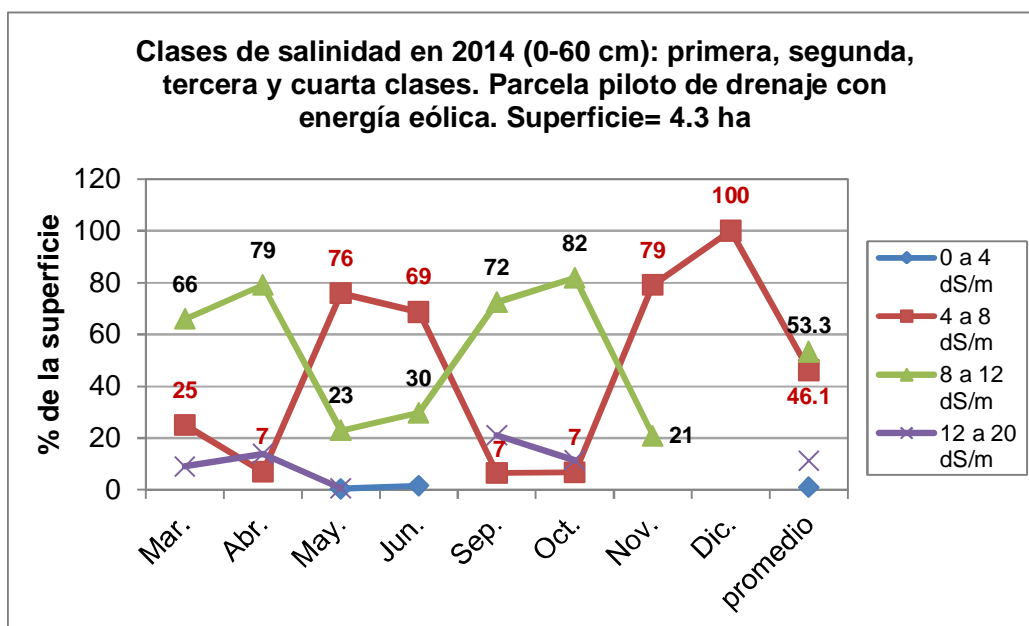


Ilustración 58. Variación de la salinidad en la parcela piloto en el estrato 0-60 cm de profundidad

En octubre se aplicó un riego para el lavado de sales con agua procedente de la presa Adolfo Ruiz Cortines; se midió su CE *in-situ* la cual resultó de 0.48 dS/m, que la clasifica como sin riesgo para el suelo y los cultivos que se siembran en el módulo de riego; dicho lavado coincidió con el inicio de operaciones del molino de viento instalado entre julio y octubre, en la parcela piloto. El efecto del lavado de suelo se presentó en noviembre con un incremento de superficie con suelos de segunda clase, que aumentó del 7-79% (octubre y noviembre, respectivamente), y con un descenso del porcentaje de suelos de tercera clase, del 82-21% (octubre y noviembre, respectivamente), como resultado de la descarga de agua de drenaje en el cárcamo y del bombeo de esta agua que está haciendo el molino de viento. Este molino está desaguando diariamente el cárcamo, dependiendo de la intensidad y duración de la velocidad del viento; el agua bombeada continuamente por el molino de viento es descargada en una línea de tubería de PVC de 2" de diámetro, y conducida por gravedad hasta un lugar ubicado en las proximidades del dren T-O, distante 900 m del molino de viento. En diciembre la superficie total de la parcela piloto se clasificó con suelo de segunda clase (ilustraciones 59-62).

Esto significa que por efecto del desagüe de agua de drenaje que está realizando el molino de viento, las afectaciones por salinidad descendieron del 93% con suelos de tercera y cuarta clases que afectaron a 4.0 ha en los meses de abril, septiembre y octubre, que resultaron con las mayores afectaciones en 2014, a 0% en diciembre; en donde, en las 4.3 ha de la parcela piloto se estimó que el 100% presentaba suelo de segunda clase. Con este contenido de sales el trigo podría rendir hasta un 90% de su potencial (Ayers y Westcot, 1987).

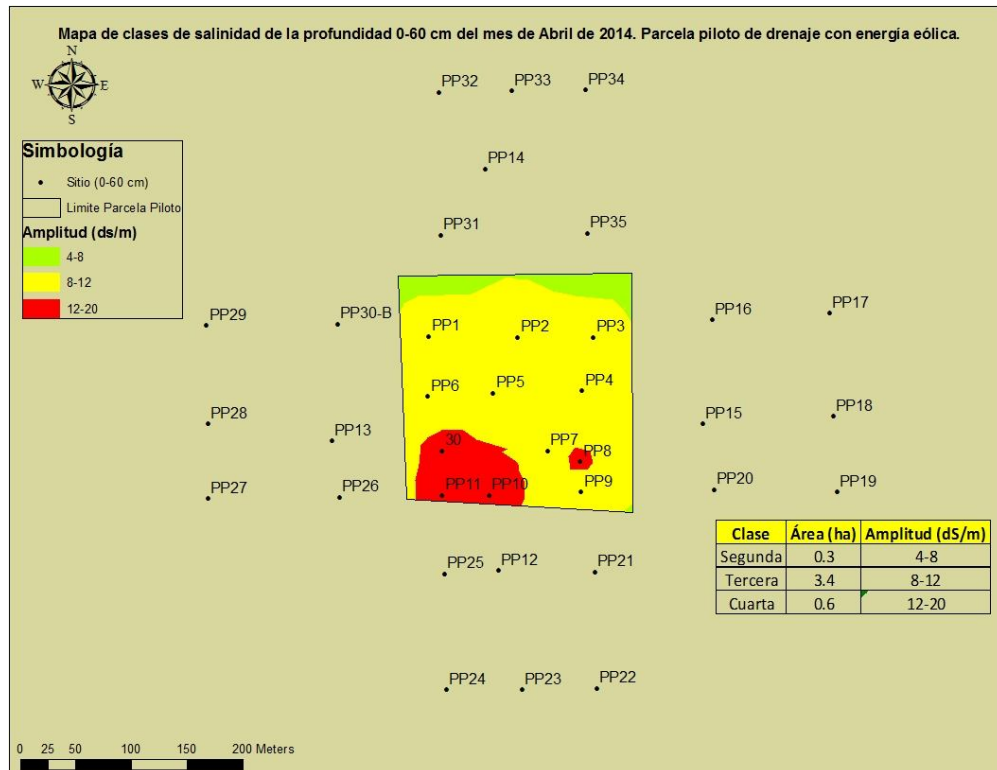


Ilustración 59. Clases de salinidad del estrato 0-60 cm en la parcela piloto en abril de 2014

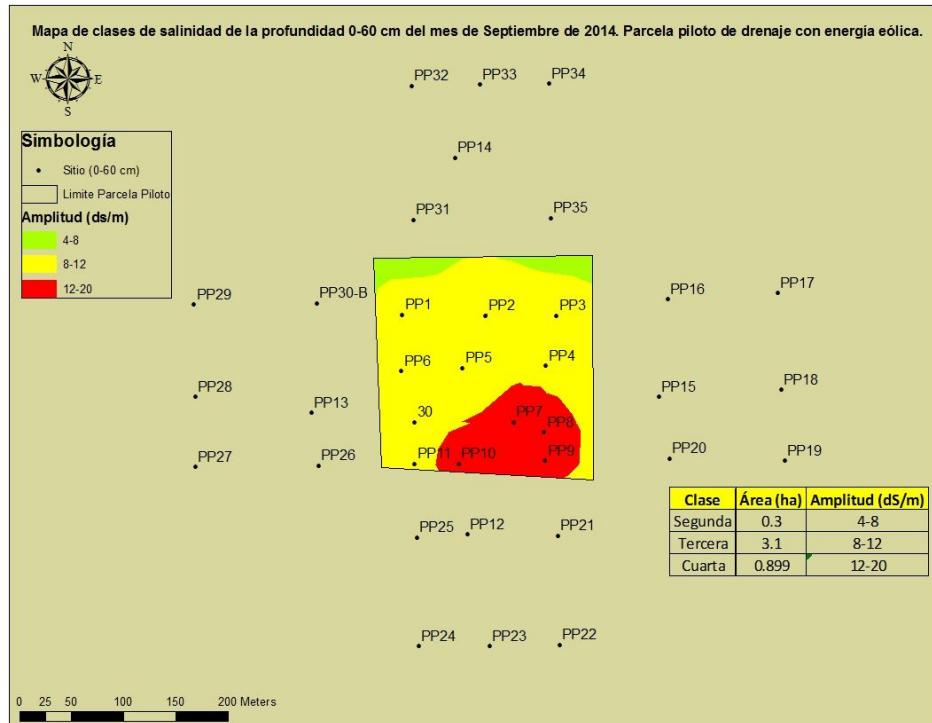


Ilustración 60. Clases de salinidad del estrato 0-60 cm en la parcela piloto en septiembre de 2014

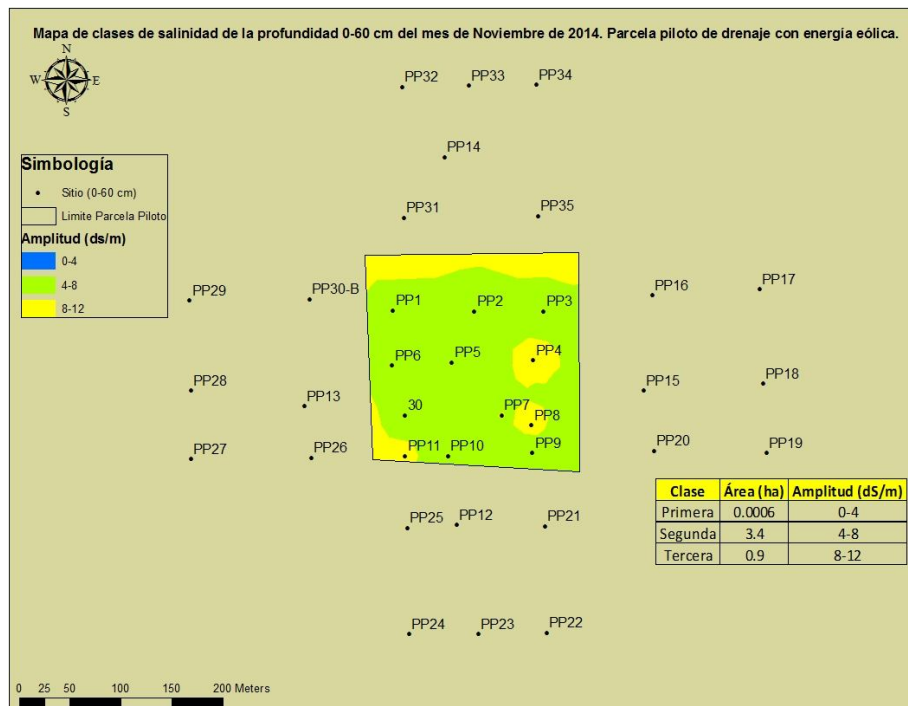


Ilustración 61. Clases de salinidad del estrato 0-60 cm en la parcela piloto en noviembre de 2014

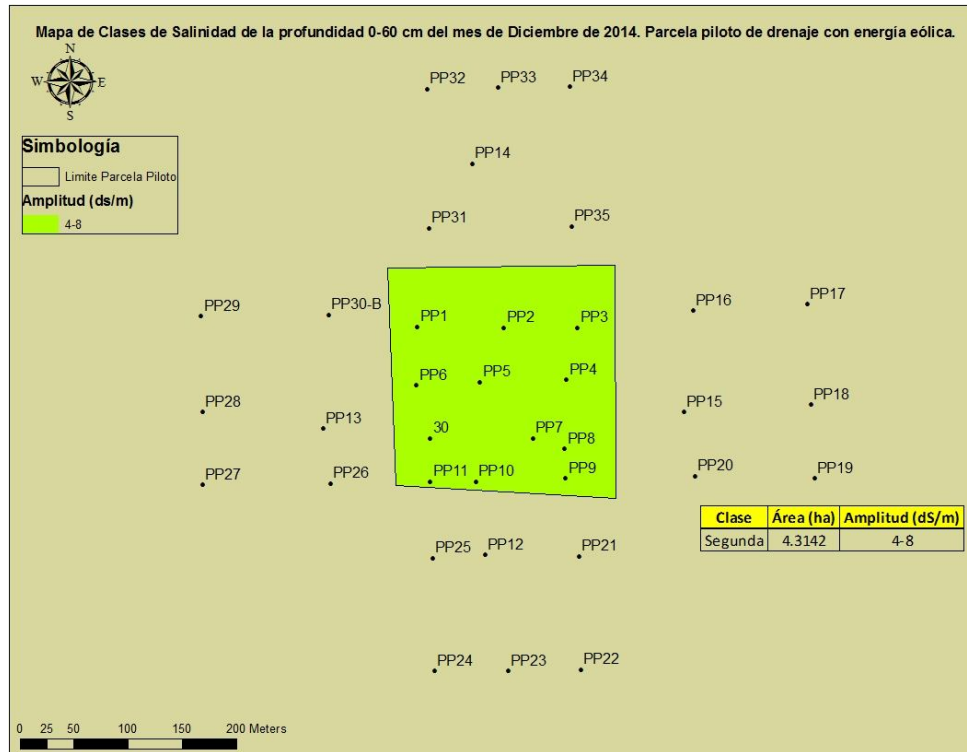


Ilustración 62. Clases de salinidad del estrato 0-60 cm en la parcela piloto en diciembre de 2014

El propietario de la parcela piloto dio el riego para siembra de trigo, o riego de asiento, entre los días 01-02 de diciembre; para ello aplicó una lámina de 17 cm. La siembra de trigo la hizo el 02 de enero de 2015, cuando el suelo dio punto. El 10 de diciembre el suelo aún estaba con un contenido alto de humedad; en una inspección llevada a cabo y en la cual se realizó la monitorización de la conductividad eléctrica con el sensor EM-38, aún se observó la presencia de sales en la cresta de los bordos de las melgas (ilustración 63). En las parcelas aledañas el trigo se sembró unas tres semanas antes que en la parcela piloto, y en la fecha de la inspección el trigo ya había emergido y se pudo apreciar que los trigos exhibían un buen desarrollo (ilustración 64).



Ilustración 63. Condición del suelo el 10 de diciembre, después del riego de asiento



Ilustración 64. Trigo en desarrollo de la parcela propiedad del ejidatario Matías Soberanes Heredia, colindante al poniente de la parcela piloto

La zona donde se está monitorizando la salinidad a partir de noviembre de 2014 cubre una superficie de 30.9 ha, y la ocupan varias parcelas; dentro de esta zona se ubica la parcela piloto que es la única que dispone de drenaje subsuperficial. El porcentaje de las clases de salinidad delimitadas cambiaron entre noviembre y diciembre, por efecto del drenaje de agua y del bombeo. En noviembre los suelos de primera clase se delimitaron hacia el sureste de la parcela piloto, y cubrían el 14 % del área total; esta superficie se incrementó a un 30% en diciembre. La superficie con suelos de segunda clase se redujo del 32-69% entre noviembre y diciembre (ilustraciones 65 y 66). La reducción de superficie ensaltrada en toda esta zona se está logrando a través del drenaje que se está desarrollando en la parcela piloto; es decir, el efecto de tener un

sistema de drenaje subsuperficial en 4.3 ha está beneficiando a un conjunto de parcelas que circundan la parcela piloto. Los valores más bajos de salinidad se están observando en la zona sureste, debido a que es más alta que el resto del área de monitorización; las parcelas que circundan la parcela piloto están drenando en el cárcamo de bombeo, ya que con el accionar del molino de viento se está produciendo un efecto de “sumidero”. El desarrollo que presentaban las plantas de trigo sembradas en una parcela al sureste de la parcela piloto en diciembre, era bueno, sin el efecto característico de un suelo salino; además en el suelo no se notó la presencia de sales (ilustración 67).

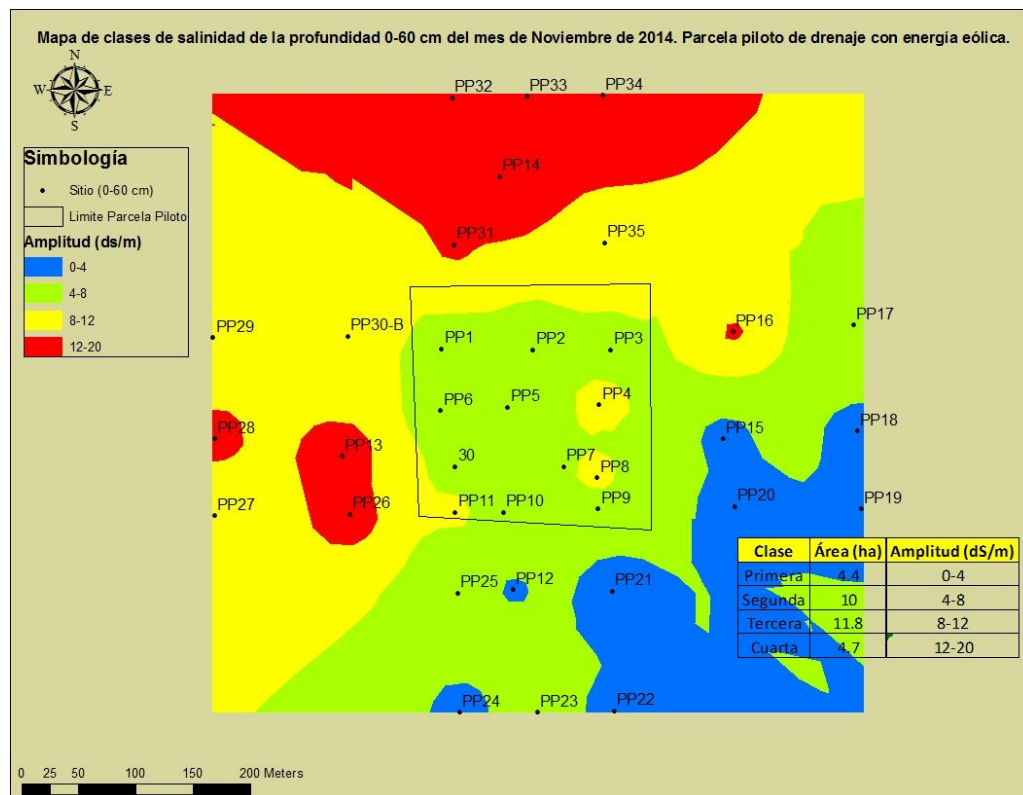


Ilustración 65. Clases de salinidad del estrato 0-60 cm en la parcela piloto y parcelas aledañas, en noviembre de 2014

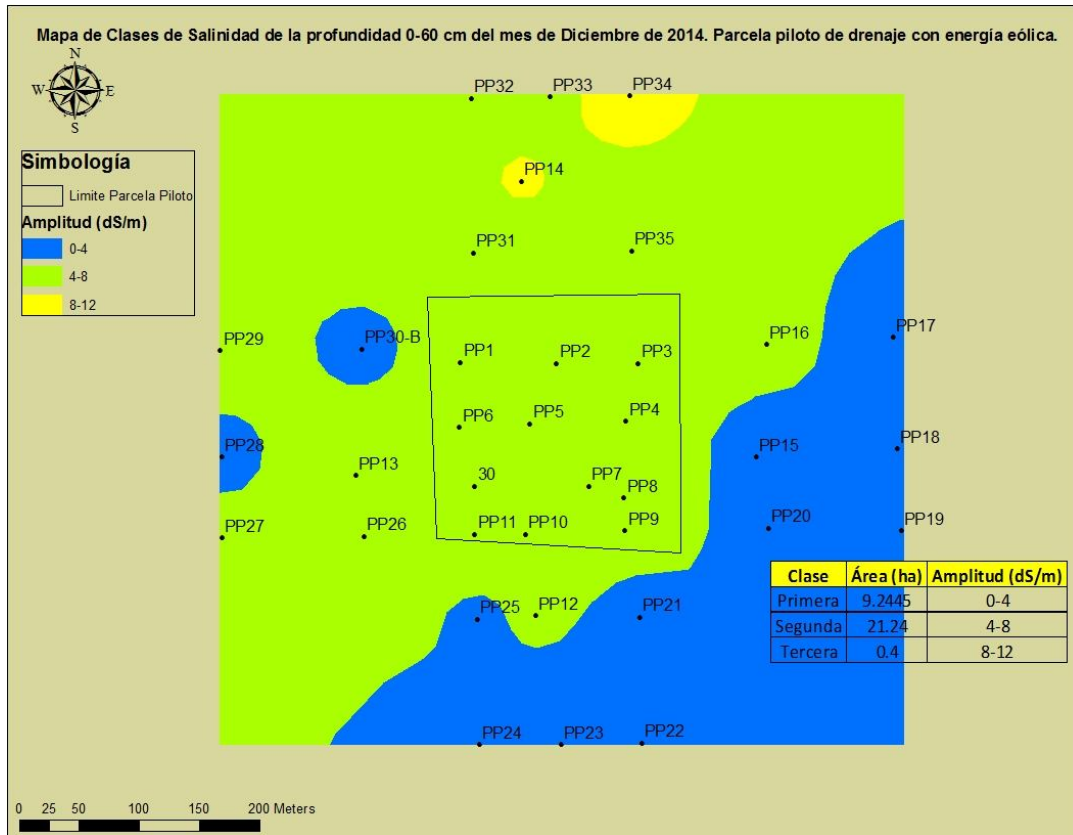


Ilustración 66. Clases de salinidad del estrato 0-60 cm en la parcela piloto y parcelas aledañas, en diciembre de 2014



Ilustración 67. Trigo en etapa vegetativa, sembrado en noviembre en una parcela al sureste de la parcela piloto

La reducción del contenido de sales que se está observando en el estrato 0-60 cm en la parcela piloto no se está viendo de igual forma en el estrato 0-150 cm, ya que hasta esta profundidad hubo un menor impacto. En este estrato las clases de suelo delimitadas en 2014 corresponden a las clases cuarta (12-20 dS/m) y quinta (>20 dS/m). La variación de superficie afectada en porcentaje no fue muy marcada; se ubicó entre un 8-18% para la cuarta clase y entre un 82-100% para la quinta clase. Las menores afectaciones se estimaron en mayo y junio, coincidiendo con el descenso de niveles freáticos por efecto de la finalización del ciclo de cultivo otoño-invierno, y del aumento de evapotranspiración. La distribución espacial de suelos de cuarta clase se delimitó al norte, oriente y sureste, donde la altitud es mayor, lo cual tiene relevancia si se considera que el agua freática se mueve por gravedad hacia el cárcamo localizado en la esquina suroeste de dicha parcela; en lo que podría considerarse como el punto más bajo (ilustraciones 68-71); en diciembre de las 4.3 ha de la parcela se estimó que en el 2% existían suelos de cuarta clase y en el 98% suelos de quinta clase.

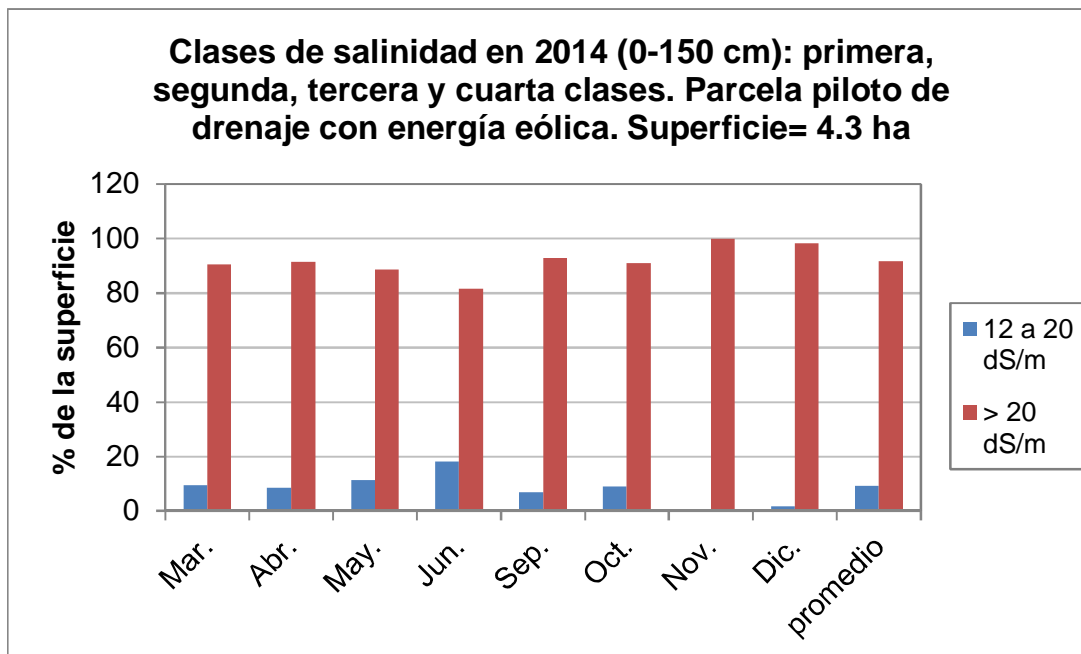


Ilustración 68. Variación de la salinidad en la parcela piloto en el estrato 0-150 cm de profundidad

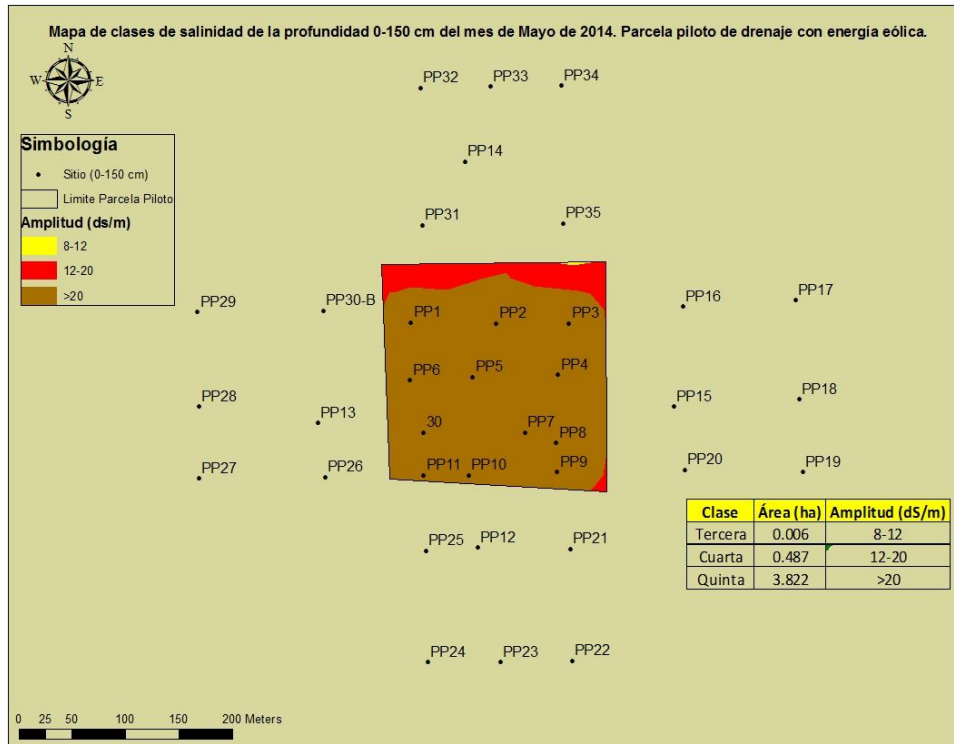


Ilustración 69. Clases de salinidad del estrato 0-150 cm en la parcela piloto en abril de 2014

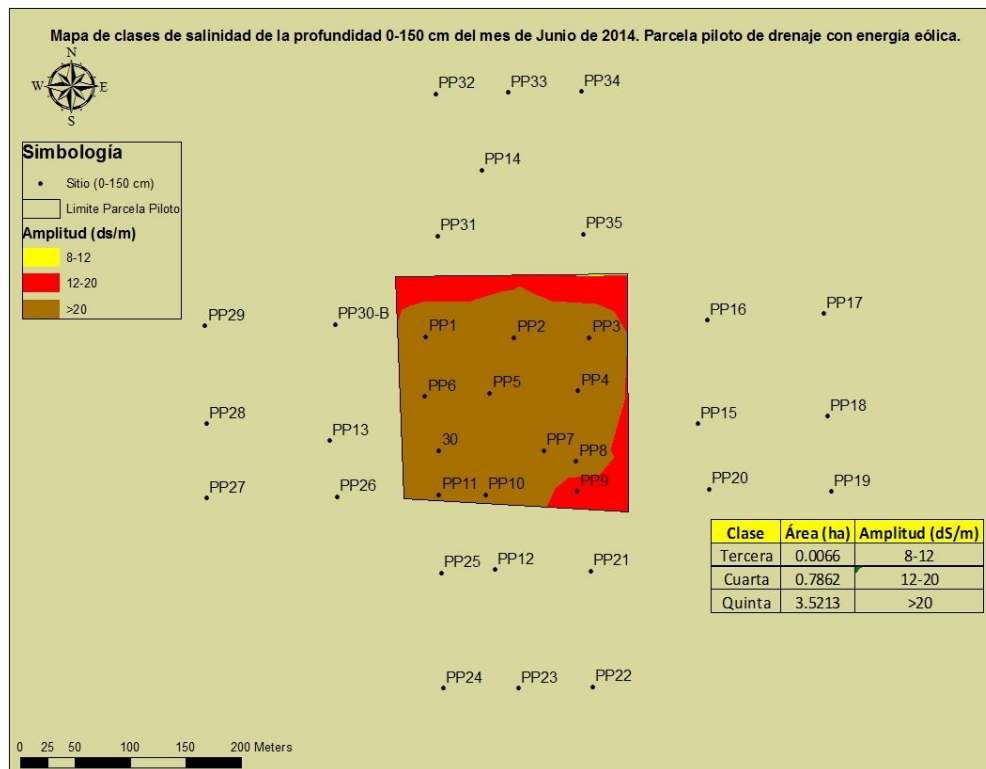


Ilustración 70. Clases de salinidad del estrato 0-150 cm en la parcela piloto en junio de 2014

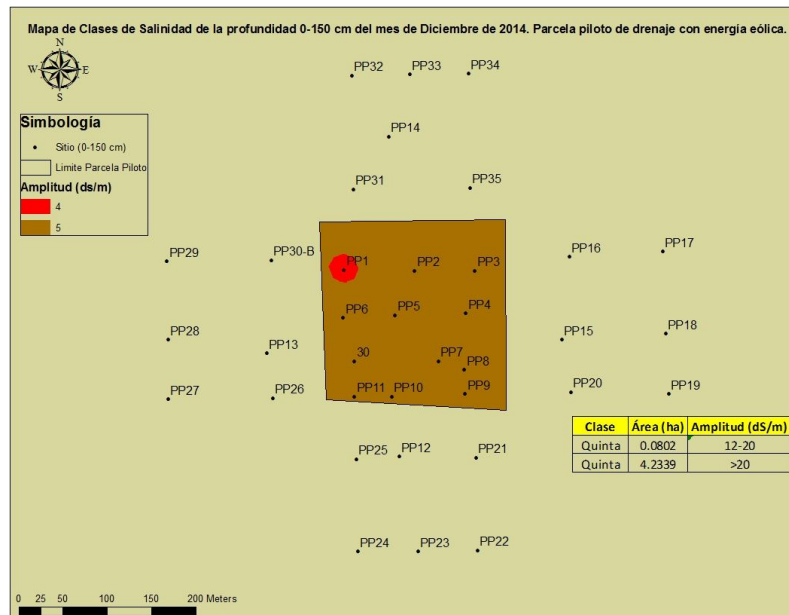


Ilustración 71. Clases de salinidad del estrato 0-150 cm en la parcela piloto en diciembre de 2014

Un análisis del contenido de sales de toda la zona de observación que cuenta con una superficie de 30.9 ha, incluida la parcela piloto, revela que al sureste de esta parcela se manifiesta una disminución en el ensalitramiento. Al comparar noviembre y diciembre se observa que en noviembre en el 3% del área se clasificaron suelos de cuarta clase y en el 97% de quinta clase; en cambio, en diciembre se clasificaron suelos de tercera clase en el 0.3%, de cuarta clase en el 13.9% y de quinta clase en el 85.8% de las 30.9 ha (ilustraciones 72 y 73).

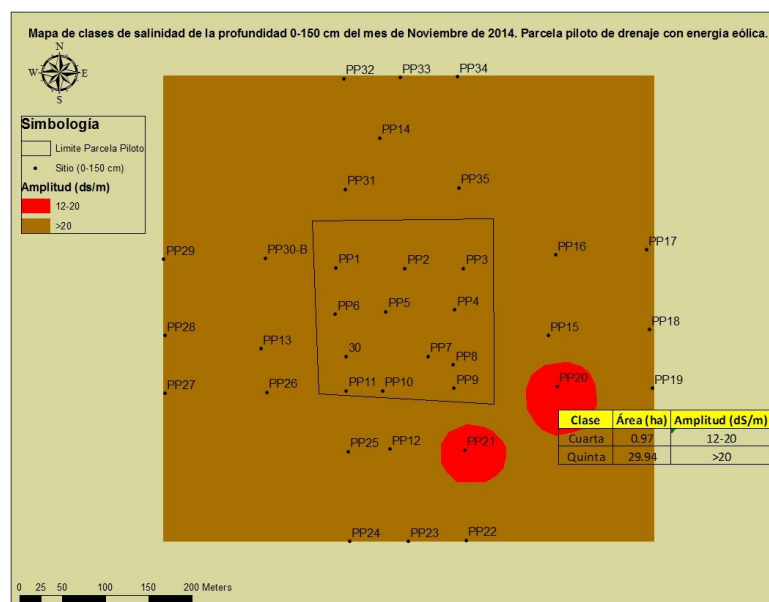


Ilustración 72. Clases de salinidad del estrato 0-150 cm en la parcela piloto y parcelas que le rodean, en noviembre de 2014

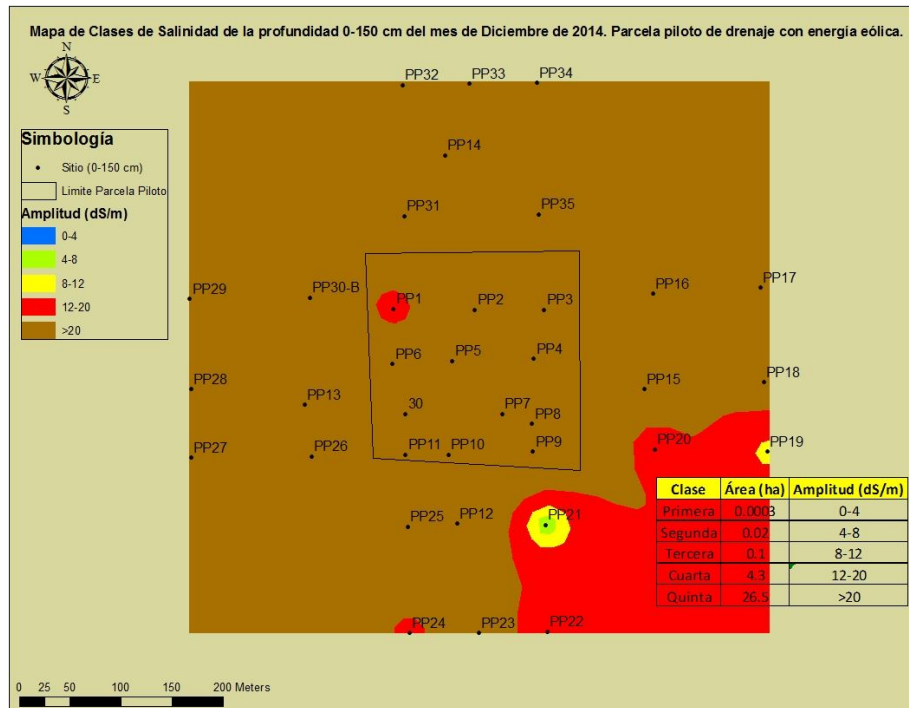


Ilustración 73. Clases de salinidad del estrato 0-150 cm en la parcela piloto y parcelas que le rodean, en diciembre de 2014

Analizada en su conjunto la superficie de estudio, esto es la parcela piloto con 4.3 ha con drenaje subterráneo y zona que le rodea con un área aproximada de 26.6 ha y que integran una superficie de 30.9 ha, se puede concluir que a través del bombeo de agua de drenaje que está realizando el molino de viento, tanto de la parcela piloto como del área circundante que no cuenta con un sistema de drenaje subterráneo, el contenido de sales de las 30.9 ha está disminuyendo, como resultado de que toda esta área está siendo drenada. Dicha disminución se está manifestando en que el 93% de los suelos de tercera y cuarta clases se convirtieron en suelos de segunda clase, y que las bajos contenidos de sales están incidiendo en el buen desarrollo del trigo sembrado tanto en la parcela piloto como en las demás parcelas que le rodean.

Las mediciones del nivel freático del cárcamo de bombeo a lo largo de 2014 evidencian que el nivel más superficial se observe en marzo, con 0.74 m; luego descendió en paralelo con la culminación del ciclo de cultivo y por el incremento de la temperatura y de la evapotranspiración. La mayor profundidad del nivel freático se evaluó el 06 de octubre con 1.55 m, previo al riego de lavado que se dio el 10 de octubre; este riego propició el ascenso del nivel freático, a 0.93 m (ilustración 74). Por el 17 de octubre tan pronto se instaló la línea de tubería de conducción de PVC desde el Molino de viento hasta el dren T-O, y así se crearon las condiciones para el desagüe del cárcamo, inició la operación del molino de viento que empezó a bombear agua, lo cual se evidenció en que el nivel freático descendió hasta 1.49 m el 24 de noviembre. Desde principios de este mes se empezaron a aplicar riegos de asiento para la siembra de trigo en las parcelas aledañas a la parcela piloto; es así que el día 11 se regó la parcela poniente misma que se

sembró de trigo. A lo largo de este mes la aplicación de riegos en la zona de estudio no se había regularizado; y la aportación de agua de drenaje al cárcamo no había llegado a su etapa más intensa, por lo que el nivel freático se registró entre 1.2-1.4 m de profundidad. Pero a principios de diciembre ya todas las siete parcelas que se están cultivando, incluida la parcela piloto, estaban siendo regadas.

La parcela piloto se regó el 02 de diciembre y el nivel freático se midió de 0.87 m; la parcela oriente se regó el 24 de diciembre y se observó una profundidad de 0.93 m del nivel freático; a la parcela poniente se le dio el primer riego de auxilio y como consecuencia el nivel freático se observó de 1.88 m (ilustración 75). Siempre que se regó, el nivel freático se midió más próximo a la superficie aunque hayan sido parcelas colindantes o próximas a la parcela piloto. A lo largo del año el nivel freático tuvo un promedio de 1.09 m; y durante el mes de diciembre su profundidad media ha sido de 1.0 m. En lo que va del año 2015, hasta el 19 de enero el nivel freático medio es de 1.09 metros. Con estos niveles freáticos es de esperarse que las raíces de las plantas de trigo no resulten afectadas debido a la humedad y a la alta concentración de sales del agua freática, ya que la profundidad de exploración radicular es dentro de los primeros 50 cm, aproximadamente.



Ilustración 74. Variación del nivel freático en el cárcamo de bombeo durante 2104



Ilustración 75. Medición de la profundidad del nivel freático en el cárcamo de bombeo, el 10 de diciembre

El gasto del molino de viento depende de la velocidad y duración del viento. El modelo 12 que se instaló permite una extracción teórica de 4,900 l/h con velocidades del viento de 24 km/h, mismas que no se registraron en la estación meteorológica de Huatabampo. Desde que el molino empezó a bombear se han estado haciendo aforos aproximadamente cada tercer día, entre las 13-17 horas, en la descarga de la línea de conducción (ilustración 76). El gasto medio medido es de 0.55 l/s, que en un periodo de bombeo de seis horas diarias, que se ha venido observando, estaría bombeando un volumen diario de 11.88 m³ (ilustración 77). Se ha estado registrando que el molino bombea cada día entre las 13:00-19:00 horas; con variaciones, ya que a veces por las noches también extrae agua, y temprano por las mañanas.



Ilustración 76. Aforo en la descarga de la línea de conducción, del agua bombeada por el molino de viento

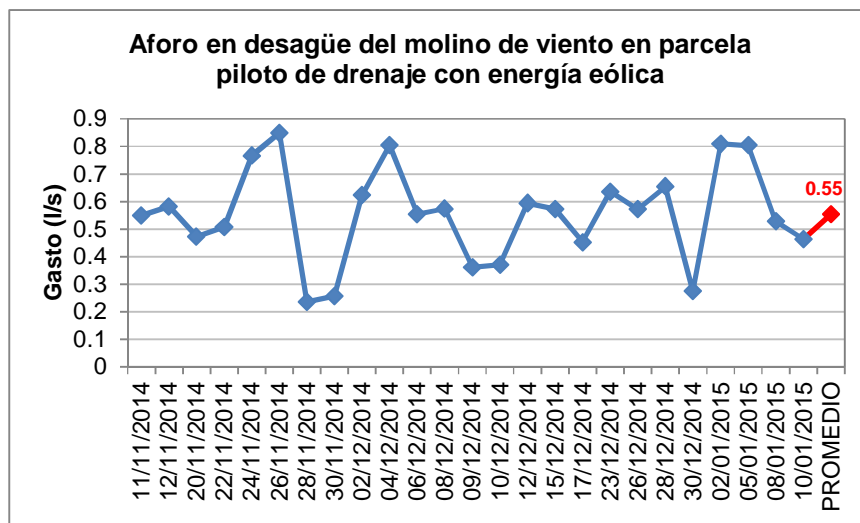


Ilustración 77. Gasto en desagüe de molino de viento

Entre el 09 y 10 de diciembre se midió *in-situ* la CE del agua de riego utilizada en la zona de estudio, del agua de los drenes T-O y Ánimas, y del agua que está drenando el molino de viento (ilustración 78). El agua de drenaje de la parcela piloto contiene 10 o más dS/m de conductividad eléctrica; el agua del dren T-O contiene 4.36 dS/m; el agua del dren Ánimas contiene 2.58 dS/m; el agua de riego presenta una salinidad de 0.48 dS/m. Entonces, el agua de drenaje que está bombeando el molino de viento contiene 21 veces más sales que el agua de riego y 2.5 más sales que las que se midieron en el dren T-O. Por lo tanto, el alto contenido de sales del agua freática representa un peligro para el suelo y los cultivos, y es una fuente de sales para el ensaltramiento de los suelos.



Ilustración 78. Medición *in-situ* de la conductividad eléctrica del agua en el dren T-O

En la parcela piloto con observaciones realizadas entre septiembre y diciembre se encontró que al aumentar la temperatura también aumenta la superficie ensaltrada ($r^2=0.93$), como consecuencia del aumento en la evapotranspiración que influye en el ascenso de sales por capilaridad ($r^2=0.81$) (ilustraciones 79 y 80); en esta época se observa que los niveles freáticos son más profundos, lo cual se presentó en septiembre con 1.55 m, mismo que empezó a ascender en octubre con las aportaciones de humedad después del riego de lavado de sales, y seguidamente en noviembre con el riego para la siembra de trigo.

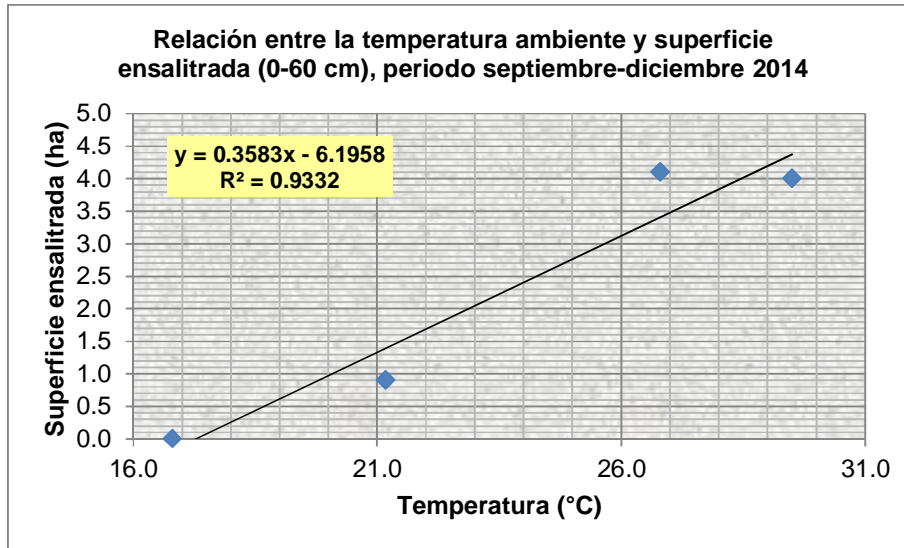


Ilustración 79. Relación entre la temperatura ambiente y la superficie ensaltrada en la parcela piloto, periodo septiembre-diciembre

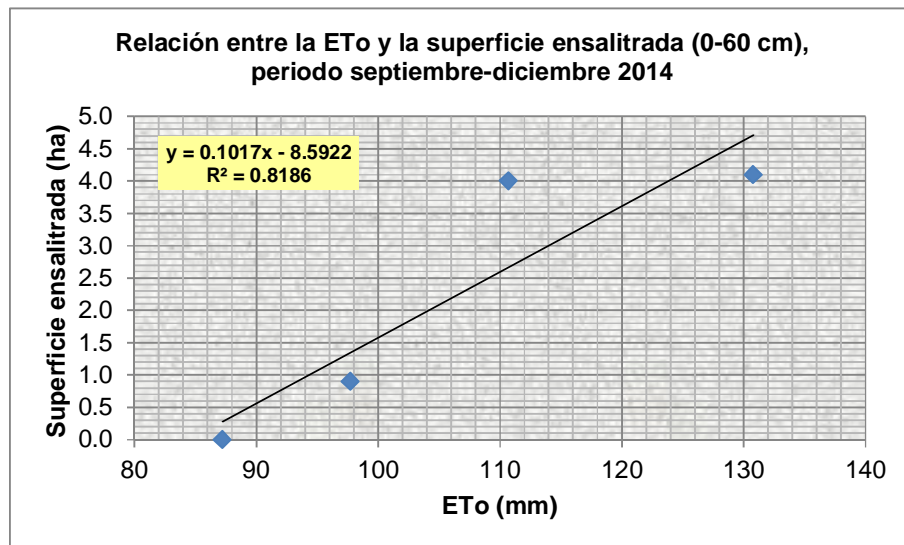


Ilustración 80. Relación entre la ETo y la superficie ensaltrada en la parcela piloto, periodo septiembre-diciembre

La proximidad del nivel freático a la superficie del suelo aumenta el contenido de sales del suelo. Entre enero y marzo, cuando los niveles freáticos son más someros, se obtuvo una alta correlación ($r^2=0.90$) (ilustración 81). Este resultado enseña que la parcela piloto está ensaltrada en gran medida por la proximidad del nivel freático en la superficie del suelo. Asimismo, se determinó que el incremento de la temperatura y de la evapotranspiración tienen influencia en el ascenso y descenso del nivel freático. Se calcularon coeficientes de determinación de 0.82 y 0.76 entre la profundidad al nivel freático y la temperatura y entre el nivel freático y la evapotranspiración, respectivamente, analizando datos del periodo marzo-mayo (ilustraciones 82 y 83).

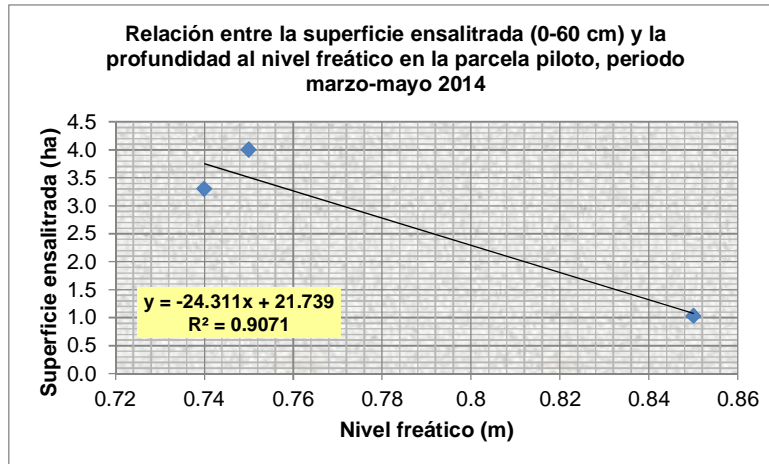


Ilustración 81. Relación entre la superficie ensaltrada y la profundidad al nivel freático en la parcela piloto, periodo marzo-mayo

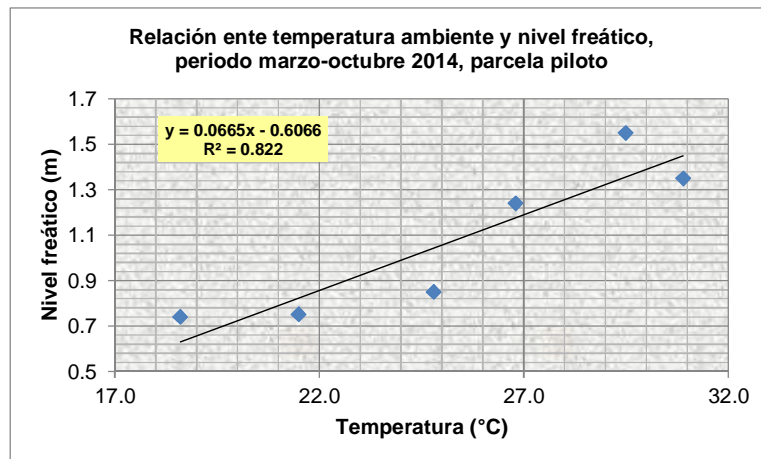


Ilustración 82. Relación entre la temperatura y el nivel freático en la parcela piloto

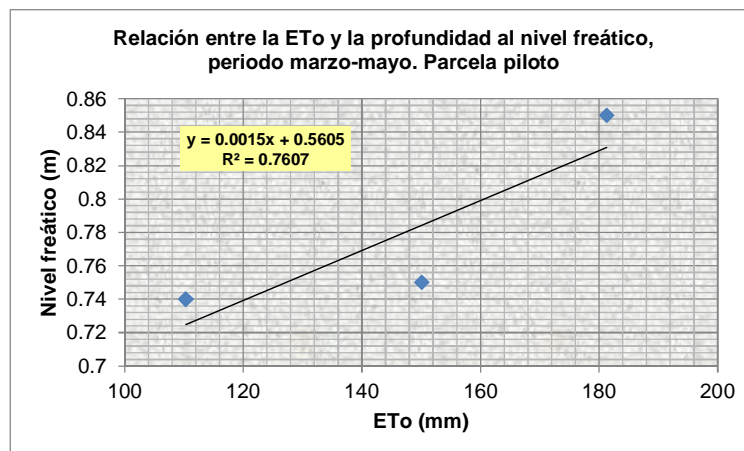


Ilustración 83. Relación entre la ETo y la profundidad al nivel freático, periodo enero-mayo

Los coeficientes de correlación obtenidos explican parcialmente el efecto individual de las variables analizadas, en el ensaltramiento del suelo. Cuando se analizó estadísticamente las variables temperature, nivel freático, evapotranspiración y precipitación pluvial como variables independientes y la superficie ensaltrada como variable dependiente, se generaron modelos estadísticos con coeficientes de determinación de uno. Por lo tanto, todas las variables referidas participan en el ensaltramiento del suelo (cuadro 3). El análisis se hizo por periodos de tiempo, en función de como se manifiestan estas variables. Entre octubre y diciembre la temperature y el nivel freático influyen fuertemente en la salinidad del suelo.

Cuadro 3. Modelos estadísticos que relacionan la salinidad del suelo con la temperatura (T), profundidad del nivel freático (MF), evapotranspiración (ETo) y precipitación pluvial (PP)

| Número del modelo | Estrato de suelo (cm) | Periodo de observación | Modelo estadístico | r ² |
|-------------------|-----------------------|------------------------|--|----------------|
| 1 | 0-60 | Marzo-septiembre 2014 | $CE^1 = 278.8114 - 131.2401 * T + 1569.9971 * MF + 9.0519 * Eto + 4.4415 * PP$ | 1 |
| 2 | 0-60 | Junio-diciembre | $CE = 0.6644 + 0.5739 * T - 6.6208 * MF - 0.0445 * Eto + 0.0440 * PP$ | 1 |
| 3 | 0-60 | Octubre-diciembre 2014 | $CE = -5.4074 + 0.4874 * T - 2.8670 * MF$ | 1 |

CE¹= superficie ensaltrada (ha), conductividad eléctrica > 4 dS/m; T= temperatura (°C); MF= profundidad al nivel freático (m); Eto= evapotranspiración de referencia (mm); PP= precipitación pluvial (mm); r²= coeficiente de determinación

CONCLUSIONES

- ❖ Se encontró consistencia con los resultados observados en 2012 y 2013, con relación a los parámetros que intervienen en el ensalitramiento del suelo, a saber: temperatura ambiente, nivel freático superficial, evapotranspiración, salinidad del agua de riego, precipitación pluvial y salinidad del agua freática.
- ❖ En tres años de observaciones mensuales de los parámetros señalados, se encontró que en el Módulo de Riego 05 la superficie afectada por sales ocupa el 97% de la superficie total hasta una profundidad de 1.5 m, por lo que este módulo es de los más afectados por sales en el Distrito de Riego 038 Río Mayo, Sonora.
- ❖ En 2014 se determinó una mayor superficie con suelos salinos que en 2012 y de suelos salino-sódicos que en 2013. En estos resultados contribuyeron las más altas temperaturas observadas en 2014 en comparación con 2012 y 2013, y las altas afectaciones por niveles freáticos que cubren el 64% del área del módulo de riego. La superficie ensalitrada está en un proceso de aumento que se relaciona con variables climáticas y agronómicas.
- ❖ Las afectaciones por salinidad más grandes se observan: entre febrero y marzo, coincidentes con la época de riegos en invierno, cuando los niveles freáticos están más superficiales; en verano, cuando las temperaturas alcanzan su valor más alto y en ausencia de cultivos; entre marzo y mayo, en la temporada de riegos, cuando las afectaciones por sales en el agua freática son más amplias; cuando se presentan las lluvias de verano; en invierno cuando se riega con agua con altos contenidos de sales; y cuando la evapotranspiración es mayor, lo cual acontece en verano. Hay consistencia con los resultados alcanzados en 2012 y 2013 en cuanto a que en verano se cuantifican las más altas afectaciones por sales.
- ❖ El análisis estadístico mediante regresiones lineales simples de la salinidad como variable dependiente y la temperatura, superficie afectada con niveles freáticos superficiales, evapotranspiración, precipitación pluvial, superficie con sales en el agua freática y salinidad del agua de riego como variables independientes, dio una alta correlación. Las altas temperaturas y las mayores afectaciones por niveles freáticos, tienen una clara influencia en el ensalitramiento del suelo. Los incrementos de volúmenes de riego se manifiestan en mayores superficies afectadas por niveles freáticos elevados; y los altos contenidos de sales del agua freática y del agua de riego contribuyen también en el ensalitramiento de los suelos. Es por ello importante solucionar los problemas de drenaje del módulo de riego y reducir el contenido de sales del agua de riego.
- ❖ Al analizar conjuntamente mediante regresiones lineales múltiples las variables salinidad como dependiente y como independientes las variables descritas, se elaboraron modelos de regresión lineal múltiple que tuvieron una correlación más alta que con el análisis de regresión lineal simple. Estos modelos pueden ser útiles para estimar la salinidad según las condiciones climatológicas y agronómicas que existan.
- ❖ 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 de los volúmenes de cosechas en el Módulo de Riego No. 5 y en el Distrito de Riego 038.

- ❖ A través del bombeo de agua de drenaje que está realizando el molino de viento, tanto de la parcela piloto como del área circundante que incluyen una superficie de 30.9 ha, su contenido de sales está disminuyendo; como resultado de que toda esta área está siendo drenada. Dicha disminución se está manifestando en que el 93% de los suelos de tercera y cuarta clases se convirtieron en suelos de segunda clase; y que los bajos contenidos de sales están incidiendo en el buen desarrollo del trigo sembrado entre noviembre y diciembre, tanto en la parcela piloto como en las demás parcelas que le rodean.
- ❖ Las afectaciones por salinidad en la parcela piloto tienen por origen las variaciones en: la temperatura ambiente, el nivel freático superficial, la evapotranspiración, precipitación pluvial, y salinidad del agua freática; de acuerdo con el análisis estadístico realizado mediante regresiones lineales simples y múltiples. En este análisis en el que la salinidad es la variable dependiente, los modelos elaborados tienen coeficientes de determinación de uno que explican la alta dependencia entre estas variables.
- ❖ Los niveles freáticos elevados que afectan en mayor grado a las partes bajas del Distrito de Riego 038 Río Mayo y Módulo de Riego 05, se podrían abatir mediante el drenaje parcelario subsuperficial y bombeo con energía eólica.

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.